

Corrélation efforts/sillage proche sur un cylindre tracté en présence d'une surface libre

R.D. RAJAONA^a, C.D. RANDRIANANTENAINA^a

a. Laboratoire Ondes Et Milieux Complexes (LOMC), 53 rue de Prony, 76600 LE HAVRE

Résumé :

Un cylindre ($D=0.04$ m; $l/D=16$) est remorqué selon un mouvement accéléré/décéléré dans une cuve de visualisation remplie d'eau. Les effets des tourbillons sont observés pour dix valeurs de l'accélération et de la décélération a dans la gamme $[0.06 - 0.15 \text{ ms}^{-2}]$ correspondants à des nombres d'accélération compris entre 4.10^6 et 6.10^6 . Les nombres de Reynolds basés sur la vitesse maximum varient entre 0 et 14000. On mesure les forces de traînée et portance. Une caméra CCD embarquée permet de visualiser le sillage. Les effets de surface libre sont étudiés en faisant varier le paramètre de profondeur d/D où d est la distance entre le dessus du cylindre principal et la surface libre de telle sorte que les nombres de Froude varient de 0.3 à 1.2. Les efforts de portance sont analysés en corrélation avec le profil de la surface libre et la configuration du sillage proche. Ce dernier est visualisé et le champ de vitesse est mesuré par une technique PIV. Pour les faibles valeurs de d/D le déferlement de la vague d'accompagnement est analysé par observation des champs de vitesses du sillage proche.

Abstract :

A cylinder ($D=0.04$ m; $l/D=16$) is towed following a uniformly accelerated and decelerated motion in a visualization water tank. The vortex effects are observed for acceleration or deceleration values in the range $[0.06 - 0.15 \text{ ms}^{-2}]$. The related acceleration number ranges from 4.10^6 and 6.10^6 . The Reynolds numbers based on the maximum velocity are varied from 0 to 14000. The drag and lift forces are measured. The cylinder wake pattern is visualized by an embarked CCD camera. The free surface effects are studied by varying the depth parameter d/D where d is the FS to the main cylinder top distance in such a way that the Froude numbers based upon the instantaneous velocity lie in the range 0.3 to 1.2. The lift force is analyzed in the light of the free surface profile and the near wake pattern. The near wake pattern is analyzed either by a visualization technique or a velocity field obtained by a PIV method.

Mots clefs : surface libre, tourbillon, traînée, portance, déferlement, sillage, cylindre

1 Introduction

Les phénomènes d'interaction entre une surface libre et un cylindre fixe ou en mouvement ont été largement étudiés dans le passé. L'interaction est responsable de diverses modifications dans les efforts subis par le cylindre en fonction de son degré d'immersion ou son orientation par rapport à l'écoulement typique d'un environnement marin. L'étude de l'écoulement en laboratoire peut alors donner des indications sur une meilleure compréhension de la dynamique des tourbillons et forces appliquées sur le corps [1][2][3](Sarpkaya 1963, Tatsuno 1971, Sulmont 1987). De plus cette interaction entre un cylindre et une surface libre concerne beaucoup d'applications dans l'ingénierie marine comme le décrivent Sheridan 1995, Oshkai 1999, Reichl 2005 [4][5][6]. Ce papier est la suite de travaux précédents [7][8][9], il présente une étude expérimentale de l'interaction entre un cylindre rigide tracté sous la surface libre (SL) et les effets de celle-ci sur les paramètres qui gouvernent les efforts appliqués. Le cylindre est équipé d'un capteur de force de type KISTLER puis entraîné dans un mouvement uniformément accéléré puis décéléré de manière à accentuer les effets des tourbillons et rendre plus aisée l'observation des phénomènes d'interaction ([8] et [9] Rajaona 2005, 2009). Il est bien connu que pour un écoulement uniforme et sur une plage du nombre de Reynolds allant de 150 à 320000 le lâcher de tourbillons est caractérisé par le nombre de Strouhal défini par fD/V qui est voisin de 0.2, où f est la fréquence de lâcher, D le diamètre et V la vitesse de l'écoulement. Le lâcher de tourbillon provoque une fluctuation des forces de pression et une oscillation des forces de portance à la fréquence f [2]. Cependant lorsque la structure est proche de la surface libre la fréquence des oscillations augmente de telle sorte que le nombre de Strouhal peut atteindre 0.3 ou 0.4 comme cela est montré Rajaona

