



Conception d'une cellule de Couette excentrique transparente pour l'étude du comportement d'écoulement de fluides visqueux à l'interface avec la paroi

Prashanth Thirunavukkarasu, Romain Castellani, Francis Fournier, Edith Peuvrel-Disdier, Arnaud Pignolet, Rudy Valette, Bruno Vergnes

► To cite this version:

Prashanth Thirunavukkarasu, Romain Castellani, Francis Fournier, Edith Peuvrel-Disdier, Arnaud Pignolet, et al.. Conception d'une cellule de Couette excentrique transparente pour l'étude du comportement d'écoulement de fluides visqueux à l'interface avec la paroi. *Rhéologie*, 2021, 39, pp.9-16. hal-03432433

HAL Id: hal-03432433

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-03432433>

Submitted on 16 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Conception d'une cellule de Couette excentrique transparente pour l'étude du comportement d'écoulement de fluides visqueux à l'interface avec la paroi

P. Thirunavukkarasu^{1,2}, R. Castellani¹, F. Fournier¹, E. Peuvrel-Disdier¹, A. Pignolet¹, R. Valette¹, B. Vergnes¹

¹ MINES ParisTech, PSL Research University, CEMEF – Centre de Mise en Forme des Matériaux, UMR CNRS 7635, CS 10207, 06904 Sophia-Antipolis

² Manufacture Française des Pneumatiques Michelin – Ladoux, 63118 Cébazat

Résumé : Nous avons développé un prototype pour observer le comportement en écoulement de fluides visqueux (10^3 à 10^5 Pa.s) sous cisaillement avec des surfaces libres. La géométrie est une cellule de Couette excentrée où les deux cylindres peuvent tourner dans le même sens ou en sens opposé. Des fenêtres transparentes permettent des observations *in-situ* pendant l'écoulement. Nous présentons ici la conception, le développement et les premiers tests de ce prototype avec une gomme silicone. Le comportement en écoulement du fluide est étudié à faible taux de remplissage de la cellule, de façon à observer les lignes triples et les surfaces libres dans des conditions d'écoulement contrôlées, à la fois en mode co- et contrarotatif. Une attention particulière a été portée à la détermination de conditions d'écoulement en régime permanent.

Mots clés : Cellule de Couette, Fluide visqueux, Surface libre, Ligne triple.

[Abridged English version on last page]

1. Introduction

La connaissance de l'écoulement aux interfaces est primordiale pour simuler un écoulement car cela requiert la définition de conditions aux limites réalistes. Les écoulements interfaciaux peuvent concerner différentes interfaces : des interfaces solide/fluide (condition de glissement ou non-glissement), des interfaces fluide/fluide (mélanges de polymères immiscibles, procédés de coextrusion multicouches), des interfaces solide/fluide/air (dynamique des lignes triples), et des interfaces fluide/air (surfaces libres). Cette étude a pour objectif d'étudier la dynamique des lignes triples et la forme des surfaces libres dans le cas de fluides de forte viscosité soumis à un écoulement de cisaillement.

L'étude de la dynamique des lignes triples, initiée au début du XX^{ème} siècle [1-6], est restée un domaine de recherche actif (voir par exemple [7-10]) en raison du caractère omniprésent des phénomènes de mouillage et d'étalement, tant dans la nature que dans de nombreux procédés industriels (revêtements de surface, peintures...). La simple description physico-chimique de l'interface d'une goutte sur un substrat solide en mouvement est complexe et nécessite une description multi-échelle du fluide au niveau de la

ligne triple (voir par exemple [7, 11, 12]). D'un point de vue mécanique, le mouvement de la ligne triple sur une surface solide viole la condition aux limites de non-glissement et conduit à une singularité de contrainte au niveau de cette ligne triple [10, 13, 14]. La plupart des travaux cités ont été menés dans le cas de liquides simples et de fluides de faible viscosité, pour lesquels la tension superficielle joue un rôle dans l'équilibre des forces à l'interface. La situation dans le cas d'un fluide visqueux est différente car l'écoulement est dominé par les forces visqueuses (la tension superficielle étant négligeable), avec des phénomènes potentiels de dissipation visqueuse.

La compréhension du mouvement de lignes triples dans les procédés de mise en forme des polymères a commencé dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Cette démarche a impliqué l'introduction d'outils à parois transparentes pour permettre des observations *in-situ* de l'écoulement. Par exemple, les écoulements interfaciaux ont été étudiés dans des filières transparentes en sortie d'extrudeuses pour visualiser les conditions de glissement, les régimes d'écoulement et les instabilités associées [15, 16]. Des parois transparentes ont également été utilisées dans des mélangeurs internes pour observer le processus de mélange de polymères hautement visqueux et étudier

le rôle de la géométrie des rotors [18-22]. Cependant, ces observations sont complexes car tridimensionnelles et transitoires par nature, en raison du transfert continu de fluide d'une chambre de mélange à l'autre et de la géométrie 3D des rotors. Des conditions d'écoulement simplifiées ont donc été utilisées pour étudier l'efficacité de la géométrie du rotor, en utilisant un seul rotor tournant dans une chambre cylindrique transparente [23].

