



**EFFET DES CONCRÉTIONS MARINES SUR LE
COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DE
STRUCTURES CIRCULAIRES**

***MARINE GROWTH EFFECTS ON THE
HYDRODYNAMICAL BEHAVIOUR OF CIRCULAR
STRUCTURES***

**B. GAURIER¹, G. GERMAIN¹, J.V. FACQ¹, L. BAUDET², M.
BIRADES², F. SCHOEFS³**

¹ Laboratoire Comportement des Structures en Mer, IFREMER, Centre de Boulogne, 150
quai Gambetta, 62 200 Boulogne-sur-mer

² TOTAL S.A., DGEP/DTO/TEC/STR CSTJF, avenue Larribau, 64 018 Pau Cedex

³ Université de Nantes, GeM - Equipe Calcul des Structures, 2 rue de la Houssinière,
44 322 Nantes Cedex 3

benoit.gaurier@ifremer.fr

Résumé

La présence de bio-salissures marines sur les parties immergées des *jackets* augmente significativement le diamètre et la rugosité des supports tubulaires de ces structures. Ce papier décrit l'étude expérimentale réalisée au bassin d'essais de Boulogne-sur-mer dans le but de quantifier les coefficients hydrodynamiques de traînée et de masse ajoutée s'appliquant sur un cylindre circulaire colonisé par des concrétions marines rigides de grandes dimensions de type corail. Deux types de rugosités sont testés et comparés au cas d'un cylindre de référence. Ces coefficients sont obtenus à partir d'essais en courant seul, en mouvements imposés et en mouvements imposés avec courant. Les résultats montrent des coefficients tous supérieurs d'un facteur compris entre 1,5 et 4 à ceux obtenus pour le cylindre de référence. Les différences observées entre les deux cas de rugosités testés sont, par contre, faibles et limitées aux plus grandes vitesses et accélérations de mouvement.

Summary

The presence of marine growth on underwater parts of jackets significantly increases diameter and roughness of tubular members of these structures. This paper describes an experimental study carried out in the circulating tank of Boulogne-sur-mer which aim to quantify the hydrodynamical drag and added-mass coefficients of a circular cylinder encrusted with rigid and large-size biofouling, such as coral. Two different kinds of roughness are studied and compared to a reference cylinder. These coefficients are obtained from trials with current only, with imposed motions or with a combination of imposed motions and current. Results show that these coefficients are from 1.5 to 4 times higher

than those obtained for the reference cylinder. Nevertheless, differences between the two tested kinds of roughness are low and limited to the highest speeds and accelerations of motions.

I – Introduction

Le phénomène de colonisation par des organismes marins des structures de type *jackets* suscite un intérêt particulier en vue d’analyser son impact sur les chargements hydrodynamiques. Ce phénomène, appelé bio-salissure, peut engendrer des dégradations mécaniques de la structure liées à l’augmentation du poids et des efforts hydrodynamiques, quand celle-ci est soumise à l’action des vagues et du courant.

Ce type de colonisation (figure 1) n’avait initialement pas été prévu dans le dimensionnement de ces structures. Il est donc nécessaire d’avoir une idée précise des coefficients hydrodynamiques s’appliquant sur les tubes présentant des bio-salissures de grande rugosité et de forte densité. Pour ce faire, une étude expérimentale a été réalisée au bassin à houle et courant de Boulogne-sur-mer sur une section de tube comportant une représentation simplifiée de coraux. L’objectif final est d’adapter les coefficients communément utilisés pour le dimensionnement de ce type de structure en prenant en compte une telle colonisation.

