



HAL
open science

Etude expérimentale de la dynamique des écoulements en film mince sur plaque plane et corruguée

Mohamad Al Sayegh, David Rouzineau, Michel Meyer, Emmanuel Cid, Pascal
Alix, Christine Dalmazzone

► **To cite this version:**

Mohamad Al Sayegh, David Rouzineau, Michel Meyer, Emmanuel Cid, Pascal Alix, et al.. Etude expérimentale de la dynamique des écoulements en film mince sur plaque plane et corruguée. CFTL 2022 - 17ème Congrès Francophone de Techniques Laser, M-R. Vetrano, Sep 2022, Leuven (KULeuven), Belgique. pp.268. hal-04725594

HAL Id: hal-04725594

<https://hal.science/hal-04725594v1>

Submitted on 8 Oct 2024

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.

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA DYNAMIQUE DES ECOULEMENTS EN FILM MINCE SUR PLAQUE PLANE ET CORRUGUEE

Mohamad Al Sayegh^{a,b,*}, David Rouzineau^a, Michel Meyer^a, Emmanuel Cid^a, Pascal Alix^b,
Christine Dalmazzone^b.

(a) Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

(b) IFP Energies Nouvelles - Lyon, Solaize, France

*Correspondant : mohamad.alsayegh@toulouse-imp.fr

Résumé : Dans cet article, une technique optique basée sur l'intensité de fluorescence a été appliquée et calibrée pour effectuer des mesures d'épaisseur de film ruisselant et de vitesse à l'interface gaz-liquide sur une grande fenêtre de mesure (300×220 mm). Deux fluides (mélange eau-éthanol) à faible tension de surface (35 et 50 mN/m) et trois fluides (mélange eau-glycérol) à viscosité élevée ($\mu = 5, 10$ et 15 mPa.s) ont été utilisés à $13 < Re < 290$ et un angle d'inclinaison θ de 10 et 20° pour une plaque plane et 60° pour une plaque ondulée. Nous étudions l'effet des propriétés physico-chimiques sur l'écoulement de film liquide. Nous montrons que l'amplitude des ondes principales augmente en présence du gaz à contre-courant ayant une faible vitesse alors que la vitesse des ondes commence à diminuer de manière significative à une vitesse du gaz supérieure à 3 m/s. L'effet de l'ondulation de la plaque solide à un angle d'inclinaison élevé ($\theta = 60^\circ$) montre l'apparition du phénomène de vagues déferlantes, en particulier pour les fluides à faible tension de surface.

1 Introduction

Au cours du dernier siècle, les écoulements de film mince ont attiré l'attention de nombreux chercheurs puisque ce type d'écoulement est largement utilisé dans les procédés industriels (par exemple dans les évaporateurs et différents types de contacteurs gaz-liquide). Ils sont largement utilisés en raison de leurs avantages, notamment en termes d'efficacité de transfert de chaleur et de matière [5]. Au début du 20ème siècle, Nusselt a été le premier à étudier l'écoulement d'un film liquide laminaire sur un plan incliné et a proposé une solution analytique de l'épaisseur du film en fonction du nombre de Reynolds, de l'angle de l'inclinaison et de la viscosité cinématique [12]. Le film liquide était supposé être un film mince avec une interface lisse, des propriétés physico-chimiques constantes et aucun transfert de chaleur dans la direction de l'écoulement.

Les études de l'écoulement dynamique en film mince présentant des formations d'ondes et plus particulièrement des ondes solitaires ont été initiées par le travail de [10] qui a caractérisé un écoulement en film mince sur la paroi d'un tube vertical de diamètre 2.5 cm. Le rapport important entre le rayon du tube et l'épaisseur du film permet de négliger les effets de courbure et d'assimiler le tube à une paroi plane verticale. Les profils des ondes et leur vitesse de phase ont pu être observés. Après les travaux de [10], un grand nombre d'expériences ont été menées pour comprendre l'instabilité des films tombants. La plupart des études ont porté sur l'hydrodynamique (structure de l'écoulement, épaisseur et vitesse du film) des écoulements en film mince sur une plaque plane [1], [5], [11], [14]. Dans la majorité de ces études, des méthodes de mesure ponctuelle ont permis

d'obtenir l'épaisseur du film sur un point de l'écoulement et uniquement sur des plaques planes. De même, peu d'attention a été accordée à la caractérisation de l'hydrodynamique d'un film s'écoulant à l'intérieur des colonnes à garnissage structuré puisque les tôles de garnissage présentent une surface complexe. Ces géométries ondulées peuvent affecter de manière significative l'hydrodynamique du film liquide comme cela a été montré dans le travail de [3]. La difficulté réside dans l'application des techniques de mesure permettant de mesurer les paramètres hydrodynamiques et de transfert de matière sur différentes géométries de surface. Il existe de nombreuses publications traitant la dynamique des écoulements en film mince liquide sur des surfaces complexes [3], [4], [13] montrant une hétérogénéité notable de l'hydrodynamique due à la géométrie de la plaque. Toutes ces études se sont concentrées sur l'impact des géométries des plaques mais n'incluent pas l'effet des propriétés physico-chimiques de la solution liquide à l'exception du travail de [4]. Il a étudié la variation de la structure locale de l'écoulement à l'intérieur d'un garnissage structuré en fonction du changement de viscosité pour différents fluides et, par conséquent, des variations de la surface interfaciale et de la rétention de liquide qui représentent des paramètres clé des performances des contacteurs gaz-liquide. Mais cette étude n'inclut pas l'effet de la tension de surface. Dans cet article, nous allons discuter de l'influence de tous les paramètres combinés (propriétés physico-chimiques, géométrie de surface, cisaillement d'un contre-courant gaz) sur l'écoulement en film mince et sur une large fenêtre de mesure. L'objectif est de caractériser l'hydrodynamique à l'intérieur de colonnes de garnissage structurées (échelle de tôle de garnissage).

