



Unité de Recherche

Hydrosystèmes et bioprocédés

SUJET DE THESE

IMPACT COUPLE DE LA RHEOLOGIE DES BOUES ACTIVEES ET DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU LIQUIDE INTERSTITIEL POUR LA MODELISATION DU TRANSFERT D'OXYGENE DANS LES PROCEDES DE TRAITEMENT DES EAUX RESIDUAIRES URBAINES

Titre en anglais

Coupled impact of activated sludge rheology and physicochemical properties of interstitial liquid for modelling of oxygen transfer in urban wastewater treatment processes

Résumé en français

L'optimisation énergétique des stations d'épuration implique une meilleure gestion de l'aération, poste le plus consommateur. Dans cet objectif, les outils de modélisation, notamment basés sur la mécanique des fluides numérique, sont actuellement développés. Cependant, la prise en compte des conditions de fonctionnement sur les phénomènes de transfert de matière dans ces modèles reste à ce jour très limitée, ne permettant pas une large utilisation de ces outils. Le sujet propose de caractériser expérimentalement, en colonne à bulles, l'impact couplé des propriétés physico-chimiques du liquide interstitiel et de la rhéologie des boues sur les propriétés des bulles d'air et les phénomènes de transfert d'oxygène résultants. Ces résultats expérimentaux seront alors utilisés afin de définir des relations de fermeture de modèles par bilans de population afin de les intégrer, à terme, aux outils de mécanique des fluides numérique.

Résumé en anglais

Energy efficiency of Water Resource Recovery Facilities induces a better management of aeration, which is the most energy intensive aspect of such facilities. To this aim, advanced modelling tools, such as Computational Fluid Dynamic, are currently developed. However, the impact of operating conditions on mass transfer is modelled in a very simplistic manner which does not allow to use such models for oxygen transfer prediction and optimization. This PhD project proposes to measure the coupled impact of physicochemical properties of interstitial liquid and activated sludge rheology on air bubble properties and associated oxygen transfer, using large bubble column filled with specific synthetic matrix at a laboratory scale. The resulting data will be used to propose closure laws of population balance models for future implantation in CFD ones.

Mots clés

Boues activées, traitement des eaux, énergie, rhéologie, transfert de matière, bilan de population

Contacts

Yannick Fayolle, Irstea Antony, Tel : 01 40 96 60 32, Email : yannick.fayolle@irstea.fr

Sylvie Gillot, Irstea Lyon-Villeurbanne, Tel : 04 72 20 87 07, Email : sylvie.gillot@irstea.fr

Arnaud Cockx, INSA-LISBP, Tel : 05 61 55 97 97, Email : arnaud.cockx@insa-toulouse.fr

Contexte et enjeux / Etat de l'art

L'efficacité énergétique des procédés, et notamment ceux utilisés en traitement des eaux résiduaires, représente actuellement un axe majeur de recherche et de développement. Pour les stations d'épuration actuelles, l'aération demeure le poste majeur en termes de consommation énergétique (pouvant représenter jusqu'à 60% de la consommation générale de la station, Rosso and Stenstrom, 2005 ; Canler et Stricker, 2016). Ce poste permet d'apporter l'oxygène nécessaire au développement de la biomasse épuratoire aérobie. Aussi, la maîtrise de la consommation énergétique des stations d'épuration passe nécessairement par une meilleure gestion des systèmes d'aération et notamment par la compréhension et la prise en compte des phénomènes de transfert de matière intervenant au sein de ces unités de traitement. Afin de proposer des solutions optimisées, les outils de modélisation s'avèrent essentiels mais le niveau de détail des modèles actuellement proposés pour la représentation de l'aération reste limité, en comparaison des modèles bio-cinétiques, et ne permettent pas d'atteindre ces objectifs (Amerlink, 2015 ; Amaral *et al.*, 2016). Le principal défi est lié à la prise en compte de l'impact des propriétés physico-chimiques des boues sur le transfert d'oxygène. Celui-ci réside dans la modification de la vitesse de transfert au niveau de l'interface gaz/liquide (k_L) par modification des propriétés locales au niveau de celle-ci mais également par modification de l'aire interfaciale d'échange (a) représentée par la surface des bulles d'air rapportée au volume de liquide à aérer.