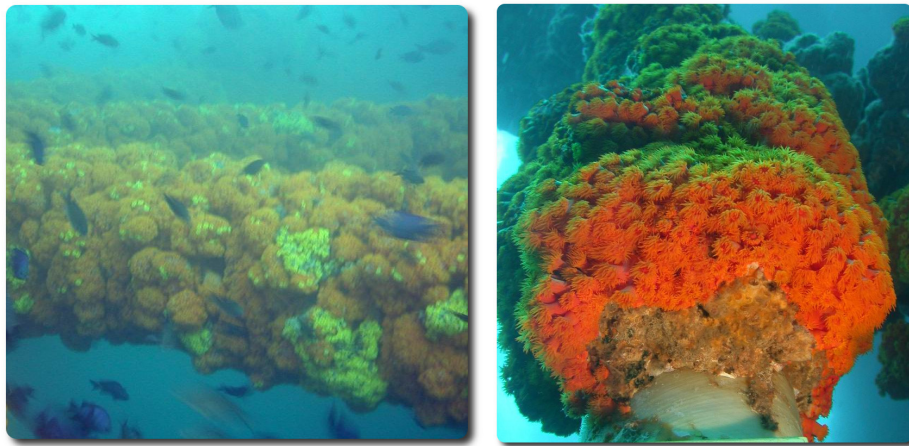


Figure 1: Coraux sur des tubes de *jacket* du golf de Guinée

Étant donné la grande rugosité et la forte densité de colonisation présente sur certains sites (figure 1), il est évident que les coefficients hydrodynamiques habituellement utilisés soient remis en question. Les principales données qui font référence en la matière sont les travaux de Sarpkaya [4, 5] qui ont été obtenus à partir d’essais sur un cylindre fixe soumis à un écoulement oscillant dans un tube en U. Ils montrent, en particulier, que le coefficient de traînée, obtenu en mouvement oscillant, augmente avec la rugosité, pour des nombres de Reynolds supérieurs à 2.10^5 , jusqu’à un facteur 2.

Par contre, comme l’a montré Schlichting [6], le coefficient de traînée obtenu en écoulement permanent diminue pour des nombres de Reynolds Re de l’ordre de $4.10^4 - 10^5$. Ceci provient d’un changement de régime d’écoulement du fait de la présence des concrétions. A ce sujet, Achenbach et Heinecke [1] ont montré que la rugosité diminuait la valeur du Reynolds critique.

Il semble, de plus, que la densité de présence des rugosités entre également en jeu et certains auteurs tels que Theophanatos [7] ont montré la dépendance du coefficient de traînée à la proportion de surface de cylindre couverte par les concrétions.

Les diamètres D des tubes constituant la plupart des *jackets* considérés dans cette étude sont de 8 et 16 pouces, soit 0,2 et 0,41 m . D’après Boukinda [2], la rugosité mesurée *in situ* montre une dimension moyenne des aspérités de $k = 60 \text{ mm}$ et le rapport k/D vaut donc 0,3 pour le diamètre de 200 mm et 0,15 pour celui de 400 mm , ce qui constitue de très fortes valeurs par rapport aux valeurs communément considérées dans la littérature. En effet, les données de Sarpkaya [5] s’échelonnent sur des valeurs comprises entre $k/D = 0,00125$ et 0,02, soit plus de 7 fois inférieures. Les coefficients de traînée en courant permanent de Schlichting [6] s’arrêtent également à des rugosités de 0,02.

Finalement, aussi denses et complets que soient ces travaux, des questions résident encore. D’abord sur le type, la densité de présence ou l’évolution spatio-temporelle des concrétions marines considérées, qui sont des facteurs déterminants dans la variation des coefficients hydrodynamiques de manière non-négligeable et qu’il est nécessaire de prendre en compte. Ensuite, l’étendue des coefficients hydrodynamiques en fonction de certaines configurations de courant et de houle, telles que les faibles nombres de Keulegan-Carpentier K_C et les grandes valeurs du paramètre $\beta = Re/K_C$, reste encore pas ou peu couverte.