Aujourd'hui, les caractéristiques hydrodynamiques et de transfert de masse mesurées pour chaque garnissage sont à la base des corrélations qui permettent de concevoir les colonnes à l'échelle industrielle. Ces mesures sont souvent effectuées à l'entrée et à la sortie de la colonne (mesure globale) et ne prennent donc pas en compte les variations de l'hydrodynamiques à l'échelle locale qui correspond à l'échelle d'une tôle de garnissage et qui peut générer une distribution spatiale des coefficients de transfert de masse. D'où l'importance de la caractérisation locale de l'hydrodynamique des écoulements en couche mince sur des surfaces complexes. Pour cette raison, les variations hydrodynamiques à l'échelle locale de l'écoulement du film liquide (épaisseur du film liquide δ et vitesse interfaciale U_i) seront étudiées sur un large domaine spatial (300x220 mm) en fonction des propriétés physico-chimiques (viscosité μ et tension superficielle σ), du contre-courant gazeux, de l'angle d'inclinaison θ , du débit du liquide et de différentes géométries de surface (surface plate et ondulée). La méthode d'intensité de fluorescence est utilisée pour obtenir l'épaisseur du film. La vitesse interfaciale sera mesurée en utilisant la technique de flot optique [2]. Les résultats seront comparés en fonction des nombres de Reynolds Re et de Kapitza. Ces paramètres sont définis comme suivant :

$$ka = \frac{\sigma}{\rho_L (g \sin \theta)^{1/2} \nu^{3/2}} \quad (1)$$

$$Re = \frac{4q_L}{\nu} \quad (2)$$

Dans ces équations, q_L (m³/m/s) représente le débit linéique liquide, θ (°) l'inclinaison du support sur lequel le fluide ruissèle, ρ_L (kg/m³) la densité, ν la viscosité dynamique (Pa.s) et g la force de gravité (m/s²).

2 Matériels et méthodes

2.1 Techniques de mesure

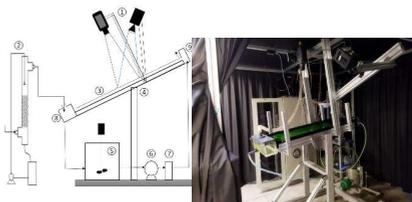
Pour le calcul de la vitesse à l'interface, la méthode de flot optique a été appliquée. Cette méthode est basée sur l'estimation du mouvement dans une succession d'images acquises dans un court délai temporel. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'estimer le mouvement apparent local de manière dense. Elle est basée sur la conservation temporelle des invariants photométriques. Elle se déduit, d'un point de vue mathématique, de la minimisation d'une fonction de coût composée de deux termes : le premier terme est lié à la conservation de l'intensité lumineuse le long du déplacement d'un point, le second effectue un lissage spatial des solutions du champ de vitesse vectoriel. L'approche hiérarchique incrémentale permet de traiter les grands déplacements entre les images et le filtrage des champs de vecteurs intermédiaires assure une bonne convergence des

résultats. Dans le cas de l'étude de la vitesse à l'interface liquide sur des plaques plates et ondulées, les images d'intensité de fluorescence présentent suffisamment de textures locales, sauf pour les conditions du régime de Nusselt. Ces textures, principalement générées par les vagues et les crêtes, permettent d'utiliser le flot optique pour mesurer le champ de vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation de la crête de la vague [15] sans ajouter de particules à la phase liquide. Le deuxième avantage de cette méthode est d'utiliser les mêmes images pour calculer l'épaisseur du film et la vitesse. Par conséquent, les deux quantités peuvent être mesurées simultanément. Le résultat brut de la méthode de flot optique, obtenu à l'aide de l'algorithme proposé par [2], est un déplacement en pixels. Pour obtenir la vitesse réelle en mètres par seconde, une étape de calibration spatiale est nécessaire. Pour se faire, les images d'un damier souple, dont toute la surface est au contact des surfaces solides de l'installation, ont été acquises. Chaque coin des carrés est automatiquement détecté et en connaissant leur position métrique réelle, une fonction de correspondance est déterminée entre le repère image (unité en pixel) et le repère physique (unité métrique).

Pour le calcul de l'épaisseur du film, la méthode d'intensité de fluorescence a été appliquée. Une courbe de calibration a été tracé pour convertir le niveau de gris en épaisseur du film en utilisant des creusets ayant différentes profondeurs connues. Des corrections numériques ont été aussi appliquées afin de corriger la non-homogénéité de l'éclairage, l'effet du vignettage, la soustraction du bruit de fond et l'absorption de la plaque en verre.

