

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Constantine 3
Faculté de Génie des Procédés Pharmaceutiques
Département de Génie de l'Environnement

N° d'ordre : .../.../2014

N° de Série : .../GC /2014



MÉMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de Magistère en Génie des procédés
**OPTION : « Génie des procédés appliqués à la résolution des
problèmes de l'environnement »**

Intitulé

APPLICATION DE LA CFD A LA SIMULATION D'UN REACTEUR BIOLOGIQUE

Par

BENSOUCI FATIMA-ZOHRA

JURY :

Président:	M ^r CHIKHI Mustapha	M.C.A.	Université Constantine 3
Rapporteur:	M ^r BOUDEBOUS Saadoun	Prof.	Université Constantine 3
Examineur:	M ^r KHOLAI Omar	Prof	Université Constantine 1
Examineur:	M ^r DERBEL Keroum	M.C.A.	Ecole Nationale Polytechnique Constantine3

.....2014

ABSTRACT

In urban wastewater treatment, the main process to treat nitrogen and organic components of wastewater is the activated sludge one. Oxidation reactors are the most important equipments in this system. Wastewater treatment quality and energy cost are strongly linked with their behavior.

A deep understanding of their hydrodynamics is therefore useful to optimize their design and guaranty a reliable and efficient treatment in such installations .Our study deals with the use of the CFD software FLUENT for flow predictions in aeration tanks. This code uses the finite volume method for the discretization of the Navier-stokes equations in turbulent flow. Standard k- ϵ model is chosen.

A steady-state is performed because steady-state simulation greatly reduces the complexity and Computer time and demonstrates the main features of the system.

First, in order to validate the model, experimental data of the water velocity from the bibliography are compared with simulated results in the case where there is no aeration. A good agreement is found.

Then varying height of roughness and rotation velocity of the agitators are simulated without aeration; we observed their effects on the mean circulation velocity.

Finally, fine bubble diffusers are implemented to perform aeration. An Eulerian-Eulerian multiphase model is used, and then the influence of aeration on the mean circulation velocity is studied. All these simulations are carried out in an annular tank.

Key-words:

Waste-water treatment, annular bioreactor, velocity fields, multiphase Eulerian-Eulerian model, Fluent code.

RESUMÉ

Dans le traitement de l'eau usée urbaine, le principal procédé de traitement des composés organiques et azotés est le procédé à boues activées. Les réacteurs biologiques sont les éléments les plus importants de ce système, la qualité du traitement et les coûts énergétiques sont fortement liés à leur fonctionnement et leurs performances. Une connaissance approfondie de leur hydrodynamique est nécessaire pour optimiser leur conception et garantir un traitement efficace dans ce type d'installations.

Notre étude consiste en l'utilisation des logiciels Gambit-Fluent pour la simulation des écoulements dans un réacteur annulaire aéré équipé de diffuseurs de fines bulles d'air et d'agitateurs à vitesses lentes et à grandes pâles. Le logiciel Fluent utilise la méthode des volumes finis pour la discrétisation des équations mathématiques régissant l'écoulement en régime permanent monophasique et/ou diphasique dans le réacteur. Le modèle standard $k-\epsilon$ a été choisi pour la résolution de ces équations en régime turbulent.

Pour l'écoulement monophasique l'influence de la rugosité des parois du bassin et la vitesse de rotation des agitateurs (eau claire, sans aération) sur la vitesse de circulation moyenne a été étudiée. Alors que pour l'écoulement diphasique nous avons rajouté les effets de la vitesse de circulation du diamètre des bulles d'air, ainsi que ceux du débit d'air.

Mots clés:

Traitement des eaux usées, bioréacteur annulaire, champs de vitesse, diphasique, modèle Eulérien-Eulérien, code fluent.

ملخص

العملية الرئيسية لعلاج النيتروجين والمركبات العضوية في مياه الصرف الصحي في المناطق الحضرية هو عملية الحمأة المنشطة. مفاعلات الأكسدة هي المعدات الأكثر أهمية في هذا النظام. جودة مياه الصرف الصحي المعالجة وتكلفة الطاقة ترتبط بقوة بعملهم. لذا فهم عميق لهيدروديناميكا مفاعلات الأكسدة مفيد لتحسين تصميمها وكفاءة علاج فعال في هذه المنشآت.

هذه الدراسة تهتم بشكل خاص بدراسة حركة السوائل و هي في حالة اضطراب داخل مفاعل حلقي الشكل و الهدف بعد الحل الرقمي بواسطة CFD الذي يستعمل طريقة الحجوم المتناهية هو المعرفة المفصلة لتغيرات السرعة في الحوض المائي المفتوح و يستند العمل على نظام Navier Stokes مع الأخذ بعين الاعتبار النموذج K-ε . النتائج المتحصل عليها من خلال استخدام Fluent version 6.3 أخذت بعين الاعتبار الحالتين وحيد الطور و ثنائي الطور.

أولاً، من أجل التحقق من صحة النموذج، تم مقارنة البيانات التجريبية لسرعة المياه من الببليوغرافيا مع نتائج المحاكاة في حال عدم وجود تهوية (وحيد الطور). ثم قمنا بتغيير ارتفاع خشونة جدران الحوض وسرعة دوران المحركات و لاحظنا آثارها على متوسط سرعة الدوران في الحوض المائي.

ثانياً، في حالة ثنائي الطور درسنا تأثير زيادة السرعة و تغير قطر فقاعات الهواء كذلك درسنا تأثير تدفق الهواء على السرعة المتوسطة و على نسبة الهواء في الحوض المائي.

كلمات البحث:

حرية تدفق السطح -- الاضطراب -- قوانين الجدار -- النمذجة -- المحاكاة الرقمية -- K-ε النموذجي -- متجانس وموحد الخواص.

Remerciements

En préambule, je souhaite rendre grâce à Dieu, le clément et miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage et la patience de mener à bien ce modeste travail

*Je tiens à remercier sincèrement mon encadreur Mr. **BOUDEBOUS SAADOUN**, Professeur à l'Université de Constantine 3, de m'avoir suivie et dirigée tout au long de la réalisation de ce mémoire. Je le remercie aussi pour la confiance qu'il a placée en moi, pour sa disponibilité permanente, pour sa patience et ses conseils.*

*Je souhaite également remercier les membres du jury, Mr. **CHIKHI MUSTAPHA**, maitre de conférences à l'Université Constantine 3 qui m'a fait l'honneur d'accepter d'être président de jury.*

*Je remercie également Mr. **KHOLAI OMAR**, professeur au département de génie mécanique, Université Constantine 1 et Mr. **DERBAL KERROUM**, maitre de conférences à l'école polytechnique de Constantine 3, pour l'importance qu'ils ont accordé à mon travail en acceptant d'être membres de ce jury et pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de ce mémoire.*

Enfin, mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin m'ont apporté aide et encouragements, Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude

Fatima-zohra

Dédicaces

Je dédie ce mémoire en particulier

Au prophète Mohamed (ص)

A mes très chers parents

A mon cher mari et mes enfants

A mes chers frères et sœurs

A toutes mes amies

*Et enfin, à la mémoire de mon ancien
directeur et frère Mr Tamine Rachid*

Fatima-zohra

ABSTRACT	i
RESUME	ii
ملخص	iii
Remerciements	iv
Dédicaces	v
Nomenclature	viii
Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités et revue bibliographique	3
I.1 Généralités	3
I.1.1 Introduction aux traitements à boue activées	3
I.1.2 Réacteur biologique	4
I.1.2.1 Géométrie	5
I.1.2.2 L'agitation	5
I.1.2.3 L'aération	7
I.2 Revue Bibliographique	7
Chapitre II: Formulation mathématique	25
II.1 Formulation mathématique	25
II.2.1 Ecoulement monophasique	25
II.2.1.1 Equation de continuité	25
II.2.1.2 Equation de transport de quantité de mouvement	25
II.2.1.3 Modèle de turbulence standard k-ε	26
II.2.2 Ecoulement diphasique	27
II.2.2.1 Equation de continuité	27
II.2.2.2 Equation de conservation de quantité de mouvement	28

Chapitre III: Formulation numérique	30
III.1 Présentation du code fluent	30
III.2 Géométrie et paramètres physiques du problème	31
III.3 Maillage	33
III.3.1 Maillage dans le cas monophasique	33
III.3.2 Maillage dans le cas diphasique	33
III.4 Conditions aux limites	34
III.4.1 Conditions aux limites pour le cas monophasique	
III.4.2 Conditions aux limites pour le cas diphasique	37
III.5 Schémas de discrétisation	37
III.5.1 Schéma de discrétisation pour le cas monophasique	37
III.5.2 Schéma de discrétisation pour le cas diphasique	37
III.6 Critère de convergence	38
Chapitre IV: Résultats et discussions	
IV.1 Introduction	39
IV.2 Effet du maillage sur la solution numérique	39
IV.3 Validation du code de calcul	40
IV.4 Première partie : Simulation de l'écoulement monophasique	42
IV.4.1 Effet de la rugosité	42
IV.4.1.1 Effet de la rugosité uniforme	43
IV.4.1.2 Effet de la rugosité non uniforme	46
IV.4.2 Effet de la vitesse de rotation	50
IV.5 Seconde partie : Simulation de l'écoulement diphasique	55
IV.5.1 Validation du code de calcul	55
IV.5.2 Effet de la vitesse de circulation	60
IV.5.3 Effet du diamètre des bulles d'air	68
IV.5.4 Effet du débit d'air	72
Conclusion générale	79
Références bibliographiques	81

Nomenclature

C_D	Coefficient de trainée
$C1 \varepsilon , C2\varepsilon , C\mu$	Constantes
d	Diamètre des pâles de l'agitateur (m)
\vec{F}_q	Force extérieure(N)
$\vec{F}_{\text{lift}, q}$	Force de portance (N)
$\vec{F}_{vm, q}$	Force de masse ajoutée (N)
Gk	Terme de production de l'énergie cinétique turbulente
g	Accélération de la pesanteur (m/s^2).
H	Hauteur du bassin (m)
k	Energie cinétique turbulente (m^2/s^2).
k_s	Hauteur de rugosité (m m)
$K_L a$	Coefficient global de transfert d'oxygène (h^{-1})
KS	Coefficient de strickler $m^{1/3} .s^{-1}$
$\cdot K_{pq}$	Interphase exchange coefficient.
\dot{m}_{pq}	Masse transférée de la phase p à la phase q ($kg.m^{-3}.s^{-1}$)
\dot{m}_{qp}	Masse transférée de la phase q à la phase p ($kg.m^{-3}.s^{-1}$)
n	Nombre de phase
N	Vitesse de rotation des agitateurs (rpm)
N_{qp}	Nombre de pompage
p	Pression (Pa)
p_q	Pression de la phase q (Pa)
Q_p	Débit de pompage (m^3/s)
R_{int}	Rayon interne du bassin (m)

R_{ext}	Rayon externe du bassin (m)
u'_i	Composante de vitesse fluctuante suivant la direction (m /s).
U_i	Composante de vitesse moyenne suivant la direction (m / s).
V	Volume du bassin (m^3)
\vec{V}_q	Vitesse de la phase q (m/s)
X_i	Coordonnées.
Re	Nombre de Reynolds
S_q	Terme source de la phase q
t	Temps
Lettres en grecques	
ρ	masse volumique (kg/m^3)
ρ_q	Masse volumique de la phase q (kg/m^3)
α_q	Taux de présence de la phase q
δ_{ij}	Symbole de Kronecker
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (m^2 / s^3)
μ	Viscosité dynamique ($kg / m s$)
μ_t	Viscosité dynamique turbulente ($kg / m s$)
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Nombre de Prandtl associés à k et ε
μ_{eff}	Viscosité effective ($kg / m s$)
τ_q	Tenseur des contraintes de la phase q (Pa)

Introduction générale

L'eau est un bien précieux qui subit diverses pollutions et dégradations : les écosystèmes et la santé des personnes en sont directement impactés. Les pollutions présentes dans l'eau sont d'origine diverses : industrielle, agricole et domestique.

Le traitement des rejets en provenance des agglomérations urbaines est aujourd'hui au cœur de la politique environnementale mondiale. Toutes les agglomérations de plus de 2000 habitants devront récolter et traiter les eaux usées de leurs administrés.

Le mode de traitement le plus utilisé des eaux résiduaires est le procédé d'épuration biologique en raison de son efficacité et de sa rusticité. Le bassin d'aération ou réacteur biologique est l'élément majeur d'une station d'épuration à boues activées. Son fonctionnement conditionne la qualité du traitement, la filière boue et la dépense énergétique.

La maîtrise de l'hydrodynamique de ces réacteurs est un enjeu essentiel pour améliorer leur conception et donc optimiser leur fonctionnement. L'agitation et l'aération sont les deux éléments essentiels d'un bassin à boues activées de manière couplée ou dissociée, ils assurent la mise en contact de l'eau usée avec la biomasse épuratrice et l'oxygénation du milieu pour la croissance et le développement microbien.

L'objectif de notre étude est la simulation des écoulements tridimensionnels, à l'aide du code Fluent, dans un bassin annulaire où l'aération se fait à l'aide de diffuseurs d'air sur pressé et le brassage par des agitateurs à larges pâles.

Dans un premier temps, l'hydrodynamique réelle du bassin d'aération a été simplifiée: seule l'agitation en eau claire a été étudiée par le code Fluent de la CFD (Computational Fluid Dynamics). Les effets de la rugosité des parois du bassin et de la vitesse de rotation des agitateurs ont été considérés. La validation de notre travail s'est faite en comparant les résultats de la simulation avec ceux trouvés dans la littérature.

Dans un deuxième temps, l'écoulement diphasique a été étudié. Les effets du diamètre des bulles d'air, de la vitesse de circulation et du débit d'aération ont été examinés.

Afin d'atteindre l'objectif fixé nous avons scindé ce mémoire en quatre chapitres:

- ◆ **Le premier chapitre** est consacré à des généralités sur le procédé de traitement des eaux, du réacteur à boue activée, de l'agitation et de l'aération. Une revue bibliographique des travaux en rapport avec le sujet a été développée.

- ◆ **Le second chapitre** expose la formulation mathématique du problème

- ◆ **Le troisième chapitre** détaille la géométrie, les paramètres physiques et expose la méthode numérique utilisée ainsi que les conditions aux limites.

- ◆ **Le quatrième et dernier chapitre** présente les principaux résultats obtenus par des simulations numériques avec les logiciels Gambit-Fluent.

- ◆ **Le mémoire** se termine par une conclusion générale résumant les différents résultats obtenus ainsi que des recommandations pour des travaux futurs en relation avec ce sujet.

Chapitre I: Généralités et revue bibliographique

I.1 Généralités

Dans cette section, nous rappelons brièvement le principe de fonctionnement des traitements biologiques, de l'agitation, l'aération, et les différents équipements composant le réacteur biologique. Le lecteur intéressé, pourra consulter « **BIOLOGY OF WASTEWATER TREATMENT** » by N. F. Gray. **Second édition.** *University of Dublin, Ireland* (2004) et la thèse de doctorat de VERMANDE (2005) pour de plus amples informations.

I.1.1 Introduction aux traitements à boues activées

Le traitement biologique par boues activées représente la phase clé de la chaîne globale de traitement. Ce processus de traitement est fondé sur la consommation par une prolifération de microorganismes (ou biomasse) de la pollution azotée, carbonée et phosphorée entrant sur la station, alors considérée comme un substrat. Une représentation typique du procédé d'épuration à boues activées est donnée sur la **figure(I.1)**.

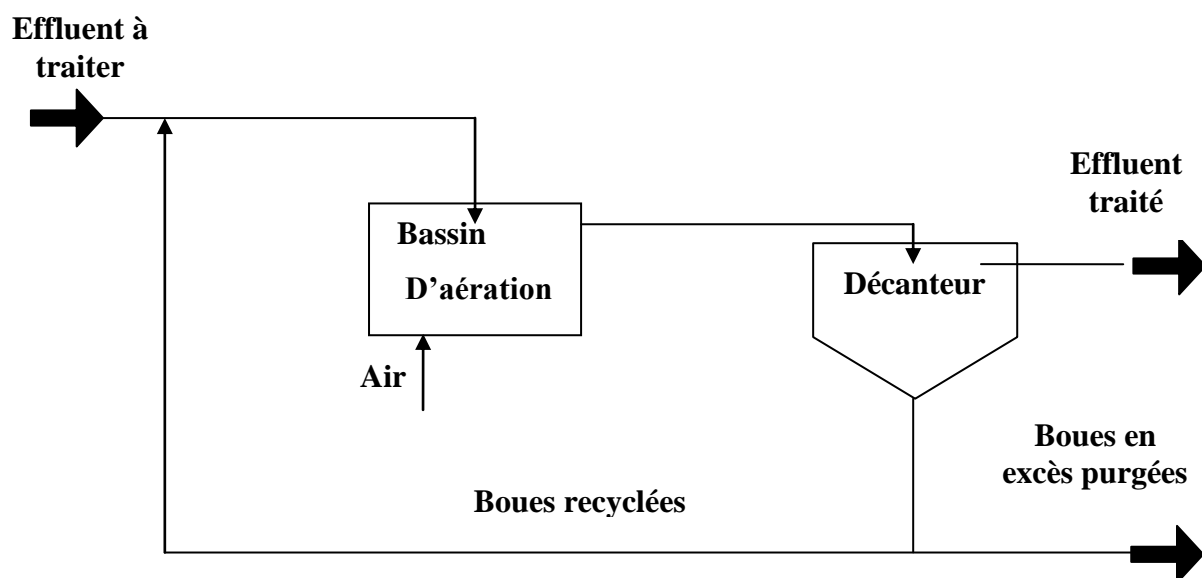


Figure (I.1): Schéma de base du procédé de traitement à boues activées

I.1.2 Réacteur biologique

Le réacteur biologique ou bassin d'aération constitue le cœur même du procédé de traitement à boue activée dans lequel s'effectue le métabolisme bactérien à l'origine de l'épuration.

I.1.2.1 Géométrie

Le volume du bassin est fonction de la charge polluante mais une géométrie bien définie peut être imposée par la capacité de traitement de l'unité (**voir figure (I.2)**).

1-Pour de petites unités, les bassins cylindriques ou annulaires sont préférés.

2-La forme oblongue est souvent favorisée pour des stations de capacité supérieure à 20000 EH.

3-Les bassins de forme rectangulaire.

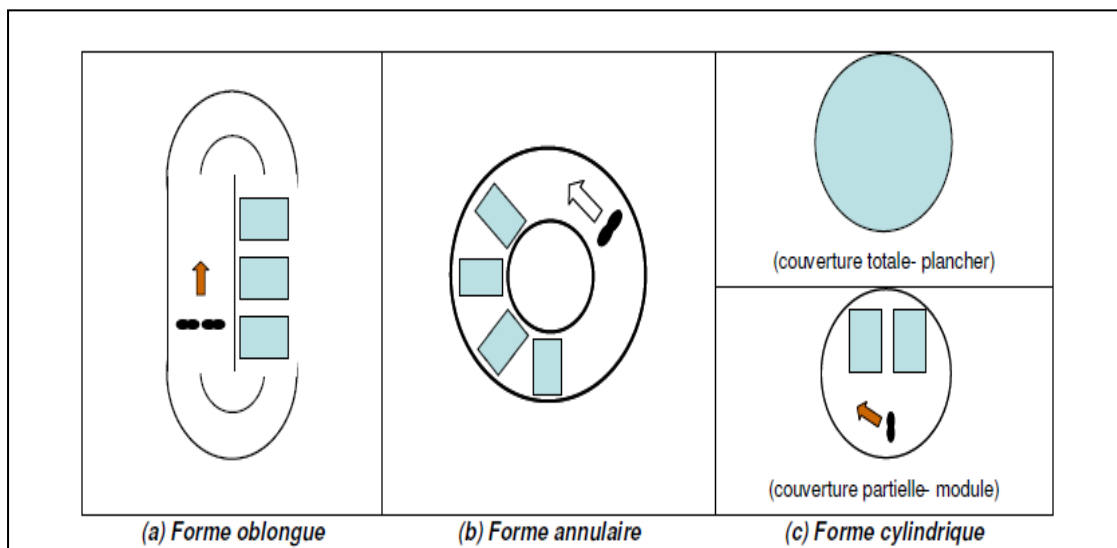


Figure (I.2): Représentation des différentes géométries de bassin d'aération VERMANDE (2005)



Figure (I.3): Les différentes formes de bassins d'aération de taille réelle (article Irstea)

Le fonctionnement du réacteur biologique est basé sur deux mécanismes très importants qui sont :

- L'agitation
- L'aération

I.1.2.2 L'agitation

L'agitation a un rôle primordial dans l'homogénéisation du mélange de boues activées et de l'eau dans les bassins d'aération et le maintien en suspension des floes bactériens afin de garantir l'efficacité du procédé d'épuration. Selon les besoins l'agitation et l'aération peuvent être assurées par un même équipement ou découplées.

On peut regrouper les agitateurs en trois familles selon les écoulements générés (Roustan et Le Lan, 1999):

- **Les agitateurs à écoulements radiaux** ce type d'agitateurs génère une forte turbulence, des effets de cisaillements importants, donc un fort mélange. On les utilise dans le mélange des liquides non miscibles, les mélanges liquide/solide ou liquide/gaz. On trouve dans cette famille les turbines Rushton.

- **Les agitateurs à écoulements axiaux** ce type d'agitateurs génère des actions de pompage, ils sont utilisés dans la mise en circulation, l'homogénéisation et le maintien en suspension de particules solides. On trouve dans cette catégorie les hélices marines. Les applications les plus courantes de ce type d'agitateurs est l'agitation dans les bassins d'aération.

- **Les agitateurs à écoulements mixtes** ces agitateurs produisent à la fois des écoulements radiaux et axiaux. Les pâles de ce type d'agitateurs sont inclinées de 45°.

parmi les paramètres principaux caractérisant un agitateur nous avons **VERMANDE (2005)**:

- *La forme et le diamètre* d (m) de l'hélice et sa vitesse de rotation N (tr/mn)

- *Le débit de pompage* Q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$) défini par la relation

$$Q_p = N_{qp} N \cdot d^3$$

Avec: N_{qp} : nombre de pompage

Le débit de pompage est le débit de liquide qui passe effectivement dans l'agitateur

- *Son nombre de Reynolds* Re :

$$Re = \frac{\rho * N * d^2}{\mu}$$

Ce nombre est défini par analogie avec le nombre de Reynolds en conduites

Pour l'agitateur, la vitesse U est en effet égale à $N.d$ et correspond à la vitesse en périphérie de l'hélice. Re définit un régime d'écoulement laminaire ($Re < 10$) ou turbulent ($Re > 10^4$). **TANGUY (2003)**

I.1.2.3 L'aération

L'aération est un phénomène crucial tant pour le fonctionnement du bassin à boues activées que pour les coûts d'exploitation d'une station d'épuration. Une bonne compréhension des phénomènes qui régissent le transfert d'oxygène de la phase air vers la phase liquide est donc primordiale pour optimiser la dépollution et minimiser les surcoûts. L'aération est basée sur le principe de transfert de matière entre la phase gazeuse (bulles d'air) et la phase liquide (eau).

Les systèmes d'aération équipant un bassin d'épuration biologique ont un double but :

- Apporter aux micro-organismes aérobies l'oxygène généralement emprunté à l'air libre dont ils ont besoin.

- Provoquer une homogénéisation et un brassage suffisant de façon à assurer un contact renouvelé entre le milieu vivant, les éléments polluants et l'eau ainsi oxygénée.

Ces systèmes sont constitués le plus souvent d'un appareil ou d'un ensemble d'appareils placés dans un bassin de volume et de forme déterminés réalisant ces deux fonctions. Les aérateurs se composent de différents types :

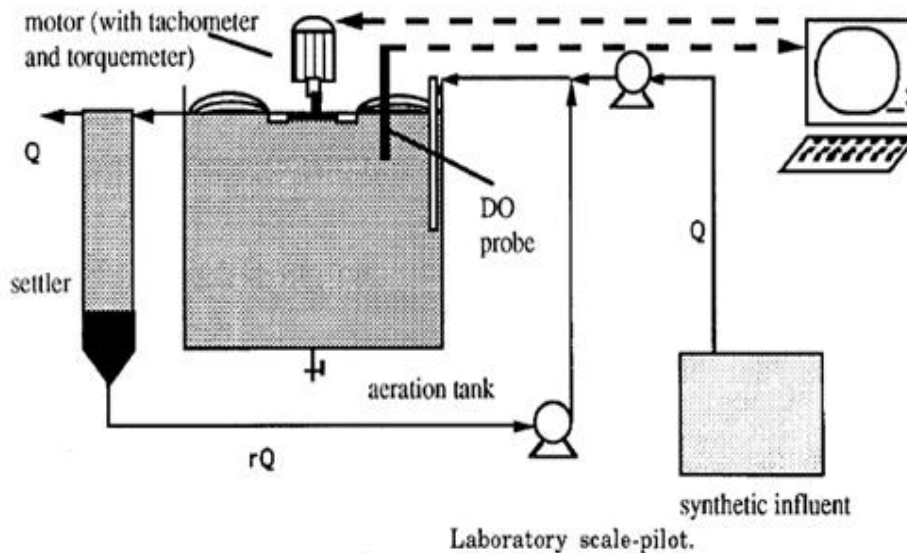
- Les aérateurs de surface
- Les aérateurs de fond
- Les hydrojecteurs
- Les Aérateurs par air surpressé

I. 2 Revue Bibliographique

Différents travaux expérimentaux et numériques que nous allons exposer dans la section revue bibliographique ont été réalisés sur la simulation de l'hydrodynamique dans les bassins d'aération afin d'optimiser l'aération et le brassage et d'obtenir de meilleurs rendements épuratoires des eaux usées.

J. VAXELAIRE et al (1994) ont fait une étude expérimentale sur un réacteur pilote à boue activée doté d'un aérateur en surface de vitesse variable (**voir figure (I.4)**). En premier, ils ont établi une corrélation entre le transfert d'oxygène et les paramètres technologiques de

l'agitation dans l'eau claire. La capacité d'oxygénation est linéairement corrélée à la puissance spécifique avec un apport de $2.56 \text{ kg d'O}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}$. En second lieu, ils ont introduit un facteur α pour corriger la valeur du coefficient de transfert entre la phase gazeuse et la phase liquide en présence de la boue activée. Ces résultats sont expliqués par la théorie des deux films.



Figure(I.4): L'installation expérimentale utilisée pour l'étude du transfert d'oxygène dans un réacteur pilote à boues activées aéré en surface

J. MORCHAIN et al (1999) : ont étudié l'effet du couplage entre le transfert de masse de l'oxygène dû à l'aérateur à jet et au flux de recirculation généré. Les simulations ont été réalisées par le code de la CFD FIDAP version 7.6 dans un bassin large (**voir figure (I.5)**) avec un débit fixe de l'aérateur, un débit variable de la circulation et trois valeurs différentes du $K_L a$. Un domaine semi-infini a été construit, des conditions aux limites fixées pour représenter le flux d'oxygène traversant la zone aérée. Les champs tridimensionnels de vitesse obtenus sont en accord avec les résultats trouvés dans la littérature. Ils ont constaté qu'à des débits de circulation élevés, une petite augmentation du $K_L a$ pouvait faire doubler la valeur du flux d'oxygène transféré. Enfin, plusieurs hydro-éjecteurs peuvent être installés pour l'aération et la mise en circulation dans les grands bassins et les lagunes destinés aux traitements des eaux usées.

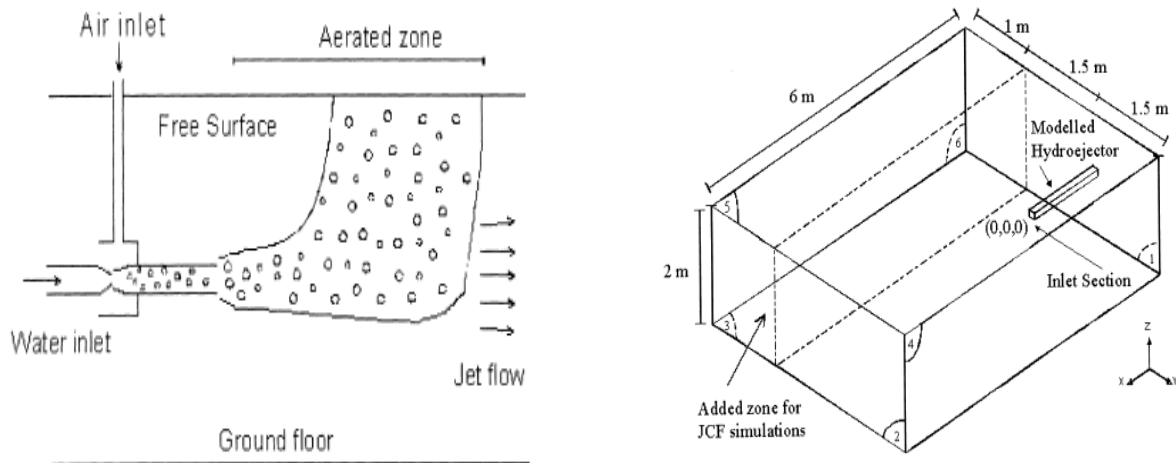


Figure (I.5): Schéma de l'hydro-éjecteur

N LESAGE et al (2003) ont présenté un modèle mathématique 1-D pour prédire les profils de concentration de l'oxygène et de l'azote. Ce modèle couple l'hydrodynamique, le transfert de masse, et l'activité biologique. Sous le régime permanent, les mesures de l'oxygène dissous montrent la qualité des résultats de la résolution du modèle élaboré. Des simulations peuvent alors être utilisées pour montrer l'influence de l'hydrodynamique, et des paramètres de transfert sur l'efficacité du procédé de purification de l'eau usée. Une vitesse de liquide plus grande engendre la baisse de la DCO et de la concentration de l'azote. La présence d'une zone anoxie dans le bassin d'activation est confirmée. La complexité du procédé s'accroît et devra être défini par la modélisation 1-D des réactions de dénitrification. Les réactions de nitrification et d'oxydation de la charge carbonée ont été suivies dans un pilote de 1.5 m^3 . Ce modèle a été validé et extrapolé à un réacteur d'oxydation de taille réelle (**voir figure I.6**).

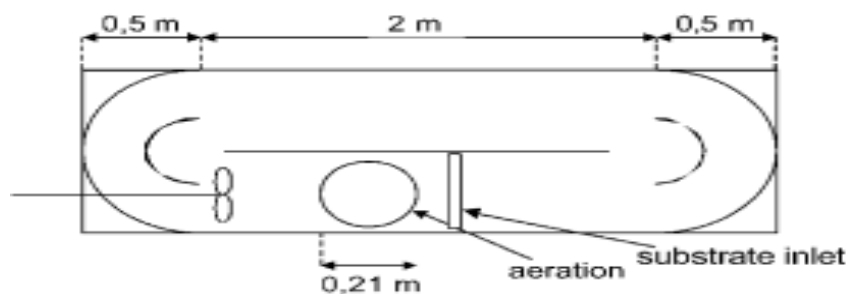


Figure (I.6): Représentation du bassin étudié

PIERRE TANGUY (2003) a développé la simulation par le code FLUENT des écoulements dans un bassin d'activation de forme annulaire où les fonctions d'aération et de brassage sont dissociées (**voir figure (I.7)**). La validation de ce travail s'est faite par la comparaison des résultats numériques aux mesures expérimentales de vitesse locales. L'étude paramétrique concerne le positionnement des agitateurs, la hauteur d'eau et l'orientation des hélices. En outre des simulations diphasiques sont effectuées à l'aide du modèle Eulérien-Eulérien, l'influence de l'aération sur la vitesse de circulation et les phénomènes de convection ascendante sont mis en évidence.