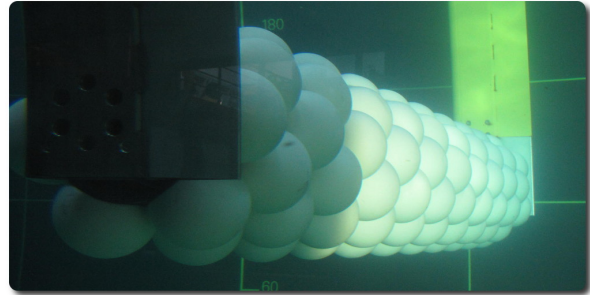
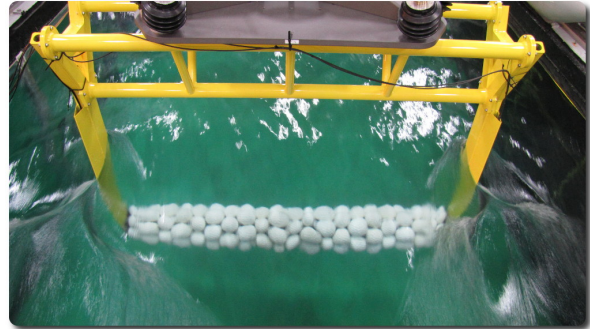
Nous proposons dans ces travaux de quantifier l’effet de ce type de bio-salissures sur le comportement hydrodynamique des structures. Dans un premier temps nous décrirons le montage expérimental utilisé. Les résultats seront ensuite présentés de manière à comparer l’évolution des coefficients hydrodynamiques d’une structure colonisée à celle de références (cylindre lisse).

II – Dispositif expérimental

Les essais ont été réalisés au bassin à houle et courant de l’IFREMER à Boulogne-sur-mer, comportant une longueur utile de 12 m et une section d’essais de 4 m de large par 2 m de profondeur. Un écoulement homogène présentant un taux de turbulence de 3 à 15 % peut y être généré dans une gamme de 0,1 à 2,2 m/s . Les essais présentés ici ont été réalisés avec un taux de turbulence de 3 % dans une gamme de vitesse de 0,15 à 1,50 m/s . Un hexapode fixé à la verticale de la section d’essais permet d’imposer des mouvements aux structures étudiées, en présence ou non de houle et de courant. Le montage utilisé, présenté figure 2, est constitué :

- d’un châssis fixé sous l’hexapode par l’intermédiaire d’une balance de mesure d’efforts 6 composantes permettant de mesurer les efforts sur l’ensemble du dispositif,
- du cylindre d’étude (lisse ou rugueux) de $L \simeq 2 \text{ m}$ de longueur, positionné horizontalement au centre de la section d’essais. Deux balances de mesure d’efforts 6 composantes sont positionnées à chaque extrémité, afin de peser le cylindre uniquement.

Afin de représenter de manière expérimentale les concrétions marines, le choix d’une répartition de sphères de diamètre constant et répartie en quinconce sur l’ensemble de la longueur du cylindre a été retenu. Pour obtenir des tailles représentatives des rugosités, le diamètre des sphères a été fixé de manière à positionner 6 sphères sur le pourtour du cylindre. De cette manière, les sphères ont un diamètre proche de 120 mm , tout en pénétrant d’un tiers de leur diamètre dans le cylindre (figure 2). Deux types de rugosités ont été testées : une macro rugosité, telle que présentée sur la figure 2a et une macro + micro rugosité avec une surface de type balle de golf (figure 2b).



(a) Macro rugosité



(b) Macro + micro rugosité

Figure 2: Montage global du cylindre dans le bassin et images des deux types de rugosités testées pendant les essais

Afin d'avoir une longueur suffisante de cylindre, sans pour autant être perturbé par les effets de bords, mais tout en ayant un nombre entier de sphères, une longueur de $L = 2096 \text{ mm}$ a été retenue. Ainsi, le coefficient de blocage, ratio entre la surface frontale de la maquette et la superficie de la section du bassin, est de 5,2 % pour le cylindre lisse et de 9,4 % avec les rugosités considérées.

Trois configurations d'essais ont été retenues :

1. la première, en courant seul de vitesse U , permet de connaître le coefficient de traînée moyen et noté C_D ,
2. la seconde, uniquement avec mouvement imposé colinéaire avec le courant et de type sinusoïdal défini à partir de son amplitude A_x et de sa fréquence $f = \omega/(2\pi)$, est utile pour le calcul des coefficients de traînée fluctuante C_d et de masse ajoutée C_m ,
3. la dernière, combinant le courant et les mouvements imposés, permet de déterminer des trois coefficients précédents simultanément.

La mesure de l'effort de traînée $F_D(t)$ est effectuée de manière synchronisée avec les mouvements de l'hexapode et s'effectue sur un temps d'acquisition dépendant des cas

et choisi de manière arbitraire à 100 s pour les essais en courant seul et 40 périodes d'oscillations pour les essais en mouvements imposés. Ceci permet d'avoir une convergence correcte de la moyenne de l'effort mesuré. La fréquence d'acquisition est constante et fixée à 100 Hz.