Le développement des outils de mécanique des fluides numérique pour la simulation des écoulements en eau claire (Cockx *et al.*, 2001 ; Fayolle *et al.*, 2007) et en boues activées (Glover *et al.*, 2006 ; Gresch *et al.*, 2011 ; Yang *et al.*, 2011 ; Xie *et al.*, 2014 ; Lei and Ni, 2014) a permis de mettre en évidence l'impact de conditions de dimensionnement et de fonctionnement sur les écoulements à l'échelle globale et locale dans les ouvrages de traitement des eaux. Cependant, la prise en compte des conditions de fonctionnement (par l'intégration des propriétés physico-chimiques des boues) sur les écoulements des bulles générés par les systèmes d'insufflation d'air et le transfert de matière résultant n'est pas réalisée faute de modèles adaptés, ne permettant pas de quantifier précisément les apports en oxygène par l'utilisation de ces outils (Amaral *et al.*, 2016 ; Karpinska and Bridgeman, 2016).

Parallèlement, le développement de modèles basés sur l'empirisme ont permis d'intégrer l'impact des conditions de fonctionnement sur le transfert d'oxygène à l'échelle du procédé, mettant en évidence l'impact de la concentration en matière en suspension (Cornel *et al.*, 2003 ; Krampe and Krauth 2003 ; Jin *et al.*, 2006 ; Germain *et al.*, 2007 ; Henkel *et al.*, 2009 ; Racault *et al.*, 2011), de la composition de la phase dissoute (Wagner and Pöpel 1996; Gillot *et al.*, 2000; Rosso *et al.*, 2006; Hébrard *et al.*, 2009; Jamnongwong *et al.*, 2010) ou de l'âge de boues (Rosso *et al.*, 2005 ; Gillot and Héduit, 2008 ; Henkel, 2010) sur celui-ci. De plus, ces études ont également mis en évidence, à

l'échelle macroscopique, les dynamiques de contamination des bulles d'air par l'intégration de l'âge de bulles ou du temps de contact (Rosso and Stenstrom, 2006 ; Gillot and Héduit, 2008) en tant que paramètre explicatif des performances de transfert. Les travaux menés ces dernières années par Irstea dans le cadre de la thèse de Camilo Duran (2015) ont permis de préciser l'influence de la rhéologie des boues activées sur le transfert de matière et ainsi d'aboutir à des modèles empiriques à l'échelle macroscopique (Duran *et al.*, 2016). Cependant, les conclusions obtenues restent valables pour des systèmes équivalents à ceux étudiés dans le cadre de ces travaux (aération prolongée, très faible charge) et restent difficilement extrapolables à l'ensemble des conditions opératoires rencontrées sur les stations d'épuration, notamment liées aux propriétés physico-chimiques du liquide interstitiel des boues. De plus, l'interprétation des phénomènes observés amène à formuler des hypothèses sur l'impact couplé des propriétés physico-chimiques du liquide interstitiel et de la rhéologie des boues sur les dynamiques des bulles d'air à l'échelle locale, non mesurables en présence de boues activées (Duran, 2015).

Parallèlement à ces recherches, le développement de méthodes expérimentales permettant la visualisation des transferts locaux à l'interface gaz/liquide (Jimenez *et al.*, 2014), couplés à la simulation directe des écoulements aux interfaces (Figueroa-Espinoza and Legendre, 2010) permettront à terme de proposer des modèles fiables quant à l'impact des propriétés physico-chimiques des boues sur les transferts interfaciaux locaux (modélisation du k_L).

Aussi, le développement de modèles prédictifs des transferts d'oxygène dans les procédés de traitement des eaux, extrapolables à la majorité des conditions de fonctionnement, passe nécessairement par l'intégration des dynamiques des bulles en lien avec les propriétés physico-chimiques des boues pour la modélisation de leurs impacts sur l'aire interfaciale d'échange (a). La modélisation par bilan de population (PBM) présente un potentiel important pour l'intégration de ces phénomènes (Nopens *et al.*, 2015 ; Karpinska and Bridgeman, 2016), notamment démontré dans le cadre d'autres applications (Dhanasekharan *et al.*, 2005 ; Morchain *et al.*, 2014). De plus, le couplage de ce type de modélisation avec les outils de mécanique des fluides (Wang and Wang, 2007 ; Wang, 2011 ; Xing *et al.*, 2013) permettrait à terme de proposer des modèles couplant de façon efficiente écoulements et transfert de matière. Cependant, le développement de ce type de modèles reste très lié à la constitution de bases de données expérimentales nécessaires au développement de lois de fermeture et de validation des modèles.

