



HAL
open science

Analyse du Procédé d'Essorage au Moyen de la Vélocimétrie par Image de Particules et la Technique d'Absorption de Lumière

Miguel Alfonso Mendez, Jean-Marie Buchlin

► **To cite this version:**

Miguel Alfonso Mendez, Jean-Marie Buchlin. Analyse du Procédé d'Essorage au Moyen de la Vélocimétrie par Image de Particules et la Technique d'Absorption de Lumière. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097813

HAL Id: hal-02097813

<https://hal.science/hal-02097813v1>

Submitted on 12 Apr 2019

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.

Analyse du Procédé d'Essorage au Moyen de la Vélocimétrie par Image de Particules et la Technique d'Absorption de Lumière.

Miguel Alfonso MENDEZ¹, Jean-Marie BUCHLIN¹

¹Institut von Karman, Rhode Saint Génèse, Belgique

Email auteur correspondant : mendez@vki.ac.be

Ce travail présente une caractérisation expérimentale du procédé d'essorage par couteau gazeux. Ce dernier constitue une méthode de revêtement continu, fortement utilisée en dans l'industrie du papier, la fabrication de films photographiques et les lignes de galvanisation. La méthode se base sur l'impact d'un jet de gaz bidimensionnel pour contrôler l'épaisseur d'un film liquide entraîné par une bande mobile. Le procédé est reproduit sur un modèle de laboratoire et sa dynamique instable est pour la première fois analysée en combinant plusieurs techniques de mesure optiques et de traitement de données telles que l'absorption de lumière (LAbS) pour caractériser l'évolution tridimensionnelle et temporelle de l'épaisseur du film liquide, la vélocimétrie par images de particules résolue en temps (TR-PIV) pour étudier l'aérodynamique du jet et la fluorescence induite par laser (LIF) pour le suivi de l'interface gaz-liquide. Un lien entre le contenu fréquentiel de la non-uniformité du revêtement liquide et le comportement du jet est établi. Plus précisément, la dynamique du jet gazeux est décrite via la décomposition orthogonale aux valeurs propres à échelles multiples (mPOD) de l'ensemble des données TR-PIV. Elle révèle la présence d'oscillations à grandes échelles, couplées à l'instabilité de l'interface liquide impactée. L'analyse des spectres fréquentiels du jet et du film liquide montre que le mécanisme oscillatoire auto-entretenu produit une ondulation de grande longueur d'onde dans le produit final.

1 Introduction

Le procédé d'essorage par couteau gazeux consiste à faire impacter un jet de gaz bidimensionnel sur un film liquide entraîné par un substrat mobile pour contrôler son épaisseur finale. En raison de sa configuration continue, sans contact et simple, cette méthode est utilisée dans plusieurs applications industrielles, y compris la fabrication de films photographiques, l'industrie papetière et les chaînes de galvanisation [1, 2, 3]. Son développement a fait l'objet d'un grand nombre d'études analytiques et expérimentales qui ont conduit à la formulation de plusieurs modèles d'ingénierie [4, 5, 6, 7] pour prédire l'épaisseur finale du revêtement en fonction des paramètres opératoires et donc à concevoir et piloter correctement les lignes de revêtement. Toutefois, le procédé souffre de la qualité de surface du produit fini. Ceci constitue une préoccupation majeure pour les applications exigeant une finition élevée comme par exemple celle demandée dans l'industrie automobile. Des travaux expérimentaux [8, 9, 10] et numériques [12, 13] antérieurs ont montré que l'uniformité du revêtement est fortement liée à la stabilité du jet qui peut développer des mécanismes oscillatoires à son impact sur le film liquide. Afin d'apporter plus d'éléments aux banques de données déjà établies, le présent travail vise à étudier expérimentalement cette interaction instable. Il repose sur une combinaison simultanée de la vélocimétrie par image de particules résolue en temps (TR-PIV) pour le champ aérodynamique, de la technique de l'absorption de lumière (LAbS) pour la mesure de l'épaisseur du film liquide et de la fluorescence induite par laser (LIF) pour le suivi de l'évolution de l'interface. Par ailleurs, les données TR-PIV font l'objet d'une analyse originale mettant en jeu une nouvelle méthode de décomposition orthogonale aux valeurs propres à multi-échelle (mPOD) [14, 15, 16] pour identifier les structures d'écoulement responsables de l'oscillation du jet et de lier leurs caractéristiques à celles du film liquide.