Pour les cas de mesures en courant seul et dont la vitesse constante est U , le coefficient de traînée est obtenu classiquement par la formule suivante :

$$C_D = \frac{2 \times \overline{F_D(t)}}{\rho S U^2} \quad (1)$$

avec ρ la masse volumique de l'eau et $S = D \times L$ la section du cylindre face à l'écoulement.

Pour les cas en mouvements forcés, on suppose que la réponse de l'effort de traînée à l'excitation sinusoïdale $x(t) = A_x \cos(\omega t + \varphi_x)$ est également une fonction sinusoïdale à la même fréquence (on suppose négligeable les harmoniques d'ordre supérieur), de la forme :

$$F_D(t) = F_m \cos(\omega t + \varphi_F) \quad (2)$$

D'où, avec $\varphi = \varphi_F - \varphi_x$, on tire :

$$F_D(t) = -\frac{F_m \cos(\varphi)}{A_x \omega^2} \ddot{x}(t) + \frac{F_m \sin(\varphi)}{A_x \omega} \dot{x}(t) \quad (3)$$

Cette dernière équation peut être mise en parallèle avec l'équation de Morison [3] selon laquelle l'effort exercé sur un corps se déplaçant à la vitesse $\dot{x}(t)$ dans un fluide au repos est la somme linéaire d'une force d'inertie dépendante de l'accélération et d'une force de traînée proportionnelle au carré de la vitesse :

$$F_D(t) = -\rho C_m L \frac{\pi D^2}{4} \ddot{x}(t) + \frac{1}{2} \rho C_d D L \dot{x}(t) | \dot{x}(t) | \quad (4)$$

Or, $\sin \omega t | \sin \omega t |$ est peu différent de $\sin \omega t$ et plus précisément :

$$\sin \omega t | \sin \omega t | \simeq \frac{8}{3\pi} \sin \omega t \quad (5)$$

D'où finalement :

$$\begin{cases} C_m = \frac{F_m \cos(\varphi)}{\rho L \frac{\pi D^2}{4} A_x \omega^2} \\ C_d = \frac{F_m \sin(\varphi)}{\frac{4}{3\pi} \rho D L A_x^2 \omega^2} \end{cases} \quad (6)$$

Pour les essais en courant constant et mouvements imposés, on suppose que la traînée se décompose sous la forme d'un terme de traînée moyen $\overline{F_D(t)}$ et d'un terme de traînée fluctuant (toujours en supposant négligeable les harmoniques d'ordre supérieur), telle que :

$$F_D(t) = \overline{F_D(t)} + F_m \cos(\omega t + \varphi_F) \quad (7)$$

et ainsi, les trois coefficients C_D , C_m et C_d peuvent être calculés de la même manière que précédemment (formules 1 et 6).

Ces trois coefficients sont tracés en fonction des nombres adimensionnels habituels que sont :

le nombre de Reynolds qui peut être défini de deux manières suivant le choix de la vitesse de référence, le courant constant U ou la vitesse d'oscillation $A_x \omega$:

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad \text{ou} \quad Re = \frac{A_x \omega D}{\nu} \quad (8)$$

le nombre de Keulegan-Carpenter défini par l'équation :

$$K_C = \frac{A_x \omega}{fD} = 2\pi \frac{A_x}{D} \quad (9)$$

la vitesse réduite pour les cas en mouvements forcés et courant :

$$U_r = \frac{U}{fD} \quad (10)$$

Suite à une étude des paramètres océano-météo rencontrés sur la zone considérée, la gamme de variation du nombre de Reynolds choisie s'étend de $3 \cdot 10^4$ à $31 \cdot 10^4$, pour les cas en courant seul. Pour les cas avec houle, et donc avec mouvements imposés, les contraintes matérielles notamment liées aux capacités de l'hexapode et des balances, ont limité les amplitudes et les fréquences des mouvements, limitant donc les K_C et Re . La gamme couverte est donc $4 < K_C < 14$ et $1,2 \cdot 10^4 < Re < 19,2 \cdot 10^4$, soit une gamme assez large du ratio β compris entre 870 et 31 600.

