

Dynamique de l'écoulement autour d'un cylindre vertical partiellement immergé

Valentin AGEORGES¹, Jorge PEIXINHO^{1,2}, Gaële PERRET¹,
Ghislain LARTIGUE³, Vincent MOUREAU³

1. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, (LOMC) CNRS et Université Le Havre Normandie, France.
valentin.ageorges@univ-lehavre.fr
2. Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM) CNRS, Arts et Métiers, CNAM, Paris, France.
3. Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (CORIA), CNRS.

Résumé :

Nous présentons des résultats expérimentaux et numériques de l'écoulement autour d'un cylindre vertical partiellement immergé. Ce travail a pour but d'améliorer la compréhension des efforts et de l'écoulement autour d'un cylindre vertical partiellement immergé soumis à l'action d'un courant seul. L'étude est réalisée pour des nombres de Reynolds compris entre 30 000 et 90 000 correspondant à un sillage turbulent, et des nombres de Froude de 0,86 à 2,57 définis à l'aide du diamètre du cylindre. Numériquement, la turbulence est modélisée par une méthode LES (Large-Eddy Simulation) grâce au code YALES2 basé sur le couplage d'une méthode volumes finis et d'une méthode level-set pour la modélisation de l'interface eau/air. L'attention est portée sur le lien entre les phénomènes d'entraînement d'air, la dynamique de l'écoulement et l'évolution des efforts agissant sur le cylindre. L'analyse des champs de vorticités et de pression a mis en évidence une zone d'atténuation de l'émission tourbillonnaire se trouvant dans une région proche de la surface libre. Les travaux expérimentaux et numériques mettent en évidence une diminution de l'effort de traînée. Ces travaux illustrent le lien entre l'évolution de la surface libre, la dynamique de l'écoulement autour du cylindre et l'évolution des efforts de traînée.

Mots-clés :

Écoulements à surface libre, Entraînement d'air.

1. Introduction

Les phénomènes d'entraînement d'air dans un écoulement diphasique air/eau apparaissent dans différentes applications environnementales ou industrielles. En effet, l'évolution de la dynamique de l'écoulement et des phénomènes d'entraînement d'air dans le sillage d'une structure partiellement immergée (HENDRICKSON *et al.*, 2019 ; AGEORGES *et al.*, 2019) sont d'intérêt pour la conception de structures offshore et pour les systèmes d'énergies marines renouvelables (LOPEZ *et al.*, 2013).

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

L'écoulement autour d'un cylindre vertical partiellement immergé est caractérisé par la présence d'une surface libre et la dynamique tourbillonnaire. L'écoulement est gouverné par le nombre de Reynolds, $Re=UD/\nu$, avec U la vitesse du courant, D , le diamètre et ν la viscosité cinématique et le nombre de Froude $Fr = U/\sqrt{gD}$ avec g , l'accélération de la pesanteur valant 9.81m/s^2 . Les travaux expérimentaux de HAY (1947) et numériques de SUH *et al.* (2011) et KOO *et al.* (2014) ont étudié, entre autres, l'évolution de la hauteur de la vague d'étrave en amont d'un cylindre ainsi que la force de traînée adimensionnée. Numériquement, il a été observé un changement de la dynamique tourbillonnaire près de la surface libre, se traduisant par des tourbillons de petites échelles. Dans certaines conditions d'écoulement, la présence de la surface libre tend à empêcher la formation de structures tourbillonnaires de grandes échelles proche de l'interface. La présence de la surface libre tend à modifier la dynamique de l'écoulement autour du cylindre. En effet, la forme de la surface libre peut être reliée à la théorie des ondes capillaro-gravitaires (BINNIE, 1955 ; MOISY & RABAUD, 2014). Il en résulte une comparaison de la position des lignes de crêtes issues de cette théorie et des zones de fluctuations d'élévations de la surface libre. Numériquement, HENDRICKSON *et al.*, 2019, ont pu étudier les caractéristiques du sillage généré par un rectangle partiellement immergé à un nombre de Froude de 2.53 ainsi que la distribution de taille de bulles présentes dans l'écoulement.

