

# INTERACTION ENTRE DEUX CYLINDRES TRACTES SOUS UNE SURFACE LIBRE

R.D. RAJAONA <sup>a)</sup>, L. RAKOTONDRAJAONA <sup>a)</sup>, E. RASOLOMANANA <sup>b)</sup>

a. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC), FRE CNRS 3102,  
Université du Havre, 53 Rue de Prony, Le Havre

b. Laboratoire de Géophysique, Université d'Antananarivo, Madagascar

## Résumé:

*Une étude expérimentale de l'écoulement autour de deux cylindres horizontaux est présentée. Les cylindres sont tractés suivant un mouvement uniformément accéléré et décéléré dans une cuve de visualisation pour mettre en évidence les effets des tourbillons. Le cylindre principal ( $D=0.04$  m,  $L/D = 16$ ) est placé derrière le cylindre secondaire ( $d=0.008$ ,  $L/D = 80$ ). L'ensemble est tracté sous la surface libre et on mesure les forces de traînée et de portance. Le sillage du cylindre principal est visualisé par une caméra CCD embarquée. Les nombres de Reynolds basé sur la vitesse maximum varient entre 0 et 14000 et le nombre de Froude entre 0.2 et 1.2 pour une valeur de l'accélération de  $0.150$  m/s<sup>2</sup>. On montre que le sillage proche est constitué par la combinaison des tourbillons de Von Karman et de ceux issus du cylindre amont. Les phénomènes d'interférence et les effets de surface libre sont étudiés en faisant varier la profondeur d'immersion de l'ensemble et la disposition relative des deux cylindres.*

## Abstract:

*An experimental study of the flow past a set of two horizontal cylinders is presented. The cylinders are towed in a uniformly accelerated and decelerated motion in a visualization tank in order to enhance the vortex effects. The main cylinder ( $D=0.04$  m;  $L/D=16$ ) is placed in the flow past a front one ( $d = 0.002$ m;  $L/D=16$ ). They are towed beneath the free surface and the drag and lift forces are measured. The main cylinder wake pattern is visualized by an embarked CCD camera. The Reynolds number based on the maximum velocity is from 0 to 14000 and the Froude number based on the main cylinder immersion from 0.2 to 1.2 for an acceleration value of  $0.15$  m.s<sup>2</sup>. It is shown that the near wake is made of a combination of the main cylinder Von Karman vortices and those of the front cylinder. The interference phenomenon and the free surface effects are studied by varying the depth parameter and the two cylinders arrangements.*

**Mot Clefs: Sillages, Surface libre, zone de recirculation, dynamique tourbillonnaire.**

## 1. INTRODUCTION

Les phénomènes d'interférence entre écoulements ont été largement étudiés dans le passé. 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, Rajaona 1988, 2008 [4][5][6].

Ce travail présente une étude expérimentale de l'interférence entre deux cylindres rigides tractés sous la surface libre (SL). 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 (Sulmont 1988, Rajaona 2005). 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  $f$ . 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 dans Bernitsas [8](2008) et Rajaona (2008)[6]. 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 [9](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 de du cylindre aval. Notre analyse est centrée sur les effets du petit cylindre. On utilise pour cela une analyse simultanée des images issues de la visualisation et de l'évolution des forces appliquées sur le cylindre. Le sillage du cylindre amont impacte le cylindre aval et modifie de cette façon les efforts appliqués. Ces efforts sont mesurés par un capteur de force. 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 5 à 0.375 pour analyser les effets de la surface libre. De même la modification de la disposition relative du cylindre amont et du cylindre aval permet d'étudier les effets de proximité (masquage ou lissage de l'écoulement). Nous discuterons plus particulièrement des résultats concernant le coefficient de traînée  $C_d$ , la longueur de la zone de recirculation  $L/D$ . Les forces de portance sont en cours d'investigation.