Pour les cas en mouvements forcés et courant, les mêmes amplitudes et fréquences de mouvements sont imposées, additionnées à un courant U de 0,2 ; 0,4 ou 0,8 m/s .

III – Résultats obtenus

III – 1 Essais en courant seul

Les essais en courant seul ont été effectués avec des vitesses de courant de 0,15 à 1,50 m/s pour les trois rugosités considérées. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3, en terme de coefficient de traînée moyen en fonction du nombre de Reynolds.

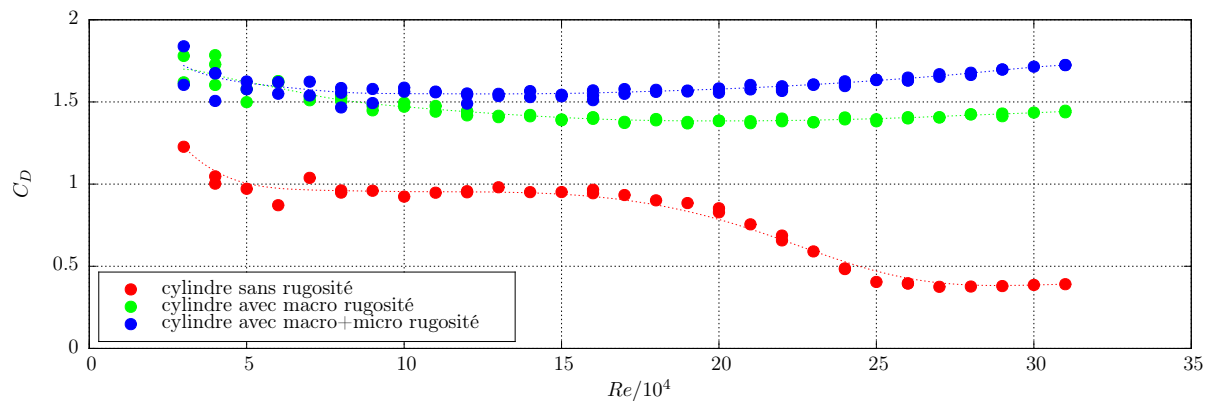


Figure 3: Évolution du coefficient de traînée moyen C_D , pour les trois cas de rugosité, en fonction du nombre de Reynolds

La courbe du C_D du cylindre sans rugosité présente une particularité intéressante avec une chute des valeurs du coefficient entre $15 \cdot 10^4$ et $25 \cdot 10^4$ (Reynolds critique). Ce

phénomène s'explique par le changement de régime d'écoulement dans cette gamme de Reynolds [8], où l'on passe du régime subcritique, avec des valeurs de C_D légèrement inférieures à 1, au régime critique et des valeurs inférieures à 0,4. Ceci conduit, par exemple, à mesurer un effort de traînée plus faible à 1,3 m/s qu'à 1,0 m/s.

Au contraire du cylindre sans rugosité, les C_D des cylindres avec rugosité ont plutôt tendance à rester constants avec le nombre de Reynolds. Ils augmentent même légèrement pour celui avec macro + micro rugosité, d'une valeur légèrement supérieure à 1,5 pour $Re < 20.10^4$ à une valeur autour de 1,7 pour $Re \simeq 30.10^4$.

Il est intéressant de constater que les courbes de traînée obtenues pour les deux rugosités ne sont pas identiques. En effet, la différence entre les deux courbes est nettement visible, en particulier pour les nombres de Reynolds supérieurs à 15.10^4 . L'écart augmente linéairement avec Re , pour atteindre une valeur de 0,2 pour les plus hauts Reynolds testés, le cylindre avec macro + micro rugosité présentant les plus grandes valeurs de C_D .

L'effet de la rugosité est donc nettement visible sur ces courbes avec une augmentation de la traînée moyenne d'un facteur 1,5 pour le régime d'écoulement subcritique ($Re < 20.10^4$) à plus de 4 pour le régime d'écoulement critique ($Re > 25.10^4$). Parallèlement, la différence de traînée moyenne est plutôt faible entre les deux cas de rugosité testés, sur la gamme de Reynolds considérée.