La cellule de Couette excentrée avec un passage fin entre les deux cylindres est vite apparue comme une géométrie simplifiée logique de l'écoulement dans un mélangeur. Cette géométrie a été utilisée pour étudier la cinématique du mélange distributif [24-26]. Ces observations ont été menées sur des fluides modèles (à température ambiante, de faible viscosité, inférieure à 10 Pa.s) et sur un domaine entièrement rempli (cylindres verticaux) ne permettant pas l'observation de surfaces libres, ni de lignes triples.

Le comportement des interfaces fluide/gaz peut être étudié avec des cellules de Couette excentrées lorsqu'un petit volume de fluide est introduit dans la zone de faible entrefer entre les cylindres (cylindres horizontaux). Cette configuration d'écoulement a été utilisée pour simuler le procédé de revêtement d'un substrat solide par un fluide dans les applications de couchage et pour étudier les instabilités qui se développent à l'interface [27-29].

Cet article présente la conception et le développement d'une cellule de Couette excentrée transparente, où les deux cylindres peuvent tourner de manière indépendante, et dédiée aux fluides de forte viscosité (10^3 à 10^5 Pa.s). L'objectif est d'étudier l'écoulement de petits volumes de fluide dans la région de faible entrefer entre les cylindres, en observant les surfaces libres et les lignes triples en régime permanent. Nous présentons les premières observations effectuées avec un fluide silicone à température ambiante, dans des conditions co- et contrarotatives. Cette première étape vise à déterminer des configurations d'écoulement favorables à l'observation des lignes triples et des surfaces libres. L'intérêt de l'étude de surfaces libres et lignes triples est de caractériser la capacité d'entraînement du fluide par des pièces en mouvement, qu'on peut rencontrer dans des procédés de mélangeage. Cette capacité résulte des contributions respectives des effets visqueux, de glissement et d'adhésion. Le poids respectif de ces contributions pourrait être retrouvé en associant cette étude à une modélisation de l'écoulement [30].

2. Description du prototype

2.1. Principe des essais

La cellule de Couette excentrée a été choisie pour avoir une zone localisée de forts taux de cisaillement autour de la région de faible entrefer entre les cylindres. Le mouvement du fluide est créé par la rotation des deux cylindres, pilotés par des moteurs indépendants permettant leur rotation dans les deux sens (Fig. 1). Nous nous sommes plus particulièrement intéressés au comportement du fluide pour de faibles taux de remplissage, permettant d'observer les surfaces libres et les lignes triples dans des conditions d'écoulement contrôlées et stationnaires.

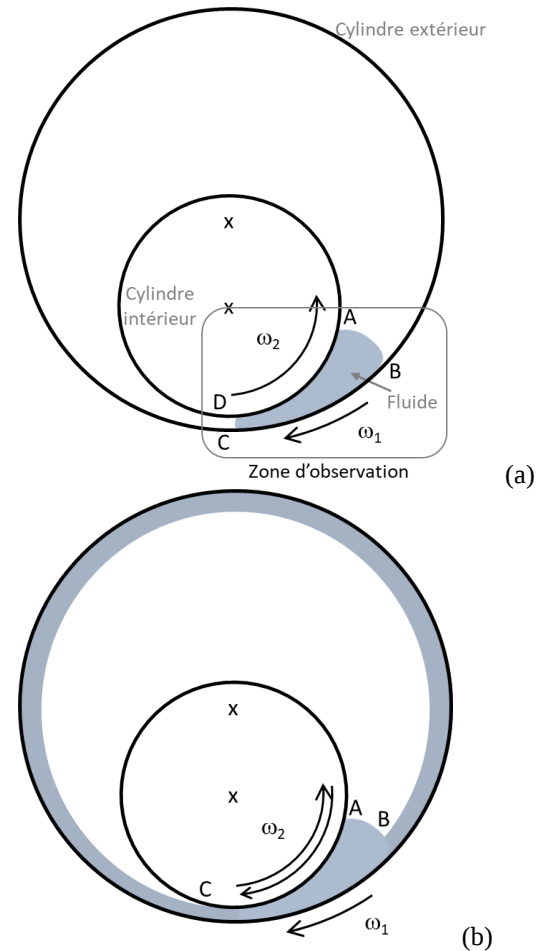


Figure 1. Représentation schématique de l'écoulement en régime stationnaire (a) d'un petit volume de fluide $\mathcal{V}_{inf}$ en mode contrarotatif et (b) d'un volume plus important $\mathcal{V}_{sup}$ en mode co- ou contrarotatif. ω_1 et ω_2 sont les vitesses angulaires des cylindres. L'indice 1 fait référence au cylindre extérieur, 2 au cylindre intérieur.

Deux géométries d'écoulement sont distinguées :

- celle d'un petit volume de fluide, noté $\mathcal{V}_{inf}$, introduit dans la zone convergente entre les deux cylindres (Fig. 1a). Cette configuration permet, en mode contrarotatif, de suivre la dynamique de quatre lignes triples (indiquées par les lettres A, B, C et D) et de deux surfaces libres (surfaces AB et

CD). Sur la Figure 1a, A et C sont des lignes de reculée, tandis que B et D sont des lignes d'avancée ;

- celle d'un volume plus important, noté $\mathcal{V}_{sup}$, permettant la formation d'une couche uniforme de fluide le long du cylindre extérieur et d'un volume de fluide recirculant dans la région amont de l'entrefer entre les cylindres, situation rencontrée en mode co- ou contrarotatif (Fig. 1b). Dans ce cas, le volume de fluide recirculant est en contact d'un côté avec le cylindre intérieur et de l'autre avec la couche de même fluide. Ici, deux lignes triples en contact avec le cylindre intérieur (A et C) et une seule surface libre (surface AB) peuvent être observées.

