

Ondes et motifs tridimensionnels dans un film liquide tombant

Nicolas Kofman^a, Sophie Mergui^a, Christian Ruyer-Quil^a

a. Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques - Bâtiment 502, Rue du Belvédère - Campus Universitaire d'Orsay - 91405 Orsay Cedex, FRANCE

Mots clés : film liquide ; ondes solitaires ; modes tridimensionnels

Nous considérons l'écoulement d'un film liquide sur un plan incliné à nombre de Reynolds modéré. En appliquant un forçage temporel en entrée, on observe des ondes solitaires bidimensionnelles lorsque la fréquence est basse. À plus haute fréquence, les ondes sont quasi-sinusoidales ; ces ondes plus lentes sont instables et évoluent en aval vers un régime d'ondes solitaires ([3],[7]). Nous étudions à la fois numériquement et expérimentalement l'évolution tridimensionnelle de ces ondes solitaires et les motifs qui en résultent. Cette question est importante d'un point de vue académique afin de mieux comprendre les étapes qui mènent à la turbulence au sein de ce système, mais également d'un point de vue industriel pour les procédés impliquant des transferts de chaleur et de masse. Le coefficient de transfert de masse, par exemple, augmente moins vite avec le nombre de Reynolds dans le régime 3D vis-à-vis du régime 2D [5], l'apparition d'écoulements de recirculation jouant probablement un rôle important.

Nous partons de modèles d'équations à petit nombre de degrés de liberté [2] et calculons les solutions 2D stationnaires par continuation. Cette étape peut s'avérer délicate du point de vue de la comparaison avec l'expérience car de nombreuses branches de solutions se côtoient. Lorsqu'il existe plusieurs solutions stationnaires des équations l'onde sélectionnée est généralement la plus rapide, mais dans certains cas un comportement oscillatoire en temps est observé [6]. Nous réalisons ensuite l'étude de stabilité linéaire 3D grâce à un code pseudo-spectral Fortran qui a déjà été utilisé pour étudier la stabilité des ondes lentes [7]. Nous analysons les résultats en faisant un bilan énergétique afin d'identifier quels sont les termes stabilisants ou destabilisants [8]. Deux modes d'instabilité distincts sont mis en évidence : un mode essentiellement capillaire, qui peut être oscillant selon les cas et se développe dans la région des ondes capillaires, et un mode inertiel, qui déforme plus lentement l'onde entière et disparaît lorsque l'angle d'inclinaison est inférieur à 11° . Ce dernier conduit à la formation de solitons 3D en forme de Λ par des effets non linéaires [1]. Les mécanismes physiques à l'origine de ces deux modes sont l'instabilité capillaire de Rayleigh-Plateau et l'instabilité de Rayleigh-Taylor des surfaces accélérées. La situation est, en fin de compte, assez générique des problèmes de bourrelets liquides en mouvement tels que rencontrés lors du splash de gouttes par exemple.

Nous comparons ces prédictions théoriques à des résultats expérimentaux. L'expérience consiste en un film d'eau qui s'écoule sur une plaque de verre inclinée de 150 cm de longueur par 40 cm de largeur. L'angle d'inclinaison peut être augmenté jusqu'à $\beta = 20^\circ$. Le forçage en entrée est réalisé grâce à une plaque qui oscille au-dessus de la surface libre du liquide (la plage de fréquences f s'étend de 2 à 20 Hz). Le nombre de Reynolds peut varier jusqu'à $R = 100$ environ. Une méthode Schlieren [4] a été adaptée afin de mesurer l'épaisseur du film. Cette méthode, basée sur l'observation d'un motif aléatoire de points à travers l'interface, permet d'obtenir des cartes d'épaisseur sur des domaines assez larges ($20 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$) avec une bonne résolution temporelle ($> 100 \text{ Hz}$) et spatiale (0.5 mm), et une précision d'environ $20 \mu\text{m}$. La visualisation des motifs peut s'effectuer aussi par ombroscopie (Figure 1). Nous cartographions les structures 3D observées dans le plan $\beta - f$ et comparons les longueurs d'onde et déformations induites par les deux modes d'instabilité avec les résultats numériques. L'influence de la fréquence de forçage et des propriétés physiques du liquide est également discutée.