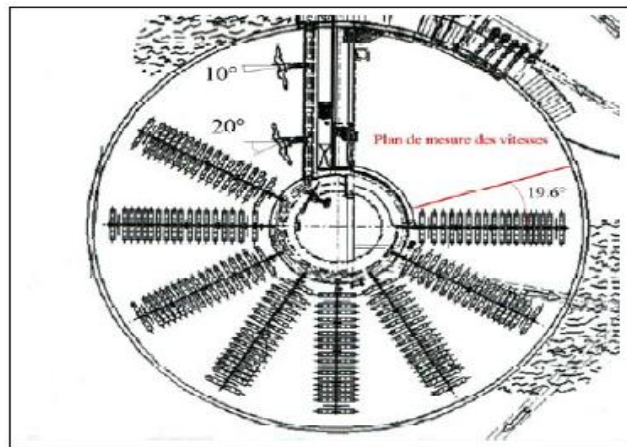


Figure (I.7): Représentation du bassin étudié

M. T. DHOTRE and J. B. JOSHI (2004) ont étudié par CFD les profils des écoulements dans un réacteur sous forme de colonne à bulles. Le modèle k- ϵ a été utilisé, et plusieurs simulations ont été effectuées pour une large plage de vitesse superficielle de gaz, de diamètre, de hauteur et de la nature du système gaz-liquide. Les résultats de ces simulations ont été comparés aux résultats expérimentaux disponibles dans la littérature. Le modèle validé dans cette étude a permis d'étendre la prédiction à la chute de pression et au transfert de chaleur.

WEIDONG HUANG et al (2005) ont mené une étude d'un réacteur rectangulaire, doté d'un aérateur de surface de grande vitesse de rotation. Ce réacteur est considéré comme étant parfaitement agité, une approche par CFD basée sur le transport des composés et les cinétiques des réactions biologiques sont introduites dans la modélisation du système biologique. Cette approche est appliquée aux traitements des eaux usées, pour l'étude du

métabolisme des substrats organiques carbonées, de l'azote et de la population microbienne dans les conditions aérobies. Le modèle CFD couplé avec les cinétiques réactionnelles est plus précis que les modèles cinétiques pour la modélisation d'un système biologique.

VERMANDE STEPHANIE(2005) a étudié l'interaction entre l'hydrodynamique monophasique et diphasique et les performances biologiques de deux types de réacteurs l'un est annulaire, l'autre est oblong via le logiciel de MFN (**voir figure I.8**). Des mesures locales relatives à la phase gazeuse (rétention gazeuse, vitesse et diamètre des bulles) et des mesures globales (vitesse de circulation, rendement d'oxygénation RO) servent de comparaison et de validation des modèles et conditions limites choisis pour les simulations sous différentes conditions opératoires (agitation et aération). Ces choix numériques sont ensuite confirmés par les simulations de deux bassins d'aération de stations d'épuration urbaines.

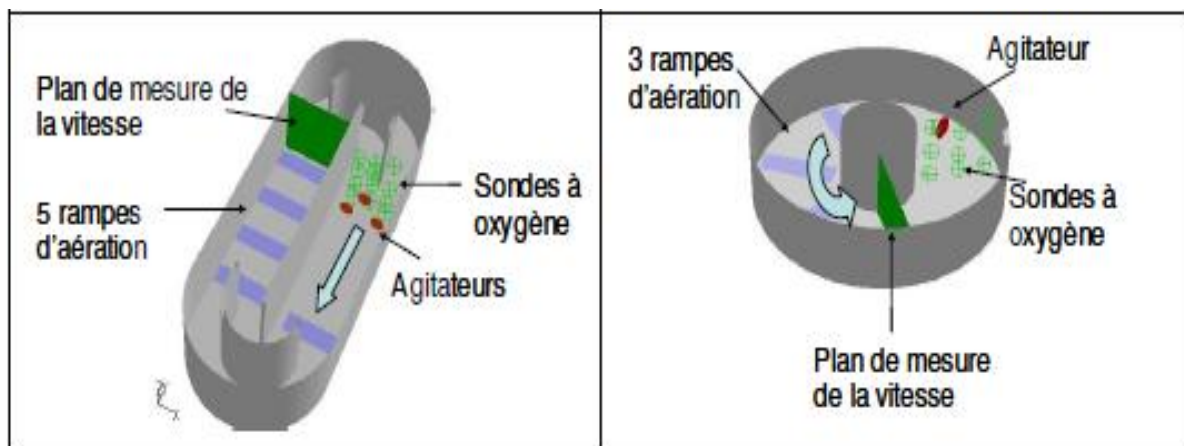


Figure (I.8) : schéma des réacteurs en 3D

A.J. BOSMA and B.A. REITSMA (2005) ont simulé par CFD, l'hydrodynamique dans un réacteur aéré pour le traitement des boues activées (**voir figure (I.9)**). Ils ont utilisé le logiciel COMSOL 3.3. L'objectif de leur analyse par CFD est de savoir s'il y'a un risque de court-circuit, économiser l'énergie et connaître l'effet de la variation des conditions opératoires sur les profils de vitesse de circulation dans le bassin d'aération. L'étude a été menée dans un réacteur doté de quatre agitateurs, de pompes de recirculation, de plaques de diffuseurs d'air positionnées sur le fond du bassin. Chaque anneau correspond à un type spécifique de réacteur. Le FCT (facultative reactor) est l'objet de leur travail, il peut opérer en tant que réacteur de nitrification ou de dénitrification.

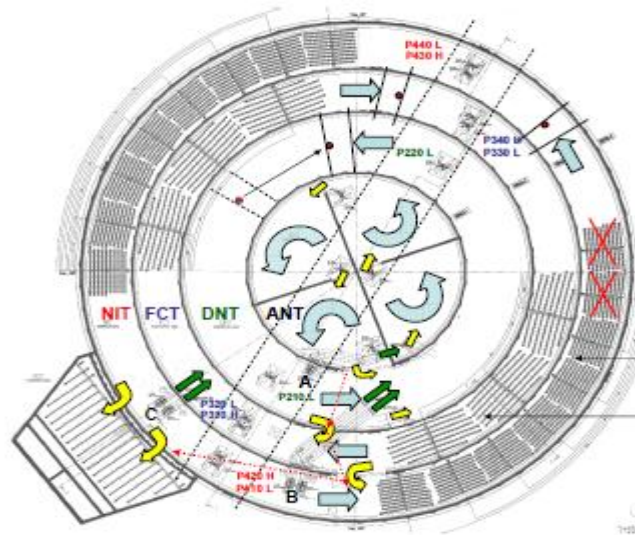


Figure (I.9): Représentation du bioréacteur étudié

YANNICK FAYOLLE et al (2007) ont effectué une simulation par le code Fluent des écoulements dans des bioréacteurs dans le but d'optimiser l'aération dans les procédés à boues activées. Cette approche numérique est capable de prédire les caractéristiques du flux de transfert d'oxygène dans des réacteurs aérés équipés de diffuseurs à fines bulles et d'agitateurs axiaux de faible vitesse (**voir figure(I.10)**). Pour quatre réacteurs aérés de différentes formes de volumes variant de 1 à 29.31 m³, de différents débits de pompage de l'eau et de l'aération, la CFD a permis de reproduire avec précision les résultats expérimentaux de la vitesse, de la rétention gazeuse. Les coefficients de transfert de l'oxygène obtenus par simulation diffèrent de 5% avec ceux obtenus expérimentalement.



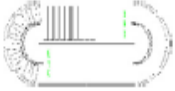

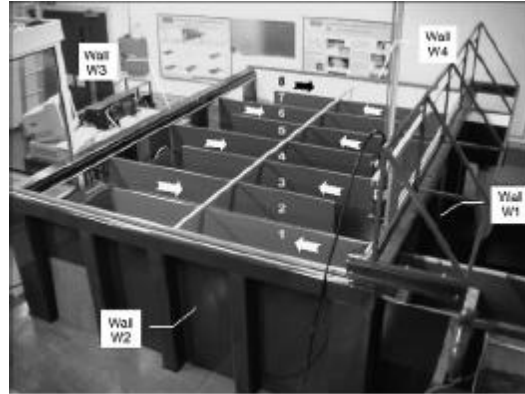
Tank	Type	Geometry and diffuser grid placement	Volume (m ³)	Dimensions	Mixers	Air supply	
						Number of diffuser grids	Number of diffuser on each grid
1	Oblong		1	$L = 3 \text{ m}; l = 1 \text{ m}; d_w = 0.4 \text{ m}$	One axial mixer ($D = 0.15 \text{ m}$)	-	1
2	Annular		1493	$D_{out} = 20.25 \text{ m}; D_{in} = 7.83 \text{ m}; d_w = 5.45 \text{ m}$	One large blade slow speed mixer ($D = 2.5 \text{ m}$)	6	26
3	Oblong		8191	$L = 50.65 \text{ m}; l = 27.5 \text{ m}; d_w = 5.3 \text{ m}$	Six large blades slow speed mixer (four of $D = 2.5 \text{ m}$ and two of $D = 2.2 \text{ m}$)	18 and 10	88 and 44
4	Oblong		29,313	$L = 90.63 \text{ m}; l = 34.08 \text{ m}; d_w = 8.6 \text{ m}$	Eight large blades slow speed mixers ($D = 2.4 \text{ m}$)	24	87

Figure (I.10) : Géométries et dimensions des réacteurs simulés

MANDAR V. TABIB (2007) ont effectué des simulations par le code Fluent des écoulements tridimensionnels en régime transitoire, dans une colonne cylindrique à bulles à échelle industrielle, pour une grande plage de la vitesse superficielle du gaz. Le but de ces simulations est de comprendre les effets des forces d'interface (force de trainée, portance, masse ajoutée...). Ce travail montre l'importance du choix du coefficient de la force de portance C_L et la loi de trainée choisie en fonction du diamètre des bulles. Ensuite des travaux à échelle du laboratoire pour trois types de buses d'aération, trois modèles de turbulence ($k-\epsilon$, RSM et LES) ont été effectués dans le but de comparer les résultats de leurs simulations avec ceux obtenus par l'expérimentation. Enfin, les résultats des simulations sont en bon accord avec les résultats trouvés dans la littérature.

WILLIAM B. RAUEN et al(2007) ont simulé à l'aide du code Fluent les écoulements dans un réacteur à baffles, le CCT (Chlorine Contact Tank) dans le but d'optimiser le design des réacteurs destinés à la désinfection de l'eau potable. Les résultats de cette simulation ont été validés par les mesures de vitesse expérimentales obtenues à l'aide de l'ADV (Acoustic Doppler Vélocimètre) à l'échelle du laboratoire (**voir figure(I.11)**).



Figure(I.11) : schéma du CCT (échelle laboratoire)

YANN LE MOULLEC et al (2008) ont rapporté des simulations tridimensionnelles numériques des écoulements dans un réacteur aéré destiné aux traitements des eaux usées effectuées grâce au code FLUENT (voir la figure (I.12)). Les résultats numériques ont été validés en utilisant les mesures « Laser-Doppler-Vélocimétrie » (LDV). Les simulations avec deux modèles de turbulence ont prédit avec succès le coefficient de dispersion du réacteur. La simulation de l'hydrodynamique peut prédire avec précision la dispersion pour différents flux de gaz ou de liquides dans le réacteur pilote et ces résultats peuvent être transposés à l'échelle industrielle. Enfin l'estimation correcte de l'hydrodynamique leur a permis de lui coupler le modèle bio-cinétique de l'ASM1.

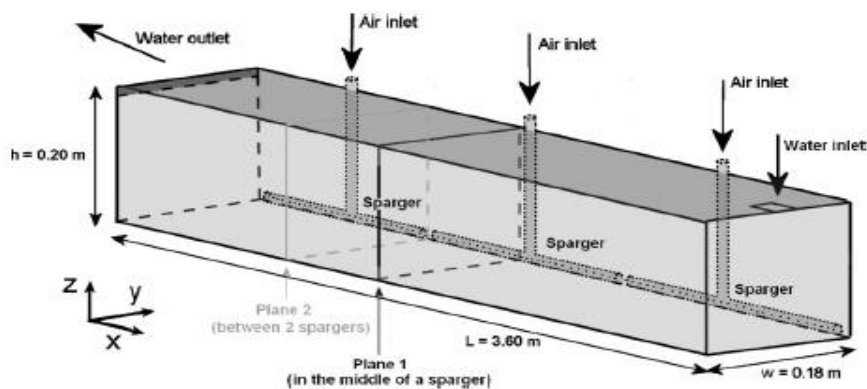


Figure (I.12) : schéma du réacteur pilote

YANNICK FAYOLLE et al (2009) ont réalisé une étude expérimentale pour mesurer le diamètre des bulles d'air, la rétention et le coefficient de transfert d'oxygène en fonction de la vitesse axiale du liquide dans un réacteur annulaire doté de six rampes de diffuseurs d'air positionnés au fond du bassin et un agitateur à larges pâles et faible vitesse (**voir la figure (I.13)**). Ils ont constaté une légère réduction du diamètre des bulles (- 4%) et la croissance du coefficient global de transfert d'oxygène ($K_{La_{20}}$) quand la vitesse axiale augmente. Cette croissance est principalement due à la réduction de la vitesse de montée des bulles d'air.

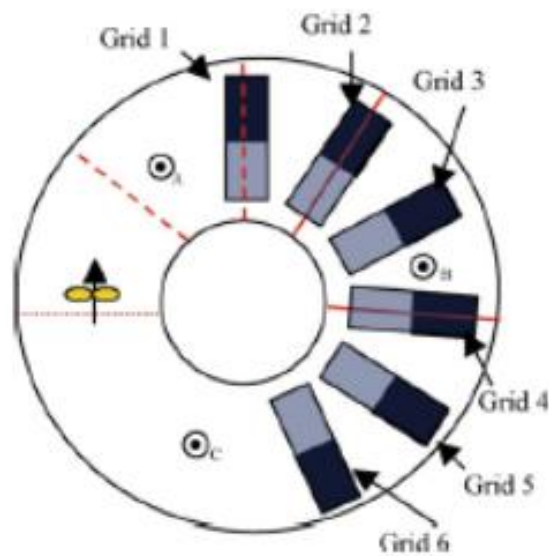


Figure (I.13): Réacteur pilote annulaire

ACHANTA RAMAKRISHNA RAO et al (2009) ont étudié expérimentalement les effets de différents facteurs géométriques et dynamiques affectant les performances des réacteurs à section circulaire dotés de baffles dont l'aération est en surface (**voir figure(I.14)**). Ils ont déterminé les dimensions géométriques optimales : nombre et largeur de baffles position, diamètre du rotor, et hauteur de l'eau dans un réacteur doté d'un rotor à six pâles plates. Ceci a permis de maximaliser le coefficient de transfert d'oxygène ($K_{La_{20}}$). En outre, ils ont établi une corrélation qui lie ce coefficient aux paramètres dynamiques du réacteur dont le but de dimensionner des réacteurs à échelle industrielle en se basant sur les résultats obtenus sur pilote.

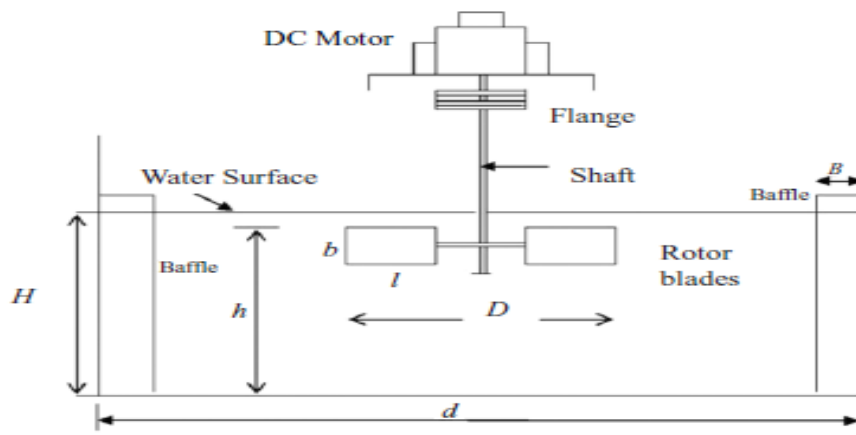


Figure (I.14): étude expérimentale sur pilote.

LIN LIO et al ont utilisé le modèle de turbulence $K-\varepsilon$ pour simuler les champs d'écoulements tridimensionnels dans un réacteur d'oxydation oblong. Dans ce réacteur tout le procédé de traitement des eaux usées y compris la dégradation biochimique aérobie, la recirculation des boues activées et la décantation peuvent être accompli d'où le nom de réacteur combiné. Un rotor mécanique est la seule source de puissance pour entraîner et aérer le fluide dans ce réacteur. Une zone de recirculation verticale est trouvée, elle a influencé les profils de vitesse dans le réacteur. Les résultats de la simulation sont acceptables en comparaison avec les résultats expérimentaux.

CEDRIC LABORDE-BOUTET et al (2009) ont effectué des simulations par le code Fluent des écoulements tridimensionnels diphasiques dans un contacteur gaz-liquide en régime transitoire, le modèle utilisé est Euler/Euler. Les résultats obtenus sont discutés en comparaison avec les résultats expérimentaux de laboratoire obtenus dans une colonne à bulles. Un intérêt particulier est porté aux écoulements turbulents pour des vitesses de gaz supérieures à 0.1 m/s et pour un taux de présence de la phase gazeuse élevé (supérieur à 0.3). Le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ RNG a donné de bons résultats.

WEIDONG HUANG et al (2009) ont développé un modèle de transfert de matière de l'oxygène par CFD dans un réacteur doté d'un aérateur de surface de grande vitesse (voir figure (I.15)). Ce modèle a été validé par des tests à échelle industrielle. Les résultats des tests montrent que l'oxygène transféré provient principalement du spray de l'eau dans l'air et que l'air entraîné par le spray plongeant et la réaération de la surface supérieure contribuent peu à l'oxygénation du bassin. La simulation était tridimensionnelle et le modèle de turbulence choisi est k- ϵ .

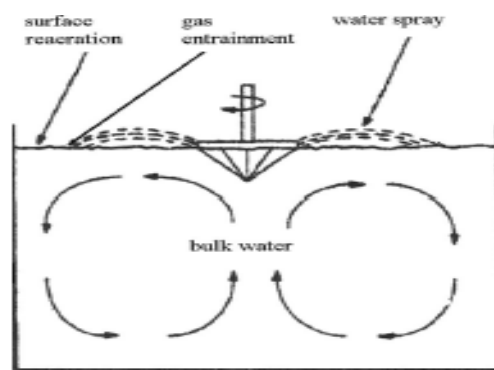


Figure (I.15) : Schéma du réacteur aéré

LONG FAN et al (2009) ont étudié par le code Fluent l'hydrodynamique dans un réacteur destiné aux traitements des eaux usées (voir figure (I.16)), l'écoulement est tridimensionnel, turbulent et diphasique (liquide-solide). Le modèle de turbulence utilisé est k- ϵ . En parallèle, ils ont utilisé un équipement pour suivre la dynamique des particules solides le PDA (Particle dynamic analyser) dans un réacteur expérimental à l'échelle du laboratoire, ils ont réussi à obtenir la distribution des champs de vitesse du liquide et celle de la fraction volumique de la phase solide. La comparaison entre les résultats de la simulation et ceux obtenus par l'expérimentation du PDA ont montré un bon accord. L'étude a montré que la fraction volumique des solides augmente suivant la profondeur dans le bassin. En outre, l'augmentation de la vitesse des aérateurs de surface fait augmenter la vitesse dans le bassin et minimise les surfaces des zones de décantation.

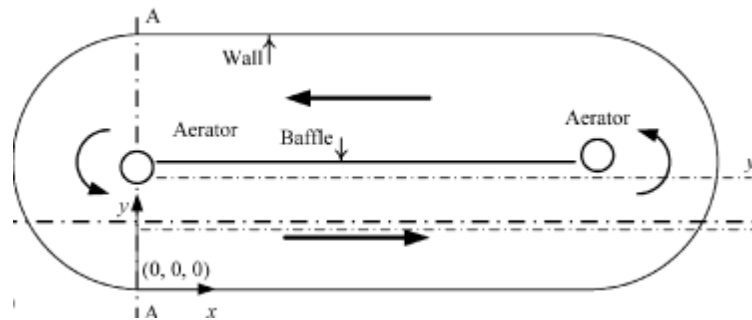


Figure (I.16) : schéma du bioréacteur

MARKUS GRESH et al (2010) ont analysé par Fluent le champ d'écoulement tridimensionnel dans un réacteur rectangulaire doté de cinq rampes d'aération (voir figure (I.17)), en utilisant des vélocimètres Doppler Acoustiques (ADV), les mesures expérimentales des vitesses et la distribution d'un traceur. Ce réacteur est composé de deux zones : l'une est anoxique et l'autre est aérobie. En outre, ils ont utilisé des électrodes ioniques calibrées pour détecter l'ion ammonium en continu. Le modèle Euler-Euler Multiphasique et le modèle de turbulence $k-\omega$ ont été utilisés pour la simulation. La phase continue est la phase de boue activée et celle dispersée est l'air. En plus des équations de l'hydrodynamique, une équation de transport pour l'ammonium est résolue. Enfin, ils ont couplé la CFD à un modèle bio cinétique pour la nitrification dans ce réacteur aéré. Les champs d'écoulement et la distribution de la concentration de l'ion ammonium ont été validés par les mesures expérimentales. Ils ont constaté la présence de zones non aérées près des murs, ce qui réduit non seulement l'efficacité de l'aération mais aussi l'agitation longitudinale. Aussi, ils ont trouvé que l'aération impacte largement le champ d'écoulement et la position des diffuseurs d'air influence les performances du réacteur et la dégradation de l'ammonium.

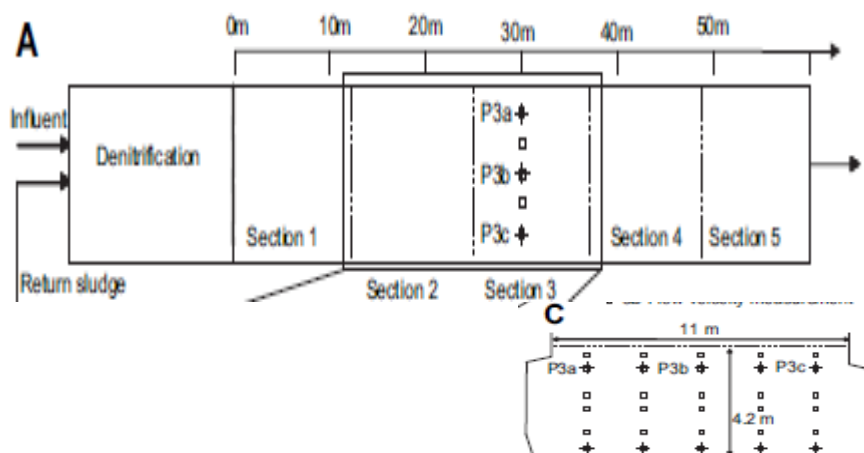


Figure (I.17): schéma du réacteur étudié et vue de la coupe C : section de mesure des vitesses et concentrations de l'ion ammonium

XU WANG et al (2010) ont utilisé le logiciel Fluent pour modéliser un écoulement couplé à la cinétique d'une réaction biologique pour simuler un système triphasique de bio traitement de l'eau usée. Le modèle montre la relation entre l'hydrodynamique et la production du bio hydrogène. La simulation est bidimensionnelle, le régime est permanent, le modèle multiphasique utilisé est Eulérien-Eulérien. Le modèle de turbulence est k- ϵ , la phase primaire est l'eau usée, et la phase secondaire est composée de gaz et des particules solides de l'eau usée. Ce modèle est vérifié et il est utilisé pour la simulation des écoulements dans un bioréacteur à lit d'eau usée pour la production de bio hydrogène EGSB (**voir figure(I.18)**).

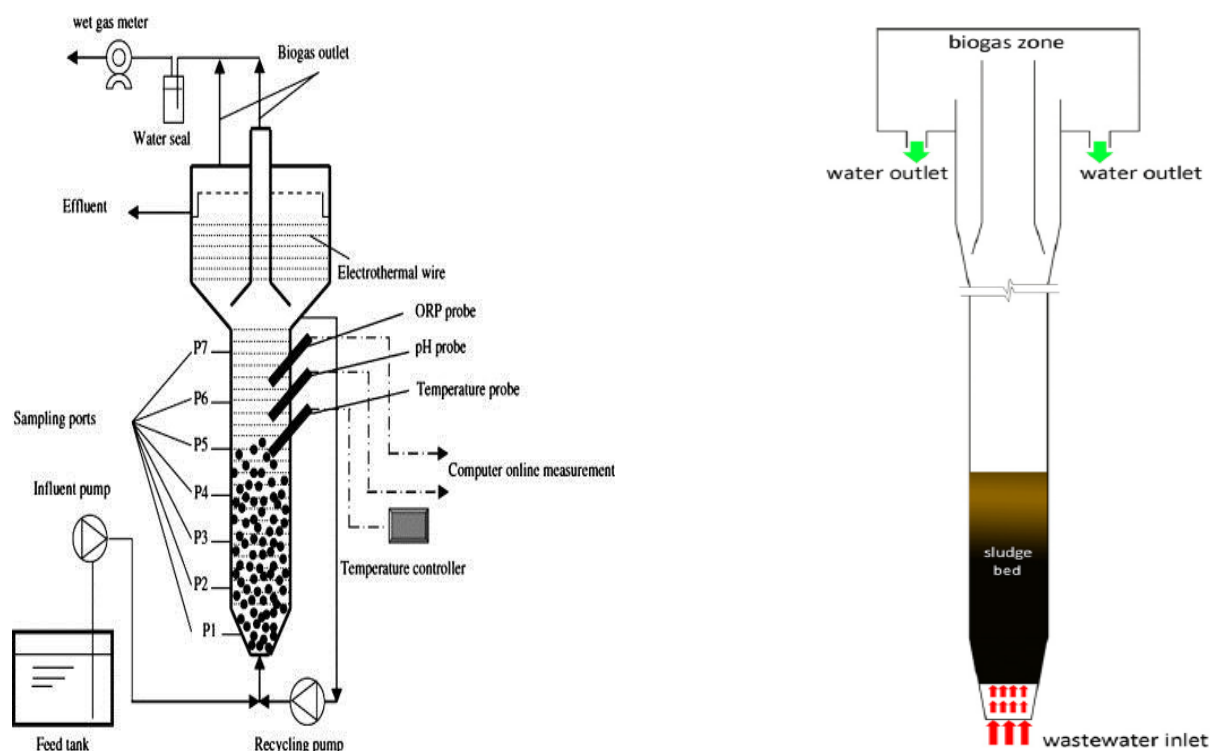


Figure (I.18): Schéma du bioréacteur (expanded granular sludge bed reactor)

XUE WANG et al(2011) ont étudié le traitement biologique du toluène (phase gazeuse) dans un réacteur triphasique, l'ALR (Air-Lift-Reactor : colonne à bulles) par la mécanique des fluides numérique. Un modèle tridimensionnel transitoire a été développé incluant le modèle de turbulence k- ϵ , les forces d'interface, le transfert de matière et de quantité de mouvement ainsi que la bio-réaction. La validation a été faite par la comparaison de la vitesse axiale de la

phase liquide aux résultats de l'expérimentation hydrodynamique. Le toluène dissous et l'efficacité de son élimination sont obtenus par les essais expérimentaux de traitement biologique à l'aide de bactéries fixées sur des supports (phase solide). Le transfert de masse entre la phase liquide et la phase gazeuse est l'étape limitant la vitesse de réaction. Ces simulations numériques ont permis d'optimiser le traitement du toluène et d'améliorer le dimensionnement de réacteurs à plus grande échelle.

OLIVIER PIRIOU et al (2011) ont développé une étude numérique d'un cas-test en considérant un tronçon d'un bassin d'aération, dans lequel les écoulements sont contrôlés, et étudiés. L'impact des différents obstacles sur les paramètres caractéristiques des écoulements (vitesse de circulation de l'eau) et du transfert d'oxygène (rétention gazeuse) sont étudiés sur ce tronçon. Les coefficients de pertes de charges singulières générés par ces obstacles ont pu être déterminés (**voir figure (I.19)**).

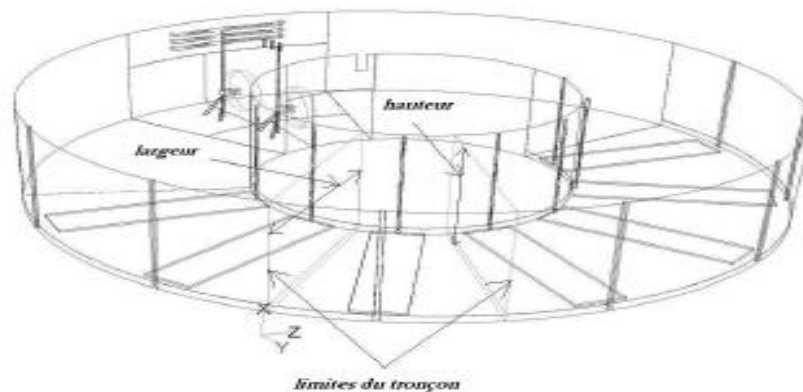


Figure (I.19): Choix du tronçon du cas test à partir du bassin réel

R. RIHANI et al(2011) ont pu caractériser des écoulements multiphasiques dans un réacteur spécifique qui est le **milli torus reactor** sans agitation (**voir figure(I.20)**). Pour cela, le code Fluent a été utilisé pour la simulation des flux air-eau. Les prédictions de la CFD ont été validées par les courbes expérimentales des temps de séjour d'un traceur. Le milli torus peut être utilisé dans le traitement des eaux usées. Ils ont utilisé le modèle diphasique Eulérien-Eulérien, supposé que l'écoulement est isotherme, adopté le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ réalisable pour modéliser la phase continue. Ils ont obtenu des contours et des courbes de la rétention de la phase gazeuse en fonction de la vitesse de circulation du liquide et celle du gaz.

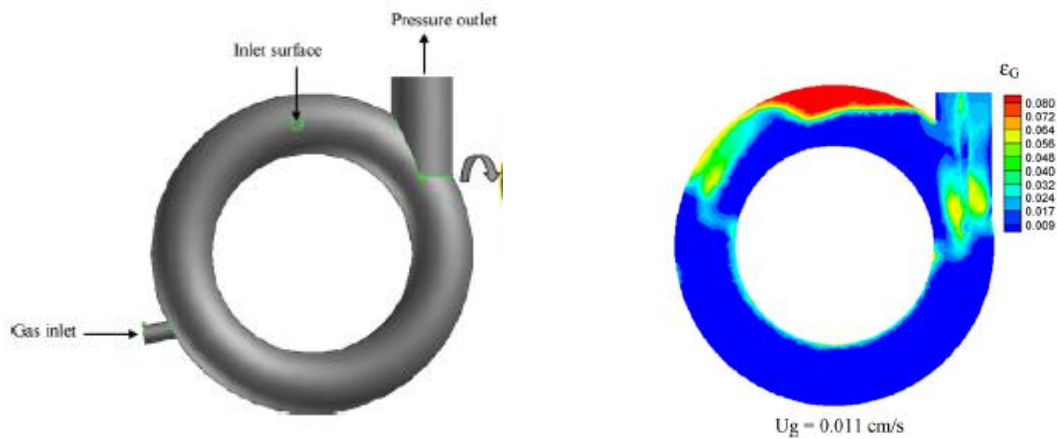


Figure (I.20): schéma du réacteur milli torus et profil de la rétention du gaz

YANN LE MOULLEC et al (2011) ont étudié expérimentalement et simulé numériquement un réacteur pilote aéré à boue activée sous forme d'un long canal (**voir figure(I.21)**). Les profils de concentration de O_2 , NO_3 , NH_4^+ et de la DCO ont été comparés à ceux obtenus par simulation avec trois approches pour la modélisation : l'approche par CFD, la modélisation par compartiments et l'approche systémique. Le modèle cinétique appliqué est celui de l'ASM1. Les trois approches ont permis une simulation raisonnable pour tous les profils de concentration sauf celui de l'ammonium dont les résultats de simulation étaient loin des résultats expérimentaux.