2.2. Description du prototype

La cellule de Couette a été conçue pour fonctionner avec des fluides de forte viscosité (jusqu'à 10^5 Pa.s, plage de viscosité typique des élastomères crus) et être contrôlée en température jusqu'à 100°C. Travailler à température contrôlée avec des fluides très visqueux, avec des cylindres pouvant tourner dans les deux directions et munis de fenêtres transparentes, constitue l'originalité du système. Une vue globale de la cellule de Couette et des éléments auxiliaires est présentée sur la Figure 2.

Le dispositif est constitué par :

- la cellule de Couette transparente avec ses moteurs ;
- un système de chauffage comprenant deux bains thermostatés ;
- un joystick pour piloter manuellement les cylindres, couplé à une interface informatique pour piloter les moteurs et enregistrer les paramètres ;
- un système d'imagerie, composé de systèmes d'éclairage et d'enregistrement.

Le rayon du cylindre extérieur ($R_1 = 89,5$ mm) a été choisi pour avoir une zone d'observation suffisamment grande dans la région de faible entrefer. Celui du cylindre intérieur (R_2) est de 43,75 mm pour avoir un rapport de diamètres proche de 2:1. L'entrefer h_0 est réglable dans une plage de 3 à 11 mm. Les rayons des cylindres intérieur et extérieur et l'entrefer définissent l'excentricité entre les axes de rotation des cylindres. La profondeur de la chambre w (égale à la longueur des cylindres, $w = 30$ mm) a été choisie aussi grande que possible. Cela permet d'exacerber le rapport d'aspect de l'écoulement, qui tendra alors à être bidimensionnel tout en permettant des observations au travers du fluide.

Contrairement à la surface du cylindre extérieur, celle du cylindre intérieur est amovible, afin de pouvoir modifier sa nature (composition, rugosité, etc.). Dans la suite, les surfaces des cylindres intérieur et extérieur sont similaires, en acier 42Cd4 avec la même rugosité. Les observations de l'écoulement se font par transmission à travers deux fenêtres transparentes, fabriquées en verre borosilicaté recuit pour résister aux contraintes générées par l'écoulement du fluide visqueux et les variations de température. La fenêtre avant est circulaire. La fenêtre arrière est annulaire du fait de la présence de l'axe de rotation du cylindre intérieur. Elles sont fixées de part et d'autre du cylindre extérieur par des brides annulaires et des vis et tournent ainsi à la même vitesse que le cylindre extérieur. L'introduction du fluide et le nettoyage sont réalisés par démontage et remontage de la fenêtre avant.

Les cylindres intérieur et extérieur sont chauffés par circulation d'un fluide caloporteur (huile silicone Julabo™ 8940114, Seelbach, Allemagne) relié à deux bains thermostatés indépendants. La rotation des cylindres est assurée par des moteurs brushless indépendants (MDP, Neyron, France).

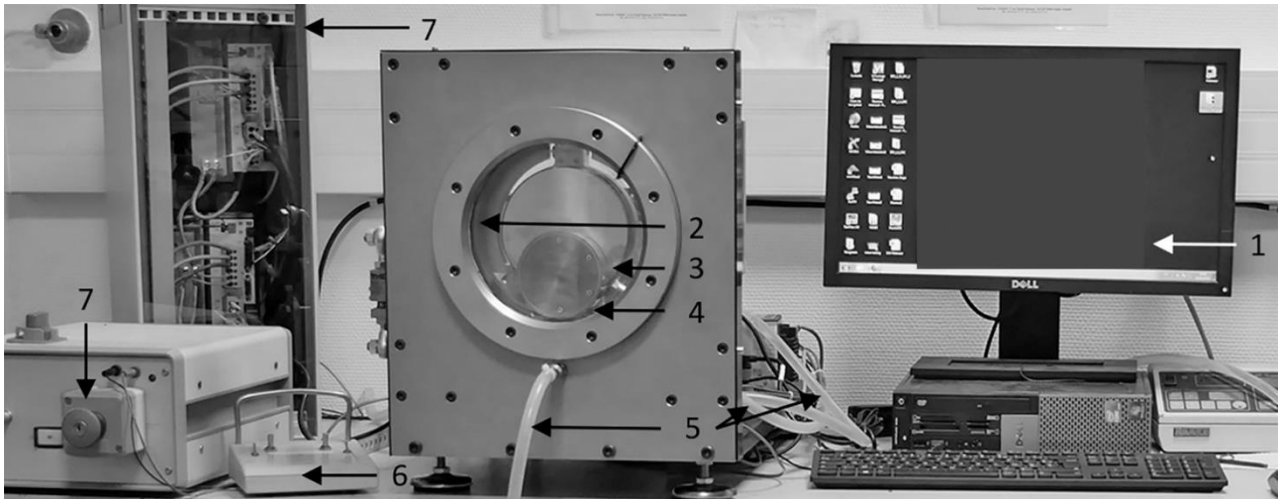


Figure 2. Cellule Couette et son environnement : 1. PC de contrôle, 2. Surface du cylindre extérieur, 3. Surface du cylindre intérieur, 4. Zone d'observation entre les deux cylindres, 5. Connections du fluide caloporteur avec les bains thermostatés, 6. Joystick pour régler les sens de rotation des cylindres et leurs vitesses. 7. Armoire de commande.

