



**HAL**  
open science

## Etude de l'effet Weissenberg microscopique par micro-PIV

Nicolas Dietrich, C. Zhao, X. Frank, S. Poncin, N. Midoux, H.Z. Li

► **To cite this version:**

Nicolas Dietrich, C. Zhao, X. Frank, S. Poncin, N. Midoux, et al.. Etude de l'effet Weissenberg microscopique par micro-PIV. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. <hal-03361146>

**HAL Id: hal-03361146**

**<https://hal.science/hal-03361146v1>**

Submitted on 1 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

## Étude de l'effet Weissenberg microscopique par micro-PIV

N. DIETRICH, C. ZHAO, X. FRANK, S. PONCIN, N. MIDOUX and H. Z. LI

Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, CNRS-ENSIC-INPL  
1 rue Grandville, BP 20451, 54001 Nancy Cedex, France  
*Nicolas.Dietrich@ensic.inpl-nancy.fr*

### Résumé :

Ce travail vise à la compréhension de l'effet Weissenberg sur des interfaces liquide-liquide diphasiques. Notre étude a porté sur des interfaces constituées de fluides newtoniens ou non-newtoniens en contact avec de l'huile. L'effet Weissenberg inverse a été confirmé pour l'eau mais pour une solution polymérique, la montée de l'interface est nettement plus importante qu'en absence d'huile, on parle alors d'effet Weissenberg amplifié. Pour étudier les mécanismes responsables de la montée, nous disposons d'un système PIV (Particule Image Velocimetry) permettant d'obtenir des champs de vitesse. Cependant, cette technique ne permet pas d'accéder à des champs de vitesse aussi petits (quelques millimètres d'épaisseur). Pour ce faire, on utilise un système micro-PIV nous permettant de les visualiser dans des géométries microscopiques. Ainsi, nous avons réalisé des effets micro-Weissenberg verticaux, et horizontaux. Cette originalité de l'effet Weissenberg nous a permis de comprendre avec plus de précision les mécanismes de la montée de l'interface.

### Abstract :

In this work we present an investigation of the Weissenberg effect which happens at liquid-liquid interfaces obtained using Oil-newtonian as well as oil-non-newtonian liquid-liquid systems. The inverted Weissenberg effect has been confirmed for the Newtonian liquid-liquid system (water/oil). However, for the polymeric solution/oil system, an amplified vertical Weissenberg effect is obtained as the rise of the interface is much more pronounced than in absence of oil. A PIV-system (Particle Velocimetry Image) has been used to study the mechanisms responsible on the rod climbing heavy phase. However, this technique has been found to be not sufficient to obtain flow fields in small areas of few millimetres thickness. A micro-PIV system has thus been used to measure flow fields in the rod climbing zone using microscopic geometries which allow the visualization of horizontal as well as vertical micro-Weissenberg effects. These experiments contribute to further understanding of the Weissenberg effect mechanism.

### Mots-clefs :

**Effet Weissenberg, PIV,  $\mu$ PIV**

### 1 Introduction

Les phénomènes interfaciaux, couplés avec l'hydrodynamique, interviennent dans de nombreux procédés industriels mettant en jeu les écoulements polyphasiques (liquide-liquide) en milieu newtonien et non newtonien. Parmi ces procédés nous citerons par exemple les émulsions intervenant dans de nombreux secteurs industriels tels que cosmétiques, détergents, agroalimentaires, pharmaceutiques, etc.

La connaissance des déformations d'une interface liquide-liquide est donc une donnée importante pour les procédés de mélange ou de séparation, ou encore pour la compréhension des mécanismes de formations de gouttes. Les phénomènes de déformation d'interfaces ont été la source de nombreuses études dans le passé. Déjà au XVII<sup>ème</sup> siècle, Isaac Newton s'intéressait aux problèmes de déformation d'interface. L'expérience dite « du seau » est décrite dans les

« Principia » (Principes Mathématiques de Philosophie Naturelle). Newton suspendait, à une longue corde, un seau rempli d'eau, puis en tordant la corde et en abandonnant l'ensemble à lui-même. Ce qui provoque la mise en rotation du seau. Newton observe ainsi que la surface de l'eau se creuse et prend la forme d'un paraboloïde de révolution. Si on verse de l'huile sur l'eau, la surface de séparation entre les deux liquides aura la même forme.

