



## ETUDE DE L'INFLUENCE D'UNE PHASE DISPERSÉE SUR LE MÉLANGE DANS LES ÉCOULEMENTS DE TAYLOR-COUETTE

Diane Dherbécourt<sup>a,b\*</sup>, Sophie Charton<sup>a</sup>, Fabrice Lamadie<sup>a</sup>, Sébastien Cazin<sup>b</sup>, Eric Climent<sup>b</sup>

(a)CEA, DEN, DTEC, SGCS, F-30207 Bagnols-sur-Cèze, France

(b)Institut de Mécanique des Fluides, Université de Toulouse, CNRS-INPT-UPS, F-31400 Toulouse, France

\*Correspondant : [diane.dherbecourt@cea.fr](mailto:diane.dherbecourt@cea.fr)

**Résumé :** A l'instar des travaux de Nemri [1], les mécanismes de mélange sont étudiés par Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) grâce à un traceur dissous dans la phase continue. Ces mesures PLIF sont synchronisées avec des mesures par Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) afin de caractériser le régime hydrodynamique dans lequel se trouve l'écoulement.

### 1 Introduction

Les réacteurs basés sur les écoulements de Taylor-Couette sont utilisés dans des domaines aussi variés que la chimie, la métallurgie ou encore l'industrie nucléaire depuis les travaux précurseurs de Davies et Weber [2]. Les faibles débits possibles sont un atout majeur dans l'étude des processus d'extraction liquide-liquide. Dans le cadre du développement et de l'expérimentation à l'échelle laboratoire de nouveaux procédés pour le retraitement des combustibles irradiés, le Laboratoire de Génie Chimique et Instrumentation du CEA de Marcoule a conçu et réalisé une colonne d'extraction liquide-liquide dénommée « Colonne Couette » qui permet de reproduire, à faible débit et avec un encombrement réduit, les performances de séparation d'une colonne pulsée industrielle, devenant ainsi un prototype de choix pour la R&D nucléaire [3]. Les performances d'extraction de la colonne dépendent fortement des propriétés de mélange de l'écoulement dans l'espace annulaire.

Depuis les travaux de Taylor [4], la dynamique non-linéaire de l'écoulement de Taylor-Couette a été étudiée en détail. La colonne Couette a pour particularité de présenter plusieurs régimes d'écoulement selon la vitesse de rotation du cylindre interne (le cylindre externe restant fixe). On définit ainsi un nombre de Reynolds dépendant du rayon interne  $R_i$ , de la vitesse de rotation  $\omega$ , de l'espace annulaire  $e$  et de la viscosité cinématique  $\nu$  :

$$Re = \frac{R_i \cdot e \cdot \omega}{\nu}$$

Le premier régime observé est un écoulement laminaire (écoulement azimutal de Couette pur). A partir d'un nombre de Reynolds critique, l'instabilité de Taylor se développe : l'apparition de rouleaux toroïdaux amène au régime de Taylor-

Couette (figure 1, régime TVF). En augmentant la vitesse de rotation du cylindre interne, les rouleaux se mettent à onduler dans la direction azimutale et le régime devient instationnaire, avant d'être complètement déstabilisé et transiter progressivement vers la turbulence développée.

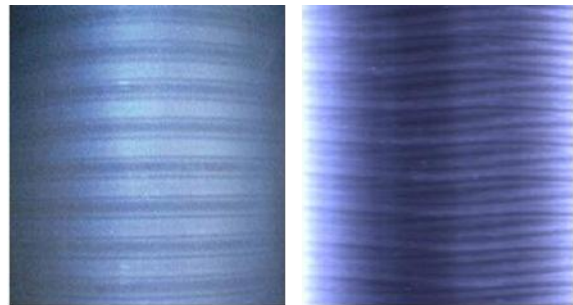


Figure 1 : A gauche, rouleaux toroïdaux stationnaires. A droite, ondulation azimutale des rouleaux.

Les performances d'extraction de la colonne dépendent fortement des propriétés de mélange de l'écoulement dans l'espace annulaire, elles-mêmes fortement reliées au régime hydrodynamique. Ces propriétés sont étudiées par PLIF grâce à un traceur fluorescent injecté dans la phase continue. En parallèle, des mesures de PIV permettent de caractériser la structure spatiale des écoulements en présence.

L'étude de Nemri et al. [5] est ici étendue à un écoulement diphasique dans la colonne Couette.

### 2 Matériel utilisé

#### Géométrie de la colonne Couette

L'étude a été réalisée dans une colonne dont les caractéristiques géométriques sont décrites dans la figure 2.