L'objectif de ce travail est d'établir le lien entre la dynamique de la surface libre, les phénomènes d'entraînement d'air, la dynamique de l'écoulement et l'évolution des efforts de traînée agissant sur le cylindre. Dans une première et une seconde partie, les conditions expérimentales utilisées puis les conditions numériques sont respectivement décrites. La dernière partie quant à elle, présentera les principaux résultats obtenus avec une comparaison des efforts de traînée expérimentaux et numériques, ainsi que la mise en évidence de la modification de la dynamique de l'écoulement et de la forme de la surface libre.

2. Dispositif expérimental

Expérimentalement, des nombres de Reynolds, compris entre 4 500 et 240 000, ainsi que des nombres de Froude de 0,2 à 2,4 ont été étudiés, grâce à différents cylindres possédant un diamètre D compris entre 1,4 et 16 cm (AGEORGES *et al.*, 2019). Ici, l'intérêt est porté sur le cylindre de 5 cm en PMMA correspondant à une gamme de Reynolds compris entre 30 000 et 60 000, et des nombres de Froude de 0,86 à 1,71. Le cylindre est immergé d'une profondeur h dans 40 cm d'eau avec un rapport d'aspect h/D de 4,6. Il est bouché à son extrémité, attaché perpendiculairement par rapport à la surface libre et tracté sur un chariot de traction se déplaçant horizontalement le long d'un canal de 34 m de long, 90 cm de large et 120 cm de hauteur. Le canal ainsi que le chariot de traction sont représentés schématiquement sur la figure 1.

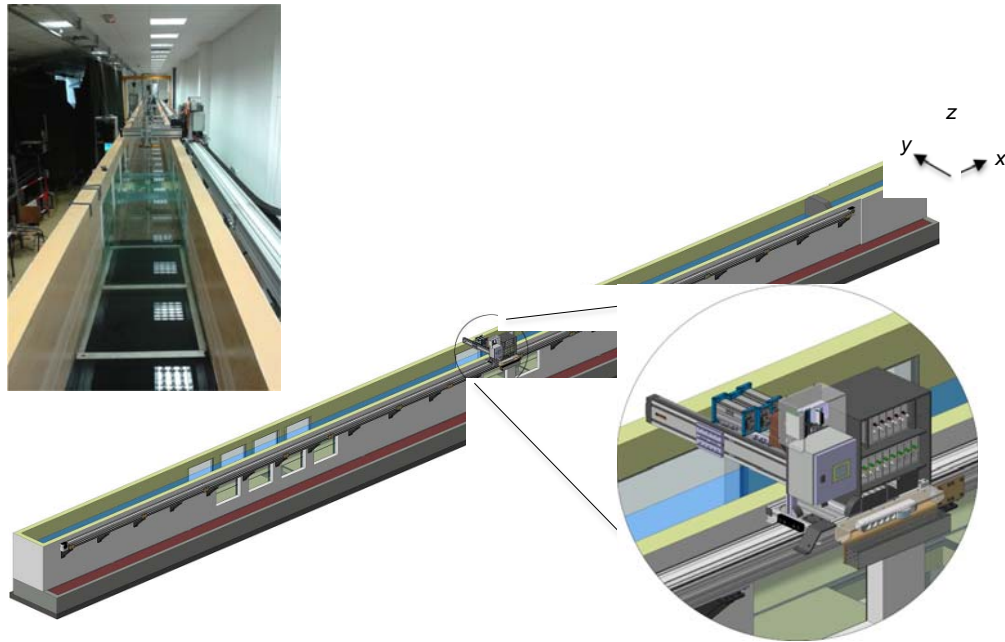


Figure 1. Photo et schéma du canal à traction.

Le protocole expérimental est le suivant, la vitesse du chariot de traction augmente linéairement sur une distance de 3,5 m, puis la vitesse est maintenue constante durant 9,5 m où l'ensemble des mesures est réalisé, et enfin la vitesse décroît linéairement sur une distance de 2 m.