## 2. MONTAGE EXPERIMENTAL

Deux cylindres horizontaux ( $D=2R=4$  cm,  $L/D=16$  et  $\delta=0.8$ cm,  $L/D=80$ ) sont tractés sous la surface libre. Le but de l'étude expérimentale est d'étudier l'interférence entre les deux cylindres en caractérisant le sillage proche en corrélation avec les efforts appliqués et le profil de la vague d'accompagnement et l'organisation du sillage proche. A partir d'une vitesse initiale nulle, le mouvement est uniformément accéléré ( $a = 0.150$  m.s<sup>-2</sup>) puis décéléré ( $a = -0.150$  m.s<sup>-2</sup>). Les paramètres géométriques retenus pour l'étude sont  $A$ , la position verticale du centre du cylindre amont,  $B$  la position horizontale,  $d$ , la profondeur d'immersion du cylindre aval. Nous avons exploré les valeurs suivantes :  $A = -0.5D; -0.25D; 0; +0.25D; +0.5D$ ;  $B = 1D; 2D; 3D$ ;  $d = 1D; 2D; 3D; 4D; 5D$ . Ainsi 75  tats possibles du système ont pu être analysées.

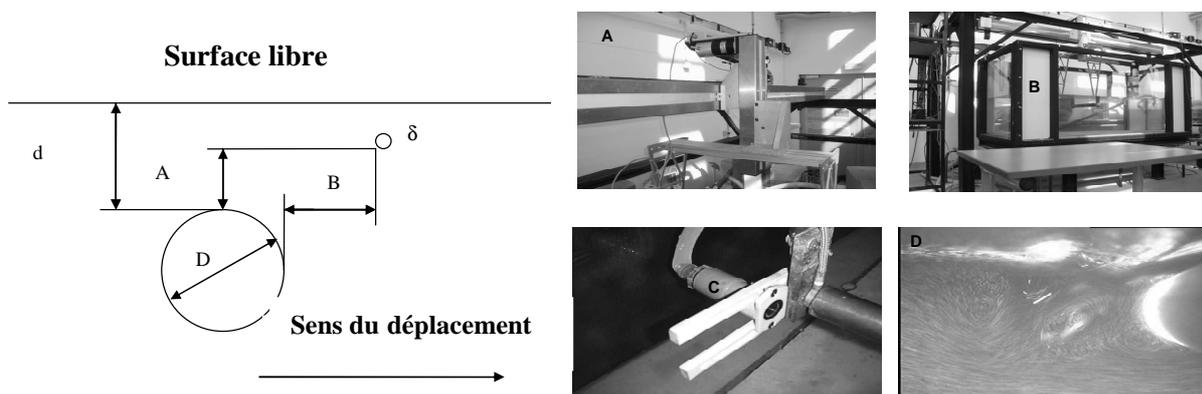


FIG 1: Configuration des deux cylindres, A: le robot; B: La cuve ; C: la caméra ; D : exemple

Le dispositif expérimental est constitué par une cuve de visualisation (Longueur 2m, largeur 1m, hauteur 1m) dont les parois sont en Plexiglas. Une caméra crayon est fixée à l'arrière du cylindre aval pour filmer le sillage. Une tranche lumineuse permet d'éclairer une tranche de l'écoulement situé dans le plan médian de la cuve. Afin de permettre l'observation des tourbillons du sillage, l'eau est ensemencée de particules de RILSAN. Un système de capteur à quartz de type KISTLER est fixé à une extrémité du cylindre aval pour permettre la mesure des efforts de portance et de traînée appliqués sur le cylindre aval. Le cylindre est mu par un robot trois axes piloté par un microordinateur. On fait l'hypothèse que l'écoulement étudié est bidimensionnel en raison de la symétrie du montage et de

l'instationnarité des mouvements. La longueur de corrélation des lâchers de tourbillons est d'autant plus grande que l'écoulement est instationnaire. L'ensemble du montage est montré sur la figure 1.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 3.1 Visualisation du sillage

