



**HAL**  
open science

## Estimation quantitative du comportement rhéologique de systèmes modèles en utilisant un dispositif rhéo-optique

Mathilde Koudougou, Giana Perre, Artemio Plana-Fattori, Denis Flick,  
Gerard G. Cuvelier

### ► To cite this version:

Mathilde Koudougou, Giana Perre, Artemio Plana-Fattori, Denis Flick, Gerard G. Cuvelier. Estimation quantitative du comportement rhéologique de systèmes modèles en utilisant un dispositif rhéo-optique. 48. Congrès du groupe français de rhéologie: Modèles et Rhéologie, Groupe Français de Rhéologie (GFR). FRA., Oct 2013, Nantes, France. 5 p. hal-02749615

**HAL Id: hal-02749615**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02749615>**

Submitted on 23 Aug 2023

**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.

# Estimation quantitative du comportement rhéologique de Systèmes modèles en utilisant un dispositif rhéo-optique

M. Koudougou, G. Almeida, A. Plana-Fattori, D. Flick, G. Cuvelier

<sup>1</sup>AgroParisTech, UMR1145 Ingénierie Procédés Aliments, F-75005 Paris, France

<sup>2</sup>INRA, UMR1145 Ingénierie Procédés Aliments, F-91300 Massy, France

<sup>3</sup>CNAM, UMR1145 Ingénierie Procédés Aliments, F-75003 Paris, France

Email : [mathilde.koudougou@agroparistech.fr](mailto:mathilde.koudougou@agroparistech.fr)

**Résumé** : L'objet de cet article est de présenter les bases d'une méthode de quantification du comportement rhéologique de systèmes newtoniens à l'aide d'un nouveau dispositif rhéo-optique. Cette méthode consiste à imposer des sollicitations harmoniques au système newtonien dans un espace semi-infini à l'aide du dispositif rhéo-optique couplé à un microscope confocal à balayage Laser (MCBL). La résultante de ce traitement mécanique non destructif permet de définir la sensibilité du comportement du système. Il permet également de localiser des régions potentiellement loties d'erreurs expérimentales.

**Mots-clés** : hydrodynamique, rhéo-optique, microscopie confocale

[Abridged English version on last page]

## 1. Introduction

L'étude du comportement rhéologique de systèmes liquides multiphasiques peut s'effectuer à plusieurs échelles. A l'échelle microscopique pour obtenir des informations sur la dynamique moléculaire, l'échelle mésoscopique pour les mouvements browniens et l'échelle macroscopique pour la cinétique et les différents phénomènes de transferts [1]. La caractérisation dynamique des systèmes multiphasiques est une donnée importante pour la compréhension des relations entre leurs propriétés rhéologiques et leurs microstructures. Elle permet une meilleure maîtrise des conditions opératoires des paramètres de procédé et de la formulation des produits sur ses propriétés d'usage. Une technique de plus en plus utilisée pour étudier le comportement rhéologique de ces systèmes liquides est la rhéo-optique. Elle se définit comme l'étude du comportement rhéologique par des méthodes optiques [2]. Elle permet de relier la visualisation de la microstructure des systèmes tout en estimant le comportement rhéologique. Elle repose sur le principe d'imposer des déformations à des fluides en les visualisant à l'aide d'un appareil optique. Depuis le système de cisaillement par rotation de Taylor [3] dont le principe repose sur la déformation de gouttes de fluides visqueux placées entre deux plans mis en mouvement et leur visualisation à l'aide de cameras CCD (Couple Charge Device), plusieurs autres dispositifs mécaniques servant à imposer des déformations à des milieux plus ou moins visqueux ont été développées. Ces dispositifs peuvent être classés par rapport à l'outil de visualisation. On peut compter parmi ces dispositifs ceux de Wu et al [4] et Besseling et al [5] utilisant la microscopie confocale. Ces deux dernières techniques reposent sur le cisaillement par translation de deux plateaux munis de mouvements bidirectionnels; ils ont servi de support à la conception du dispositif rhéo-optique [6] qui est utilisé dans le cadre de ce travail. Ce dispositif permet d'imposer des déformations harmoniques à des systèmes fluides dans l'optique d'évaluer leurs comportements rhéologiques. Ce travail présente les bases d'une méthode d'analyse du comportement harmonique à 20°C, d'un système newtonien dans l'optique d'estimer sa viscosité cinématique en prenant en compte les limites du dispositif rhéo-optique [6] et du MCBL.