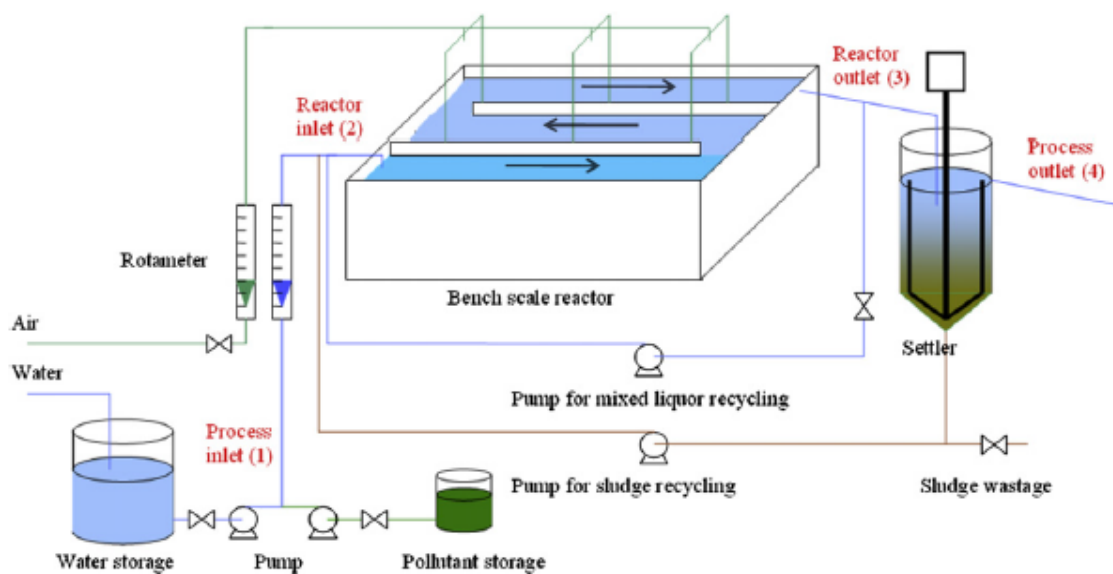
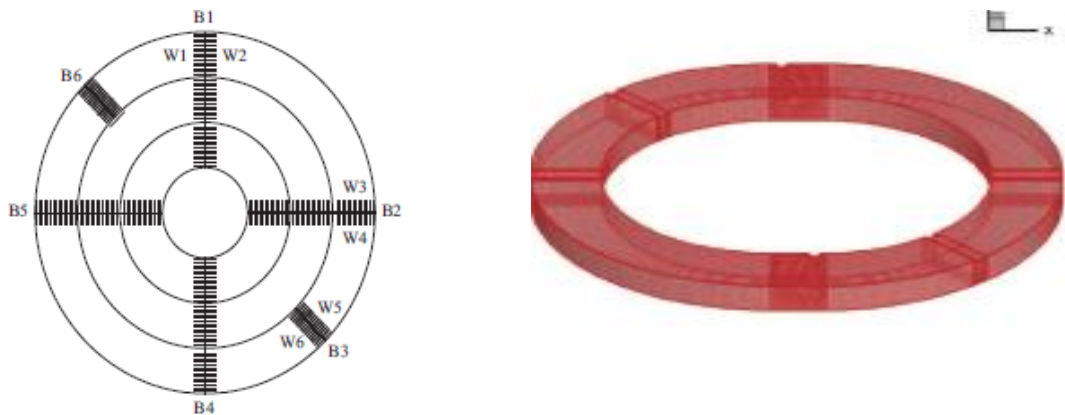


Figure (I.21) : schéma du réacteur pilote

XUESONG GUO et al(2012) ont considéré un bassin d'oxydation de type orbal dont les dimensions sont 71.3x65.3x4.5m (**voir figure (I.22)**). La dénitrification est principalement accomplie dans le canal extérieur (largeur 10 m) seulement les caractéristiques détaillées du champ d'écoulement et la distribution de l'oxygène dissous DO sont mal compris. Pour cela les auteurs de cette étude ont suivi in situ les champs de vitesse et les concentrations de l'oxygène. En outre, la simulation par le code Fluent montre que le champ de vitesse est hétérogène, par conséquent la distribution de l'oxygène dissous l'est aussi : des gradients de concentration axiaux et radiaux sont constatés. Ce qui a créé plusieurs zones anoxies et aérobies. Les réactions de nitrification et de dénitrification ont lieu simultanément. Les résultats de cette étude sont une source d'informations pour l'optimisation rationnelle des performances du bassin d'aération de type orbal.



Figure(I.22): Bassin orbal doté de six agitateurs rotatifs à disques B₁-B₆ et six appareils de mesure de vitesse w₁-w₆

ANGELIQUE DELAFOSSE et al(2013) Ces auteurs ont proposé une nouvelle approche couplée à la mécanique des fluides numérique pour prédire l'hydrodynamique tridimensionnelle dans un bioréacteur (**voir la figure(I.23)**) et son interaction avec la réaction biologique. Cette approche, peu coûteuse en temps de calcul, consiste à diviser le domaine en un nombre limité de volumes interconnectés où les propriétés de fluide (turbulence, concentration...) sont considérées comme étant homogènes. Les flux entre deux compartiments adjacents sont facilement calculables à partir des champs de vitesse obtenus par simulation numérique. L'évolution de l'agitation prédite par ce modèle, comparée aux résultats expérimentaux, montre que cette approche reproduit avec précision la distribution spatiale des vitesses et des concentrations durant le procédé de l'agitation.

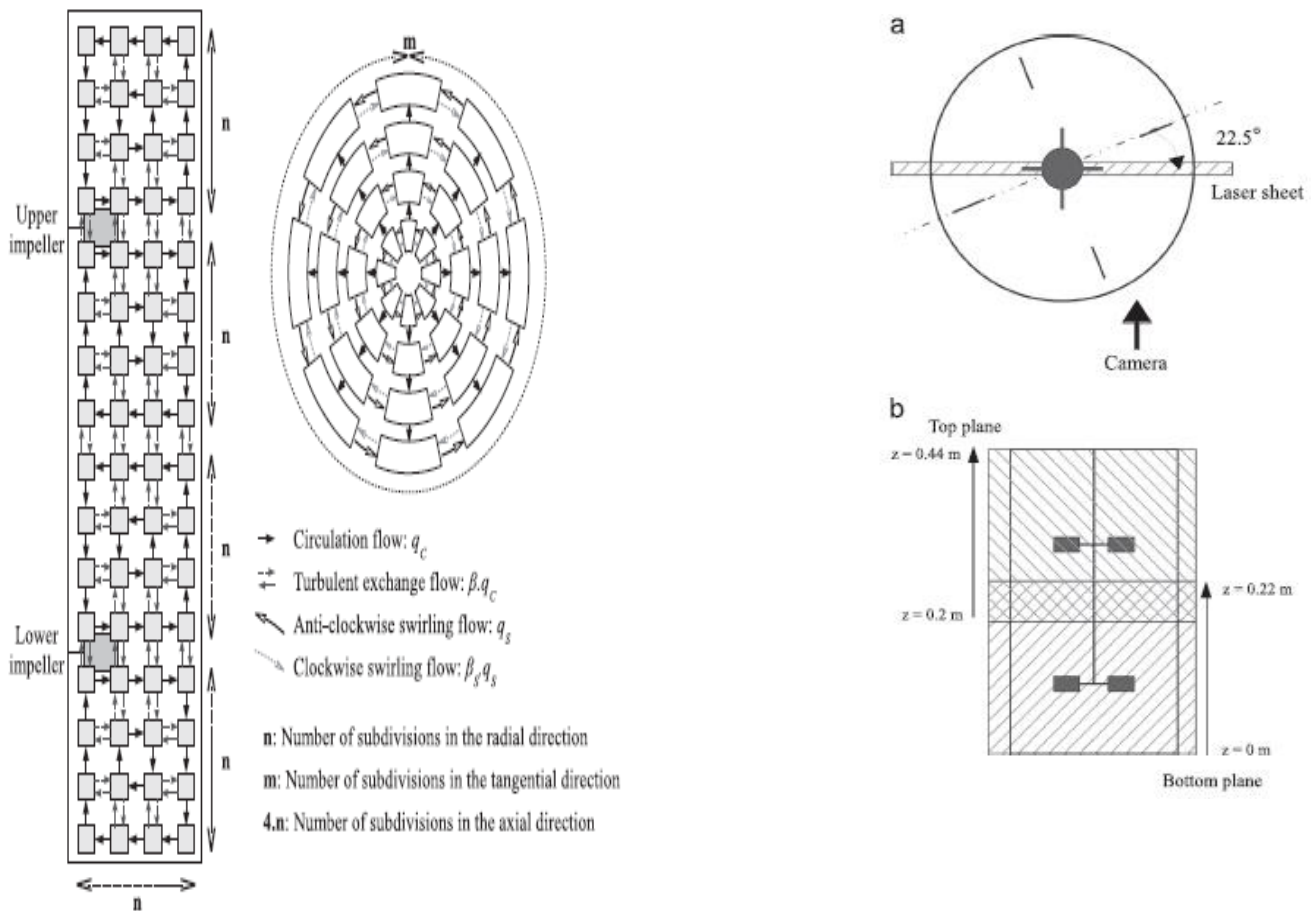


Figure (I.23): Configuration des compartiments dans un bioréacteur agité en continu doté de deux turbines Rushton et Mesures des champs de vitesse à l'aide d'une caméra 2 D-PIV

HAOXIE et al (2014) ont simulé par le code Fluent les écoulements diphasiques (liquide-solide) dans un bioréacteur de type carrousel (oblong), constitué de quatre canaux, possédant treize aérateurs de surface, neuf agitateurs submergés, et dont la capacité de traitement de la charge polluante est grande (**voir figure (I.24)**). L'originalité de ce travail est le fait qu'ils ont étudié le phénomène de décantation dans le bassin d'aération. Ils ont introduit une UDF (user-defined-fonction) qui définit la vitesse de décantation pour la simulation par Fluent, Cette vitesse ayant été modélisée expérimentalement. Enfin, ils ont pu simuler la distribution de la concentration de la phase solide et les champs de vitesse dans le réacteur. Les champs d'écoulements diphasiques résultats de ces simulations sont en bon accord avec les résultats expérimentaux obtenus sur site.

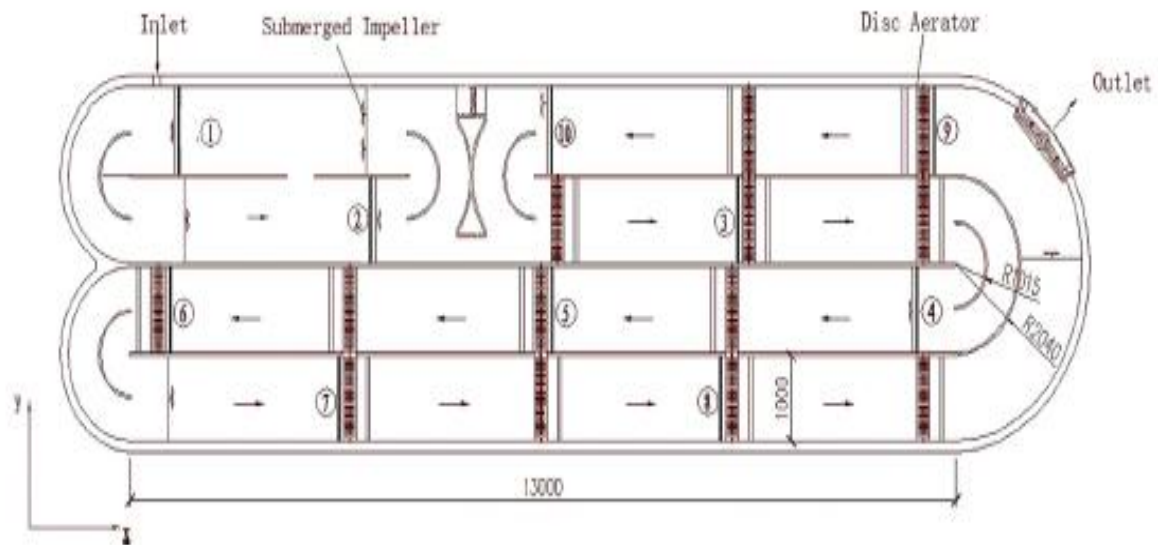


Figure (I.24): Schéma du bioréacteur

Cette revue bibliographique montre que l'application de la CFD à l'étude des écoulements de fluides, avec transfert de masse, se produisant dans les bioréacteurs est très efficace pour déterminer l'hydrodynamique et le transfert d'oxygène. C'est dans cette perspective que nous avons décidé de mener une étude qui consiste en l'utilisation des logiciels Gambit-Fluent pour la simulation des écoulements monophasiques (eau seule) et diphasiques (eau + bulles d'air) dans un réacteur annulaire aéré équipé de diffuseurs de fines bulles d'air et d'agitateurs à vitesses lentes et à grandes pâles.

Chapitre II: Formulation mathématique

II.1 Formulation mathématique

Dans notre problème, nous avons traité deux cas d'écoulements :

- Ecoulement monophasique (eau claire)
- Ecoulement diphasique (eau claire + bulles d'air)

II.2.1 Ecoulement monophasique

L'écoulement tridimensionnel, permanent et turbulent de l'eau liquide choisi dans notre travail est régi par les équations classiques de Navier Stokes. Le modèle de turbulence choisi est k-ε. Il est utilisé par tous les auteurs qui ont modélisé ce type d'écoulements (TANGUY(2003), VERMANDE (2005), FAYOLLE (2006)...).Le choix de travailler en 3D étant imposé par la nature de l'écoulement dans les bassins d'aération.

II.2.1.1 Equation de continuité

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{II.1})$$

II.2.1.2 Equation de transport de quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (\text{II.2})$$

Où:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (\text{II.3})$$

II.2.1.3 Modèle de turbulence k-ε standard

Il est basé sur le concept de **Boussinesq** reliant les contraintes de Reynolds aux taux de déformations moyens.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (\text{II.4})$$

Par analogie avec la viscosité laminaire caractérisée par une vitesse (des molécules) et une distance (libre parcours moyen), la viscosité turbulente est caractérisée par une vitesse \sqrt{k}

et une distance $l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$ (II.5)

Où:

$$k = \frac{\overline{u'^2}}{2} \quad (\text{II.6})$$

et

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II.7})$$

k et ε sont obtenus à partir de leurs équations de transport:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (\text{II.8})$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.9})$$

Avec:

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \left[\frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \quad (\text{II.10})$$

Les différents coefficients: $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ sont déterminés empiriquement alors que σ_k , σ_ε sont des nombres de Prandtl turbulents relatifs à l'énergie cinétique turbulente et au taux de dissipation, et sont donnés dans le tableau suivant :

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1	1.3

II.2.2 Ecoulement diphasique

La description des écoulements multiphasiques fait appel à la notion de fraction volumique notée α_q .

II.2.2.1 Equation de continuité

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (\text{II.12})$$

Avec:

\vec{V}_q : vitesse de la phase q

α_q : taux de présence de la phase q

ρ_q : masse volumique de la phase q

\dot{m}_{pq} : Masse transférée de la phase p à la phase q

\dot{m}_{qp} : Masse transférée de la phase q à la phase p

S_q : terme source de la phase q

n = nombre de phase présentes

II.2.2.2 Equation de conservation de quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \alpha_q \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{\text{lift}, q} + \vec{F}_{\text{vm}, q}) \quad (\text{II.13})$$

P: pression

$\bar{\tau}_q$: Tenseur des contraintes visqueuses de la phase q

$\vec{R}_{pq} = K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q)$	Terme d'échange de quantité de mouvement entre les phases dû au mouvement de l'interface
$\dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}$	Terme d'échange de quantité de mouvement entre les phases dû à l'échange de matière
$(\vec{F}_q + \vec{F}_{\text{lift}, q} + \vec{F}_{\text{vm}, q})$	Force extérieure, Force de portance, Force de masse ajoutée

Avec: K_{pq} : Coefficient adimensionnel appelé dans Fluent, interphase exchange coefficient.

La population des bulles d'air est considérée comme homogène et les phénomènes de cisaillement et de coalescence ne sont pas pris en considération. Les bulles sont considérées comme étant sphériques et de diamètre 3 mm environ.

Une des principales forces qui agit sur le mouvement des bulles est **la force de trainée**, le modèle **de Schiller et Naumann** décrit cette force de résistance qui est exercée sur les bulles d'air par leur environnement liquide.

Le coefficient de trainée est donné par:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_D = \frac{24}{Re}(1+0.15Re^{0.6}) \quad \text{si } Re \leq 1000 \\ C_D = 0.44 \quad \quad \quad \text{si } Re > 1000 \end{array} \right. \quad (\text{II.14})$$

L'hydrodynamique du bassin d'aération est principalement contrôlée par le poids, la force de trainée, la poussée d'Archimède, et la force de masse ajoutée (Cockx A 1997), (Simon S 2000).

En effet les forces qui s'exercent sur une bulle d'air sont:

-Son poids

-La poussée d'Archimède : est la force que subit un corps plongé en tout ou en partie dans un fluide soumis à un champ de gravité. Cette force provient de l'augmentation de la pression du fluide avec la profondeur. La pression étant plus forte sur la partie inférieure d'un objet immergé que sur sa partie supérieure. Il en résulte une poussée verticale orientée vers le haut.

-La force de trainée : est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide ou un gaz. Mathématiquement c'est la composante des efforts exercés sur le corps, dans le sens opposé à la vitesse relative du corps par rapport au fluide.

-La force de portance : est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement.

-La force de masse ajoutée : Elle naît du fait de l'accélération relative de la phase air par rapport à la phase eau. Pendant leur accélération, les particules d'air peuvent être ralenties par l'inertie du fluide porteur et subir ainsi une force dite de masse virtuelle. On dit que le conflit entre l'inertie de la masse de l'eau et l'accélération des bulles exerce une masse virtuelle sur les bulles.

- La force de Basset dans le cas d'un écoulement infini non stationnaire et à faible nombre de Reynolds, la force de traînée subit une augmentation matérialisée par la force de Basset.

Chapitre III: Formulation Numérique

III.1 Présentation du code fluent

Pour réaliser nos simulations, nous avons choisi d'utiliser le logiciel commercial FLUENT version 6.3-26, que nous présentons dans cette partie.

Comme tout logiciel de CFD, il est composé de trois éléments : **le préprocesseur**, **le solveur** et **le post processeur**.

La définition géométrique du problème à résoudre s'effectue à l'aide du **préprocesseur** GAMBIT. Il permet de représenter la géométrie du système, de définir le type de conditions limites aux frontières du domaine, de spécifier le type de matériaux (fluide ou solide). Il fournit aussi la possibilité de discrétiser le domaine, en proposant plusieurs algorithmes de maillage suivant sa géométrie.

Le **solveur** permet de définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression) dans lesquelles est effectuée la simulation, ainsi que la spécification des conditions aux limites. Enfin, il permet de choisir le processus itératif, en proposant notamment plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, et pour le couplage de la vitesse et de la pression. Il offre également une interface permettant de contrôler à tout moment l'état d'avancement des calculs.

Le **post processeur** est l'élément qui permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, mais surtout d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser les champs du vecteur vitesse, les champs de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées sur un segment, une section du domaine ou sur tout le volume. Il offre aussi la possibilité de tracer des courbes et de visualiser les lignes de courant ou la trajectoire de particules.

Fluent, code largement utilisé dans l'industrie aéronautique, automobile, offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Ces raisons ont motivé notre choix pour l'utilisation de ce logiciel.

III.2 Géométrie et paramètres physiques du problème

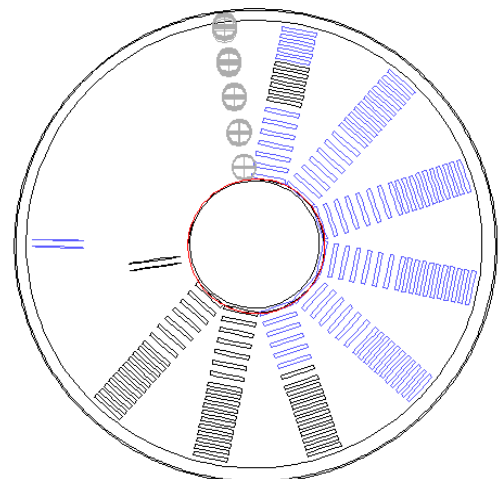
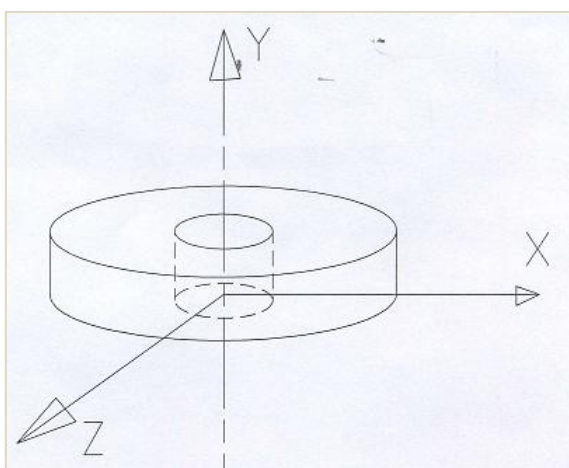
La géométrie du problème considéré est illustrée dans la **figure (III.1)**. L'écoulement se fait dans un bassin annulaire de rayon externe r_{ext} , rayon interne r_{int} , et de hauteur H . Le bassin est équipé de deux agitateurs identiques de type FLYGT SR 4410 CB 400 à larges pâles (plus de 2 m de diamètre) et à vitesse de rotation N . Ce qui correspond à un débit volumique Q chacun, le nombre de pompage est N_{qp} . Les deux agitateurs sont positionnés à une hauteur de 1.7 m du fond du bassin (radier). L'agitateur interne est incliné de 20° et l'agitateur externe de 10° . Leur axes de rotation se trouvent dans le plan horizontal. Ces agitateurs à vitesse lente ayant une poussée axiale et un débit de pompage élevés mais une action de cisaillement et de turbulence faibles sont les mieux adaptés pour la mise en circulation et l'homogénéisation des bassins d'activation

Le bassin est doté d'un système d'aération qui est constitué de 144 diffuseurs de type Flexazur-GVA ELASTOX P à fines bulles de formes rectangulaires, de longueur 1.732 m et de largeur 0.2 m, répartis sur huit modules ou rampes. Ces rampes sont disposées sur le fond du bassin et espacées de 30° les unes des autres. Elles sont alimentées par un surpresseur de débit égal à $2500 \text{ m}^3/\text{h}$ et de surpression égale à 5500 Pa. La surface totale d'injection de l'air est de 49.88 m^2 . L'air est injecté sous forme de bulles de 3 mm de diamètre, à une vitesse de 0.014 m/s .

Pour prendre en considération la présence des diffuseurs, on considère que le radier a une hauteur de rugosité de 6.15 mm correspondant à un coefficient de strickler de $60 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$.

Les parois du bassin ont une rugosité homogène et uniforme de hauteur 2.44 mm (coefficient de strickler $KS = 70 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$). Le plan de mesure est situé à 19.6° de l'axe de symétrie de la huitième rampe en comptant à partir des agitateurs.

Il n'y a aucune source de chaleur et l'écoulement se fait à l'air libre.



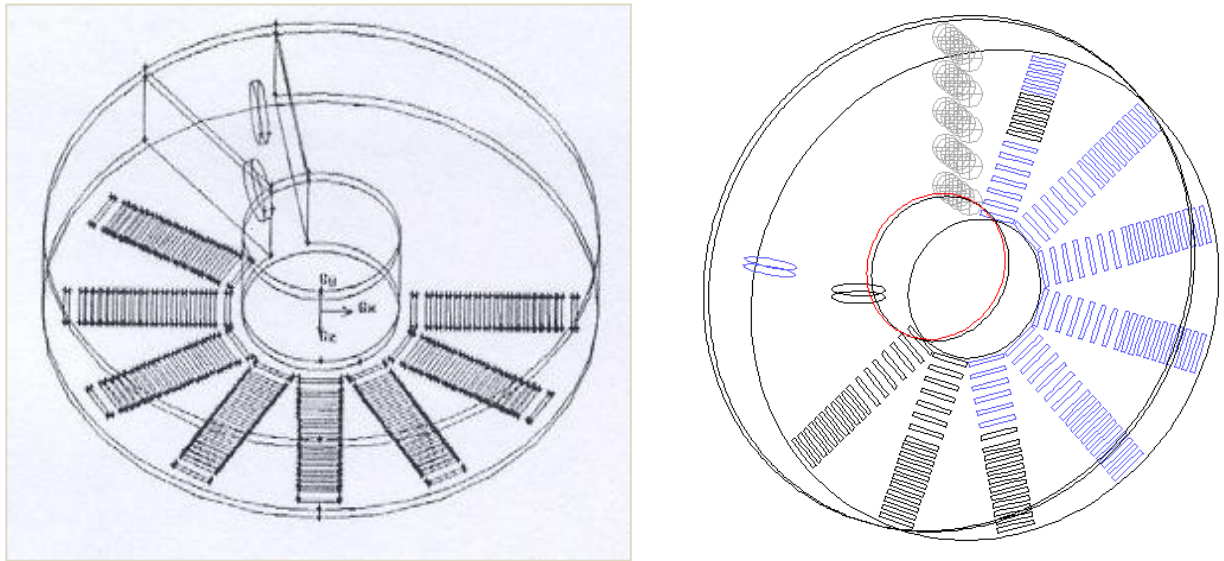


Figure (III.1): Géométrie du problème considéré (TANGUY 2003)

Les paramètres physiques du problème sont réunis dans les tableaux suivants :

Tableau (III.1): Dimensions du bassin

Rext (m)	Rint(m)	H(m)	H eau(m)	Volume(m ³)
11.45	3.25	4.20	4.15	1590

Tableau(III.2): Caractéristiques des agitateurs

Vitesse de rotation[rpm]	Diamètre des pâles[m]	Nqp	Poussée des agitateurs [N]	Débit de pompage [m ³ .h ⁻¹]	Puissance absorbée[KW]
27	2.5	0.41	2*1700	2*9277	2*3.20

III.3 Maillage

III.3.1 Maillage dans le cas de l'écoulement monophasique

La procédure de résolution des équations en volumes finis nécessite un maillage discrétisé en plusieurs éléments suffisamment fins de manière à résoudre les équations de Navier-Stokes jusqu'à la convergence. Cependant un maillage trop fin augmente de façon considérable le temps de calcul. C'est pourquoi un compromis a dû être trouvé. Le domaine de calcul est divisé en deux zones : le cône qui entoure les agitateurs est maillé avec un maillage non structuré tétraédrique, le reste du domaine est maillé à l'aide d'un maillage curviligne hexaédrique. Sachant que ce dernier suit l'écoulement et permet de minimiser les erreurs d'approximation des dérivées partielles, ce qui minimise le risque de divergence des calculs.

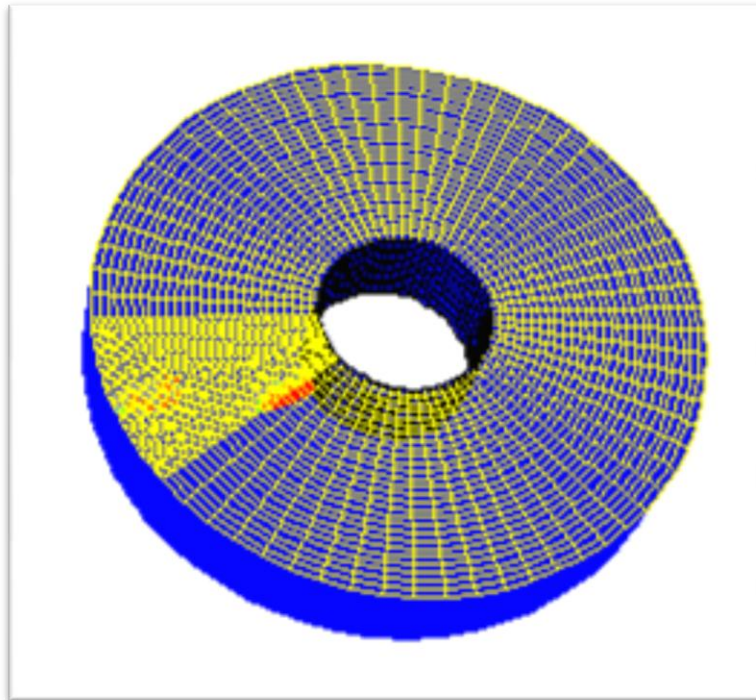


Figure (III.2) : Présentation du maillage du bassin

III.3.2 Maillage dans le cas de l'écoulement diphasique

Dans le cas diphasique, et vu la complexité de la géométrie : présence de diffuseurs, volume additif de 0.5 m de hauteur positionné sur la surface supérieure. Le bassin a été maillé avec un maillage non structuré tétraédrique dont le nombre de cellules atteint 131000.

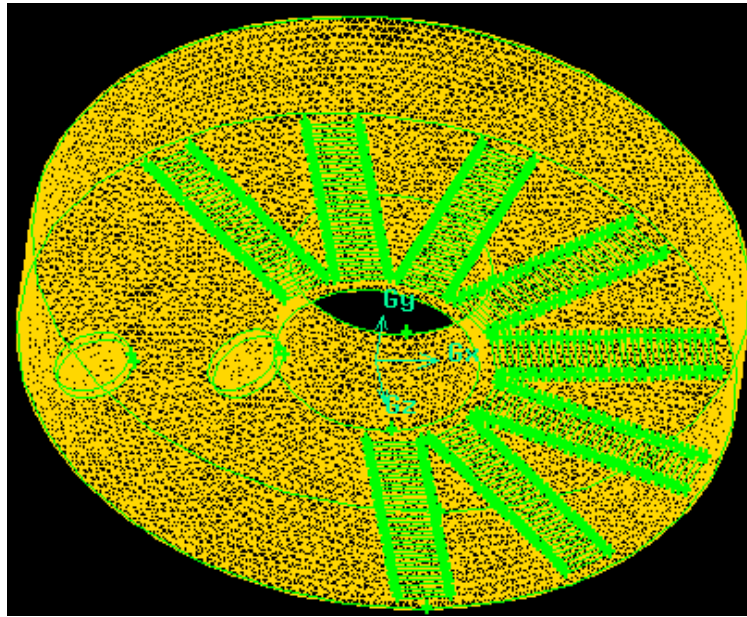


Figure (III.3): Présentation du maillage du bassin

III.4 Conditions aux limites

Les conditions aux limites pour les deux cas étudiés sont :

III.4.1 Conditions aux limites dans le cas de l'écoulement monophasique

Une fois que nous avons représenté la géométrie du système étudié, nous devons fixer des conditions aux limites du système sur les valeurs de la pression p , de la vitesse v , de l'énergie cinétique turbulente k et du taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente ϵ .

