

# Etude expérimentale d'un écoulement gaz-liquide à contre courant sur un plan incliné

K. NJIFENJU<sup>a,b</sup>, M. FERMIGIER<sup>a</sup>, J. BICO<sup>a</sup>, E. ANDRES<sup>b</sup>

*a. Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (PMMH), ESPCI-ParisTéc ; 10 rue Vauquelin 75005 Paris -France*

*b. Renault / DREAM / DTAA, groupe Aérodynamique et Mécanique des Fluides ; FR TCR AVA 0 58, 1 av. du golf 78288 Guyancourt -France*

## Résumé :

*Le ruissellement d'un film d'eau de pluie sur un pare-brise ou une carrosserie est un phénomène important dans un contexte de sécurité des véhicules. Nous décrivons ici une expérience modèle de drainage d'un film liquide sur un plan incliné soumis à un contre-écoulement d'air. Nous caractérisons en particulier le seuil en vitesse de vent qui permet au film liquide de remonter la pente.*

## Abstract :

*A counter-current gas-liquid flow is studied in order to understand the dynamics of water falling film on a windscreen subject to various gas flow conditions. Theoretical analysis of mean flow and experimental results show a transition from gravity regime to entrained regime that appears for a modified Froude number of 100. This transient regime corresponds to flooding phenomena.*

**Mots clefs :** écoulement à contre courant, film liquide, cisaillement aéraulique

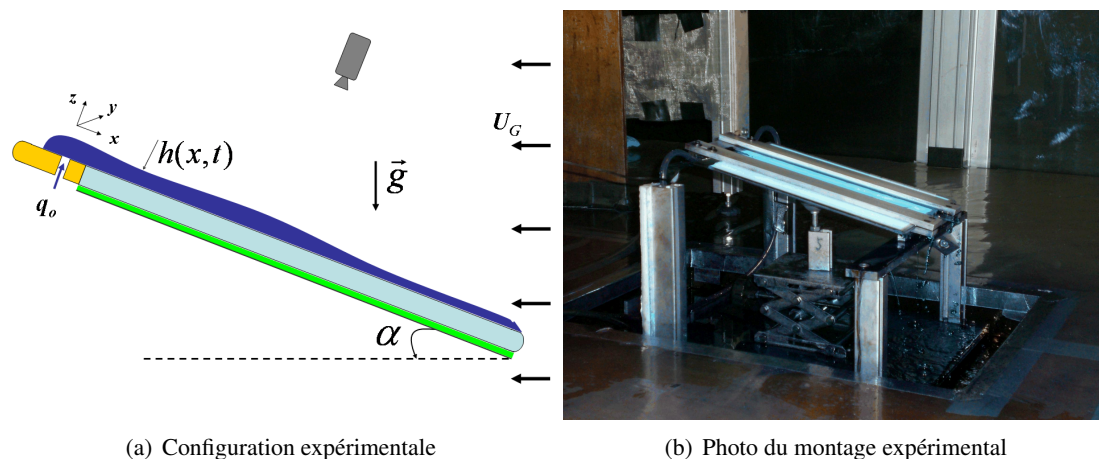
## 1 Introduction

L'étude envisagée ici est celle de la dynamique d'un film d'eau de pluie s'écoulant sur le pare-brise d'un véhicule en déplacement, pouvant occasionner une gêne de la visibilité. Le problème se ramène à celui illustré par la figure 1 : un film d'eau ruisselant par gravité sur une plaque de verre est soumis à un écoulement d'air à contre courant. Ce type de problème, où interviennent conjointement gravité et cisaillement aéraulique, se rencontre également en génie des procédés lorsque deux fluides non miscibles circulent à contre-courant dans une conduite inclinée ou verticale [1]. Dans ce contexte de génie des procédés, comme dans le nôtre, le problème essentiel est de prédire le seuil d'inversion du flux liquide. Nous présentons une étude expérimentale dans une plage de nombre de Reynolds liquide intermédiaire ( $27 < Re_L < 300$ ). Une technique optique nous permet de visualiser et d'analyser la dynamique du film liquide, d'identifier les transitions entre les différents régimes. Nous proposons une analyse dimensionnelle simple de ces résultats.

