

Hydrodynamique de deux cylindres horizontaux tractés en présence d'une surface libre

R.D. RAJAONA^a, T. RAMANAKOTO^a, E. RASOLOMANANA^b, L. RAKOTONDRAJAONA^b

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

b. Laboratoire de Géophysique (LGP), Antananarivo, ANTANANARIVO (MADAGASCAR)

Résumé :

Un cylindre principal ($D=0.04$ m; $L/D=16$) placé derrière un cylindre secondaire ($\delta = 0.002$; $L/\delta=340$) est remorqué et l'ensemble est partiellement ou totalement immergé. Le mouvement est accéléré/décéléré dans une cuve de visualisation remplie d'eau pour accentuer les effets des tourbillons. Les nombres de Reynolds basés sur la vitesse maximum varient entre 0 et 14000 pour une valeur de l'accélération de 0.150 m/s². 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. Les efforts de portance sont caractérisés pour une configuration non symétrique en corrélation avec le profil de la surface libre et la configuration du sillage proche. La configuration symétrique correspond au cas « totalement ou partiellement immergé ». Les effets d'interférence sont analysés en fonction de B/D où B désigne la distance entre les cylindres.

Abstract :

A main cylinder ($D=0.04$ m; $L/D=16$) placed past a secondary one ($\delta = 0.002$; $L/\delta=340$) is towed; the set is totally or partially immersed. The motion is uniformly accelerated and decelerated in a visualization water tank in order to enhance the vortex effects. The Reynolds numbers based on the maximum velocity are varied from 0 to 14000 for an acceleration value of 0.15 m.s⁻². The drag and lift forces are measured. The main 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. The lift force is analyzed in the light of the free surface profile and the near wake pattern for a non symmetric arrangement of the cylinders. The symmetric arrangement is used to study the partially immersed cylinders case. The interference effects are studied in terms of B/D where B is the distance between the cylinders.

Mots clefs : interférence, cylindre, sillage, interaction, surface libre, portance.

1 Introduction

Les phénomènes d'interférence entre écoulements ont été largement étudiés. L'interférence est responsable de diverses modifications dans les efforts lorsque plus d'un cylindre sont placés dans l'écoulement. L'étude de l'écoulement autour de deux cylindres peut alors donner des indications sur une meilleure compréhension de la dynamique des tourbillons et forces appliquées sur un ensemble plus complexe [1][2][3](Bearman 1973, Zdravkovich 1988, Rockwell 1998). De plus l'interaction entre un cylindre et une surface libre concerne beaucoup d'applications dans l'ingénierie marine comme le décrivent Malavasi 2007, Oshkai et al. 1999, Price, 1976 [4][5][6]. Ce papier est la suite de travaux précédents [7][8][9], il présente une étude expérimentale de l'interférence entre deux cylindres rigides tractés sous la surface libre (SL) ou coupant cette dernière. Le cylindre aval est équipé d'un capteur de force de type KISTLER. Les cylindres sont entraînés dans un mouvement uniformément accéléré puis décéléré de manière à accentuer les effets des tourbillons et rendre plus aisée l'observation des phénomènes d'interférence ([8] et [9] Rajaona 2005, 2009). Dans le cas d'un cylindre isolé 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 un 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 [7]. 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 aval. Notre analyse est centrée sur les effets du petit cylindre. On utilise les images issues de la visualisation et de l'évolution des forces appliquées sur le cylindre au même instant. Le sillage du cylindre amont impacte le cylindre aval et modifie les efforts appliquées. Une caméra CCD embarquée permet d'enregistrer quand cela est possible 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 5 à 0 pour le cas totalement immergé et d/D de -1 à 0 pour le cas partiellement immergé. Nous discuterons plus particulièrement des résultats concernant la longueur de la zone de recirculation L/D et les coefficients de portance sur deux configurations particulières, « non symétrique - compl tement immergé » et « symétrique compl tement ou partiellement immergée ».