III – 2 Essais en mouvements forcés

Les résultats des essais présentés dans ce paragraphe ont tous été effectués sans courant, mais avec des mouvements sinusoïdaux forcés définis par une amplitude A_x et une fréquence f . Les figures 4 et 5 présentent respectivement l'évolution du coefficient de masse ajoutée et de traînée fluctuante en fonction du K_C , pour le cylindre de référence ainsi que pour les deux rugosités. Les valeurs obtenues pour le cylindre sans rugosité sont comparées à celles issues de Verley [8] et Sarpkaya [4] pour des valeurs du paramètre β dans la gamme testée ici, *i.e.* de 870 à 31 600. Les essais de Verley ont été obtenus en suivant un protocole identique à celui de cette étude (cylindre oscillant dans un canal de circulation) à la différence près qu'ils ont été obtenus pour des β constants. Les valeurs mesurées sont proches des résultats bibliographiques pour les deux coefficients, sur la gamme des K_C testée. Globalement, le C_m montre peu d'évolution avec des valeurs comprises entre 2 et 1,5. Il en est de même pour le C_d , avec des valeurs comprises entre 0,7 et 2.

Les coefficients relevés pour les cas avec rugosité diffèrent des précédents en valeur avec une augmentation d'un rapport proche de 2 pour le C_m et le C_d . Ce dernier tend à augmenter à mesure que K_C diminue, pour les $Re \geq 12.10^4$. Par contre, aucune différence n'apparaît de manière significative entre les deux cas de rugosité. Le cas macro + micro rugosité semble toutefois montrer une disparité des résultats un peu supérieure, en particulier pour le C_d à faible K_C .

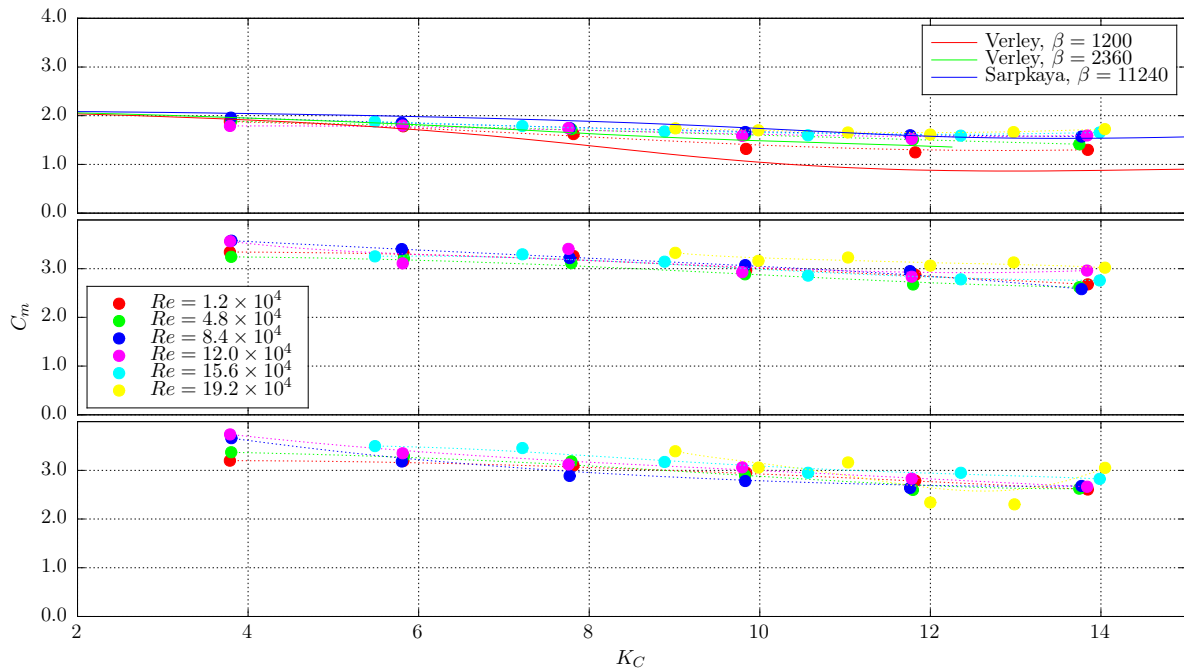


Figure 4: Coefficient de masse ajoutée C_m obtenu pour le cylindre sans rugosité (en haut), avec macro rugosité (au centre) et avec macro + micro rugosité (en bas), en mouvement imposé, en fonction du K_C , pour différentes valeurs de Re .