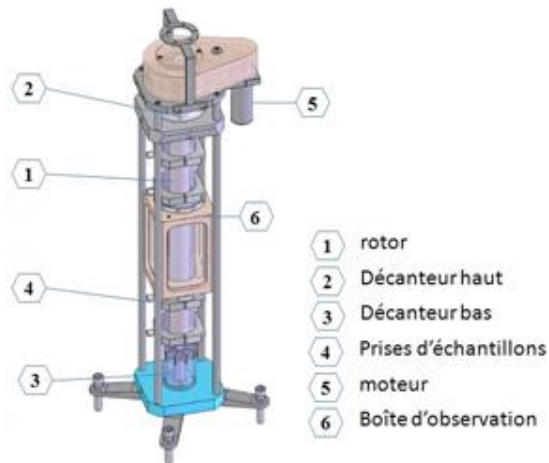


Figure 2: Principe de la colonne Couette

Le rotor, en inox, a un rayon de 24 mm et le cylindre extérieur en plexiglas un rayon de 35 mm, ce qui représente un entrefer (espace annulaire) de 11 mm. L'écoulement de Taylor-Couette étant sensible à son histoire [4], un générateur de rampe est utilisé afin d'assurer la reproductibilité des expériences.

### Choix de la phase dispersée

Les gouttelettes de petite taille présentes en extraction liquide/liquide sont modélisées par des particules solides afin d'éviter les phénomènes de déformation, coalescence et rupture des interfaces. Des billes de PMMA parfaitement sphériques et de taille calibrée (de 1,5 mm à 3 mm de diamètre) sont ainsi utilisées pour modéliser la phase dispersée. Ce matériau est choisi pour son indice de réfraction ( $n=1,489$ ) proche de celui du verre borosilicate ( $n=1,472$ ) dont est constitué le fut de la colonne, pour sa densité bien inférieure à celle du verre ( $1,19 \text{ g/cm}^3$ ) et pour sa bonne transparence à la lumière.

### Adaptation en densité et indice de réfraction

Afin d'éviter les problèmes liés à la sédimentation ou au crémage des billes dans la colonne, la phase continue est adaptée en densité avec les billes de PMMA. Elle est également adaptée en indice de réfraction (figure 3) pour pouvoir faire des mesures avec des concentrations modérées en phase dispersée.

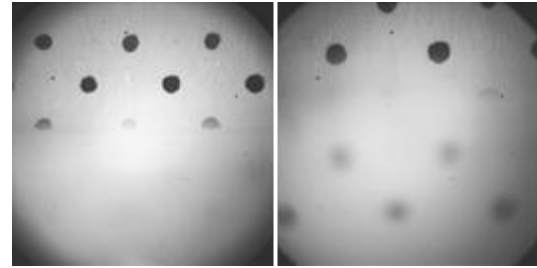


Figure 3: Illustration de l'adaptation d'indices : à gauche, une différence trop importante entre les indices de réfraction de la phase liquide et des billes ne permet pas de distinguer le pattern de points placés derrière. À droite, la phase liquide et les billes ont des indices proches.

Une étude bibliographique, complétée par des essais de formulation, ont permis de trouver une solution adaptée : un mélange en proportions déterminées de KSCN (thiocyanate de potassium), DMSO (diméthylsulfoxyde) et d'eau [6], qui constitue donc la phase continue lors des expériences.

### 3 Couplage PIV/LIF

Pour réaliser l'étude locale de l'hydrodynamique de l'écoulement, ce dernier est observé dans un plan vertical (dans l'entrefer) sur quelques longueurs d'onde axiales, c'est-à-dire sur deux ou trois paires de rouleaux contra-rotatifs. Les deux caméras de PIV et LIF sont synchronisées et placées face à face, de part et d'autre de la nappe laser observée.

La PIV est une méthode de mesure du champ instantané de vitesse dans un écoulement. Elle est basée sur l'analyse de doublets d'images, séparées l'une de l'autre par un très bref laps de temps. La fluorescence Induite par Laser (PLIF) est une méthode d'imagerie non intrusive qui permet d'obtenir une cartographie 2D de la concentration locale d'une molécule fluorescente. Cette technique est donc pertinente pour étudier les propriétés de mélange dans l'écoulement en fonction du taux de rétention de la phase dispersée, et de la taille des billes.

