



Stabilité et instabilité des écoulements de fluides complexes par Speckle UltraSonore

Maxime Chinaud, Philippe Tordjeman, Thomas Delaunay

► To cite this version:

Maxime Chinaud, Philippe Tordjeman, Thomas Delaunay. Stabilité et instabilité des écoulements de fluides complexes par Speckle UltraSonore. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. <hal-03391300>

HAL Id: hal-03391300

<https://hal.science/hal-03391300v1>

Submitted on 21 Oct 2021

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.



HAL Authorization

Stabilité et instabilité des écoulements de fluides complexes par Speckle Ultrasonore

M.CHINAUD¹, T. DELAUNAY¹ et P.TORDJEMAN²

1. Institut d'Electronique du Sud, Groupe MIRA, Université Montpellier 2, CC 082, 34095 Montpellier cedex 5, France

2. Université de Toulouse- CNRS, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse UMR 5502, Allée Camille Soula, F-31400 Toulouse, France

Résumé :

Une technique de vélocimétrie Speckle Ultrasonore (USV) a été développée pour l'étude d'écoulements de fluides complexes en cellule de Hele-Shaw. La validation de cette technique repose sur la confrontation directe des mesures, obtenues par Particles Imaging Velocimetry (PIV), de profil de vitesse pour des fluides modèles. L'objectif de cette présentation est de discuter des intérêts et des inconvénients des deux techniques sur la base d'expériences d'écoulement d'une solution de Xanthane.

Abstract :

An ultrasonic Speckle Velocimetry (USV) allows us to study the stability of a complex fluids flow in a Hele-Shaw cell. The comparison between USV and Particles Imaging Velocimetry (PIV) measurement for velocity profile gives us the validation of the ultrasonic technique. In this paper, our attention is focused on the interest and limits of each technique for a Xanthane solution flow.

Mots clefs : Speckle ultrasonore, fluides complexes, cellule de Hele-Shaw, stabilité et instabilité en écoulement de Poiseuille.

1 Introduction

Depuis environ 50 ans, l'industrie chimique synthétise des fluides aux lois de comportement de plus en plus complexes. Ces lois leur confèrent des propriétés dynamiques spécifiques et sont responsables de l'apparition d'instabilités bien différentes de celles générées par des fluides newtoniens. La description de ses instabilités présente donc un enjeu majeur dans l'amélioration des écoulements et en particulier dans les écoulements en milieu confinés.

Actuellement, les méthodes de vélocimétrie restent fondamentales dans l'étude et la compréhension de la dynamique des fluides. La principale difficulté dans l'utilisation de ces méthodes est liée aux perturbations de l'écoulement et de la structure du fluide en cours de mesure.

Généralement ces méthodes de vélocimétrie non intrusives sont des méthodes optiques. La plus connue d'entre elles est la « Particles Imaging Velocimetry » (PIV). Elle est basée sur la fluorescence de la rhodamine excitée par LASER et contenue dans des particules de PMMA. Ces dernières sont dispersées dans un fluide sous écoulement et l'analyse de leur position permet de remonter au profil de vitesse. Cependant, ces méthodes optiques ne peuvent pas être utilisées pour des écoulements fluides en milieu opaque (veines, canalisations opaques...) ou pour des écoulements de fluides opaques (eau turbides, pétroles...). De plus, les techniques de vélocimétrie classiques ne peuvent être utilisées pour la caractérisation des écoulements en milieu confiné, avec des épaisseurs caractéristiques inférieure au millimètre. En revanche, l'utilisation d'une méthode de vélocimétrie ultrasonore présente l'avantage d'être insensible à l'opacité et peut être utilisée pour des dimensions caractéristiques voisines d'une centaine de micromètres [6][7][8].

C'est face à ces enjeux que nous nous proposons de développer une méthode de vélocimétrie par Speckle ultrasonore (USV)[1]. Cette méthode consiste à envoyer une série d'impulsions ultrasonores dans un fluideensemencé de billes de verre. L'étude du signal rétrodiffusé associé à un traitement signal permet alors de déterminer le profil de vitesse de l'écoulement. De plus, l'utilisation de capteur ayant des fréquences acoustique allant de 2.25 MHz à 36 MHz permet l'étude d'écoulement fluide dans des dimensions allant de

1 mm à 40mm.