Les efforts sont mesurés à l'aide de capteurs piézoélectriques (Kistler 9327C) fixés au-dessus du cylindre. Ils mesurent les efforts horizontaux $F_x(t)$ et $F_y(t)$ agissant sur le cylindre. Cependant, l'accent est mis dans cette étude sur les efforts de traînée $F_x(t)$ et leur lien avec les phénomènes d'inclusion d'air et la dynamique de l'écoulement. Les signaux d'efforts sont acquis avec une fréquence de 100 Hz. Le coefficient de traînée C_D est défini par la relation (1) :

$$C_{D(t)} = \frac{2F_x(t)}{\rho h D U^2} \quad (1)$$

Avec $F_x(t)$, la force de traînée au cours du temps, ρ la masse volumique de l'eau, h la profondeur d'immersion du cylindre dans l'eau au repos et U , la vitesse de traction, correspondant à la vitesse de courant simulé.

3. Simulations numériques

Numériquement, le code de calcul YALES2 est utilisé. YALES2 est un code de mécanique des fluides numérique, résolvant les équations de Navier-Stokes par des calculs massivement parallèles. Il est organisé comme une collection de solveurs offrant la possibilité de couvrir une large gamme d'applications et de phénomènes physiques. Le solveur spray (SPS) est utilisé car il permet l'étude des écoulements diphasiques avec prise en compte de la tension de surface. Il résulte de la combinaison entre le solveur

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

incompressible (ICS), le solveur level-set (LSS) et la méthode Ghost-Fluid pour traiter la discontinuité à l'interface fluide/fluide. Cette méthode permet alors de tenir compte de la discontinuité des conditions entre l'eau et l'air pour la résolution des équations de Navier-Stokes. Le schéma numérique associé à ces solveurs pour l'intégration spatiale utilise la méthode des volumes-finis d'ordre 4. Pour l'intégration temporelle, le schéma Runge-Kutta d'ordre 4 est utilisé.

Le traitement de l'interface Γ , est réalisé grâce à une méthode level-set. La méthode Accurate Conservative Level-Set (ACLS) (DESJARDINS, 2008) est utilisée, avec une amélioration de l'algorithme de réinitialisation (CHIODI & DESJARDINS, 2017). Elle permet de prédire précisément la dynamique de l'interface tout en assurant la conservation de la quantité de masse du liquide. Le principe de l'algorithme est de transporter un scalaire Ψ , de telle façon à ce que l'interface Γ corresponde à $\Psi = 0.5$.

Le scalaire Ψ a une forme de tangente hyperbolique qui lui est imposé dans la direction normale à l'interface, comme présenté dans l'équation (2).

$$\Psi(x, t) = \frac{1}{2} \left[\Phi(x, t) + 1 \right] \quad (2)$$

avec $\Phi(x, t)$, la fonction distance et 2ε l'épaisseur constante du profil.

Le repère pour les simulations est fixe par rapport au cylindre, imposant de ce fait une vitesse en entrée uniforme et constante tout comme les murs du domaine. Le cylindre est considéré comme un mur non glissant, comme le montre la figure 2.