Le couple maximal fourni par les moteurs est respectivement de 100 Nm et 50 Nm pour les cylindres extérieur et intérieur, avec des vitesses de rotation théoriques maximales respectivement de 120 et 85 tr/min, donnant un taux de cisaillement théorique maximum autour de 450 s^{-1} pour le plus faible entrefer. Les premières observations rapportées dans ce travail ont été réalisées dans une fenêtre de vitesses plus restreinte : respectivement 0-16 et 0-3,2 tr/min pour les cylindres extérieur et intérieur, soit un taux de cisaillement maximum de 35 s^{-1} en mode contra-rotatif. Le couple est mesuré sur chaque axe moteur via des bras de levier de 100 mm et des jauges de contrainte. Deux thermocouples sont placés dans les espaces creux des deux cylindres pour contrôler la température du fluide caloporteur. Un troisième thermocouple peut être inséré dans un trou à travers la fenêtre avant pour mesurer la température du fluide à la fin de l'expérience. Les différentes informations collectées par les capteurs sont affichées sur un PC et enregistrées en fonction du temps, grâce à un programme développé sous LabView®.

L'appareil permet de varier la nature (tension de surface) et le comportement rhéologique du fluide utilisé, le volume de fluide introduit, les sens de rotation des cylindres, leur vitesse, l'entrefer h_0 , la température, la nature (limitée au cylindre intérieur) et la rugosité des surfaces des cylindres, avec la possibilité d'avoir des conditions asymétriques, la nature de la fenêtre transparente. Dans cet article, seuls le volume de fluide, la direction et les vitesses des cylindres ont été modifiés, les autres paramètres étant fixés.

3. Résultats et discussion

Un fluide silicone transparent à forte viscosité a été sélectionné pour les premiers essais (Liquid Glass Thinking Putty®, Crazy Aaron, Nebraska, USA). Sa courbe de viscosité suit une loi de type Carreau-Yasuda, caractérisée à température ambiante par une viscosité newtonienne de $2,2 \cdot 10^4 \text{ Pa.s}$, un indice de pseudo-plasticité de 0,36, un temps de relaxation de 0,86 s et un paramètre de distribution de largeur de 0,69. Les essais présentés dans cet article ont été réalisés à cette température.

3.1. Détermination du volume de fluide

Les volumes d'intérêt (voir Figure 1) sont déterminés sur la base de considérations géométriques. Le grand volume de fluide $\mathcal{V}_{sup}$ (Fig. 1b) correspond à un volume supérieur au volume formant une couche continue d'épaisseur h_0 autour du cylindre extérieur ($\mathcal{V}_{h_0} = 8,7\%$ du volume libre de la cellule de Couette). Le petit volume $\mathcal{V}_{inf}$ (Fig. 1a) est par définition inférieur à $\mathcal{V}_{h_0}$. Il est en pratique limité à 4,5%. L'objectif est de déterminer les configurations d'écoulement dans lesquelles les lignes triples et les surfaces libres peuvent être observées à des endroits fixes par rapport au laboratoire. Pour cette raison, la première étape du travail a été de tester les différentes conditions d'écoulement en jouant avec le volume de fluide, le sens de rotation des cylindres et leurs vitesses, afin de déterminer les conditions de régime permanent. Les vitesses mentionnées par la suite font référence aux vitesses linéaires de la surface de chaque cylindre.

3.2 Rotation d'un seul cylindre

La mise en rotation, ici du cylindre extérieur (fixée dans le sens horaire dans l'ensemble du travail),

entraîne l'écoulement du fluide lorsque ce dernier se retrouve en contact avec les deux cylindres. Le fluide est cisailé et légèrement mis sous pression dans la zone de convergence. Le passage du fluide à travers l'entrefer h_0 conduit au dépôt d'une couche uniforme, dont l'épaisseur est très proche de celle de l'entrefer. Ce film tourne à la même vitesse que la surface du cylindre extérieur et celle des fenêtres transparentes. La longueur de la couche déposée est fixée par l'entrefer minimum et le volume introduit.

3.3. Cylindres en co-rotation

Après l'introduction du volume de fluide, la vitesse du cylindre extérieur est d'abord fixée, puis celle du cylindre intérieur est progressivement augmentée. La vitesse du cylindre extérieur est alors augmentée à son tour et ainsi de suite. Dans le cas d'un petit volume de fluide ($\mathcal{V}_{inf}$), aucune observation en régime permanent ne peut être obtenue. La situation est proche du cas précédent : le fluide se déforme lors du passage de l'entrefer h_0 , avec formation d'un film d'épaisseur uniforme sur la surface du cylindre extérieur.

Au contraire, l'écoulement de volumes de fluide plus importants ($\mathcal{V}_{sup}$) conduit toujours à une situation stationnaire, quelles que soient les vitesses des cylindres (Fig. 3).

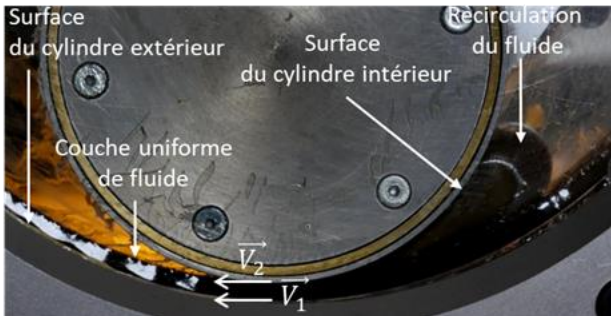


Figure 3. Observation de l'écoulement en co-rotation, dans le cas d'un grand volume de fluide.