2 Caractérisation des fluides complexes

Les fluides complexes présentent une grande diversité de lois de comportement. Dans le cadre de cette étude, nous nous focaliserons sur les écoulements des fluides rhéofluidifiants. Ils se caractérisent par le fait que leur viscosité diminue lorsque la vitesse de cisaillement augmente.

Nous avons choisis comme fluide modèle une solution de Xanthane, peu coûteuse qui présente l'avantage d'être rapidement et simplement formulée [2]. Ce dernier se présente sous forme de poudre (polysaccharide naturel produit par les bactéries *Xanthomonas campestris*) qui se dilue dans de l'eau distillée et dont la concentration augmente le caractère rhéofluidifiant de la solution. Notre choix s'est porté sur le Xanthane 1500 ppm (1500 mg/L) dont la loi de comportement (cf. figure 1) présente trois régimes bien distincts. Pour de faibles vitesses de cisaillement (10^{-2} - 10^{-1} s⁻¹), sa viscosité reste constante, le fluide se comporte comme un fluide newtonien ($\eta=1$ Pa.s). Pour des vitesses de cisaillement intermédiaires (10^{-1} - 10^3 s⁻¹), la viscosité du fluide diminue définissant ainsi un régime rhéofluidifiant. Enfin, le comportement du Xanthane 1500ppm aux fortes vitesses de cisaillement (10^3 - 10^4 s⁻¹) est caractérisé par un deuxième « plateau » newtonien ($\eta=10^{-3}$ Pa.s) plus faible que le premier.

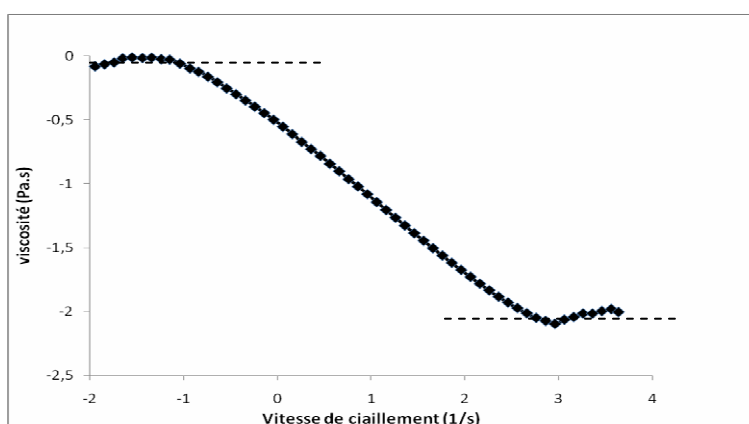


FIG. 1 – Loi de comportement du Xanthane 1500 ppm. (Obtenus par rhéomètre AR2000)

Représentation log-log de la viscosité η du Xanthane (Pa.s) en fonction de la vitesse de cisaillement (1/s).

3 Cellule de Hele-Shaw

Nous nous proposons d'étudier la stabilité du Xanthane 1500 ppm en écoulement de Poiseuille. Pour cela, nous avons réalisé une cellule de Hele-Shaw constituée de deux plaques de verre dont l'espacement est assuré par une entretoise métallique de 5 mm d'épaisseur. Ces plaques de dimensions 19×90×300 mm, données à plus ou moins 0.5 mm par le constructeur, sont encastrées dans des cadres en aluminium de 50 mm d'épaisseur. L'étanchéité de la cellule est assurée par un joint torique en nitrile. Afin de pouvoir réaliser une étude de l'écoulement du Xanthane dans une large gamme de cisaillement, il est impératif de pouvoir faire varier la vitesse d'écoulement fluide à l'intérieur du canal. Une seringue d'injection en acier, d'un volume de 250 mL, est reliée à la cellule et son poussoir est constitué d'une platine de déplacement reliée à un moteur pas à pas BRUSHLESS AKM75. Des vitesses d'injection comprises entre 1 à 500 mm.s⁻¹ permettent alors d'imposer différentes vitesses d'écoulement.