## 2 Approche expérimentale

L'expérience est représentée sur la figure 1. Une plaque de verre ( $L_p \times l_p = 310 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ) est placée sur un support inclinable (angle  $\alpha$  variant de 0 à 30°). Le liquide est injecté par une

fente à l'extrémité haute de la plaque. Le débit de liquide  $q_0$ , fixé par une pompe à engrenage varie de 0,1 à 1  $l \cdot min^{-1}$ . L'ensemble est placé dans la veine d'une soufflerie de type Eiffel permettant d'imposer une vitesse du gaz  $U_G$  jusqu'à 20  $m \cdot s^{-1}$ . Le liquide utilisé est de l'eau



(a) Configuration expérimentale

(b) Photo du montage expérimental

FIGURE 1 – Dispositif expérimental en soufflerie [2] : Le liquide utilisé est de l'eau teintée au bleu de méthylène. La zone d'écoulement est de longueur ( $L_p$ ) et de largeur ( $l_p$ );  $L_p \times l_p \equiv 310 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ , les parois du canal ont une hauteur de 5mm

additionnée de bleu de méthylène. Une feuille électroluminescente est placée sous la plaque de verre pour éclairer uniformément le film liquide. Une caméra CCD rapide enregistre l'intensité lumineuse traversant le film liquide et permet de cartographier, via une calibration, l'épaisseur du film en fonction du temps [2]. Pour chaque point de mesure, le film liquide s'écoule initialement par gravité et est soumis ensuite au cisaillement d'air à contre-courant. L'épaisseur  $h$  du liquide est la moyenne spatiale sur un profil longitudinal d'épaisseur mesuré et temporelle sur une série de profils mesurés avec une fréquence d'acquisition de 500Hz.

## 2.1 Observations

La figure 2 montre les structures de l'écoulement à débit liquide et inclinaison donnés avec une vitesse de gaz croissante. Des ondes et des zones de concentration de liquide (en bout de plaque) sont mises en évidence ainsi que l'arrachement de gouttes et le débordement du liquide au-delà de la zone d'étude. Ceci marque la transition entre le régime de drainage vers le bas par gravité et le régime d'entraînement vers le haut par le cisaillement aérodynamique. Le seuil d'équilibre gravité-cisaillement est défini visuellement et se reconnaît par la formation d'un bourrelet en bout de plaque (figure 2,  $Re_G = U_G L_p / \nu_G = 2,0 \cdot 10^5$ ). La vitesse (nombre de Reynolds) seuil d'entraînement ainsi déterminée est représentée sur la figure 4(a) en fonction du nombre de Reynolds du film liquide, pour différentes inclinaisons.

L'observation de la dynamique de l'écoulement dans une telle configuration est plus explicite en visualisant les diagrammes spatio-temporels (figure 3) où la dynamique des structures le long de l'axe médian de la plaque est suivie au cours du temps. L'inclinaison des structures diagonales reflète le sens de propagation des ondulations de surface. On voit clairement que ce sens de propagation s'inverse lorsqu'on passe de  $Re_G = 2,0 \cdot 10^5$  à  $Re_G = 3,4 \cdot 10^5$ , signalant ainsi le renversement de l'écoulement du film liquide.