Comme pour le petit volume, le passage du fluide dans l'entrefer conduit d'abord à la formation d'une couche uniforme, jusqu'à l'obtention d'une couche continue sur le cylindre extérieur. L'excès de volume conduit alors à la formation d'un bourrelet de fluide en recirculation, comme cela est observé dans certains procédés de couchage [27] ou de calandrage [30]. Le volume du bourrelet est contrôlé par le volume introduit, l'entrefer minimal et les vitesses relatives des cylindres.

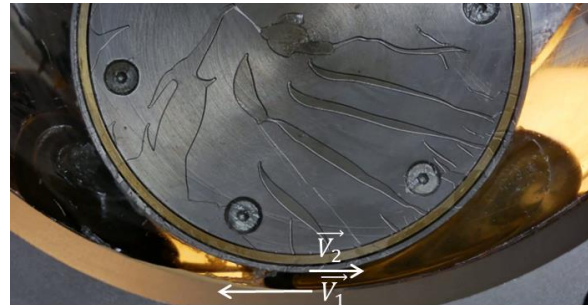
3.4. Cylindres en contra-rotation

Trois types de conditions d'écoulement peuvent être observés dans le cas d'un petit volume de fluide ($\mathcal{V}_{inf}$),

en augmentant la vitesse du cylindre intérieur ($\vec{V}_2$) à vitesse du cylindre extérieur fixe ($\vec{V}_1$) ($\vec{V}$ désigne la vitesse linéaire de surface des cylindres) :

- lorsque la vitesse du cylindre intérieur est petite devant celle du cylindre extérieur, $|\vec{V}_2| < |\vec{V}_1|$, il est impossible de stabiliser le fluide. Le fluide est entraîné dans le sens de rotation du cylindre extérieur dans le convergent. Le passage du fluide à travers l'entrefer h_0 conduit finalement à la séparation du volume en deux parties (Fig. 4a). Le volume dans le convergent (à droite) est stabilisé. Le volume détaché est entraîné par le cylindre extérieur et rejoint l'autre partie après un tour. Le volume total retrouve alors un comportement instationnaire;
- dans une plage optimale de vitesse du cylindre interne, avec $|\vec{V}_2| > |\vec{V}_1|$, le fluide peut être stabilisé entre les deux surfaces des cylindres (Fig. 4b), permettant des observations en régime permanent ;
- à une vitesse excessive du cylindre interne, $|\vec{V}_2| \gg |\vec{V}_1|$, l'écoulement est dominé par la rotation du cylindre intérieur et le fluide est entraîné dans cette direction. Le volume de fluide prend une forme plus cylindrique au fur et à mesure qu'il s'éloigne de la zone de faible entrefer. Il tourne sur lui-même comme un corps solide entre les surfaces des cylindres (Fig. 4c).

Dans les conditions optimales de stabilisation, le fluide est soumis à du cisaillement et du roulement. La stabilisation est obtenue pour des vitesses $|\vec{V}_2| > |\vec{V}_1|$. En effet, le cylindre intérieur doit tourner à une vitesse linéaire plus élevée pour contrebalancer l'entraînement du fluide par la surface du cylindre extérieur et aussi celle des fenêtres transparentes. Une fois que la vitesse optimale du cylindre interne est trouvée, le fluide est stabilisé.



(a)

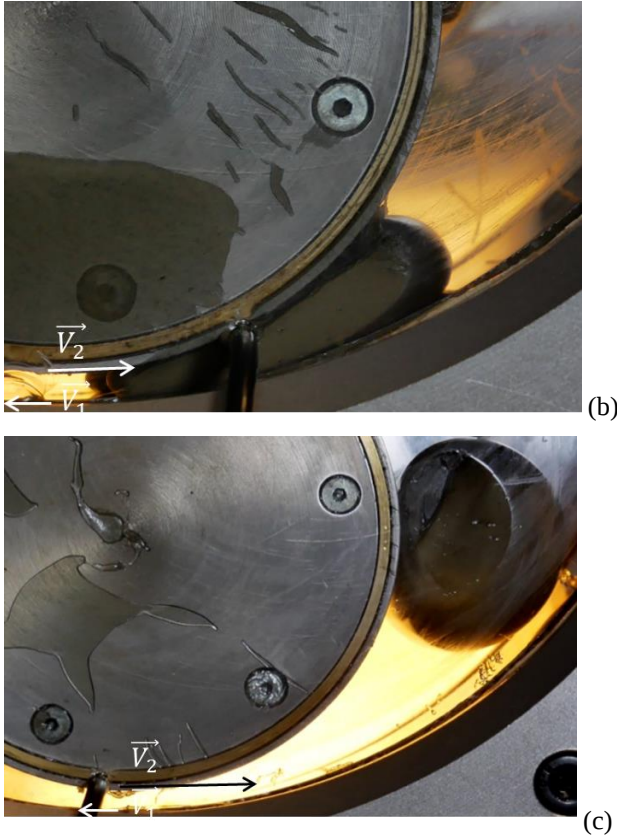


Figure 4. Observation de l'écoulement en contra-rotation, dans le cas d'un petit volume de fluide. (a) vitesse insuffisante du cylindre interne avec fragmentation du volume au niveau du passage au fin ; (b) vitesse optimale du cylindre interne ; (c) vitesse excessive du cylindre interne.