Le montage expérimental est décrit à la section 2, tandis que la section 3 s'adresse à la mise en œuvre des techniques de mesure optiques et des algorithmes de traitement des données qui s'y rapportent. La section 4 recueille les résultats de cette étude. Les conclusions et les perspectives sont présentées à la section 5.

2 Dispositif expérimental

Les expériences sont réalisées sur l'installation Ondule de l'Institut von Karman. La figure 1 en donne un schéma de principe (a) et une vue d'ensemble (b). Le substrat ascendant (1) est simulé par un grand cylindre (1) en verre acrylique d'un diamètre de 450 mm et d'une largeur de 350 mm. Ce cylindre est mis en rotation à l'aide d'un moteur électrique tournant à $n=15$ tr/min, ce qui simule une bande se déplaçant à $U_s=0,353$ m/s. Il trempe dans un bain (2) sur une profondeur d'environ 5 cm. Le liquide est du Dipropylène Glycole (densité $\rho=1026\pm 1\%$ kg/m³, viscosité $\mu=70\pm 1\%$ cP, tension superficielle $\sigma=32\pm 1\%$ N/mm), introduit dans le bain par une pompe volumétrique (4) au début de l'essai. La buse bidimensionnelle (5) qui produit le couteau d'air est installée sur un mécanisme à deux axes (6) pour régler la position de l'impact et la distance d'éloignement.

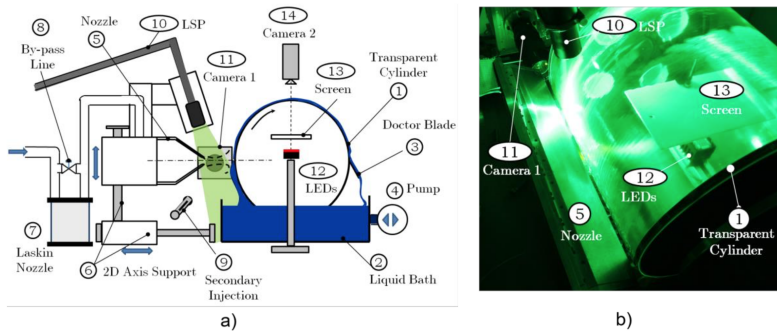


Figure 1: a) Schéma de l'installation Ondule b) vue d'ensemble.

Pour réaliser la TR-PIV, la buse est alimentée par une génératrice d'aérosols Laskin PIVTEC45-M (7) fonctionnant avec de l'huile minérale Ondina Shell 917. Un conduit de dérivation (8) permet d'ensemencer aussi le flux d'air entraîné par le jet et de maximiser ainsi l'uniformité de l'ensemencement. La source de lumière est un laser ND:YLF à double pompage par diodes (Quantronix Darwin Duo 527). Il est équipé avec une optique LSO de l'ILA (10) pour produire le feuillet laser. L'interaction entre le jet et le film liquide est visualisée au moyen d'une caméra Photron FASTCAM SA1 de CMOS (11) positionnée sur un côté de l'installation à une distance d'environ 16 cm du plan étudié. Elle est munie d'un objectif zoom Tamron CZ-735 70-30mm offrant un facteur d'échelle de $20\pm 0,1$ pixels/mm.

Chaque vidéo se compose de $n_t=21000$ images (10500 paires) avec une résolution de 512×512 pixels, prises à une fréquence de $f_s=3$ kHz. La netteté du contour de l'interface est améliorée par fluorescence induite par laser ; pour ce faire de la rhodamine B est diluée dans le liquide avec une concentration de ≈ 10 mg/kg. Une image typique de la TR-PIV et de l'interface est présentée à la figure 2a.