(2008)[9]. Cela est la conséquence de l'interaction avec la surface libre, le transfert de vorticité de sillage vers SL. Les vagues d'accompagnement peuvent déferler comme cela a été montré par Duncan [10](1981) sur un hydrofoil tracté sous la surface libre. Les nombres de Reynolds pour cette étude se situent dans la plage de 0 à 14000. La force de portance dépend très largement de l'immersion du cylindre. On utilise les images issues de la visualisation et de l'évolution des forces appliquées sur le cylindre au même instant. Une caméra CCD embarquée permet d'enregistrer une séquence vidéo de l'évolution du sillage proche et du profil de SL. On fait varier ainsi la profondeur d'immersion d/D de 0.37 à 5. Nous discuterons plus particulièrement des résultats concernant des coefficients de portance et de traînée et de la longueur de la zone de recirculation L/D . Enfin une technique PIV permet de faire des observations quantifiées du sillage.

2 Montage expérimental

L'ensemble du montage est constitué d'un cylindre long de 0.637 m, d'un diamètre de 0.04 m placé horizontalement sous la surface libre d'une masse d'eau au repos contenue dans une cuve de visualisation de dimensions 2m x 1m x 1m. Le cylindre est équipé à une extrémité d'un capteur de force KISTLER à trois composantes dont deux seules sont utilisées pour mesurer les forces horizontale et verticale exercées par le fluide sur le barreau au cours du mouvement. Le mouvement est uniformément accéléré puis décéléré pour différentes valeurs de l'accélération correspondant à des nombres d'accélération variant de $4 \cdot 10^6$ et $6 \cdot 10^6$. Ce mouvement est obtenu par un robot permettant l'asservissement en vitesse de la maquette.