Dans le cas d'un volume de fluide plus important ($\mathcal{V}_{sup}$), une couche uniforme est d'abord créée sur la surface du cylindre extérieur. Même en mode contra-rotatif, il existe aussi un volume de recirculation. Ce volume est principalement fixé par le volume de fluide initial et l'entrefer h_0 dans la plage de vitesses étudiée. Deux conditions d'écoulement peuvent être distinguées pour le volume de recirculation, en fonction de la vitesse du cylindre intérieur ($\vec{V}_1$ étant fixée) :

- jusqu'à une valeur critique $|\vec{V}_2|_{crit}$ ($|\vec{V}_2| < |\vec{V}_2|_{crit}$), le volume du fluide de recirculation (Fig. 5a) est stabilisé au niveau de l'entrefer. Des observations à l'état d'équilibre sont possibles tant que la vitesse du cylindre intérieur ne domine pas l'écoulement, $|\vec{V}_2|_{crit} > |\vec{V}_1|$;
- aux vitesses élevées du cylindre intérieur, $|\vec{V}_2| \gg |\vec{V}_1|$, le volume du bourrelet est progressivement éloigné de la zone de faible entrefer par le cylindre intérieur, puis séparé de la couche uniforme (Fig. 5b). Comme pour le petit volume de fluide, le volume en excès se retrouve sous la forme d'un

cylindre tournant sur lui-même entre le cylindre intérieur et la couche uniforme déposée sur le cylindre extérieur.

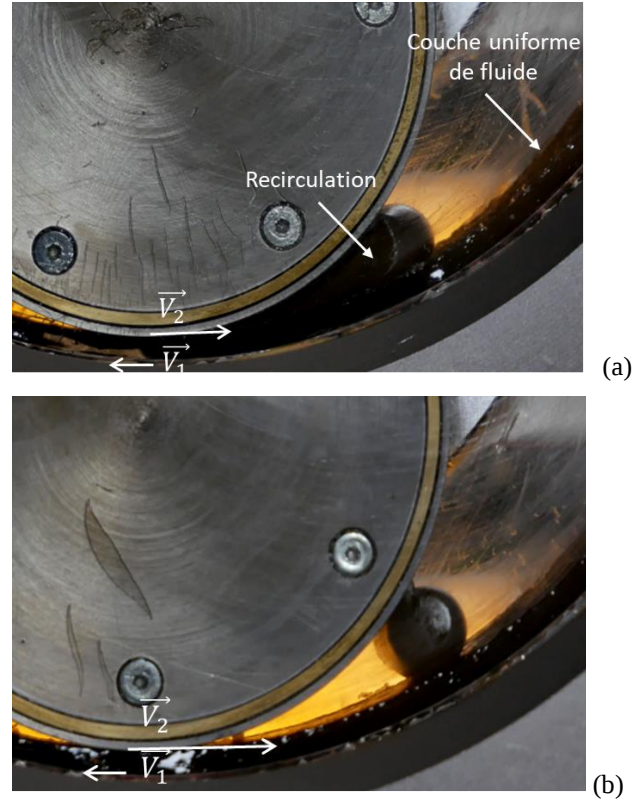


Figure 5. Observation de l'écoulement en contra-rotation, dans le cas d'un grand volume de fluide. (a) vitesse suffisante du cylindre intérieur pour stabiliser ; (b) vitesse excessive du cylindre intérieur.

3.5. Exemple de premières observations

Une fois l'écoulement stabilisé, différentes informations caractérisant le comportement du fluide en écoulement peuvent être extraites :

- la mesure du profil latéral du volume de fluide sous cisaillement par analyse d'image : un exemple est illustré sur la Figure 6a dans le cas d'un mode contrarotatif. A partir d'un tel profil, il est notamment possible de caractériser la forme des surfaces libres (AB et CD sur la Fig. 1a), déterminer les surfaces en contact avec les parois et identifier la position des lignes triples ;
- l'observation du champ de vitesse ou des lignes de courant illustrant le mouvement du fluide à l'intérieur du bourrelet (Fig. 6b), visualisation possible grâce à la présence ou l'ajout de traceurs.