## 2. Matériel et Méthodes

### 2.1 Matériaux

Dans le présent travail, l'eau distillée est le milieu choisi afin d'extraire les paramètres nécessaires à l'étude numérique.

### 2.2 Microscope Confocal à Balayage Laser (MCLB) couplée à la cellule Rhéo-optique

Une cellule Rhéo-optique [6] couplée à un MCBL TCS AOBSP (Leica, Allemagne) inversé est également utilisé pour réaliser un choix adéquat des variables d'entrées du modèle numérique. Elle a été conçue pour observer la dynamique de structures multiphasiques soumises à des sollicitations thermo-mécaniques. Elle dispose de deux plateaux qui peuvent être mis en mouvement de translation plan/plan à l'aide de trois platines motorisées piézo-électriques. Deux de ces trois platines motorisées supportent le plateau supérieur et permettent le déplacement suivant la direction x et z (de bas en haut et de gauche à droite). La troisième platine permet d'effectuer des déplacements unidirectionnels suivant l'axe x du plateau inférieur.

Les deux plateaux ont une forme rectangulaire avec 48.5mm de largeur et 94mm de longueur. Le plateau inférieur est percé d'un orifice de 144mm<sup>2</sup> qui permet l'observation au MCBL.

La cellule offre également la possibilité d'imposer la température via un plan Peltier relié à un circuit d'eau. Elle propose trois modes de déplacement des plateaux le mode continue, saut relaxation et oscillation.

Le mode continue induit part le mouvement en sens opposé des deux plateaux.

L'amplitude de chaque plateau et le temps de l'essai sont les variables d'entrées du système.

Le mode saut relaxation impose un mouvement brusque des deux plateaux en sens opposé après avoir indiqué l'amplitude et la vitesse des plateaux.

Le mode oscillation permet d'appliquer une déformation harmonique d'un plateau en fixant au préalable la fréquence du signal et le temps de l'essai.

Pour observer la dynamique d'un système soumis à des sollicitations thermo-mécaniques, on dépose la cellule sur la platine du MCBL (figure 1).

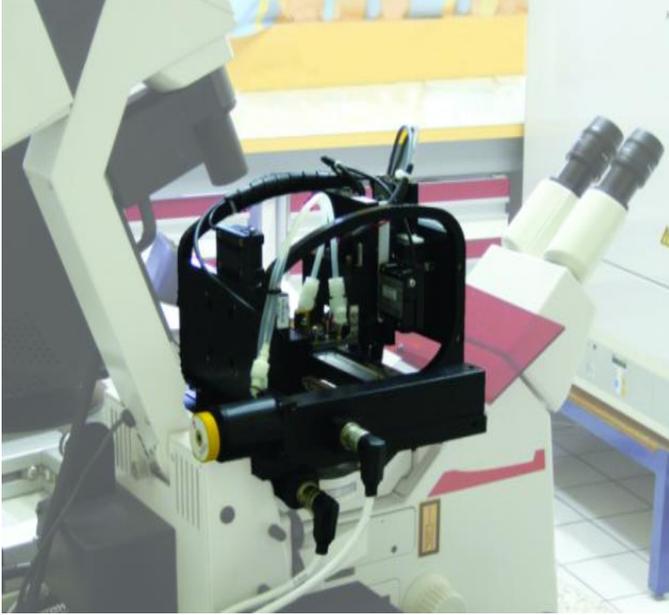


Figure 1: Dispositif rhéo-optique placé sur un Microscope Confocal à Balayage Laser [6]

L'échantillon est placé entre les deux lamelles portées par les plateaux et soumis aux modes de déformations que l'on souhaite lui imposer.

### 2.3 Comportement d'un système newtonien soumis à des sollicitations harmoniques

#### 2.3.1 Approche théorique

Le système semi-infini étudié est l'écoulement d'un fluide visqueux placé entre deux plaques parallèles en régime laminaire et harmonique. Le fluide est soumis à des déformations harmoniques au travers de mouvements périodiques induits par l'un des deux plateaux comme illustré sur la figure 2. L'équation du mouvement du fluide est décrite par l'équation de Navier Stokes en régime laminaire et résolue en considérant le fluide incompressible [7].