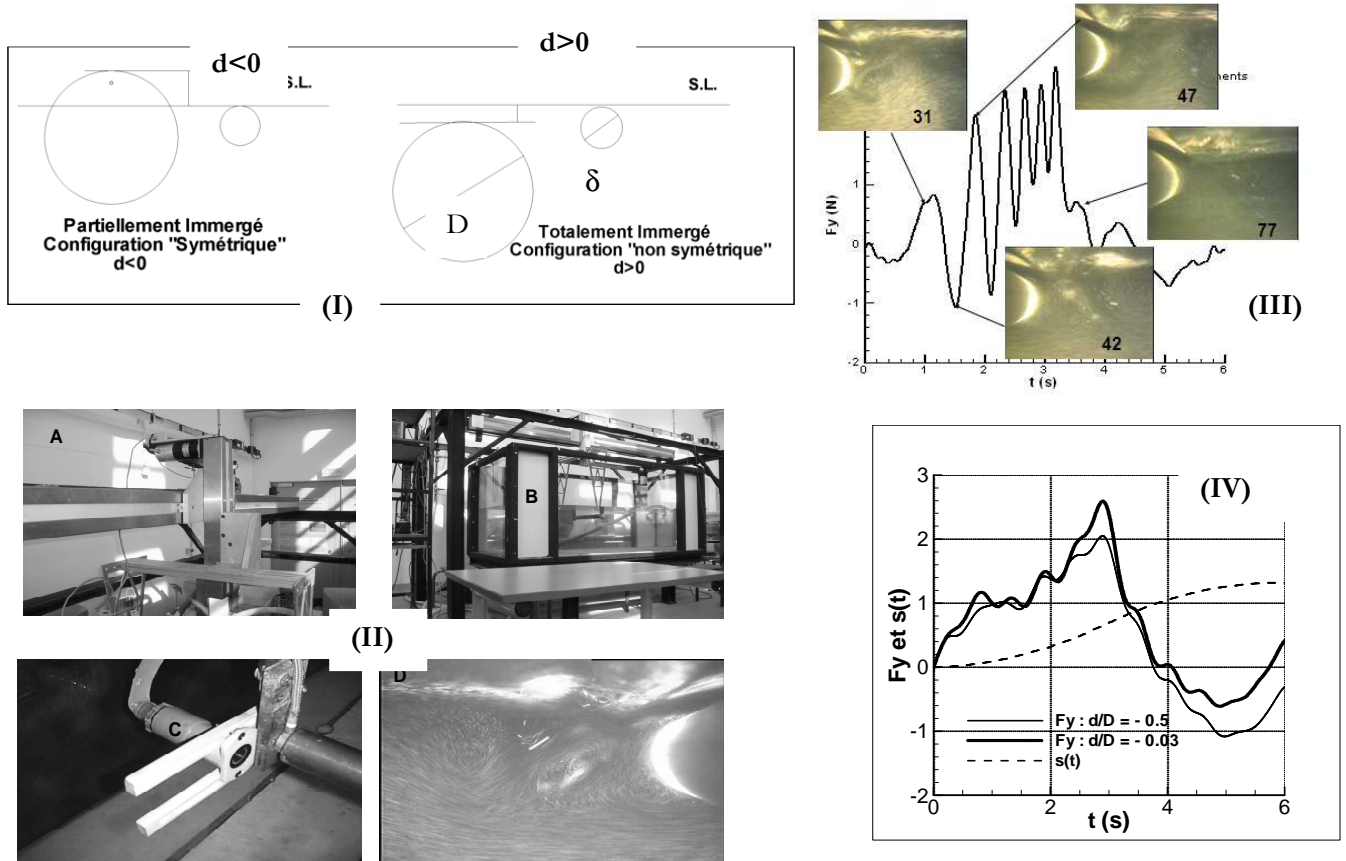


FIG. 1 – (I) Configurations  tudi es ; (II) Montage expérimental A : Robot ; B : Cuve ; C Caméra embarquée et (III) Sillages à divers instants correspondants aux numéros des images. La configuration du sillage proche lors d'un maximum ou d'un minimum de F_y est observable. Le profil de surface libre est détaillé en Fig. 5. (IV) Allure de la force de portance en configuration partiellement immergée.

