

Optimisation de la forme des décanteurs lamellaires à flux croisés par la modélisation numérique 3D

■ J. VAZQUEZ¹, A. MORIN², M. DUFRESNE¹, J. WERTEL³

Mots-clés : modélisation 3D, CFD, modèle de turbulence, bassin de décantation, décanteurs lamellaires, optimisation de la géométrie

Keywords: 3D CFD, turbulence model, sedimentation tank, lamellar decanters, shape optimisation

Introduction

Les décanteurs lamellaires à flux croisés, décrits dans cet article, sont des ouvrages destinés au traitement des eaux de ruissellement polluées. Le principe du traitement est la séparation gravimétrique entre deux lames juxtaposées et inclinées par rapport au 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 vers le bas. Après avoir décanté, les eaux claires ressortent de l'autre côté de la structure lamellaire (figure 1). Ce type de décanteurs lamellaires se différencie des décanteurs lamellaires à contre-courant, dans lesquels l'effluent traverse la structure lamellaire verticalement de bas en haut. On admet que la profondeur requise pour construire un décanteur lamellaire à flux croisés est plus faible que celle d'un décanteur à contre-courant, ce qui conduit à réduire les coûts de construction. La structure lamellaire d'un décanteur à flux croisés est également plus simple à mettre en œuvre et sa maintenance est plus facile à effectuer parce qu'elle est posée sur deux murets et non accrochée en hauteur aux voiles du décanteur. Enfin, l'exploitant peut accéder aux lames à des fins de nettoyage, sur trois faces de la structure

lamellaire (de chaque côté et par le dessus depuis une galerie ou bien des trappes), alors qu'il ne peut nettoyer les lames d'un décanteur à contre-courant que par le dessus.

Depuis les années 1990, de nombreux articles [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. En dessous du seuil de 100 micromètres, on trouve environ 80 % de la masse des particules selon ces auteurs. Leur diamètre médian approche les 30 micromètres. Les vitesses de chute habituellement retenues pour le calcul du nombre de lames qui équipent les décanteurs sont très faibles. Il en résulte la mise en œuvre d'importantes surfaces de décantation pour séparer ces fines particules. Le calcul du nombre de lames conduit donc à des ouvrages de grandes dimensions et, par conséquent, la distribution équitable

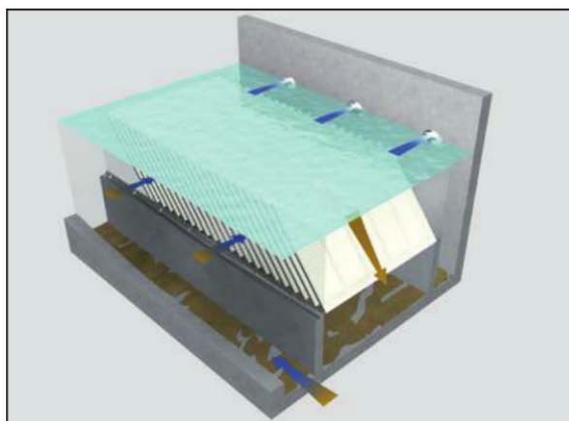


Figure 1. Décanteur lamellaire à flux croisés

¹ Institut de mécanique des fluides et des solides de Strasbourg – 2, rue Boussingault – 67000 Strasbourg. Courriel : jvazquez@engees.u-strasbg.fr

² Hydroconcept – ZA Trappes Élancourt – 46, avenue des Frères-Lumière – 78190 Trappes. Courriel : hydroemail@gmail.com

³ 3D Eau – 4, rue Boussingault – 67000 Strasbourg. Courriel : jonathan.wertel@3deau.fr

de l'eau dans la totalité de la structure lamellaire est plus difficile à réaliser. Mais lorsqu'on calcule le nombre de lames d'un décanteur lamellaire, on suppose toujours vraie l'hypothèse selon laquelle l'eau se répartit équitablement entre toutes les lames. L'équirépartition de l'eau est l'un des gages du bon fonctionnement d'un décanteur lamellaire. Cette problématique a été étudiée dans un décanteur lamellaire à contre-courant par MORIN et coll. [2009 et 2012], qui ont mis en évidence le rôle des dispositifs de reprise des eaux décantées pour obtenir des vitesses d'écoulement homogènes.

Cependant, le fonctionnement hydraulique des décanteurs à flux croisés reste peu étudié. Ce problème est d'ailleurs signalé par Chocat [CHOCAT, 1997], dans son ouvrage *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*, qui explique 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 est un outil particulièrement performant pour permettre la connaissance fine du champ des vitesses dans un ouvrage hydraulique. Les simulations faites avec l'outil informatique CFD (pour : *computational fluid dynamics*) ont été suffisamment vérifiées par des mesures expérimentales pour pouvoir être utilisées aujourd'hui dans le but d'optimiser la forme des ouvrages et atteindre un comportement hydraulique adéquat. Le code retenu pour cette étude est Fluent [FLUENT, 2001], déjà utilisé pour l'étude de déversoirs d'orage [LIPEME-KOUYI, 2005] et de bassins d'orage [STOVIN et SAUL, 1994; ADAMSSON et al., 2003; DUFRESNE et al., 2009].

L'objectif principal du travail présenté est d'optimiser le fonctionnement hydraulique tridimensionnel d'un décanteur lamellaire à flux croisés. Les critères principaux de conception de ce type d'ouvrage sont la bonne répartition des flux et la réduction des vitesses verticales du fluide. Si l'étude a abordé ces deux sujets, le présent article concerne principalement le premier point, le second n'est abordé qu'à travers la

considération d'un critère global. C'est pourquoi le critère d'optimisation choisi consiste à quantifier de quelle façon le débit se répartit dans la structure lamellaire afin de déterminer les conditions permettant d'obtenir une répartition homogène des effluents entre toutes 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 de huit décanteurs. Plus précisément, ce sont les caractéristiques géométriques des dispositifs d'alimentation des eaux brutes et de sortie des eaux décantées qui seront testées afin de satisfaire au mieux le critère d'optimisation précédemment défini.

1. Principe de modélisation et méthode 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 *Reynolds stress model* (RSM) [VERSTEEG et MALALASEKERA, 1995]. Les conditions aux limites sont du type Dirichlet (vitesse imposée) à l'entrée et du type Neumann (sortie de fluide à la pression atmosphérique) au niveau de la sortie. La surface dans notre ouvrage ne présente pas de difficulté en matière de localisation, cette condition aux limites a été représentée par un plan de symétrie.

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. Quant à leur forme, les mailles hexaédriques sont privilégiées. Cependant, dans le cas de géométries aux formes complexes, il n'est pas toujours possible d'utiliser de telles mailles. Des cellules tétraédriques peuvent alors être utilisées. C'est le cas dans le modèle présenté, pour les transitions de formes circulaires vers des formes angulaires, par exemple lorsque le tuyau

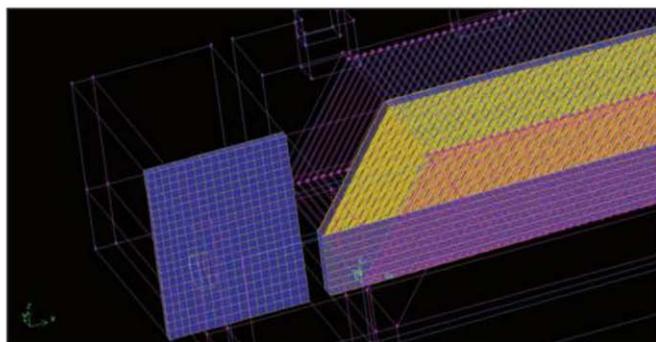


Figure 2. Maillage avec 1 500 000 mailles

d'entrée débouche dans une chambre rectangulaire (figure 2).