Pour les manipulations de TR-LAbs, une source de lumière diffuse (12) est installée à l'intérieur du cylindre transparent. Il s'agit de deux réseaux de 4×4 LEDs de $\approx 0,7$ W chacun et dont l'émittance se situe à 636 ± 26 nm. Ces LEDs sont installées derrière une feuille de verre acrylique Opaline de 3mm d'épaisseur (13). La caméra de réception (14) est une caméra CMOS 16 bits à obturateur à balayage (Hamamatsu ORCA-Flash 4.0) synchronisée avec les LEDs pour acquérir $n_t=2000$ images à $f_s=300$ Hz avec une résolution de 660×1800 pixels. Elle possède un objectif Nikkor de 35 mm, pour fournir un facteur d'échelle d'image de $13,4\text{mm}\pm 0,3$ pixel/mm, et d'un filtre passe-bande optique (plage BP 640 ± 40 nm) pour limiter la sensibilité de la caméra dans la plage de longueurs d'onde où l'absorption de lumière a lieu. Elle est positionnée perpendiculairement à la section d'essai, à environ 40 cm du cylindre. Pour optimiser la correspondance entre les spectres d'absorption du liquide et les spectres d'émission de la lumière, un colorant bleu de méthylène est dilué dans le liquide avec une concentration de 21 mg/kg. La définition de la concentration optimale de colorant pour minimiser l'incertitude de mesure est présentée dans [17, 18]. Une image typique de l'acquisition TR-Labs est proposée à la figure 2b (en haut), ainsi que l'image de référence (en bas) qui correspond à la section d'essai sans liquide.

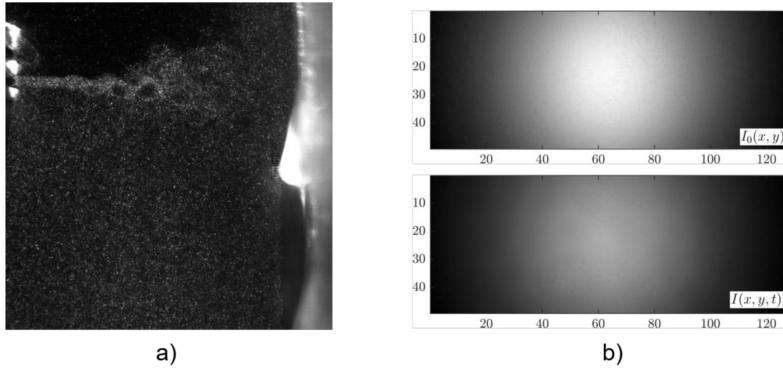


Figure 2: a) Exemple d'image TR-PIV, b) et d'images LABs.

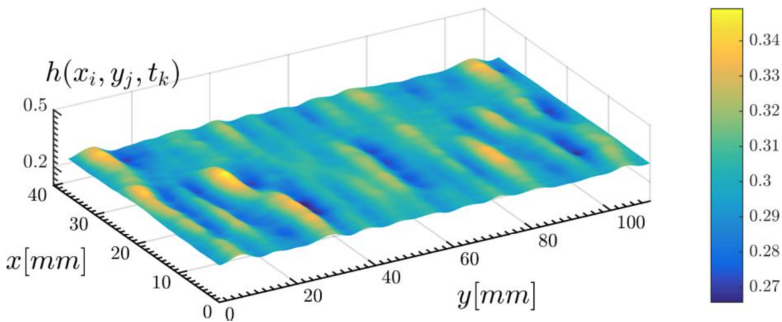
3 Techniques de mesure et traitement des données connexes

3.1 Mesure de l'absorption de la lumière et analyse du film de revêtement

La méthode TR-Labs permet de déterminer la distribution instantanée de l'épaisseur d'un film liquide $h(x,y,t)$ à partir de la mesure de la quantité de lumière qu'il absorbe. Étant donné une image de référence $I_0(x,y)$ (comme celle de la figure 2b, en haut), la méthode consiste à enregistrer les images de transmission (comme celle de la figure 2b, en bas) et à calculer la distribution de l'épaisseur du film à partir de la loi de Beer-Lambert :

$$h(x, y, t) = \frac{1}{\gamma_g} \ln \left(\frac{I_0(x, y)}{I(x, y, t)} \right)$$

où la constante γ_p (dans ce travail $\gamma_p=0,75\pm 1\%$ mm^{-1} est le coefficient d'extinction de la lumière, déterminé par une procédure d'étalonnage décrite dans [19]. La difficulté majeure rencontrée dans ce travail est le mouvement du cylindre, qui rend problématique l'indépendance temporelle de l'image de référence $I_0(x, y)$: alors que celle-ci est construite à partir de la moyenne temporelle d'un enregistrement vidéo en conditions sèches, les défauts venant des rayures du verre acrylique et de l'entraînement des bulles d'air produisent des régions dans lesquelles la mesure de l'épaisseur est polluée. Ceux-ci sont identifiés et éliminés par une procédure de traitement d'image décrite dans [20]. Un exemple de reconstruction du film liquide est fourni à la Figure 3.