2.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé permet de créer un écoulement en film mince sous l'effet de la force de gravité. La figure 1 montre un schéma du dispositif expérimental ainsi qu'une image réelle de ce dernier. Ce dispositif fonctionne en boucle fermée, le liquide



stocké dans le réservoir opaque (5) est envoyé grâce

Figure 1. Schéma et image du dispositif expérimental

à une pompe à engrenage Verder WG 200.8 à travers un filtre (7) qui permet d'éliminer les particules ayant une taille supérieure 20 μ m et réduire les fluctuations de débit. Le débit liquide est réglé en utilisant un régulateur de débit et mesuré à l'aide d'un débitmètre

Macnought M2 ayant une précision de $\pm 1\%$ pour une gamme de débit allant de 25 à 200 L/h. Le liquide arrive dans la boîte d'alimentation (9) qui sera remplie de liquide. La sortie de cette boîte d'alimentation est composée de deux barres parallèles dont l'espacement peut être réglé de sorte à étaler le liquide sur toute la largeur de la plaque. Le liquide s'écoule sur toute la surface de la plaque d'étude et il est collecté grâce à une boîte de récupération (8). Le dispositif permet d'élaborer des expériences à différentes inclinaisons allant de 0° (horizontale) à 90° (verticale). Au-dessus de la plaque, une plaque en verre Borofloat® 33 ayant une longueur de 1140 mm, une largeur de 500 mm et 9 mm d'épaisseur est posé par l'intermédiaire de quatre supports en aluminium. Le verre Borofloat® 33 présente plusieurs avantages en termes de qualité (transmittance élevée) et de planéité. Cette plaque a pour rôle de confiner l'écoulement gaz. La section de passage entre la plaque plane et la plaque en verre est de 12 mm. Le gaz est de l'air sec qui provient d'un compresseur du laboratoire. Son débit est mesuré à l'aide d'un débitmètre Brooks MT3809 ayant une précision de $\pm 1,6\%$ sur une gamme d'écoulement entre 20 et 150 m³/h. Les écoulements en film mince ont une épaisseur très faible et afin de ne pas évaporer le fluide d'étude, le gaz traverse une colonne d'humidification (2) de diamètre 150 mm contenant un lit de hauteur 0,5 m d'anneaux de Raschig. L'air arrive ensuite à la boîte de distribution du gaz (8) et remonte le long de la plaque avant de ressortir (9). Le système optique (1) est composé d'une caméra rapide Phantom V9.1 ayant une résolution de 1632x1200 pixels et une dynamique de 14 bits ce qui permet d'enregistrer le niveau de gris du film liquide. Cette caméra est munie d'un objectif Nikkor 52 mm f1.8D et d'un filtre passe-haut (Filtre ET520LP) Une lampe LED ILM-401B-M-Bleu de HARDsoft® Microprocessor Systems émettant de manière continue à une longueur d'onde de 460 nm pour exciter les molécules du fluorophore.

2.3 Plaques d'étude

Dans cette étude, plusieurs types de géométrie de plaque ont été utilisées afin de pouvoir comparer la structure de l'écoulement sur chaque type de surface. Le choix du matériau et de la couleur des plaques doit être fait avec précaution pour convenir aux méthodes optiques retenues afin de minimiser les bruits optiques. Notre choix s'est orienté vers l'aluminium qui est un matériau résistant, peu onéreux et facilement usinable. Cependant, l'aluminium dans son état brut est un matériau brillant. L'application des méthodes optiques sur un support brillant implique des réflexions de lumière. La solution retenue a été d'anodiser les plaques. Ce traitement de surface par oxydation anodique permet de noircir les plaques en ajoutant une couche mince de 5 à 10 μm d'oxyde d'aluminium noir mat. Deux plaques ont été étudiées sur ce dispositif expérimental. La géométrie

des plaques a été choisie de façon à commencer par

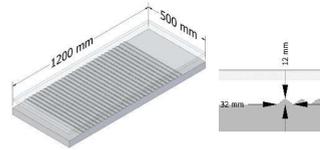


Figure 2. Géométrie de la plaque corruguée transversale
une configuration classique (plaque plane) et ensuite complexifier la géométrie en ajoutant des corrugations (Figure 2). Cette transition est importante afin de maîtriser l'application des techniques de mesure optique sur des géométries ondulées et résoudre les problèmes qui peuvent se manifester.

2.4 Fluides d'étude

La phase liquide est une solution aqueuse contenant de la fluorescéine ($\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5$) dissoute. Un agitateur électrique a été utilisé afin de dissoudre ce fluorophore dans la solution. Le choix des mélanges préparés permet de faire varier les propriétés physico-chimiques dans des gammes rencontrées dans les applications industrielles. L'ensemble des fluides est à base d'eau et de fluorescéine dissoute et ensuite l'éthanol et le glycérol sont ajoutés pour faire varier la viscosité et la tension de surface. Deux solutions à base d'eau et de l'éthanol (W-E1 : $\sigma = 35 \text{ mN/m}$; W-E2 : $\sigma = 50 \text{ mN/m}$) ont été préparées et forment les fluides à faible tension de surface et trois solutions à base d'eau et de glycérol (W-G1 : $\mu = 5 \text{ mPa.s}$, W-G2 : $\mu = 10 \text{ mPa.s}$ et W-G3 : $\mu = 15 \text{ mPa.s}$) forment les fluides visqueux. Ces paramètres physico-chimiques ont été vérifiés expérimentalement avant et après chaque expérience. La température du fluide a été maintenue à $21^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ et a été vérifiée à l'entrée et à la sortie du dispositif expérimental durant les expérimentations en utilisant des thermocouples PT 100.