Pour obtenir des résultats de simulation corrects, le maillage doit être construit avec le plus grand soin. Le choix du nombre de mailles doit constituer un compromis entre le temps de calcul et la qualité des résultats. Plus le maillage est dense, plus les résultats sont précis, mais plus le temps de calcul est long. 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 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 particulière. Trois maillages ont été testés : 300 000 mailles, 700 000 mailles et 1 500 000 mailles (figure 2). Les résultats ont montré qu'un maillage à 700 000 mailles est performant tant du point de vue des résultats que du temps de calcul [VAZQUEZ *et al.*, 2009] en ce qui concerne l'étude de la répartition des flux. Ce dernier a donc été utilisé pour les différents

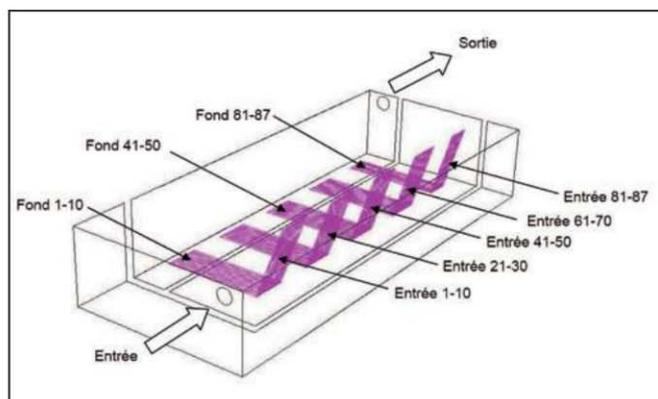


Figure 3. Division du bloc lamellaire en paquets de dix lames

calculs présentés dans cette communication. Suivant la configuration testée (figure 4), le maillage a été adapté à la géométrie, mais le nombre de mailles ne varie que localement et reste globalement voisin de 700 000.

À titre d'information, les calculs sont effectués en 14 heures environ sur des ordinateurs équipés de Pentium 4 ou équivalent. Le calcul est arrêté lorsque les critères de convergence sont satisfaits. Ces derniers sont obtenus lorsque l'écart des variables calculées au cours de deux itérations consécutives est inférieur à 10^{-4} . D'autres valeurs sont considérées, notamment le bilan de masse ou la faible fluctuation des débits entrée/sortie.

Afin de comparer les résultats des simulations entre elles, nous avons divisé la structure lamellaire en paquets de dix lames (figure 3). On dispose ainsi de neuf paquets de lames qui seront traversés par une fraction de l'effluent brut. Nous avons calculé le pourcentage du débit qui traverse chacun d'eux dans le sens horizontal d'une part, mais également dans le sens vertical afin d'apprécier l'importance de la circulation de l'eau sous les lames.

2. Caractéristiques du décanteur lamellaire à flux croisés

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 devant chaque lame représente 1,15 % du débit d'entrée ($88 \text{ L/s}/87 \text{ lames} = 1,0115$), soit respectivement 11,5 % pour un paquet de dix lames et 8,05 % pour les sept dernières lames. Les lames ont les dimensions suivantes : 3,20 m de largeur \times 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 qui sont parfois nervurées.

Protéger l'environnement et réduire notre consommation cela constitue pour les municipalités

- un potentiel **d'économie** financière
- la possibilité d'améliorer leur **rentabilité** économique

! Nous auditons **gratuitement**
! vos bâtiments municipaux

! **Chiffrage**

- ! - de l'investissement,
- ! - des économies,
- ! - de l'amortissement (de 1 à 3 ans)

CRÉATEUR DE SOLUTIONS HYDRO-ÉCONOMES



7B Boulevard Gustave Eiffel 21600 LONGVIC

www.eco-techniques.fr - tél : 03 80 52 99 75 - hamer@eco-techniques.fr

Nous avons retenu les caractéristiques géométriques et hydrauliques suivantes. Elles sont issues d'un ouvrage dont la planification a été faite par Hydro-concept mais qui n'a pas été réalisé :

- débit d'alimentation 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 (0,28 mm/s) : 1 m/h ;
- nombre de lames : 87 ;
- hauteur minimale sous lames : 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 sur un plan horizontal : 319 m² ;

- vitesse théorique moyenne d'écoulement entre les lames : 0,43 cm/s.

Dans les configurations couramment proposées par les industriels, on observe que les décanteurs lamellaires à flux croisés sont constitués d'un canal d'alimentation conduisant les effluents bruts vers le compartiment lamellaire. Les eaux décantées sont ensuite évacuées par un canal d'évacuation parfois muni de seuils de surverse. Ces configurations (avec ou sans seuils) sont représentées respectivement par les tests 1 et 2.

L'objectif de cette étude est d'aboutir à une configuration satisfaisante au regard de la répartition de l'eau dans les lames. Aussi, nous avons défini trois configurations de base qui correspondent aux trois premiers tests de la figure 4, que nous avons ensuite modifiées afin d'aboutir rapidement à une solution acceptable.

Huit configurations ont ainsi été testées (figure 4 et tableau I).

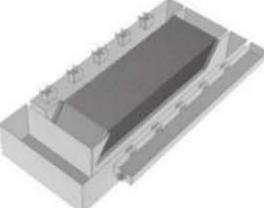
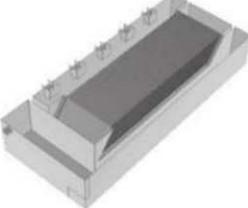
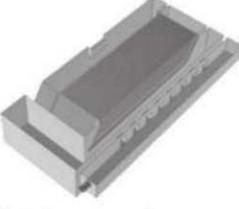
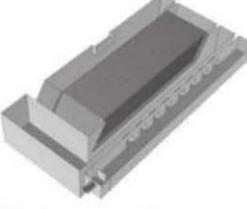
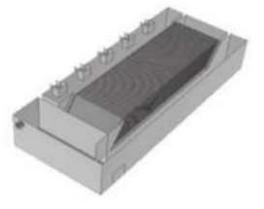
<p>TEST 1</p>  <p>Entrée directe sans canal d'alimentation et sans déversoir de sortie</p>	<p>TEST 2</p>  <p>Entrée directe sans canal d'alimentation et avec 5 déversoirs de sortie</p>	<p>TEST 3</p>  <p>Entrée avec canal d'alimentation percé de 5 baies, et sortie par 5 déversoirs</p>	<p>TEST 4</p>  <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 4. Ensemble des tests

Test	Entrée				Sortie		
	Directe	Indirecte	Via un canal d'alimentation	Défecteur	Simple	1 déversoir	5 déversoirs
1	✓				✓		
2	✓						✓
3			Avec 5 baies				✓
4		✓					✓
5			Avec 8 baies			✓	
6			Avec 8 baies	✓		✓	
7		✓		✓			✓
8			Voile siphonide et 8 seuils			✓	

Tableau I. Synthèse des configurations entrée/sortie testées

3. Les résultats

3.1. Tests 1-2 : comparaison de sorties (avec et sans déversoirs)

3.1.1. Description des configurations

Les tests 1 et 2, dont les configurations sont rappelées dans le *tableau II*, permettent de comparer deux modes d'évacuation de l'ouvrage : par une simple sortie ou cinq déversoirs.

3.1.2. Résultats

Les *figures 5* et *6* montrent les lignes de courants pour les tests 1 et 2. Ces lignes de courant sont colorées, comme pour les autres figures similaires, par la vitesse en m/s.