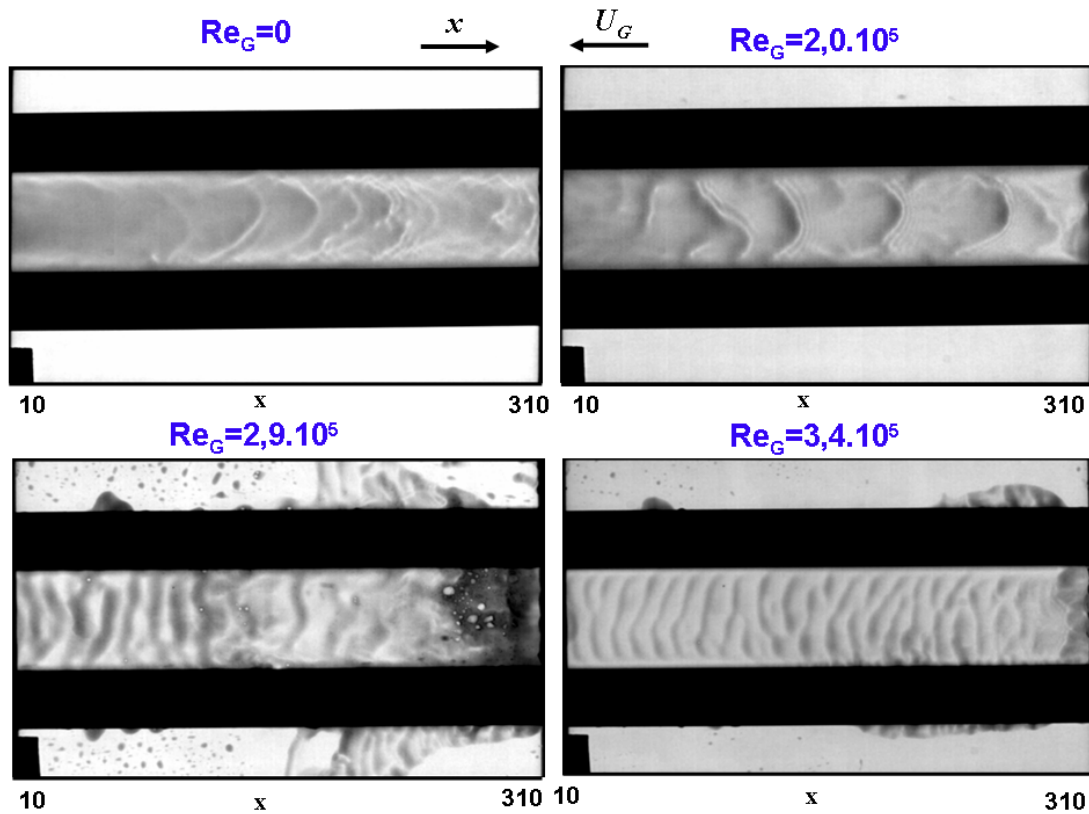


FIGURE 2 – Observations ( $Re_L = 222$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ) : Du film liquide ruisselant par gravité au film liquide entraîné par le cisaillement aéraulique. L'équilibre gravité-cisaillement se manifeste par l'arrachement de gouttes et l'accumulation locale de liquide.

### 3 Seuil d'équilibre gravité/cisaillement aéraulique

Pour analyser la transition entre l'écoulement dominé par la gravité et celui dominé par le cisaillement aéraulique, une approche simple consiste à considérer l'écoulement laminaire d'un film liquide d'épaisseur  $h$  soumis à sa surface à une contrainte de cisaillement constante. L'écoulement de gaz étant un écoulement à grand nombre de Reynolds, nous pouvons écrire la contrainte de cisaillement comme  $\tau_G = \rho_G U_G^2$ . Alors le débit de liquide linéique ( $q = q_o/l_p$ ), intégré sur toute l'épaisseur  $h$  s'écrit :

$$q = h \cdot u_L = \frac{g \sin \alpha h^3}{3\nu_L} - \frac{\rho_G U_G^2 h^2}{2\mu_L} \quad (1)$$