-Entrée: Aucune condition d'entrée, le bassin n'est doté ni de nourrice d'alimentation ni de sortie.

- Agitateurs:

Les agitateurs sont représentés par des cylindres de diamètre 2.5 m et d'épaisseur 0.35 m. Ils sont situés à une hauteur de 1.7 m du radier(fond du bassin).L'écoulement n'est pas simulé à l'intérieur de ces cylindres et le domaine de calcul est en fait le tore évidé du volume de ces cylindres situés à l'emplacement des deux agitateurs. Une vitesse constante est imposée sur la face avant de ceux-ci. Cette vitesse d'entrée ($0,525\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) est calculée à partir du débit de pompage des agitateurs ($9277\text{ m}^3/\text{h}$). La vitesse radiale est supposée négligeable.

Nous indiquons donc une condition « mur » sur la face latérale du cylindre. Nous spécifions une vitesse de sortie sur sa face arrière, sa norme est égale à celle de la vitesse d'entrée. Dans le code, nous affectons cette valeur d'un signe « moins » pour spécifier que, sur la face arrière, l'eau sort du domaine. Avec cette méthode, le flux d'eau aspiré à l'arrière de l'hélice est bien égal au flux refoulé par celle-ci par le devant. Des profils constants de turbulence ($k=0,0008$ et $\varepsilon =0,000057$), calculés selon les équations (III-1) et (III-2) **FAYOLLE (2006)**, sont également imposés sur les faces avant et arrière du cylindre. Donc pour les agitateurs, c'est une condition de vitesse d'entrée « velocity inlet » pour le fluide (eau liquide) avec des paramètres de turbulence à l'entrée:

$$k = 0.003U^2 \quad (\text{III-1})$$

$$\varepsilon = 6(\sqrt[3]{k})/d \quad (\text{III-2})$$

U: vitesse moyenne en sortie de jet en [m/s]

d: diamètre de l'agitateur

Vitesse des agitateurs (m/ s)	0.525
Energie cinétique turbulente (m2 / s2)	8.10^{-4}
Taux de dissipation (m2 /s3)	57.10^{-6}
Débit (m ³ / h)	2*9277

-Sortie: Aucune condition de sortie, le bassin n'est doté ni de nourrice d'alimentation ni de sortie

-Les parois:

C'est une condition de non glissement, sans transfert de chaleur. Pour le traitement près des parois, on a utilisé « **la fonction de paroi standard** » (standard wall function).

-Paramètre de la rugosité

Hauteur de rugosité k_s :

Fluent permet de prendre en compte la rugosité des parois par l'intermédiaire du coefficient k_s [$m^{1/3}s^{-1}$] appelé rugosité standard, rugosité de grain de sable ou rugosité équivalente selon Nikuradse.

Il est d'usage d'évaluer la rugosité à l'aide du coefficient K_s [$m^{1/3}s^{-1}$] de Strickler. Une relation entre K_s et k_s valable pour les écoulements à surface libre, turbulents et rugueux qui est:

$$K_s k_s = 8.2\sqrt{g} \quad (\text{III-3})$$

Il est ainsi possible, à partir des valeurs connues de K_s de calculer k_s et de l'introduire dans le code de calcul. Dans Fluent la valeur par défaut est zéro, ce qui correspond à des murs très lisses. Pour prendre en considération l'effet de la rugosité, il faut spécifier une valeur non nulle pour k_s . La rugosité des parois latérales du bassin est estimée à $K_s = 70$ [$m^{1/3}s^{-1}$] soit une hauteur de rugosité de 2,44[mm]. Nous estimons que le radier du bassin est moins lisse. Cela permet de tenir compte des rampes de diffuseurs. Nous prenons donc $K_s = 60$ [$m^{1/3}s^{-1}$] soit $k_s = 6,15$ mm (TANGUY(2003)).

- La surface libre: condition de cisaillement nul (zéro shear stress)

La surface libre supérieure est supposée indéformable, en régime monophasique le gradient de la variable suivant la direction perpendiculaire à la surface libre est nul. Donc, on peut imposer une condition de symétrie sur cette limite. Nous modélisons, sous Fluent, la surface libre comme étant un plan de symétrie au travers duquel les flux convectifs et diffusifs sont nuls (SIMON (2000), TANGUY(2003), VERMANDE (2005), FAYOLLE(2006)...

III.4.2 Conditions aux limites dans le cas diphasique

Dans le cas diphasique, on ajoute deux conditions supplémentaires au cas monophasique :

-Rampes d'aération

La condition aux limites est velocity-inlet dans la phase gaz, la vitesse à spécifier est 0.014 [m/s]. La fraction volumique est comprise entre 0 et 1.

- Surface libre

La surface libre du bassin est sujette à beaucoup de déformations dues au dégazage des bulles d'air pour cela, on a rajouté un volume de 0.5 m d'air au dessus de la surface supérieure du bassin pour pouvoir laisser la surface d'eau libre de se déformer et imposer à la face supérieure composée d'air une condition au limite de pression atmosphérique. Cette face supérieure sera donc définie comme étant une pression de sortie. (TANGUY 2003)

III.5 Schémas de discrétisation

Les schémas de discrétisation pour les deux cas étudiés sont:

III.5.1 Schéma de discrétisation dans le cas monophasique

MODELE	K- ϵ
Pression	Standard
Quantité de mouvement	Schéma 2 ^{eme} ordre amont
Couplage vitesse - pression	SIMPLE
Taux de dissipation	Schéma 2 ^{eme} ordre amont
Energie cinétique turbulente	Schéma 2 ^{eme} ordre amont

III.5.2 Schéma de discrétisation dans le cas diphasique

Le modèle de résolution des écoulements diphasiques adopté est Eulérien-Eulérien, Fluent propose plusieurs modèles de turbulence reposant sur le modèle K- ϵ . Le modèle de dispersion (**Dispersed Turbulence Model**) proposé par Fluent, est applicable dans le cas où la concentration de la phase dispersée est faible et lorsqu'il y'a nettement une phase primaire continue et une phase secondaire dispersée. Dans le cas de notre bassin, la phase continue est

l'eau et la phase dispersée sont les bulles d'air éparpillées dans l'eau. . En effet, la fraction volumique de l'air dans les bassins d'aération dépasse rarement 1% selon la bibliographie.

Le modèle K- ϵ du mélange a été utilisé par **TANGUY 2003** et le modèle K- ϵ poly dispersé par **VERMANDE (2005)** prenant en compte le transport et la dissipation de l'énergie turbulente.

MODELE DIPHASIQUE	K- ϵ Eulérien-Eulérien Dispersed
Quantité de mouvement	Schéma 2 ^{eme} ordre amont
Volume fraction	Schéma 1 ^{er} ordre
Couplage vitesse - pression	Phase coupled SIMPLE
Taux de dissipation turbulente	Schéma 2 ^{eme} ordre amont
Energie cinétique turbulente	Schéma 2 ^{eme} ordre amont

III.6 Critère de convergence

La convergence sous fluent est principalement surveillée suivant la valeur des résidus des différents paramètres de l'écoulement, le logiciel cessera dès lors que tous les résidus calculés sont sous la valeur du critère de convergence entré par l'utilisateur (10^{-3} au minimum). Cette valeur est à fixer selon le degré de précision désiré de la solution approchée par le code de calcul.

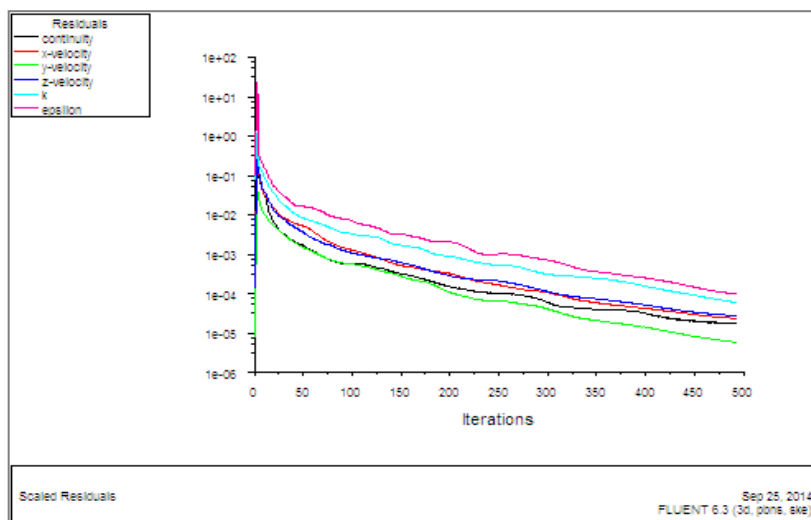


Figure (III.4): courbes des résidus

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des principales simulations numériques permettant la caractérisation des écoulements monophasiques et diphasiques dans le bassin annulaire choisi.

La première partie du travail sera consacrée à l'écoulement de l'eau claire. Deux effets seront étudiés :

- L'effet de la rugosité
- L'effet de la vitesse de rotation.

La seconde partie concernera l'écoulement diphasique (eau claire+bulles d'air) avec l'introduction de l'air à travers des diffuseurs positionnés dans le radier.

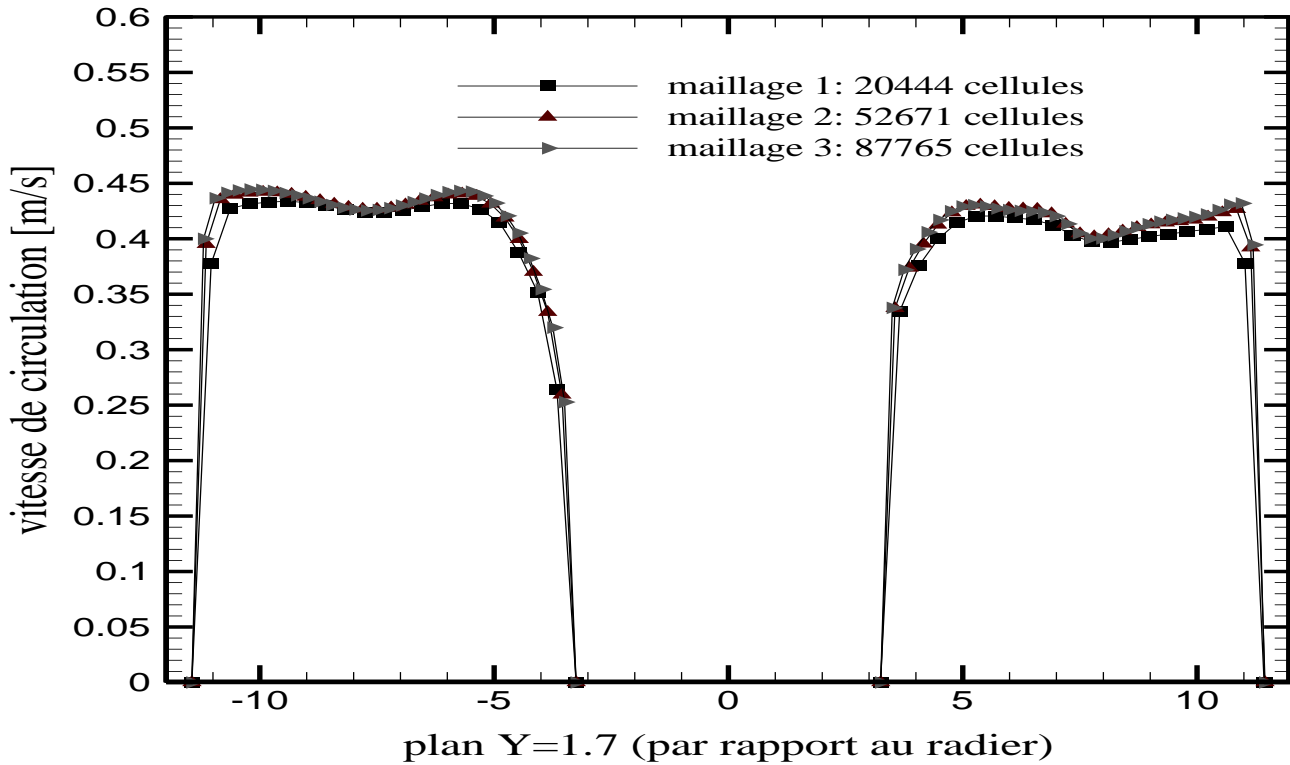
Trois effets seront étudiés:

- L'effet de la vitesse de circulation
- L'effet du diamètre des bulles d'air
- L'effet du débit d'air.

IV.2 Effet du maillage sur la solution numérique

Pour examiner et évaluer l'indépendance du maillage de la solution, trois maillages non-uniformes sont employés pour les simulations dans ce travail: 20444, 52671 et 87765 cellules, pour: une vitesse de rotation $N= 27$ rpm, une vitesse à la sortie des agitateurs est de $U=0.525$ m/s, une hauteur de rugosité homogène des parois $k_s = 2.44$ mm et une hauteur de rugosité homogène du radier $k_s = 6.15$ mm.

La **figure (IV.1)** montre les profils de vitesse selon la finesse du maillage dans tout le bassin à une hauteur de 1.7 m du radier. On constate que les trois simulations donnent pratiquement le même résultat.



Figure(IV.1): Résultat du test de maillage. Evolutions similaires des profils de vitesse selon la finesse du maillage dans le réacteur annulaire.

Dans le présent travail et pour cette géométrie, le maillage composé de 52671 cellules est celui qui sera adopté dans la suite des calculs dans le cas monophasique.

IV.3 Validation du code de calcul

Afin de vérifier l'exactitude de l'étude numérique actuelle, le code numérique a été validé en comparant la valeur de la vitesse moyenne simulée dans la présente étude à celle obtenue par les mesures expérimentales de Tanguy.

Ces mesures ont été effectuées en eau claire, et sans aération. La hauteur d'eau dans le bassin était alors de 4,15 m. Les mesures au nombre de vingt ont été effectuées à l'aide d'un appareil de mesure de vitesses, sur cinq verticales (les distances : 0,5m, 2,25m, 4m, 5,75m et 7,5m du bord extérieur du bassin) et quatre profondeurs (les hauteurs : 0,5m, 1,5m, 2,5m et 3,48m prises à partir du radier). Les incertitudes de mesure varient entre 5 et 10%.

Les résultats expérimentaux de Tanguy sont réunis dans le tableau (IV.1) et les résultats de la simulation actuelle sont réunis dans le tableau (IV.2).

Ces résultats ont été obtenus avec une rugosité homogène $k_s = 2.44$ mm pour les murs du bassin et $k_s = 6.15$ mm pour le radier. La vitesse à la sortie des agitateurs étant $U = 0.525$ [m/s].

	Distance du Bord extérieur [m]	0.5	2.25	4	5.75	7.5	Moyennes Des horizontales [m/s]
IMMERSION[m]	Fond+3.48m	0.5656	0.4888	0.4834	0.4560	0.2952	0.4578
	Fond+2.5 m	0.5984	0.5391	0.5016	0.4267	0.2258	0.4583
	Fond+1.5 m	0.5984	0.6185	0.5692	0.4286	0.2112	0.4852
	Fond+0.5 m	0.4779	0.6021	0.5948	0.5436	0.3354	0.5108
	Moyennes des verticales [m/s]	0.5601	0.5621	0.5372	0.4637	0.2669	Moy = 0.4780

Tableau (IV.1): Résultats des vitesses mesurées dans le plan de mesure en [m/s] mémoire de (TANGUY 2003)

	Distance du Bord extérieur [m]	0.5	2.25	4	5.75	7.5	Moyennes Des horizontales [m/s]
IMMERSION[m]	Fond+3.48m	0.4066	0.4116	0.4269	0.4369	0.3495	0,4063
	Fond+2.5 m	0.4135	0.4286	0.4321	0.4449	0.3456	0,4129
	Fond+1.5 m	0.3962	0.4389	0.4356	0.4515	0.3382	0,4121
	Fond+0.5 m	0.3722	0.4385	0.4297	0.4527	0.3802	0,4147
	Moyennes des verticales [m/s]	0,3971	0,4294	0,4311	0,4465	0,3534	Moy = 0.4115

Tableau (IV.2): Résultats des vitesses simulées dans le plan de mesure

La comparaison des vitesses de circulation moyennes, résultats des deux tableaux fait ressortir un écart de 13.9%. Un bon accord est trouvé entre les résultats de la présente étude et les résultats expérimentaux de **TANGUY(2003)**.

En outre, ce léger écart peut être expliqué par la précision des mesures expérimentales de Tanguy qui est de l'ordre de 5 à 10% et par le nombre de prélèvements insuffisants. D'après (**FAYOLLE (2006)**), le nombre de prélèvements devrait être augmenté pour avoir des moyennes de vitesse plus représentatives dans la section de mesure. Un prélèvement par m^2 est préconisé. Comme la section du bassin est de $34 m^2$, le nombre total devrait être augmenté à 30, 35 prélèvements.

En outre, on remarque que la distribution de vitesses est plus homogène pour les résultats de la simulation et concernant les résultats expérimentaux de (**TANGUY (2003)**) les valeurs de vitesses proches du bord extérieur sont plus élevées que celles proches du bord intérieur et ceci est dû à l'effet de courbure. Ce gradient de vitesse est aussi présent pour nos simulations.

IV.4 Première partie : Simulation de l'écoulement monophasique

L'écoulement monophasique est strictement régi par les équations classiques de Navier-stokes en régime turbulent en prenant comme modèle de turbulence, le modèle standard k- ϵ .

Le but principal de l'étude en condition d'agitation sans aération est de s'assurer de l'absence de zones de décantation dans le bassin.

L'influence de la rugosité (des parois du bassin et du radier) et de la vitesse de rotation des agitateurs a été étudiée.

IV.4.1 Effet de la rugosité

Dans le but d'étudier l'effet de la variation de la hauteur de rugosité du bassin sur la vitesse de circulation. Deux cas seront étudiés :

Le premier cas est celui où la rugosité varie uniformément sur toutes les parois y compris le radier. Et le second est celui où la rugosité du radier est maintenue constante $k_s=6.15\text{mm}$, seule la rugosité des parois varie. Le paramètre maintenu constant est le débit volumique, soit une vitesse U de l'ordre de 0.525 m/s à la sortie des agitateurs.

IV.4.1.1 Effet de la rugosité uniforme dans le bassin

Quatre simulations ont été effectuées pour différentes rugosités homogènes et uniformes : 0.29, 2, 4 et 6 mm. Les figures de (IV.2) à (IV.5) illustrent la comparaison des profils de vitesse pour différentes rugosités et à plusieurs hauteurs à partir du radier, le long du bassin. La figure (IV.6) illustre la comparaison des profils à une rugosité uniforme fixe pour plusieurs hauteurs. La figure (IV.7) illustre la comparaison des contours de vitesse pour différentes hauteurs à partir du radier, le long du bassin. Ces contours ont été tracés pour une rugosité homogène et uniforme dans tout le bassin y compris le radier.

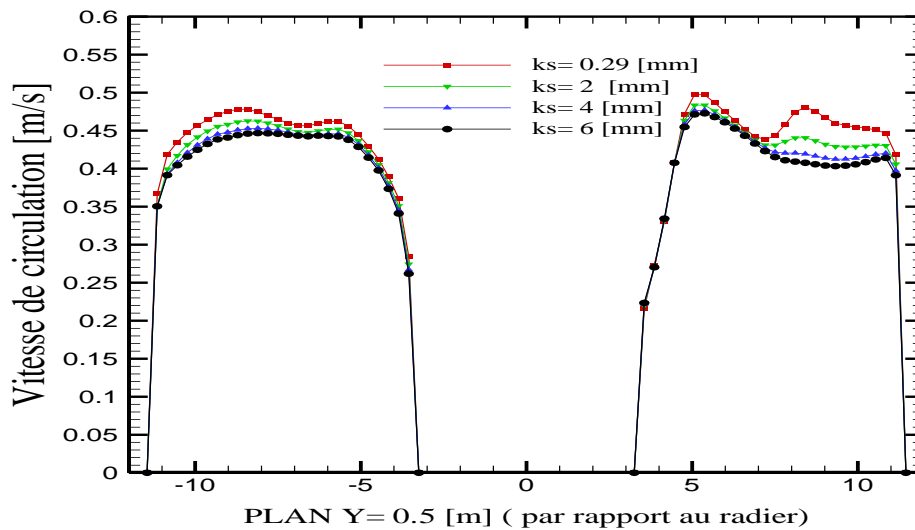


Figure (IV.2): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation dans tout le bassin pour différentes rugosités dans le plan $Y=0.5$ m

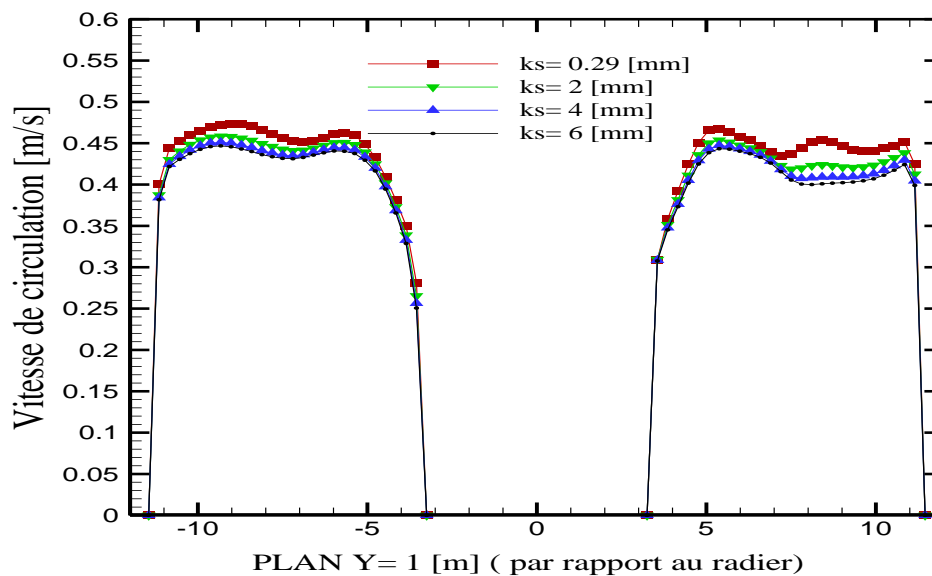


Figure (IV.3): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation dans tout le bassin pour différentes rugosités dans le plan $Y=1$ m

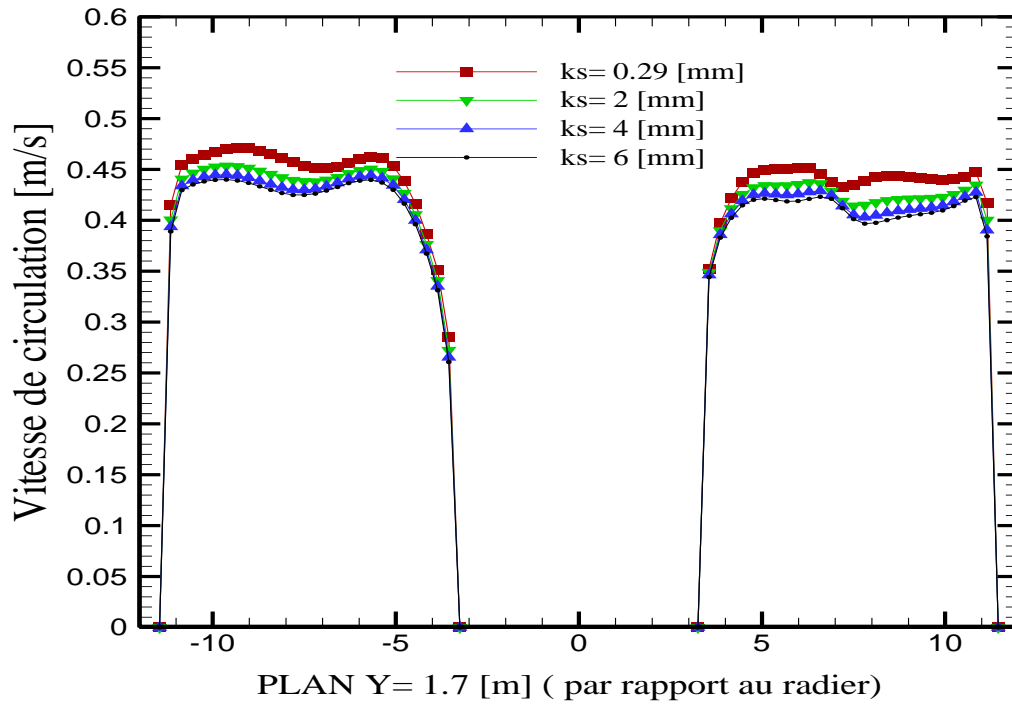


Figure (IV.4): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation dans tout le bassin pour différentes rugosités dans le plan $Y=1.7$ m

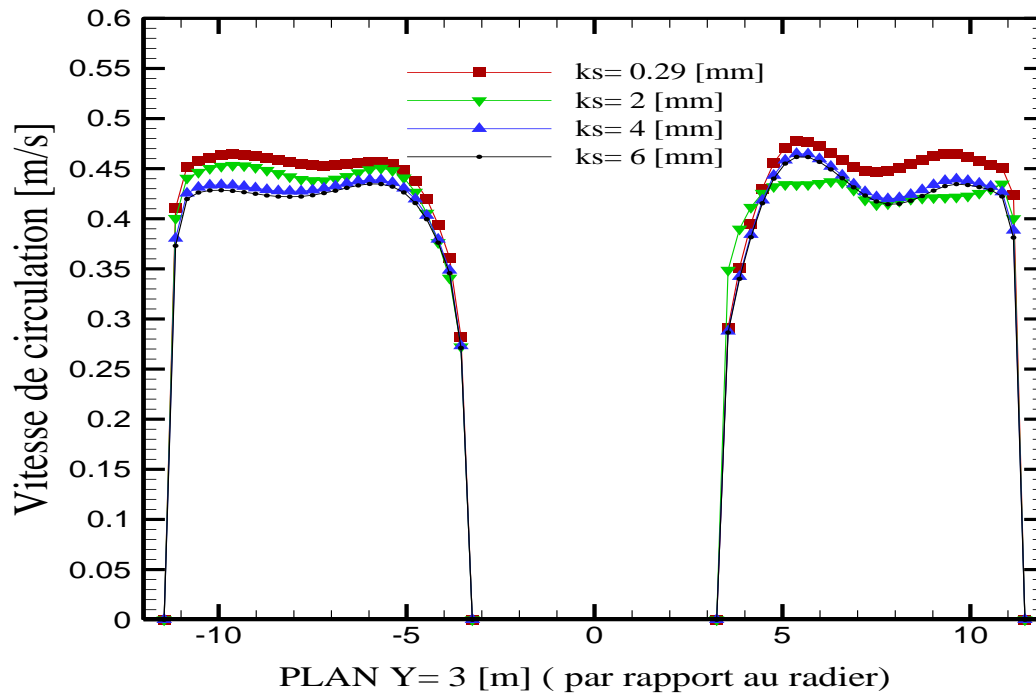


Figure (IV.5): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation dans tout le bassin pour différentes rugosités dans le plan $Y=3$ m

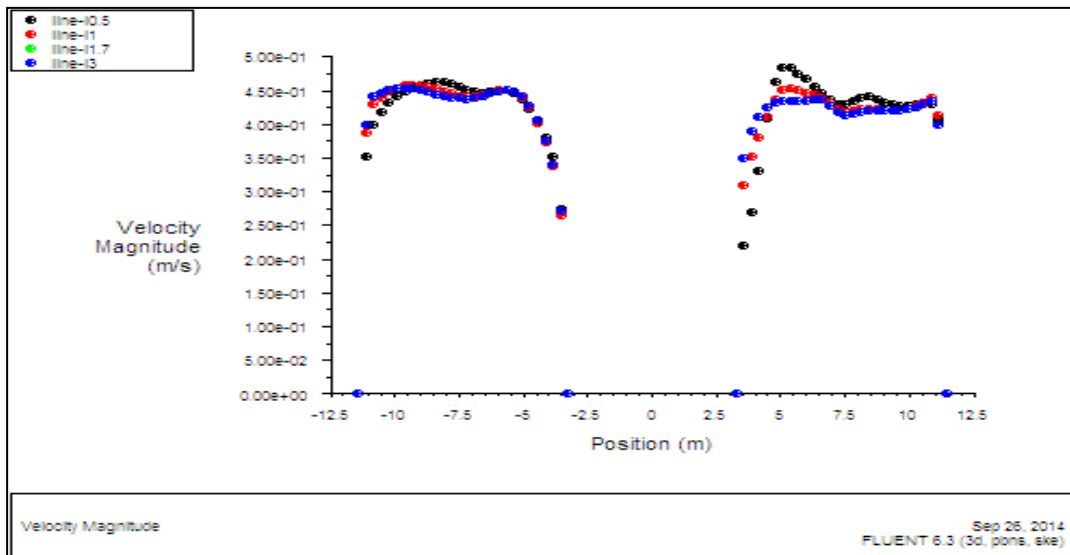


Figure (IV.6): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation dans tout le bassin pour différentes hauteurs pour une rugosité uniforme de 2 mm

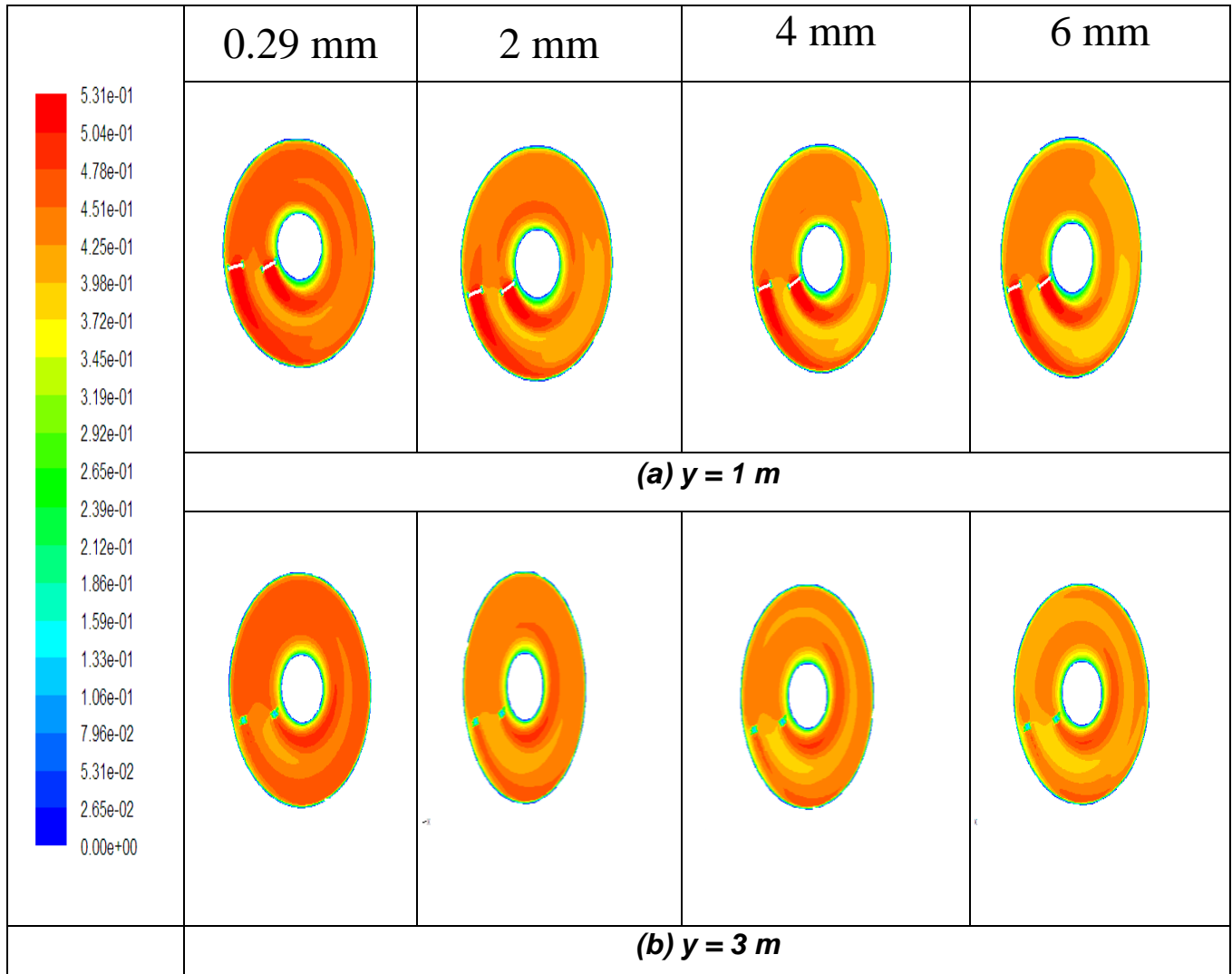


Figure (IV.7): Contours de vitesse $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ dans deux plans horizontaux pour les simulations à différentes rugosités : 0.29, 2, 4, 6 mm.