Dans un premier temps, afin d'estimer les performances de notre cellule d'écoulement, nous avons cherché à caractériser le profil de vitesse de l'eau par Particles Imaging Velocimetry (PIV) [9]. Le matériel utilisé est un LASER (QUANTEL Twinultra) de longueur d'onde 532 nm et de puissance 30 mJ et une caméra (PCO sensicamQE) 1376-1040 px. Le système est placé de telle sorte que la nappe LASER pénètre la cellule d'écoulement avec un angle de 56° par rapport la normale et soit dans le plan focal de la caméra. L'eau estensemencée de particules de PMMA de 10 µm contenant de la rhodamine dont la fluorescence peut être excitée à la longueur d'onde du LASER.

On observe que le profil de vitesse a bien l'allure parabolique attendu pour un écoulement de Poiseuille (cf. figure 2). A l'approche des parois les incertitudes augmentent diminuant ainsi la fiabilité de nos mesures dans les zones d'écoulement à fort gradient de vitesse.

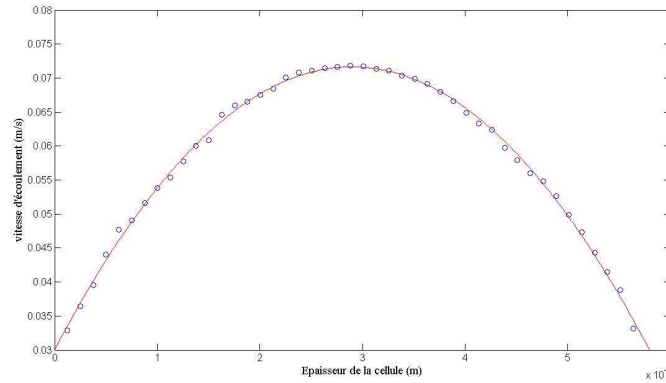


FIG. 2 – Profil de vitesse de l'eau dans la cellule de Hele-Shaw (points) et approximation parabolique (trait plein) pour une vitesse d'injection de $v = 0,01 \text{ m.s}^{-1}$.

4 Vélocimétrie par Speckle Ultrasonore (USV)

Un signal Speckle se définit comme l'interférence de tous les signaux ultrasonores rétrodiffusés par de fines particules contenues dans un fluide. Ce type de signal s'obtient lorsque le rayon a des billes obéit à la relation $a \approx \lambda/10$ (où λ représente la longueur d'onde acoustique) et la concentration en particules est de $C \approx 10^{11}$ - 10^{12} part/m³ [4][5]. Le traitement du signal permet alors de caractériser la vitesse d'écoulement du fluide.

4.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'USV est le suivant : deux impulsions ultrasonores séparées d'un intervalle de temps T_{PRF} insonnifient le fluide en écoulement. Pendant le temps T_{PRF} , les billes de silices parcourent une distance dy le long de l'axe de propagation acoustique (cf. figure 3). T_{PRF} étant fixé, la détermination de la vitesse repose sur la mesure du déplacement dy : $v_y = dy / T_{PRF}$. Le déplacement dy étant le projeté orthogonal du déplacement réel sur l'axe acoustique il est impératif que le faisceau ultrasonore ne soit pas perpendiculaire au sens de l'écoulement.