Il existe d'autres phénomènes de déformation simple, comme la rotation de la cuillère dans le café, qui creuse effectivement la surface du liquide et si l'on effectue rigoureusement l'expérience, on observe bien un creux à l'interface air/liquide. Celui-ci s'explique par l'effet des forces d'inertie comme dans le cas de l'expérience du seau de Newton. Cet effet a notamment été étudié par Karl Weissenberg (1946). En plongeant une tige tournante dans un liquide newtonien, il a observé un abaissement de l'interface, et une montée d'interface dans le cas d'un fluide non-newtonien. Il fut le premier à faire cette observation, d'où le nom attribué à ce phénomène: l'effet Weissenberg qui est devenu l'un des phénomènes les plus intéressants concernant les fluides non-newtoniens. Cet effet est le fruit des propriétés élastique du fluide. Il tend effet tend à provoquer l'ascension d'un liquide non-newtonien élastique le long du rotor alors que pour un liquide newtonien purement visqueux, on observe la formation d'un vortex. Ces contraintes normales agiraient comme une force circulaire autour de la tige qui forcerait le liquide à se déplacer vers l'intérieur, à l'encontre de la force centrifuge, et vers le haut, à l'encontre de la force gravitationnelle. Ce concept a servi de base à certaines applications de mesure de grandeurs rhéologiques.

Contrairement à l'étude de Newton, Weissenberg n'a pas essayé de vérifier la déformation de l'interface en versant de l'huile (ou un autre fluide newtonien) sur la surface du liquide non-newtonien. Beavers et Josphe (1978) ont étudiés des interfaces composées d'eau et de solution polymérique flottant par dessus. Ils ont observé une descente le long de l'axe du fluide non-newtonien environ quatre fois plus importante que la montée du fluide en contact avec de l'air, on parle alors de « Weissenberg inversé », mais il n'ont pas comparé l'influence et l'amplification de la montée du fluide. L'amplification est encore plus importante si l'eau est remplacée par un fluide newtonien dont la densité est proche de celle de la solution viscoélastique. Saville et Thompson (1969) ont coloré le fluide pour observer l'existence d'un écoulement secondaire perpendiculaire à l'écoulement circulaire originale.

Cependant leurs schémas prédictifs des champs de vitesses sont en désaccord avec nos études préliminaires et notamment avec les champs obtenus par vélocimétrie d'imagerie particulaire expérimentalement. Notre étude se focalise donc sur les interface composées d'huile flottant sur une solution polymérique viscoélastique et nous comparerons l'influence de la montée avec ou sans huile ainsi que l'influence des propriétés de la phase huileuse. Une analyse par PIV (Particle Image Velocimetry) a donc été entreprise pour comprendre cette ascension, mais en raison de leurs petites tailles, la réalisation d'effet Weissenberg microscopique nous a permis de les visualiser dans des géométrie microscopiques afin de comprendre qualitativement l'ascension du fluide.

## 2. Dispositif Expérimental

Le montage expérimental est constitué d'une colonne à base carrée en plexiglas, de qualité optique (FIG. 1). Le coté et la hauteur de la colonne sont respectivement de 0,12 et 0,20 m. On place au centre de cette colonne un axe de rotation en acier de 10mm de diamètre, peint en noir pour éviter les problèmes de réflexion. La colonne est remplie d'une solution aqueuse de Poly Acryl Amide (PAAm, AN905 SH) de la société SNF Floeager de concentrations massiques de 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 0,75 et 1%. C'est un polymère linéaire de masse molaire élevée  $M_w = 6,96 \cdot 10^3$

$\text{kg mol}^{-1}$ . La tension superficielle et la rhéologie sont mesurées en utilisant respectivement un tensiomètre Tracker (ITC concept) et un rhéomètre RDA (Rheometric scientific).