#### Mise en œuvre expérimentale

Le laser utilisé est un Nd:YAG à double-cavité générant un faisceau laser de longueur d'onde 532 nm. A chaque tir, chacune des cavités délivre une énergie d'environ 180 mJ à une fréquence maximale de 10 Hz. Le décalage temporel entre deux tirs est contrôlé par une synchronisation externe afin de se limiter à un déplacement maximal de 8 pixels d'un motif soumis à l'écoulement entre les deux images utilisées pour la PIV.

La nappe laser est formée grâce à un système de deux lentilles : la première est une lentille sphérique convergente qui focalise le faisceau et la seconde une lentille cylindrique divergente qui étire le faisceau en nappe d'épaisseur 1,77 mm (vérifié à l'analyseur de faisceau) sur toute la hauteur observée.

La caméra sCMOS utilisée pour la PIV est capable d'acquérir deux images consécutives avec un temps descendant jusqu'à  $1\mu\text{s}$  et est couplée avec un objectif bi-télécentrique de longueur de focalisation 18cm pour l'étude locale des rouleaux. Celle utilisée en LIF est couplée à un objectif (105 mm,  $f/2.8$ ) muni d'un filtre passe haut présentant une longueur d'onde de coupure de 540 nm, permettant de filtrer la longueur d'onde laser.

Deux types d'ensemencements ont été utilisés dans la phase continue (Table 1) :

- Pour les expériences de PIV seules, des particules de rhodamine encapsulée dans du PMMA.
- Pour les expériences couplées PIV/PLIF, des billes de verre creuses de dimensions bien inférieures aux billes de PMMA représentant la phase dispersée.

Traceur	Taille ( $\mu\text{m}$ )	$\rho$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	Matériau	$n_D$
Billes de verre creuses	10	1.1	Borosilicate	1,52
Rhodamine encapsulée	1-20	1,2	PMMA	1,48

La Rhodamine encapsulée a l'avantage d'avoir une densité identique à celle de la phase continue.

De plus, le choix des filtres optiques permet de séparer la longueur d'onde du laser de la longueur d'onde de la Rhodamine, et d'améliorer ainsi le rapport signal sur bruit des images PIV (les champs PIV obtenus à partir d'images identiques à celles de la figure 4 sont de meilleure qualité que ceux obtenus à partir de billes de verre creuses, illustrés sur la figure 5). De plus, les particules de verre ont tendance à adhérer aux parois des billes de PMMA, ce qui engendre de nombreux vecteurs faux aux interfaces.

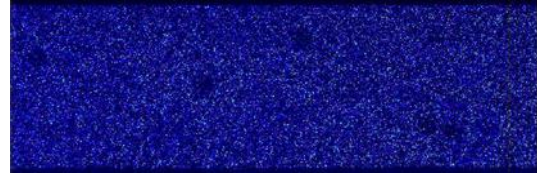


Figure 4 : Ensemencement avec la Rhodamine encapsulée

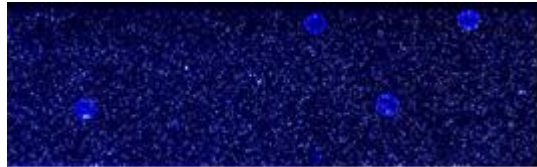


Figure 5 : Ensemencement avec les billes de verre creuses

Afin de pouvoir séparer les signaux PIV de ceux issus de la PLIF, mais également du signal laser, une combinaison adéquate de traceurs fluorescents et PIV est recherchée.

La combinaison Rhodamine encapsulée (PIV) et Rhodamine WT dissoute dans le mélange (PLIF), qui serait idéale par ses propriétés physiques, est malheureusement impossible pour des problèmes de séparation des signaux.

Deux combinaisons ont donc été examinées, à savoir la Rhodamine encapsulée (PIV) couplée à de la Fluorescéine (PLIF), ou les particules de verre creuses (PIV) couplées à de la Rhodamine WT (PLIF).

L'intensité de fluorescence de la Fluorescéine présentant un comportement non linéaire en fonction de la concentration en Fluorescéine dans le mélange KSCN/DMSO/eau, le choix du traceur fluorescent s'est porté sur la rhodamine WT (figure 6). Ce traceur présente en effet un spectre d'absorption compatible avec la source d'excitation.