Figure 3: Exemple de reconstruction de l'épaisseur du film liquide. Précision $\Delta h = 1\mu\text{m}$, résolution spatiale $\Delta x = 12\mu\text{m}$ et résolution temporelle $\Delta t = 3 \text{ ms}$. Épaisseur moyenne $310 \mu\text{m}$. (barre des couleurs en mm).

Ces mesures sont utilisées pour identifier trois quantités caractéristiques du revêtement. Il s'agit de l'épaisseur moyenne h_f , de l'amplitude de l'onde locale A_{fL} et des spectres de fréquence spécifiques H_f . La première est définie comme la moyenne spatio-temporelle sur l'ensemble de la séquence vidéo, tandis

que l'amplitude de l'onde est calculée comme la moyenne crête à crête à partir d'un profil 2D extrait au centre de l'image. Enfin, le spectre fréquentiel caractéristique est obtenu sous forme de moyenne d'ensemble des spectres calculés à chacun des points du profil 2D.

3.2 Suivi de l'interface liquide et analyse de l'interface

L'interface liquide impactée par le jet de gaz est déduite à partir des images PIV via un logiciel de traitement d'images développé sous Matlab. Il se compose de quatre étapes illustrées à la figure 4 (correspondant à l'image PIV de la figure 2a). Tout d'abord, l'image est recadrée autour de l'interface liquide (figure 4a). Ensuite elle est filtrée au moyen d'un masquage à base de POD décrit dans [21]. Ce filtre consiste à traiter la séquence vidéo par POD pour, in fine, ne conserver qu'une petite fraction des modes dominants. Cette procédure permet de capturer le mouvement des grands objets tout en supprimant la contribution non corrélée des traceurs. Le résultat de cette étape est l'élimination complète des particules de PIV des images comme le montre la figure 4b. Cette opération simplifie considérablement la détection de l'interface qui peut être alors obtenue au moyen de méthodes d'amélioration des bords par contraste directionnel [17] et application d'un aiguisage gaussien (figure 4c) suivi de la détection des pics des profils d'échelle de gris le long des lignes horizontales de l'image. Finalement, une amélioration est apportée grâce à un filtre lissant de type Savitzky-Golay [22]. Le résultat obtenu est montré à la figure 4d.

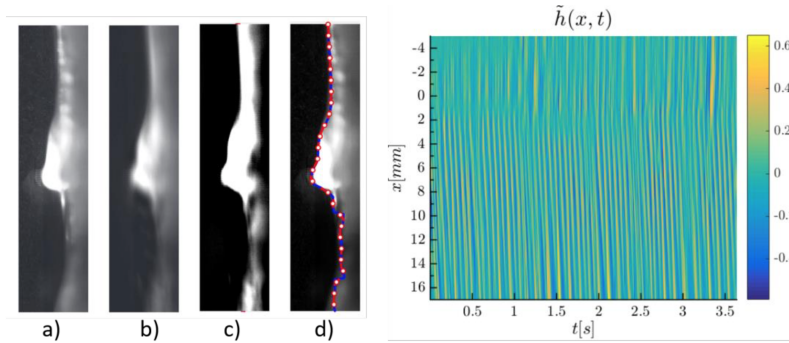


Figure 4: Sur la gauche les séquences du traitement de l'image. Sur la droite graphique spatio-temporel des ondes.

Toutes les détections d'interface sont stockées dans une matrice spatio-temporelle qui permet de visualiser les lignes caractéristiques à travers lesquelles se propagent les ondes dans le film liquide. Un résultat illustratif, normalisé de manière à avoir une amplitude unitaire, est vu sur la droite de la figure 4. À partir de tels résultats il est possible de calculer la vitesse de propagation des ondes en utilisant l'analyse de corrélation et la transformée de Hough (comme dans [18]), ainsi que les spectres caractéristiques des ondes du film essoré redescendant indiqués comme H_r par la suite.