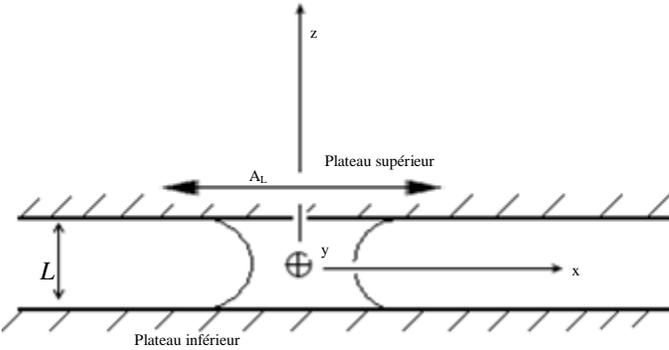


Figure 2: Schéma du phénomène mécanique étudié,  $A_L$  étant l'amplitude d'oscillation du plateau supérieur,  $x$ ,  $y$  et  $z$  sont les axes du repère cartésien.  $L$  est la distance entre les deux plateaux

Ce système fluide peut être aussi étudié grâce à sa capacité à réagir à des sollicitations harmoniques. Par exemple, la diffusion de chaleur dans un solide constitue un problème classique dont les solutions analytiques sont connues. La solution du système mécanique est donnée par [8]:

$$A = A_L \sin(\omega t + \varepsilon + \phi) + 2\pi \nu \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n(-1)^n (\nu n^2 \pi^2 \sin(\varepsilon) - \omega L^2 \cos(\varepsilon)) \sin\left(\frac{n\pi X}{L}\right) e^{-\nu n^2 \pi^2 t / L^2}}{\nu^2 n^4 \pi^4 + \omega^2 L^4} \quad (1)$$

$A_L$  : amplitude du déplacement du plateau (m)

$\omega$  : pulsation (rad/s)

$\phi$  : déphasage (rad)

$\nu$  : viscosité cinématique ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

$X$  : position de mesure de l'amplitude (m) comprise entre 0 et  $L$

$L$  : distance entre les deux plateaux (m)

$n$  : indice

$\varepsilon$  : déphasage à l'instant initial

Dans notre étude on suppose que le deuxième terme de l'expression est nul parce que la série converge rapidement et que l'on se place dans un régime périodique [8].

Le rapport entre l'amplitude  $A$  à une position  $X$  et l'amplitude  $A/A_L$  du plateau oscillant est donné par la relation suivante :

$$\frac{A}{A_L} = \left( \frac{\cosh(2kX) - \cos(2kX)}{\cosh(2kL) - \cos(2kL)} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{avec } k = \left( \frac{\omega}{2\nu} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$1/k$  : profondeur de pénétration de la vitesse dans le milieu (m)

$\omega$  : pulsation (rad/s)

$\nu$  : viscosité cinématique du milieu ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

L'inverse de  $k$  correspond à la profondeur de pénétration de la vitesse dans le milieu. Elle est donnée par la relation 3 et permet de remonter à la viscosité cinématique du milieu.

Dans le cas où le plateau inférieur est mobile et le plateau supérieur, fixe, on remplace dans l'expression 2,  $X$  par  $X-L$ . De ce fait,  $A$  sera donnée par la relation suivante :

$$\frac{A}{A_L} = \left( \frac{\cosh(2k(X-L)) - \cos(2k(X-L))}{\cosh(2kL) - \cos(2kL)} \right)^{1/2} \quad (4)$$

#### 2.3.2 Approche numérique

La mise en place de notre approche implique le calcul des équations (relations 2, 3, 4) du système mécanique précédemment décrit. Ce calcul est effectué à l'aide du logiciel Matlab.

Les paramètres moteurs du système étudié sont la viscosité cinématique du milieu  $\nu$ , la distance entre les deux plateaux  $L$ , la fréquence  $f$ , l'amplitude  $A_L$  associé au mouvement harmonique du plateau.

Pour appliquer ces équations dans la perspective d'analyser les résultats expérimentaux du système, il est nécessaire de prendre en compte les limites du dispositif rhéo-optique et du MCBL.

Par exemple pour l'eau, le calcul s'effectuera en choisissant une distance  $L$  de 1mm et une fréquence maximale de 8Hz.

