Note de présentation

La mécanique des fluides numérique appliquée à l'optimisation du transfert d'oxygène dans les bassins d'aération

L'optimisation des dispositifs d'aération équipant les bassins aérobies des stations d'épuration est essentielle pour garantir la qualité du traitement des eaux résiduaires, mais aussi pour limiter les coûts de construction et énergétiques des installations. À l'aide de la mécanique des fluides numérique, Irstea développe des modèles pour améliorer la conception et le fonctionnement de ces dispositifs.

La majorité des stations d'épuration françaises est constituée d'installations du type boues activées. Dans ces installations, des cultures bactériennes en suspension dégradent les substrats contenus dans les eaux résiduaires en conditions aérobies. L'apport en oxygène nécessaire à la croissance bactérienne est réalisé artificiellement, notamment à l'aide de systèmes d'insufflation d'air en fines bulles, disposés en fond de bassin, et couplés ou non à une agitation mécanique (figure ❶).

L'optimisation de ces dispositifs est impérative, d'une part pour garantir la qualité du traitement, et d'autre part pour réduire les coûts d'exploitation des installations, le poste aération pouvant représenter jusqu'à 60 % de la consommation électrique d'une station d'épuration à boues activées.

L'analyse des bases de données, constituées par Irstea depuis le début des années 1990, intégrant les performances d'aération mesurées en eau claire sur ce type de bassin, a conduit à l'élaboration de formules de dimensionnement des systèmes d'insufflation d'air en fines bulles (FNDAE[1], 2004). Cependant, le domaine d'application de ces outils basés sur l'empirisme est relativement restreint (limité par les configurations des bassins analysés, notamment la hauteur d'eau). Afin de s'affranchir de ces problèmes liés au changement d'échelle, et de développer des outils d'optimisation des dispositifs d'aération valides dans un large domaine, Irstea et le Laboratoire d'ingénierie des systèmes biologiques et procédés (LISBP – Institut national des sciences appliquées de Toulouse) se sont associés pour développer des modèles de mécanique des fluides numérique (CFD : *Computional Fluid Dynamics*). Les modèles proposés permettent de comprendre et de préciser les phénomènes physiques qui gouvernent l'aération, tout en apportant des solutions techniques concrètes aux acteurs industriels pour l'optimisation du dimensionnement et du fonctionnement de ce procédé. L'objectif reste de limiter les coûts de construction et énergétiques de la station, tout en maintenant un niveau de traitement élevé des eaux résiduaires.

Le développement de ces modèles est précisé dans la première partie de cet article en insistant notamment sur les données expérimentales requises. L'apport de cet outil pour l'optimisation du dimensionnement et du fonctionnement des systèmes d'aération est abordé dans la seconde partie.

La simulation des écoulements et du transfert d'oxygène dans les bassins d'aération – Données requises

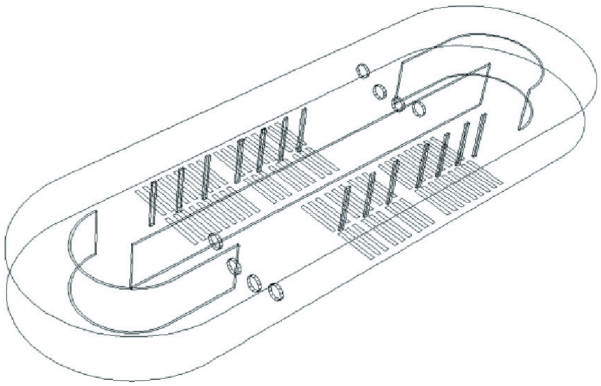
La CFD consiste à résoudre les équations générales de la mécanique des fluides (équations de Navier-Stokes) à l'aide de méthodes numériques et d'algorithmes, afin d'étudier les écoulements des fluides (liquide et gaz). Les bassins à étudier sont découpés en volumes élémentaires (le maillage) et les équations sont résolues sur chacune des mailles obtenues, permettant ainsi de déterminer localement les caractéristiques des écoulements (vitesses du gaz et du liquide) et du transfert de matière entre les deux phases. Outre les choix relatifs au maillage (taille et forme des volumes élémentaires), le développement de modèles CFD requiert :

- des données d'entrée, comme la taille des bulles d'air ou les modèles de transfert d'oxygène à utiliser ;
- des données de validation qui, par comparaison avec les résultats de simulation, permettent de valider les modèles retenus et de préciser leur domaine d'application. Il s'agit ici de la poussée des agitateurs, des vitesses de l'eau et du coefficient de transfert d'oxygène à l'échelle du bassin.