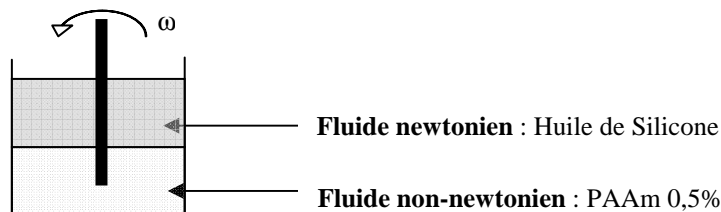


FIG. 1 – Schéma de l'expérience.

Pour visualiser le phénomène et mesurer la déformation de l'interface, on utilise un système vidéo constitué d'une caméra numérique rapide de type CCD d'une vitesse de prise de vue pouvant aller jusqu'à 950 images par seconde. Le champ de vitesse instantané a été mesuré à l'aide d'un système de Vélocimétrie par Imagerie Particulaire (PIV, DANTEC Dynamics). On utilise aussi, pour la visualisation microscopique, un système de  $\mu$ -PIV composé d'un microscope Leica et d'une caméra CCD. Des particules de latex sont utilisées pour tracer la phase liquide et ainsi suivre l'écoulement dans des canaux de plexiglas de section carrée de 5 mm. Toutes les expériences ont été réalisées à la température constante de 293 K.

### 3. Résultats expérimentaux

Les premières observations expérimentales effectuées sur des fluides non-newtoniens en contact avec une phase huileuse confortent les études reportées dans la littérature et l'existence de « l'effet Weissenberg inversé ». Les mesures expérimentales de la montée de l'interface constituée par le système PAAm 0.5% / Huile de silicone 100 montrent une déformation et une montée très prononcées semblables à celles obtenues par un effet Weissenberg classique à l'interface entre le PAAm 0.5%/air. La figure 2 illustre un exemple de montée d'interface au voisinage de l'axe de rotation pour une interface composée de PAAm 0,5% et d'huile de silicone 47V100. Les mesures sont arrêtées à des vitesses de rotation de  $500 \text{ tr.min}^{-1}$  en raison de l'apparition de différentes perturbations (instabilités, création d'anneaux ou de gouttes, etc.).



FIG. 2 – Visualisation par caméra de la déformation de l'interface PAAm 0.5% et Huile de silicone 100. De gauche à droite : 50, 100, 200, 300 et 400  $\text{tr.min}^{-1}$ .  $D_{\text{axe}} = 10\text{mm}$ .  $V = 1\text{L}$ .

La montée de l'interface est très importante si on la compare à la montée de la même phase lourde en contact avec de l'air. La figure (3a) représente la comparaison entre ces deux variations de hauteur. On remarque ainsi que l'ajout d'huile amplifie l'effet Weissenberg, on parle alors de « l'effet Weissenberg amplifié ».

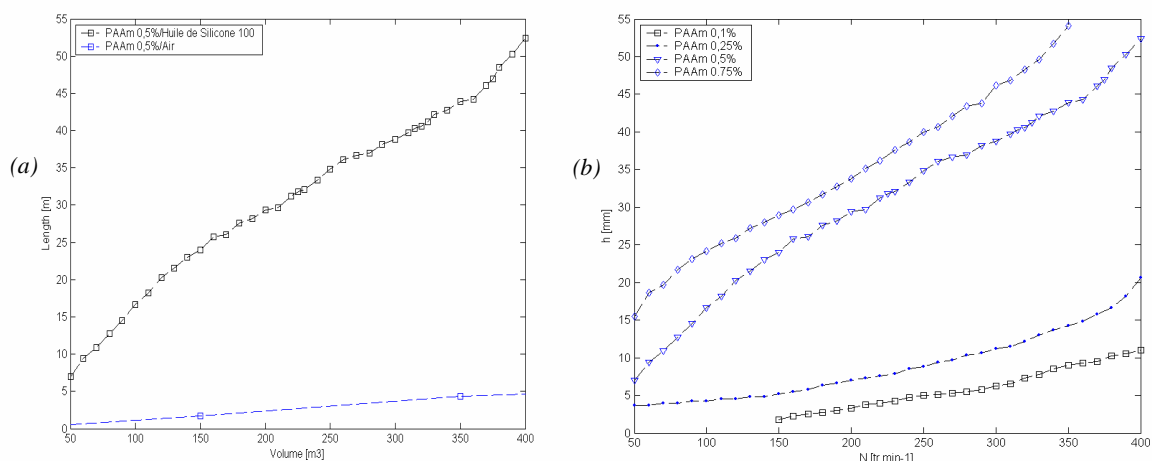


FIG. 3 – (a) Comparaison de la variation de la hauteur de la montée pour les interfaces PAAM 0,5% -Air et PAAM 0,5% -Huile de Silicone 100. (b) Variation de la hauteur de l'interface PAAM-Huile pour différentes concentrations massiques de polymère 0,1 ; 0,25 ; 0,5 et 0,75%.