## 3. Résultats et discussions

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les limites de la faisabilité expérimentale. En effet pour un système aqueux (eau distillée) de viscosité cinématique égale à  $10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ , dans les conditions opératoires de déplacement du plateau supérieur (0.01Hz à 10Hz), on observe les profils de  $A/A_L$  sur la figure 3. Cette figure présente un profil linéaire pour des fréquences entre 0.01Hz et 1Hz qui correspond physiquement à une diffusion rapide des mouvements harmoniques imposées au milieu par le plateau inférieur. Cette région, du fait de la rapidité de la diffusion de la quantité de mouvement ne permet pas d'estimer la profondeur de diffusion  $k$ . A partir de 1Hz, le système évolue vers un profil transitoire qui se manifeste par la non linéarité des courbes de  $A/A_L$ . La distance entre les deux plateaux  $L$  a également une influence majeure sur l'allure des profils de  $A/A_L$ . La comparaison entre les figures 3 et 4 correspondant aux valeurs respectives de  $L$  égales à 1mm et 0.5mm démontre que des petites valeurs de  $L$  exigent des fréquences plus importantes pour atteindre le régime transitoire.

Dans les mêmes conditions expérimentales de fréquence et de distance entre les deux plateaux  $L$ , on peut définir un indice de sensibilité  $i_s$  du milieu à la fréquence (relation 5). Cet indice vaut 0,44 pour l'eau de viscosité cinématique égale à  $10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$  (figure 3) contre 0,13 pour un système newtonien sept fois plus visqueux que l'eau (figure 5).

$$i_s = \left( \frac{A}{A_L} \right) \Bigg|_{f \rightarrow 0}^{x/L=0.5} - \left( \frac{A}{A_L} \right) \Bigg|_{f=10Hz}^{x/L=0.5} \quad (5)$$

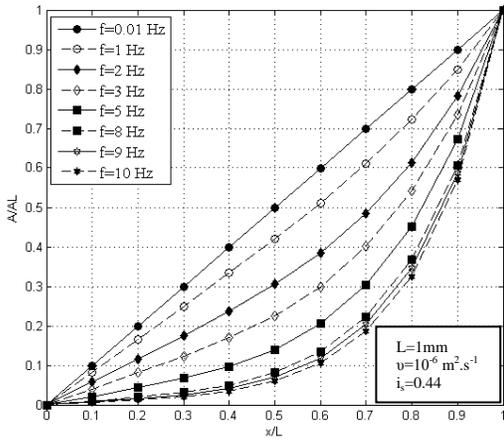


Figure 3: Profils  $A/A_L$  pour l'eau ayant une viscosité cinématique égale à  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour une distance entre les plateaux de 1mm à 0.01Hz, 1Hz, 2Hz, 3Hz, 5Hz, 8Hz, 9Hz et 10Hz.  $A/A_L$  est le rapport de l'amplitude à la position  $x$  dans le milieu sur l'amplitude sollicitée au plateau supérieur.  $x/L$  est le rapport entre la position  $x$  dans le milieu sur la distance entre les deux plateaux. La droite correspondant à la fréquence de 0.01Hz représente le domaine linéaire (sollcitation instantanément transmise à tout le milieu); l'augmentation de la fréquence d'oscillation permet d'observer le régime transitoire, visualisé sous la forme d'une famille de courbes associées à des fréquences comprises entre 1Hz et 10Hz.

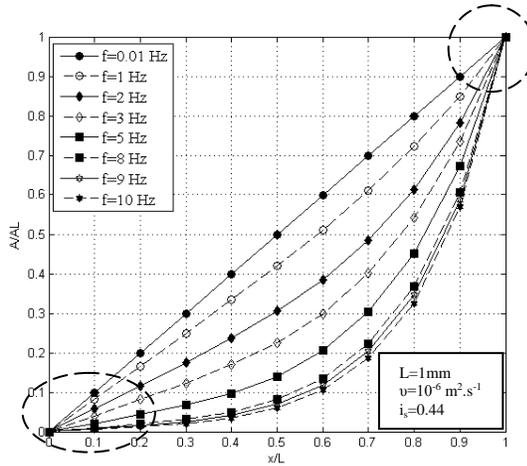


Figure 6: Profils  $A/A_L$  pour l'eau ayant une viscosité cinématique égale à  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour une distance entre les plateaux de 1mm à 0.01Hz, 1Hz, 2Hz, 3Hz, 5Hz, 8Hz, 9Hz et 10Hz.  $A/A_L$  est le rapport de l'amplitude à la position  $x$  dans le milieu sur l'amplitude sollicitée au plateau supérieur.  $x/L$  est le rapport entre la position  $x$  dans le milieu sur la distance entre les deux plateaux. Les points de coordonnées (0,0) et (1,1) correspondent respectivement aux positions du plateau inférieur et supérieur. Les cercles représentent les zones proches des plateaux surjetant à des erreurs expérimentales