Le tableau (IV.3) résume les valeurs des vitesses moyennes et les écarts négatifs obtenus en augmentant la rugosité dans tout le bassin.

	Vitesses de circulation [m. s ⁻¹]			
Rugosité [mm]	0.29	2	4	6
U _L [m.s ⁻¹]	0.4338	0.4199	0.4124	0.4079
Ecart	-	- 3.20 %	- 4.93 %	- 5.97 %

Tableau(IV.3): Moyennes des vitesses de circulation en fonction de la rugosité.

On constate qu'en augmentant la hauteur de rugosité, les vitesses diminuent dans tout le bassin, ce qui est en accord avec les résultats de **VERMANDE (2005)**. On remarque cependant que cette influence est plus sensible dans les zones extérieures, au voisinage de la paroi interne cette influence est cachée par l'effet de courbure. Cependant, l'évolution des profils de la vitesse ne montre pas d'influence significative de la hauteur du bassin.

IV.4.1.2 Effet de la rugosité non uniforme dans le bassin

Dans le but d'étudier l'effet de la variation de la hauteur de la rugosité des murs, en considérant que la rugosité du radier du bassin est constante et égale à 6.15 mm, et ceci afin de tenir compte de la présence des diffuseurs d'air répartis sur le fond du bassin, quatre simulations ont été effectuées pour différentes rugosités homogènes : 0.29, 2, 4 et 6 mm. Le paramètre maintenu constant est le débit volumique, soit une vitesse de l'ordre de 0.525 m/s à la sortie des agitateurs. Les figures (IV.8) à (IV.11) illustrent la comparaison des profils de vitesse pour différentes rugosités non uniformes à plusieurs hauteurs à partir du radier, le long du bassin d'aération. La figure (IV.12) illustre différents profils de vitesse pour une rugosité fixe et pour plusieurs hauteurs.

La figure (IV.13) illustre la comparaison des contours de vitesse pour différentes hauteurs à partir du radier, le long du bassin. Ces contours ont été tracés pour différentes rugosités homogènes et non uniformes dans tout le bassin (y compris le radier).

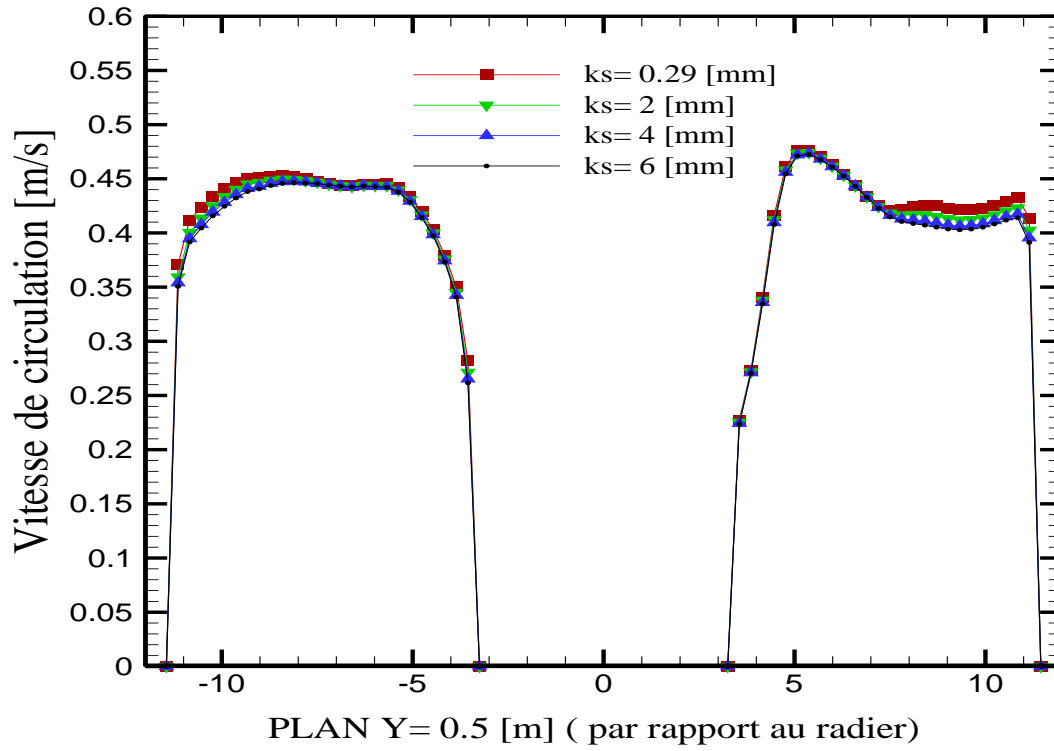


Figure (IV.8): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation dans tout le bassin pour différentes rugosités dans le plan $Y=0.5$ m.

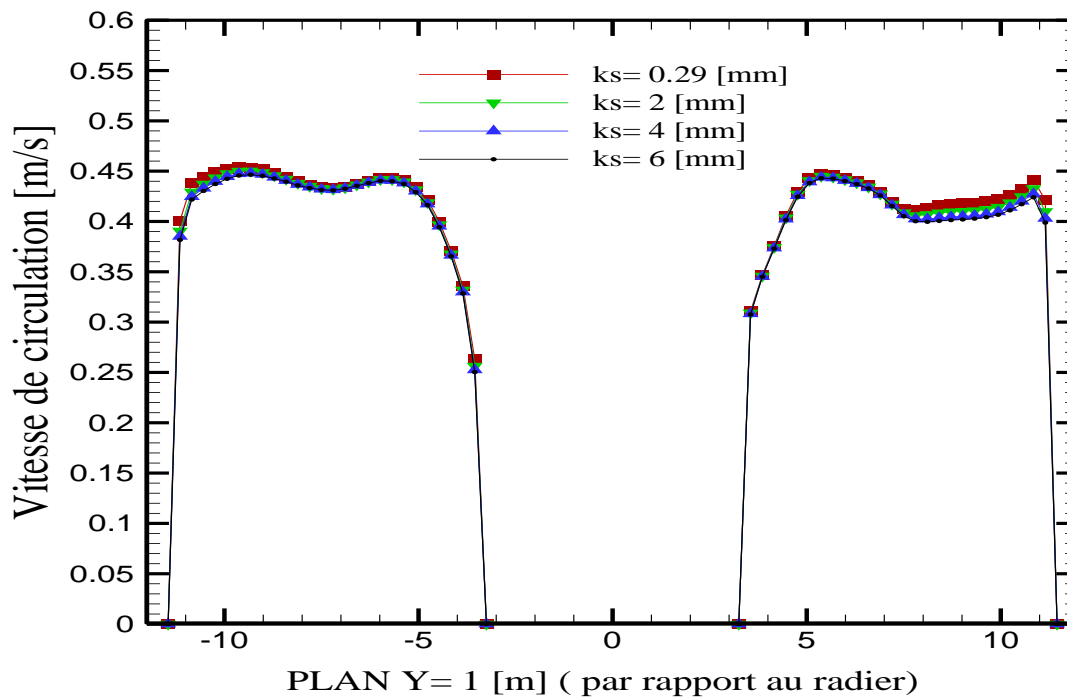


Figure (IV.9): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation dans tout le bassin pour différentes rugosités dans le plan $Y=1$ m.

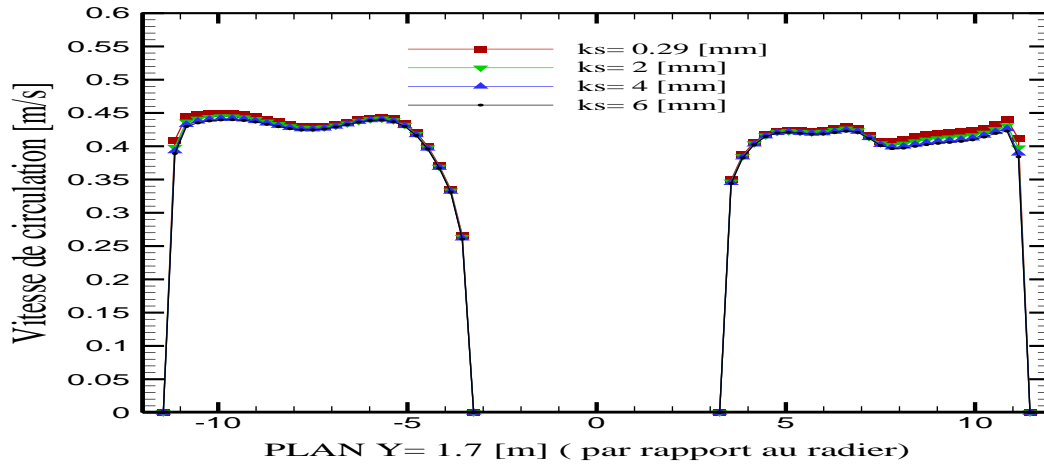


Figure (IV.10): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation dans tout le bassin pour différentes rugosités dans le plan $Y= 1.7$ m.

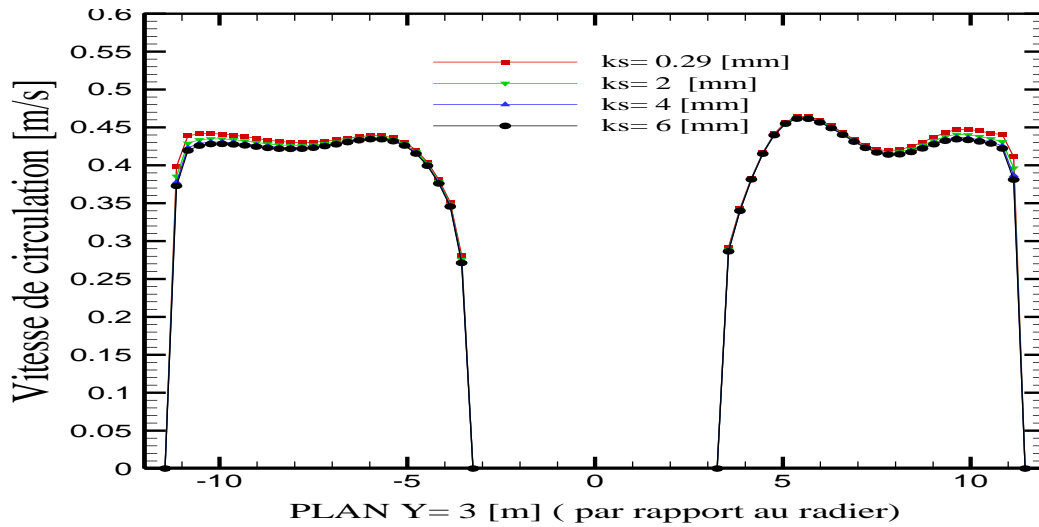


Figure (IV.11): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation dans tout le bassin pour différentes rugosités dans le plan $Y= 3$ m

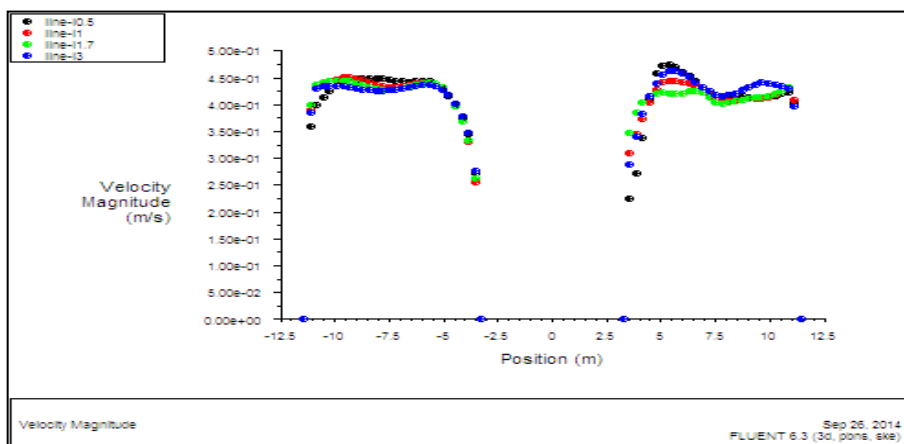


Figure (IV.12): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation dans tout le bassin pour différentes hauteurs à une rugosité des parois de 2 mm (celle du radier est 6.15 mm)

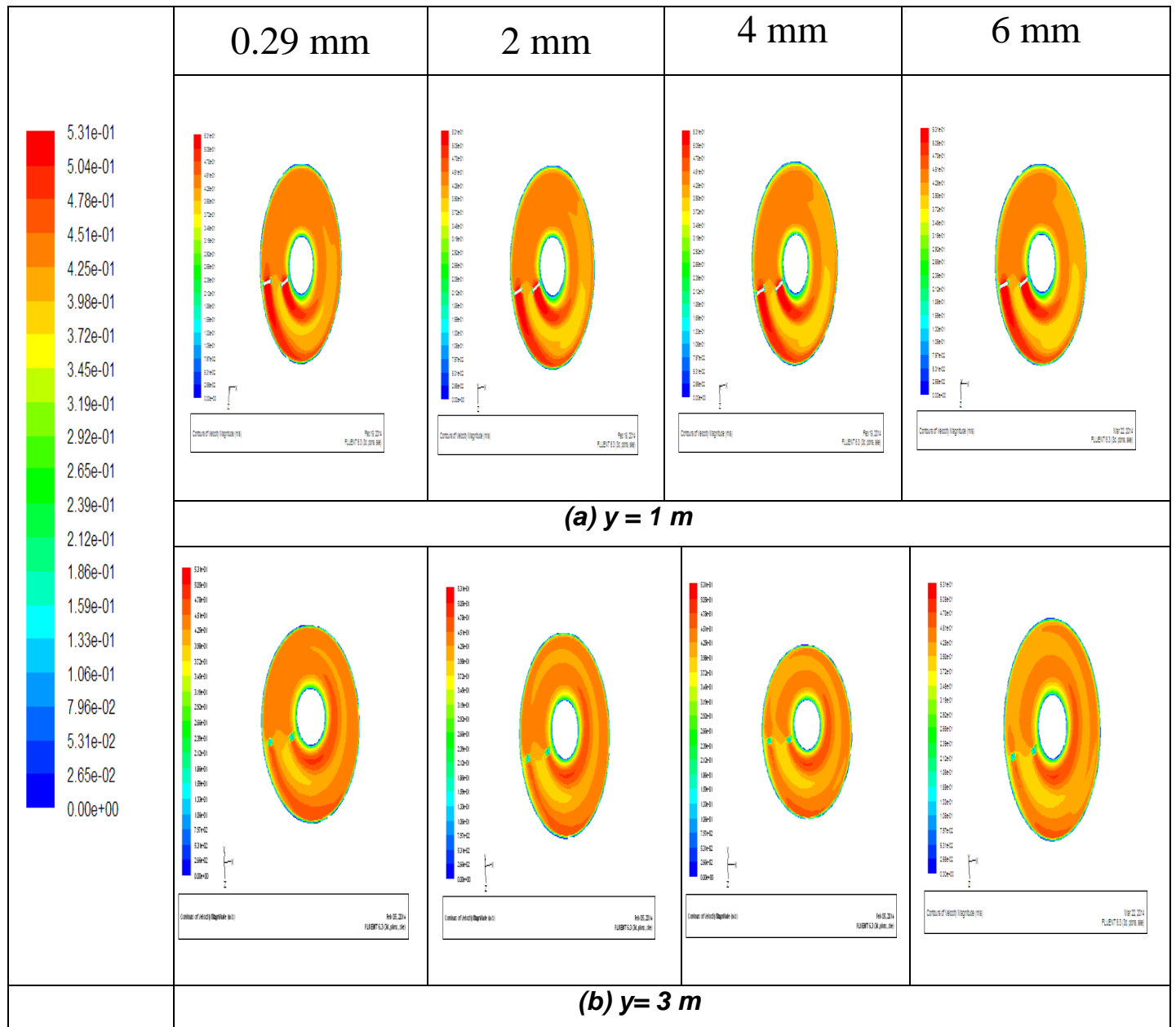


Figure (IV.13): Contours de vitesse [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] dans deux plans horizontaux pour les simulations à différentes rugosités.

	Moyennes de vitesses de circulation [$m.s^{-1}$]			
Rugosité [mm]	0.29	2	4	6
U_L [$m.s^{-1}$]	0.4175	0.4126	0.4096	0.4078
Ecart	-	-1.17 %	-1.89 %	-2.32 %

Tableau(IV.4): Moyennes de vitesses de circulation en fonction de la rugosité des parois (rugosité du radier $k_s = 6.15$ mm)

IV.4.2 Effet de la vitesse de rotation

Dans le but d'étudier l'effet de la variation de la vitesse de rotation sur l'écoulement, quatre simulations ont été effectuées pour différentes vitesses de rotation des agitateurs : 27, 32, 35, 40 rpm. Les paramètres maintenus constants dans cette section sont : la hauteur de rugosité $k_s = 2.44$ mm sur les parois et la présence des diffuseurs sur le radier, ce qui correspond à une hauteur de rugosité de 6.15 mm.

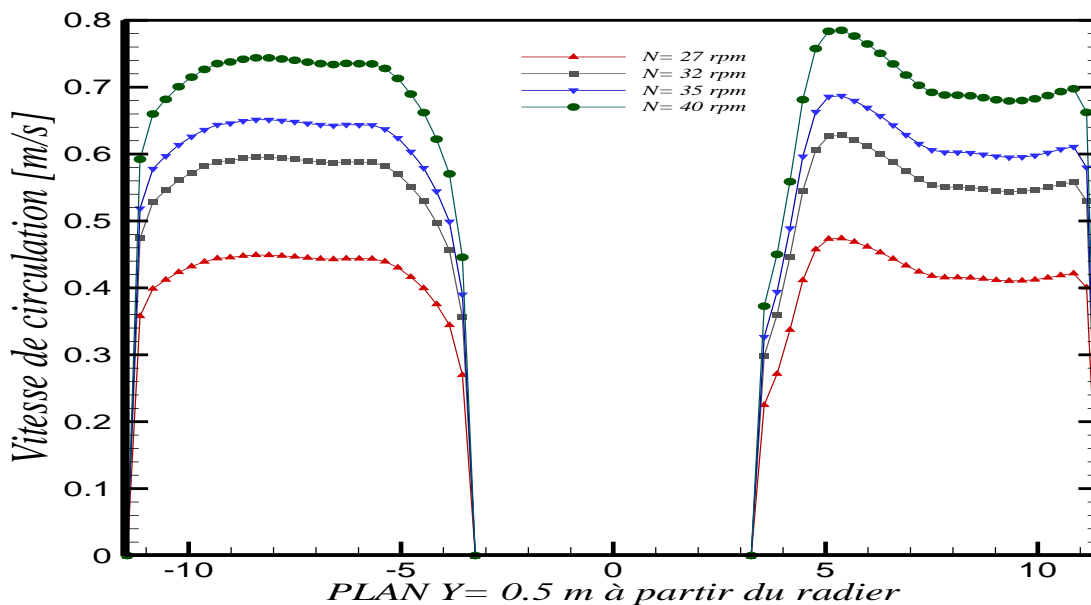


Figure (IV.14): Profils de vitesses [$m.s^{-1}$] pour différentes vitesses de rotation des agitateurs dans le plan $Y = 0.5$ m

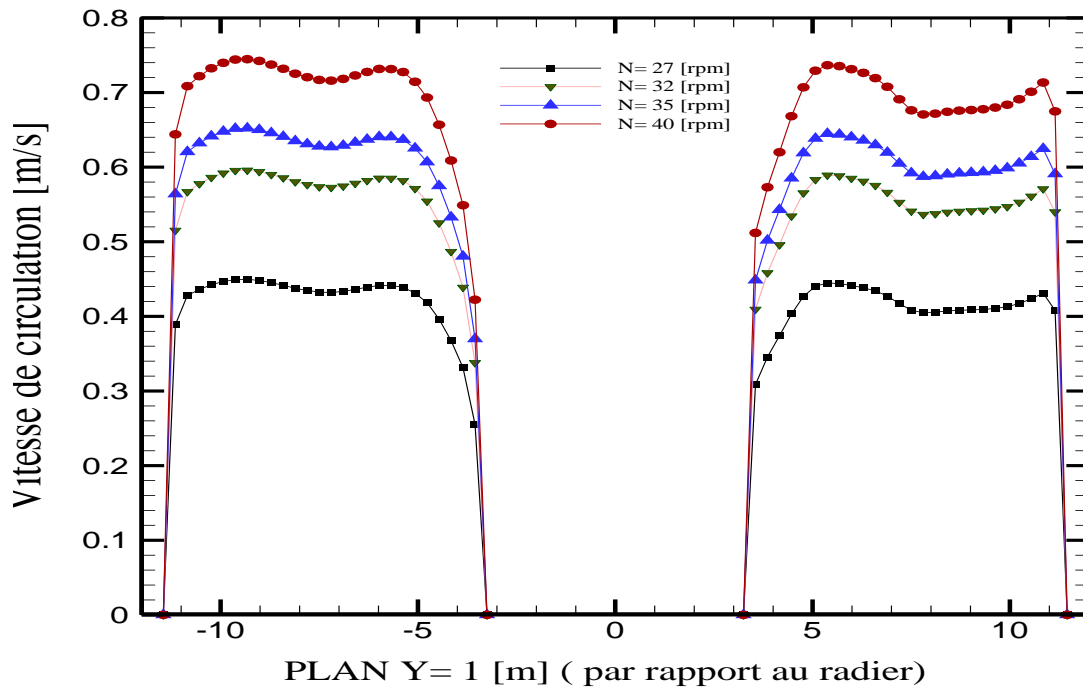


Figure (IV.15): Profils de vitesses [m.s⁻¹] pour différentes vitesses de rotation des agitateurs dans le plan Y=1 m

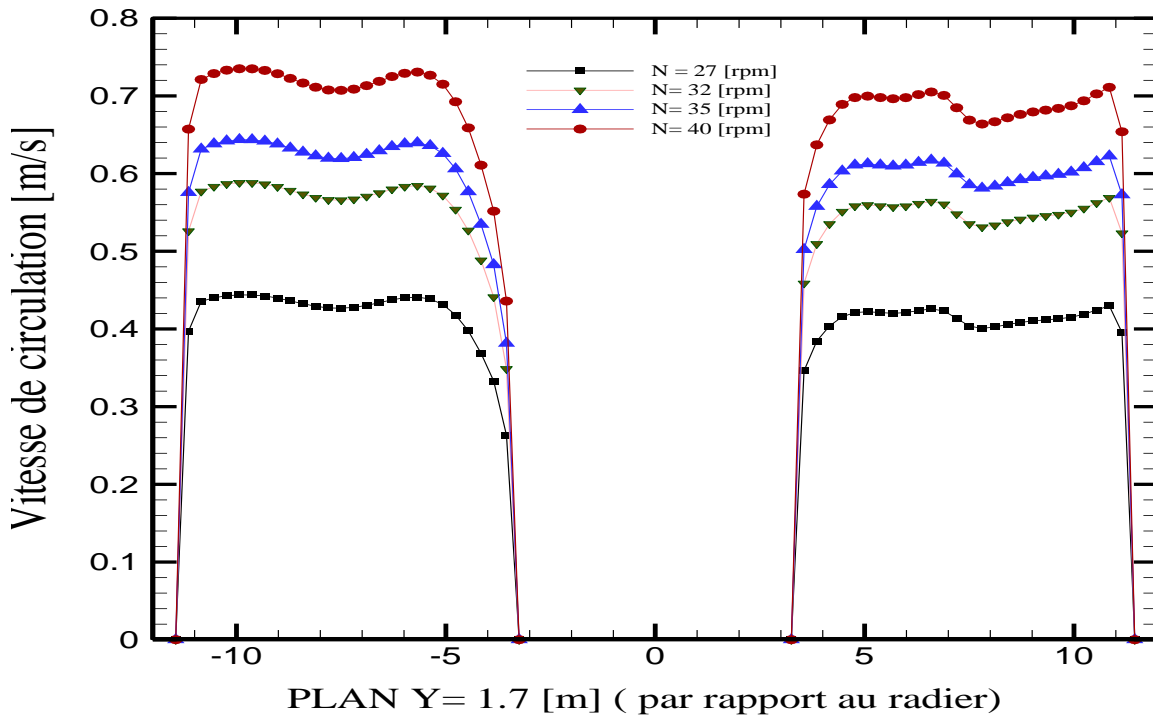


Figure (IV.16): Profils de vitesses [m.s⁻¹] pour différentes vitesses de rotation dans le plan 1.7 m

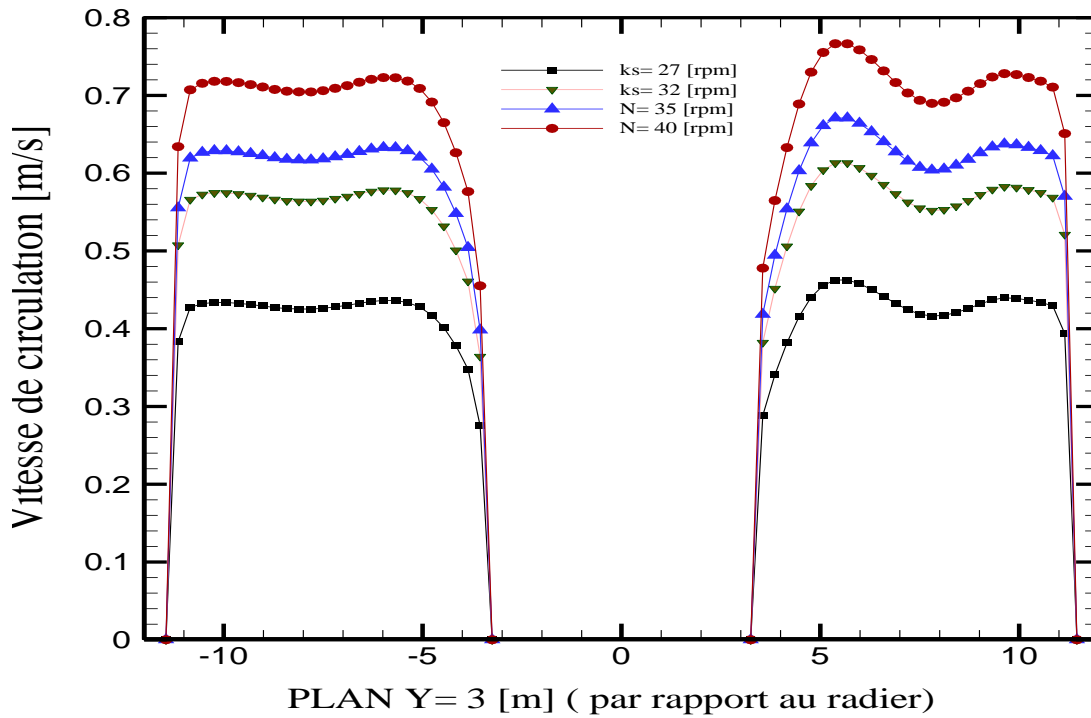


Figure (IV.17): Profils de vitesses pour différentes vitesses de rotation des agitateurs dans le plan Y=3 m

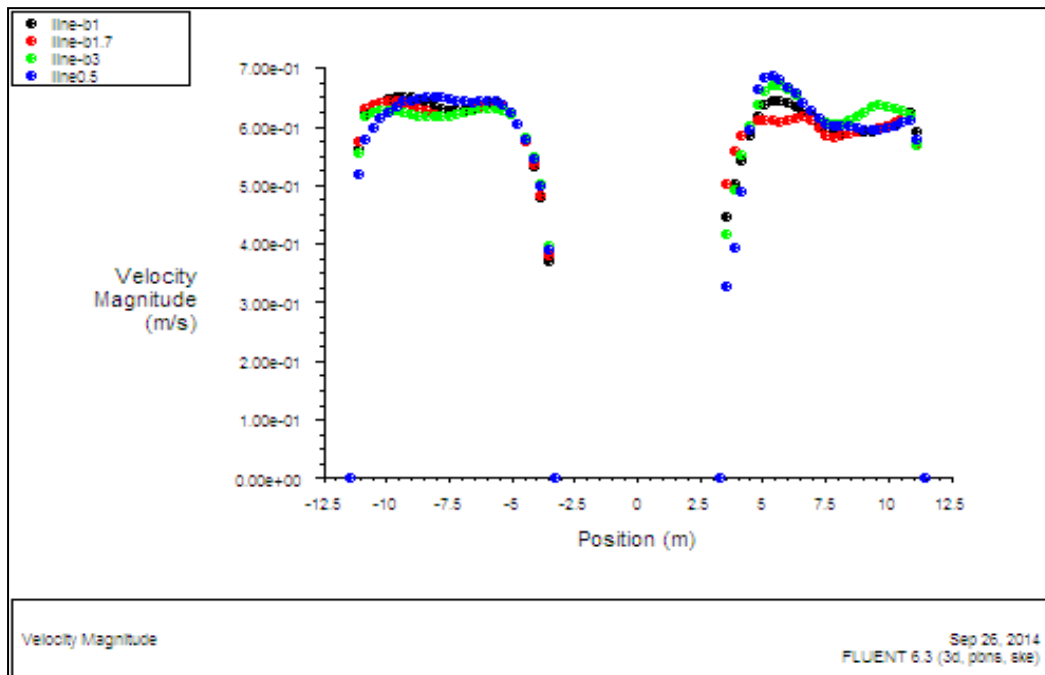


Figure (IV.18): Profils de vitesses pour différentes hauteurs pour une vitesse de rotation de 35 rpm

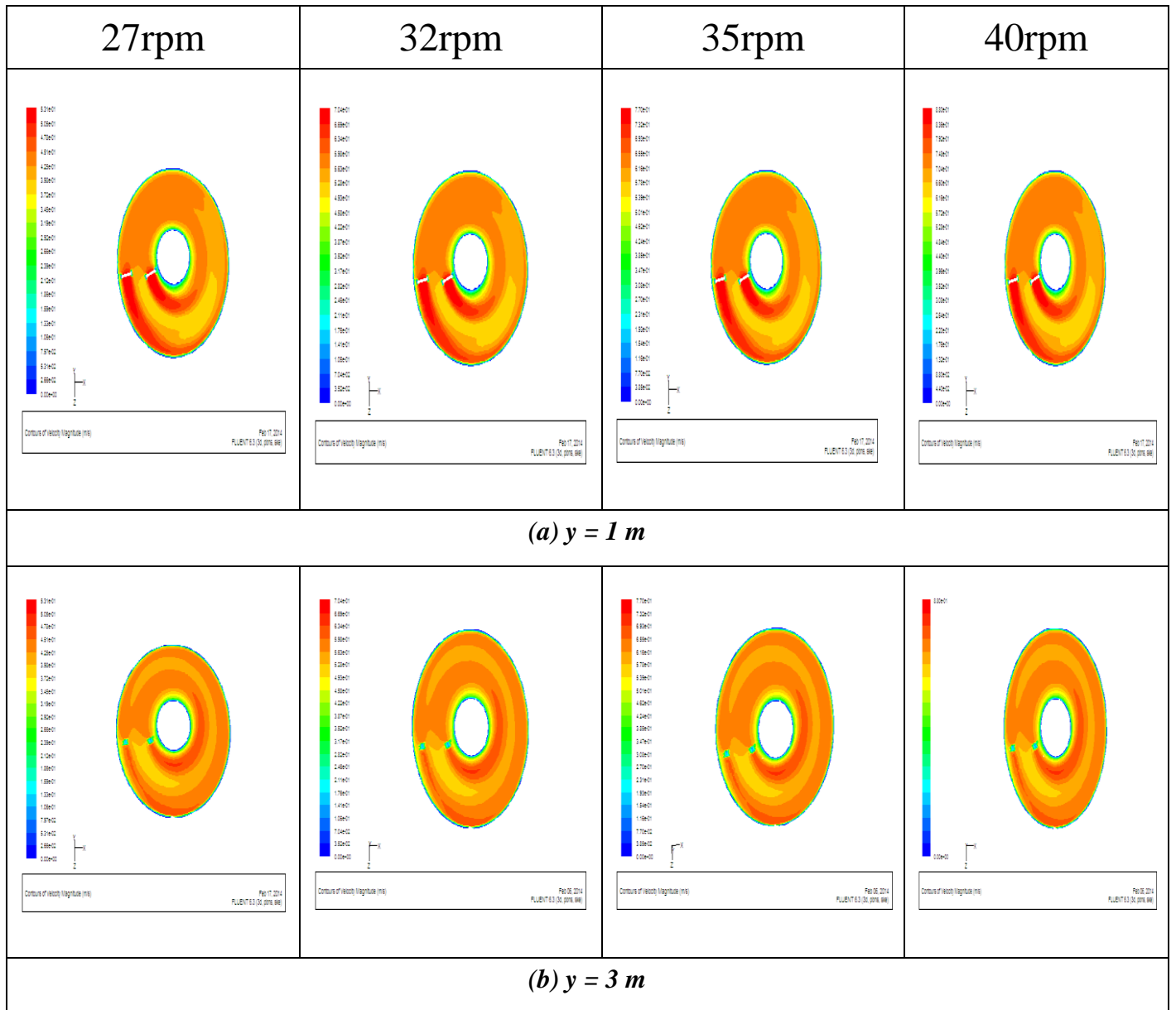


Figure (IV.19): Contours de la vitesse [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] dans deux plans horizontaux pour les simulations à différentes vitesses de rotation

Le tableau (IV.5) résume les valeurs des vitesses moyennes et les écarts positifs obtenus en augmentant la vitesse de rotation des agitateurs.

