

ED SMAER

Sujet de thèses 2013

Laboratoire : Matière et Systèmes Complexes

Etablissement de rattachement : Université Paris-Diderot

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : Sandra Lerouge (28)

Titre de la thèse : Influence des conditions aux limites sur la stabilité des écoulements de fluides complexes.

Collaborations dans le cadre de la thèse : Sébastien Manneville (ENS Lyon), Annie Colin (LOF Bordeaux), Benoît Ladoux (MSC)

Rattachement à un programme : DIM-ISC (2011-2013) + labex 2013-2014

Le sujet peut être publié sur le site web de l'ED SMAER : OUI

Résumé du sujet :

Le comportement des fluides complexes sous écoulement est bien souvent gouverné par une relation non-linéaire entre contrainte et gradient de vitesse, qui peut, par exemple, générer des effets de localisation du cisaillement. Par ailleurs, l'équation d'évolution de la contrainte contient un terme non-linéaire d'origine « élastique » qui peut conduire à une succession d'instabilités pour lesquelles l'inertie ne joue aucun rôle, les écoulements secondaires pouvant être cohérents puis turbulents (« élastiquement ») en fonction du paramètre de contrôle. Au cours de cette thèse, nous nous intéresserons à l'influence des conditions aux bords sur la stabilité de l'écoulement de fluides complexes qui s'organisent en bandes de cisaillement. Les systèmes choisis sont des solutions de tensioactifs. Il s'agira d'étudier comment les parois perturbent le système. En contrôlant leur rugosité, leur rigidité et leur affinité chimique, nous étudierons leur influence sur la dynamique en volume de l'écoulement et sur la séquence de bifurcations attendue. Ce contrôle est crucial dans les nombreuses utilisations industrielles (pétrole, cosmétiques, ...) des tensioactifs.

La thèse comportera 3 volets : la mise en oeuvre d'un dispositif de vélocimétrie 3D financée l'an dernier par le DIM ISC qui servira ensuite à l'étude des instabilités et de la turbulence élastique avec des conditions aux bords rigides et « lisses », et enfin l'étude de l'effet de conditions aux bords « molles » et/ou « rugueuses ».

Sujet développé (à présenter en 2 ou 3 pages maximum,
en précisant notamment le contexte, les objectifs, les résultats attendus)

Le contexte :

Contrairement aux fluides simples, les fluides complexes (polymères, émulsions, mousses...) sont structurés à l'échelle « mésoscopique », correspondant par exemple à la taille de la maille dans les solutions de polymères enchevêtrés ou bien à la taille d'une bulle constituant une mousse. Une telle échelle de taille fournit de nouveaux degrés de liberté, avec des temps caractéristiques de l'ordre de 10^{-3} à 100 s, qui peuvent être aisément excités par un écoulement: l'écoulement affecte la structure du fluide à l'échelle mésoscopique, et en retour, la nouvelle structure émergente modifie l'écoulement lui-même, à l'échelle macroscopique. Par exemple, dans le cas de solutions de polymères enchevêtrés, l'écoulement étire les chaînes et les aligne dans l'écoulement, induisant ainsi une fluidification de l'échantillon. Une autre conséquence possible de cette rétroaction est l'apparition d'un écoulement hétérogène organisé en « bandes de cisaillement » macroscopiques : l'échantillon se scinde en régions de viscosité différentes supportant des taux de cisaillement différents.

De nombreux fluides complexes (solutions de surfactant [Lerouge et al, Adv. Polym. Sci. 2010], polymères associatifs [Manneville et al, PRE 2007], émulsions [Coussot et al, PRL 2002], matériaux granulaires [Losert et al, PRL 2000], mousses [Gilbreth et al, PRE 2006]) présentent, sous écoulement, cette phénoménologie à l'échelle macroscopique malgré des structures microscopiques très différentes (et par conséquent des interactions entre les entités de base de nature différente).

Parmi ces systèmes, les solutions de micelles géantes font l'objet d'une littérature abondante, d'une part parce que ce sont les premiers pour lesquels la transition en bandes de cisaillement a été observée expérimentalement il y a 15 ans, et d'autre part parce qu'ils sont considérés comme des systèmes modèles pour l'étude des écoulements en bandes. Les micelles géantes sont des structures allongées, localement cylindriques et flexibles, analogues aux chaînes de polymères, résultant de l'auto-association de molécules amphiphiles en solution aqueuse. Contrairement aux polymères, elles se cassent et se recombinent continuellement, cette propriété fournissant un mécanisme de relaxation additionnel. En cisaillement simple, l'écoulement s'organise en bandes : les structures émergentes contenues dans la bande de fort taux de cisaillement sont totalement alignées dans l'écoulement (pour des échantillons concentrés, cette phase induite est nématique) et coexistent avec des régions où les structures, proches de l'état initial sont faiblement alignées. La courbe d'écoulement correspondante est constituée de 2 branches, a priori stables, caractéristiques des deux états distincts du système, séparées par un plateau de contrainte (Figure 1). La relation constitutive sous-jacente est quant à elle non-monotone, la sélection du plateau de contrainte étant assurée par l'inclusion d'un terme non local.