3.3 Vélométrie d'images de particules à résolution temporelle et POD multi-échelle

Les images PIV sont d'abord masquées à l'aide de la détection d'interface décrite à la Section 3.2, puis prétraitées à l'aide de l'élimination de l'arrière-plan par POD [21] pour éliminer les réflexions dépendantes du temps produites par l'interface liquide. Le dépouillement PIV est réalisée avec le code Matlab open-source PIVlab [23], en utilisant une interrogation standard itérative de plusieurs étapes (trois passages de fenêtres de de 64×64 à des fenêtres de 8×8) avec déformation de la fenêtre par fonctions splines et interpolation sous-pixels gaussienne 2D. La figure 5a présente un exemple de champ TR-PIV avec le résultat de la détection automatique de l'interface.

Les champs TR-PIV sont analysés via une nouvelle méthode de décomposition aux valeurs propres à échelles multiples, la mPOD, décrite dans [14, 15, 16]. Elle combine l'analyse multi résolution (ARM) avec la POD standard pour construire une base de modes orthogonaux sans chevauchement de fréquence. Dans le cadre de l'ARM, l'analyse est effectuée par transformation en ondelettes discrètes de la matrice de corrélation temporelle $K[i, j] = \sum_m \sum_n u(m, n, i)u(m, n, j)$. Ceci permet d'isoler la

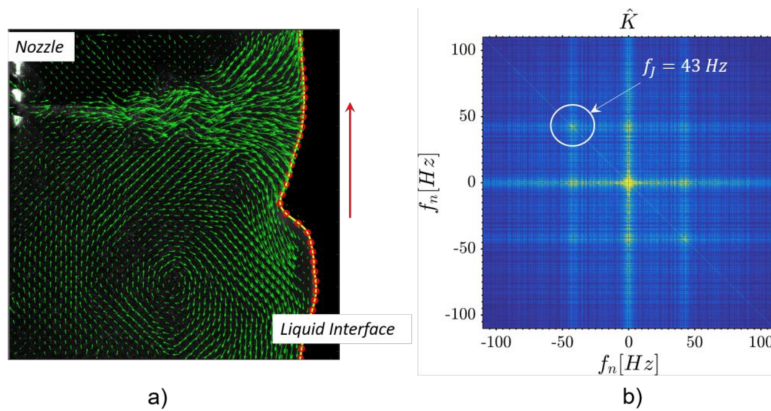


Figure 5: Exemple d'un instantané TR-PIV combiné avec un masquage dynamique de l'interface: résolution de vitesse 0,1 m/s. Résolution spatiale $\Delta x=0,2\text{mm}$, résolution temporelle $\Delta t=0.3\text{ms}$. b) Spectre de corrélation fréquentiel.

contribution des différentes échelles sur les spectres de la corrélation temporelle, qui présente typiquement un pic dominant ; un exemple de spectre de fréquence de corrélation est montré à la figure 5b. On y retrouve aussi un niveau significatif de contributions non corrélées dues au bruit aléatoire et à la turbulence. Cela donne une largeur de bande de fréquence limitée, centrée autour de la fréquence dominante pour les modes dominants et attribue des fréquences moins importantes aux modes les moins significatifs.

Le résultat est un ensemble de modes proches de l'harmonique, sans toutefois forcer la pureté spectrale comme dans la transformation de Fourier discrète classique (DFT) ou la décomposition en mode dynamique (DMD). Il permet ainsi de garder la convergence de la décomposition proche de l'optimale de la POD standard (voir [16] pour une comparaison entre ces décompositions). Les spectres du mode dominant sont considérés comme représentatifs de l'organisation globale de l'écoulement d'air et sont désignés ici sous le nom de Y_J .

4 Résultats

La Figure 6 montre l'épaisseur moyenne du film (à gauche) et l'amplitude de l'ondulation du film liquide final (à droite) pour un ensemble de 28 mesures, obtenues en variant la distance de séparation buse-substrat $\hat{Z}=Z/d$ (d l'ouverture de la buse) et la vitesse du jet. Le graphique de droite à la figure 5 montre que l'épaisseur moyenne du film dépend essentiellement d'un groupe sans dimension $\Pi_g = \Delta P_N d / \rho_l g Z^2$ appelé actuateur d'essorage. La corrélation adimensionnelle proposée est représentée par la ligne en pointillés. En revanche, l'amplitude de l'ondulation du film liquide montre une dépendance inattendue avec la distance de séparation tuyère-film, ce qui suggère que le phénomène n'est pas uniquement régi par la dynamique du film liquide, puisque cette dernière est seulement fonction de l'épaisseur du film.