	Vitesses de rotation [rpm]			
	27	32	35	40
U_L [m.s⁻¹]	0.4115	0.5456	0.5971	0.6819
Ecart	-	+ 32.58%	+ 45.10%	+ 65.71%

Tableau (IV.5): Moyennes de vitesse de circulation dans le plan de mesure en fonction de la vitesse de rotation des agitateurs.

On constate qu'en augmentant la vitesse de rotation des agitateurs, les vitesses de circulation augmentent dans tout le bassin, ce qui représente un effet bénéfique sur l'écoulement et le brassage dans le bassin d'aération. Cependant, l'évolution des profils avec la vitesse de rotation ne montre pas d'effet significatif de la hauteur du bassin. Ces résultats sont en accord avec les résultats de **VERMANDE(2005)**.

IV.5 Seconde partie : Simulation de l'écoulement diphasique

L'écoulement diphasique est régi par les équations de Navier-stokes modifiées par la prise en compte des différentes forces dues à l'interaction des phases. Le modèle de turbulence est le modèle k- ϵ Eulérien-Eulérien dispersé.

IV.5.1 Validation du code de calcul

Afin de vérifier l'exactitude de l'étude numérique actuelle, le code numérique a été validé en comparant la valeur de la vitesse moyenne simulée dans la présente étude à celle obtenue par les simulations numériques de **TANGUY (2003)**.

Ces simulations ont été effectuées en activant l'aération. La hauteur d'eau dans le bassin était alors de 4,15m. On a rajouté un volume de 0.5m d'air au dessus de la surface supérieure libre du bassin pour pouvoir laisser la surface d'eau libre de se déformer et imposer à la face supérieure composée d'air une condition au limite de pression atmosphérique **TANGUY (2003)**.

Les résultats des simulations de **TANGUY (2003)** sont réunis dans le tableau **(IV.6)** et les résultats des simulations actuelles sont réunis dans les tableaux **(IV.7)** et **(IV.8)**.

Ces résultats ont été obtenus pour une rugosité homogène $k_s = 2.44$ mm pour les murs du bassin et $k_s = 6.15$ mm pour le radier. La vitesse à la sortie des agitateurs étant $V = 0.525$ m/s. La vitesse de l'air injecté étant 0.014 m/s et le taux de présence des bulles d'air est de 1%.

	Simulations TANGUY (2003)		
	Monophasique	Diphasique	Variation relative
U_c [m/s]	0.41	0.35	-14 %

Tableau(IV.6): Influence de l'aération sur la vitesse de circulation (**Résultats de TANGUY (2003)**).

	Distance du Bord extérieur [m]	0.5	2.25	4	5.75	7.5	Moyennes Des horizontales [m/s]
IMMERSION[m]	Fond+3.48m	0.3772	0.3517	0.3237	0.3058	0.2706	0,3258
	Fond+3 m	0.3505	0.3552	0.3352	0.3263	0.2917	0,3318
	Fond+2.5 m	0.3865	0.3595	0.3445	0.3427	0.3129	0,3492
	Fond+2 m	0.3886	0.3652	0.3538	0.3567	0.3250	0,3579
	Fond+1.5 m	0.3955	0.3733	0.3624	0.3651	0.3325	0,3658
	Fond+0.5 m	0.3765	0.3608	0.3485	0.3548	0.3292	0,3540
	Moyennes des verticales [m/s]	0,3791	0,3610	0,3447	0,3419	0,3103	Moy=0,3474

Tableau (IV.7): vitesses locales de l'eau dans le plan de mesure en condition aérée (30 points)

	Distance du Bord extérieur [m]	0.5	2.25	4	5.75	7.5	Moyennes Des horizontales [m/s]
IMMERSION[m]	Fond+3.48m	0.3772	0.3517	0.3237	0.3058	0.2706	0,3258
	Fond+2.5 m	0.3865	0.3595	0.3445	0.3427	0.3129	0.3492
	Fond+1.5 m	0.3955	0.3733	0.3624	0.3651	0.3325	0.3658
	Fond+0.5 m	0.3765	0.3608	0.3485	0.3548	0.3292	0.3540
	Moyennes des verticales [m/s]	0,3839	0,3613	0,3448	0,3421	0,3113	Moy = 0.3487

Tableau (IV.8): vitesses locales de l'eau dans le plan de mesure en condition aérée (20 points)

NB: Le tableau (IV.7) réunit les résultats des simulations de 30 points dans le plan de mesure

Le tableau (IV.8) réunit les résultats des simulations de 20 points dans le plan de mesure.

Pour la mesure de la vitesse de circulation de l'eau sans aération, une étude statistique précisant le nombre de points de mesure et le temps d'échantillonnage a été réalisée par Da Silva - Déronzier (1994) et Duchène (1997). Cette étude a abouti à un protocole de mesure préconisant, pour les chenaux de sections inférieures à 40 m^2 :

- vingt points de mesure, répartis de manière homogène sur une section du chenal éloignée de tout obstacle majeur ;
- des distances minimales entre les premiers points par rapport à la surface, la paroi intérieure et les diffuseurs, respectivement de 0,2, 0,6 et 0,2 m.

L'application de ce protocole de mesure permet, selon les auteurs, de déterminer la vitesse de circulation de l'eau avec une précision de 5% pour des chenaux de section inférieure à 40 m^2 .

La comparaison de la vitesse moyenne de circulation obtenue à partir de 30 points avec celle obtenue à partir de 20 points fait ressortir un écart négatif de 0.37 %.

Dans la suite des simulations, un total de 30 points sera utilisé pour le calcul des vitesses de circulation moyennes. Pour une section de 34 m^2 , le nombre de points de mesure ou de simulation à utiliser varie entre 30 à 34 points (soit un point par m^2) **FAYOLLE(2006)**.

	Simulations actuelles	
	Monophasique	Diphasique
U_c [m/s]	0.41	0.35

Tableau (IV.9): Influence de l'aération sur la vitesse de circulation

La comparaison des vitesses de circulation moyennes, résultats des tableaux (IV.6), (IV.8) montre qu'il y'a un bon accord entre les résultats de la présente étude et les résultats des simulations numériques de **TANGUY (2003)**.

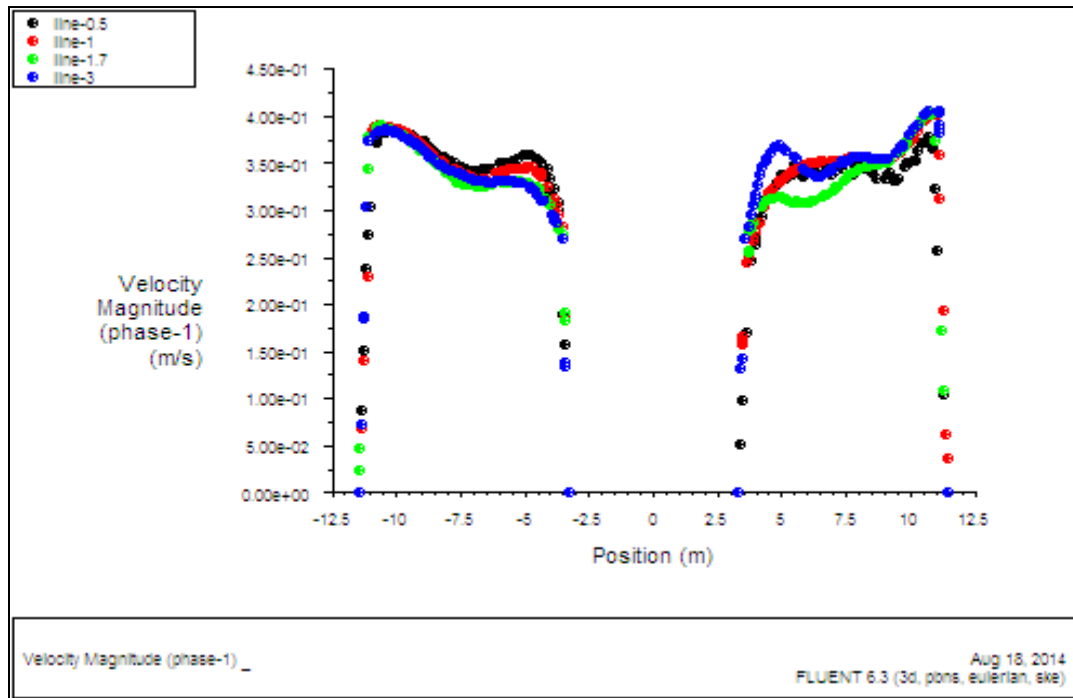


Figure (IV.20): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation de l'eau (phase 1) dans tout le bassin pour différentes hauteurs (0.5-1-1.7-3m) à partir du radier.

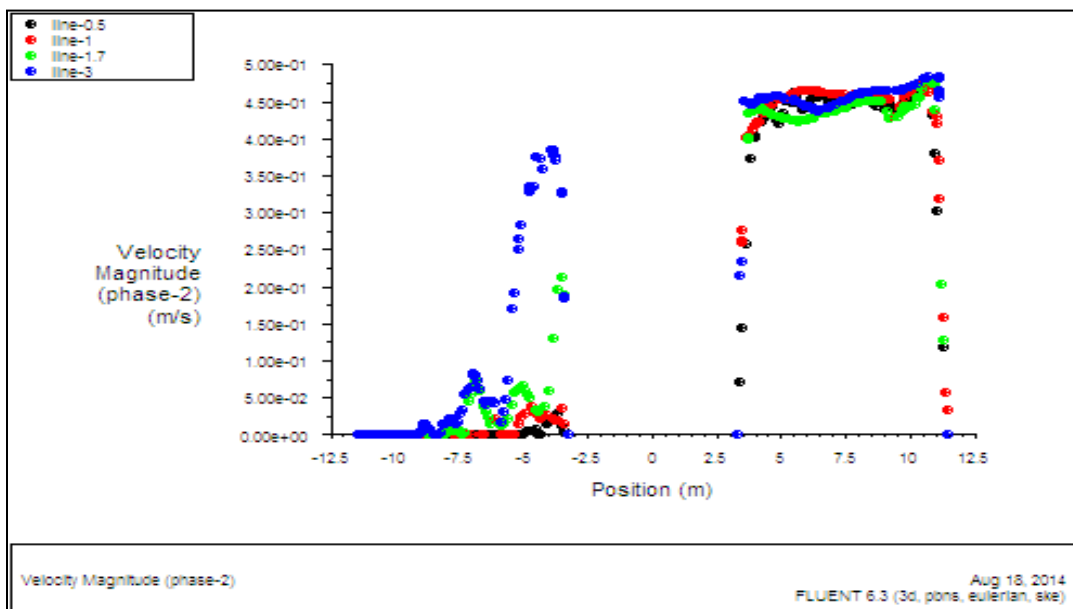


Figure (IV.21): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation de l'air (phase 2) dans tout le bassin pour différentes hauteurs (0.5-1-1.7-3m) à partir du radier.

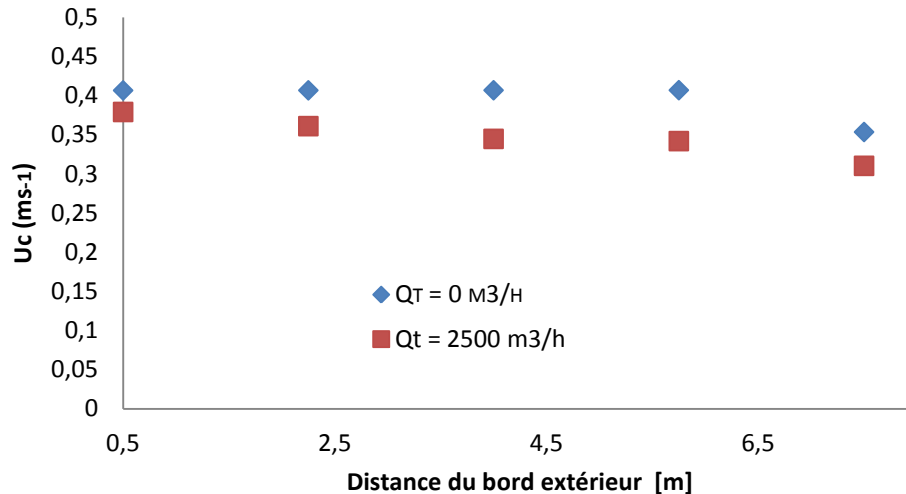


Figure (IV.22): Comparaison des profils de vitesses moyennes de circulation (moyennes des verticales) dans les cas avec et sans aération en fonction de la distance du bord extérieur du bassin

En comparant les profils de vitesse de circulation, on constate qu'ils ne dépendent pas de la hauteur (à partir du radier) (**voir figure (IV.20)**). Mais on note que les vitesses diminuent au fur et à mesure que l'on s'approche des parois intérieures (**Voir tableau (IV.8)**). Le gradient de vitesse déjà présent en condition monophasique est accentué en présence de l'aération. En effet, pour un diamètre de bulles de 3 mm, la moyenne de vitesse sur les quatre hauteurs diminue de 0.3839 à 0.3113 m/s (cas diphasique) et de 0.3971 à 0.3534 m/s (cas monophasique).

L'injection de l'air a fait chuter la moyenne de la vitesse de circulation de 14%.

Les vitesses axiales de circulation ont été simulées sur une même section sans et avec l'aération. La figure (IV.22) représente la vitesse axiale du liquide (U_c) en fonction de la distance du bord extérieur (dans la section de mesure). Chaque point correspond à la moyenne des quatre vitesses simulées sur une verticale.

On remarque que les vitesses de circulation sont supérieures à la valeur de la vitesse minimale requise pour éviter la décantation qui est de l'ordre de 0.25 à 0.3 m/s (**Voir tableau (IV.8)**) (**TANGUY 2003- FAYOLLE 2006- VERMANDE 2006-...**). Et ceci est très important pour éviter les phénomènes de dépôts dans les bassins d'aération. Les dépôts sont responsables de désordres biologiques (croissance de bactéries filamenteuses) pouvant gravement altérer le fonctionnement du clarificateur et donc diminuer le rendement épuratoire de la station.

On constate que les vitesses pour la phase 2 sont nulles sur une partie du bassin où il n'y a pas de diffuseurs (**voir figure (IV.21)**).

IV.5.2 Effet de la vitesse de circulation

Dans le but d'étudier l'influence de la vitesse de circulation liquide sur les rouleaux de circulation transversaux, nous avons augmenté la vitesse des agitateurs jusqu'à la vitesse nominale de 0.525 m/s. Les paramètres maintenus constants dans cette section sont : les hauteurs de rugosité, la vitesse d'injection de l'air et la fraction volumique correspondante.

Les tableaux suivants donnent les conditions aux limites appliquées comme valeurs fixes au niveau des agitateurs ainsi que les vitesses horizontales de circulation obtenues par les simulations actuelles et celles obtenues par les simulations de **Tanguy(2003)**.

	1 ^{er} cas	2 ^{eme} cas	3 ^{eme} cas	4 ^{eme} cas
V agit [m/s]	0	0.2	0.4	0.525
k agit	0	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
ε agit	0	$3.15 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$
V_c [m/s]	0	0.13	0.27	0.35

Tableau (IV.10): conditions aux limites et résultats des simulations actuelles

	1 ^{er} cas	2 ^{eme} cas	3 ^{eme} cas	4 ^{eme} cas
V agit [m/s]	0	0.2	0.4	0.525
k agit	0	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
ε agit	0	$3.15 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$
V_c [m/s]	0	0.10	0.25	0.35

Tableau (IV.11): conditions aux limites et résultats des simulations de Tanguy (2003)

En comparant les résultats des simulations actuelles aux résultats de TANGUY (2003). On constate de faibles écarts dans les moyennes de vitesses de circulation pour les vitesses des agitateurs de 0.2 et 0.4 m/s (voir les tableaux (IV.10) et (IV.11)). Donc un bon accord est trouvé et la validation a été obtenue pour quatre vitesses des agitateurs. Dans le cas de l'arrêt de l'agitation, les vitesses de circulation de l'eau sont nulles dans le bassin.

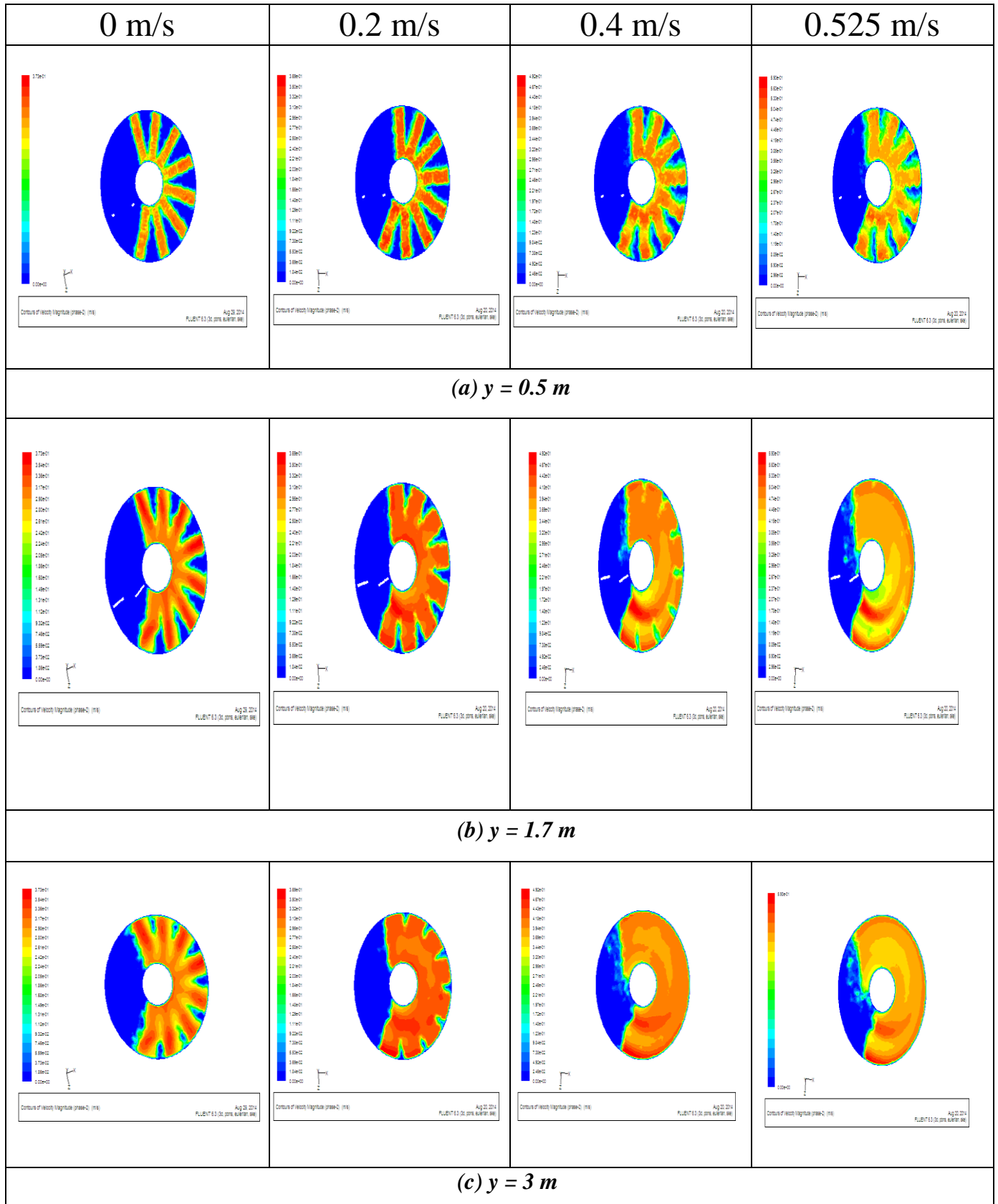


Figure (IV.23): Contours de vitesse de la phase 2 (l'air) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] dans trois plans horizontaux pour les simulations à différentes vitesses de circulation.

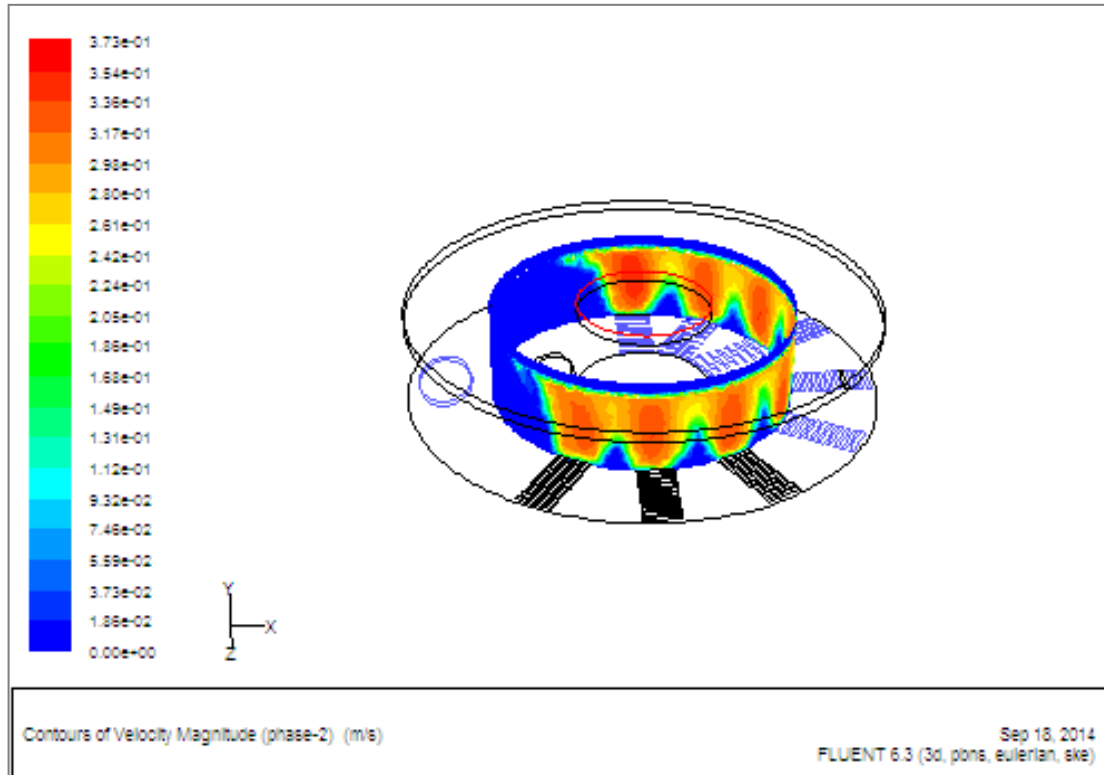


Figure (IV.24): Contour de la vitesse de la phase air à mi-largeur du bassin en l'absence d'agitation

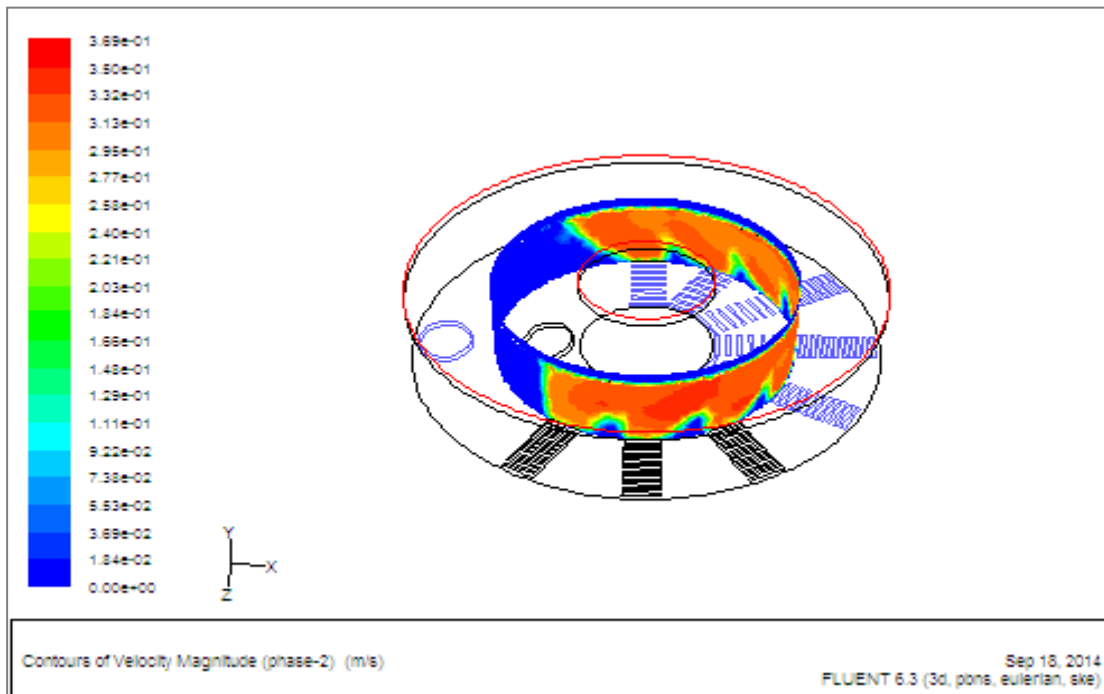


Figure (IV.25): Contour de la vitesse de la phase air à mi-largeur du bassin en présence de l'agitation pour $V = 0.2 \text{ m/s}$

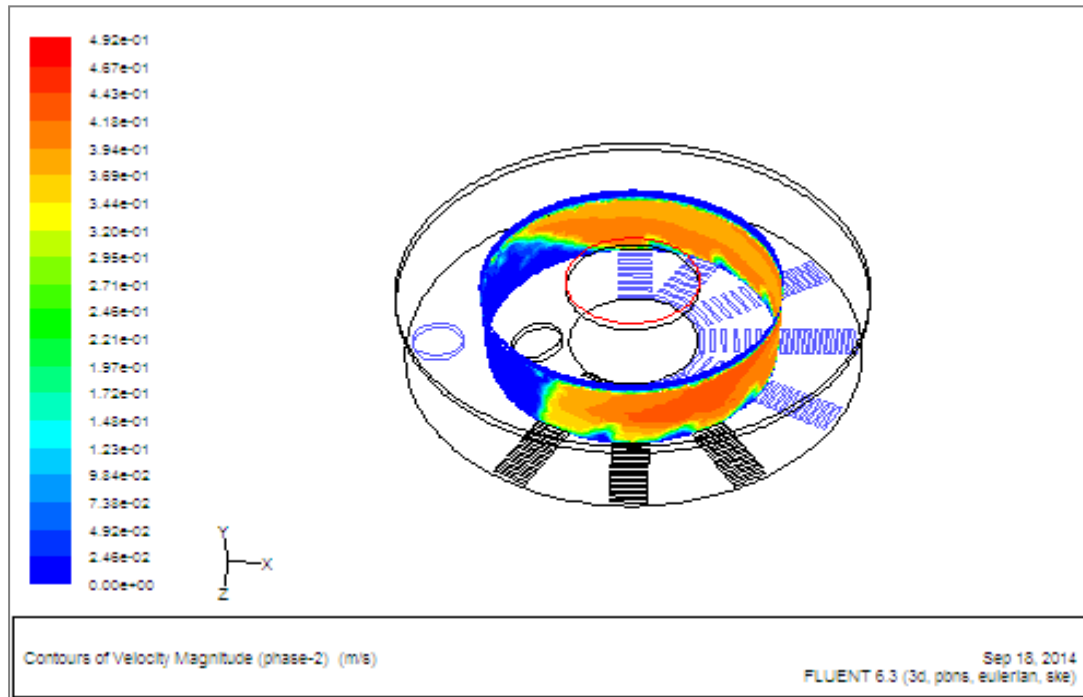


Figure (IV.26): Contours de la vitesse de la phase air à mi-largeur du bassin en présence de l'agitation pour une vitesse de circulation de $V = 0.4$ m/s

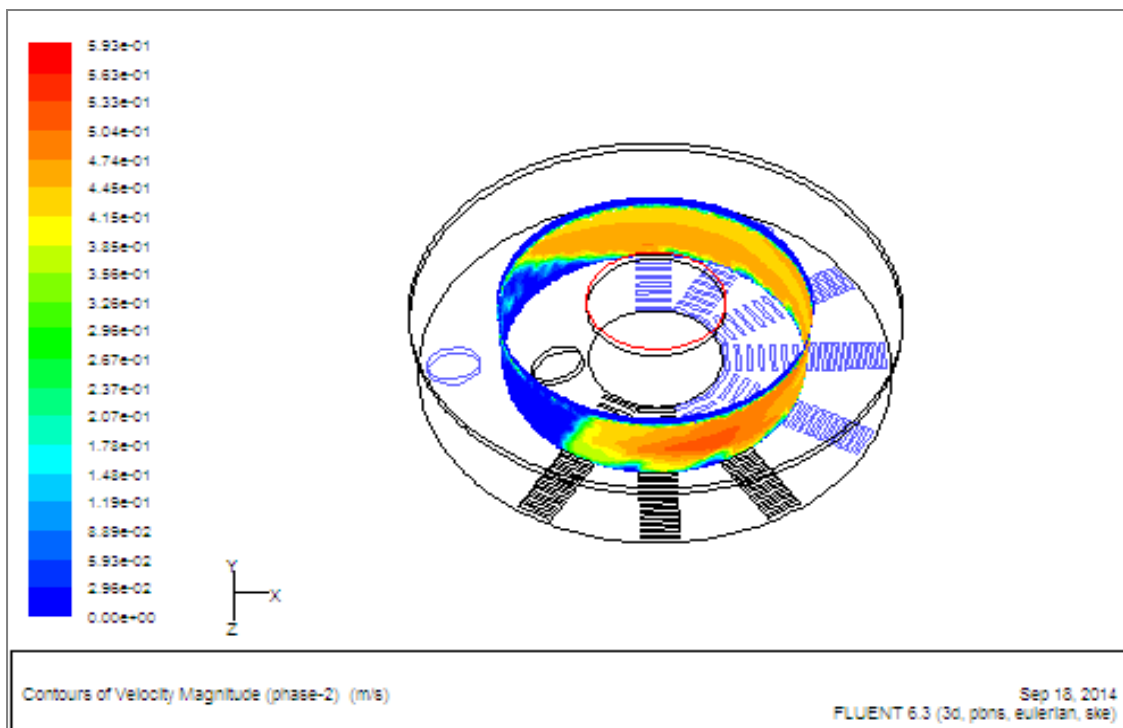


Figure (IV.27): Contour de la vitesse de la phase air à mi-largeur du bassin en présence de l'agitation $V = 0.525$ m/s

En observant les contours de vitesses de l'air à différentes hauteurs voir figure (IV.23) et les figures de (IV.24) à (IV.27), on remarque des zones de faibles vitesses entre les diffuseurs et l'absence de circulation de l'air dans celles-ci : Ce phénomène est dû à la présence de boucles de recirculation qui sont créées par l'aération. Ces boucles sont appelées les spiral-flows, elles sont néfastes à l'obtention de vitesses horizontales suffisantes. L'élimination de ces boucles se fait en augmentant la vitesse des agitateurs.