Nous définissons une épaisseur adimensionnelle  $\bar{h} = h/h^*$  où  $h^* = \frac{3}{2} \frac{\rho_G U_G^2}{\rho_L g \sin \alpha}$  est l'épaisseur pour laquelle le débit est nul. Nous pouvons alors exprimer le débit sous forme adimensionnée :

$$\bar{q} = \frac{q}{q^*} = \bar{h}^2(\bar{h} - 1) \quad (2)$$

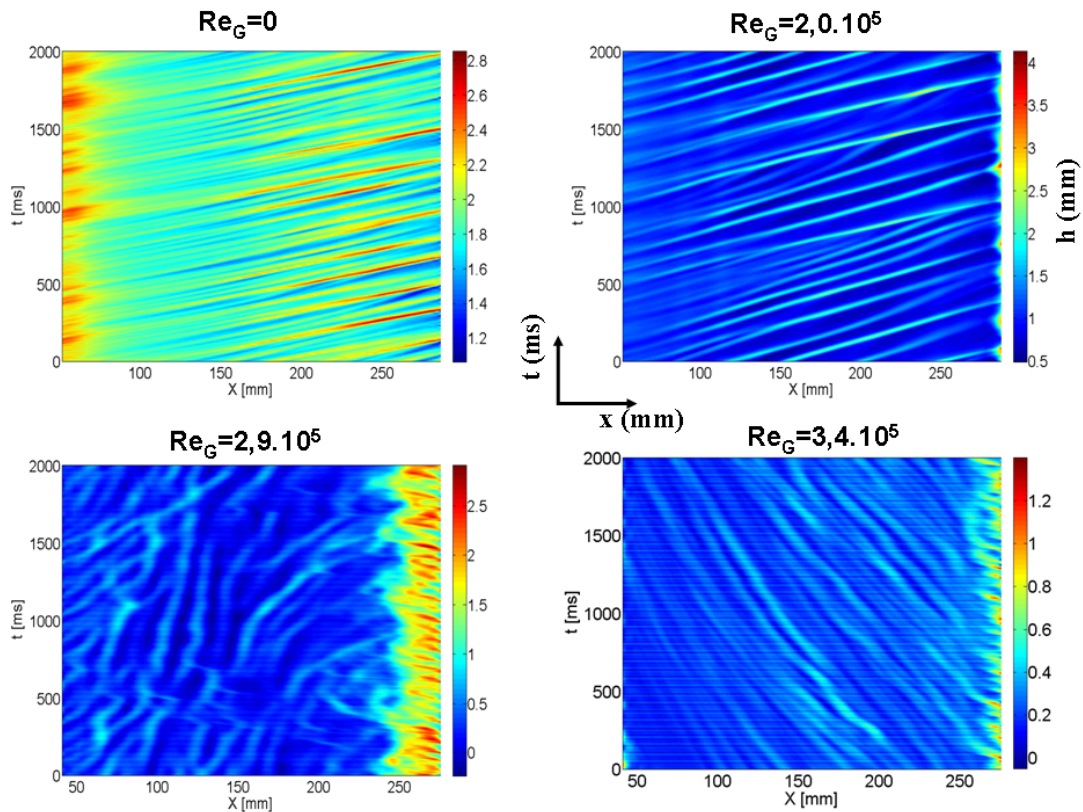


FIGURE 3 – Diagrammes spatio-temporels du film liquide en écoulement gravité-cisaillement :  $Re_L = 222$ ,  $\alpha = 20^\circ$ .

où le débit caractéristique  $q^*$  est donné par :

$$q^* = \frac{9}{8} \left( \frac{\rho_G U_G^2}{\rho_L} \right)^3 \frac{1}{\nu_L (g \sin \alpha)^2} \quad (3)$$

En effet, la relation 2 exprime le fait que pour chaque grandeur  $\bar{q}$ , il existe plusieurs couples  $(q_o, U_G)$  représentés par  $\bar{h}$  décrivant la même phase de l'écoulement. Ceci devrait donc se vérifier en particulier au seuil d'équilibre entre la gravité et le cisaillement.

A partir des relevés de la vitesse d'air au seuil ( $U_G$ ) et du débit liquide ( $q_o$ ) correspondant, analysons expérimentalement la relation (2) à l'aide des graphiques de la figure 4.