2.5 Conditions expérimentales

Le débit liquide a été fixé entre 80 L/h et 180 L/h sur l'ensemble des plaques. Cette gamme de débit couvre un débit similaire au débit par plaque de garnissage basé sur un taux d'arrosage de 20 m³/m²/h utilisé dans une colonne industrielle d'un diamètre de 1 mètre remplie de Mellapak™ 250Y. Le débit de gaz utilisé est compris entre 20 m³/h et 90 m³/h, ce qui correspond à une vitesse de gaz comprise entre 1 et 5 m/s. Cette plaque couvre une vitesse de gaz similaire à celle utilisée dans une colonne industrielle. Avant chaque expérience, la plaque est totalement mouillée avec la solution liquide afin de faciliter l'étalement du film sur toute la surface de la plaque. Cependant, malgré toutes les précautions prises lors de la mise en place du dispositif expérimental et la fabrication de la plaque plane, le liquide ne s'étale pas sous certaines conditions ($\theta < 5^\circ$ et $\theta > 20^\circ$) et suit des chemins préférentiels. Pour cela, les expériences sur plaque plane ont été réalisées à 10° et 20° . Pour le cas de la

plaque ondulée transversale, à 10° et 20° le liquide forme des zones stagnantes entre les crêtes des corrugations ce qui implique la saturation du capteur de la caméra lors de l’acquisition des images de l’écoulement. En plus, la présence de ces liquides stagnants ne nous intéresse pas dans le cadre de notre étude car ce phénomène n’est pas présent dans les colonnes à garnissage. Ainsi, les expériences ont été effectuées à une inclinaison de 60°. Au-dessus de cet angle, le liquide suit des chemins préférentiels malgré la géométrie ondulée de la plaque d’étude.

3 Résultats

Pour comprendre l’effet des propriétés physico-chimiques des fluides, des résultats qualitatifs et quantitatifs sont décrits et comparés (toutes les conditions expérimentales sont maintenues constantes dans la première sous-section : $\theta = 20^\circ$ et $Q_L = 180 \text{ L/h}$). Un mélange eau-éthanol (W-E1 et W-E2) a été utilisé pour diminuer la tension de surface et un mélange eau-glycérine (W-G1, W-G2 et W-G3) a été utilisé pour augmenter la viscosité. Dans la deuxième partie, l’impact du gaz à contre-courant est également décrit et dans la dernière partie, les résultats sur la plaque ondulée transversale sont présentés.

3.1 Impact des paramètres physico-chimiques

3.1.1 Epaisseur du film

L’épaisseur du film liquide a été calculée sur chaque

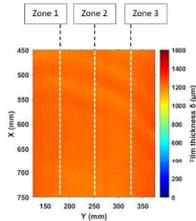


Figure 3. Les zones d’intérêt dans la fenêtre de mesure (W-G3 à $\theta = 10^\circ$ et $Q_L = 80 \text{ L/h}$).

pixel de la fenêtre de mesure en utilisant une courbe de calibration qui relie le niveau de gris à l’épaisseur du film. Cette procédure est appliquée sur des milliers d’image. Ces images permettent d’effectuer des comparaisons en utilisant les observations visuelles ; ce qui est très intéressant pour l’étude qualitative mais complique l’étude quantitative. Afin de faciliter l’étude quantitative, on s’intéresse à trois zones d’études comme illustrer dans la figure 3. L’ensemble des résultats est obtenu sur la même zone de la plaque comprise entre 450 et 750 mm.

3.1.1.1 Observation visuelle

La figure 4.a et b présente la structure générale des vagues de l’écoulement des fluides W-E1 et W-E2 respectivement.

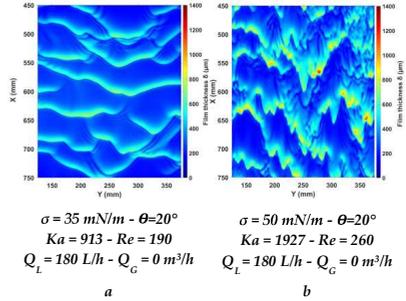


Figure 4. Influence de la tension de surface pour (a) : W-E1 (b) : W-E2 sur la plaque plane

Dans le cas du fluide W-E1, l’écoulement est plus stable avec des ondes festonnées (en forme de U) séparées par une large zone sans vague. L’existence de ces larges zones sans vague peut avoir un impact significatif sur l’efficacité des phénomènes d’échange dans les colonnes à garnissage structuré. Cet échange est intensifié en présence des vagues dans la structure de l’écoulement. La comparaison des résultats des fluides W-E1 et W-E2 montre un écoulement fortement déstabilisé dans le cas de W-E2 ainsi que l’apparition des ondulations en forme de W et des ondes capillaires.

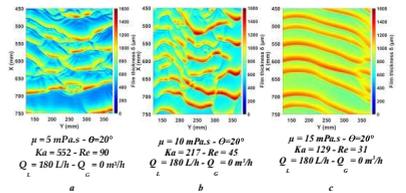


Figure 5. Influence de la viscosité pour (a) : W-G1, (b) : W-G2, et (c) : W-G3 sur la plaque plane.

L’impact de la viscosité sur la structure de l’écoulement est identifié dans les figures 5.a, b, et c. Les résultats montrent que l’épaisseur du film au niveau du substrat augmente avec l’augmentation de la viscosité. Dans les figures 5.a et b, l’écoulement est pleinement développé et les ondes principales sont suivies par un train d’onde capillaire à l’exception de la figure 5.c qui représente le fluide le plus visqueux. Sur cette figure, on remarque l’apparition d’ondes solitaires ayant une épaisseur de l’ordre de 1350 μm suivies d’une couche mince non perturbée d’épaisseur constante de 850 μm .

3.1.1.2 Distribution axiale dans les trois zones

La distribution axiale instantanée de l’épaisseur du film liquide dans les trois zones (figure 3) pour les fluides W-E1 et W-E2 est représentée sur la figure 6.a et b respectivement. On peut observer que dans le cas de W-E1 (figure 6.a), les ondes solitaires sont précédées par quelques ondes capillaires puis par un film sans perturbation. Dans la figure 6.b le film non

perturbé est remplacé par un grand nombre d’onde capillaire.