2 Configuration non symétrique et compl tement immergée

Les effets instationnaires sur le cylindre dépendent des mouvements propres du cylindre et de la configuration du sillage proche. Le paramètre B représentant la distance qui sépare les deux cylindres permet l'étude de l'interférence. B varie de $1D$   $3D$. Nous définissons les coefficients de portance et de traînée par les formules (1). B permet d'étudier les effets d'interférence pour différentes profondeurs d'immersion :

$$C_{L_{max}} = F_{y_{max}} / (1/2) \cdot \rho L D \cdot V_0^2 \quad \text{et} \quad C_{d_{max}} = F_{x_{max}} / (1/2) \cdot \rho L D \cdot V_0^2 \quad (1)$$

2.1 Caractérisation de la force de portance

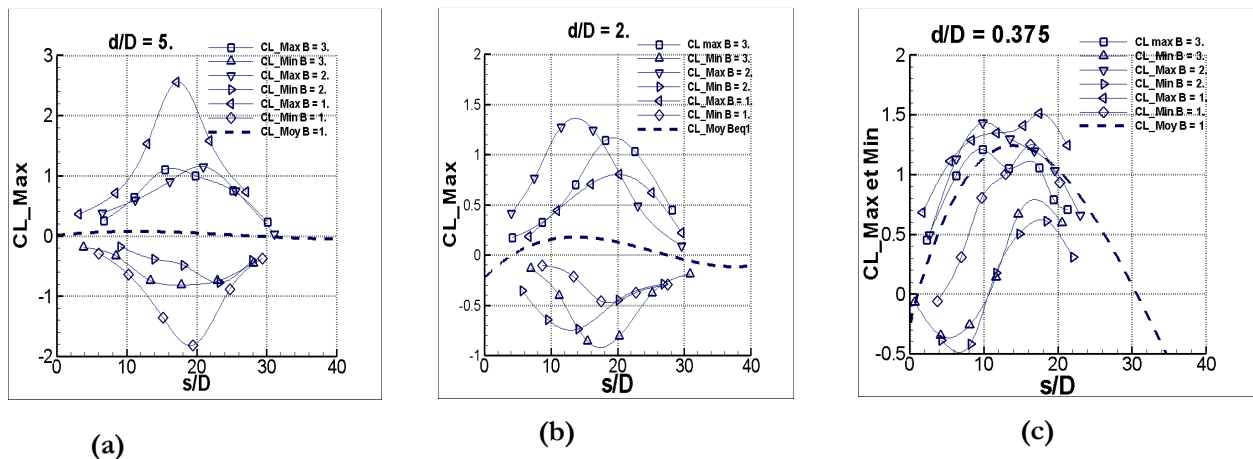


FIG. 2 – Maxima et Minima de la force de portance en fonction de s/D pour trois valeurs de d/D : 5 (a), 2(b), 0.375 (c) et pour trois valeurs de B/D : 3 (symbole carré, et triangle haut) ; 2 (triangle bas et triangle droite) ; 1 (triangle gauche et losange).

Une allure typique de la force transverse est représentée en fig. 1 (III) lorsque le ou les cylindres sont totalement immergés. 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. Nous avons représenté sur la figure 2 les enveloppes des maxima et minima des courbes pour trois profondeurs d’immersion $d/D = 5, 2, 0.375$. De même la moyenne mobile des efforts de portance est représentée en fonction de s/D pour ces trois profondeurs par les courbes en pointillés. Pour analyser la « fréquence » des oscillations nous représentons la force de portance en fonction du déplacement relatif, nous mesurons l’écart entre deux rapports D/s successifs où s est la position du cylindre à un maximum de la force transversale. Ces écarts sont notés CL_Max entre deux maxima successifs, puis CL_Min entre deux minima successifs. Il convient de remarquer que dans le cas d’un mouvement uniforme du cylindre les valeurs prise par ces deux écarts sont égales au nombre de Strouhal, comme cela a été montré dans Rajaona (2008). Les résultats sont représentés sur les courbes figure 3 pour trois profondeurs d’immersion et 3 positions du cylindre amont. On constate que ce « Strouhal » est en moyenne voisin de 0.2 pour $d/D = 5$. Lorsque $d/D = 0.375$ l’interférence se rajoute à l’effet de SL ; ce qui se traduit par une dispersion et une augmentation de ce Strouhal autour de 0.3.

