Ecoulement liquide-liquide en milli-canal ondulé : hydrodynamique et transferts

Antoinette MAARAWI[1], Zoé ANXIONNAZ-MINVIELLE[1], Pierre COSTE[1], Nathalie DI MICELI RAIMONDI[2], Michel CABASSUD[2]

Affiliation 1 : Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTCH, Laboratoire Composants et Systèmes Thermiques, 38000 Grenoble, France.

Affiliation 2 : Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

Introduction

Les échangeurs/réacteurs milli-structurés se sont avérés prometteurs pour la mise en œuvre de synthèses chimiques, notamment rapides et exothermiques. Dans le cas de réactions multiphasiques, le transfert de matière peut devenir l'étape limitante contrôlant la réaction chimique. Par conséquent, ce travail vise à la fois à caractériser l'écoulement (cartographies par visualisations) et quantifier le transfert de matière liquide-liquide dans le milli-canal ondulé de l'échangeur/réacteur « DeanHex » (Théron et al., 2014) pour pouvoir finalement établir un modèle complet de ce dispositif capable de prédire ses performances à l'échelle industrielle.

Matériels et méthodes

Des études expérimentales sont menées sur trois milli-canaux zigzag de section carrée (diamètres hydrauliques d_h = 2, 3 et 4 mm). Le système de fluides diphasique eau/rhodamine B/octanol est utilisé. Des visualisations des écoulements sont réalisées pour différents couples de débits des phases. Ensuite, le transfert de la rhodamine B de l'eau vers l'octanol est suivi pour un débit total des phases entre 1,5 et 6 $kg \cdot h^{-1}$ et un ratio des débits, q, entre 0,5 et 2. A la sortie du réacteur, un raccord en T en acier dans lequel est introduit un capillaire en téflon permet d'extraire sélectivement et partiellement la phase organique en se basant sur le principe de mouillabilité des liquides par rapport à un matériau solide donné. La phase organique est ensuite analysée par spectrométrie UV-Visible.

Résultats

Quatre types de régime d'écoulement sont observés. Une cartographie d'écoulement est établie en fonction du nombre de Weber côté phase dispersée, We_{aq}, et du nombre de Dean interne côté phase continue, Dei_{org}.

$$We_{aq} = \rho_{aq} u_{aq,0} d_h / \gamma$$

$$Dei_{org} = (\rho_{org} u_{org,0} d_h / \mu_{org}) \cdot (d_h / R_{ci})$$

ρ_i et μ_i sont la masse volumique et la viscosité de la phase i, γ la tension interfaciale entre les phases, $u_{i,0}$ la vitesse superficielle de la phase i et R_{ci} le rayon de courbure interne des coudes. Cette représentation permet une séparation nette des régimes d'écoulement dans les trois milli-canaux (cf. figure 1).

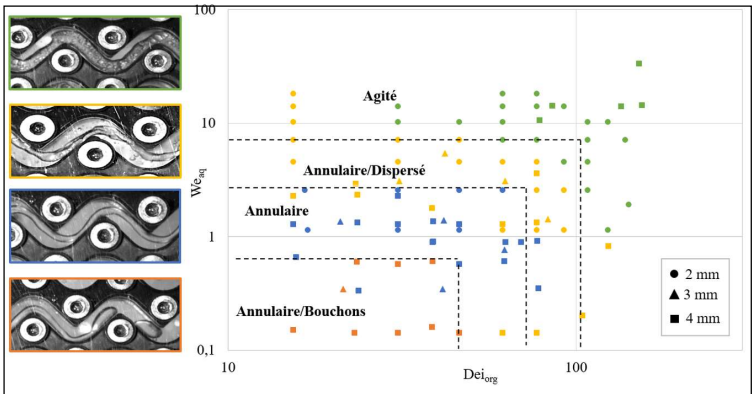
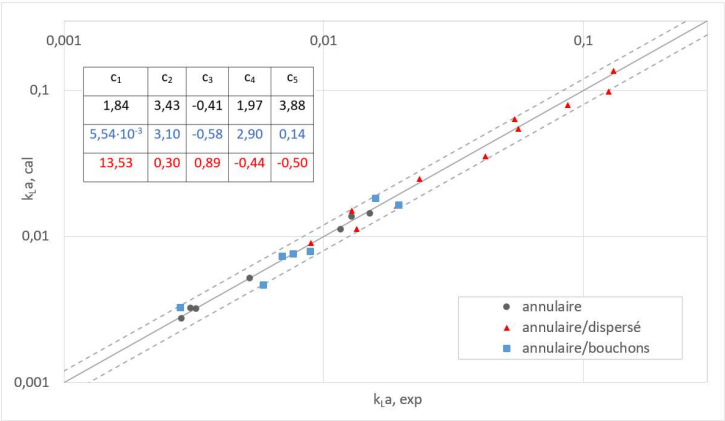