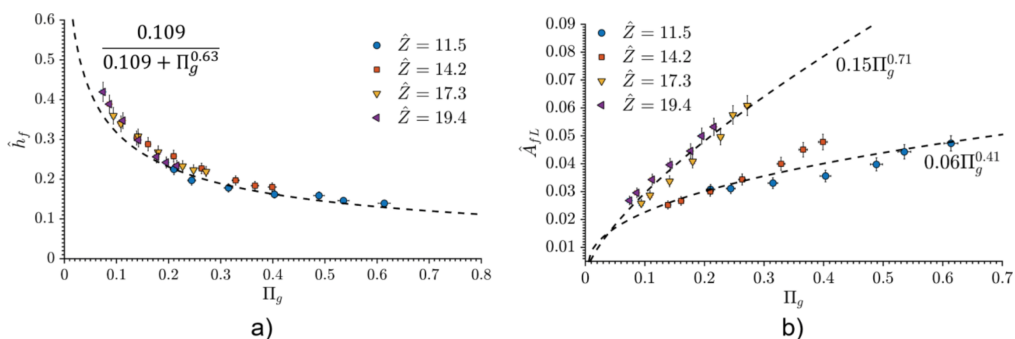


Figure 6: a) épaisseur moyenne du film liquide. b) amplitude crête à crête.

Une comparaison des spectres fréquentiels caractéristiques du jet d'air, du film liquide descendant de retour et du film liquide de revêtement final est présentée à la figure 7 pour six expériences menées avec le même Z/d mais en augmentant (de gauche à droite) la pression à la buse. Les conditions de l'essai sont rappelées à chaque graphique de la figure 7. Il est intéressant de noter que les spectres des trois quantités physiques étudiées se synchronisent à la même fréquence quand le paramètre adimensionnel d'essorage se situe en dessous d'une valeur critique (dans ce cas $\Pi_g \approx 0,27$). Au-dessus de ce seuil, le film liquide n'est plus capable de suivre le battement du jet.

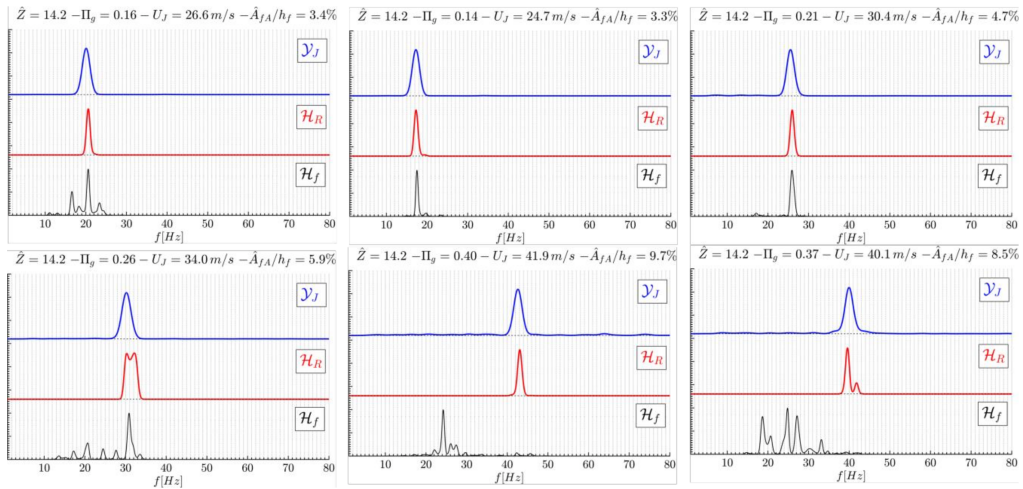


Figure 7: Comparaison de spectres fréquentiels caractéristiques : Y_J du jet d'air, H_R des ondes du film descendant et H_f de l'ondulation finale.

La figure 8 se rapporte à l'analyse mPOD d'un test typique. On y voit à gauche le champ de la vitesse d'air moyennée dans le temps, au centre les structures spatiales de deux modes mPOD caractéristiques et à droite le spectre fréquentiel de leur évolution temporelle respectif.