Objectifs et descriptif des travaux

L'objectif de la thèse proposée est de développer des modèles basés sur la modélisation par bilan de population (PBM) permettant de prendre en compte l'impact couplé des propriétés physico-chimiques du liquide interstitiel et de la rhéologie des boues activées sur les propriétés des bulles d'air, et donc sur l'aire interfaciale d'échange (a), dans les procédés de traitement des eaux. Ce développement passe à la fois par (i) la constitution d'une base de données par la réalisation d'expérimentations en fluide modèle pour la définition des lois de fermeture des modèles, (ii) la réalisation d'expérimentation en fluide réel afin de disposer de données de validation et (iii) le développement de modèles numériques basés sur les bilans de population.

1. Lien entre l'échelle macro et micro pour la modélisation de la rhéologie des boues activées

Les travaux effectués dans le cadre de la thèse de Duran (2015) ont permis de développer un système expérimental permettant la mesure des caractéristiques rhéologiques des boues activées en lien avec les mesures de transfert. Les résultats obtenus sur un échantillon d'une dizaine de boues issues de six installations différentes ont permis de mettre en évidence l'impact de la concentration en matières en suspension (MES) sur ces propriétés rhéologiques et de proposer des modèles de prédiction de ces derniers. Cependant, ces modèles ne permettent pas de traduire l'ensemble des hétérogénéités observées pour les boues échantillonnées. La mesure des caractéristiques granulométriques de floccs biologiques a permis de fournir quelques éléments d'explications (Duran, 2015). Cependant, le développement de ces techniques de caractérisation granulométrique des boues a été poursuivi dans le cadre du post-doctorat de Yoan Péchaud (Pechaud *et al.*, en cours de rédaction) et permettent dorénavant de générer des informations plus poussées que celles obtenues dans le cadre des travaux de Duran (2015) sur la structure physique des floccs et sa dynamique.

Cette étape préliminaire consistera à poursuivre le développement des modèles rhéologiques des boues activées en couplant et poursuivant les mesures initiées par Duran (2015) et dans le cadre du post-doctorat de Péchaud (2014). Ces mesures devront permettre de proposer un modèle permettant de traduire l'ensemble des hétérogénéités observées sur les boues issues de différentes stations d'épuration.

2. Constitution d'une base de données de l'évolution d'une distribution de tailles de bulles d'air au sein d'une colonne à bulle en fluides modèles

(i) Définition des fluides modèles

Les outils métrologiques de détermination des distributions de taille de bulles ne permettant pas la détermination en fluides réels, le recours aux expérimentations en fluides modèles est nécessaire dans le cadre de la thèse. Ces fluides modèles seront définis en fonction des propriétés physico-chimiques des échantillons analysés de précédents projets. L'objectif est de se rapprocher le plus possible des propriétés observées expérimentalement sur les stations d'épuration (sels dissous, exo-polymères solubles (EPS), tensioactifs, tension de surface statique et dynamique) en termes de type et de concentration. Les propriétés rhéologiques des boues issues lors de la phase 1 du projet de thèse devront être le plus fidèlement reproduites.

(ii) Détermination de l'évolution de la distribution de taille de bulles d'air (DTB) au sein d'une colonne à bulles pour différentes conditions opératoires et propriétés physico-chimiques de la phase dissoute

Les DTB seront déterminées en colonne à bulle de grande taille pour différentes distances au système de diffusion de l'air par imagerie (photographie externe ou imagerie locale suivant financement). Ces mesures seront couplées avec des mesures de rétention de gaz locale à l'aide de sondes optiques mais également globale à l'aide de mesure de niveau. Pour chacune des conditions opératoires, le coefficient global de transfert d'oxygène sera également déterminé à l'aide de méthodes adaptées aux conditions opératoires.