Selon la figure 4 le rapport  $q/q^*$  apparaît quasiment constant sur la plage de  $Re_L$  étudiée. Ceci est en accord avec la relation (2) en admettant que la grandeur  $\bar{h}$  caractérise l'écoulement de manière homogène pour tout couple  $(q_o, U_G)$ . Cependant, nous observons une nette variation de ce rapport avec l'inclinaison de la plaque. L'interprétation physique de cette dernière observation reste encore à trouver car l'angle  $\alpha$  est déjà pris en compte dans l'expression du rapport  $q/q^*$ , donc ne devrait plus apparaître sur la figure 4(b). Par ailleurs, le paramètre  $\bar{h}$  qui caractérise la transition du débit du bas vers le haut peut s'écrire comme l'inverse d'un nombre de Froude modifié :

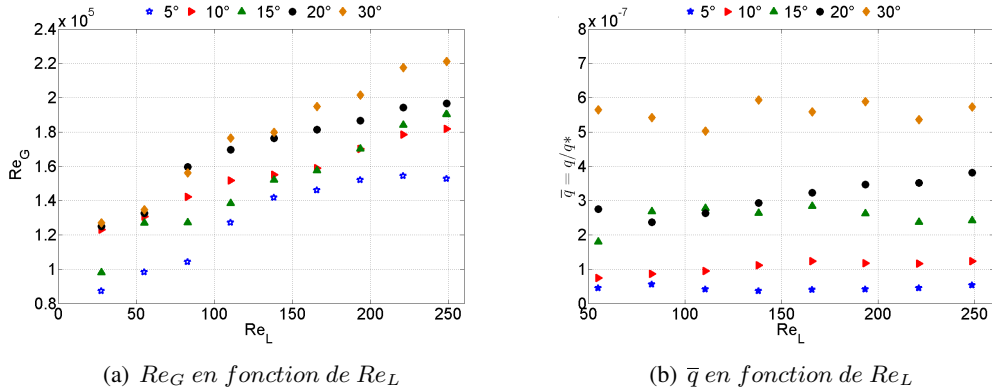


FIGURE 4 – Caractérisation de l'écoulement au seuil d'équilibre gravité-cisaillement .

$$Fr = \frac{1}{\bar{h}} = \frac{2}{3} \frac{\rho_G U_G^2}{\rho_L g \sin \alpha} \quad (4)$$

qui compare la contrainte de cisaillement imposée par le vent et la contrainte imposée par la force de gravité. Cette analyse simple suggère que la transition se produise à une valeur fixe de ce nombre de Froude modifié.

#### 4 Ondes de surface

Le suivi de la dynamique des profils d'épaisseur met en évidence des ondes de surface dont on peut mesurer la vitesse de propagation  $C$  à partir des diagrammes spatio-temporels (figure 3). Afin d'obtenir une courbe maîtresse entre la vitesse  $C$ , la vitesse du gaz  $U_G$  et la vitesse débitante  $u_L = \frac{q \sin \alpha \cdot h^2}{3\nu} - \frac{\rho_G U_G^2 \cdot h}{2\mu}$ , des mesures d'épaisseur et de vitesse d'onde sont réalisées en faisant varier  $Re_L$ ,  $Re_G$  et  $\alpha$ . Adimensionnons  $C$  par  $u_L$  et représentons  $U_G$  sous la forme du nombre de Froude modifié. Le tracé de  $C/u_L$  en fonction de  $Fr$  permet ainsi d'obtenir une courbe maîtresse représentée en figure 5. Cette figure définit la dynamique du film liquide en gravité-cisaillement où de part et d'autre de  $Fr = 100$ , on a les tendances définies par :

$$\begin{cases} \frac{C}{u_L} \equiv Fr^{-3/2} & Fr_{G,L} < 100 \\ \frac{C}{u_L} \equiv Fr^{3/2} & Fr_{G,L} > 100 \end{cases} \quad (5)$$

Le point singulier de l'écoulement du film liquide qui caractérise le régime transitoire entre les régimes de gravité et de cisaillement est défini par  $Fr = 100$ . Le Regime transitoire quant-à-lui se situe au voisinage de  $Fr = 100$ .