Quatre concentrations massiques différentes de PAAM ont été utilisées pour la phase lourde : 0,1 ; 0,25 ; 0,5 et 0,75%. De l'huile de silicone 47V100 est utilisée comme phase légère. L'influence de la vitesse de l'axe de rotation a été étudiée pour ces différentes interfaces. La figure (3b) qui résume les résultats ainsi obtenus montrent que l'ascension du fluide est d'autant plus importante que la concentration de la solution de polymère et la viscosité de l'huile est grande. L'étude de l'effet Weissenberg par PIV nécessite l'obtention d'une déformation de l'interface suffisamment élevée et large pour pouvoir être visualisée. Par ailleurs, sachant que pour des concentrations trop grandes (0,75%, 1%, et 2%) la vitesse du fluide devient très faible en raison de la grande viscosité de ces fluides. Nous avons choisi de travailler avec des concentrations permettant d'obtenir une montée d'interface suffisamment grande et une vitesse de déplacement dans le fluide mesurable par PIV. Nous avons ainsi opté pour le système PAAM 0,5% et l'huile de silicone 100.

Pour étudier les mécanismes responsables de la montée de l'interface, nous avons utilisé le système de PIV permettant d'obtenir des champs de vecteur vitesse comme le montre la figure (4).

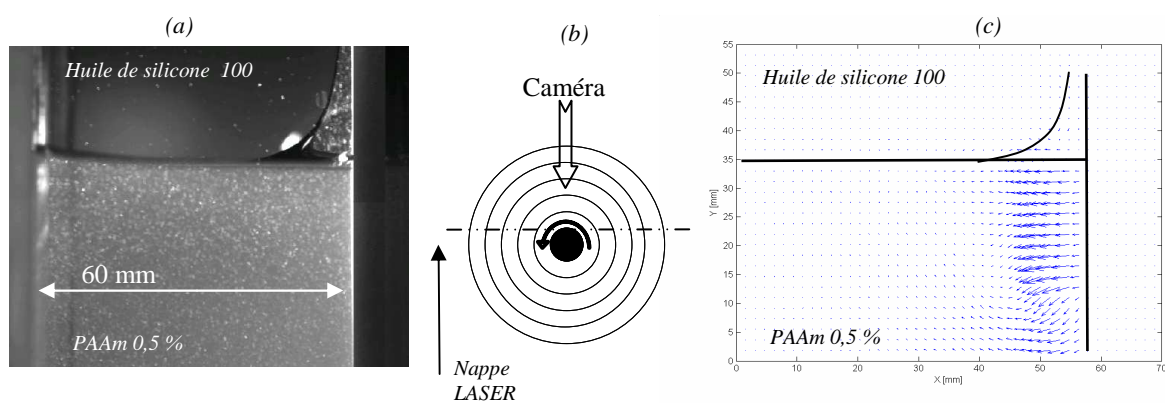


FIG. 4 : (a) Visualisation de la montée d'interface. PAAM 0,5% en bas et Huile de silicone en haut.  $D = 10$  mm.  $N = 500$  tr  $\text{min}^{-1}$ . (b) Positionnement de la nappe Laser pour l'expérience. (c) Champs de vitesse visualisé par PIV