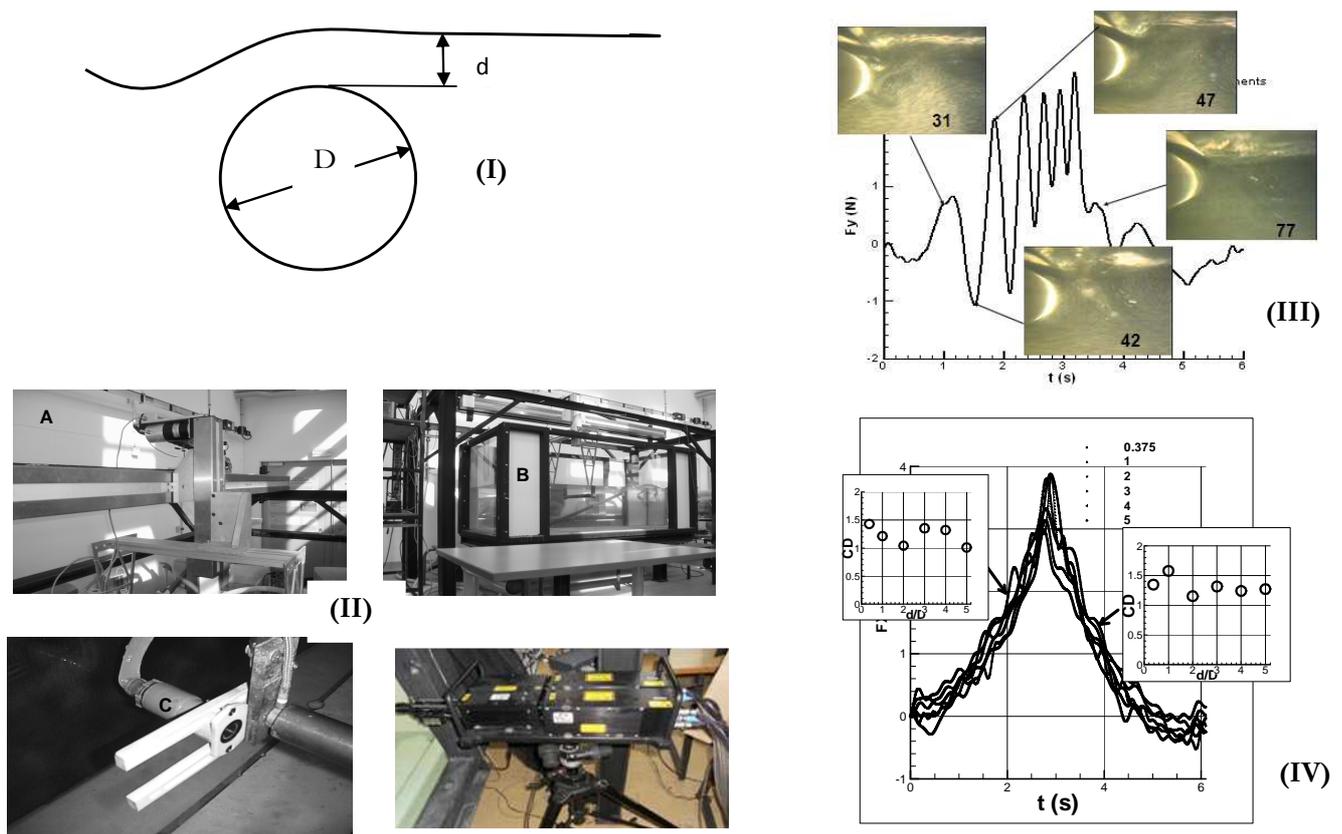


FIG. 1 – (I) Configuration  tudi e ; (II) Montage expérimental A : Robot ; B : Cuve ; C Caméra embarquée D Deux têtes Lasers Quantel pour la PIV et (III) Sillages à divers instants correspondant aux numéros des images. La configuration du sillage proche lors d'un maximum ou d'un minimum de F_y est observable. La très forte distorsion du profil de surface libre est observable sur les images. (IV) Allure de la force de traînée pour les 6 profondeurs d'immersion $0.375D$, $1D$, $2D$, $3D$, $4D$, $5D$. $F_x(t)$ croît jusqu'à un maximum puis décroît.

3 Résultats

3.1 Amplitude et fréquence de la force de portance

Le coefficient de portance est défini par la formule suivante :

$$CL_{max} = Fy_{max} / (1/2) \cdot \rho L D \cdot V_0^2 \quad (a); \quad \tau = \frac{tV_0}{D} \quad (b); \quad Ra = aD^3 / \nu^2 \quad (c) \quad (1)$$

Où Fy_{max} représente le maximum local de $Fy(t)$ et V_0 la vitesse maximale pour l'accélération de 0.15 m.s^{-2} . Ce coefficient est représenté en fonction du paramètre adimensionnel τ .

Une allure typique de la force transverse est représentée en fig. 1 (III) lorsque le cylindre est entraîné avec $a = 0.15 \text{ m.s}^{-2}$. On observe des maxima et des minima ainsi qu'une moyenne « mobile », c'est-à-dire évoluant au cours du mouvement. On se propose de caractériser l'amplitude et les « fréquences » de la force de portance. Le coefficient Cy est représenté par les valeurs des maxima et minima des courbes pour trois profondeurs d'immersion $d/D = 3, 1, 0.375$. De même une moyenne mobile des efforts de portance est observable celle-ci permet l'observation de la perte de symétrie de $Cy(t)$.