Les deux premiers tests montrent des débits négatifs à travers les 30 premières lames. Les débits négatifs traduisent un mouvement de recirculation de l'eau dans les lames à contresens. Ces recirculations engendrent une élévation du débit par rapport à la solution idéale pour les groupes de lames disposés à l'aval.

Pour ces deux tests, l'effluent brut pénètre dans le couloir d'alimentation avec une vitesse, en partie supérieure du couloir, de l'ordre de 0,5 m/s. Le flux

percuté 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 verticales à travers les lames du décanteur représentent au maximum 46,9 % du débit d'entrée pour le test 2.

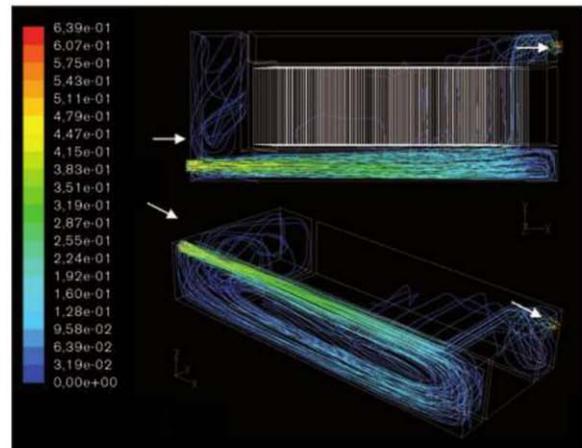


Figure 5. Lignes de courant pour le test 1 (m/s)

Test	Entrée				Sortie		
	Directe	Indirecte	Via un canal d'alimentation	Défecteur	Simple	1 déversoir	5 déversoirs
1	✓				✓		
2	✓						✓

Tableau II. Rappel des configurations entrée/sortie des tests 1 et 2



Drainfix® Clean

Caniveaux épuratoires
pour traitement des
eaux pluviales



**Le nouveau
caniveau HAURATON
assure le traitement
de l'eau de pluie polluée**

- voies de circulation
- parkings
- cours
- zones industrielles et commerciales
- routes à trafic intense

SOCIÉTÉ HAURATON FRANCE



10, rue Gay Lussac
BP 48089, Eckbolsheim
67038 Strasbourg Cedex 2
Tél. 03 88 77 34 35
Fax 03 88 77 33 35
www.hauraton.com

Basé sur le principe
de filtration par couche
(gâteau de filtration)

Grande capacité épuratoire

Réduction des particules > 90%

La grande surface de filtration
réduit fortement l'intervalle
de maintenance

Travaux d'entretien
simples et rapides

Circulable jusqu'à
la classe de charge F900

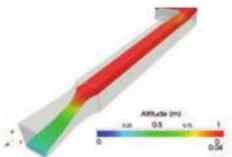
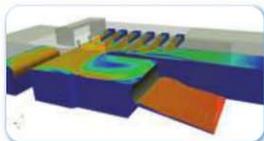
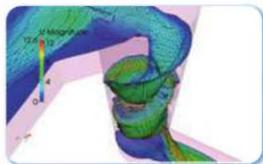
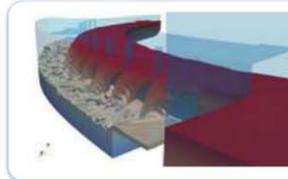


3D EAU

LA MODÉLISATION 3D AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT

3D EAU réunit des experts en hydraulique et mécanique des fluides pour répondre à vos besoins en :

- **Conception et diagnostic** des ouvrages hydrauliques (assainissement, eau potable, fluvial,...)
- **Élaboration de l'autosurveillance** en collecteur ou des ouvrages complexes (déversoirs, Venturi, trop-plein de poste de relevage ou de bassin...)
- **Design industriel**



+33 6 60 04 96 88
contact@3deau.fr
4 rue Boussingault, 67000 Strasbourg
3 rue des Camélias, 75014 Paris
www.3deau.fr

eau claire®

Équipements de pré-traitement

NOUVEAUTÉS



Dégrilleur continu
Inclinaison de 60 à 90°

Couvertures polyester DOMAFOS



Gamme d'équipements :

- * *Dégrilleurs verticaux, inclinés, courbes*
- * *Tamis rotatif, Tamis Trommel*
- * *Convoyage / compactage (à vis, à piston, tapis de convoyage)*
- * *Turbines fixes et flottantes*
- * *Traitement spécifique pour traitement matières de vidange, produits de curage, épaissement de boues*
- * *Ponts racleurs / dessableurs-dégraisseurs / Herses*
- * *Couvertures DOMAFOS et serrureries polyester*

Retrouvez-nous sur www.eau-claire.fr

Press for Less ...

Pollutec 2014
Hall 6, Allée A
Stand 132

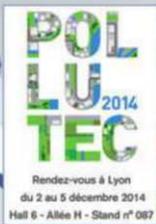


- Siccités élevées
- Réduction des coûts d'évacuation
- Fonctionnement automatique
- Besoins en main d'oeuvre et maintenance réduits

...with the Bucher sludge press!

BUCHER
unipektin

Bucher Unipektin AG
CH-8166 Niederweningen
Phone: +41 44 857 23 00 • Fax: +41 44 857 23 41
info@bucherunipektin.com • www.bucherunipektin.com



INSPIRING ANSWERS

Rendez-vous à Lyon
du 2 au 5 décembre 2014
Hall 6 - Allée H - Stand n° 087

“ Qui a dit qu'il fallait constamment garder un oeil sur plusieurs appareils de mesure pour garantir la qualité de l'eau ? „



Grâce à notre Système d'analyse en ligne de type 8905, ce n'est plus d'actualité ! Compact et modulaire, il répond à tous vos besoins en terme de surveillance de la qualité des eaux. Contrôler les paramètres sensibles en un seul coup d'oeil.

Bürkert, solutionneur en régulation des fluides.



bürkert
FLUID CONTROL SYSTEMS

www.burkert.fr

Test	Lames les plus sollicitées		Lames les moins sollicitées		Écart type du débit entre les lames	% de recirculation avec le fond
	Lames	% du débit amont	Lames	% du débit amont		
1	Entrée 81-87	58,30 %	Entrée 11-20	-10,11 %	20,55 %	16,0 %
2	Entrée 81-87	63,44 %	Entrée 1-10	-21,41 %	26,70 %	46,9 %

Tableau III. Synthèse des résultats des tests 1 et 2

Test	Entrée				Sortie		
	Directe	Indirecte	Via un canal d'alimentation	Défecteur	Simple	1 déversoir	5 déversoirs
2	✓						✓
3			Avec 5 baies				✓
4		✓					✓

Tableau IV. Rappel des configurations entrée/sortie des tests 3 et 4

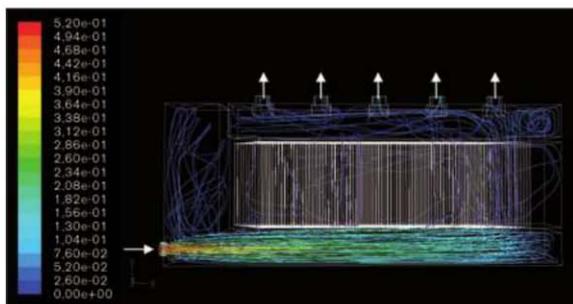


Figure 6. Lignes de courant pour le test 2 (m/s)

3.1.3. Conclusion sur la comparaison des sorties

L'ajout des déversoirs de sortie ne permet pas de réduire la recirculation dans le canal d'entrée et d'améliorer la répartition de l'eau dans les lames. Par ailleurs, pour le test 2, lorsque l'eau pénètre entre les lames, au mieux elle ressort de l'autre côté et, au pire, elle ressort sous les lames.