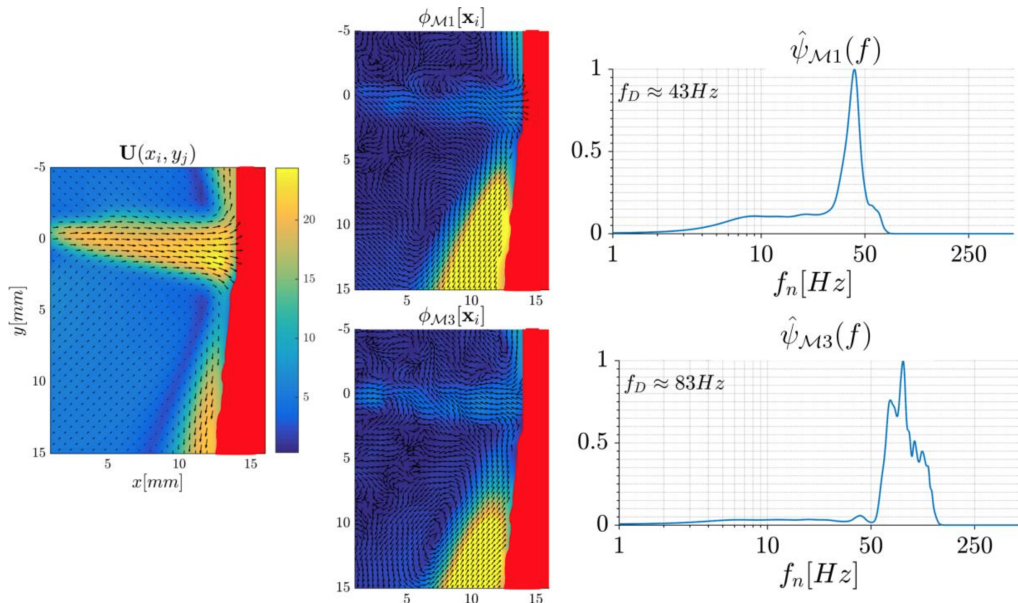


Figure 8: Résultats typiques de l'analyse mPOD d'un champ TR-PIV. À gauche champ moyenné, au centre deux structures spatiales de modes dominants avec leur spectre fréquentiel tracé.

Sommés au champ moyen, ces modes reproduisent l'oscillation à grande échelle du jet entretenue

par les grosses vagues de l'écoulement liquide retombant provoquées par l'essorage. En effet, celles-ci induisent une recirculation d'air qui attire périodiquement le jet vers le bas, comme cela se produit dans d'autres types d'oscillations temporelles de jets [24].

5 Conclusions et Perspectives

Le procédé d'essorage par couteau d'air est expérimentalement reproduit sur un montage de laboratoire. Le comportement instable du procédé est pour la première fois analysé en combinant simultanément la technique de l'absorption de lumière pour la mesure de l'épaisseur du film liquide, la fluorescence induite par laser pour le suivi du comportement de l'interface et enfin la PIV résolue en temps pour la déamination du champ de vitesse du jet gazeux.

Alors que l'épaisseur moyenne du revêtement final est uniquement contrôlée par un nombre adimensionnel dit actuateur d'essorage, l'amplitude des ondulations du film liquide reste fortement liée à la distance de séparation entre la buse et le substrat.

Dans des conditions d'essorage relativement faibles, la fréquence de l'ondulation est liée à la dynamique du jet de gaz qui oscille sous l'effet d'une rétroaction hydrodynamique du film liquide. Cette rétroaction est nettement mise en évidence par une nouvelle analyse mPOD des résultats TR-PIV. Elle est constituée de structures verticales à grande échelle produites par la chute des vaguelettes liquides de l'écoulement liquide de retombée produites dans la région d'impact. Une base de données expérimentale plus étendue de ce phénomène est actuellement en préparation (voir [24, 25]).