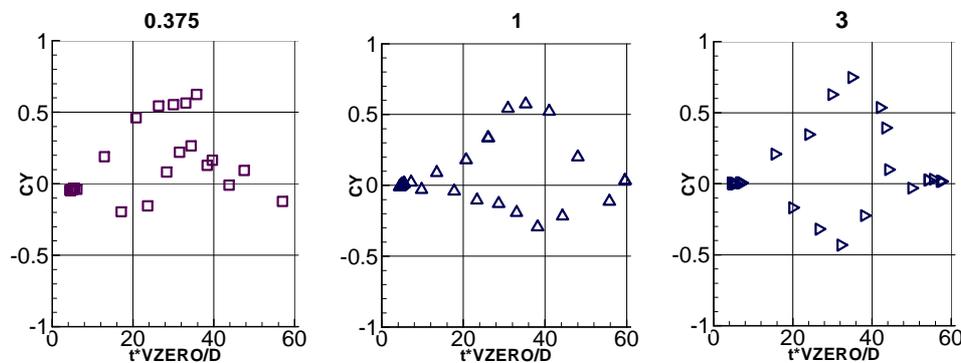


FIG. 2.a – Evolution de la force de portance en fonction du paramètre d'immersion $d/D = 0.375, 1, 3$. On observe l'effet de SL sur les maxima de Cy . Notamment la perte de la « symétrie » des oscillations. L'allure complète de Cy est celle de la Fig. 1.III

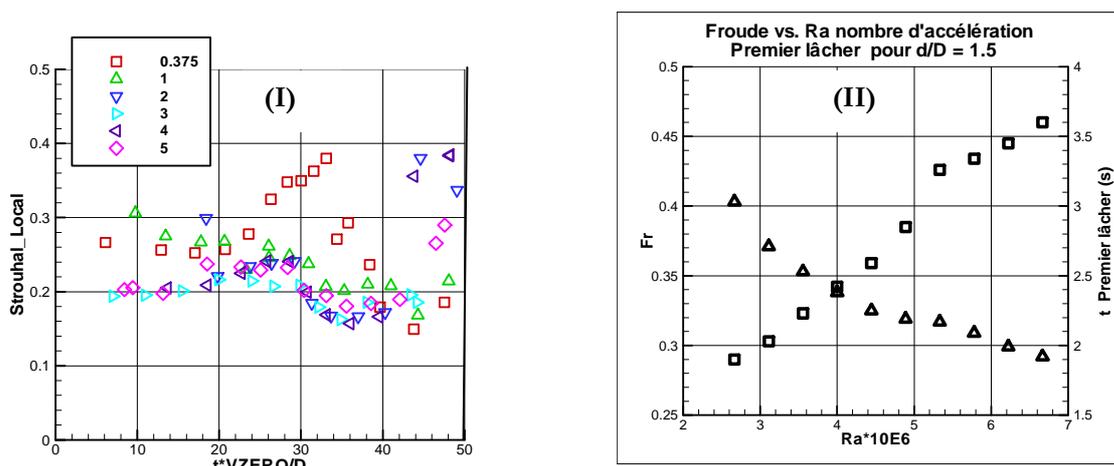


FIG. 2.b – (I) Evolution du nombre de Strouhal local pour $d/D = 0.375, 1, 2, 3, 4$ et 5 et $a=0.15 \text{ m.s}^{-2}$. On note que ce nombre évolue au voisinage de la valeur 0.2 pour les profondeurs supérieures à 1 . La proximité de SL a pour d'augmenter les valeurs de St qui peut prendre des valeurs voisines de 0.4 . (II) Nombre de Froude (symbole carré) relatif à l'apparition du premier lâcher pour dix valeurs du nombre d'accélération voir formule (1-c).

Pour analyser la « fréquence » des oscillations nous représentons la force de portance en fonction du temps adimensionnel τ et pour un nombre d'accélération de $6.67 \cdot 10^6$, nous mesurons la distance parcourue entre deux maxima ou deux minima successifs de la force transversale. L'écart entre deux maxima ou minima successifs permet de calculer un rapport que nous baptisons Strouhal local. On convient donc de

