

Visualisation expérimentale de l'engorgement d'un film liquide cisailé par un contre-écoulement d'air

N. KOFMAN^a, S. MERGUI^b, C. RUYER-QUIL^c

a. EPFL-LFMI, Bât ME A2, Station 9, 1015 Lausanne, Suisse - nicolas.kofman@epfl.ch

b. Univ Paris-Sud, CNRS, Lab FAST, Bât 502, 91405 Orsay, France - mergui@fast.u-psud.fr

c. Univ Savoie Mont Blanc, CNRS, Lab LOCIE, 73000 Chambéry, France - christian.ruyer-quil@univ-smb.fr

Résumé

Nous étudions expérimentalement l'influence d'un contre-écoulement d'air sur la dynamique des ondes à la surface d'un film liquide tombant sur un plan incliné. Le cisaillement aérodynamique modifie à la fois la vitesse, l'amplitude et le caractère 2D/3D des ondes. Le point d'engorgement du système correspond à l'apparition de vagues qui remontent l'écoulement.

Abstract

We study experimentally the influence of a counter-current air flow on the wave dynamics at the interface of a liquid film falling down an inclined plane. The wind shear modifies both the speed, the amplitude and the 2D/3D character of the waves. The flooding point of the system corresponds to the emergence of waves going upstream.

Mots clés : film liquide, contre-écoulement d'air, instabilités, ondes, engorgement

1 Introduction

Les films liquides tombants en présence d'un écoulement de gaz co-courant ou contre-courant se rencontrent dans de nombreux dispositifs industriels : colonnes de distillation, tours de refroidissement des centrales nucléaires, évaporateurs à films tombants pour l'agroalimentaire Les ondes solitaires à l'interface gaz/liquide favorisent en effet les transferts de chaleur et de masse entre les deux phases [1]. Le point optimal de fonctionnement des procédés industriels se situe proche de la limite d'engorgement caractérisée par un envahissement de l'espace disponible par la phase liquide, une augmentation brusque des pertes de charge et une chute des rendements. Afin de prédire et contrôler l'apparition de ce phénomène, il est essentiel d'identifier les mécanismes physiques qui entrent en jeu. Quelques études numériques récentes existent dans la littérature ([2, 3], parmi d'autres) mais très peu d'études expérimentales. Ces dernières ont bien du mal en effet à séparer l'engorgement en entrée/sortie de gaz/liquide des phénomènes se produisant « à coeur » [4]. L'objectif est ici d'étudier l'engorgement à coeur en contrôlant l'entrée en contact des deux phases.

2 Dispositif expérimental

Le montage a pour but d'étudier l'écoulement d'un film mince d'eau d'épaisseur $h < 1.5$ mm en présence d'un contre-courant d'air dans un canal incliné (figure 1). L'angle d'inclinaison du montage par rapport à l'horizontale est noté β et varie entre 3° et 20° . Le nombre de Reynolds du liquide peut être augmenté jusqu'à $R_L = 200$ environ. Un forçage temporel des ondes en entrée du liquide est réalisé grâce à deux haut-parleurs reliés 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 canal pour le contre-écoulement d'air se compose de trois portions : un convergent (à droite sur le schéma de la figure 1), une zone d'étude d'entrefer $e = 18$ mm, et un divergent. Le ventilateur, situé en amont du divergent, aspire l'air dans le canal. Le rôle du convergent est d'accélérer l'écoulement de gaz dans la zone d'étude tout en assurant une mise en contact des deux phases la plus douce possible. Le divergent et sa boîte d'isolation, quant à eux, permettent d'évacuer l'air tout en évitant les aspirations directes depuis l'extérieur. La vitesse de l'air, mesurée à mi-hauteur du canal avec un anémomètre à fil chaud, varie entre 0 et 14 m/s. Le nombre de Reynolds du gaz maximum correspondant est $R_G = 14000$, l'écoulement étant clairement turbulent pour $R_G > 1400$.

L'épaisseur du film liquide est mesurée d'une part en un point grâce à une technique commerciale CCI (Confocal Chromatic Imaging) et d'autre part en utilisant une méthode Schlieren [5] que nous avons adaptée. Cette dernière, 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 ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) avec une bonne résolution temporelle ($> 100 \text{ Hz}$) et spatiale (0.5 mm), et une précision d'environ $5 \mu\text{m}$. La visualisation des ondes peut aussi s'effectuer par ombroscopie en éclairant la surface du film de manière oblique à l'aide d'une source de lumière blanche (figure 2).