3.2. Tests 2-3-4 : comparaison d'entrées : directe/indirecte/canal d'alimentation

3.2.1. Description des configurations

Pour les tests 2, 3 et 4, dont les configurations sont rappelées dans le *tableau IV*, on compare essentiellement la forme du dispositif d'alimentation.

Dans le test 3 (*figure 7*), on cherche à diffuser le flux d'entrée *via* des baies d'alimentation.

Le test 4 (*figure 8*) a pour objectif de « casser » la vitesse en entrée afin de ralentir l'écoulement et d'homogénéiser la répartition du flux entre les lames.

La canalisation d'entrée a ainsi été décalée par rapport à l'axe du couloir d'alimentation (*figure 4*) pour que le flux vienne percuter le mur séparant la chambre d'alimentation du compartiment lamellaire.

3.2.2. Résultats

Pour les tests 3 et 4, on constate que la répartition des vitesses est plus homogène que précédemment (*tableau V*).

Pour le test 3 (*figure 7*), on remarque que les lames qui sont en face des baies d'entrée reçoivent davantage d'effluents que celles qui se trouvent placées entre deux baies. Cette observation est confirmée, dans la *figure 13*, par l'alternance de pourcentages négatifs et positifs. Quant aux recirculations verticales, elles représentent 33,1 % du débit d'entrée. Pour le test 4 (*figure 8*), on observe une nette amélioration de la répartition du débit entre les différentes lames. Les recirculations verticales ne représentent plus que 8,9 % du débit d'entrée.

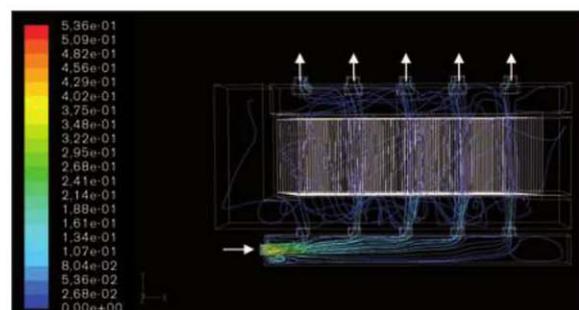


Figure 7. Lignes de courant pour le test 3 (m/s)

Test	Lames les plus sollicitées		Lames les moins sollicitées		Écart type du débit entre les lames	% de recirculation avec le fond
	Lames	% du débit amont	Lames	% du débit amont		
2	Entrée 81-87	63,44 %	Entrée 1-10	-21,41 %	26,70 %	46,9 %
3	Entrée 41-50	32,90 %	Entrée 1-10	-16,91 %	19,32 %	33,1 %
4	Entrée 71-80	24,17 %	Entrée 1-10	-8,93 %	10,20 %	8,9 %

Tableau V. Synthèse des résultats des tests 2, 3 et 4

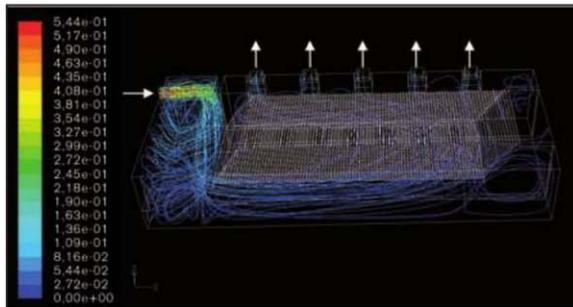


Figure 8. Lignes de courant pour le test 4 (m/s)

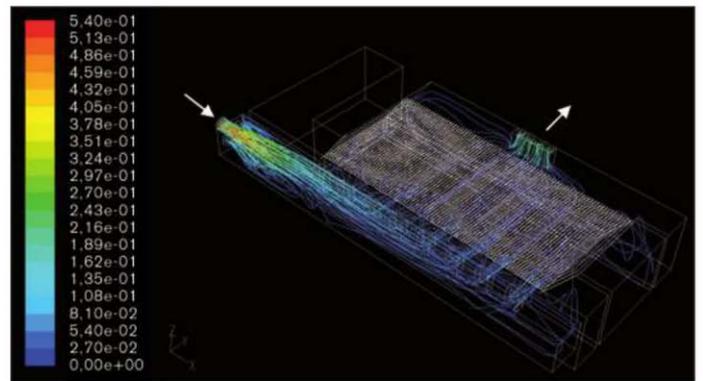


Figure 9. Lignes de courant pour le test 5 (m/s)

3.2.3. Conclusion sur la comparaison des entrées

L'aménagement de l'entrée est une bonne piste pour uniformiser les flux. Le test 4 est plus performant que le test 3. La tranquillisation du flux en entrée permet une meilleure répartition des débits sur les différentes lames.

3.3. Tests 4-7/5-6 : impact de la mise en place d'un déflecteur

3.3.1. Description des configurations

Les configurations des tests 4 à 7 sont rappelées dans le tableau VI.

Le test 5 (figure 9) cherche à améliorer le test 3 en ajoutant trois baies supplémentaires dans le couloir d'entrée. On dispose ainsi de huit baies d'entrée. Les déversoirs de sortie ne permettant pas d'améliorer la répartition homogène des débits dans les lames

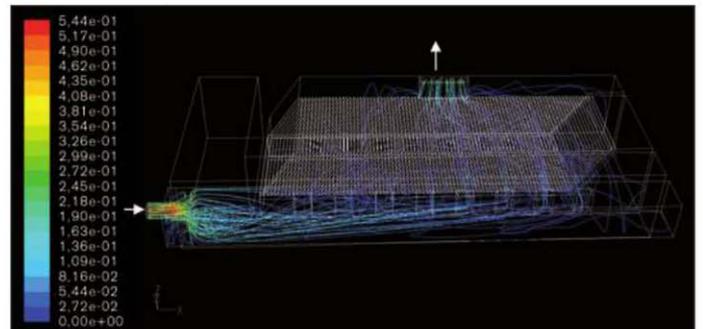


Figure 10. Lignes de courant pour le test 6 (m/s)

puisque l'effluent est canalisé par celles-ci (figure 5 du test 1 et figure 6 du test 2), il a donc été décidé de ne disposer qu'un seul déversoir de surverse plus large en sortie.

Le test 6 (figure 10) reprend la géométrie du test 5 en y ajoutant un déflecteur en tête pour « casser » les

Test	Entrée				Sortie		
	Directe	Indirecte	Via un canal d'alimentation	Déflecteur	Simple	1 déversoir	5 déversoirs
4		✓					✓
5			Avec 8 baies			✓	
6			Avec 8 baies	✓		✓	
7		✓		✓			✓

Tableau VI. Rappel des configurations entrée/sortie des tests 4 à 7



Gamme de produits Télérèlève AMR ...

- Emetteur Wireless M-Bus Eau / Gaz / Electricité / Energie thermique
 - Répéteur Wireless M-Bus
 - Sonde de Température d'Ambiance Wireless M-Bus
 - Récepteur Wireless M-Bus
 - Dongle USB Wireless M-Bus AMR
 - Passerelle Wireless M-Bus / GPRS
 - Répartiteur de frais de chauffage Wireless M-Bus
- ... pour créer un écosystème indépendant.

5^e forum national sur la gestion durable des eaux pluviales

Dates à retenir !

18 et 19 MARS 2015 - DOUAI

Au programme : des exposés, des retours d'expériences, un salon professionnel, des visites de sites...