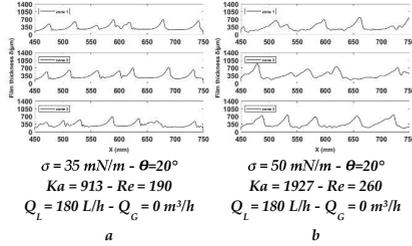


Figure 3. Distribution axiale instantanée pour (a) : W-E1 (b): W-E2 sur la plaque plane.

Des profils d’ondes similaires à celles de la figure 6.a ont été décrits dans les travaux de [8]. Les ondes s’écoulant sur la plaque plane se divisent, formant des fronts d’onde de grande amplitude et un film plat étendu entre ces ondes principales. Les ondes solitaires finissent par atteindre un état stationnaire. Dans le cas du fluide W-E2, la formation d’ondes développées en 3D peut être décrite comme le résultat de l’interaction entre les ondes de grande amplitude et celles plus petites. Elles croissent et s’accroissent progressivement tout au long de la plaque.

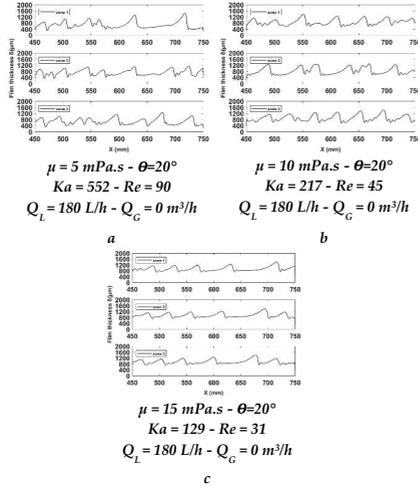


Figure 4. Distribution axiale instantanée pour (a): W-G1 (b): W-G2 (c) : W-G3 sur la plaque plane.

La figure 7 montre la distribution axiale instantanée de l’épaisseur du film pour les fluides visqueux. La figure 7.a peut-être divisée en deux régions, la région I entre 450 et 600 mm et la région II entre 600 et 750 mm. Dans la région I, les ondes primaires ne sont pas pleinement développées et présentant un front d’onde déformé tandis que dans la région II, les ondes se superposent et forment des ondes pleinement développées. En augmentant la viscosité du fluide, l’instabilité est

atténuée et les ondes se développe pleinement et apparaissent dans la région I et II (figure 7.b) toujours en présence des ondes capillaires. Pour le fluide le plus visqueux, les ondes solitaires ayant une grande longueur d’onde sont formées. La distance entre ces ondes solitaires augmente avec la distance en aval. En augmentant la viscosité, les ondes capillaires sont atténuées et l’épaisseur du film augmente significativement au niveau du substrat.

3.1.2 Vitesse des ondulations

Conformément à notre objectif, nous nous sommes concentrés sur les variations à l’échelle locale de l’épaisseur du film et de la vitesse à l’interface du film liquide. Pour cela, il est intéressant de pouvoir étudier ces variations simultanément. Dans cette section, nous illustrons les variations de vitesse en utilisant la méthode de flot optique [2]. La fréquence d’acquisition des images est de 120 images par seconde. A cette fréquence, le déplacement de l’interface gaz-liquide entre deux images successives est de l’ordre de quelques pixels.

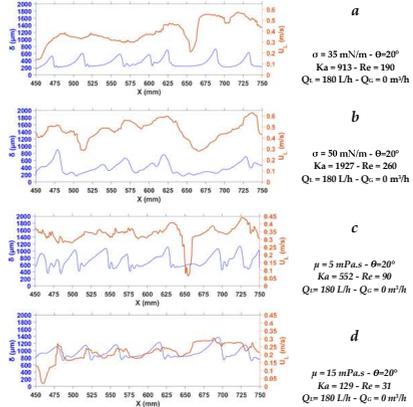


Figure 5. Distribution axiale de δ et U_1 pour (a): W-E1 (b): W-E2 (c): W-G1 (d) : W-G3

Les figures 8.a, b, c, et d présente la vitesse à l’interface du film liquide calculé sur 10 images successives. Le déplacement des vagues entre 10 images successives est considéré petit de façon à ne pas perdre la position de l’ondulation. Ceci permet de relier les résultats de vitesse à celles de l’épaisseur du film. Dans la figure 8.a, la diminution de la valeur de U_1 qui apparaît à $X = 675$ mm représente le film plat sans perturbation qui apparaît entre $X = 625$ et $X = 675$. Ces résultats montrent que U_1 augmente globalement avec la distance en aval ce qui peut être relié à la force de gravité et à l’augmentation de δ . Afin de comprendre l’effet de la tension de surface sur la vitesse des ondulations, la figure 8.b montre la variation de δ et de U_1 pour W-E2 dans la zone 2. On peut constater que la vitesse interfaciale augmente avec l’augmentation

de la tension de surface. Les ondes ayant une faible amplitude accumulent de la masse par l'interaction et l'absorption des ondes par effet de la gravité. Ceci favorise la formation des grandes ondes. Ces grandes ondes sont à l'origine de l'augmentation de la vitesse. Malgré ce constat, les interactions des ondes observées pour les fluides W-E1 et W-E2 compliquent l'obtention de la relation globale entre δ et U_L . La même analyse a été appliquée pour les fluides visqueux et montre que l'augmentation de la viscosité implique une diminution de U_L (figure 8.c et d). La figure 8.d montre comment U_L évolue de façon synchrone avec δ . Dans le cas du fluide W-G3, il y a moins d'interaction entre les ondes (figure 5.c) ce qui permet d'observer moins de fluctuation de U_L .