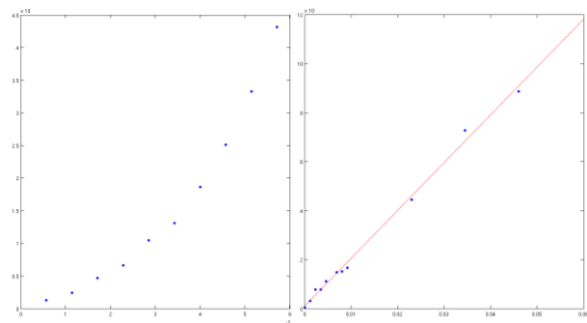


Figure 6 : Intensité de fluorescence (UA) en fonction de la concentration en fluorescéine (à gauche, concentrations entre 0 et  $6.10^{-6}$ ) et en rhodamine (à droite, concentrations entre 0 et  $6.10^{-2}$ ).

La concentration en Rhodamine WT a été choisie afin de garantir d'une part la linéarité de l'intensité de la fluorescence avec la concentration de Rhodamine, et d'autre part une bonne sensibilité du détecteur (intensité mesurée par la caméra proche de la saturation sans jamais l'atteindre).

#### Exemple de résultats PIV

La technique d'ensemencement avec la Rhodamine encapsulée est illustrée sur la figure 4 et celle avec les billes de verre sur la figure 5.

Le post-traitement (calcul des champs de vitesse) est réalisé à l'aide du logiciel DAVIS® (LaVision).

L'allure des champs instantanés (figure 7, à gauche) permet de contrôler le régime d'écoulement, et les champs moyens (figure 7, à droite) donnent des informations à propos de l'influence des billes sur les régimes (longueur d'onde axiale).

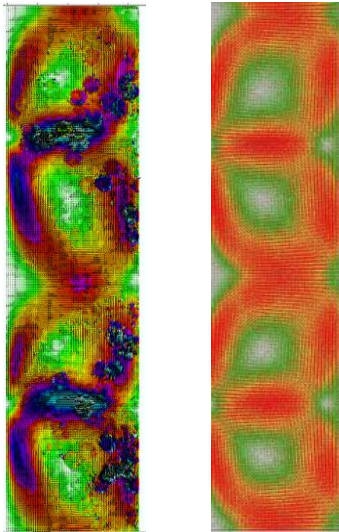


Figure 7 : A gauche, champ PIV instantané sur deux paires de rouleaux ( $Re = 590$ ) avec 4% de billes de diamètre 3 mm. A droite, champ PIV moyen correspondant.

#### Exemples de résultats PLIF

Le champ de visualisation observé en PLIF est légèrement plus large qu'en PIV : jusqu'à trois paires de rouleaux contra-rotatifs. Le colorant est injecté à mi-hauteur de la colonne, dans la zone d'étude PIV.

La concentration de traceur est suivie au cours du temps jusqu'à homogénéisation complète sur toute la zone de visualisation (figure 8).

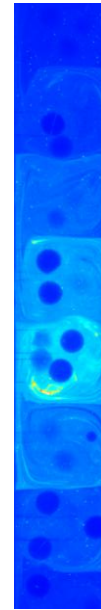


Figure 8 : Image obtenue avec la PLIF, conditions identiques à celles de la figure 7 (rétention 4%,  $Re = 590$ ).

## 4 Résultats et discussion

Les expériences de PIV seules permettent de mettre en évidence la modification des régimes d'écoulement en présence de la phase dispersée.

En effet, dans les suspensions concentrées, deux types de mécanismes induits par le cisaillement peuvent se superposer aux mécanismes de mélange monophasiques. Ces deux phénomènes ont été mis en évidence dès 1987 et sont décrits par exemple dans [7]: *i*) la migration stochastique des particules, qui intervient lorsque des gradients de cisaillement ou de concentration existent, les particules se déplacent alors des régions de plus forts cisaillement ou concentration, vers les faibles, et *ii*) dans les suspensions concentrées, la présence de particules de taille finie et les interactions hydrodynamiques induisent une agitation plus importante du fluide conduisant à une diffusion augmentée.

#### Influence du régime d'écoulement sur le mélange

Le mélange dépend fortement du régime d'écoulement, qu'il s'agisse du mélange intra-vortex (diffusion du traceur fluorescent à l'intérieur d'un même vortex) ou inter-vortex (passage du traceur fluorescent d'un vortex aux vortex adjacents) [5], comme illustré sur les figures 9 et 10.

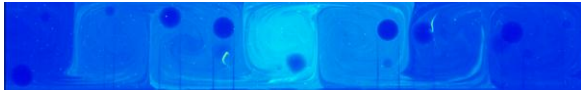


Figure 9 : A  $t = 40s$ , mélange en régime de Taylor-Couette (rétention 6%,  $Re = 105$ )



Figure 10 : à  $t = 40s$ , mélange en régime ondulatoire (rétention 6%,  $Re = 590$ )

Ce phénomène est quantifié en termes de temps caractéristique de retour à l'homogénéité dans la zone de mesure.