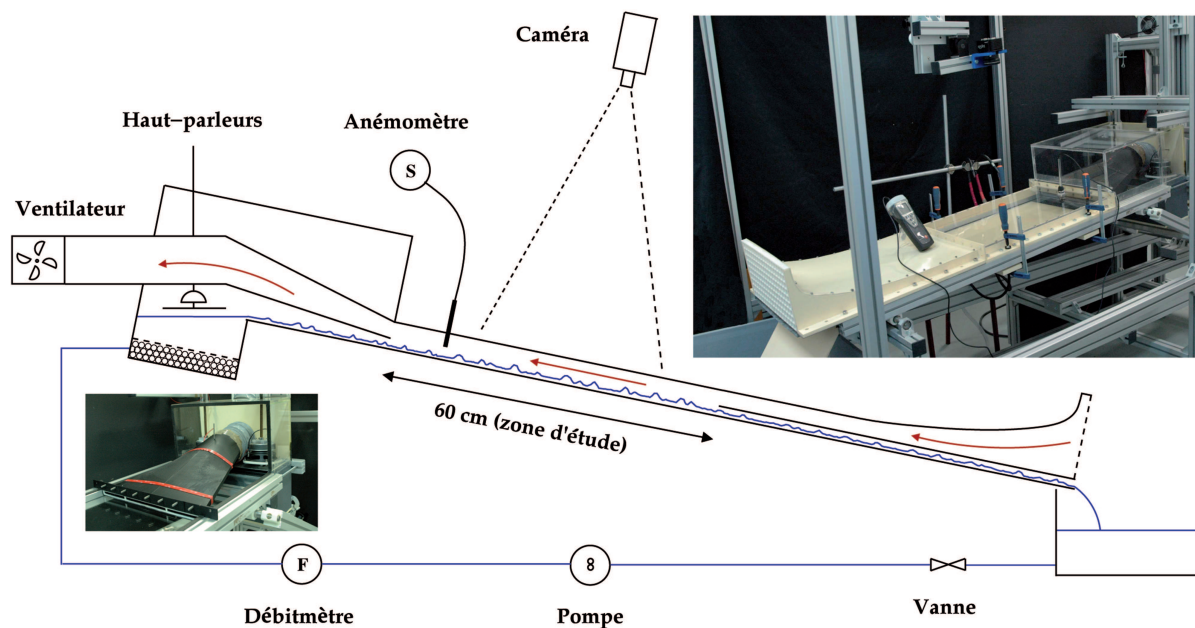


Figure 1: Schéma et photos du dispositif expérimental de film liquide cisailé par un contre-écoulement d'air

3 Résultats

Nous avons étudié dans un premier temps l'influence d'un contre-écoulement d'air modéré ($U_G < 7 \text{ m/s}$) sur les ondes solitaires (composées d'une crête principale et d'une série d'ondes capillaires). Pour $\beta \sim 5^\circ$ et $R_L < 50$, la dynamique du film reste 2D. L'épaisseur moyenne du film et l'amplitude des ondes augmentent, leur vitesse de phase diminue. La crête principale est amplifiée et devient plus symétrique tandis que les ondes capillaires sont fortement atténuées. Ces comportements sont bien en accord avec les travaux numériques existants et dépendent principalement d'un nombre adimensionnel de Froude gaz-liquide.

Nous nous sommes penchés ensuite sur l'influence du contre-écoulement d'air sur les instabilités secondaires 3D des ondes solitaires. Dans le cas non-cisailé, celles-ci sont de deux types [6] : un mode capillaire courte longueur d'onde, qui se développe uniquement dans la région capillaire des ondes, et un mode inertiel grande longueur d'onde qui déforme plus lentement l'onde entière. Le contre-écoulement d'air stabilise fortement le mode courte