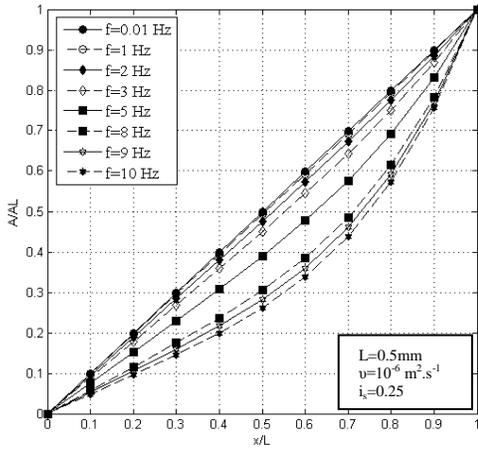


Figure 4: Profils  $A/A_L$  pour l'eau ayant une viscosité cinématique égale à  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour une distance entre les plateaux de 0.5mm à 0.01Hz, 1Hz, 2Hz, 3Hz, 5Hz, 8Hz, 9Hz et 10Hz.  $A/A_L$  est le rapport de l'amplitude à la position  $x$  dans le milieu sur l'amplitude sollicitée au plateau supérieur.  $x/L$  est le rapport entre la position  $x$  dans le milieu sur la distance entre les deux plateaux. La droite correspondant à la fréquence de 0.01Hz représente le domaine linéaire (sollcitation instantanément transmise à tout le milieu); l'augmentation de la fréquence d'oscillation permet d'observer le régime transitoire, visualisé sous la forme d'une famille de courbes associées à des fréquences comprises entre 3Hz et 10Hz.

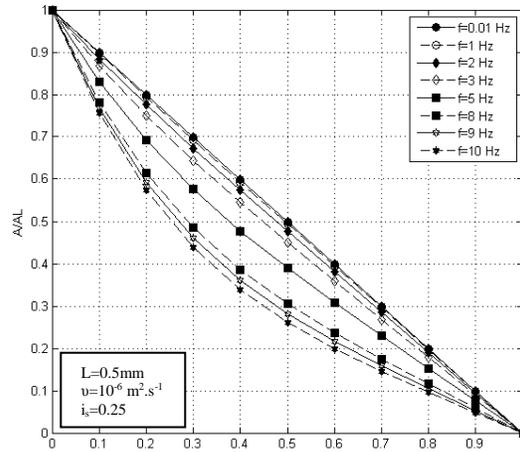


Figure 7: Profils  $A/A_L$  pour l'eau ayant une viscosité cinématique égale à  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour une distance entre les plateaux de 0.5mm à 0.01Hz, 1Hz, 2Hz, 3Hz, 5Hz, 8Hz, 9Hz et 10Hz.  $A/A_L$  est le rapport de l'amplitude à la position  $x$  dans le milieu sur l'amplitude sollicitée au plateau inférieur.  $x/L$  est le rapport entre la position  $x$  dans le milieu sur la distance entre les deux plateaux. Les points de coordonnées (0,0) et (1,1) correspondent respectivement aux positions du plateau inférieur et supérieur.

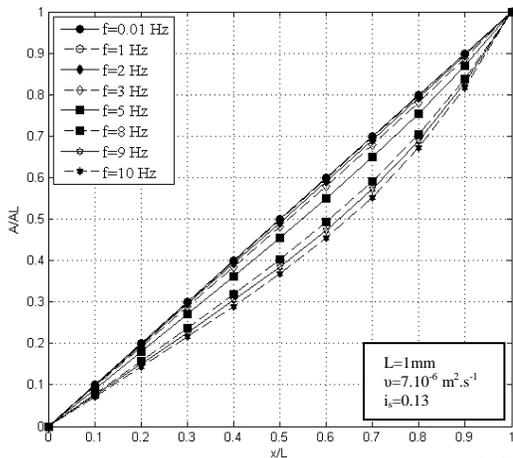


Figure 5: Profils  $A/A_L$  pour l'eau ayant une viscosité cinématique égale à  $7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour une distance entre les plateaux de 1mm à 0.01Hz, 1Hz, 2Hz, 3Hz, 5Hz, 8Hz, 9Hz et 10Hz.  $A/A_L$  est le rapport de l'amplitude à la position  $x$  dans le milieu sur l'amplitude sollicitée au plateau supérieur.  $x/L$  est le rapport entre la position  $x$  dans le milieu sur la distance entre les deux plateaux. La droite correspondant à la fréquence de 0.01Hz représente le domaine linéaire (sollcitation instantanément transmise à tout le milieu); l'augmentation de la fréquence d'oscillation permet d'observer le régime transitoire, visualisé sous la forme d'une famille de courbes associées à des fréquences comprises entre 3Hz et 10Hz.