définir ce nombre de Strouhal pour caractériser la « fréquence » des oscillations. Pour automatiser ce calcul on effectue pour cela les opérations suivantes. La dérivation numérique de la force de portance permet d'en repérer les extrema en déterminant ses zéros. Un fois ceux-ci repérés, on calcule le déplacement du cylindre entre deux maxima ou minima successifs. Cette différence est alors adimensionnée au diamètre du cylindre. On a donc de cette manière défini un nombre de Strouhal local au sens où il est défini pour des instants correspondants aux maxima ou minima de C_y . Les résultats sont représentés sur les courbes figure 2.b pour cinq profondeurs d'immersion. On constate que ce « Strouhal » est en moyenne voisin de 0.2 pour $d/D = 5$. Lorsque $d/D = 0.375$ l'effet de SL est maximal; ce qui se traduit par une dispersion et une augmentation de ce Strouhal local. Il convient de remarquer que dans le cas d'un mouvement uniforme du cylindre les précédentes valeurs sont égales au nombre de Strouhal, comme cela a été montré dans Rajaona (2008).

Pour explorer plus finement les effets du caractère instationnaire de l'écoulement et voir s'il accentue sensiblement les effets des tourbillons et ainsi rendre plus facile leur observation, comme cela est montré en partie sur la Fig.1. (III), nous avons fait varier l'accélération de 0.06 à 0.15 $m.s^{-2}$. Cela permet d'explorer les nombres de Froude pour lesquels le premier lâcher de tourbillons a lieu voir Fig. 2.B(II). On constate qu'une augmentation de l'accélération a pour effet de provoquer une apparition anticipée du premier lâcher de tourbillons. Nous constatons aussi ce phénomène par la mesure de la longueur de la zone de recirculation comme cela sera analysé sur l'effet de surface libre dans le paragraphe 3.2 Fig. 3.

La force de traînée est illustrée par la Fig. 1 (IV). $F_x(t)$ est continument croissante jusqu'à atteindre un maximum pour la vitesse maximum du cylindre puis la force décroît. Chaque phase (accélération, décélération) peut être caractérisée par un coefficient de C_M de masse ajouté et un coefficient C_D défini par le modèle de l'équation (2) [3]. Ce dernier coefficient prend des valeurs comprises entre 1. et 1.5.

$$F_x(t) = C_M l \frac{\pi D^2}{4} a + C_D \frac{1}{2} \rho l D V^2(t) \quad (2)$$

On montre que ce C_D est plus sensible à l'effet de surface libre pendant la phase d'accélération.

3.2 Longueur de la zone de recirculation

La Fig. 1 (III) montre un jet qui apparaît dans le gap au dessus du cylindre lors du déferlement de la vague d'accompagnement. Par ailleurs, cette vague déferle en même temps que la force de portance passe par un maximum ou un minimum. Une manière d'étudier les effets de surface libre est de mesurer L/D la longueur de la zone de recirculation pour différentes profondeurs d'immersion. La Fig. 3. montre que L/D est quasiment linéaire en fonction du temps et donc du nombre de Reynolds instantané. Sa pente représente la rapidité du processus de déstabilisation de la zone de recirculation, plus elle est grande plus le premier lâcher survient tôt. L'extrémité inférieure informe sur l'instant de la séparation de l'écoulement, la supérieure correspond à l'instant du premier lâcher et donc le nombre de Froude auquel le lâcher de tourbillon survient.