Dans le cas d'un écoulement uniforme, et dans la gamme des nombres de Reynolds subcritiques la fréquence de lâcher des tourbillons est donné par  $f=StV/D$  où  $St$  est voisin de 0.2. Au cours du mouvement accéléré, le nombre de  $Re$  maximum du cylindre amont est de 4300, celui du cylindre aval de 14000. Les deux cylindres sont en régime subcritique sur une grande partie de leur trajet. Le rapport des fréquences du lâcher du petit sur le grand cylindre est donc d'environ 5. Cela veut dire que les tourbillons issus du petit cylindre seraient lâchés 5 fois plus rapidement que sur le grand. Ces tourbillons viennent impacter le cylindre aval et viennent modifier la structure du sillage proche comme on le voit sur la figure 2. L'effet de cet impact est de modifier la position du point de séparation et de provoquer une apparition anticipée du premier lâcher sur le grand cylindre comme on le verra sur la mesure de la zone de recirculation.

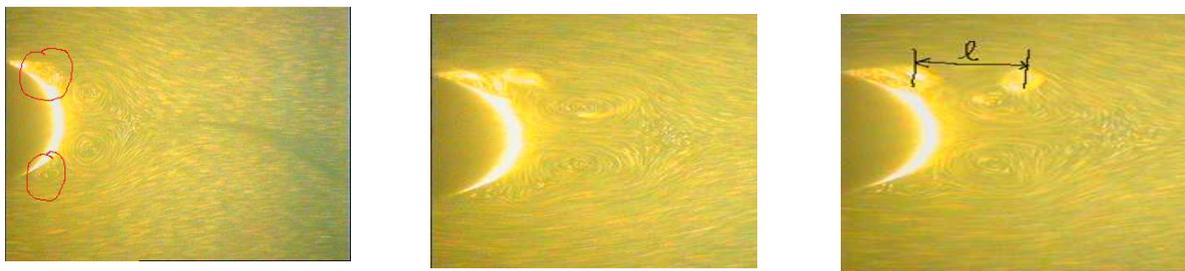


FIG. 2 - Formation des tourbillons secondaires sur la partie supérieure du cylindre amont ; Evolution des tourbillons dans la zone de recirculation du cylindre principal pour  $\delta = 8\text{mm}$ ;  $A = +0.25D$ ;  $B = 2D$ ;  $d = 4D$  et  $t_a = 1.28\text{s}$  et  $t_b = 1.36\text{s}$ . L'ensemble se déplace de droite à gauche.

En effet, ces tourbillons viennent se mélanger avec les deux tourbillons contrarotatifs du grand cylindre. En appelant  $l$  la distance entre deux tourbillons issus du petit cylindre, le rapport  $l/D$  varie entre 0.425 et 0.625 au cours du mouvement accéléré.