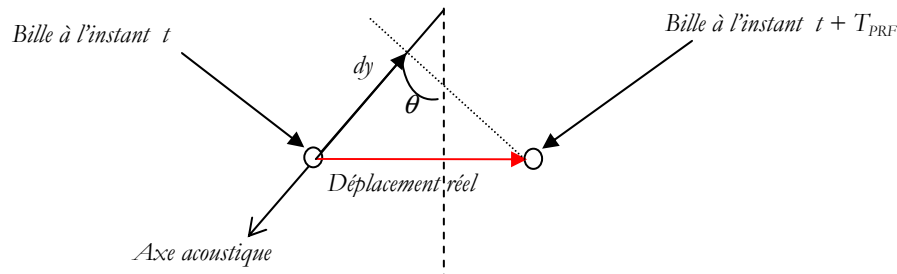
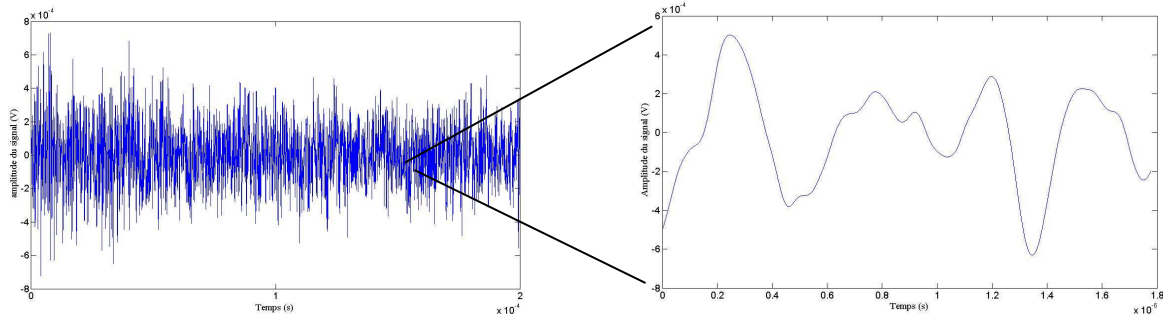


FIG. 3 – Schéma du déplacement d'une bille de verre dans un écoulement fluide.

Le déplacement minimal mesurable est $dy(\min) = \lambda$, ce qui impose $T_{PRF}(\min) = \lambda/v_{th}$ où v_{th} est la vitesse théorique de la bille. De plus, afin d'éviter les vibrations mécaniques basses fréquences, on fixe $f_{PRF}(\min) = 10 \text{ Hz}$. Le profil de vitesse sur la distance étudié s'obtient en décomposant le signal Speckle en N fenêtres dont la taille Δt est de quelques périodes acoustique. La figure 4 présente un signal Speckle et une de ses fenêtres dont la taille est de 4 périodes acoustiques.

FIG. 4 – $10^{\text{ème}}$ fenêtre Speckle de taille $\Delta t = 4 T_{ac}$.

En considérant la célérité de l'onde sonore dans le fluide C_0 , on obtient la taille de la fenêtre spatiale $\Delta y = (1/2)C_0 \Delta t$. Les vitesses mesurées par USV sont donc données pour une zone de largeur Δy .

L'intercorrélation de la $n^{\text{ème}}$ fenêtre à l'instant t et de la $n^{\text{ème}}$ fenêtre à un l'instant $t + T_{PRF}$ permet d'obtenir leur décalage temporel δ et ainsi de calculer le déplacement $dy = C_0 \delta / 2$ [1].

Enfin, la vitesse v_y le long de l'axe ultrasonore est donnée par $v_y = dy / T_{PRF} = C_0 \delta / (2 T_{PRF})$. En particulier, la vitesse réelle de la $n^{\text{ème}}$ fenêtre est $v(n) = v_y(n) / \cos(\theta)$ où θ est l'angle entre le faisceau ultrasonore et le sens de l'écoulement.

4.2 Validation du principe de mesure USV en cellule de sédimentation

Avant utilisation en cellule de Hele-Shaw, nous avons cherché à valider nos mesures de vitesse dans une géométrie simple d'écoulement de sédimentation des billes de verre.