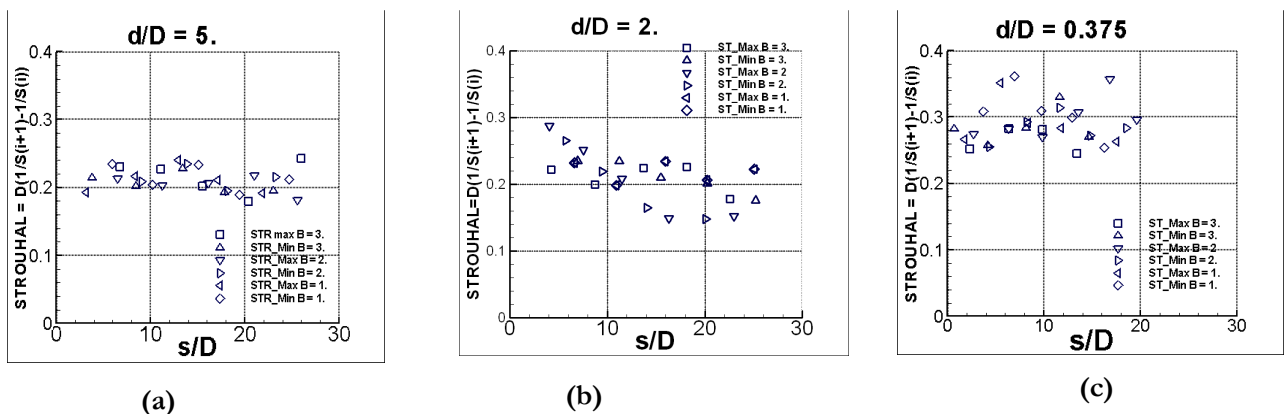


FIG. 3 – Nombres de « Strouhal » en fonction de s/D pour trois valeurs de d/D : 5 (a), 2(b), 0.375 (c) et pour trois valeurs de B/D : 3 (symbole carré, et triangle haut) ; 2 (triangle bas et triangle droite) ; 1 (triangle gauche et losange). Notons que les valeurs de s/D des mesures correspondent à une position du cylindre pour un maximum ou un minimum de la force de portance.

2.2 Effets combinés de proximité et de SL sur la longueur de la zone de recirculation

Nous avons montré que le sillage proche du cylindre principal est constitué par la combinaison des tourbillons issus du petit cylindre et des tourbillons du cylindre principal [9]. C’est pourquoi, les effets d’interférence sont étudiées aussi par l’évolution de la longueur de la zone de recirculation L/D pour trois valeurs de B/D (1, 2, 3) et pour cinq profondeurs d’immersion $d/D = 1, 2, 3, 4$ et 5 sur la figure 4. L/D est ici représentée en fonction du nombre de Reynolds instantané. On observe que le caractère instationnaire du mouvement a tendance à maintenir la stabilité des deux tourbillons contrarotatifs principaux pour des Reynolds pouvant atteindre 9000. Ce phénomène a été observé aussi dans le cas du cylindre seul.