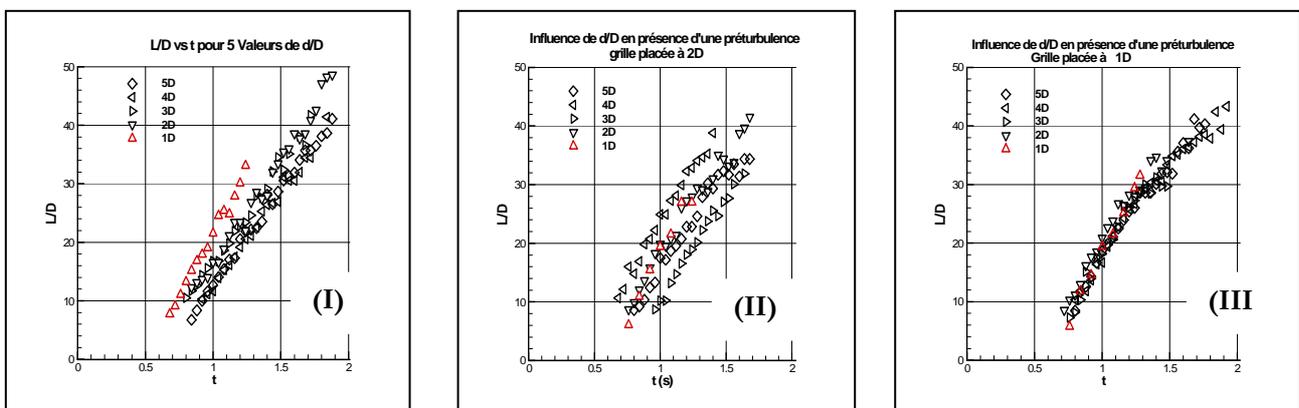


FIG. 3 – Evolution de la longueur de la zone de recirculation pour $d/D = 1, 2, 3, 4$ et 5 . L/D est étudiée (I) avec la seule turbulence présente dans la cuve, (II) avec une grille de pré turbulence placée à $2D$ du cylindre, (III) avec une grille de pré turbulence placée à $1D$ du cylindre. On note que l'effet combiné de la surface libre et de la pré turbulence retarde la séparation de l'écoulement et anticipe l'instant du premier lâcher.

On observe sur la figure 3 (I) que la surface libre accélère le processus puisque la courbe rouge est plus pentue que les autres. De même sur la figure 3 (III) le regroupement des courbes indique l'existence d'un comportement unique de l'écoulement quant à l'alimentation de la zone de recirculation en vorticité. Dans tous les cas, la présence de la surface libre crée une anticipation du premier lâcher.

3.3 Déferlement de la vague d'accompagnement et champ de vitesse

Pour illustrer l'évolution du champ de vitesses derrière le cylindre une technique PIV a été mise en œuvre. La caméra est embarquée. Le montage PIV est constitué de 2 têtes laser, Twins BSL, BIG SKY Laser Quantel qui génèrent les flashes lorsqu'elles sont alimentées par 2 boitiers de charge, ICE 450, BIG SKY Laser Quantel. Les flashes sont synchronisés la prise de vue par les impulsions générées par un boitier R&D Vision EG+ relié à l'ordinateur de commande. L'écoulement est ensemencé par des particules de RILSAN d'une taille moyenne de quelques microns. Ces particules sont illuminées et filmées par une caméra PULNIX Dual Tap AccuPIXEL, RM- 6740 CL d'une résolution de 640 x 480 pixels munie d'un objectif de 25 mm. La lentille utilisée a une distance focale de 30 cm environs afin de permettre une netteté des images des particules pour un plan laser au milieu de la cule de visualisation. Le traitement du champ de vitesse est effectué par le logiciel DirectPIV.