Le champs de vitesse obtenu est mesuré légèrement en amont de l'axe de rotation, comme le montre la figure (4b) pour limiter les effets de réflexion qui masqueraient le déplacement des

particules traçantes. Le champ de vitesse obtenu illustré sur la figure (4c) montre un déplacement azimuthal du fluide non-newtonien avec un gradient radial. L'écoulement de cisaillement induit des contraintes normales, indépendantes de la direction de l'écoulement. Cette anisotropie des contraintes normales conduit à  $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr}$ , dans un système de coordonnées cylindriques ( $r, \theta, z$ ),  $z$  étant l'axe du cylindre. Il y a une tension le long des lignes de courant qui tend à pousser le fluide vers l'axe et à le faire monter. Cependant il est très difficile de visualiser les vecteurs vitesses dans la zone de montée du fluide. La réalisation d'un agrandissement sur la zone de montée est effectuée, le champ de vitesse obtenu montre alors la présence de boucles de recirculation dans la phase huileuse. Il s'agit des rouleaux dits de Taylor qui apparaissent lorsque l'écoulement circulaire initial devient instable et perpendiculaire à l'écoulement de base. Malheureusement, l'épaisseur de l'interface, la petite taille de la zone de fluide montante et la réflexion du LASER crée une zone sombre sans données de champs de vitesse. L'écoulement peut être azimuthal comme pour le fluide de la phase inférieure ou alors la boucle de circulation de la phase supérieure peut engendrer une rotation du fluide. On ne sait donc pas quelle est la nature de l'écoulement dans cette zone car il est difficile de visualiser des champs de vitesses aussi faibles (de l'ordre de quelque dixième de millimètres par secondes) avec précision. Pour ce faire nous nous sommes orientés vers l'utilisation d'un système micro-PIV nous permettant de visualiser ces champs de vitesse dans des géométries microscopiques. Ainsi, nous avons réalisé des effets micro-Weissenberg verticaux, et pour les besoins de la micro-PIV réalisé des effets micro-Weissenberg horizontaux comme le montre la figure (5a) et (5b). En raison des forces de capillarités, des petites géométries utilisées, et de la viscosité de nos produits, les interfaces sont stables verticalement dans la mini-conduite horizontale de 5 mm.

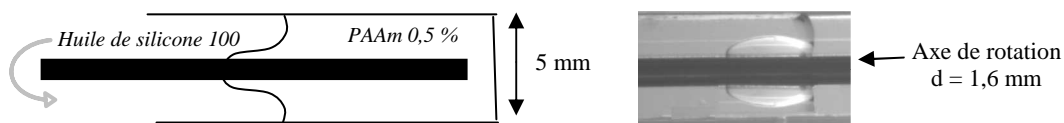


FIG.5 : (a) Schéma de la réalisation expérimentale de l'effet Weissenberg horizontal.

(b) Visualisation de l'effet Weissenberg expérimental par caméra.

PAAm 0,5 % à gauche et huile de silicone à droite.  $N = 500 \text{ tr.min}^{-1}$ .  $D = 1,6 \text{ mm}$ .  $V = 2,5 \cdot 10^7 \text{ m}^3$ .

La visualisation de la déformation de l'interface reportée sur la figure (5) est réalisée pour différentes vitesses de rotations de l'arbre. On observe ainsi au voisinage de l'axe de rotation, un déplacement du fluide le plus lourd vers le plus léger. La forme de l'interface est similaire à celle de « l'effet Weissenberg amplifié ». La figure (6) montre l'évolution du déplacement du fluide en fonction de la vitesse de rotation de l'axe.

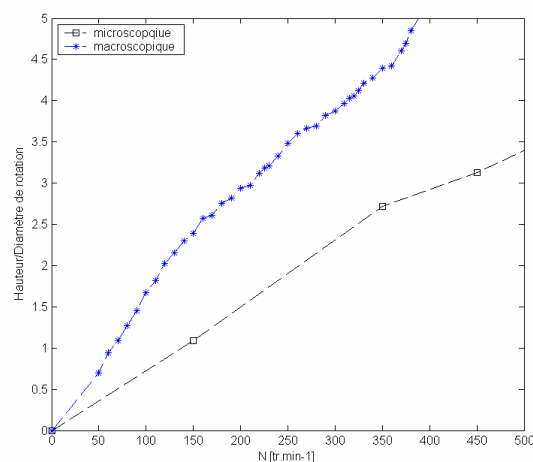


FIG. 6 : Variation du rapport hauteur du déplacement/diamètre de l'axe de rotation en fonction de la vitesse de rotation.