3.2 Effet du contre-courant gaz

La figure 9 montre l'effet du contre-courant gaz sur la structure de l'écoulement en film mince et sur l'épaisseur du film pour le fluide W-E2 à $\theta = 10^\circ$ et $Q_L = 80\text{L/h}$. Partant d'un liquide avec des ondes solitaires précédées par un train d'onde capillaire le long de la distance en aval en absence du contre-courant gaz, la distance entre les ondes principales est élargie en augmentant la vitesse du gaz n'est observée. Cette augmentation de la vitesse amplifie le cisaillement entre le flux de gaz et le film liquide. Aucune variation notable de la structure de l'écoulement à faible vitesse gaz mais l'effet commence à être significatif à partir de $U_G = 3\text{m/s}$. Des ondes en forme de V apparaissent à U_G élevé avec une large zone sans vague séparant les ondes principales. Comme l'illustre la figure 9, l'effet du contre-courant est d'atténuer le train d'ondes capillaires qui est comprimé en onde de plus grande épaisseur. Le deuxième paramètre impacté est la fréquence des ondes capillaire. En comparant les images de la figure 9, on peut constater que la fréquence de ces ondes diminue avec l'augmentation de U_G .

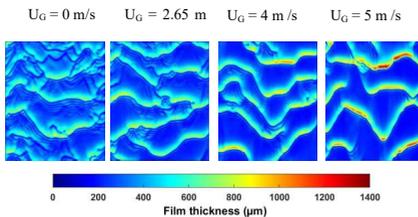


Figure 9. Images du film liquide montrant l'impact du contre-courant gaz pour W-E2 ($\sigma = 50\text{ mN/m}$) à $\theta = 10^\circ$ et $Q_L = 80\text{L/h}$.

La figure 10 montre l'évolution de δ_{\max} et de la vitesse d'onde correspondante U_L en fonction de U_G pour le cas présenté dans la figure 9. L'amplitude des ondes principales augmente substantiellement avec la vitesse du gaz tandis que la vitesse d'onde n'est pas significativement affectée par le courant gaz à faible

U_G . Ces résultats sont en accord avec les résultats de [6] et [15].

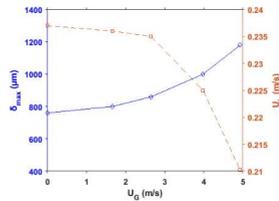


Figure 10. Variation de δ_{\max} et U_L W-E2 ($\sigma = 50\text{ mN/m}$) à $\theta = 10^\circ$ et $Q_L = 80\text{L/h}$.

3.3 Écoulement en film liquide sur plaque corruguée transversale

Dans cette partie, les résultats obtenus sur la plaque corruguée transversale sont présentés. L'étude sur cette plaque a été réalisée avec une grande attention pour éviter le bruit optique. Pour cela, la lampe LED bleu a été fixée avec un angle de 25° par rapport au plan XZ attaché aux plaques d'étude et parallèle à la corrugation pour éviter les ombres portées et les réflexions de la lumière sur la surface de la plaque. La caméra reste dans la même position, orthonormée au plan XY. La calibration du film liquide a été étendue à un maximum de $8000\text{ }\mu\text{m}$. Les épaisseurs supérieures à $8000\text{ }\mu\text{m}$ représente moins de 2% des résultats dans la fenêtre de mesure.

Les observations visuelles des écoulements des fluides à faible tension de surface et des fluides visqueux sont présentées à l'aide d'une échelle de couleur modifiée puisque la plupart des épaisseurs du film δ sont inférieures à $2000\text{ }\mu\text{m}$. La distribution axiale de δ le long de la distance en aval est également comparée dans la zone 2.

3.3.1 Observation visuelle

La figure 11 montre l'impact de la géométrie sur la structure de l'écoulement dans le cas d'une inclinaison $\theta = 60^\circ$ et un débit liquide $Q_L = 180\text{L/h}$. Les résultats montrent une forte perturbation des ondes et la présence d'un phénomène de vagues déferlantes. Ce phénomène a été observé en raison du changement de profondeur graduel entre chaque corrugation. Sur la figure 11.a on observe une fréquence d'apparition élevée de ces vagues déferlantes illustrées par des zones de couleur rouge foncé. L'apparition importante de ces vagues est reliée à la faible tension de surface. La diminution de la tension de surface implique des forces intermoléculaires plus faibles et par conséquent une diminution de la cohésion entre les molécules. Ceci accentue l'apparition de vagues déferlantes dans le cas de géométrie complexe de plaque. Ces vagues déferlantes observées peuvent être à l'origine des phénomènes d'engorgement à l'intérieur des colonnes à garnissage structuré. D'autre part, les travaux de [3] ont montré que l'échange est intensifié sur la crête des ondes ce qui peut favoriser l'échange dans les colonnes à garnissage. Les figure 12.a et b montrent

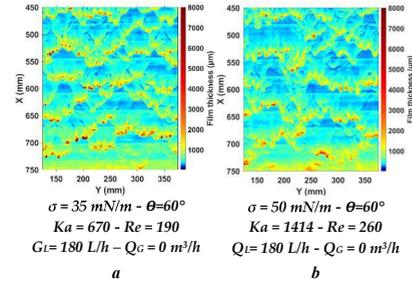


Figure 6. Influence de la tension de surface sur la structure de l'écoulement pour (a) : W-E1 (b) : W-E2 sur la plaque corruguée transversale

que pour les fluides visqueux (W-G2 et W-G3), la fréquence d'apparition des vagues et spécifiquement les vagues déferlantes diminue avec l'augmentation de la viscosité. La longueur d'onde des vagues principales augmente considérablement avec l'augmentation de la viscosité. [8] a montré que les vagues d'amplitude importante peuvent transporter 40 à 70 % de la masse totale du liquide dans l'écoulement. De plus, nous observons que les surfaces libres présentent des ondulations spatiales en phase avec les ondulations de la plaque.