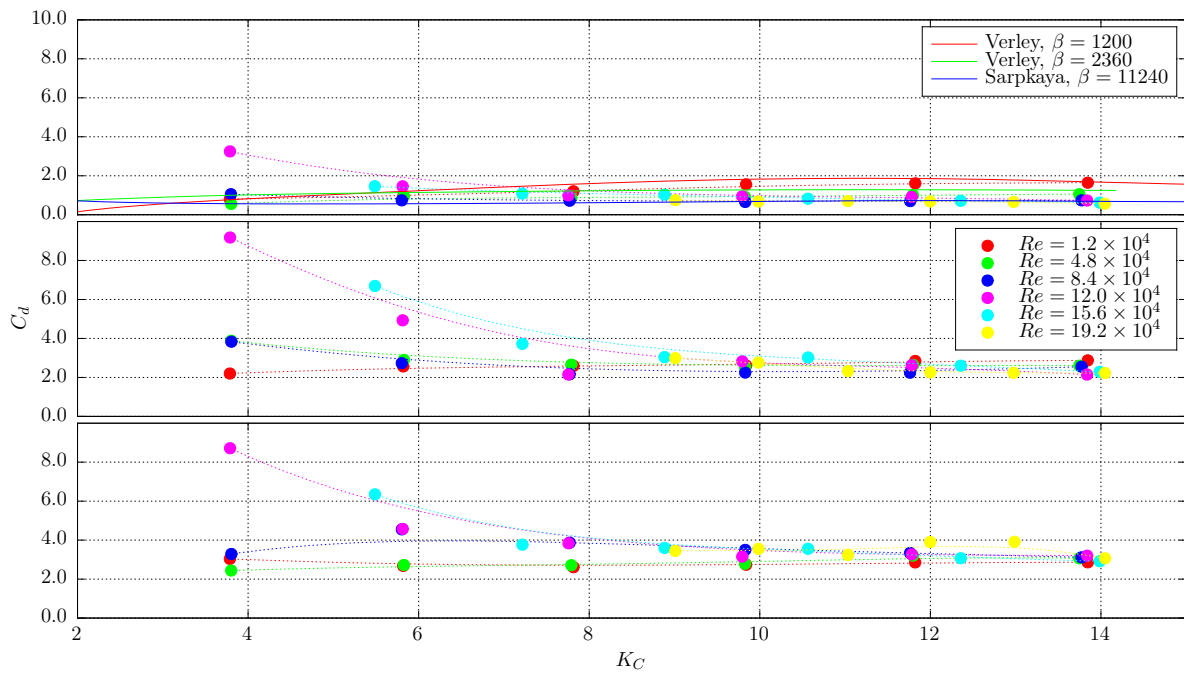


Figure 5: Coefficient de traînée C_d obtenu pour le cylindre sans rugosité (en haut), avec macro rugosité (au centre) et avec macro + micro rugosité (en bas), en mouvement imposé, en fonction du K_C , pour différentes valeurs de Re .

III – 3 Essais en mouvements forcés et courant

L'évolution des C_m , C_d et C_D obtenus pour les mêmes cas que précédemment, mais avec la combinaison de courant et de de mouvements imposés colinéaires avec celui-ci, sont présentés sur les figures 6, 7 et 8. Ces résultats sont tracés en fonction de la vitesse réduite U_r , qui tient compte de la fréquence des mouvements f et de la vitesse du courant U , pour différentes valeurs d'amplitude réduite des mouvements A_x/D . Comme dans le paragraphe précédent, les résultats obtenus pour le cylindre de référence sont comparés avec ceux issus de [8], sur une gamme d'amplitude et de vitesse réduites proche. Les résultats obtenus ici semblent converger vers les résultats bibliographiques pour les trois coefficients et sur la gamme de U_r commune, sauf pour la traînée moyenne (figure 8) pour laquelle les données bibliographiques montrent une plus grande dispersion aux plus faibles vitesses réduites.