Figure 1 : Cartographie d'écoulement séparant différents régimes d'écoulements observés.

Des expériences de transfert de matière sont ensuite réalisées. Les coefficients de transfert de matière « k_La » obtenus dans les trois milli-canaux varient entre 0,003 et 0,130 s^{-1}. A iso-vitesse, le régime d'écoulement est conservé quelle que soit la taille du canal et des tendances de k_La similaires sont observées. Ce résultat est intéressant pour envisager une procédure d'extrapolation. Une corrélation du Sherwood modifié est établie pour chaque régime d'écoulement :

$$\mathrm{Sh}^* = \frac{k_L a \cdot d_h}{D} = \mathrm{c}_1 \cdot \mathrm{Dei}_{\mathrm{org}}^{\mathrm{c}_2} \cdot \mathrm{We}_{\mathrm{aq}}^{\mathrm{c}_3} \cdot \mathrm{q}^{\mathrm{c}_4} \cdot \left(\frac{\mathrm{R_{ci}}}{\mathrm{L_d}}\right)^{\mathrm{c}_5}$$

où *D* est le coefficient de diffusion du soluté dans la phase aqueuse, L_d est la longueur droite entre les coudes ; c_1 à c_5 sont des constantes qui diffèrent d'un régime à l'autre. Ces corrélations permettent de prédire les résultats expérimentaux à ± 20% (cf. figure 2).



c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
1,84	3,43	-0,41	1,97	3,88
$5{,}54 \cdot 10^{-3}$	3,10	-0,58	2,90	0,14
13,53	0,30	0,89	-0,44	-0,50

Figure 2 : Comparaison entre les valeurs de k_La expérimentales et celles prédites par la corrélation dans les canaux zigzag, pour chaque régime d'écoulement (lignes pointillées : erreur de 20%).

Conclusion

Ce travail concerne le développement d'un dispositif expérimental pour étudier à la fois l'hydrodynamique d'un écoulement liquide-liquide et le transfert de matière dans trois milli-canaux ondulés de dimensions croissantes. Une cartographie d'écoulement et des corrélations pour la prédiction du coefficient de transfert de matière sont établies. Ces différentes corrélations servent à alimenter le modèle 1D/3D développé en parallèle des travaux expérimentaux sous Comsol Multiphysics (Maarawi et al., 2021). Ce modèle intègre les mécanismes thermo-hydrauliques et le transfert de matière dans un objectif de prédiction des performances lors de l'extrapolation de l'échangeur/réacteur « DeanHex ».

Références bibliographiques

Maarawi A., Anxionnaz-Minvielle Z., Coste P., Di Miceli Raimondi N., Cabassud M., « 1D/3D Numerical Approach for Modelling a Milli-Structured Heat Exchanger/Reactor », *Chemical Engineering Transactions*, **2021**, vol. 86, p. 1441-1446.

Théron F., Anxionnaz-Minvielle Z., Cabassud M., Gourdon C., Tochon P., « Characterization of the performances of an innovative heat-exchanger/reactor », *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, **2014**, vol. 82, pp. 30–41, doi: 10.1016/j.cep.2014.04.005