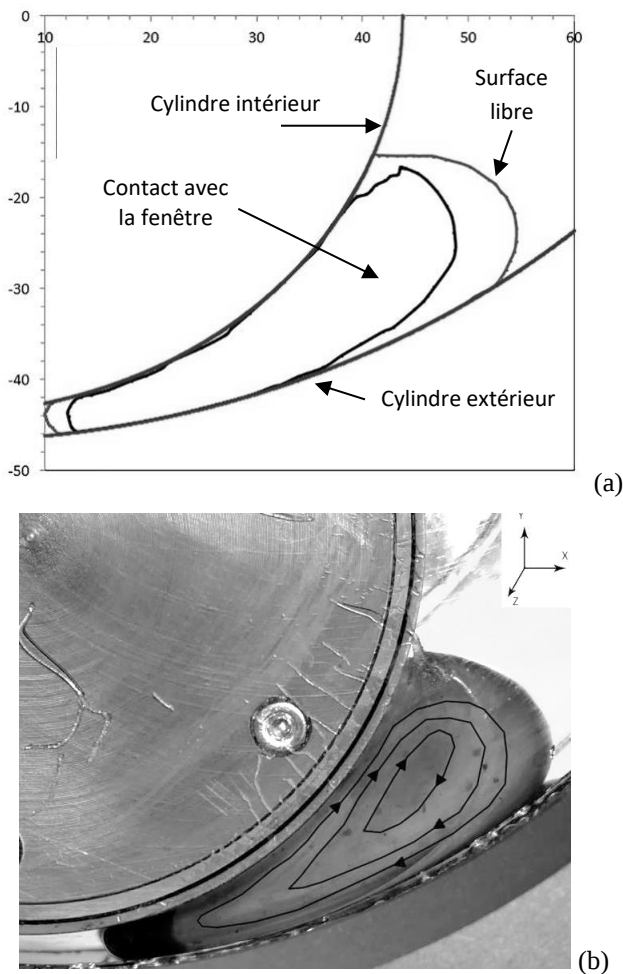


Figure 6. Exemples de mesure en configuration contra-rotative. (a) Profil latéral du volume de fluide ; (b) Visualisation des lignes de courant

4. Conclusions

La caractérisation du comportement interfacial de fluides visqueux en écoulement reste un sujet ouvert. Les observations expérimentales sont importantes pour appréhender ce comportement, en particulier pour les fluides de forte viscosité. Une cellule de Couette excentrée transparente, permettant la rotation des cylindres intérieur et extérieur dans les deux sens, a été conçue et développée pour caractériser l'écoulement de petits volumes de fluide sous cisaillement contrôlé avec surfaces libres. Le prototype permet l'observation d'écoulements en régime transitoire ou établi, en contrôlant la direction et la vitesse de rotation des cylindres. Le comportement d'un fluide silicone a été étudié en faisant varier le sens de rotation des cylindres (co- ou contra-rotation), leur vitesse et le volume de fluide introduit. Différentes conditions d'écoulement permettant de stabiliser le volume de fluide dans l'entrefer et d'observer les surfaces libres et les lignes triples ont été identifiées :

- dans le cas d'un petit volume de fluide, ce volume peut être stabilisé en contra-rotation dans certaines conditions de vitesses des cylindres intérieur et extérieur ;
- pour un volume plus important avec une couche continue uniforme de fluide sur le cylindre extérieur, le volume en excès peut être stabilisé quelles que soient les vitesses des cylindres en mode co-rotatif et dans certaines conditions de vitesses en mode contrarotatif.

Le prototype développé peut permettre de caractériser l'écoulement interfacial via l'observation des surfaces libres (interfaces fluide/gaz), de la position des lignes triples, de la zone de contact interfaciale entre le fluide et les cylindres, aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire. L'effet de paramètres, comme la nature du fluide et son comportement rhéologique, le volume de fluide introduit, les vitesses et sens de rotation des cylindres, l'entrefer h_0 , la température, la rugosité des surfaces intérieure et extérieure des cylindres, et la nature de la surface du cylindre intérieur, sur le comportement du fluide en écoulement interfacial peut être déterminé.

Une étude détaillée des conditions de stabilisation en mode contrarotatif du fluide silicone et de leur interprétation en termes d'adhésion et de la forme de surfaces libres au niveau des lignes triples fera l'objet d'un prochain article.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier leurs collègues Marc Bouyssou, Eric Brotons, Christelle Combeaud, Guillaume Corvec, Gilbert Fiorucci du CEMEF pour leur aide lors de la réalisation du prototype ou des essais et Céline Cohen de l'INPHYNI (Université Côte d'Azur) pour son implication dans la recherche de fluides modèles pour ce type d'essai.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet OSUM, FUI AAP23, financée par BPIFrance. Le doctorat de Prashanth Thirunavukkarasu a fait l'objet d'une bourse CIFRE financée par l'ANRT et Michelin MFP. Des remerciements particuliers sont adressés à Bruno Dratz et Pascal Tremblay de Michelin pour leur implication et leurs échanges lors de ces travaux.

Références

- [1] G.D. West, On the resistance to the motion of a thread of mercury in a glass tube, *Proc. Roy. Soc., A* 86 20-25 (1911)
- [2] R. Lucas, Über das Zeitgesetz des kapillaren Aufstiegs von Flüssigkeiten, *Koll.-Z.*, 23, 15-22 (1918).