Focus : Financement du pluvial, biodiversité en ville, zonage pluvial

3 raisons pour avoir recours à une **gestion durable et intégrée des eaux pluviales** et contacter **L'ADOPTA**

- **Limiter les déversements au milieu naturel** (bientôt pas plus de 20 déversements par an sur chaque déversoir d'orage !)
- **Réduire les rejets d'eaux pluviales** dans les réseaux d'assainissement
- **Développer la biodiversité en ville** et atténuer les phénomènes d'îlots de chaleur urbains

L'ADOPTA vous accompagne dans vos démarches ou projets en faveur d'une gestion durable et intégrée des eaux pluviales (mise en place d'une nouvelle politique, sensibilisation auprès du public...).

Ses outils :

- des fiches de vulgarisation et des vidéos,
- des visites de sites,
- un showroom,
- un site Internet www.adopta.fr
- des sessions de formation adaptées à la demande,
- des conférences, colloques...
- de la recherche et du développement (études sur la bouche d'injection, création de protocoles de réception des techniques alternatives, SIG...)
- **et surtout :**
plus de 17 années d'expériences



Conférences / Débats



Protocoles de réception des techniques alternatives



Journées de sensibilisation en partenariat avec l'Agence de l'Eau Artois Picardie

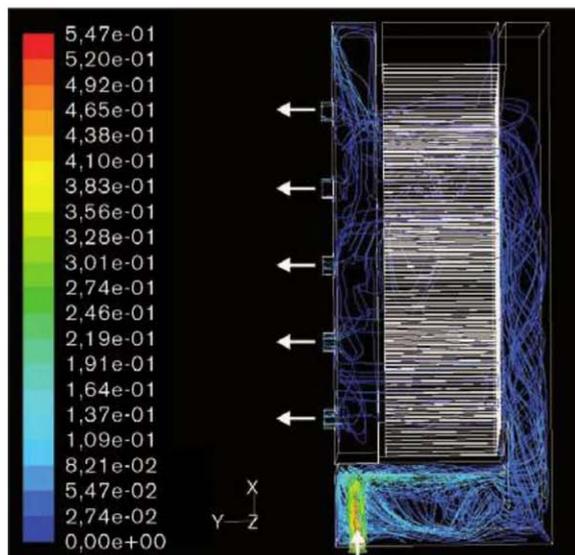


Figure 11. Lignes de courant pour le test 7 (m/s)

vitesses en entrée. Le test 7 (figure 11) reprend la configuration du test 4, c'est-à-dire avec une conduite d'alimentation décalée, mais en ajoutant une paroi déflectrice entre la chambre d'alimentation et le couloir d'amenée des effluents bruts.

3.3.2. Résultats

On remarque que la répartition obtenue pour la géométrie du test 5, qui n'est pas encore suffisamment homogène, s'améliore par rapport aux tests 1 et 2 (tableau VII). Les recirculations verticales représentent 24,9 % du débit d'entrée. Elles sont meilleures que dans le cas du test 3.

Le test 6 permet une légère amélioration par rapport au test 5. En effet, la valeur maximale de débit dans les lames passe de 26,1 % à 21,9 % (entrée 71-80, figure 13 et tableau VI). Les recirculations verticales représentent 15,5 % du débit d'entrée.

En comparant les tests 7 et 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 dix lames.

3.3.3. Conclusion sur la mise en place d'un déflecteur

La mise en place du déflecteur, dans les deux cas (tests 6 et 7), permet la réduction des vitesses et l'amélioration de la répartition du débit dans les lames.

3.4. Tests 5-8 : impact du voile siphonide

3.4.1. Description des configurations

Le test 8 (figure 12) reprend le principe de la géométrie du test 5 mais en ajoutant d'abord un voile (ou cloison) siphonide latéral entre la chambre d'alimentation et le couloir d'amenée des eaux brutes. On dispose aussi des seuils au lieu de baies à l'entrée du compartiment lamellaire. Enfin, on ajoute des manchettes siphonides derrière les huit seuils, il s'agit de parois disposées en travers de l'écoulement pour briser le déversement. L'objectif étant de dissiper au

Test	Lames les plus sollicitées		Lames les moins sollicitées		Écart type du débit entre les lames	% de recirculation avec le fond
	Lames	% du débit amont	Lames	% du débit amont		
4	Entrée 71-80	24,17 %	Entrée 1-10	-8,93 %	10,20 %	8,9 %
5	Entrée 71-80	26,15 %	Entrée 1-10	-13,72 %	14,59 %	24,9 %
6	Entrée 71-80	21,92 %	Entrée 1-10	-13,44 %	11,66 %	15,5 %
7	Entrée 81-87	21,02 %	Entrée 21-30	4,57 %	6,12 %	14,5 %

Tableau VII. Synthèse des résultats des tests 4 à 7

Test	Entrée				Sortie		
	Directe	Indirecte	Via un canal d'alimentation	Déflecteur	Simple	1 déversoir	5 déversoirs
5			Avec 8 baies			✓	
8			Voile siphonide et 8 seuils			✓	

Tableau VIII. Rappel des configurations entrée/sortie des tests 5 et 8

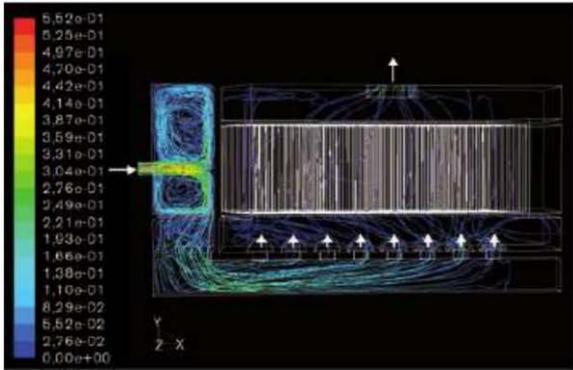


Figure 12. Lignes de courant pour le test 8 (m/s)

maximum l'énergie des effluents lorsqu'ils passent d'un compartiment à un autre.

Les configurations des tests 5 et 8 sont rappelées dans le *tableau VIII*.

3.4.2. Résultats

Concernant le test 8 (*figure 12*), la répartition des débits d'entrée est encore améliorée par rapport à celle obtenue pour le test 5 comme le montre le *tableau IX*.

3.4.3. Conclusion sur la mise en place d'un voile siphonoïde

Ce dernier test démontre l'utilité des manchettes siphonoïdes pour améliorer la répartition de l'eau brute dans les lames. Il est le plus performant en matière de débit homogène sur l'ensemble des lames. Il présente également l'avantage de séparer les matériaux des plus grossiers aux plus fins, dans l'enchaînement de cloisons, lors du cheminement de l'eau dans les différents compartiments du décanteur.

3.5. Synthèse des résultats

Les *figures 13* et *14* montrent respectivement l'évolution du débit d'entrée dans chaque groupe de lames et l'écart type des répartitions (exprimé en pourcentage du débit amont) pour chaque test. Les huit tests réalisés y sont représentés.