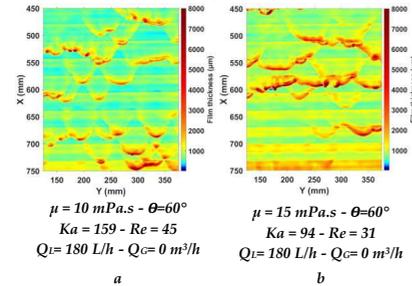


Figure 7. Influence de la viscosité de la structure de l'écoulement pour (a) W-G2 (b) : W-G3 sur la plaque corruguée transversale.

3.3.2 Distribution axiale

Pour étudier l'effet des ondulations sur la formation des vagues et l'apparition du phénomène de déferlement, deux observations de la variation spatiale des vagues ont été réalisées. La première est une observation zoomée (Zoom in) entre 0 et 3000 μm et la seconde est plus globale (Zoom out) entre 0 et 8000 μm qui représente la limite de la calibration. Les figures 13.a et b montrent les déferlements liquides et qui apparaissent au niveau des creux des corrugations de la plaque solide. Cette observation peut être expliquée par le fait que lorsqu'une onde arrive avec une rétention suffisante de liquide, la vitesse de cette onde augmente la pente de l'ondulation après la crête et entre en choc avec le début de l'ondulation

suivante. On observe également que l'épaisseur du liquide n'est pas affectée par la diminution de la tension de surface mais une augmentation de la fréquence des vagues déferlantes apparaît en diminuant la tension de surface.

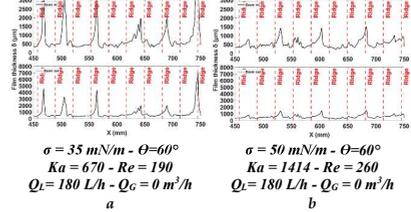


Figure 8. Distribution axiale instantanée pour (a) : W-E1 (b) : W-E2 sur la plaque corruguée transversale.

Pour les fluides visqueux (figure 14.a et b), on observe que δ augmente au niveau du substrat liquide avec l'augmentation de la viscosité. Les vagues déferlantes sont remplacées par des ondes festonnées (en forme de U) ayant une large longueur d'onde.

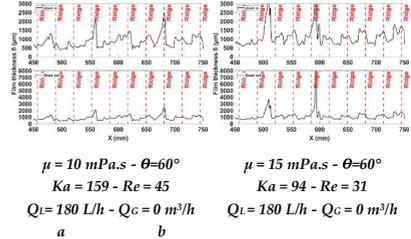


Figure 9. Distribution axiale instantanée pour (a) : W-G2 (b) : W-G3 sur la plaque corruguée transversale.

4 Conclusions et perspectives

Dans cet article, une méthode optique non intrusive basée sur l'intensité de fluorescence a été appliquée pour étudier l'épaisseur locale et la variation de la vitesse interfaciale de l'écoulement en film tombant sur une plaque plate et ondulée dans une fenêtre de mesure importante. La principale précaution à prendre est de maintenir des conditions expérimentales stables et une procédure de calibration précise. Cinq fluides ayant différentes propriétés physico-chimiques différentes ont été utilisés, des mélanges eau-éthanol à faible tension de surface (W-E1 : $\sigma = 35 \text{ mN/m}$; W-E2 : $\sigma = 50 \text{ mN/m}$) et des mélanges eau-glycérine à haute viscosité (W-G1 : $\mu = 5 \text{ mPa.s}$, W-G2 : $\mu = 10 \text{ mPa.s}$ et W-G3 : $\mu = 15 \text{ mPa.s}$). La dynamique d'écoulement du mélange eau éthanol et eau glycérine a été étudiée dans la plage de $13 < Re < 290$ qui correspond à un débit de liquide de $80 < Q_L < 180 \text{ L/h}$ et un angle d'inclinaison θ de 10° et 20° pour la plaque plane et 60° pour la plaque ondulée transversale. Les principaux résultats sont résumés comme suit. La tension superficielle a une influence de stabilisation de l'écoulement en film mince. Des