Dans le cadre de la thèse de Yannick Fayolle (2006) puis du projet ANR[2] O_2 STAR (encadré ❶), des méthodologies et des protocoles expérimentaux ont été mis au point afin d'acquérir les données requises au

1. Fonds national pour le développement des adductions d'eau.
2. Agence nationale de la recherche.

❶ **Photographie et schéma d'un chenal d'aération de forme oblongue.**



développement des modèles CFD en eau claire, les bassins étant remplis d'eau propre (ce qui est souvent le cas avant la mise en route des installations afin de mesurer les performances des dispositifs d'aération et de vérifier les garanties des constructeurs dans des conditions contrôlées).

La mesure de la taille des bulles d'air, l'un des paramètres régissant le transfert d'oxygène de la phase gazeuse vers le liquide, a notamment fait l'objet de développements spécifiques. Les dimensions des bulles d'air – ellipsoïdales quand on injecte de l'air dans de l'eau aux profondeurs des bassins d'aération (entre 4 et 8 m) – ainsi que leur évolution dans l'espace au cours de leur remontée sont déterminées à partir de photographies sous-marines (figure ❷) et d'une analyse des images obtenues.

La poussée des agitateurs, caractérisant la performance des agitateurs submersibles, a également été déterminée *in situ* dans le cadre du projet ANR O_2 STAR, par mesure de la force de réaction de l'écoulement sur les pales des mobiles d'agitation. Dans cet objectif, les agitateurs ont été installés sur des châssis spécifiquement adaptés des équipements et de la méthodologie décrite dans la norme ISO/CD-21630 (2004). Les résultats de ces mesures caractérisent l'impact du confinement des agitateurs et de la géométrie du bassin sur leur efficacité et constituent des données de validation des modèles d'agitation.

L'élaboration des modèles CFD pour la simulation du transfert d'oxygène nécessite également de disposer de corrélations rigoureuses pour décrire les flux d'oxygène au niveau des bulles d'air. La détermination par CFD de ce flux à l'échelle d'une bulle peut être réalisée par simulation directe (DNS[3]) ; il est fonction de la taille de la bulle, de sa vitesse, de la diffusion moléculaire dans le milieu et de la contamination de sa surface, liée à la présence de contaminants (particules, composées tensioactifs…) dans le milieu liquide.

L'ensemble de ces travaux a permis d'aboutir à un modèle complet des écoulements et du transfert d'oxygène dans les bassins d'aération, validé à l'aide de données recueillies sur différents bassins industriels.

Une analyse des écoulements et des phénomènes de transfert aux échelles locale et globale

Les modèles obtenus permettent, par simulation, d'obtenir des données locales (vitesses de liquide en tout point du bassin, répartition des bulles d'air…) et globales (vitesses moyennes de circulation de liquide, apport en oxygène…) relatives aux écoulements et au transfert d'oxygène des bulles d'air vers l'eau.

3. DNS = *Direct Numerical Simulation*.

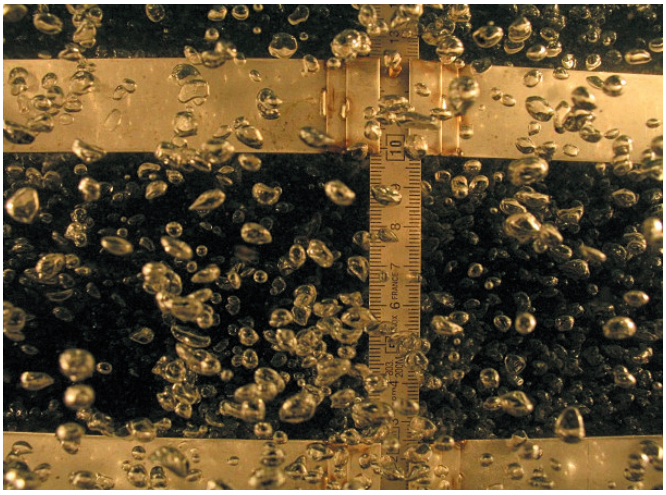
❶ O_2 STAR : un outil logiciel pour optimiser les écoulements et le transfert d'oxygène dans les bioréacteurs de traitement des eaux résiduaires

O_2 STAR (https ://o2star.cemagref.fr/) est un projet de recherche industrielle coordonné par Irstea qui a bénéficié d'une aide financière de l'Agence nationale de la recherche. Il associe aussi Xylem, le Laboratoire d'ingénierie des systèmes biologiques et procédés (LISBP), l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse et Degrémont-France Assainissement. Le projet a commencé en avril 2008 et a duré quarante-cinq mois.