La cellule de sédimentation, de forme rectangulaire (2,7×3,4×14,9 cm) est constituée de deux plaques de verre fixées sur un cadre en aluminium. Le capteur ultrasonore est placé en bas de la cellule de telle sorte que la sédimentation des billes soit parallèle à l'axe du faisceau d'émission. Le profil de vitesse étant relativement constant le temps de l'écoulement, une résolution de quelques millimètre suffit, c'est pourquoi nous utiliserons un capteur plan de fréquence 2,25 MHz dont la longueur d'onde dans l'eau est de 660 μm . Le fluide estensemencé de billes de silice de diamètre compris entre 45-90 μm donnés à plus ou moins 10% dont le rayon médian représente 1/20 de la longueur d'onde. Le capteur est relié à un générateur d'impulsion de type Panametrics-NDT 5800 et l'acquisition des traces se fait au moyen d'un oscilloscope (Lecroy, waves runner 104Xi). La fréquence de répétition des impulsions f_{PRF} est fixée à 1 kHz et la bande passante du générateur d'impulsion est [1 kHz ; 5 MHz].

Le nombre de Reynolds de cette population de billes en sédimentation est de l'ordre de 0,1. Il est donc possible de confronter nos résultats à ceux obtenus par la formule de Stokes :

$$f_v = 6\pi\eta V.$$

Dans ces conditions la vitesse limite de sédimentation s'écrit :

$$v_l = \frac{d^2 g}{18\eta} (\rho_{billes} - \rho_{eau}),$$

Où f_v représente la force de viscosité, η et ρ_{eau} la viscosité et la densité du fluide (eau). d , v_l et ρ_{billes} représentent respectivement le diamètre, la vitesse et la densité des billes. Les vitesses de sédimentation pour la population de billes étudiée seront donc comprises entre 3 mm/s et 20 mm/s.

Les résultats obtenus par Speckle acoustique montrent une répartition de vitesses de sédimentation comprises entre 4 mm/s et 16 mm/s, ce qui correspond aux prévisions théoriques. On remarque également une population de billes dont la vitesse est nulle qui correspondent aux billes déjà sédimentées, à la surface du capteur.

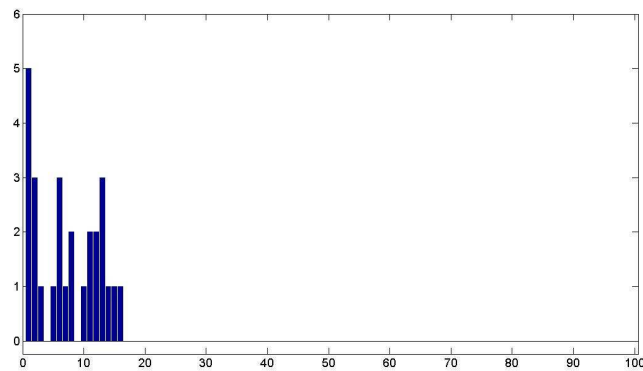


FIG. 5 – Histogramme des vitesses de sédimentation obtenu dans l'eau. Les vitesses, en abscisses sont en mm.s^{-1} .

L'utilisation de capteur acoustique haute fréquence pose cependant plusieurs problèmes expérimentaux liés à une forte atténuation des signaux Speckle. A titre d'exemple, un capteur plan se défocalise naturellement au-delà de la zone de Fresnel, limitant ainsi la profondeur d'investigation Speckle. Dans le cadre de notre expérience de sédimentation, cette profondeur est d'environ 5cm.

4.3 Mise en place du dispositif sur la cellule Hele-Shaw

Dans le but d'appliquer l'USV à un écoulement en cellule de Hele-Shaw, le capteur est mis en contact avec la plaque supérieure de la cellule. Nous avons fixé l'angle d'incidence du faisceau ultrasonore à 15° . Lors de l'écoulement d'un fluide newtonien, le profil de vitesse attendu est parabolique. En revanche pour le Xanthane 1500 ppm, on s'attend à un écoulement du type bouchon présentant trois zones distinctes, deux zones cisailées au niveau des parois et une zone centrale, où le taux de déformation est proche de zéro. Nous présentons ici les premiers résultats d'un profil de vitesse du Xanthane 1500 ppm obtenus par PIV (cf. figure 6). Les mesures de vitesses par USV sont en cours de traitement. Dans notre exposé, nous discuterons de la confrontation PIV et USV pour le Xanthane en nous focalisant sur les difficultés expérimentales et la précision des deux techniques.