Ces mesures seront réalisées pour des conditions opératoires contrastées en terme de débit d'air et de concentrations en perturbateurs du transfert (sels dissous, composés

tensioactifs, EPS). L'impact de chacun de ces perturbateurs du transfert sera mesuré indépendamment (leur impacts pouvant être dissemblables) mais également de façon couplée.

- (iii) Détermination de l'évolution de la distribution de taille de bulles d'air (DTB) au sein d'une colonne à bulles pour différentes conditions opératoires et propriétés rhéologiques du fluide modèle

Le même type d'expérimentations seront menées pour différentes propriétés rhéologiques du fluide modèle. Ces mesures se concentreront sur l'impact de fluides non-newtoniens rhéo-fluidifiants, équivalents aux boues activées. De plus, des propriétés rhéologiques contrastées permettant de reproduire l'impact de la concentration en matières en suspension (MES) sur celles-ci devront être intégrées (pour un équivalent MES de 1 à 10 g/l).

- (iv) Détermination de l'évolution de la distribution de taille de bulles d'air (DTB) au sein d'une colonne à bulles pour différentes conditions opératoires et couplant l'impact de la phase dissoute et des propriétés rhéologiques

L'objectif de cette étape sera de coupler les effets des propriétés de la phase dissoute à des propriétés rhéologiques spécifiques. Les propriétés des fluides choisies seront définies suite à l'interprétation des données obtenues lors des expérimentations précédentes afin de disposer de conditions opératoires contrastées. Le même type d'expérimentation seront menées au cours de cette étape. La compilation de l'ensemble de ces résultats devrait permettre de fournir des éléments d'interprétation quant à l'impact de boues activées sur le transfert de matière dans les procédés de traitement des eaux.

3. Développement de modèles des DTB basés sur le bilan de population

La modélisation en bilan de population devra permettre de décrire les évolutions de distribution de taille des bulles pour les différentes conditions opératoires en termes de propriétés hydrodynamiques (débit d'air) et caractéristiques des fluides. Les travaux résideront principalement dans la définition et le calage de lois de fermeture pour ces différentes conditions opératoires sur les mécanismes de coalescence et de fragmentation des bulles d'air. La variation de volume en fonction du transfert de matière et de la variation de pression hydrostatique devra également être intégrée. Les modèles ainsi développés seront validés par confrontation aux données expérimentales acquises dans le cadre de la thèse de Camilo Duran (2015). L'acquisition de données supplémentaires par la réalisation de mesures en colonne à bulle sur des boues prélevées au sein d'un bassin d'aération en flux piston est également envisagée. Ces mesures supplémentaires devraient permettre de disposer de données pour des conditions contrastées en termes de propriétés physico-chimiques du liquide interstitiel.

Organisation

- Encadrement

- Environnement Scientifique

La direction de la thèse sera assurée par Sylvie GILLOT (Directrice de recherche, Irstea Lyon). La co-direction de la thèse sera assurée par Arnaud COCKX (Professeur, LISBP Toulouse). L'encadrement de la thèse au sein de l'Unité de Recherche HBAN sera assuré par Yannick FAYOLLE (Ingénieur de recherche, docteur d'université).

- Environnement technique

Les campagnes expérimentales de laboratoire et de terrain seront réalisées avec l'appui de l'équipe technique de l'équipe EPURE de l'unité HBAN (1 IE, 2 AI).

- Nom de l'équipe

Le doctorant sera accueilli au sein de l'équipe EPURE de l'unité HBAN sur le site d'Irstea Antony (92)

- Profil du candidat recherché

Le candidat devra avoir une solide formation en génie des procédés. Il devra de plus être fortement motivé par la composante expérimentale de la thèse et par le travail en équipe. Un stage de fin d'étude ayant comporté une forte composante expérimentale et/ou un travail de modélisation phénoménologique serait un plus. Son niveau d'anglais devra lui permettre de présenter ces travaux à des congrès internationaux et de publier dans des revues scientifiques en langue anglaise.