#### 3.2 Mesure de la longueur de la zone de recirculation

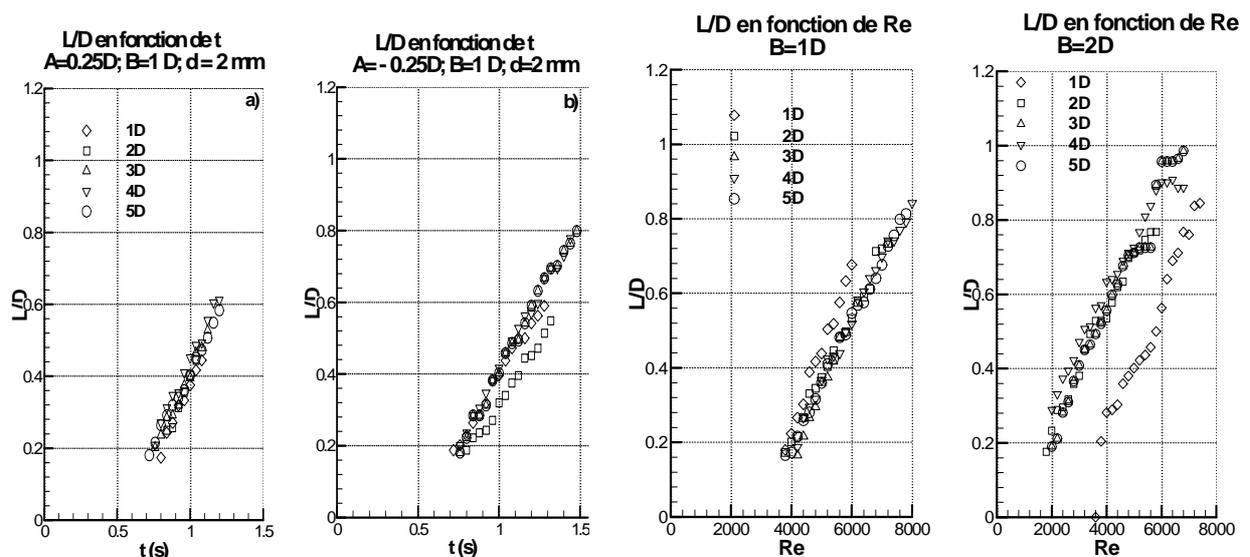


FIG. 3 - Longueur de la zone de recirculation en fonction du temps (s).  $A = +0.25D$ ,  $B = 1D$  a) et  $A = -0.25D$ ,  $B = 1D$  b) le paramètre  $\delta/D$  est de 0.05 où  $\delta$  est le diamètre du petit cylindre. Les deux courbes suivantes montrent l'évolution de  $L/D$  en fonction du nombre de Reynolds instantanés lorsque l'on remplace le cylindre amont par une grille.

La longueur de la zone de recirculation est définie sur le cylindre aval par la distance entre la base et le point selle qui délimite les deux tourbillons contrarotatifs. En raison du déplacement uniformément accéléré, le régime d'écoulement passe par une phase laminaire avant le premier lâcher. Les résultats reportés sur la figure 3 correspondent aux valeurs  $A=+0.25D$ ,  $B=1D$  et  $A=-0.25D$ ,  $B=1D$  pour un paramètre  $\delta/D$  de 0.05. Pour cette expérience, l'immersion du grand cylindre varie de  $1D$  à  $5D$ . Il est clair que la proximité de la surface libre provoque une instabilité anticipée de la zone de recirculation: le lâcher du 1er tourbillon est avancé. On note cependant que la pente des courbes n'est pas significativement changée ; ce qui veut dire que le taux d'augmentation de la vorticité dans la zone est peu modifié. On note aussi que l'effet du petit cylindre est accentué lorsqu'il est près de la surface libre pour  $A=0.25$ . C'est pourquoi les pentes des courbes sont différentes d'une configuration à l'autre. De plus nous avons observé la présence d'un jet à l'arrière du cylindre lorsqu'il est très près de la surface libre [6]. Nous avons comparé les résultats avec ceux obtenus en remplaçant le cylindre amont par une grille. La grille a une maille de 5mm de côté et le diamètre du fil est de 1 mm. Les courbes montrent que les pentes sont faiblement modifiées par la surface libre. En particulier, lorsque  $B=2D$ , les courbes sont regroupées indépendamment de l'immersion  $d/D$ . Pour le cas  $B=1D$ , les effets de la surface libre sont plus significatifs, car la courbe correspondante est décalée des autres. En résumé l'évolution de la longueur de la zone de recirculation reste gouvernée par le diamètre de cylindre aval et les effets de la surface libre sur l'interaction entre son sillage et une turbulence amont ne sont perceptibles que si  $d/D$  est inférieur ou égal à 1. Il est à noter cependant que la présence de cette perturbation amont provoque le lâcher de tourbillon plus tôt, que ce soit avec le petit cylindre ou avec une grille.