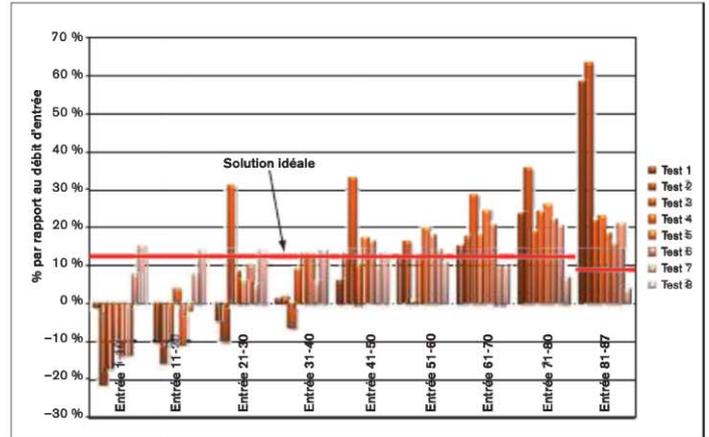


Figure 13. Évolution des débits d'entrée pour l'ensemble des cas

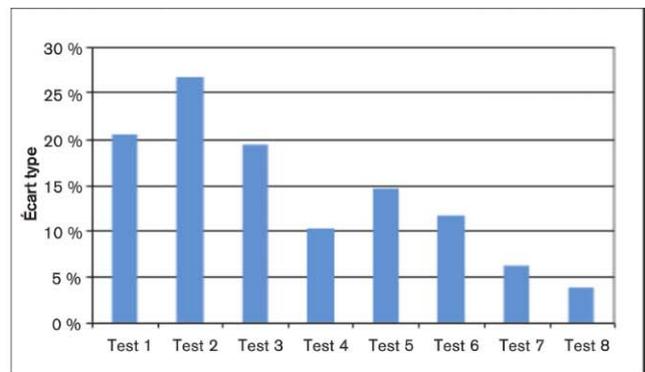


Figure 14. Évolution de l'écart type des répartitions (exprimé en pourcentage du débit amont) pour chaque cas

La *figure 15* représente le pourcentage de recirculation verticale avec le fond en fonction des différents tests. On remarque que le test 8 n'est pas le plus performant, toutefois la variation est faible par rapport au test 4.

On y observe que la première piste d'optimisation d'un décanteur est bien la dissipation de l'énergie de l'effluent en entrée. Sans un ouvrage de tranquillisation conçu afin de dissiper l'énergie à l'entrée du décanteur, seules les dernières lames sont réellement sollicitées et le taux de recirculation avec le fond est élevé.

Test	Lames les plus sollicitées		Lames les moins sollicitées		Écart type du débit entre les lames	% de recirculation avec le fond
	Lames	% du débit amont	Lames	% du débit amont		
5	Entrée 71-80	26,15 %	Entrée 1-10	-13,72 %	14,59 %	24,9%
8	Entrée 1-80	15,08 %	Entrée 81-87	3,73 %	3,82 %	18,0 %

Tableau IX. Synthèse des résultats des tests 5 et 8

La gestion active de la qualité des eaux de baignade avec XplOrer64™

Une méthode rapide et simple pour la quantification des *E. coli* et des entérocoques intestinaux.

La gestion active : un enjeu de santé publique et d'attrait touristique

La gestion active des eaux de baignade consiste à réaliser des analyses à réponse rapide sur des échantillons prélevés dans la masse d'eau, afin de pouvoir réagir au plus vite pour avertir et éviter une éventuelle contamination du baigneur. Cela permet de quantifier rapidement les deux indicateurs bactériologiques de contamination fécale que la réglementation Européenne impose de rechercher, à savoir les *Escherichia coli* et les entérocoques intestinaux. Les vecteurs de ces bactéries traçant une contamination fécale par des germes pathogènes qu'ils représentent, sont multiples. Naturellement présents dans la flore intestinale humaine et animale, une contamination de l'eau se fait essentiellement via la voie environnementale (rejets de station d'épuration, d'effluents d'élevage, lessivages de sols d'élevages contaminés...).

La directive 2006/7/CE concernant la gestion de la qualité des eaux de baignade et transcrit en droit français par le décret 2008-990 du 18/9/2008. Elle impose aux maires, aux collectivités locales et aux personnes responsables d'un site d'eaux de baignade (PREB) d'interdire ou de limiter la baignade en cas de pollution bactériologique et de prendre les mesures d'information du public appropriées. La fréquence des prélèvements obligatoires (au minimum 4 fois par plage et par saison) n'offre pas la possibilité de connaître au jour le jour la qualité d'une eau de baignade et d'identifier précisément les facteurs de contamination. Ces informations sont pourtant indispensables pour déterminer les actions conduisant à une amélioration de la qualité des eaux et la stratégie de surveillance à mettre en place.

Une gestion active efficace permet à la fois de gérer le risque de contamination du baigneur, d'identifier et de hiérarchiser les lieux et les sources de pollution recensées lors de la réalisation du « profil de vulnérabilité » du lieu de baignade. En plus d'être un enjeu de santé publique, il s'agit aussi d'assurer l'attrait touristique. Permettre de réduire le risque pour un baigneur de contracter une maladie ORL, digestive ou respiratoire est un argument enga-

geant, pour un public de plus en plus exigeant en matière de Santé Publique.

XplOrer64 de Bio-Rad : solution simple et automatique pour la gestion active des eaux de baignade

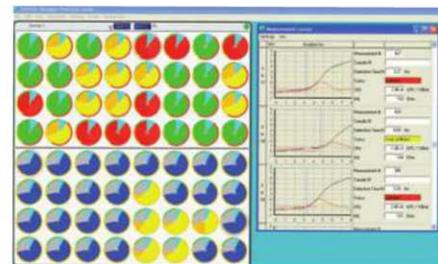
Aussi, pour répondre au besoin d'accompagnement des responsables de baignade dans une gestion active et dans une gestion des situations de crise, Bio-Rad propose depuis 2009 une méthode fiable, compacte et alternative à la méthode des microplaques, le Système XplOrer64. Facilement implantable dans un faible espace et bénéficiant d'une mise en œuvre simple, elle s'utilise avec la gamme de réactifs CheckN'Safe™ qui permet de quantifier les *Escherichia coli* en quelques dizaines de minutes à 9 heures et les entérocoques intestinaux en quelques dizaines de minutes à 13.5 heures, selon les niveaux de contamination de l'eau, sans étape de confirmation.

En complément de la méthode analytique réglementaire normalisée en microplaques MUG/MUD qui permet l'obtention d'un résultat en 2 à 3 jours, la méthode XplOrer64 permet ainsi de connaître dans la journée si la qualité de l'eau est bonne pour une baignade en toute sécurité, ou si la plage doit être temporairement fermée. Elle permet également de décider d'une réouverture rapide d'une plage à la suite d'une pollution de courte durée (éliminée par les vents, les courants, les marées...) ou encore de démontrer l'absence d'impact d'un événement accidentel. Complémentaire aux analyses réglementaires de classement assurées par les Agences Régionales de la Santé (ARS), la méthode XplOrer64 constitue un excellent outil pour décider des actions immédiates à mener sur les zones de baignade.

La fiabilité de la méthode XplOrer64 a été prouvée en 2009 par une première étape de validation menée par un laboratoire expert : l'Institut Pasteur de Lille (étude préliminaire). Suivie d'une étude collaborative (essais inter-laboratoires) menés par 12 laboratoires ayant permis d'en valider son profil d'exactitude par rapport aux microplaques, la méthode a été reconnue comme la première méthode alternative validée AFNOR.



Système XplOrer64™



Logiciel XplOrer : lecture et interprétation simple

Sans cesse optimisée et largement utilisée pour le contrôle en France et à l'étranger des eaux de baignade (plus de 10 000 analyses par saison balnéaire), la méthode XplOrer64 se place comme la première méthode alternative officielle et rapide de contrôle des eaux de baignade, permettant un dénombrement fiable des *E. coli* et des entérocoques intestinaux en quelques heures, compatible avec une gestion active.

Comme l'évoque Pascal Kohaut, Référent Baignade du groupe Saur :

« La simplicité, la rapidité et la fiabilité sont les points-clés du choix de cette méthode par Saur. Nous avons avec notre Recherche et Développement, entre autre, contribué à l'inter-calibration de la méthode avec 3 de nos 11 laboratoires d'analyses rapides en France et nous l'utilisons depuis 2009. Plusieurs sites de baignade sont surveillés par cette technologie pour la gestion active des baignades en eau douce et eau de mer. Parmi les précurseurs dont nous nous félicitons d'être partenaire, nous pouvons citer les stations balnéaires d'excellence de : Carnac (56), Evian-les-Bains (74), Bénodet (29), Arzon (CCP Rhuys - 56),... »

Devant le succès commercial de cette méthode depuis 2009, Bio-Rad a étendu dès 2011 les applications de l'XplOrer64 aux contrôles des eaux de STEP et des eaux usées.