Références

- Amaral A., Schraa O., Rieger L., Gillot S., Fayolle Y., Bellandi G., Amerlinck Y., Mortier S. T. F. C., Gori R., Neves R., Nopens I. 2016. Towards advanced aeration modelling: from blower to bubbles to bulk. *Water Science and Technology*, In press.
- Amerlinck Y. 2015. Model refinements in view of wastewater treatment plant optimization: improving the balance in sub-model detail. PhD thesis, Ghent University, Belgium.
- Canler J.P., Stricker A.E. (2016) Vers des stations d'épuration moins énergivores. Colloque « La station d'épuration du futur, maillon de l'économie circulaire, Lyon, 17 octobre 2016.
- Cockx A., Do-Quang Z., Audié J.M., Liné A., Roustan M. 2001. Global and local mass transfer coefficients in waste water treatment process by computational fluid dynamics. *Chemical Engineering and Processing*, 40 (2), pp. 187-194.
- Cornel P., Wagner M. and Krause S. 2003. Investigation of oxygen transfer rates in full scale membrane bioreactors. *Water Science and Technology*. 47. (11). pp. 313-319.
- Dhanasekharan K.M., Sanyal J., Jain A., Haidari A. 2005. A generalized approach to model oxygen transfer in bioreactors using population balances and computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Science*, 60 (1), pp. 213-218.
- Duran C. 2015. Rheological behaviour of activated sludge: Measurement, Modelling and Impact on oxygen transfer in bioreactors. PhD thesis, INSA Toulouse, France
- Durán C., Fayolle Y., Pechaud Y., Cockx A., Gillot S. 2016. Impact of suspended solids on the activated sludge non-newtonian behaviour and on oxygen transfer in a bubble column. *Chemical Engineering Science*, 141, pp. 154-165.
- Fayolle Y., Cockx A., Gillot S., Roustan M., Héduit A. 2007. Oxygen transfer prediction in aeration tanks using CFD. *Chemical Engineering Science*, 62 (24), pp. 7163-7171.
- Fayolle Y., Gillot S., Cockx A., Bensimhon L., Roustan M., Héduit A. 2010. In situ characterization of local hydrodynamic parameters in closed-loop aeration tanks. *Chemical Engineering Journal*, 158 (2), pp. 207-212.