vagues en forme de U précédées de petites ondulations capillaires se forment dans le cas de W-E1, suivies d'un film sans vagues, tandis que des vagues 3D en forme de W avec une fréquence élevée d'ondes capillaires se forment dans le cas de W-E2. Lorsque nous augmentons la viscosité, l'instabilité capillaire est amortie et est remplacée par des ondes solitaires. L'épaisseur du film augmente au niveau du substrat avec l'augmentation de la viscosité. La vitesse des ondes augmente globalement avec la distance en aval pour tous les liquides, ce qui est lié à la force de gravité et à l'augmentation de l'épaisseur du film. La vitesse interfaciale augmente avec l'augmentation de la tension de surface et diminue avec l'augmentation de la viscosité. En ajoutant le gaz à contre-courant, aucune variation significative de la vitesse interfaciale n'a été observée à faible vitesse du gaz ($0 < U_c < 3$ m/s), mais l'effet du contre-courant commence à être important à partir de $U_c = 3$ m/s. L'effet du contre-courant est d'atténuer les ondes capillaires. L'épaisseur maximale du film augmente sensiblement avec toutes les vitesses du gaz, tandis que la vitesse des ondes n'est pas affectée par le contre-courant à faible vitesse du gaz. Les zones de film sans perturbation entre les ondes principales sont amplifiées lorsque la vitesse du gaz augmente. Sur la plaque ondulée transversale, une forte perturbation des ondes a été observée et le phénomène de vagues déferlantes a été illustré à faible tension de surface. Lorsque la viscosité augmente, la fréquence d'apparition des vagues et des déferlements diminue. Dans l'étude actuelle, le choix des plaques a été guidé par la complexification graduelle du dispositif, allant de la configuration standard (plaque plate) vers une géométrie plus représentative d'une feuille de garnissage structuré. Dans les perspectives de ce travail, nous prévoyons d'étudier l'écoulement sur une troisième plaque verticale ayant une géométrie corruguée similaire à celle d'une tôle de Mellapak™ 250Y qui est couramment utilisée dans les applications industrielles. En outre, des mesures locales et globales du transfert d'oxygène entre les phases gazeuse et liquide seront effectuées à l'aide d'une méthode optique non intrusive et des sondes à oxygène. Cette combinaison entre les résultats hydrodynamiques (épaisseur du film et vitesse interfaciale) et le transfert de masse à l'échelle locale vont nous permettre d'approfondir la compréhension de l'impact de la topologie de l'écoulement et surtout des propriétés physico-chimiques sur l'efficacité du transfert de masse. Les résultats actuels seront également utilisés pour des comparaisons avec des simulations CFD qui pourraient être appliqués à des éléments de garnissage représentatifs 3D.

References

[1] Drosos, E. I. P., Paras, S. V., & Karabelas, A. J. (2004). Characteristics of developing free falling films at intermediate

Reynolds and high Kapitza numbers. *International Journal of Multiphase Flow*, 30(7-8 SPEC. ISS.), 853-876. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2004.03.003>

[2] Ershov, A. (2015). Automated Analysis of Time-resolved X-ray Data using Optical Flow Methods (English Version). Der Fakultät F'ur Informatik Des Karlsruher Instituts F'ur Technologie (KIT), (13 November 2015). <https://doi.org/DOI:10.5445/IR/100005519>

[3] Gerke, S. J., & Repke, J. U. (2019). Experimental investigations of the fluid dynamics in liquid falling films over structured packing geometry. *Chemical Engineering Research and Design*, 147, 634-643. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.05.043>

[4] Janzen, A., Steube, J., Aferka, S., Kenig, E. Y., Crine, M., Marchot, P., & Toye, D. (2013). Investigation of liquid flow morphology inside a structured packing using X-ray tomography. *Chemical Engineering Science*, 102, 451-460. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.08.035>

[5] Kofman, Nicolas. (2014). Films liquides tombants avec ou sans contre - écoulement de gaz: application au problème de l'engorgement dans les colonnes de distillation, 391.

[6] Kofman, N., Mergui, S., & Ruyer-Quil, C. (2017). Characteristics of solitary waves on a falling liquid film sheared by a turbulent counter-current gas flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 95, 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.05.007>

[7] Lei, V. V., Al-Sibai, A. F., Leerken, A. A., & Renz, A. U. (2005). Local thickness and wave velocity measurement of wavy films with a chromatic confocal imaging method and a fluorescence intensity technique. <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0020-x>

[8] Liu, J., & Gollub, J. P. (1994). Solitary wave dynamics of film flows. *Physics of Fluids*, 6(5), 1702-1712. <https://doi.org/10.1063/1.868232>

[9] Mudawar, I., & Houpt, R. A. (1993). Measurement of mass and momentum transport in wavy-laminar falling liquid films. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36(17), 4151-4162. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(93\)90077-J](https://doi.org/10.1016/0017-9310(93)90077-J)

[10] P.L. Kapitza, S. P. K. (1965). Wave flow of thin layers of a viscous fluid. In *Collected Papers of P.L. Kapitza*, 662-709. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-010973-2.50013-6>

[11] Njifenju, A. K., Bico, J., Andrès, E., Jenffer, P., & Fermigier, M. (2013). Experimental investigation of liquid films in gravity-driven flows with a simple visualization technique. *Experiments in Fluids*, 54(5). <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1506-6>

[12] Nusselt, (1916). Nusselt, W., 1916. Die Oberflachencondensation des Wasserdampfes. VDI 60, 541- 569, 60, 541-569.

[13] Solomenko, Z. (2016). Two-phase flows over complex surfaces: towards bridging the gap between computations and experiments with application to structured packings.

[14] Takahama, H., & Kato, S. (1980). Longitudinal flow characteristics of vertically falling liquid films without concurrent gas flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 6(3), 203-215. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(80\)90011-7](https://doi.org/10.1016/0301-9322(80)90011-7)

[15] Vitry, Y. (2011). Étude expérimentale des écoulements film mince sur plan incliné avec contreécoulement gaz dans des conditions de similitude aux écoulements cryogéniques. Institut National Polytechnique de Toulouse.

[16] Wu, H., Zhao, R., Gan, X., & Ma, X. (2019). Measuring surface velocity of water flow by dense optical flow method. *Water (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/w11112320>