### Influence de la concentration de la suspension sur le mélange

La concentration en particules a également une influence non négligeable sur les mécanismes et sur la cinétique de mélange dans la colonne Couette (figures 11 et 12).

L'intensité moyenne du signal de fluorescence dans chaque vortex permet de remonter au mélange inter-vortex, et la distribution d'intensité à l'intérieur de chaque vortex au mélange intra-vortex.

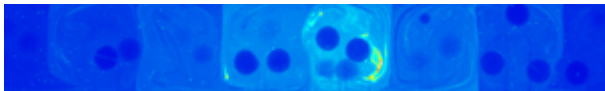


Figure 11: A  $t = 10 s$ , mélange avec une concentration de 4% en particules (régime ondulatoire :  $Re = 590$ )

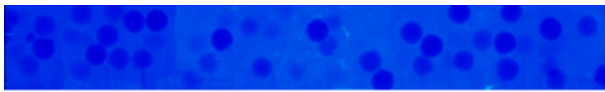


Figure 12: A  $t = 10 s$ , mélange à 16% de rétention (régime ondulatoire :  $Re = 590$ )

## 5 Conclusion

Après l'étude récente du mélange et de la dispersion axiale dans l'écoulement monophasique à l'aide de techniques globale (Distribution de Temps de Séjour) et locale (Vélocimétrie par Images de Particules, Fluorescence Induite par Laser) [1], l'étude est actuellement étendue au cas diphasique : une phase dispersée solide et la phase continue liquide adaptée en densité et en indice de réfraction.

La PIV permet de mettre en évidence les deux types de mécanismes induits par le cisaillement : la

migration stochastique et la diffusion augmentée par les interactions hydrodynamiques dues à la présence de particules de taille finie. Ces mécanismes n'ont encore jamais été étudiés dans les régimes à rouleaux de Taylor-Couette, mais uniquement en écoulement de Couette annulaire [8,9] ou de Poiseuille dans un tube circulaire [9], en conditions liquide/solide.

Les expériences de PLIF permettent d'évaluer l'influence des billes sur les propriétés statistiques du mélange, dans des conditions d'écoulement identifiées par PIV.

Lorsque la rotation du cylindre interne augmente, et donc le cisaillement, il est constaté expérimentalement que le mélange inter-vortex se fait de manière beaucoup plus rapide. Ce phénomène se cumule avec l'augmentation de la diffusion liée à la quantité de billes dans la phase continue. Les résultats obtenus sont détaillés et discutés par Dherbecourt et al. [10].

## Références

- [1] Nemri M., Etude expérimentale et numérique du mélange et de la dispersion axiale dans une colonne à effet Taylor-Couette, Thèse de l'Université de Toulouse (INP Toulouse, 2013)
- [2] Davies M.W and Weber E.J., Liquid-liquid extraction between rotating concentric cylinders, *Ind. Eng. Chem.* 52 (1960)
- [3] Lanoë J.Y., Performances d'une colonne d'extraction liquide-liquide miniature à écoulement de Taylor-Couette, Rapport scientifique ATALANTE pp. 245-251 (2002)
- [4] Taylor G.I., Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders, *Phil. Trans. Roy. Soc. London. A* 223 (1923)
- [5] M. Nemri, S. Charton and E. Climent, Experimental investigation of mixing and axial dispersion in Taylor-Couette flow patterns, *Experiments in Fluids* – underpress (2014)
- [6] Dijkman J.A., Rietz F., Lorincz K.A., Van Hecke M., Losert W., Refractive index matched scanning of dense granular materials, *Review of Scientific Instruments* 83 (2012)
- [7] Ramachandran A., Secondary convection due to second normal stress differences : A new mechanism for the mass transport of solutes in pressure-driven flows of concentrated, non-colloidal suspensions, *Soft Matter* (2013), 9, 6824
- [8] Breedveld V., Van Den Ende D., Tripathi A., Acrivos A., The measurement of the shear-induced particle and fluid tracer diffusivities in concentrated suspensions by a novel method, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 375, pp. 297-318 (1998)
- [9] Davis R.H., Hydrodynamic diffusion of suspended particles : a symposium, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 310, pp. 325-335 (1996)
- [10] Dherbecourt D., Nemri M., Charton S., Climent E., Flow modification induced by the presence of droplets in Taylor-Couette flows, *20th International Solvent Extraction Conference (ISEC 2014)*, paper 8853, 8- 12 September, Würzburg, Germany, 2014.