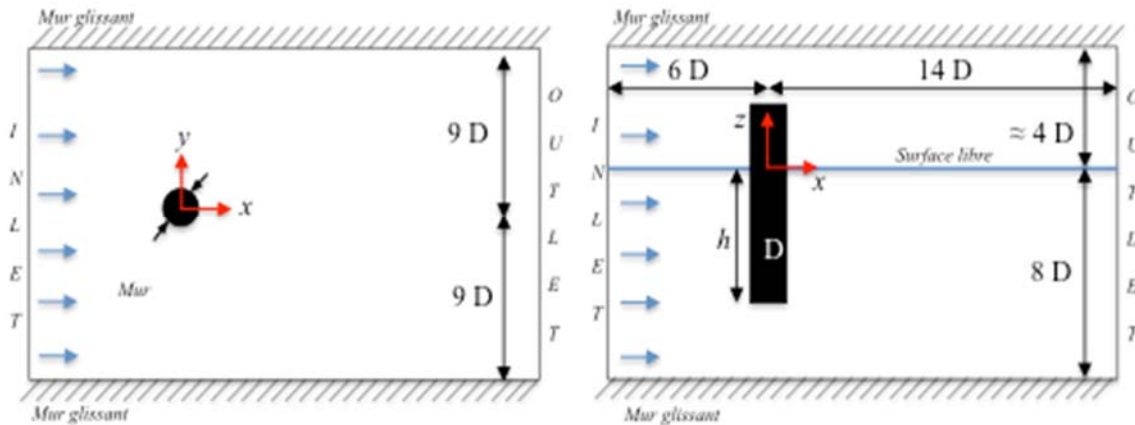


Figure 2. Schéma du domaine et des conditions aux limites.

Les simulations sont réalisées sur un maillage convergé de 47,9 millions de cellules tétraédrique. Les simulations sont réalisées pour un cylindre de diamètre $D = 5$ cm pour des nombres de Reynolds compris entre 30 000 et 90 000, et des nombres de Froude de 0,86 à 2,57.

Numériquement, pour être cohérent par rapport aux expériences, le coefficient C_D présenté correspond à la contribution des efforts de pression et visqueux. La partie visqueuse représentée par le coefficient C_x peut ainsi être définie en utilisant les efforts

visqueux comme $C_x(t) = 2F_{visq}(t)/\rho h D U^2$, avec F_{visq} la force visqueuse.

L'ensemble des statistiques présentées ci-après correspond à des résultats moyennés suivant le temps adimensionné Ut/D compris entre 42 et 60.

4. Résultats

L'évolution du coefficient de traînée, le volume d'air entraîné ainsi que les champs de pression instantanés dans le plan $z/D = -1$ (plan horizontal situé à un diamètre sous la surface libre au repos) et $y/D = 0$ (plan vertical dans la direction de l'écoulement passant par l'axe du cylindre) sont représentés en figure 3.

L'évolution du coefficient de traînée, C_D , montre expérimentalement et numériquement une légère augmentation, puis une diminution du C_D à partir de $Re = 45\ 000$. Les symboles creux de la figure 3 correspondent aux cas avec entraînement d'air. La chute du C_D observée semble concomitante à l'apparition des premières bulles d'air dans l'écoulement.