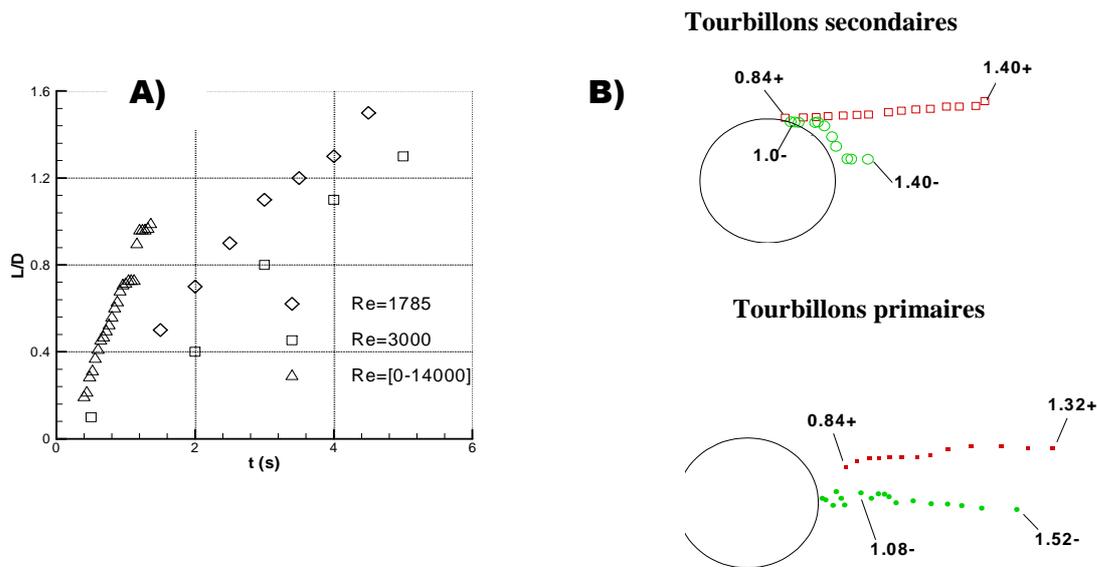


FIG. 4 – A) Comparaisons de la longueur de la zone de recirculation dans le cas de mouvements uniforme et accélérés pour un cylindre unique Rajaona (2003) et Bouard (1981)[10] ; B) trajectoire des quatre tourbillons dans le sillage proche du cylindre principal.

La figure 4 montre une comparaison de l'évolution de la zone de recirculation pour un cylindre unique entre mouvements impulsifs et accéléré. La pente de la courbe du mouvement accéléré est plus forte. Cet écart est du au fait de la présence du petit cylindre et des effets de surface libre. De plus les expériences de Bouard et al. ont été effectuées avec un très faible taux de turbulence dans l'air. De même l'expérience de Rajaona et al. correspond à une profondeur de  $d/D=5$ .

### 3.3 Configuration du sillage proche et profil de la surface libre

On analyse la configuration du sillage proche à partir d'un enregistrement vidéo de son évolution au cours du temps par la caméra embarquée. La séquence est ensuite analys e image par image à raison

de 25 images par seconde et le profil de la surface libre est extrait de cette observation. Une fois les images obtenues, elles sont filtrées et une image noir et blanc est retenue. Le niveau de filtrage est retenu lorsque l'on observe les lignes de courant dans le sillage proche. Un exemple de ce processus est représenté sur la figure. Quatre tourbillons sont observés. Deux sont issus du cylindre amont notés 1 et 2 et deux autres de plus grande taille notés 3 et 4. Il est possible de suivre leurs trajectoires comme le montre la figure 4 B. Elles sont représentées dans un repère lié au cylindre entre les instants 0.84s et 1.52s. Les tourbillons dits secondaires sont issus du cylindre amont, les tourbillons primaires issus du principal. On note que le tourbillon de vorticité négative est piégé dans le sillage proche alors que le 2 se rapproche de la surface libre. Les positions relatives de ces 4 tourbillons sont photographiées sur la figure 5