Le principal objectif du projet O_2 STAR était de mettre à disposition des constructeurs de stations d'épuration, bureaux d'études, équipementiers et exploitants, un outil logiciel permettant de dimensionner et d'optimiser les systèmes d'aération équipant les bioréacteurs aérobies. Le logiciel O_2 STAR repose sur le couplage de modèles d'écoulements et de transfert de matière, développés à différentes échelles (du pilote aux réacteurs industriels), et dont la validation a nécessité l'acquisition de données *in situ* à l'aide de méthodes innovantes. L'utilisation de ce logiciel par les professionnels du domaine permettra de garantir les performances des dispositifs à insufflation d'air, et donc de renforcer la protection des ressources en eau, en fiabilisant le traitement des eaux résiduaires.

Une version β du logiciel est en cours de test, et sa mise en ligne est envisagée au plus tôt début 2013.

❷ Exemple de prise de vue dans un panache de bulles d'air (immersion de 4,5 m). Les bulles d'air sont ellipsoïdales avec des dimensions de quelques millimètres.



Ces résultats de simulation sont utilisés :

• pour étudier l'impact de choix de conception et de dimensionnement (formes et dimension des bassins, hauteur d'eau, nombre et disposition des rampes de diffuseurs d'air, caractéristiques du système d'agitation…) et de paramètres caractéristiques du fonctionnement des installations (débit d'air…) sur les performances d'oxygénation des systèmes d'aération ;

• en ingénierie, pour concevoir et dimensionner un dispositif d'aération, même si les temps de calcul requis ne permettent pas d'envisager un recours systématique à la modélisation CFD dans cet objectif. Cet outil permet notamment de valider des solutions innovantes en termes de dimensionnement. Son utilisation peut également être envisagée pour valider une modification des équipements ou pour expliquer d'éventuels dysfonctionnements et mettre en évidence les moyens d'y remédier ;

• en recherche, pour analyser et comprendre les processus qui régissent les écoulements et le transfert d'oxygène. À titre d'exemple, la figure ❸ présente les panaches de bulles d'air issus de simulations CFD pour deux conditions d'agitation différentes. Par comparaison des deux images, il apparait que l'agitation a pour effet d'incliner le panache de bulles et ainsi d'augmenter la dispersion de celles-ci dans le liquide. Ce type de résultat permet notamment d'analyser l'impact des conditions d'agitation sur le transfert d'oxygène ;

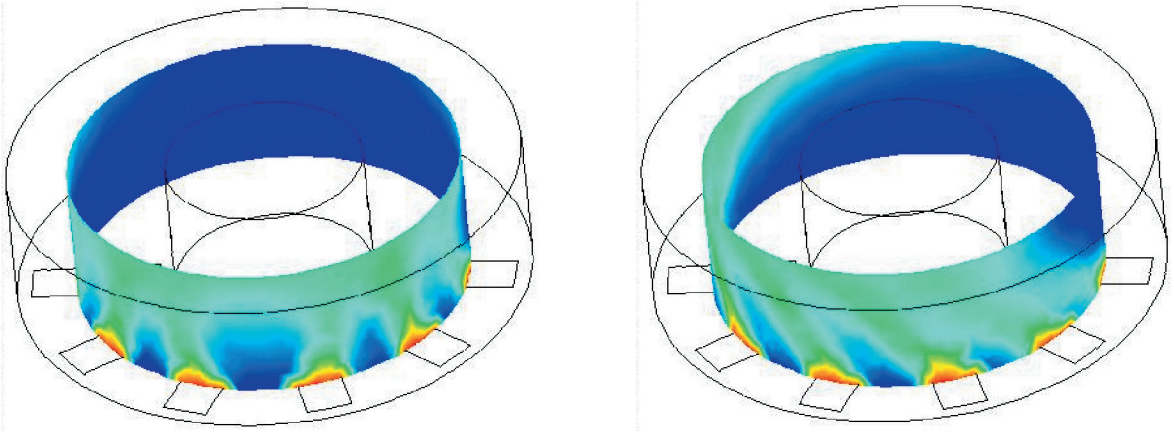
• pour développer des modèles plus simples, qui seront ensuite utilisés dans des plateformes logicielles ne requérant pas l'utilisation des codes de calcul CFD. Ces résultats numériques permettent notamment de compléter les données expérimentales et d'étendre ainsi le domaine d'application de ces modèles simplifiés. Cet objectif constitue l'une des tâches du projet O_2 STAR (encadré ❶).