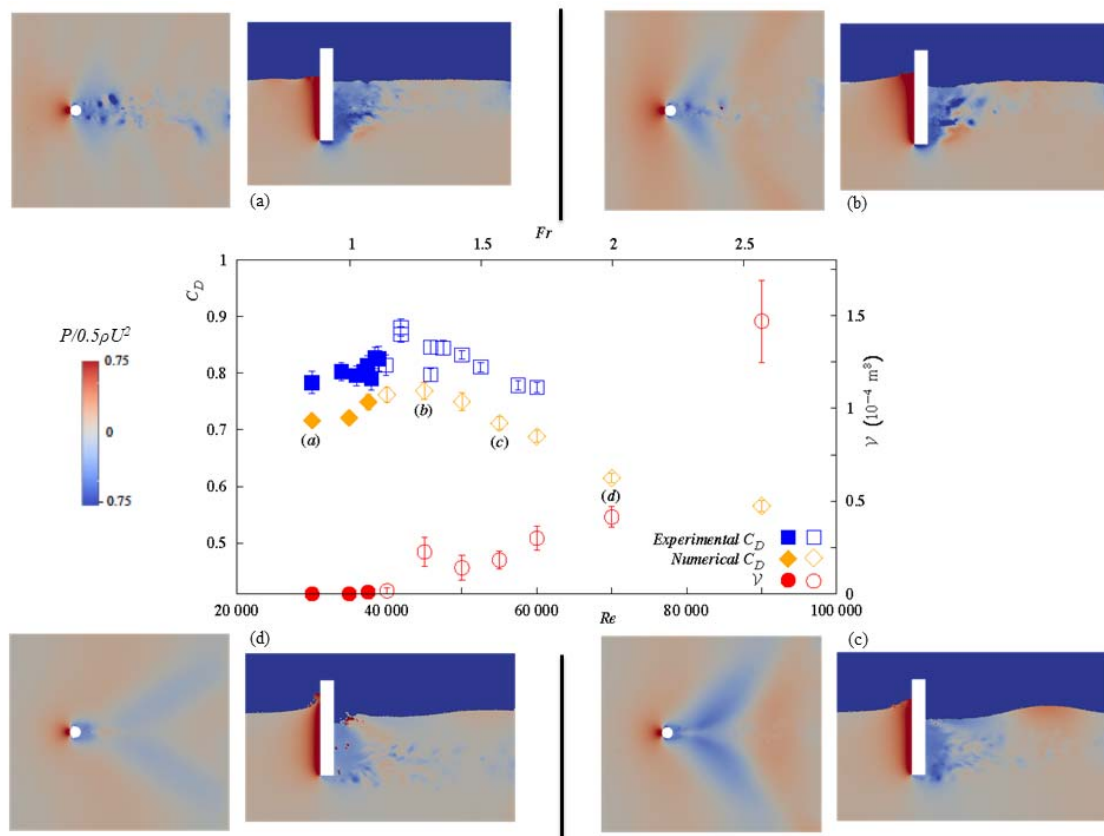


Figure 3. Evolution du coefficient de traînée C_D expérimental et C_D numérique et volume d'air numérique entraîné V en fonction du nombre de Reynolds. Sur le graphique les lettres (a) à (d) réfèrent aux champs de pression à l'instant $Ut/D = 60$ dans les plans verticaux et horizontaux $y/D=0$ et $z/D = -1$.

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

A partir des simulations numériques, les volumes d'air entraînés \mathcal{V} ont été étudiés et comparés à l'évolution du C_D . Le volume \mathcal{V} augmente de manière significative avec le nombre de Reynolds lorsque le C_D diminue.

Les champs de pression adimensionnés $P/(0.5\rho U^2)$ à l'instant $Ut/D = 60$ sont mis en regard de l'évolution du coefficient de traînée, C_D , comme indiqué par les lettres (a), (b), (c) et (d). La pression adimensionnée en amont du cylindre reste proche de la valeur prédite par la relation de Bernoulli, alors qu'en aval pour les cas (c) et (d) la pression est réduite pour les Reynolds et les Froude les plus élevés correspondant aux cas où l'entraînement d'air est le plus intense.

De plus, la dynamique de l'écoulement caractérisée par l'émission tourbillonnaire, visible sur les champs de pression de la figure 3 (a) et (b) est inhibée près de la surface libre à partir de $Re = 50\,000$ et $Fr \approx 1,43$. Cette inhibition est également visible sur les champs de vorticité dans le plan $y/D = 0$, présentés en figure 4 avec la surface libre instantanée correspondante.



Figure 4. Vorticité dans le plan vertical et surface libre instantanée à $Ut/D = 60$.
A gauche $Re = 30\,000$ & $Fr \approx 0,86$ et à droite $Re = 55\,000$ & $Fr \approx 1,57$.

L'émission tourbillonnaire proche de la surface libre est inhibée, et semble être en lien avec la déformation caractéristique de cette dernière. Le caractère inhibiteur de la surface libre sur la dynamique tourbillonnaire a déjà été observé dans des configurations similaires à des nombres de Reynolds plus élevés et des nombres de Froude plus faibles (KOO *et al.* 2014, YU *et al.* 2008).

Les déformations de la surface libre provoquent une stratification verticale de la dynamique de l'écoulement. Cette inhibition coïncide avec l'apparition d'un motif en forme de V localisé près du cylindre, lorsque Re et Fr augmentent. L'entraînement d'air observé dans le sillage est causé par un déferlement localisé en aval de la forme stationnaire en V observée à partir de $Re = 50\ 000$ et $Fr \approx 1,43$. A contrario, l'entraînement d'air au niveau de la cavité lui apparaît en amont du motif en forme de V, proche du cylindre. La diminution du coefficient de traînée C_D coïncide avec la présence de ce motif stationnaire en forme de V et de la diminution de la dynamique tourbillonnaire proche de l'interface.