Jusqu'à récemment le caractère unidimensionnel de l'écoulement en bandes de cisaillement était simplement présupposé et sa stabilité n'avait pas été étudiée expérimentalement. En nous intéressant à un système expérimental modèle de micelles géantes, nous avons montré récemment que l'écoulement en bandes est sujet à une instabilité hydrodynamique en écoulement de Taylor-Couette [Lerouge et al, PRL 2006, Fardin et al, PRL 2009]: l'interface entre les bandes ondule suivant l'axe de la vorticité et des rouleaux de Taylor se développent dans la bande de haut taux de cisaillement (Figure 1-b). En fonction du paramètre de contrôle, le système présente différents motifs avec un régime stationnaire borné d'une part par un régime oscillant et d'autre part par un régime de création et annihilation de paires de rouleaux. Enfin, à hauts taux de cisaillements, nous avons observé une transition vers un état de désordre apparent (Figure 1-d), indiquant que l'écoulement des structures induites n'est pas stable [Fardin et al, PRL 2010].

Des développements théoriques récents ont essayé de rationaliser l'écoulement 3D observé en invoquant un mécanisme interfacial piloté par le saut de contraintes normales à l'interface entre les bandes [Fielding, PRE 2007]. Cependant, dans ces écoulements à bas nombre de

Reynolds Re , d'autres mécanismes sont possibles pour expliquer les motifs complexes que nous observons. Il est bien connu depuis une vingtaine d'années que des structures d'écoulement 3D se développent dans les solutions de polymères [Larson, Rheol. Acta 1992]. Les instabilités sous-jacentes résultent du champ de contrainte non-Newtonien créé dans l'écoulement et dû à l'élasticité du système. L'importance de la non-linéarité élastique est donnée par le nombre de Weissenberg Wi (défini comme le rapport du temps associé aux degrés de liberté mésoscopiques et du temps d'advection). Wi joue le rôle d'un paramètre de contrôle analogue à Re : lorsque Wi augmente, un fluide viscoélastique est susceptible de subir une transition d'un écoulement 1D vers différents écoulements 3D cohérents conduisant éventuellement à un état de turbulence élastique, appelée également turbulence à bas Reynolds [Groisman et al, Science 2000].

Nos résultats suggèrent que l'instabilité de l'écoulement en bandes de cisaillement est d'origine élastique, connectée à « l'instabilité purement élastique » observée dans les solutions de polymères. Les écoulements de micelles géantes présentent donc deux types entremêlés d'instabilités : l'instabilité de la structure du fluide qui conduit à la formation de bandes, et l'instabilité de l'écoulement lui-même qui conduit à des écoulements secondaires (rouleaux, turbulence...).

Par ailleurs, des études récentes en géométries d'écoulement macro- et micro-fluidiques suggèrent que la dynamique de l'écoulement est fortement affectée par les conditions aux bords [Bécu et al, PRE 2007, Masselon et al, PRE 2010], le glissement aux parois et la rhéologie de surface influant sur l'écoulement en volume.

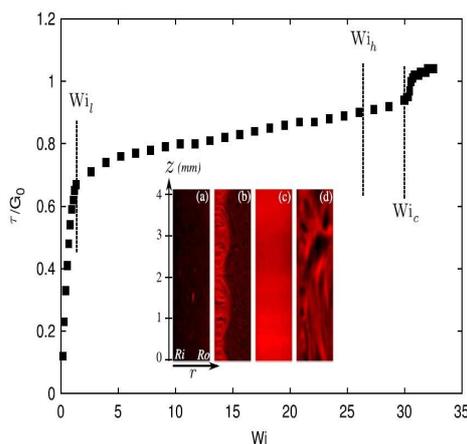


Figure 1: Contrainte de cisaillement normalisée en fonction du nombre de Weissenberg Wi . Insert: Vue du plan gradient de vitesse/vorticité pour différents Wi . Les cylindres intérieurs et extérieurs sont respectivement à gauche et à droite de l'image. (a) $Wi < Wi_l$: Ecoulement homogène le long de la branche de bas Wi . (b) $Wi_l < Wi < Wi_h$: Etat en bandes. L'interface entre les bandes présente des ondulations dont la longueur d'onde varie comme la taille de la bande de haut Wi dans laquelle des rouleaux étagés suivant la vorticité se développent. (c) $Wi_h < Wi < Wi_c$: Ecoulement homogène de la phase induite. (d) $Wi > Wi_c$: Ecoulement turbulent de la phase induite