References

- [1] Cohen, C., *Modern Coating and Drying Technology*, New York: VCH, 1992.
- [2] TAPPI, *Air knife coating seminar notes*, Tech. rep., Atlanta: TAPPI Press (1981).
- [3] Butler, J.J., Beam, D.J., Hawkins, J.C., *The Development of Air Coating Control for Continuous Strip Galvanizing*, *Iron and Steel Engineer* 8 (1) (1970) 77–86.
- [4] Ellen, C. H., Tu, C. V., *An analysis of the jet stripping of molten metallic coatings*, in: 8th Australasian Fluid Mechanics Conference, 1983.
- [5] Thornton, J. A., Graff, H.F., *An analytical description of the jet finishing process for hot-dip metallic coatings on strip*, *Metallurgical Transactions B* 7 (4) (1976) 607–618.
- [6] Tu, C.V., Ellen, C. H., *Stability of liquid coating in the jet strip-ping process*, in: 9th Australasian Fluid Mechanics Conference, 1986.
- [7] Buchlin, J.M. *Modelling of gas jet wiping*. In: *Thin Liquid Films and Coating Processes*, VKI Lecture Series, von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1997.
- [8] Gosset, A., Mendez, M.A., Buchlin, J.-M. *Experimental Characterization of the Jet Wiping Instability*, in: *European Coating Symposium ECS2017*, Fribourg, Switzerland, 2017.
- [9] Mendez, M.A., Myrillas, K., Gosset, A., Buchlin, J.-M., *A Research Methodology to study the jet wiping process*, in: *European Coating Symposium ECS2015*, Eindhoven, The Netherlands, 2015.
- [10] Mendez, M.A., Buchlin, J.-M., *Oscillation of a Planar Gas Jet Impinging on a Deformable Wall*, *Symposium of VKI PhD Research*, von Karman Institute 2016.
- [11] Mendez, M.A., Gosset, A., Myrillas, K., Buchlin, J.-M., *Numerical Modal Analysis of the Jet Wiping Instability*, in: *European Coating Symposium ECS2017*, Fribourg, Switzerland, 2017.
- [12] Pfeiler, C., Ebi, W., Reiss, G., Reiner, C.K., Angeli, G., Kharicha, A., *Investigation of the gas-jet wiping process- two phase large eddy simulations elucidate impingement dynamics and wave formation on zinc coatings*, *Steel Research International* 88(9), 2017.
- [13] Ebi, W., Pfeiler, C., Reiss, G., Ecker, W., Riener, C.K., Angeli, G., *LES-VOF Simulation and POD analysis of the gas-jet wiping process in continuous galvanizing lines* 82(2), *Steel Research International*, 2018.

- [14] Mendez, M.A., Balabane, M., Buchlin, J.-M., Multi-scale Proper Orthogonal Decomposition (mPOD), in: International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2017).
- [15] Mendez, M.A., Scelzo, M.T., Buchlin, J.-M., Multi-scale Modal Analysis of an Oscillating Impinging Gas Jet, *Exp Therm Fluid Sci* 91:256-276, 2018.
- [16] Mendez, M.A., Balabane, M., Buchlin, J.-M., Multi-scale Modal Analysis of Complex Fluid Flows, preprint available in arXiv:1804.09646.
- [17] Mendez, M.A., Nemeth, L., Buchlin, J.-M., Measurement of Liquid Film Thickness via Light Absorption and Laser Tomography, *EPJ* 114(02072):1-11, 2016.
- [18] Mendez, M.A., Scheid, B., Buchlin, J.-M., Low Kapitza Falling Liquid Films, *Chem. Eng Sci*, 170:122-138, 2017.
- [19] Gosset, A., Measurement Techniques for Unstable Film Flows, in: VKI Lecture Series on Thermo-Hydraulic Instabilities, von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2006.
- [20] Mendez, M.A., Enache, A., Gosset, A., Buchlin, J.-M. Experimental Characterization of the Jet Wiping Process, *EPJ* 180(02064): 1-13, 2018.
- [21] Mendez, M.A., Raiola, M., Masullo, A., Discetti, S., Ianiro, A., Theunissen, R., Buchlin, J.-M., POD-based background removal for Particle Image Velocimetry, *Exp Therm Fluid Sci*, 80 :181-191, 2017.
- [22] Shafer, R., What is a Savitzky-golay filter? *IEEE Signal Process Mag.*: 111-117, 2011.
- [23] Thielicke, W., Stamhuis, E.J., PIVlab, Towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in matlab. *Journal of Open Research Software* 2(1):e30, 2014.
- [24] Gosset, A., Mendez, M.A., Buchlin, An Experimental Analysis of the Stability of the Jet Wiping Process: Part I: Characterization of the Coating Uniformity (in preparation).
- [25] Mendez, M.A., Gosset, A., Buchlin, J.-M. An Experimental Analysis of the Stability of the Jet Wiping Process: Part II: Modal Analysis of the Gas Jet- Liquid Film interaction (in preparation).