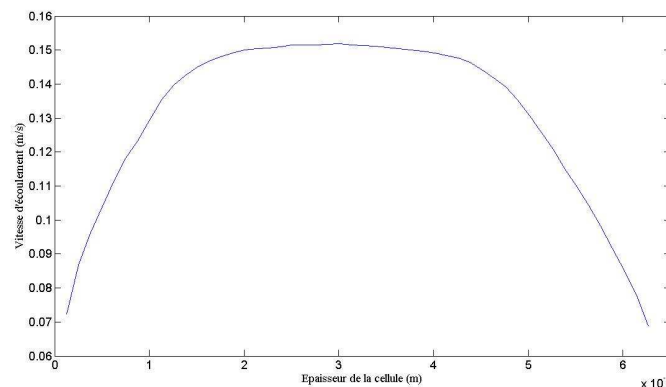


FIG. 6 – Profil de vitesse du Xanthane 1500 ppm dans la cellule de Hele-Shaw pour une vitesse d'injection de $v = 0,2 \text{ m.s}^{-1}$.

5 Conclusion-Perspectives

Les méthodes d'investigation ultrasonore, permettent l'étude des écoulements en milieu confiné et la caractérisation des profils de vitesse de fluides opaques.

Afin d'étudier la stabilité et les modes d'instabilité de fluides complexes [3] opaques, nous avons développé une méthode de caractérisation de la vitesse de ces fluides par Speckle ultrasonore. L'utilisation de notre méthode USV doit être validée par la confrontation directe des profils obtenus pour des fluides modèles à ceux obtenus par PIV. Dans un premier temps, la technique USV a été développée pour caractériser l'écoulement dans une cellule de sédimentation, ce qui a permis de montrer la robustesse d'une telle méthode

de vélocimétrie. Une cellule de Hele-Shaw a été construite afin de générer des écoulements dans une large gamme de vitesse. Nous nous sommes alors focalisés sur l'étude d'un fluide rhéofluidifiant modèle à base de Xanthane et caractérisé par rhéométrie sa loi de comportement. Enfin, les profils de vitesse de ce fluide modèle ont été établis dans la cellule de Hele-Shaw sur une plage étendue de vitesses d'injection. La confrontation des mesures PIV et USV sera discutée lors de notre présentation en nous concentrant sur les intérêts et les inconvénients de deux techniques.

References

- [1] Manneville.S, Bécu.L et Colin.A, High-fréquence ultrasonic speckle velocimetry in sheared complex fluid.
- [2] Lindner.A, L'instabilité de Saffman-Taylor dans les fluides complexes : relation entre les propriétés rhéologiques et la formation des motifs, Septembre 2000.
- [3] Saffman.P.G and Taylor.G, The penetration of a fluid into a prous medium or Hel-Shaw cell containing a more viscous liquid, (1958).
- [4] Page.J.H, Schriemer.H.P, Bailey.A.E and Weitz.D.A, Experimental test of the diffusion approximation for multiply scattered sound. Phys. Rev. E, Vol 52, N°3 (1995).
- [5] Cowan.M.L, Page.J.H and Weitz.D.A. Velocity fluctuation in fluidized suspensions probed by ultrasonic correlation spectroscopy. Phy. Rev. Lett., Vol 85, N°2 (2000).
- [6] Coldani.G, Corazza.I, Ghidetti, Lombardi. R, Zannoli.R, An instrument to measure velocity profile by means of ultrasound techniques.
- [7] Sisbot.S, A cross-correlation technique as a system evaluation tool; application to blood flow measurement in extra-corporeal circuits. Flow meas. And Inst., Vol 16, 27-34, (2005).
- [8] Pan.T.T, Chiang.H.K, Ultrasound low-velocity flow estimations using cross-correlation and decorrelation: A thread phantom study. Med. Ing. Phy., Vol 29, 602-614, (2007).
- [9] M.L.RIETHMULLER. Velocimétrie par image de particules ou PIV, école d'automne (2005).