Nos simulations rejoignent les observations expérimentales et numériques de **DA SILVA DERONZIER G., COCKX A.**, " la mise en rotation horizontale de l'eau n'a qu'un effet sur les spiral-flows dont l'axe de rotation est perpendiculaire à l'écoulement. Des vitesses comprises entre 0,25 et 0,35 m.s⁻¹ sont nécessaires pour assurer une disparition quasi totale de ce type de spiral-flows." Des résultats similaires sont trouvés par **Tanguy et Fayolle**.

Arrêt de l'agitation

Une simulation a été réalisée sans agitation afin d'étudier l'hydrodynamique en l'absence de mouvement horizontal de l'eau. Sous ces conditions, les panaches de bulles sont verticaux (Figure IV.28). En présence de l'agitation, les panaches s'inclinent voir (Figure IV.29). La fraction volumique globale de l'air dans le bassin chute de 1.62% (à 27rpm) à 0.295% des boucles de recirculation verticales de l'eau (spiral-flow) apparaissent. Ce qui est en accord avec les résultats de **VERMANDE(2006)**

	Vitesse d'agitation [m/s]	
	0	0.525
Fraction volumique de l'air(%)	0.295	1.62

Tableau (IV.12): Fractions volumiques de l'air dans tout le bassin pour un débit d'air de 2500 m³/h dans les cas avec et sans agitation.

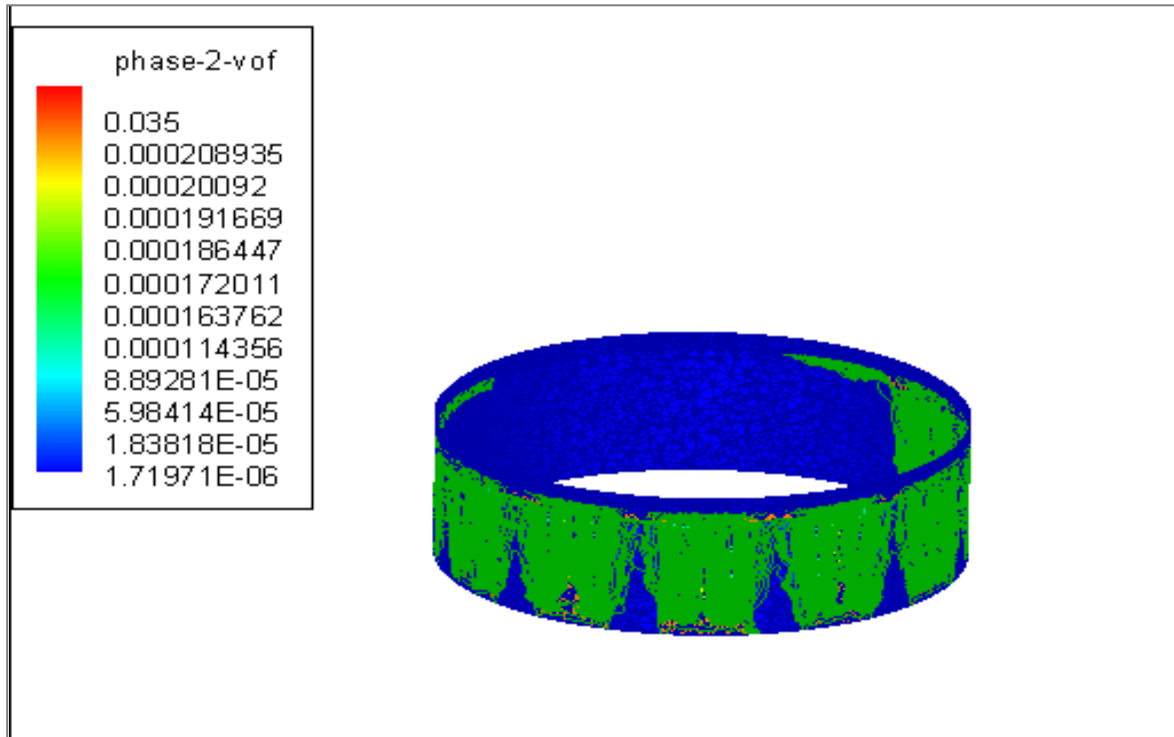


Figure (IV.28): Contour de la fraction volumique dans le cas sans agitation pour un débit d'air de 2500 m³/h à mi-largeur

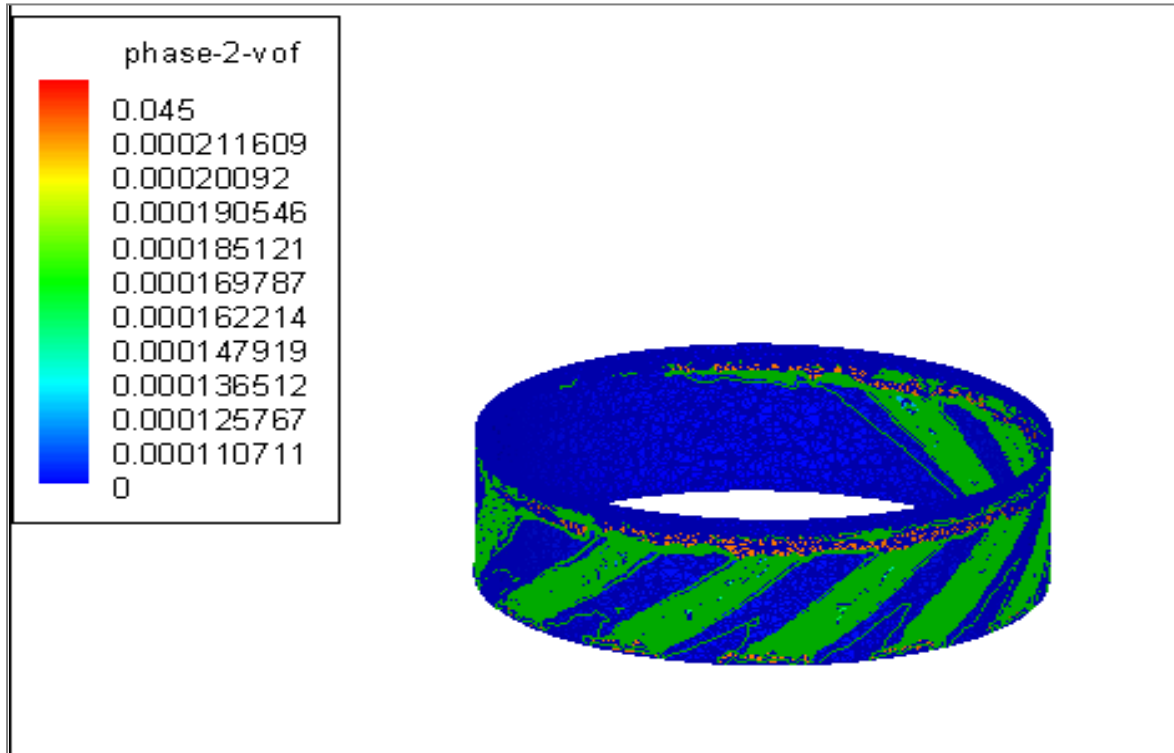


Figure (IV.29): Contour de la fraction volumique à la vitesse 0.525 m/s pour un débit d'air 2500 m³/h à mi-largeur

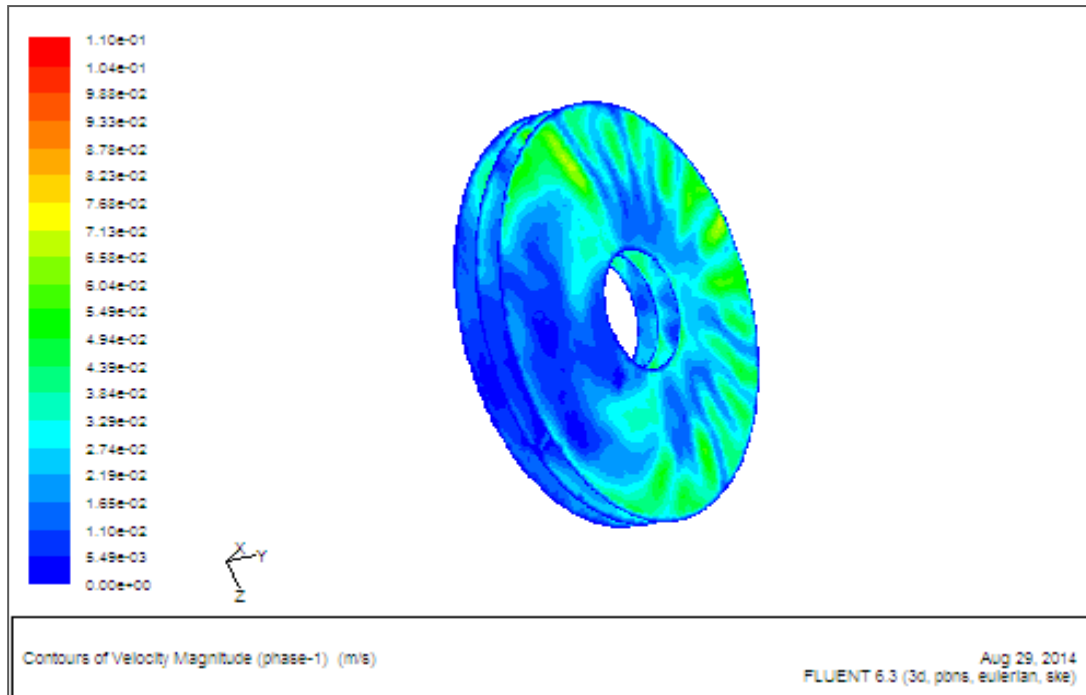


Figure (IV. 30): Contours de vitesse de circulation de l'eau dans le cas sans agitation à différentes hauteurs 0.5-1.7-3

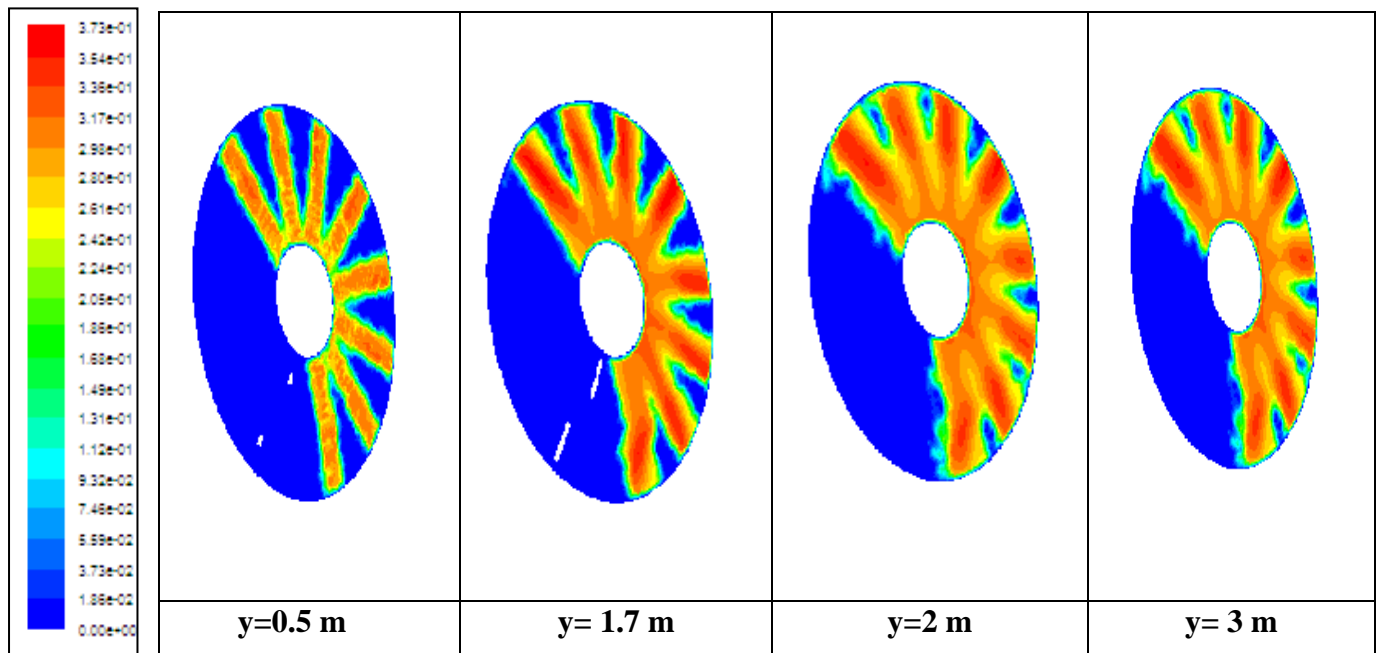


Figure (IV.31): Evolution des contours de vitesse de l'air à différentes hauteurs dans le cas sans agitation.

On constate dans la figure (IV.30) que les vitesses de circulation de l'eau sont quasi-nulles dans le bassin en l'absence de l'agitation.

On remarque dans la figure (IV.31) la présence ininterrompues de spiral-flows jusqu'à la hauteur de 3 m, en absence de l'agitation.

IV.5.3 Effet du diamètre des bulles d'air

La taille des bulles d'air est le paramètre prépondérant dans les phénomènes de transfert de matière. Afin de connaître l'effet de sa variation sur les écoulements, trois simulations seront effectuées pour différents diamètres des bulles : 3, 3.5 et 4 mm. Les autres paramètres sont maintenus constants.

Les figures de (IV.32) à (IV.35) illustrent la comparaison des profils de vitesse pour différentes hauteurs à partir du radier, le long du bassin.

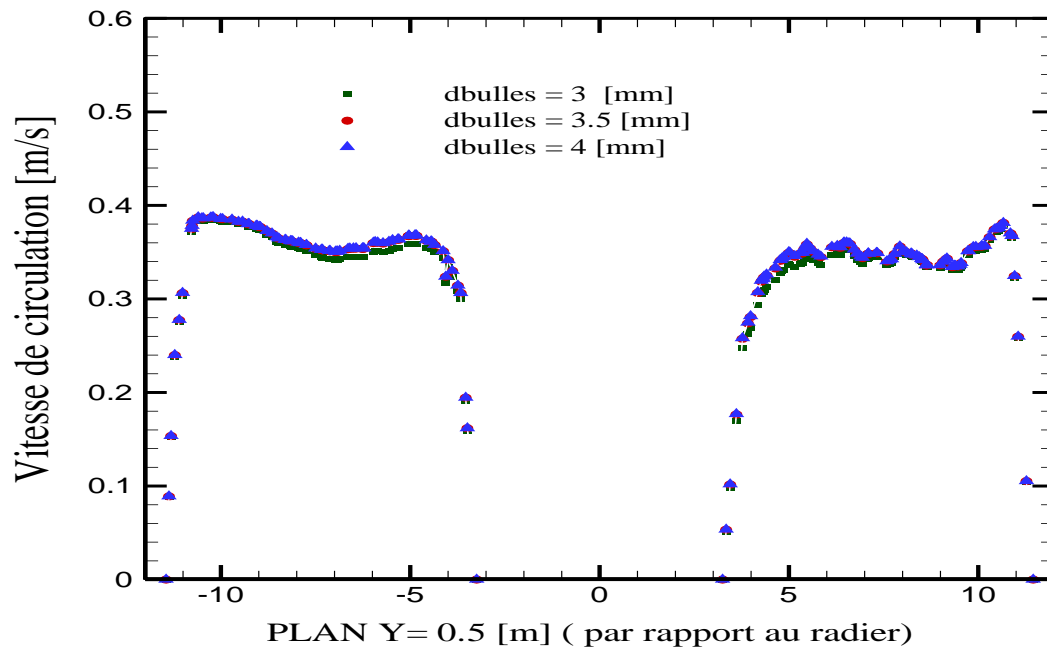


Figure (IV.32): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation de l'eau pour différents diamètres des bulles d'air dans le plan Y=0.5m

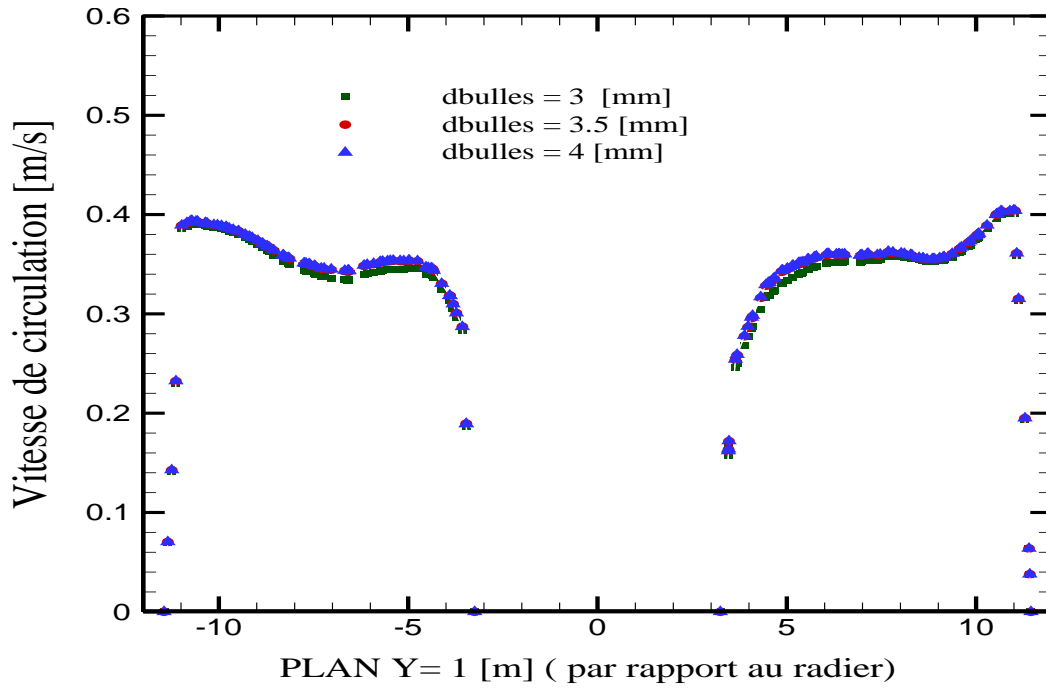


Figure (IV.33): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation de l'eau dans tout le bassin pour différents diamètres des bulles d'air dans le plan Y= 1 m

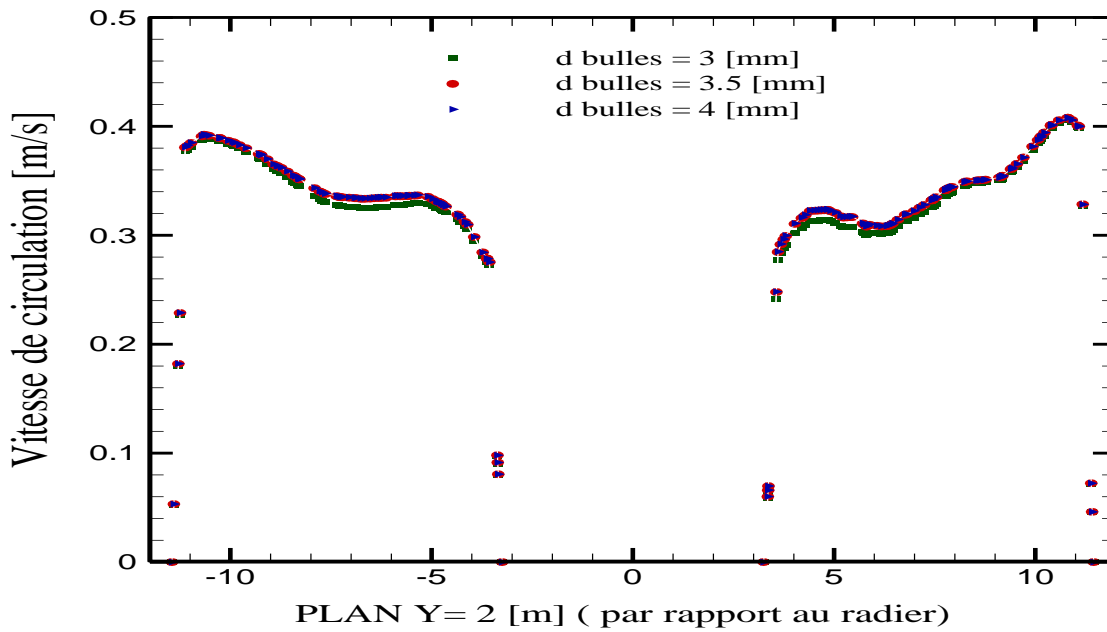


Figure (IV.34): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation de l'eau pour différents diamètres des bulles d'air dans le plan Y= 2 m

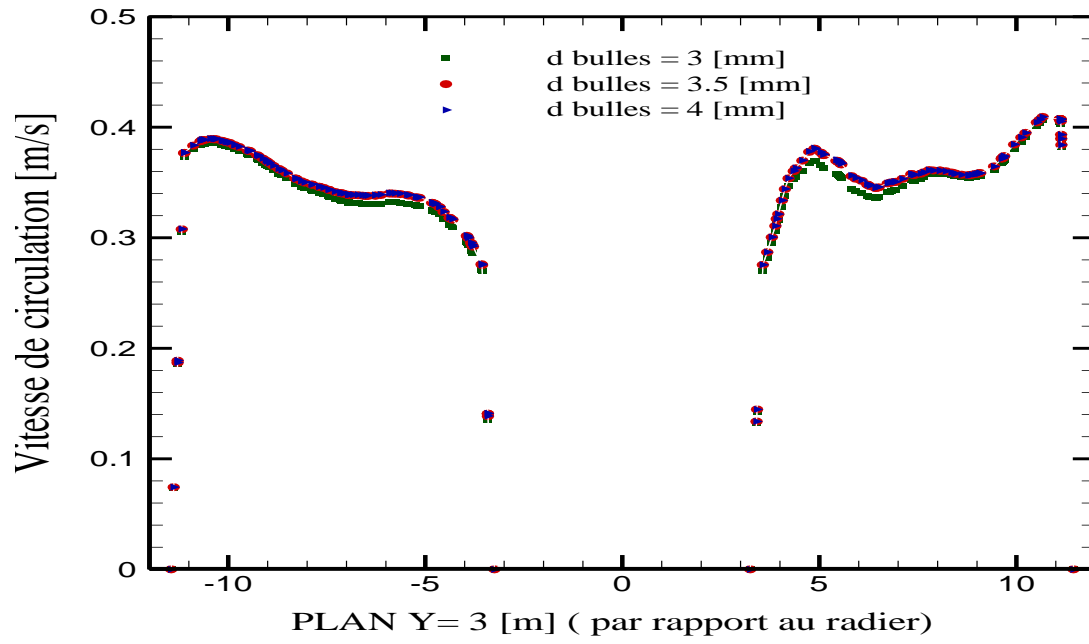


Figure (IV.35): Comparaison entre les profils de vitesse de circulation de l'eau dans tout le bassin pour différents diamètres de bulles d'air dans le plan Y=3 m

La figure (IV.36) illustre la comparaison des Contours de vitesse de l'eau [m.s⁻¹] dans deux plans horizontaux pour les simulations à différents diamètres de bulles d'air : 3, 3.5 et 4 mm.

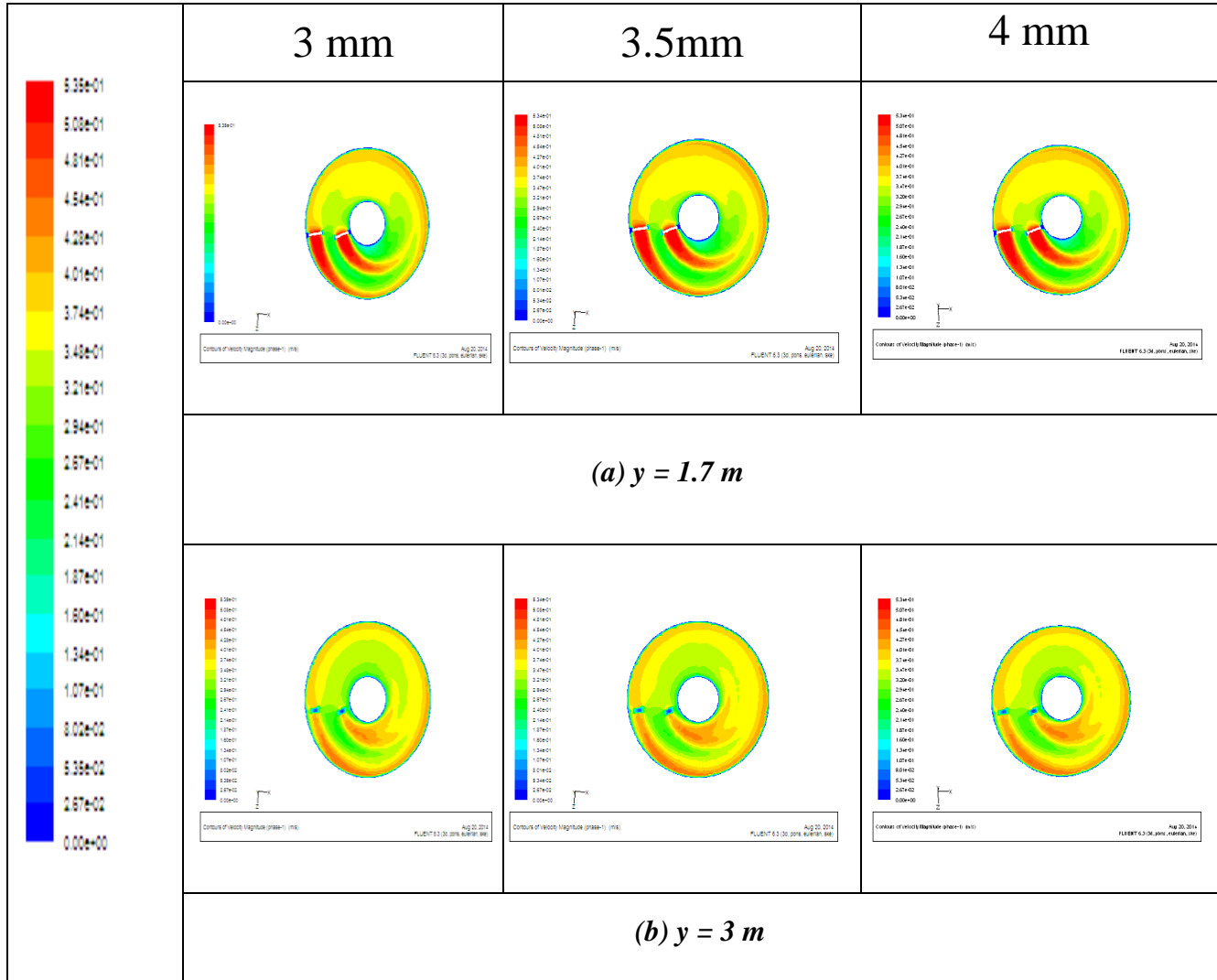


Figure (IV.36): Contours de vitesse de l'eau [m.s⁻¹] dans deux plans horizontaux pour les simulations à différents diamètres de bulles d'air : 3, 3.5 et 4 mm.

Le tableau (IV.13) : résume les valeurs des vitesses de circulation moyennes en fonction du diamètre des bulles d'air.

	Vitesses de circulation [m. s^{-1}]		
Diamètre des bulles [mm]	3	3.5	4
U_c [m.s^{-1}]	0.35	0.3527	0.3531

Tableau (IV. 13): Moyennes des vitesses de circulation en fonction du diamètre des bulles d'air

On constate que le diamètre des bulles d'air a peu d'impact sur la vitesse de circulation de l'eau. Ce qui est en accord avec les résultats trouvés dans la littérature : **VERMANDE (2005)**

IV.5.4 Effet du débit d'air

Dans le but d'étudier l'effet du débit d'air sur la variation de la vitesse de circulation, trois simulations ont été effectuées pour différents débits : 1900-2500 et 2800 m^3/h . Les paramètres maintenus constants dans cette section sont : la vitesse des agitateurs 0.525m/s, le diamètre des bulles de 3 mm, les hauteurs de rugosité, la fraction volumique de l'air à la sortie des rampes d'aération.

Les figures de (IV. 37) à (IV.41) illustrent la comparaison des profils de vitesse et contours pour différentes hauteurs à partir du radier, le long du bassin.