5. Conclusions

Les efforts de traînée subis par un cylindre vertical partiellement immergé ont été caractérisés expérimentalement et numériquement. Les simulations numériques ont été réalisées pour des $30\ 000 < Re < 90\ 000$ et $0,86 < Fr < 2,57$. L'évolution du coefficient de traînée est cohérente expérimentalement et numériquement. Dans les deux approches une augmentation puis une diminution du coefficient de traînée C_D a été observée, en concomitance des phénomènes d'entraînement d'air. Cette évolution du C_D a été comparée aux champs de pression et à la vorticité instantanée dans les plans $z/D = -1$ et $y/D = 0$, ainsi qu'à la forme de la surface libre. La surface libre évolue avec l'augmentation du nombre de Reynolds et de Froude vers un motif stationnaire en forme de V déplaçant les zones instationnaires loin en aval du cylindre. La diminution du coefficient de tra nee C_D coïncide avec la présence de ce motif stationnaire en V et de l'inhibition de la dynamique tourbillonnaire dans une région proche de l'interface.

Remerciements

Les auteurs remercient le support financier de la Région Normandie et de l'Union Européenne à travers le fond FEDER du projet NEPTUNE. Ce travail a également bénéficié du support financier de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), par le programme 'Investissement d'Avenir' du laboratoire d'excellence Energy Materials and Clean Combustion Center (LabEx EMC3). Ce travail a bénéficié des moyens de calcul du mésocentre CRIANN (Centre Régional Informatique et d'Applications Numériques de Normandie). Les auteurs remercient Geoffroy VAUDOR et Romain JANODET du laboratoire CORIA pour l'aide apportée concernant les simulations numériques.

6. Références bibliographiques

AGEORGES V., PEIXINHO J., PERRET G. (2019). *Flow and air-entrainment around a partially submerged vertical cylinders*, Phys. Rev. Fluids, Vol. 4(6), 064801, <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.064801>

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

- BINNIE A.M. (1955). *Solutions of the fish-line problem at intermediate velocities*, Br. J. Appl. Phys. Vol. 16(11), pp 1755-1758.
- CHIODI R., DESJARDINS O. (2017). *A reformulation of the conservative level set reinitialization equation for accurate and robust simulation of complex multiphase flows*. J. Comp. Phys., Vol. 343, pp 186-200. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.04.053>
- DESJARDINS O., MOUREAU V., PITSCH H. (2008). *An accurate conservative level set/ghost fluid method for simulating turbulent atomization*. J. Comp. Phys., Vol. 227(18), pp 8395-8416. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2008.05.027>
- HAY A. D. (1947). *Flow about semi-submerged cylinders of finite length*. Technical Report, Princeton University, 174p. <https://trove.nla.gov.au/version/18064699>
- HENDRICKSON K., WEYMOUTH G.D., YU X., YUE D.K.P. (2019). *Wake behind a three-dimensional dry transom stern. Part 1. Flow structure and large-scale air entrainment*, J. Fluid Mech., Vol. 875, pp 854-883. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.695>
- KOO B., YANG J., YEON S.M., STERN F. (2014). *Reynolds and Froude number effect on the flow past an interface-piercing circular cylinder*. Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng., Vol. 6(3), pp 529-561. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0197>
- LÓPEZ I., ANDREU J., CEBALLOS S. DE ALEGRIA I.M., KORTABARRIA I. (2013). *Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment*, Renew. Sust. Energy Rev., Vol. 27, pp 413-434, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>
- MOISY F., RABAUD M. (2014). *Mach-like capillary-gravity wakes*, Phys. Rev. E, Vol. 90, 023009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.023009>
- SUH J., YANG J., STERN F. (2011). *The effect of air-water interface on the vortex shedding from a vertical circular cylinder*. J. Fluids Struct., Vol. 27 (1), pp 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2010.09.001>
- YU G., AVITAL E.J., WILLIAMS J.J. (2008). *Large eddy simulation of flow past free surface piercing circular cylinders*. J. Fluids Eng. Vol. 130 (10), 101304. <https://doi.org/10.1115/1.2969462>