Perspectives

La mécanique des fluides numérique constitue à ce jour un outil puissant pour l'optimisation des performances d'oxygénation des bassins d'aération, à condition d'utiliser des modèles numériques adaptés et de les valider. Cependant, les temps de calculs requis par les simulations ne permettent pas d'envisager son utilisation de façon systématique pour la conception et le dimensionnement des dispositifs d'aération. C'est pourquoi le développement de modèles plus simples doit être poursuivi afin de fournir des outils spécifiques à cette application. De tels modèles seront intégrés au logiciel O_2 STAR, qui sera mis à disposition des acteurs du domaine au plus tôt début 2013.

Les développements actuels portent également sur l'adaptation de ces modèles aux conditions réelles de fonctionnement des installations, c'est-à-dire en présence de boues activées. Cette adaptation nécessite notamment la prise en compte des effets visqueux des boues et le développement de modèles de transfert adaptés. ■

❸ Représentation CFD de panaches de bulles d'air pour des simulations sans agitation (image de gauche) et avec agitation, pour une vitesse de liquide de 0,45 m.s-1 (image de droite).



Les auteurs

Yannick FAYOLLE, Alain HÉDUIT et Sylvie GILLOT
Irstea, UR HBAN, Hydrosystèmes et bioprocédés,
1 rue Pierre-Gilles de Gennes, 92761 Antony Cedex
yannick.fayolle@irstea.fr
alain.heduit@irstea.fr
sylvie.gillot@irstea.fr

Arnaud COCKX
LISBP, INSAT,
135 avenue de Rangueil,
31077 Toulouse Cedex 4
arnaud.cockx@insa-toulouse.fr

Quelques références clés...

- **COCKX, A., DO-QUANG, Z., AUDIC, J.M., LINE, A., ROUSTAN, M.,** 2001, Global and local mass transfer coefficients in waste water treatment process by computational fluid dynamics, *Chemical Engineering and Processing*, vol. 40, p. 187-194.
- **FAYOLLE, Y.,** 2006, *Modélisation de l'hydrodynamique et du transfert d'oxygène dans les chenaux d'aération*, thèse de doctorat, spécialité génie des procédés et de l'environnement, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 295 p.
- **FAYOLLE, Y., COCKX, A., GILLOT, S., ROUSTAN, M., HEDUIT, A.,** 2007, Oxygen transfer prediction in aeration tanks using CFD, *Chemical Engineering Science*, vol. 62, n° 24, p. 7163-7171.
- **FAYOLLE, Y., GILLOT, S., COCKX, A., BENSIMHON, L., ROUSTAN, M., HEDUIT, A.,** 2010, In situ characteristics of local hydrodynamics parameters in closed loop aeration tanks, *Chemical Engineering Journal*, vol. 158, n° 2, p. 207-212.
- **GILLOT, S., HEDUIT, A.,** 2004, *Prédiction des capacités d'oxygénation en eau claire des systèmes d'insufflation d'air*, Document technique FNDAE n° 31, 36 p.
- **LE MOULLEC, T., POTIER, O., GENTRIC, C., LECLERC, J.P.,** 2011, Activated sludge pilot plant : Comparison between experimental and predicted concentration profiles using three different modelling approaches, *Water Research*, vol. 45, n° 10, p. 3085-3097.

▶ Consulter l'ensemble des références sur le site de la revue www.set-revue.fr

Diffuseurs d'air fines bulles en bassin d'aération.

© S. Capela (Irstea)