Cette extension représente un avantage certain pour la réalisation des analyses exploratoires destinées à l'établissement du profil de vulnérabilité ; analyses permettant la réduction des SPC Sources Potentielles de Contamination.

Présent historiquement dans le domaine de l'analyse des eaux Bio-Rad propose, en plus des microplaques MUG/MUD, une gamme de milieux chromogéniques validés qui permettent la détection et le dénombrement des *E.coli*/Coliformes et de *Pseudomonas aeruginosa* en 24h sans confirmation. Bio-Rad propose ainsi une offre globale pour l'analyse des eaux.

Frédéric Pastori, Chef de Produit International
email: frederic.pastori@bio-rad.com



Deux exemples de gestion par Saur des baignades des Communes de Carnac (56) (eau de mer) et d'Evian-les-Bains (74) (eau douce : lac Léman)



PIRANHA

DRONE SOUS-MARIN D'OBSERVATION

Domaines d'application

- Canaux et écluses,
- Aquaculture,
- Cartographie de fonds côtiers,
- Sécurité civile et militaire,
- Recherche en mer,
- Structures immergées (centrales électriques, parcs éoliens),
- Protection de l'environnement.

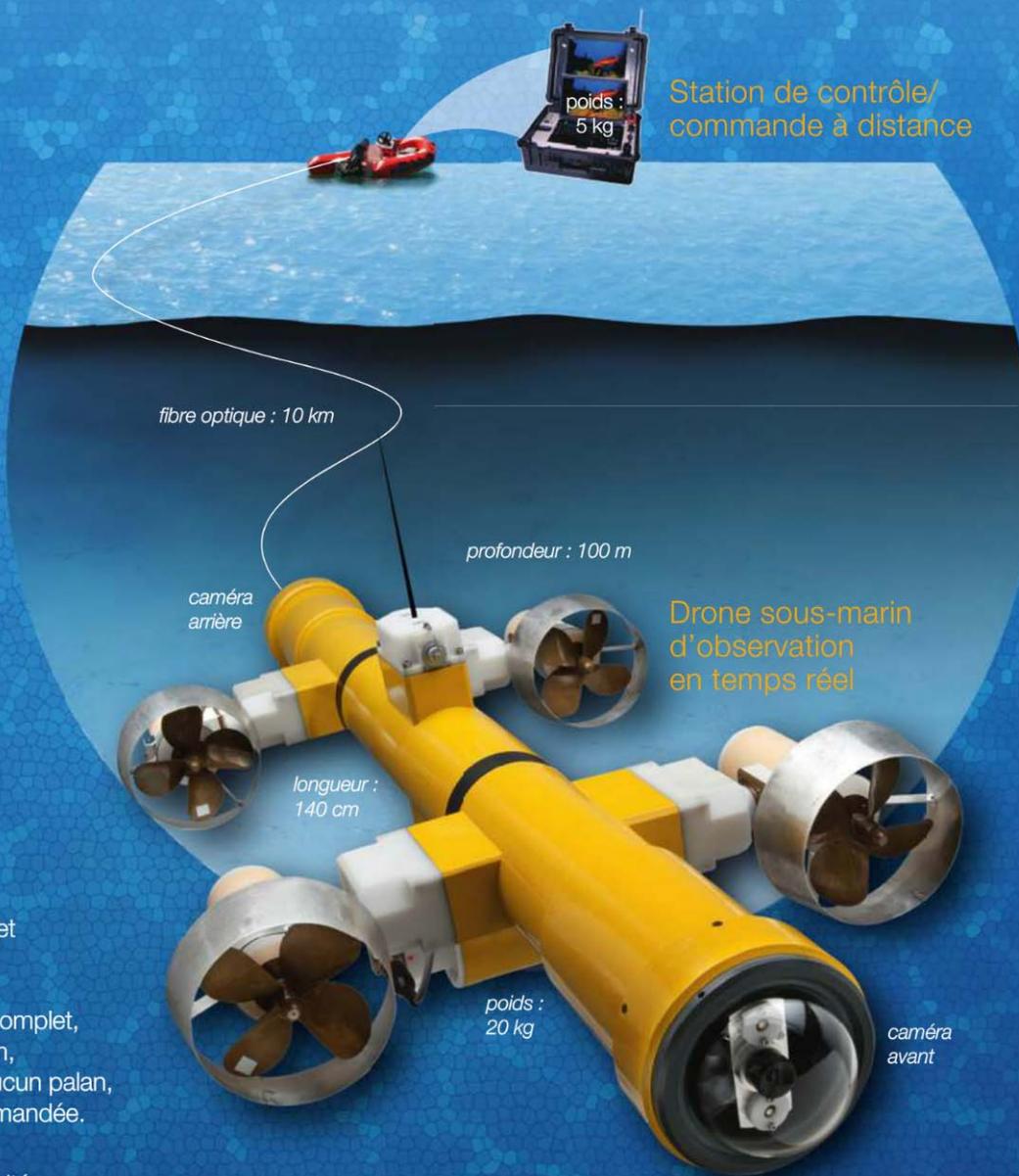
Avantages / bénéfices

Il est...

- simple : absence de gouverne et de ballast,
- portable : le drone (20 kg), la station de contrôle/commande (5kg),
- maniable : assiette horizontale et selon 3 axes,
- autonome : plus de 2 heures d'autonomie pour le système complet,
- à longue portée : jusqu'à 10 km,
- d'une mise en œuvre aisée : aucun palan,
- sécurisé : retour radio télécommandée.

Il permet...

- des missions flexibles : modularité d'installation des capteurs embarqués,
- l'exploitation d'images en temps réel de qualité,
- des surveillances régulières,
- des surveillances précises.



PETIT DRONE POUR GRANDES MISSIONS

Le drone PIRANHA est un compromis judicieux pour explorer, préalablement à des plongeurs, les milieux subaquatiques difficiles d'accès, éloignés, protégés, hostiles ou dangereux.

Par sa légèreté, son faible encombrement, sa bobine de fibre optique embarquée le drone PIRANHA se met en œuvre aisément et sans palan à partir d'une embarcation légère.

En plus d'être rapidement opérationnel, son pilotage, d'une déconcertante facilité pour un non initié, permet d'assurer de nombreuses missions d'observation, de surveillance ou d'examen approfondi d'éléments immergés ou sensibles sur tout type de site.

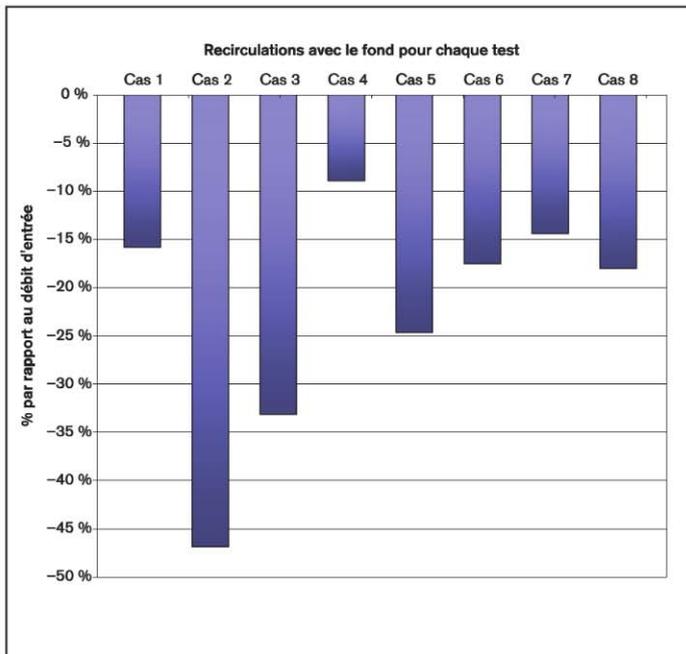


Figure 15. Pourcentage de recirculation avec le fond

Pour opérer cette tranquillisation du flux en entrée, deux solutions se démarquent :

- la mise en place d'une alimentation indirecte (test 4 : canalisation d'entrée décalée par rapport à l'axe du couloir d'alimentation) ;
- la mise en place d'un voile siphonoïde (test 8).