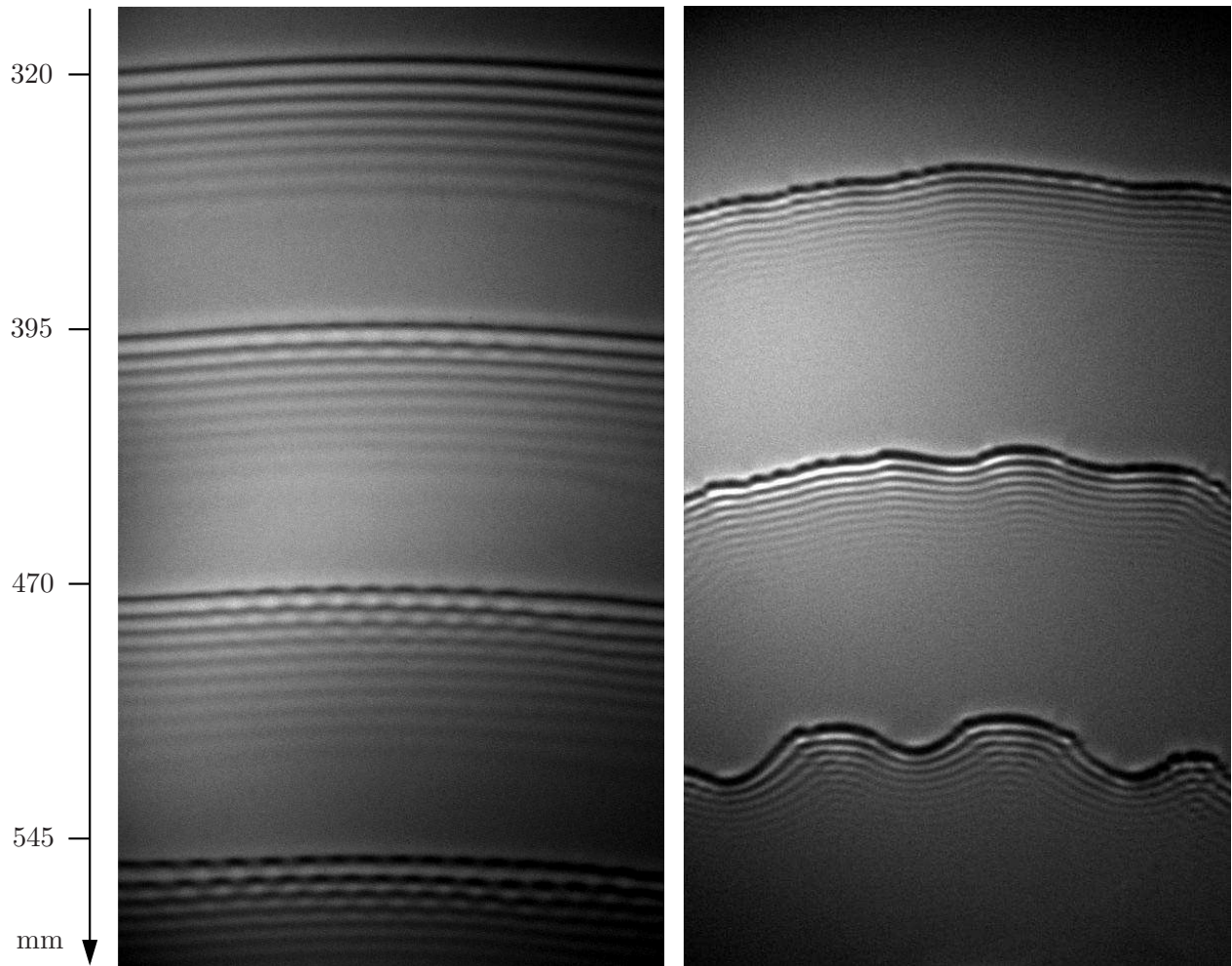


FIGURE 1 – Images par ombroscopie d’ondes solitaires subissant un mode d’instabilité transverse de courte longueur d’onde (gauche : $\beta = 8.3^\circ$, $R = 60$, $f = 3.5$ Hz) ou de grande longueur d’onde (droite : $\beta = 17.9^\circ$, $R = 50$, $f = 4.2$ Hz). Les distances sont données par rapport à l’entrée.

Références

- [1] Three-dimensional localized coherent structures of surface turbulence. II. Λ solitons
E.A. Demekhin, E.N. Kalaidin, S. Kalliadasis, S.Y. Vlaskin, *Phys. Fluids* **19**, 114104 (2007)
- [2] Falling liquid films
S. Kalliadasis, C. Ruyer-Quil, B. Scheid, M.G. Velarde, Springer
- [3] Three-dimensional instabilities of film flows
J. Liu, J.B. Schneider, J.P. Gollub, *Phys. Fluids* **7** (1), 55-67 (1995)
- [4] A Synthetic Schlieren method for the measurement of the topography of a liquid interface
F. Moisy, M. Rabaud, K. Salsac, *Exp. in Fluids* **46** (6), 1021-1036 (2009)
- [5] Three-dimensional wave dynamics on a falling film and associated mass transfer
C.D. Park, T. Nosoko, *AIChE Journal* **49** (11), 2715-2727 (1995)
- [6] A full-scale numerical study of interfacial instabilities in thin-film flows
B. Ramaswamy, S. Chippada, S.W. Joo, *J. Fluid Mech.* **325**, 163-194 (1996)

- [7] Wave patterns in film flows : Modelling and three-dimensional waves
B. Scheid, C. Ruyer-Quil, P. Manneville, J. Fluid Mech. **562**, 183-222 (2006)
- [8] On the instability of a falling film due to localized heating
J. Skotheim, U. Thiele, B. Scheid, J. Fluid Mech. **475**, 1-19 (2003)