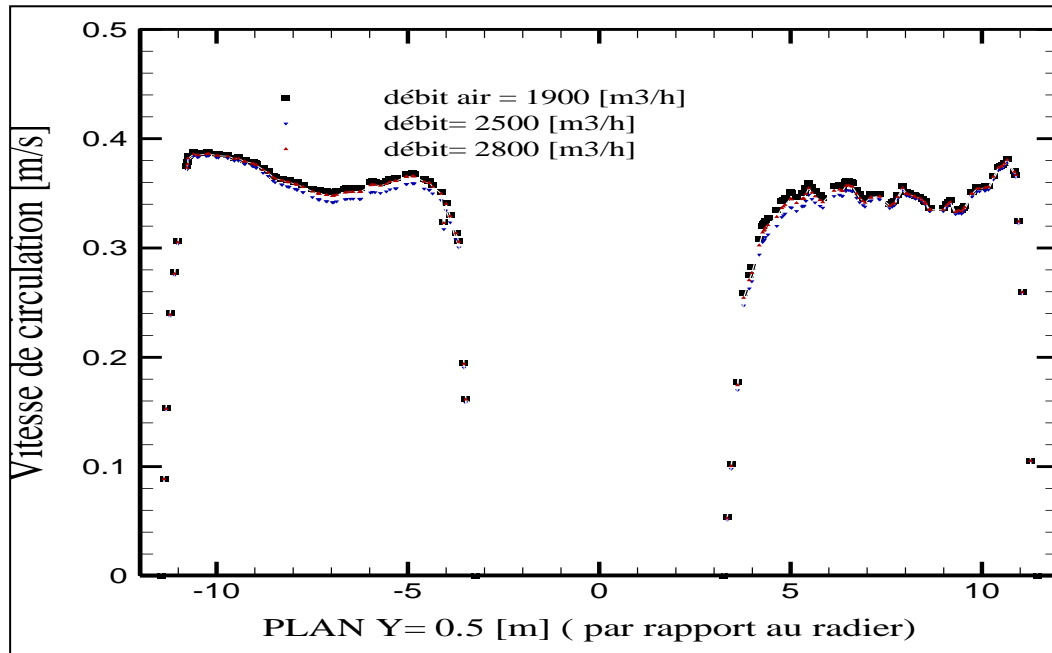


Figure (IV.37): Profils de vitesses [m.s⁻¹] pour différents débits des diffuseurs d'air dans le plan Y= 0.5 m

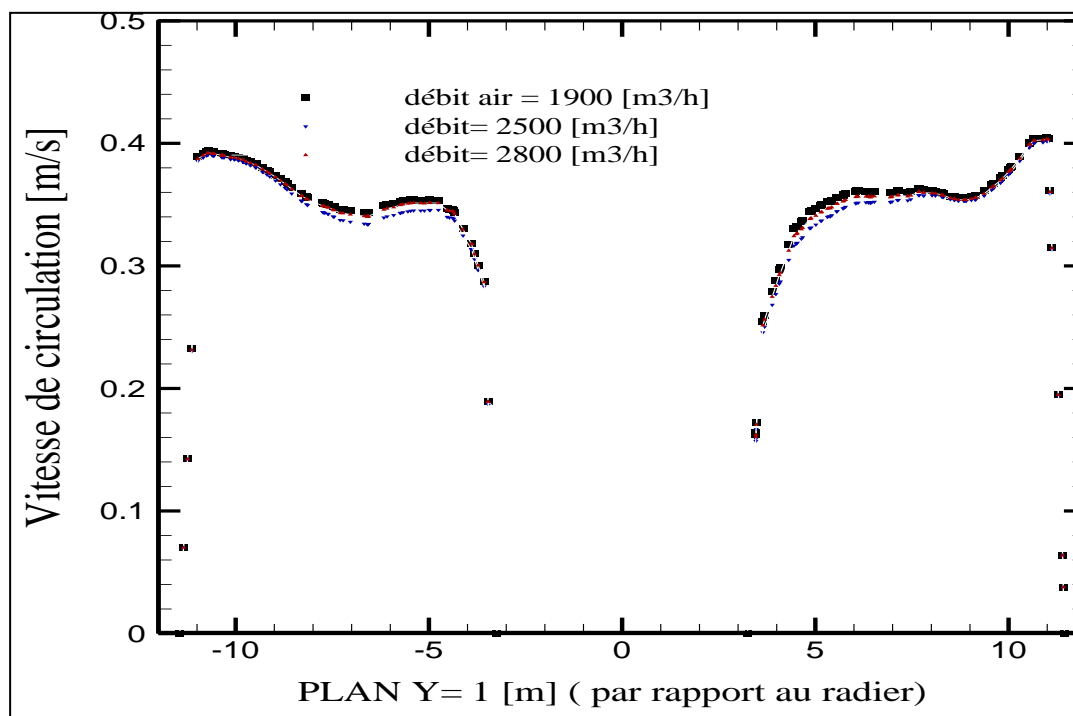


Figure (IV.38): Profils de vitesses [m.s⁻¹] pour différents débits des diffuseurs d'air dans le plan Y= 1 m

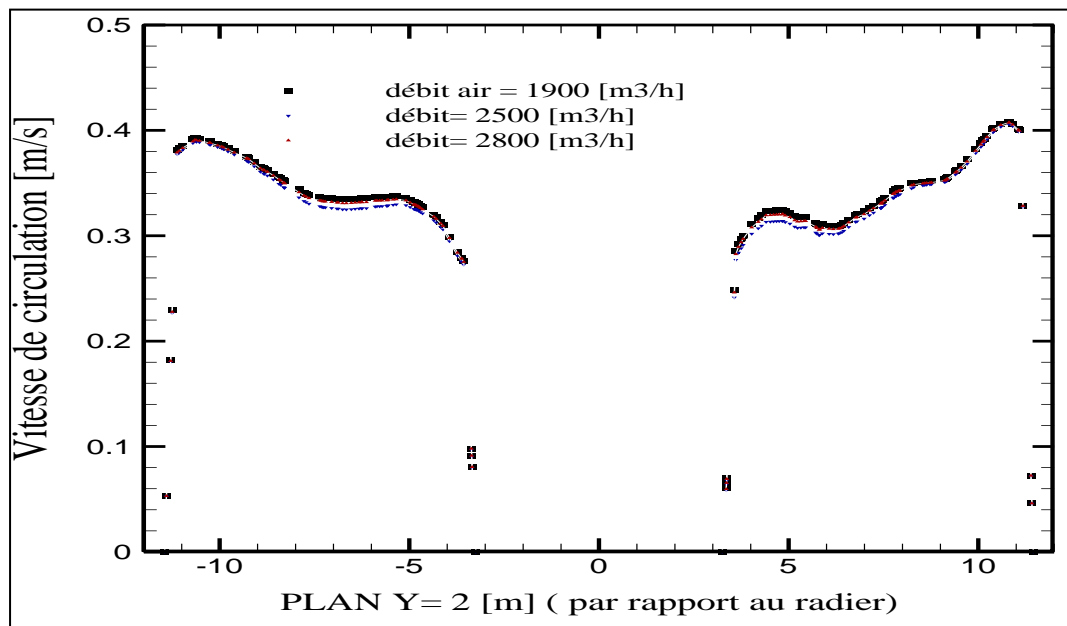


Figure (IV.39): Profils de vitesses [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] pour différents débits des diffuseurs d'air dans le plan $Y=2\text{m}$

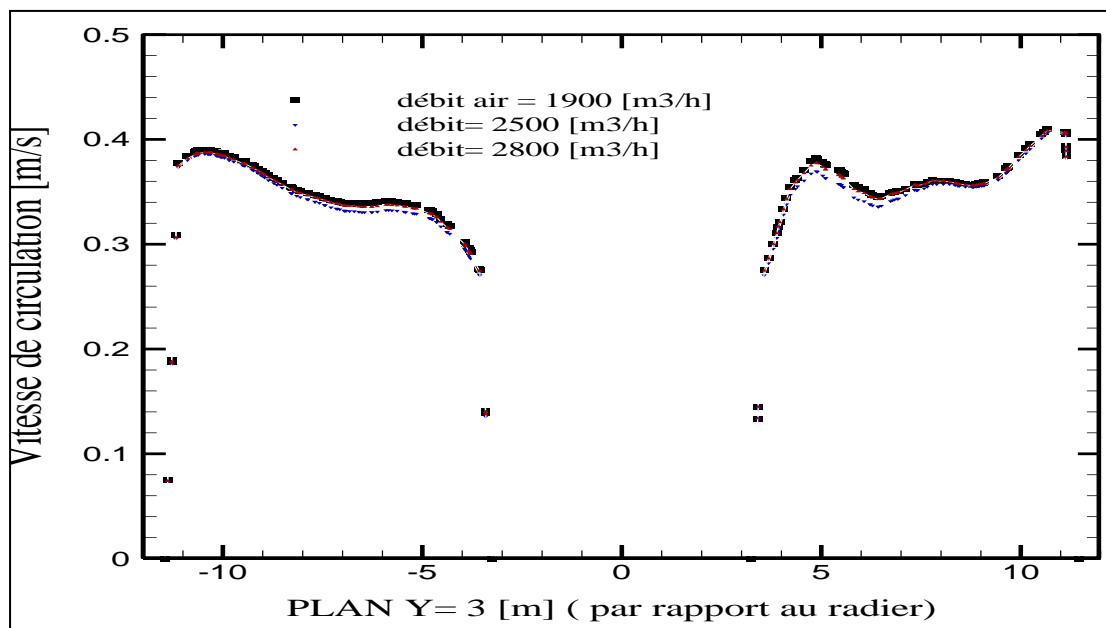


Figure (IV.40): Profils de vitesses [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] pour différents débits des diffuseurs d'air dans le plan $y=3\text{m}$

La **Figure (IV.41)** résume les contours de vitesse [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] dans trois plans horizontaux pour les simulations à différents débits d'air.

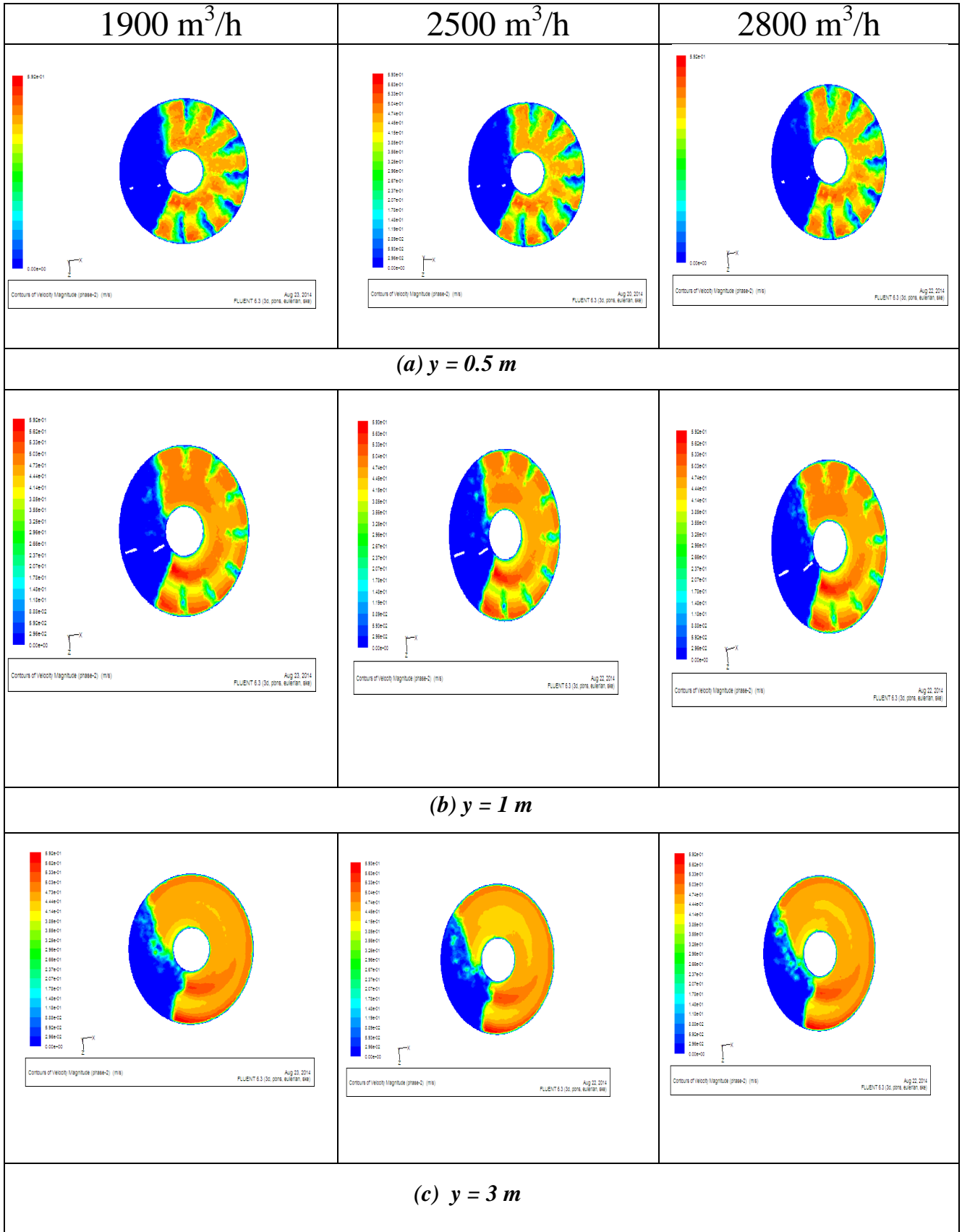


Figure (IV.41): Contours de vitesse [m.s⁻¹] dans trois plans horizontaux pour les simulations à différents débits d'air

Le tableau (IV.14) résume les valeurs des vitesses moyennes en fonction des débits d'air

	Débits de l'air [m^3h^{-1}]		
	1900	2500	2800
U_L [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	0.3534	0.35	0.3511

Tableau (IV.14): Moyennes de vitesse de circulation dans le plan de mesure en fonction des débits d'air

On constate qu'en augmentant le débit des diffuseurs d'air, la moyenne de vitesse de circulation ne varie pas beaucoup. En outre, l'évolution des profils avec le débit ne montre pas d'effet significatif de la hauteur du bassin. Ces résultats sont en accord avec les résultats de **VERMANDE(2005)** et **Fayolle (2006)**.

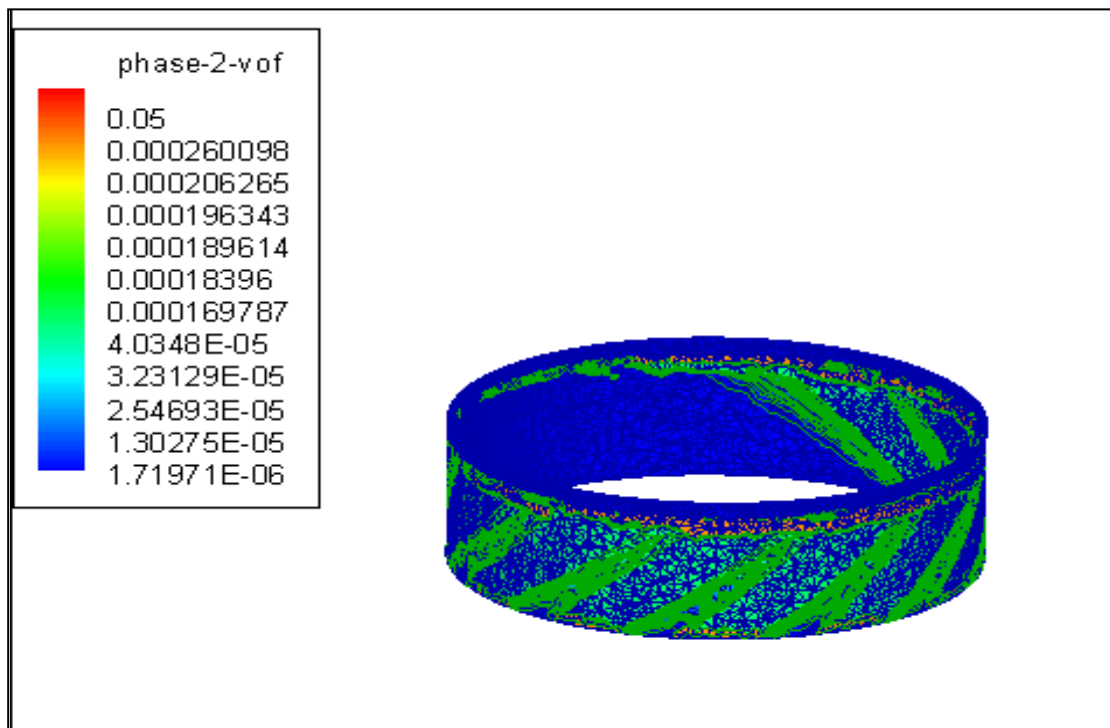


Figure (IV.42): Contour de la fraction volumique pour un débit d'air $1900 \text{ m}^3/\text{h}$ à mi-largeur

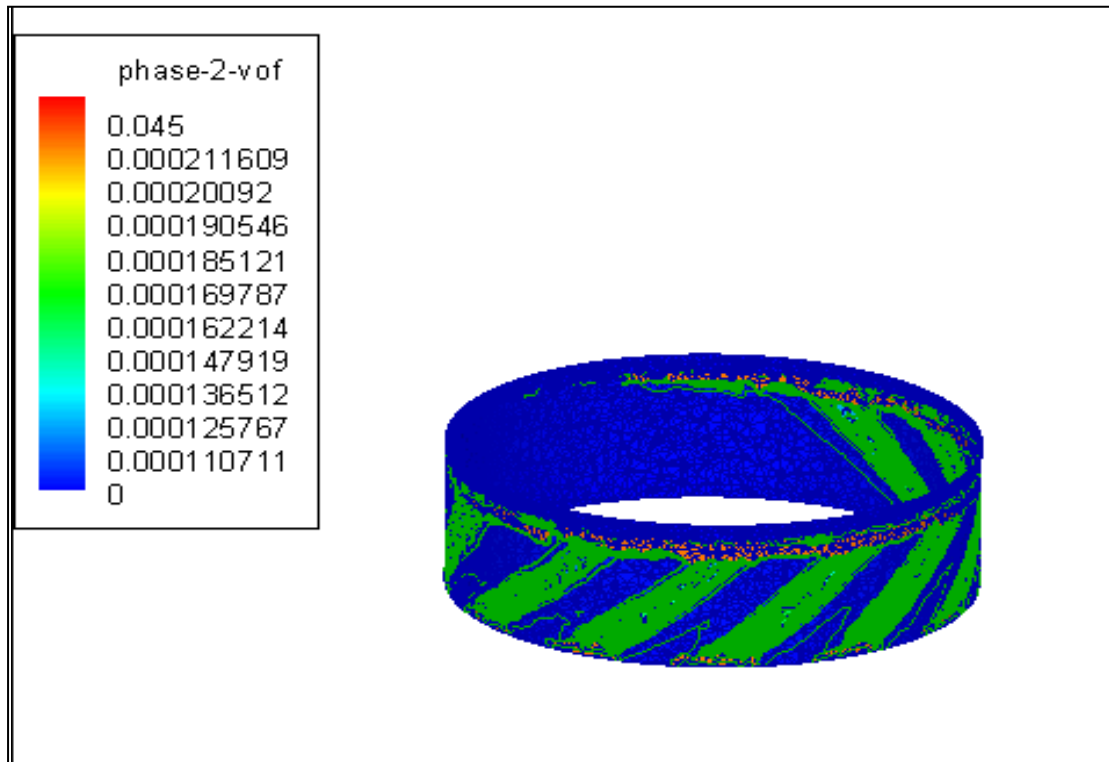


Figure (IV.43): Contour de la fraction volumique pour un débit d'air 2500 m³/h à mi-largeur

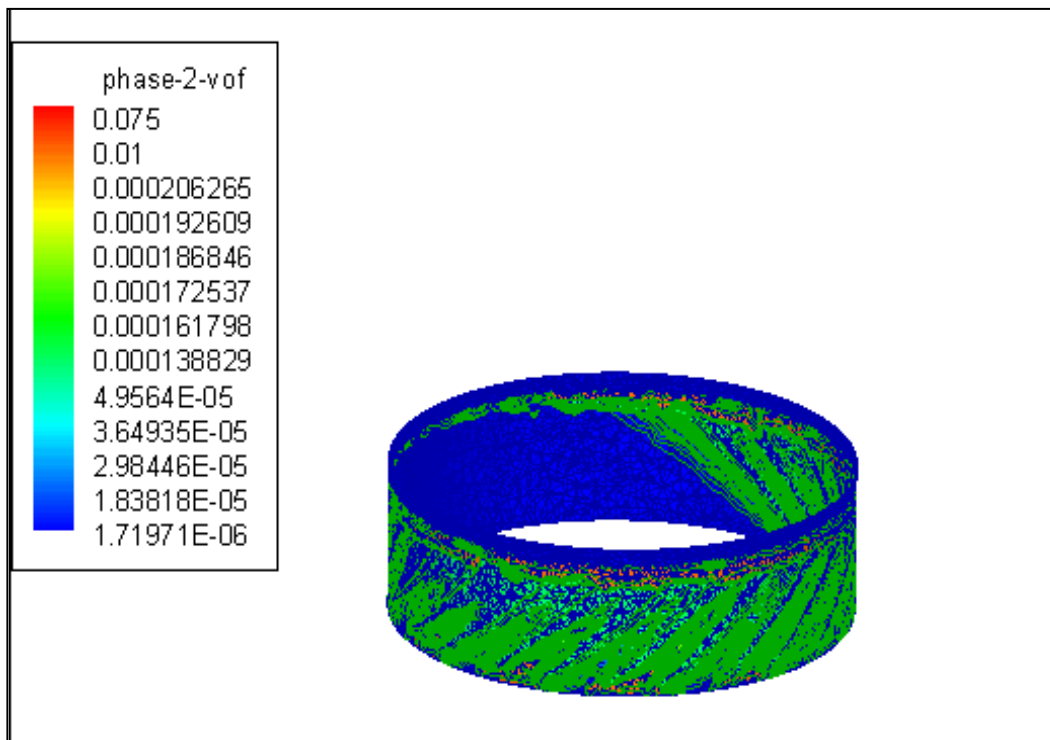


Figure (IV.44): contour de la fraction volumique pour un débit d'air de 2800m³/h à mi-largeur

Fraction volumique de l'air(%)	Débits de l'air [m^3h^{-1}]		
	1900	2500	2800
	1.03	1.62	1.68

Tableau (IV.15): Fractions volumiques de l'air dans tout le bassin en fonction du débit d'air

On constate qu'en augmentant le débit d'air injecté par les diffuseurs, la fraction volumique globale de l'air augmente dans le bassin, ce qui favorise le transfert de l'oxygène nécessaire aux réactions biologiques aérobies.

Conclusion générale

Le but du travail entrepris dans ce projet de magistère concerne la simulation numérique en 3D de l'hydrodynamique des écoulements turbulents monophasiques et diphasiques se produisant dans un réacteur de forme annulaire équipé de diffuseurs de fines bulles d'air et d'agitateurs munis de grandes pâles à vitesse lente. La résolution des équations modélisant ces écoulements a été réalisée grâce aux logiciels Gambit- Fluent.

Les efforts consentis pour traiter les écoulements diphasiques dans une géométrie tridimensionnelle et en régime turbulent ont débouché sur une maîtrise de ces logiciels. La principale difficulté rencontrée le long de ce travail concerne l'implémentation des conditions aux limites aux niveaux de la surface libre du bassin, des agitateurs et des diffuseurs.

Des simulations numériques ont donc pu être menées, à la fois sur des écoulements turbulents en monophasique et des écoulements turbulents diphasiques et dans les deux cas la procédure de résolution adoptée a été validée.

L'analyse des résultats obtenus montre que :

Dans le cas de l'écoulement turbulent monophasique :

- Les vitesses de circulation de l'eau diminuent au fur et à mesure que l'on s'approche des parois intérieures du bassin.
- Accroître la hauteur de la rugosité entraîne une diminution de la vitesse de circulation dans l'espace annulaire.
- Accroître la vitesse des agitateurs entraîne, cette fois ci, une augmentation de la vitesse de circulation ce qui représente un effet bénéfique sur l'écoulement en favorisant le brassage dans le bassin d'aération.

Dans le cas de l'écoulement turbulent diphasique :

- La hauteur du bassin n'a pas une influence significative sur la vitesse de circulation.
- Les vitesses de circulation locales et moyennes obtenues sont supérieures aux vitesses minimales requises pour éviter la décantation et le dépôt des boues dans le bassin d'aération.

➤ on remarque des zones de faibles vitesses entre les diffuseurs et l'absence de circulation de l'air dans celles-ci : Ce phénomène est dû à la présence de boucles de recirculation qui sont créées par l'aération. Ces boucles sont appelées les spiral-flows, elles sont néfastes à l'obtention de vitesses horizontales suffisantes. L'élimination de ces boucles se fait en augmentant la vitesse des agitateurs

➤ Le diamètre des bulles d'air a peu d'impact sur la vitesse de circulation de l'eau.

➤ Augmenter le débit d'air n'influence pas la vitesse de circulation mais accroît la fraction volumique de l'air dans le bassin d'aération, ce qui est bénéfique pour la croissance microbienne.

Nous estimons que ce travail représente une modeste contribution à la maîtrise de la CFD (Computational Fluid Dynamics) appliquée aux écoulements multiphasiques qui sont régis par des équations différentielles aux dérivées partielles.

Nous espérons poursuivre ce travail en considérant:

- ✓ D'autres modèles de turbulence.
- ✓ L'implémentation d'autres conditions aux limites au niveau de la surface libre du bassin d'aération.
- ✓ L'implémentation d'une équation de transport des composés organiques et azotés dans le logiciel.
- ✓ Des écoulements tri phasiques (solides-liquides-gaz).

Références bibliographiques

J Vaxelaire , N Roche, and C Prost (1994) : Oxygen Transfer in activated sludge surface-aerated process. Environmental Technology, volume 16 pp 279-285, Taylor et Francis CFD

J. Morchain, C. Maranges and C. Fonade (1999) : Modeling of a two-phase jet aerator under influence of a cross flow. Pergamon Elsevier

N Lesage, M Spérandio, C Lafforgue and A Cockx(2003) : calibration and application of 1-D model for oxidation ditches Ichem institution of chemical Engineers vol 81 part A

Tanguy Pierre (2003) : Simulation de l'hydrodynamique des réacteurs biologiques à culture libre. Mémoire d'ingénieur.

M. T. Dhotre and J. B. Joshi (2004) : Two-dimensional CFD Model for the prediction of flow pattern, pressure drop and heat transfer coefficient in bubble column reactors chemical engineering research and design.

Weidong Huang, Chundu Wu, Bingjia Xia and Weidong Xia (2005): Computational Fluid Dynamic Approach for Biological System Modeling

Vermande Stéphanie (2005) : Modélisation hydrodynamique et biologique des bassins d'aération. Thèse de doctorat

A.J. Bosma and B.A. Reitsma (2005): Hydraulic Design of Activated sludge Tanks with CFD Deventer, The Netherlands

Yannick Fayolle (2006) : Modélisation de l'hydrodynamique et du transfert d'oxygène dans les chenaux d'aération Thèse de doctorat

Yannick Fayolle, Sylvie Gillot, Arnaud Cockx, Sylvie Gillot, Michel Roustan, Alain Hédut (2007): "Oxygen transfer prediction in aeration tanks using CFD ". Elsevier Chemical Engineering journal 158(2010) 207-212

Mandar V. Tabib, Swarnendu A. Roy, Jyeshtharaj B. Joshi (2007): CFD simulation of bubble column. An analysis of interphase forces and turbulence models. Elsevier Chemical Engineering Journal 139 (2008) 589–614

William B. Rauen , Binliang Lin , Roger A. Falconer , Edmilson C. Teixeira: CFD and experimental model studies for water disinfection tanks with low Reynolds number flows. Elsevier Chemical Engineering Journal 137 (2008) 550–560

Y. Le Moullec, C.Gentric, O. Potier, J.P. Leclerc (2008) : CFD simulation of the hydrodynamics and reactions in an activated sludge channel reactor of waste water treatment" Elsevier Chemical Engineering Science 65 (2010) 492 – 498

Yannick Fayolle ,Sylvie Gillot, Arnaud Cockx, Laetitia Bensimhon, Michel Roustan, Alain Hédut (2009) : In situ characterization of local hydrodynamic parameters in closed-loop tanks. Elsevier Chemical Engineering journal 158(2010) 207-212

Achanta Ramakrishna Rao, Ajey Kumar Patel and Bimlesh Kumar (2008) : Oxygen transfer in circular surface aeration tanks Environmental Technology, vol 30, No, 7, June 2009, 747-753, Taylor et Francis

Cédric Laborde-Boutet, Faïçal Larachi, Nicolas Dromard, Olivier Delsart, Daniel Schweich (2009) : CFD simulation of bubble column flows: Investigations on turbulence models in RANS approach. Elsevier Chemical Engineering Science 64 (2009) 4399 – 4413

Weidong Huang, Chundu Wu, and Weidong Xia (2009): Oxygen Transfer in High-Speed Surface Aeration Tank for Wastewater Treatment: Full-Scale Test and Numerical Modeling JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING Vol. 135, No. 8, August 1, 2009

Long Fan, Nong Xu, Zhiqiang Wang, Hanchang Shi (2009) :PDA experiments and CFD simulation of a lab-scale oxidation ditch with surface aerators.Elsevier chemical engineering research and design 88 (2010) 23–33

Markus Gresh, Martin Armbruster, Daniel Braun, Willi Gujer (2010): Effects of aeration patterns on the flow field in wastewater aerations tanks. water research 45 (2011) 810-818, Science direct Elsevier (2010)

Xu Wang, Jie Ding, Wan-Qian Guo, Nan-Qi Ren(2010): A hydrodynamics–reaction kinetics coupled model for evaluating bioreactors derived from CFD simulation. Elsevier Bio resource Technology 101 (2010) 9749–9757

Xue Wang Xiaoqiang Jia , Jianping Wen(2011) : Transient CFD modeling of toluene waste gas biodegradation in a gas–liquid–solid three-phase airlift loop reactor by immobilized *Pseudomonas putida*. Elsevier Engineering Journal 172 (2011) 735– 745

Oliver Piriou, Yannick Fayolle, Arnaud Cockx, Sylvie Gillot(2011) : Utilisation d'un cas-test pour caractériser l'influence des obstacles présents dans les bassins d'aération sur les écoulements liquides et gaz-liquides.Manuscrit publié dans 'Stic et Environnement France'

R. Rihani, O. Guerri, J. Legrand (2011): Three dimensional CFD simulations of gas–liquid flow in milli-torus reactor without agitation. Chemical Engineering and Processing 50 (2011) 369–376

Y. Le Moullec, O. Potier, C. Gentric, J.P. Leclerc (2011) : Activated sludge pilot plant: Comparison between experimental and predicted concentration profiles using three different modelling approaches. Elsevier water research 45 (2011) 3085–3097

Xuesong Guo, Xin Zhou, Qiuwen Chen, Junxin Liu (2012): Flow field and dissolved oxygen distributions in the outer channel of the Orbal oxidation ditch by monitor and CFD simulation.Science-Direct Journal of Environmental Sciences 2013, 25(4) 645–651.

Angélique Delafosse, Marie-Laure Collignon, Sébastien Calvo, FrankDelvigne , Michel Crine , Philippe Thonart, Dominique Toye (2013) :CFD based compartment model for description of mixing in bioreactors. Laboratory of Chemical Engineering, Université de Liège Belgique

Hao Xie , Jiakuan Yang , Yuchen Hua, Hao Zhang , Yin Yang, Kai Zhang , Xinfeng Zhu YeLi , ChangzhuYang (2014) : Simulation of flow field and sludge settling in a full-scale oxidation ditch by using a two-phase flow CFD model. Elsevier Chemical Engineering 109(2014)296–305

Hatem Dhaouadi(2008) : Traitement des Eaux Usées Urbaines. Les procédés biologiques d'épuration

N. F. Gray (2004): **Biology of wastewater treatment.** University of Dublin,*Ireland*
Second edition