- [3] E.W. Washburn, The dynamics of capillary flow, *Phys. Rev.*, 17, 273-283 (1921).
- [4] E.K. Rideal, On the flow of liquids under capillary pressure, *Phil. Mag.*, 44, 1152-1159 (1922).
- [5] R.N. Wenzel, Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Ind. Eng. Chem.*, 28, 988-994 (1936).
- [6] A.B.D. Cassie, S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *Trans. Faraday Soc.*, 40, 546-551 (1940).
- [7] G. Lu, X.D. Wang, Y.Y. Duan, A critical review of dynamic wetting by complex fluids: from Newtonian fluids to non-Newtonian fluids and nanofluids, *Adv. Colloid Interf. Sci.*, 236, 43-62 (2016).
- [8] T.A. Terhehmen; Y.S. Gbaoron, Contact angle hysteresis – Advantages and disadvantages: A critical review, *Rev. Adhes. Adhes.*, 8, 47-67 (2020).
- [9] B. Andreotti, J.H. Snoeijer, Statics and dynamics of soft wetting, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 52, 285-308 (2020).
- [10] N.T. Chamakos, D.G. Sema, A.G. Papathanasiou, Progress in modeling wetting phenomena on structured substrates. *Arch. Comput. Meth. Eng.* (2020).
- [11] P.G. de Gennes, Wetting: statics and dynamics, *Rev. Mod. Phys.*, 57, 827-863 (1985).
- [12] D. Bonn, J. Eggers, J. Indekeu, J. Meunier, E. Rolley, Wetting and spreading, *Rev. Mod. Phys.*, 81, 739-805 (2009).
- [13] C. Huh, L.E. Scriven, Hydrodynamic model of steady movement of a solid/liquid/fluid contact line, *J. Colloid Interf. Sci.*, 35, 85-101 (1971).
- [14] M.C.T. Wilson, J.L. Summers, Y.D. Shikhmurzaev, A. Clarke, T.D. Blake, Non-local hydrodynamic influence on the dynamic contact angle: Slip models vs experiment, *Phys. Rev. E*, 73, 041606 (2006).
- [15] L. Robert, Y. Demay, B. Vergnes, Stick-slip flow of high density polyethylene in a transparent slit die investigated by laser Doppler velocimetry, *Rheol. Acta*, 43, 89-98 (2004).
- [16] C. Combeaud, B. Vergnes, A. Merten, D. Hertel, H. Münstedt, Volume defects during extrusion of polystyrene investigated by flow induced birefringence and laser-Doppler velocimetry, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 145, 69-77 (2007).
- [17] H. Yokoi, Part IV: Process visualization, control, optimization, and simulation: Internal visualization of mold cavity and heating cylinder, in *Injection Molding, Technology and Fundamentals*, edited by M.R. Kamal, A. Isayev and S.-J. Liu, Carl Hanser Verlag, Munich, 395-438 (2009).
- [18] P.K. Freakley, W.Y. Wan Idris, Visualization of flow during the processing of rubber in an internal mixer, *Rubber Chem. Technol.*, 52, 134-145 (1979).
- [19] T. Asai, T. Fukui, K. Inoue, M. Kuriyama, Proc. International Rubber Conference Paper III-4, Paris (1983).
- [20] K. Min, J.L. White, Flow visualization of the motions of elastomers and molten plastics in an internal mixer, *Rubber Chem. Technol.*, 58, 1024-1037 (1985).
- [21] J.L. White, K. Min, C.Y. Ma, R. Brzoskowski, Basic studies of flow visualization of processing of elastomers and their compounds: Internal mixer and extrusion, *J. Polym. Eng.*, 6, 79-93 (1986).
- [22] K. Min, Flow visualization parallel and perpendicular to the rotor axes for elastomers and molten plastics in an internal mixer - The influence of rotor design, *Intern. Polym. Proc.*, 1, 179-187 (1987).
- [23] O. Breuer, H. Chen, B. Lin, U. Sundararaj, Simulation and visualization of flow in a new miniature mixer for multiphase polymer systems, *J. Appl. Polym. Sci.*, 97, 136-142 (2005).
- [24] J. Chaiken, R. Chevray, M. Tabor, Q.M. Tan, Experimental study of Lagrangian turbulence in a Stokes flow, *Proc. Roy. Soc. A*, 408, 165-174 (1986).
- [25] K.H. de Haas, D. van den Ende, C. Blom, E.G. Altena, G.J. Beukema, J. Mellema: A counter-rotating Couette apparatus to study deformation of a sub-millimeter sized particle in shear flow. *Rev. Scient. Instr.*, 69, 1391-1397 (1998).
- [26] J.F. Agassant, A. Poitou, R. Valette, A kinematic approach to distributive mixing, in: *Mixing and Compounding of Polymers*, 2nd edition, I. Manas Zloczower (Ed.), Hanser, Munich, 217-240 (2009).
- [27] M. Rabaud, S. Michalland, Y. Couder, Dynamical regimes of directional viscous fingering: Spatiotemporal chaos and wave propagation, *Phys. Rev. Lett.*, 64, 184-189 (1990).
- [28] L. Pan, J.R. de Bruyn, Spatially uniform travelling cellular patterns at a driven interface, *Phys. Rev. E*, 49, 483-493 (1994).
- [29] F. Varela López, L. Paucharda, M. Rosenb, M. Rabaud, Non-Newtonian effects on ribbing instability threshold, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 103, 123-139 (2002).
- [30] P. Thirunavukkarasu, Analysis of the interfacial flow behavior of polymers along the walls of an internal mixer. Thèse de doctorat de l'université PSL, préparée à MINES ParisTech, Sophia Antipolis (2021).

[Abridged English version]

Design of a transparent co- and counter-rotating eccentric Couette cell dedicated to study the interfacial flow behavior of viscous fluids

A prototype was developed to observe the flow behavior of viscous fluids (10^3 to 10^5 Pa.s) under free surface shear. The geometry of the prototype is an eccentric Couette cell where both cylinders can rotate in the same or opposite directions. Transparent windows permit *in-situ* observations during flow. The design, development and testing of the prototype with a viscous silicon fluid are reported in this paper. In order to obtain information on contact lines and free surfaces under shear, the flow behaviour in the case of a small fill factor was investigated in co- and counter-rotating conditions. A particular attention was paid to determine steady state flow conditions.