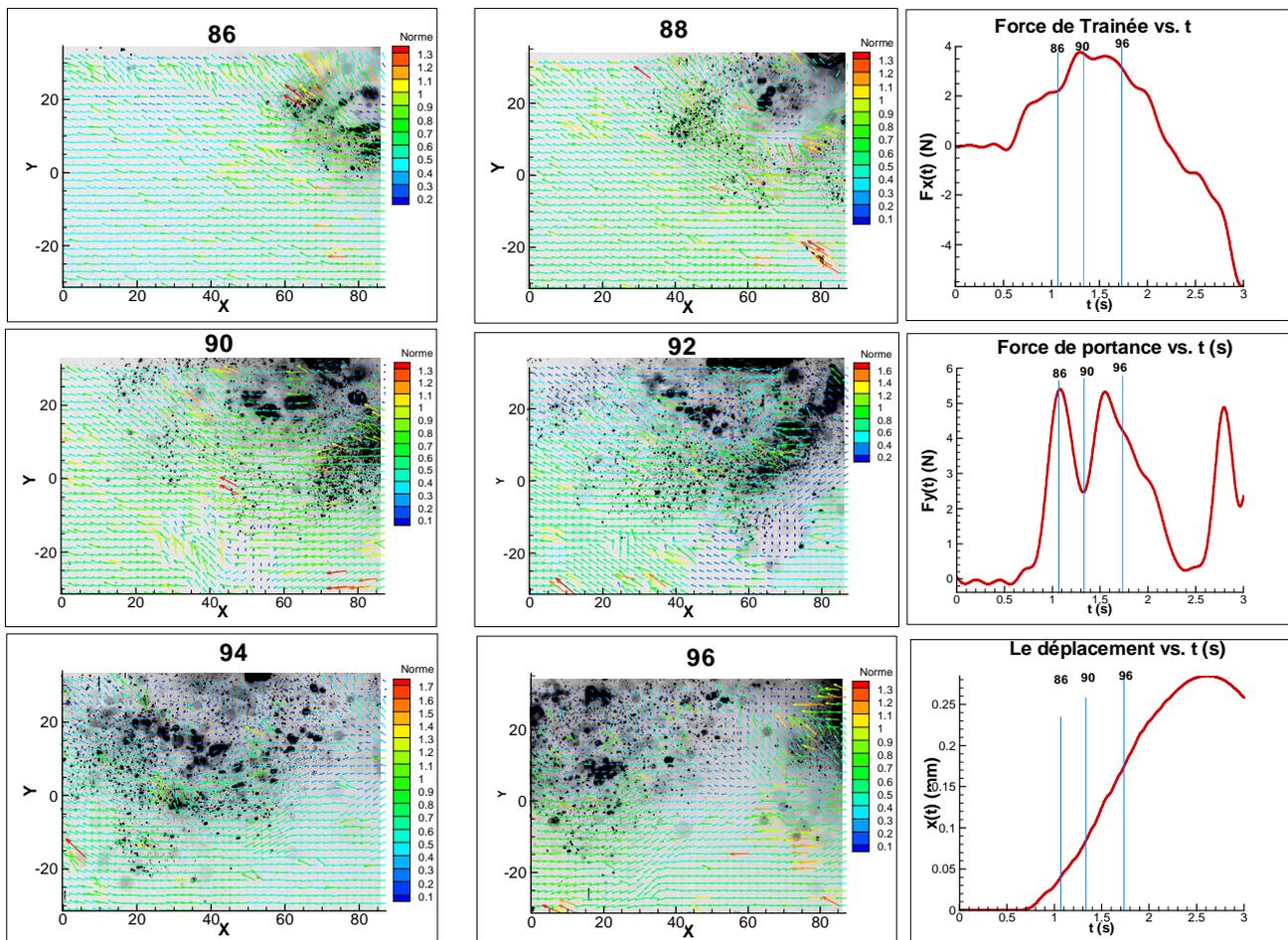


FIG. 4. Champ de vitesse et efforts appliqués sur le cylindre dans le cas de la phase d'accélération en présence d'un déferlement de la vague d'accompagnement pour un mouvement oscillatoire caractérisé par une amplitude de 260 mm, une fréquence de 0.250 Hz un paramètre d'immersion de d/D de 0.7. Les numéros 86 à 96 correspondent aux instants marqués par les lignes verticales. Le champ est superposé à l'image utilisée lors du calcul du champ. Les points noirs représentent les bulles résultant du déferlement. La couleur des vecteurs vitesses est associée à leur norme.

La figure 4 illustre le champ de vitesse derrière le cylindre lors d'un déferlement de la vague d'accompagnement et pendant une phase d'accélération pour une expérience où le cylindre effectue un aller retour. La caméra embarquée met nettement en évidence les évolutions d'une zone turbulente où

apparaissent plusieurs grosses bulles qui sont convectées par l'écoulement. Au cours de cette excursion la zone est le siège de la diffusion qui se traduit par un élargissement. Au cours de ce processus les bulles de grandes tailles sont scindées en plusieurs petites. Les courbes rouges sur la droite de la Fig.4 montrent l'évolution de la force de traînée (I), la force de portance (II) et le mouvement du cylindre (III). Pour faciliter l'interprétation on a superposé au champ de vitesse mesuré une photographie de l'écoulement. La corrélation du champ de vitesse aux forces $F_x(t)$ et $F_y(t)$ s'obtient en relevant les numéros des paires analysées et les dates auxquelles elles sont traitées et ces dates sont représentées par les verticales bleues. La vitesse moyenne dans le jet subit de très fortes variations au cours du déferlement.