Notons par ailleurs que ce modèle numérique permet de localiser deux régions proches de chaque lamelle (figure 6 et 7). Ces régions sont des zones potentielles d'erreurs expérimentales parmi lesquels on peut compter le glissement du système étudié sur la lamelle mobile pouvant entraîner une mauvaise estimation de l'amplitude  $A$ . L'inaccessibilité aux faibles déplacements du système sur le plateau fixe biaise également les mesures d'amplitude à cet endroit. La difficulté à situer la transition entre lamelle et échantillon peut être la cause d'erreurs de mesures de  $X$  proche des lamelles.

La méthode de calcul définie en déplaçant le plateau supérieur est applicable lorsque l'on déplace le plateau inférieur. On observe sur la figure 7, des profils de  $A/A_L$  similaires à ceux obtenus en déplaçant le plateau supérieur (figure 4).

Concrètement, l'expérience permet d'accéder aux profils de  $A/A_L$ . Les équations des profils  $A/A_L$  obtenus par le calcul des équations peuvent être intégrés aux résultats expérimentaux afin d'en déduire la valeur de la viscosité cinématique du système étudié à l'aide d'un solveur.

#### 4. Conclusion

Les équations utilisées dans cette étude permettent de définir avec précision la gamme des systèmes fluides newtoniens dont le comportement rhéologique peut être quantifié à l'aide du dispositif rhéo-optique et du MCBL. Cette gamme de systèmes se situe sur des viscosités cinématiques comprises entre  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Il est également important de prendre en compte les propriétés optiques afin de ne pas fausser la détermination expérimentale des amplitudes  $A$  associées aux positions  $X$  de mesure. Le calcul des équations a permis de déceler des zones potentiellement inexploitablement expérimentalement car sujettes à de nombreux aléas physiques tels que des effets de bords.

En règle générale, les limites de méthodologie peuvent être repoussées en utilisant un dispositif rhéo-optique et un MCBL offrant un meilleur choix de fréquences (fréquence d'oscillation mécaniques et fréquence de balayage). Cela élargirait naturellement la gamme de systèmes fluides à étudier.

## 5. Références

[1] Ashim K. Datta, -2008- Status of Physics-Based Models in the Design of Food Products, Processes, and Equipment. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 9 (2): 121-129.

[2] Erik van der Linden, Leonard Sagis, Paul Venema, -2003 - Rheo-optics and food systems, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Volume 8 ,349-358.

[3] Taylor G -1934-The formation of Emulsions in Definable fields of Flow. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* (1905-1934), 501-523.

[4] Wu, Y. L., Brand, J. H. J., van Gemert, J. L. A., Verkerk, J., Wisman, H., van Blaaderen, A., Imhof, A. -2007 - A new parallel plate shear cell for in situ real-

space measurements of complex fluids under shear flow. *Review of Scientific Instruments*, 78 (10):103902.

[5] Besseling Rut Isa Lucio Weeks, Eric R Poon, Wilson C K -2009-Quantitative imaging of colloidal flows, *Advances in colloid and interface science*, 146 (1-2):1-17.

[6] Boitte, J.-B. - 2012 - ."Contribution à l'Etude de Systèmes Divisés Alimentaires par Observation de Microstructures au cours de Traitements Thermo-Mécaniques". *Thèse de Doctorat*, ParisTech, 139pp.

[7] Guyon, E., Hulin, J.-P., Petit, L. -2001-. "Hydrodynamique Physique", *CNRS Editions* ,672p, 204-209.

[8] Carslaw, H.S., Jaeger, J.-C. -1967-. "Conductions of Heat in Solids" *Oxford Science Publications*, New York, 510p, 99-105.

## Quantitative estimate of the rheological behavior of Model systems using a rheo-optical device

Rheo-optic devices are used to observe rheological behavior of fluids. This article presents a numerical method for rheological quantification with a novel rheo-optic device coupled with a Confocal Scanning Laser Microscopy. In this method, harmonic deformations are imposed to a sample of Newtonian fluid. We remark the sensibility of the fluid behavior with some parameters.