- Figueroa-Espinoza B., Legendre D. 2010. Mass or heat transfer from spheroidal gas bubbles rising through a stationary liquid. *Chemical Engineering Science*, 65 (23), pp. 6296-6309.
- Germain E., Nelles F., Drews A., Pearce P., Kraume M., Reid E., Judd S. J. and Stephenson T. 2007. Biomass effects on oxygen transfer in membrane bioreactors. *Water Research*. 41. (5). pp. 1038-1044.
- Gillot S., Capela S. and Hédouit A. 2000. Effect of horizontal flow on oxygen transfer in clean water and in clean water with surfactants. *Water Research*. 34. (2). pp. 678-683.
- Gillot S., Hédouit A. 2008. Prediction of alpha factor values for fine pore aeration systems. *Water Science and Technology*, 57 (8), pp. 1265-1269.
- Glover, G.C., Printemps C., Essemiani K., Meinhold J. 2006. Modelling of wastewater treatment plants - How far shall we go with sophisticated modelling tools? *Water Science and Technology*, 53 (3), pp. 79-89.
- Gresch M., Armbruster M., Braun D., Gujer W. 2011. Effects of aeration patterns on the flow field in wastewater aeration tanks. *Water Research*, 45 (2), pp. 810-818.
- Hebrard G., Zeng J. and Loubiere K. 2009. Effect of surfactants on liquid side mass transfer coefficients: A new insight. *Chemical Engineering Journal*. 148. (1). pp. 132-138.
- Henkel J. 2010. *Oxygen Transfer Phenomena in Activated Sludge*. Technische Universität Darmstadt, + annexes.
- Henkel J., Lemac M., Wagner M. and Cornel P. 2009. Oxygen transfer in membrane bioreactors treating synthetic greywater. *Water Research*. 43. (6). pp. 1711-1719.
- Jamnongwong M., Loubiere K., Dietrich N. and Hebrard G. 2010. Experimental study of oxygen diffusion coefficients in clean water containing salt, glucose or surfactant: Consequences on the liquid-side mass transfer coefficients. *Chemical Engineering Journal*. 165. (3). pp. 758-768.
- Jimenez M., Dietrich N., Grace J.R., Hébrard G. 2014. Oxygen mass transfer and hydrodynamic behaviour in wastewater: Determination of local impact of surfactants by visualization techniques. *Water Research*, 58, pp. 111-121.
- Jin B., Yin P. and Lant P. 2006. Hydrodynamics and mass transfer coefficient in three-phase air-lift reactors containing activated sludge. *Chemical Engineering and Processing*. 45. (7). pp. 608-617.
- Karpinska A.M., Bridgeman J. 2016. CFD-aided modelling of activated sludge systems - A critical review. *Water Research*, 88, pp. 861-879.
- Krampe J. and Krauth K. 2003. Oxygen transfer into activated sludge with high MLSS concentrations. *Water Science and Technology*. 47. (11). pp. 297-303.
- Lei L., Ni J. 2014. Three-dimensional three-phase model for simulation of hydrodynamics, oxygen mass transfer, carbon oxidation, nitrification and denitrification in an oxidation ditch. *Water Research*, 53, pp. 200-214.
- Morchain J., Gabelle J.-C., Cockx A., 2014. A coupled population balance model and CFD approach for the simulation of mixing issues in lab-scale and industrial bioreactors. *AIChE Journal*, 60 (1), pp. 27-40.
- Nopens I., Torfs E., Ducoste J., Vanrolleghem P.A., Gernaey K.V. 2015. Population balance models: A useful complementary modelling framework for future WWTP modelling. *Water Science and Technology*, 71 (2), pp. 159-167.
- Racault Y., Stricker A. E., Husson A., Gillot S. 2011. Monitoring the variations of OTR in a full-scale membrane bioreactor using daily mass balances. *Water Science & Technology*. 63.(11). pp. 2651-2657.
- Rosso D., Huo D. L. and Stenstrom M. K. 2006. Effects of interfacial surfactant contamination on bubble gas transfer. *Chemical Engineering Science*. 61. (16). pp. 5500-5514.
- Rosso D., Iranpour R. and Stenstrom M. K. 2005. Fifteen Years of Offgas Transfer Efficiency Measurements on Fine-Pore Aerators: Key Role of Sludge Age and Normalized Air Flux. *Water Environment Research*. 7. (3). pp. 266-272.
- Rosso D., Stenstrom, M. K. 2005. Economic Implications of Fine Pore Diffuser Aging. *Proc. Water Environ. Fed.* 78, 810-815.
- Rosso D. and Stenstrom M. K. 2006. Surfactant effects on [alpha]-factors in aeration systems. *Water Research*. 40. (7). pp. 1397-1404.
- Wagner M. and Pöpel H. J. 1996. Surface active agents and their influence on oxygen transfer. *Water Science and Technology*. 34. (3-4). pp. 249-256.
- Wang T. 2011. Simulation of bubble column reactors using CFD coupled with a population balance model. *Frontiers of Chemical Engineering in China*, 5 (2), pp. 162-172.
- Wang T., Wang J. 2007. Numerical simulations of gas-liquid mass transfer in bubble columns with a CFD-PBM coupled model. *Chemical Engineering Science*, 62 (24), pp. 7107-7118.
- Xie H., Yang J., Hu Y., Zhang H., Yang Y., Zhang K., Zhu X., Li Y., Yang C. 2014. Simulation of flow field and sludge settling in a full-scale oxidation ditch by using a two-phase flow CFD model. *Chemical Engineering Science*, 109, pp. 296-305.

- Xing C., Wang T., Wang J. 2013. Experimental study and numerical simulation with a coupled CFD-PBM model of the effect of liquid viscosity in a bubble column. *Chemical Engineering Science*, 95, pp. 313-322.
- Yang Y., Yang J., Zuo J., Li Y., He S., Yang X., Zhang K. 2011. Study on two operating conditions of a full-scale oxidation ditch for optimization of energy consumption and effluent quality by using CFD model. *Water Research*, 45 (11), pp. 3439-3452.