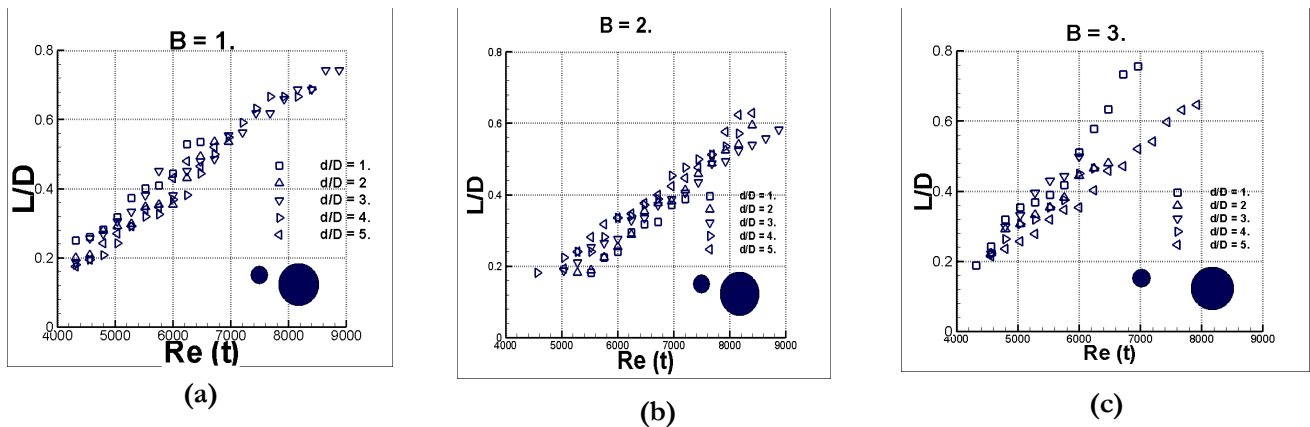


FIG. 4 – L/D en fonction du nombre de Reynolds instantané pour cinq valeurs de d/D : 5 (a), 2(b), 0.375 (c) et pour trois positions du cylindre amont, soit les valeurs de B/D : 3 (symbole carré, et triangle haut) ; 2 (triangle bas et triangle droite) ; 1 (triangle gauche et losange).

2.3 Profil de SL

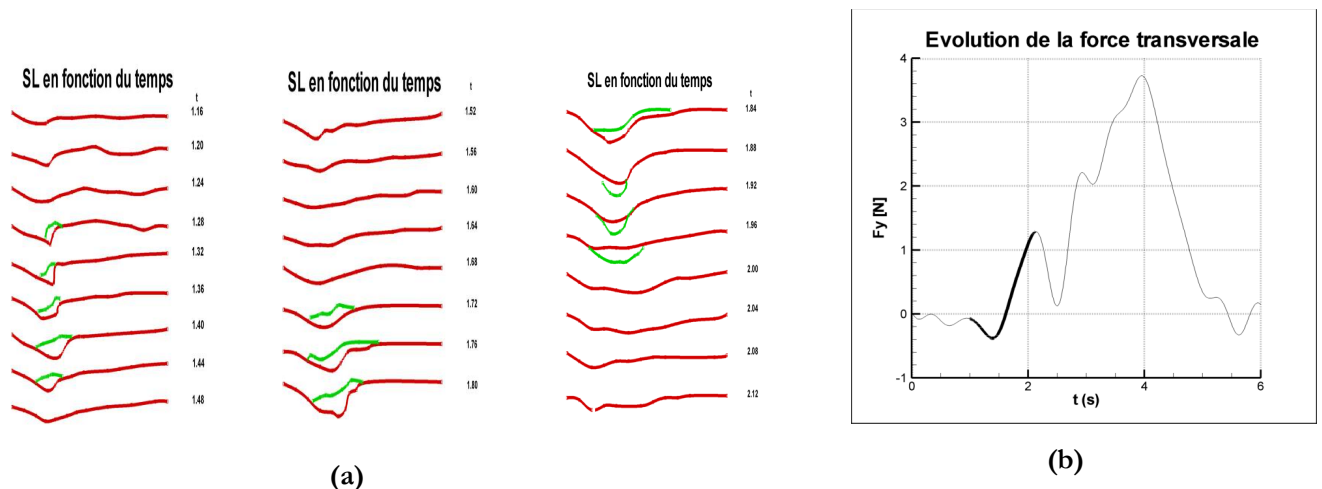


FIG. 5 – (a) Évolution du profil de la surface libre entre les instants 1.2 et 2.2s pour un pas de temps de 0.04s. cf Duncan 1981 [10], (b) A ce profil correspond une évolution de la force de portance représentée à droite de la figure en gras. On observe nettement les deux déferlements en phase avec les extrema de la force de portance.

La figure 5. illustre l’évolution de la surface libre entre deux lâchers de tourbillons pour une profondeur $d/D=0.375$, une valeur de $B/D = 1$. Le déferlement de la vague d’accompagnement est observable. Ce déferlement s’accompagne d’une zone de mélange au front de l’onde. Cette zone est représentée par la

courbe verte. La pente du jet qui se forme au dessus du cylindre principal change avec le temps. La taille de la zone de turbulence est associée à l'intensité de la vorticité dans la zone. Cette intensité peut être accentuée par les tourbillons issus du cylindre amont qui migrent vers la SL. Au regard de l'évolution de F_y , il est montré que le maximum de la force est en phase avec la plus forte distorsion de SL et donc du déferlement.