Si l'on rapporte la longueur du déplacement de l'interface au diamètre de l'axe de rotation on obtient un nombre adimensionnel caractéristique de la géométrie de l'écoulement. La variation de ce paramètre en fonction de la vitesse de rotation est illustrée sur la figure (6) qui montre que, pour l'étude microscopique, les effets de paroi et de capillarité freinent le déplacement du fluide qui varie toutefois avec la fréquence de rotation, la forme de l'interface étant semblables dans les deux cas. Ce système peut ainsi être étudié par  $\mu$ PIV. Plusieurs mesures de champs de vitesse sont effectuées à différentes profondeurs dans la mini-conduite). Ces champs de vitesses sont représentés sur la figures (7) permettant de confirmer l'écoulement azimuthal avec un gradient de vitesse radiale.

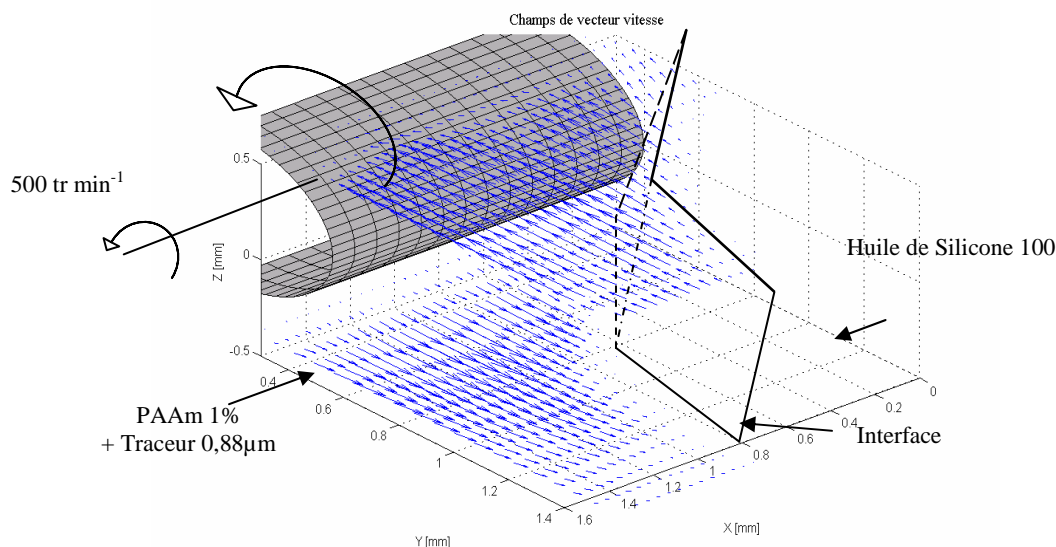


FIG. 7 : Représentation 3D des champs de vitesses obtenus par  $\mu$ PIV

#### 4. Conclusion

Cette étude multi-échelle nous a permis d'étudier l'amplification de l'effet Weissenberg par ajout d'une couche d'huile de silicone sur la solution de polymère. Cette amplification avait été déjà remarqué Plus la viscosité de l'huile est grande et plus la concentration de la phase polymérique est grande alors l'ascension est importante. Le système de PIV nous a permis d'obtenir des champs difficilement visualisables à l'échelle du phénomène avec précision et donc ne permettant pas de comprendre le sens de l'écoulement des fluides. L'utilisation d'un système de micro-PIV nous a permis de visualiser le sens de déplacement des fluides dans des géométries millimétriques. La réalisation des effets micro-Weissenberg verticaux et horizontaux a ainsi permis de comprendre avec plus de précision les mécanismes de montée de l'interface.

#### References

Beavers G.S., Joseph D.D., 1979. Experiments on free surface phenomena, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 5, 323-352

Saville, D. A. & Thompson, D. W., "Secondary Flows Associated with Weissenberg Effect.," *Nature* 223 391 (1969)

Weissenberg K., Conference of British Rheologist's Club, London 1946. Saville, D. A. & Thompson, D. W., "Secondary Flows Associated with Weissenberg Effect.," *Nature* 223 391 (1969)