Les objectifs:

Dans le contexte ci-dessus, plusieurs questions se posent:

- Comment les seuils des instabilités élastiques et les propriétés statistiques de la turbulence sont modifiés par l'existence des bandes? En effet, nous avons par exemple observé une zone de stabilité (Figure 1.c) entre les structures cohérentes et la transition vers la turbulence alors que pour d'autres systèmes de micelles géantes, la turbulence peut croître durant le régime en bandes. Du point de vue de la phase induite, les conditions aux limites changent lorsque Wi augmente : dans le régime en bandes, cette bande est confinée entre un mur rigide et la bande visqueuse qui agit comme un bord « mou ». Par contre pour Wi au-delà du régime en bandes la phase induite est au contact des deux bords rigides de la géométrie de mesure.

- Comment les parois perturbent-elles le système? En d'autres termes, quelle est l'influence du glissement à la paroi sur la dynamique de l'écoulement. La rugosité des parois affecte-t-elle la

séquence de bifurcations observées? Dans toutes les expériences actuelles le contrôle des parois est extrêmement grossier (typiquement, il peut s'agir d'un usinage mécanique aléatoire ou bien de parois de plexiglas sablées ou non avec des rugosités moyennes microniques) et il est quasiment impossible de quantifier les perturbations sur l'écoulement en volume.

- Est-il possible en variant la rigidité et/ou l'affinité chimique des parois, d'observer de nouveaux motifs ou bien d'inhiber certains modes? En effet des travaux théoriques récents ont prédit qu'un fluide élastique s'écoulant entre des parois « molles » (typiquement un gel de polymère) présente une instabilité sous-critique due au couplage élastique entre le fluide et les parois.

L'objectif principal du projet proposé est de développer des géométries d'écoulement à parois contrôlées et d'étudier leur influence sur la stabilité des écoulements en bandes de cisaillement des systèmes de micelles géantes.

Les méthodes :

1. D'un point de vue pratique, l'étude de la dynamique de l'écoulement sera effectuée à l'aide de techniques classiques de visualisation de la structure de l'écoulement par des particules anisotropes réfléchissantes (Kalliroscope). Nous établirons les spectres en espace et en temps des fluctuations d'intensité diffusée. La mesure des composantes de la vitesse et de leur fluctuations dans l'espace et dans le temps (en volume et au voisinage des parois) sera réalisée à l'aide d'un dispositif de vélocimétrie par image de particules qui sera mis au point au laboratoire. L'acquisition des principaux éléments de ce dispositif a été soutenue dans le cadre des appels à projets ISC-DIM petits et moyens équipements (année 2011).

Nous tenterons également d'établir une connexion entre les fluctuations à l'échelle locale et celles des grandeurs macroscopiques (contrainte, taux de cisaillement).

2. Contrôler « proprement » les conditions aux bords dans des géométries d'écoulement macroscopique est une tâche ardue. Pour contrôler la rugosité, nous envisageons de mettre à profit les techniques de lithographie molle déjà développées au laboratoire. Il s'agira de fabriquer des films de polydiméthylsiloxane (PDMS) micropatternés qui seront ensuite déposés sur les surfaces de la géométrie d'écoulement. Nous utiliserons les techniques de microfabrication de substrats recouverts de piliers micrométriques dont la taille et l'espacement sont parfaitement contrôlés, une technique développée au laboratoire par l'équipe de Benoît Ladoux pour l'étude de l'adhésion et de la migration cellulaire. Il nous faudra les adapter à une échelle tout à fait différente mais nous avons déjà testé la faisabilité de ces surfaces texturées à grande échelle [Guyennet, Stage M2 2010].

Le PDMS sera également utilisé pour varier la rigidité des parois. Il s'agira de dupliquer, en volume, les géométries d'écoulement standard, en essayant de respecter des contraintes géométriques draconiennes (excentricité par exemple). La rigidité du PDMS sera modulée en jouant sur la concentration en réticulant. La faisabilité de ce mode de fabrication par moulage a déjà été testée [Guyennet, Stage M2 2010]. L'un des avantages de la réalisation de géométries d'écoulement en PDMS est la possibilité de fonctionnaliser facilement la surface et de jouer ainsi avec ses affinités chimiques.

Les résultats attendus:

- Quantification des scalings de la turbulence élastique dans les micelles géantes
- Etablissement de protocoles robustes de fabrication de géométries d'écoulement à parois contrôlées (rigidité, rugosité)
- Contrôle de la stabilité des écoulements en bandes de cisaillement à l'aide des conditions aux bords.