4 Conclusions et perspectives

Nous avons présenté une technique expérimentale adaptée à l'étude de la corrélation entre le sillage proche et les efforts appliqués sur un cylindre en mouvement instationnaire. Nous avons montré que les maxima de la force de portance permettent de caractériser les coefficients C_L qui varient dans la gamme 0 à 0.6. De même l'introduction du nombre de Strouhal local permet de caractériser les fréquences des oscillations. Ce nombre prend des valeurs voisines de 0.2 à profondeur modérée $d/D = 3, 4, 5$. Cependant la proximité de la surface libre peut lui conférer des valeurs avoisinant 0.4. Les caractéristiques cinématiques du sillage proche ont pu être étudiées en faisant appel à une caméra embarquée dans une chaîne de mesure PIV. Malgré les difficultés de mises en œuvre, il est possible d'observer la capture de bulles de taille moyenne et leur convection/diffusion au cours du processus. De même la vitesse moyenne dans le jet au dessus du cylindre subit de très fortes variations au cours du déferlement.

5 Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Région Haute Normandie pour son soutien financier lors de la réalisation de ces travaux dans le cadre du contrat RHYNO du CPER-2011.

Références

- [1] TATSUNO, M. et TANEDA, S. 1971, Visualization on the unsteady flow past cylinders and plates decelerated from steady speed, J. of the Phys. Soc. Japan , vol.31n°4, October 1971.
- [2] SARPKEYA, T., GARISSON, C.J. 1963, Vortex formation and resistance in unsteady flow .Transaction of ASME n°16.Mars 1963.
- [3] SULMONT, P. et RAJAONA, D.R. 1987, Etude expérimentale de la dynamique d'un cylindre de révolution en décélération ou en accélération avec vitesse initiale nulle dans un fluide au repos.1ères Journées de l'hydrodynamique 16 au 18 Février- Nantes 1987
- [4] SHERIDAN, J., LIN J.C., ROCKWELL, D., 1995, Metastable states of a cylinder wake adjacent to a free surface, Physics of Fluids 7, pp.2099-2101.
- [5] REICHL, P., HOURIGAN, K., and THOMPSON, M.C. 2005, Flow past a cylinder close to a free surface. J. Fluid Mech. , vol.533, pp.269-296.
- [6] OSHKAI, P. & ROCKWELL, D., 1999, Free surface wave interaction with a horizontal cylinder, Journal of Fluids and Structure, 13, 935-954.
- [7] RAJAONA, D.R., RAKOTONDRAJAONA, L., LHOR, A. 2005, Etude expérimentale du déferlement glissant derrière un cylindre en mouvement accéléré/décéléré sous la surface libre.10èmes journées de l'hydrodynamique- Nantes, 7,8 et 9 mars.
- [8] RAJAONA, D.R., RAMANAKOTO, T., RASOLOMANANA, E., RAKOTONDRAJAONA, L. 2011, Hydrodynamique de deux cylindres horizontaux tractés en présence d'une surface libre. 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon 29 août au 2 septembre.
- [9] RAJAONA, R.D., RAKOTONDRAJAONA, L. et RASOLOMANANA E., 2008, On the lift forces acting on a cylinder accelerating and decelerating beneath a free surface, Proceedings, IUTAM Symposium on Fluid-Structure Interaction in Ocean Engineering, Hamburg University of Technology, Hamburg, Springer Verlag, pp. 205-216
- [10] DUNCAN, J.H., 1981, An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil, Proceedings R. Soc. London, 126, 331-348.