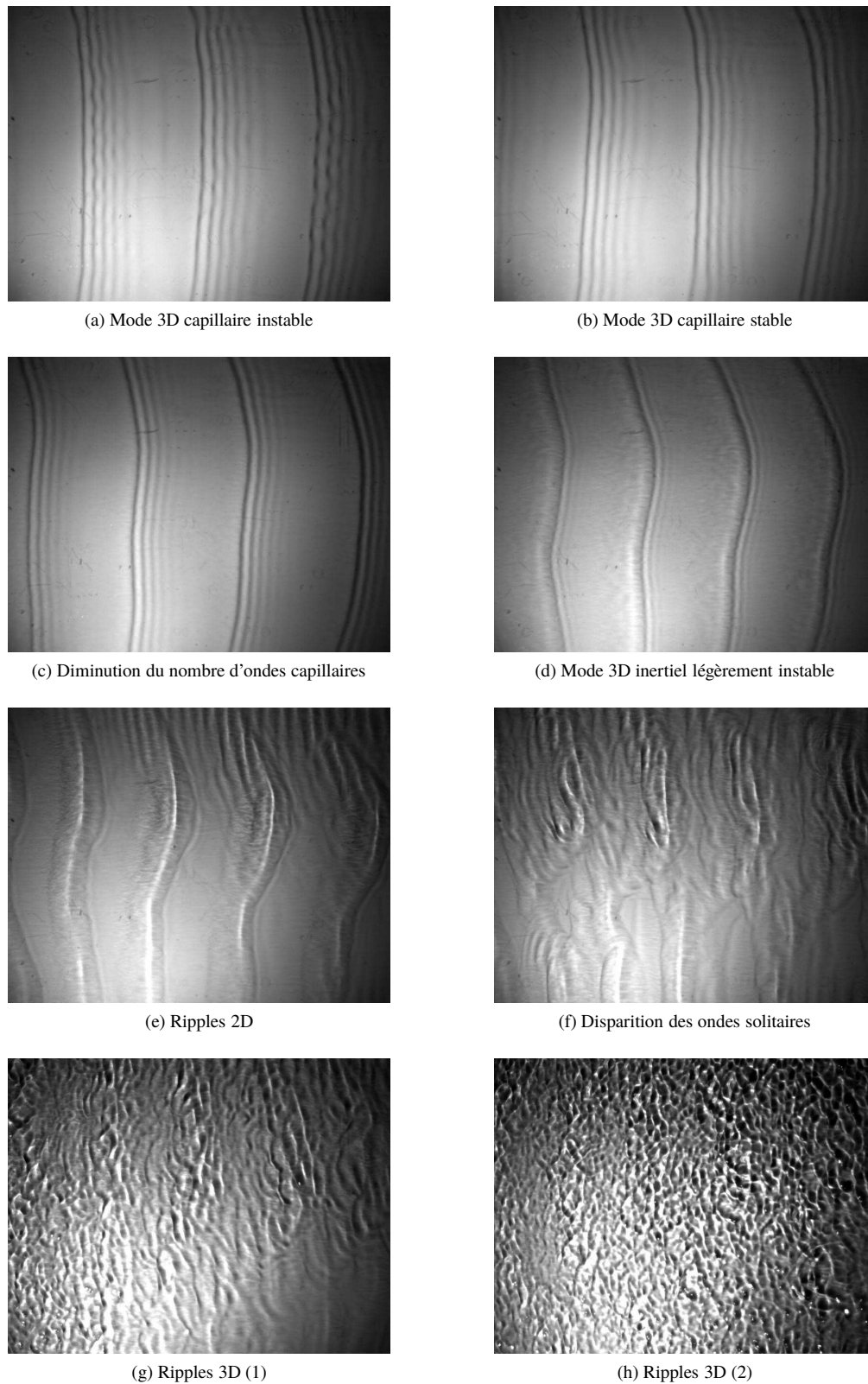


Figure 2: Visualisations par ombroscopie pour des vitesses de contre-écoulement d'air croissantes : U_G varie entre 0 m/s (a) et 10 m/s (h). Les paramètres expérimentaux sont : $\beta = 5^\circ$, $R_L = 54$, $f = 2.8$ Hz. Le liquide s'écoule de la gauche vers la droite (le gaz en sens inverse). La taille réelle des images est : 29 cm \times 22 cm.

longueur d'onde en raison de l'atténuation des ondes capillaires (figure 2). Le mode inertiel, en revanche, est amplifié et entraîne systématiquement l'évolution 3D rapide des ondes pour $\beta > 5^\circ$.

Dans nos expériences, l'engorgement n'est provoqué ni par les effets de bord (bien contrôlés), ni par l'atomisation du film liquide (tension de surface de l'eau élevée), ni par une onde touchant la paroi supérieure du canal (système peu confiné). L'arrêt puis rebroussement des ondes solitaires est court-circuité par l'apparition de vagues à contre-courant (« ripples ») qui résultent d'une instabilité à l'interface gaz-liquide (probablement de type *Yih* liée au contraste de viscosité entre les deux couches). Pour des valeurs plus élevées de R_L , nous avons mis en évidence une deuxième famille de vagues à contre-courant, les « slugs », qui semblent résulter d'un couplage entre les ondes solitaires et les « ripples » précédemment évoqués.

References

- [1] Enhancement of mass transfer into a falling laminar liquid film by two-dimensional surface waves - Some experimental observations and modelling
P.N. Yoshimura, T. Nosoko, T. Nagata, Chem. Eng. Science **51(8)**, 1231-1240 (1996)
- [2] Counter-current gas-liquid film flow between the vertical plates analyzed using the Navier-Stokes equations
Y.Y. Trifonov, AIChE J. **56(8)**, 1975-1987 (2010)
- [3] Wavy liquid films in interaction with a confined laminar gas flow
G. Dietze, C. Ruyer-Quil, J. Fluid Mech. **722**, 348-393 (2013)
- [4] Countercurrent gas-liquid flow in inclined and vertical ducts
A. Zapke, D.G. Kröger, Int. J. Mult. Flow **26(9)**, 1439-1455 (2000)
- [5] 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)
- [6] Three-dimensional instabilities of quasi-solitary waves in a falling liquid film
N. Kofman, S. Mergui, C. Ruyer-Quil, J. Fluid Mech. **757**, 854-887 (2014)