3 Configuration symétrique : Cas du cylindre et du tandem coupant la surface libre

Un « zoom » sur les effets de surface libre a été réalisé lors d'expériences à très faible profondeur d'immersion et en faisant émerger le cylindre seul ou le tandem. Il n'a pas été possible d'utiliser la technique de visualisation pour ces configurations en raison des très fortes perturbations de la SL. Nous avons mesuré les efforts de traînée et de portance. Les résultats sont reportés sur la figure 6. L'évolution de la longueur de la zone de recirculation à très faible profondeur est illustrée par la figure 6 (I). Il apparaît que cette longueur est fortement réduite par la proximité de la surface libre, voir les symboles « A ».

Cas du cylindre seul émergent: Lorsque le cylindre est tracté à une très faible émergence, d/D de l'ordre de 0.04, un film d'eau passe par dessus le cylindre. Ce qui tend à rapprocher son fonctionnement hydrodynamique d'un comportement à très faible profondeur d'immersion. Lorsque cette valeur est dépassée, il apparaît un comportement du type « barrage », ce qui veut dire que pendant la phase d'accélération le niveau d'eau à l'avant du cylindre est supérieur à celui de l'arrière et inversement pendant la phase de décélération. La portance moyenne augmente et le comportement est de « type profil portant ». Il n'y a plus d'oscillations de la force transversale.

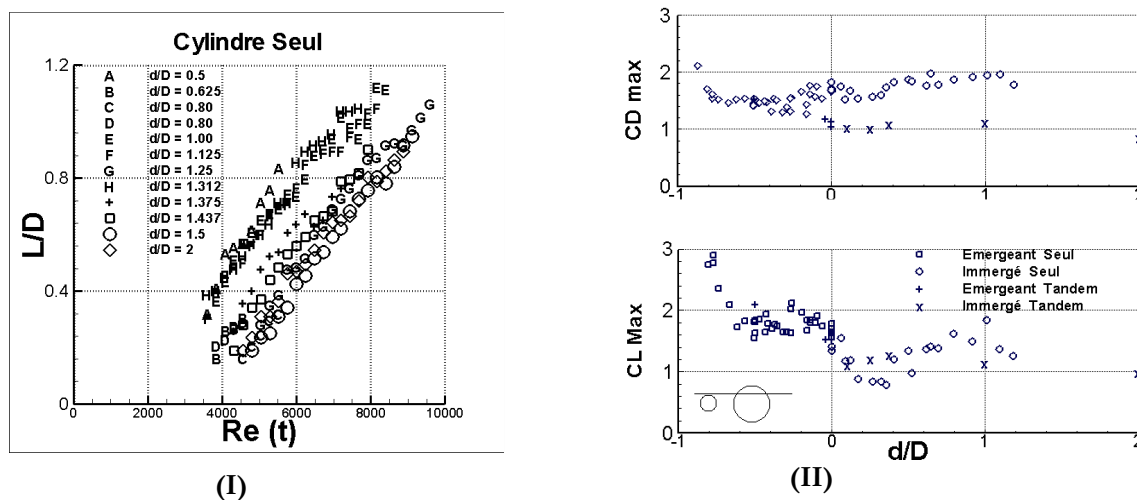


FIG. 6 – (I) Evolution de L/D pour un cylindre seul pour les très faibles profondeurs d'immersion en fonction du nombre de Reynolds instantané; (II) Evolution des coefficients de traînée max et de portance max pour un tandem coupant la surface libre ; les valeurs négatives de d/D correspondent au cas où le cylindre principal coupe la surface libre. La distance entre les deux cylindres est $B/D=1$. Les valeurs négatives de d/D correspondent au cas où le grand cylindre est partiellement immergé.

Cas du tandem émergent : Rappelons que la configuration retenue est symétrique, les axes du cylindre principal et du petit cylindre sont situés dans un même plan horizontal. Les résultats reportés sur la figure 6 (II) montrent que l'interférence des deux cylindres confère au tandem un comportement de type profil symétrique qui se traduit par une diminution de la force de traînée à très faible profondeur, mais dès que l'émergence critique est atteinte, c'est le phénomène de type « barrage » qui prend le pas et le coefficient de traînée moyenne atteint le niveau « cylindre seul ». La présence du cylindre amont a tendance à diminuer la valeur du CL_{max} pour d/D positifs. Pas de changement notable attribué à l'interférence si d/D est négatif.