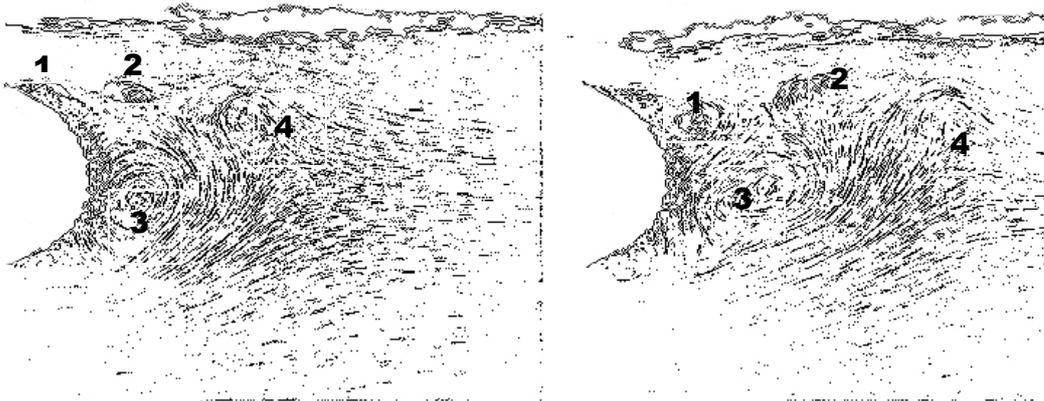


FIG. 5 – Configuration du sillage proche pour  $d/D=0.375$ ,  $t= 1.20$  s et  $t=1.32$ s,  $A=0.5D$ ,  $B=2D$ , Quatre tourbillons sont observables: deux issus du cylindre amont 1&2 et deux autres 3&4 issus du cylindre aval. Le tourbillon 1 quitte le cylindre et se trouve attiré par le 3 alors que le 2 migre vers la surface libre SL

Il est bien connu que la fréquence de lâcher dépend du diamètre du cylindre. De ce fait les tourbillons issus du cylindre amont arrivent sur le cylindre aval avant que ce dernier ne lâche les siens propres. Nous avons observé que l'impact de ces petits tourbillons a pour effet de décaler le point de séparation vers l'arrière. Par ailleurs, en cohérence avec la mesure de la longueur de la zone de circulation, ils provoquent un lâcher anticipé des tourbillons 3&4. De plus, ces tourbillons secondaires sont pleinement développés et se mélangent avec les gros tourbillons de la zone de recirculation du cylindre aval. On pense que l'une des conséquences est le lâcher prématuré. La fréquence spatiale de ces tourbillons variant avec le temps puisque le mouvement est accéléré, le  $l/D$  varie de 0.425 à 0.625.

Huit profils de SL sont reportés sur la figure 6 pour les instants allant de 1.80s à 2.08s. Ces profils montrent pour le cas de la faible immersion  $d/D=0.375$  la présence d'une vague d'accompagnement semblable à celle observée par Duncan 1981. Cette vague déferle entre les instants 1.88s et 2.04s comme on voit sur les photos a), b) et c). On observe aussi un tourbillon de grande taille qui migre vers la surface libre. Ce tourbillon est issu du dessus du cylindre principal, présente une vorticité négative et se trouve attiré par la vorticité positive sous la surface libre. La vague d'accompagnement présente sur son avant une zone de turbulence délimitée par les traits en pointillés pour les instants entre 1.84s et 1.96s.

#### 4 – CONCLUSIONS

Une méthode expérimentale d'investigation du sillage proche derrière un ensemble de deux cylindres est présentée. L'ensemble est tracté sous la surface libre suivant un mouvement accéléré puis décéléré. Les effets tridimensionnels sont faibles sur la partie médiane des cylindres. De même les effets tourbillonnaires sont accentués par l'instationnarité du mouvement. Les effets de la surface libre sont obtenus en faisant varier l'immersion des cylindres et en analysant les évolutions de la longueur de la zone de recirculation pour plusieurs configuration des cylindres. Il apparaît que les effets de la surface

libre sont significatifs pour les faibles profondeurs,  $d/D < 1$ . La géométrie du sillage est complexe et met en interférence le sillage du petit sur le grand cylindre. Pour certaine configuration, l'un des tourbillons issus du petit se trouve piégé tandis que l'autre migre vers SL, ce phénomène provoque une anticipation du lâcher de tourbillon sur le grand cylindre. Le profil de la surface libre fait apparaître un écoulement de type jet comme dans le cas d'un cylindre solitaire. Un déferlement apparaît au bout de 2s pour  $d/D=0.375$ . Le front de la vague présente une zone de turbulence qui s'effondre un peu avant la phase de décélération. L'analyse des effets d'interférence sur les forces de traînée et de portance est en cours d'investigation.