Le test 4 présente une moins bonne homogénéité de la répartition des flux, bien qu'acceptable, mais une plus faible recirculation verticale avec le fond, ce qui est un paramètre essentiel vis-à-vis de la dépollution. Cela montre l'intérêt de définir clairement les critères de dimensionnement et d'optimisation des décanteurs lamellaires, une fois que la répartition des flux entre les lames est correcte, il est nécessaire de privilégier la minimisation de la vitesse verticale de liquide et donc le test 4.

Conclusion

L'objectif de cette étude a été de simuler l'écoulement dans un décanteur lamellaire à flux croisés. Huit configurations ont été testées. Les différences ont porté sur les modalités d'alimentation des eaux brutes et de reprise des eaux traitées. Nous avons pu montrer l'intérêt de la modélisation tridimensionnelle en matière 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 sont beaucoup plus importantes 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 les modèles testés, nous avons obtenu un prototype de décanteur lamellaire permettant d'homogénéiser au maximum la vitesse à travers les lames. À noter toutefois l'importance des volumes « morts » des différents compartiments des ouvrages testés, qui permettent de dissiper l'énergie et ont une influence sur leur fonctionnement hydraulique.

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 des cloisons. 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 vérifier la relative inertie hydrodynamique de cette partie de l'ouvrage.

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. La modélisation numérique permet donc de donner à l'investisseur une garantie de fonctionnement hydraulique et donc de traitement, préalablement à la réalisation d'un ouvrage. Cette démarche, anticipant l'exécution, pourra être complétée, après réalisation, par une campagne de mesure en entrée et en sortie sur de longues séries d'épisodes pluvieux, pour valider le bon fonctionnement de l'ouvrage.

On évoquera enfin l'intérêt de modéliser finement l'interaction fluide/particule/paroi au niveau, notam-

ment, d'une lame du décanteur. Cela nécessiterait de « zoomer » sur ce système en modélisant, par exemple, deux ou trois lames seulement par la CFD. Le maillage serait alors beaucoup plus dense au niveau des parois, ce qui permettrait la mise œuvre de modèle « bas Reynolds » reproduisant l'écoulement en proche paroi de manière plus réaliste que

les lois de parois utilisées par défaut par Fluent. Les vitesses verticales au voisinage des lames seraient mieux évaluées. Les résultats de ce modèle seraient couplés avec ceux du modèle faisant l'objet du présent article et permettraient ainsi de prédire de manière plus fine la répartition des flux et l'efficacité de l'ouvrage.

Bibliographie

ADAMSSON Å., STOVIN V.R., SAUL A.J. (2003) : « Bed shear stress boundary condition for storage tank sedimentation ». *J. Environ. Eng.* ; 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.

CHEBBO G. (1992) : *Solides des rejets urbains par temps de pluie : caractérisation et traitabilité*. Thèse, École nationale des ponts et chaussées, Paris, France.

CHOCAT B. (ed.) (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 : 1042-1049.

FLUENT (2001) : *Fluent 6.0 software User's Guide*. Fluent Inc., Lebanon, New Hampshire, États-Unis.

LIPEME-KOUYI G. (2005) : *Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage*. Thèse, université Louis Pasteur, Strasbourg.

MORIN A., MILISIC V., FIGUE J.-F., AIRES N. (2009) : « Simulations numériques des écoulements dans un décanteur lamellaire à contre-courant ». *TSM* ; 11 : 59-73.

MORIN A., MILISIC V., FIGUE J.-F. (2012) : « Simulations numériques de champs de concentrations de particules dans un décanteur lamellaire à contre-courant ». *TSM* ; 9 : 25-36.

STOVIN V.R., SAUL A.J. (1994) : « Sedimentation in storage tank structures ». *Wat. Sci. Tech.* ; 29 (1-2) : 363-372.

VAZQUEZ J., MORIN A., WERTEL J., DUFRESNE M. (2009) : *Optimisation hydrodynamique des décanteurs lamellaires à flux croisés*, Rapport de contrat pour la société Hydroconcept.

VERSTEEG H.K., MALALASEKERA W. (1995) : *An introduction to computational fluid dynamics*. Pearson, Prentice Hall.

Résumé

J. VAZQUEZ, A. MORIN, M. DUFRESNE, J. WERTEL

Optimisation de la forme des décanteurs lamellaires à flux croisés par la modélisation numérique 3D

L'objectif de cette étude est l'optimisation du fonctionnement hydraulique tridimensionnel d'un décanteur lamellaire à flux croisés. Le critère d'optimisation choisi est l'équirépartition hydraulique du débit entre les lames. La modélisation 3D complète de l'ouvrage permet de montrer la répartition des vitesses, la localisation des zones de recirculation et les chemins préférentiels d'écoulement à l'amont, à l'aval et entre les lames du décanteur. Concrètement, ce sont les modalités géométriques d'alimentation et de sortie qui sont testées afin de satisfaire au mieux le critère d'optimisation précédemment défini. La modélisation hydraulique des formes de l'ouvrage a montré que la tranquillisa-

tion et la répartition des flux sont beaucoup plus importantes 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 n'atteint pas 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 les géométries testées, nous avons obtenu un prototype de décanteur lamellaire permettant d'homogénéiser au maximum la vitesse de l'eau à travers les lames.

Abstract

J. VAZQUEZ, A. MORIN, M. DUFRESNE, J. WERTEL

Shape optimisation of lamellar decanters using 3D CFD modelling

The aim of this paper is the optimization of a cross-flow lamellar decanter tridimensional hydraulic running. The more homogenous flow distribution among the lamella is the chosen optimization criteria. 3D modeling of the whole structure makes it possible to obtain the velocity distribution, the location of the recirculation and turbulence zones, the preferential flow path from upstream to downstream and between the lamella of the decanter. More precisely, several income and outcome shapes have been tested to satisfy the opti-

mization criteria. It is found that tranquilization and flux distribution mainly takes place in upstream zone. Without any modification, a great percentage of the flow rate (80%) goes into 20% of the lamella. This is poor distribution, since the active settling surface is small, the decanter cannot be efficient. Zigzags, siphons and walls installing make it possible to decrease the velocity of upstream lamella flow. Successive models have been studied, the present one allows the velocity among the lamella to be homogenized quite well.

PERAX
TÉLÉGESTION



Plus de 30 ans d'expérience dans la
Télégestion
des réseaux d'eau

PERAX réalise les solutions sur mesure et les services adaptés pour la télégestion de vos réseaux d'eau potable et d'assainissement..



18 Chemin de la Violette
31240 L'UNION - France

T. 05 62 75 95 75

www.perax.com
perax@perax.com

AQUALABO
GROUP

AQUALYSE
LABORATOIRE

PERAX
TÉLÉGESTION

PONSEL
MESURE

ORCHIDIS
LABORATOIRE