4 Discussions des Résultats et Conclusions

Nous avons présenté une étude expérimentale des efforts hydrodynamiques agissant sur un cylindre principal tracté en mouvement accéléré/décéléré. Les effets d'un cylindre amont de petit diamètre est présenté pour deux configurations.

La configuration non symétrique est retenue pour caractériser le coefficient de portance en amplitude et en fréquence en fonction de la profondeur d'immersion et de la configuration du tandem. On utilise pour cela les valeurs extrémales de F_y ainsi que les positions du tandem correspondantes. On montre la pertinence du paramètre « écart entre deux maxima ou minima successifs » pour caractériser les effets instationnaires dus au mouvement accéléré/décéléré et les oscillations non linéaires de $Cl(t)$ qui en résultent. Les effets d'interférence mis en évidence pour une profondeur d'immersion de $d/D=5$, figure 2.a augmentent la valeur du Cl_{max} . Ce qui veut dire que les tourbillons issus du cylindre amont provoquent une anticipation du lâcher et raccourcissent ainsi la longueur de la zone de recirculation figure 4.a. La forte non linéarité du profil de surface libre ainsi que la présence du jet se traduisent par une augmentation du nombre de Strouhal et les effets de SL prennent le pas sur l'effet d'interférence à très faible profondeur. Le profil de surface libre montre que le déferlement est en phase avec les maxima de la force de portance que ce soit avec ou sans effet d'interférence figures 1 (III) et 5.

La configuration symétrique a permis d'étudier les efforts lorsque le cylindre principal est partiellement immergé. On montre que lorsque le tandem est immergé, l'évolution de la traînée permet de penser que le comportement est celui d'un profil portant symétrique qui conduit à des valeurs de Cd_{max} faibles, résultats observables aussi mais à une moindre mesure sur le Cl_{max} , figure 6 (II). Par ailleurs, lorsque le cylindre principal coupe la surface libre, le comportement des efforts hydrodynamiques est dicté par la dissymétrie de la répartition des niveaux d'eau devant et derrière du cylindre principal. Dans ce cas les effets d'interférence ne sont plus perceptibles.

La suite de ce travail sera consacrée à mesurer le champ de vitesse derrière le cylindre principal de manière à mesurer les vorticités dans le sillage proche en utilisant une technique de type PIV.

Références

- [1] Bearman, P.W. & Wadcock, A.J. 1973. The interaction between a pair of circular cylinders normal to a stream, *Journal of Fluid Mechanics* 61, pages 499-511.
- [2] Zdravkovich, M.M. 1988. Review of Interference-induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 28, Issues 1-3, Pages 183-199.
- [3] Rockwell, D. 1998. Vortex-body interactions. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Volume 30, pages: 199-229
- [4] Malavasi, S. & Guadagnini A., 2007, Interactions between a rectangular cylinder and a free-surface flow, *Journal of Fluids and Structures*, 23, 1137-1148.
- [5] Oshkai, P. & Rockwell, D., 1999, Free surface wave interaction with a horizontal cylinder, *Journal of Fluids and Structure*, 13, 935-954.
- [6] Price, S.J., 1976, The origin and nature of the lift force on leeward of two bluff bodies, *Journal of Aeronautics Quarterly*.
- [7] Rajaona, R.D. & Rakotondrajaona, L., 2005, Etude expérimentale du déferlement derrière un cylindre en mouvement accéléré/décéléré en dessous d'une surface libre. 10^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique, Nantes, 10, 203-216.
- [8] Rajaona, R.D., Rakotondrajaona, L. & 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.
- [9] Rajaona, R.D., Rakotondrajaona, L. & Rasolomanana E. 2009. Interaction entre deux cylindres tractés sous une surface libre, *CFM 2009*, Marseille, 24 – 28 Août.
- [10] Duncan, J.H., 1981, An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil, *Proceedings R. Soc. London*, 126, 331-348.