#### Conclusion

Cette étude des films liquides met en évidence des comportements caractéristiques des écoulements liquides soumis à un contre-courant aérien. Nous avons en particulier mis en évidence les différents paramètres caractéristiques du problème qui permettent de différencier les régimes d'écoulement. Nous avons également observé la formation d'ondes de surfaces dont la vitesse de propagation adimensionnée par la vitesse d'écoulement apparaît comme une fonction d'un nombre de Froude modifié. Ces éléments devraient conduire à une meilleure compréhension des

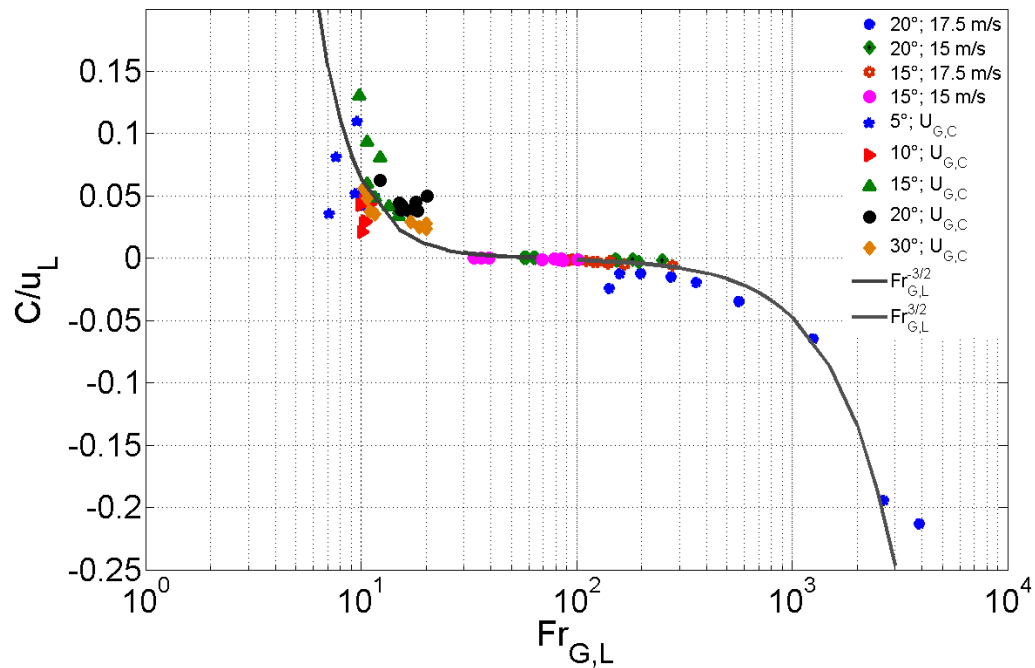


FIGURE 5 – Caractérisation de l'écoulement gaz-liquide en gravité-cisaillement en fonction du nombre de Froude.

écoulements de films d'eau de pluie sur les pare-brises ou les vitres latérales d'automobiles. Ce pendant, l'eau de pluie sur les surfaces externes automobiles se trouve dans certains cas sous forme de gouttes soumises à des conditions semblables de gravité et de cisaillement aérodynamique. La suite de ces travaux en aérodynamique automobile portera donc sur les questions de dynamique de gouttes où en plus des effets de la gravité et du cisaillement, il faudrait tenir compte de l'effets du mouillage.

## Références

- [1] Zapke A. and Kröger D. G. Int. J. Multiphase Flow, 26, 1439–1455, 2000.
- [2] Njifenju K., Fermigier M., Andrès E., Bico J., Bobillier P., Gillieron P., and Jenffer P. ISFV13, FLUVISU12, July, 2008.