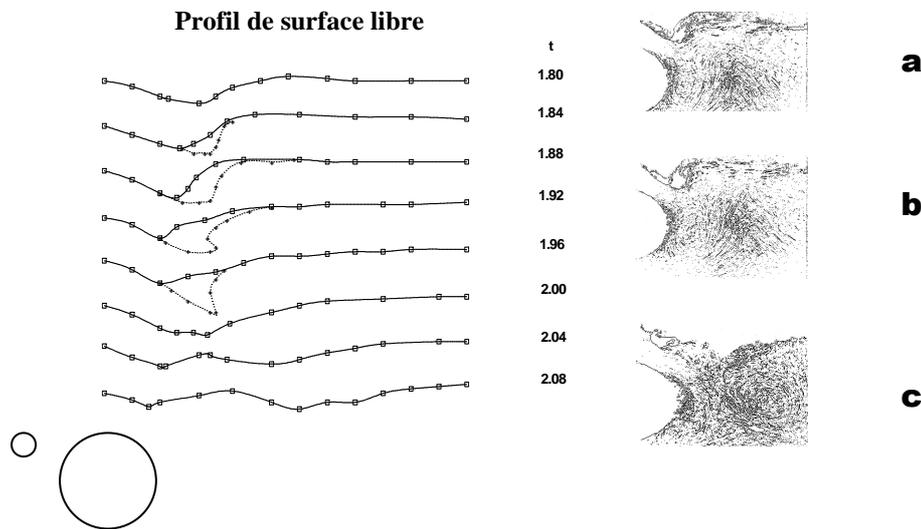


FIG. 6 – Profil de la surface libre pour  $d/D=0.375$ ,  $A = 0.5D$ ,  $B=2D$ ,  $t=1.80-2.08$  s. Les trois photos a b c correspondent aux instants  $t=1.88$ s pour a),  $t=1.88$ s pour b),  $t=2.04$ s pour c). Un écoulement de type jet est visible entre la surface libre et le dessus du cylindre comme dans le cas d'un cylindre seul.

## 5 - REFERENCES

- [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*, Volume 23, pages 1137-1148
- [5] - Oshkai, P. & Rockwell, D. 1999, Free surface wave interaction with a horizontal cylinder, *Journal of Fluids and Structure*, Volume 13, pages: 935-954
- [6] - Rajaona, R.D., Rakotondrajaona, L. & Rasolomanana E. 2008. On the lift forces acting on a cylinder accelerating and decelerating beneath a free surface, *IUTAM Book Series, IUTAM Symposium on Fluid-Structure Interaction in Ocean Engineering*, Springer pp. 205-216. (Invited paper)
- [7] - Sulmont, P., Rajaona, R.D. 1988. Measurements of the drag forces on a inclined circular cylinder in a uniformly accelerated or decelerated motion, *Behaviour of Offshore Structure*, Trondheim, pages: 489-504, 1988.
- [8] - Bernitsas, M. M., Ben-Simon, Y., Raghavan, K., Garcia, E. M.H., 2006, "The VIVACE Converter: Model Tests at High Damping and Reynolds Number Around  $10^5$ ," 25th International OMAE Conference, 2006. Transaction ASME 2008
- [9] - Duncan, J.H. 1981. An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil, *Proceedings R. Soc. London*, Volume 126, pages: 331-348.
- [10] -Bouard, R. & Coutanceau, M. 1981. The early stage of development of the wake behind an impulsively started cylinder for  $40 < Re < 104$ , *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 101, pages 583-607