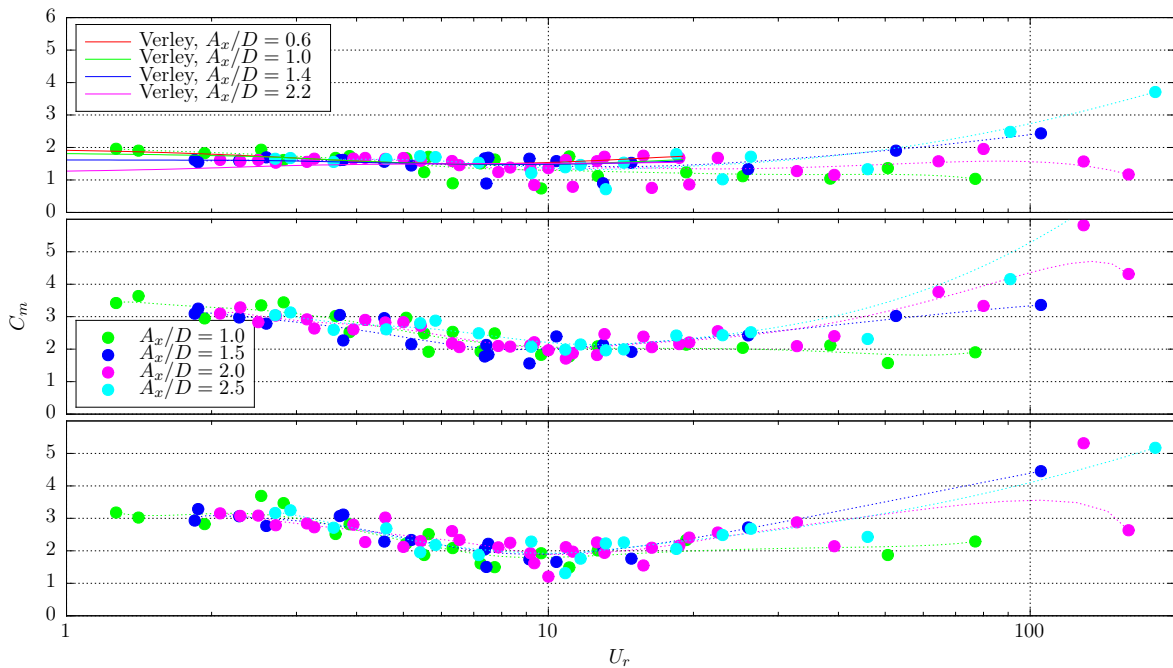


Figure 6: Coefficient de masse ajoutée C_m obtenu pour le cylindre sans rugosité (en haut), avec macro rugosité (au centre) et avec macro + micro rugosité (en bas), en mouvement imposé et courant, en fonction de U_r , pour différentes valeurs de A_x/D .

Le coefficient de masse ajoutée du cylindre de référence (figure 6) montre des valeurs convergeant vers 2 pour les plus faibles U_r puis se dispersant entre 0,5 et 2 pour $5 < U_r < 50$. Au delà de $U_r = 50$, les résultats se dispersent d'avantage. Le coefficient de traînée fluctuante (figure 7) converge globalement autour de 1 pour les plus faibles U_r puis augmente avec U_r jusqu'à des valeurs supérieures à 10 pour les plus grandes vitesses réduites. Ce changement de pente intervient d'autant plus tôt que le rapport A_x/D est faible, ce qui semble également être constaté par Verley. Enfin, la traînée moyenne (figure 8) est plutôt relativement dispersée entre 1 et 3 pour les plus faibles U_r , puis diminue globalement en convergeant vers 1 pour les plus grandes vitesses réduites.

Les résultats obtenus pour les deux cylindres rugueux sont, ici aussi, relativement proches mais diffèrent fondamentalement du cylindre non rugueux. Ainsi, le coefficient de masse ajoutée (figure 6) est légèrement supérieur à 3 pour les plus basses vitesses réduites, puis décroît jusqu'à un minimum autour de 2 pour $U_r \simeq 10$. Pour $U_r > 10$, il

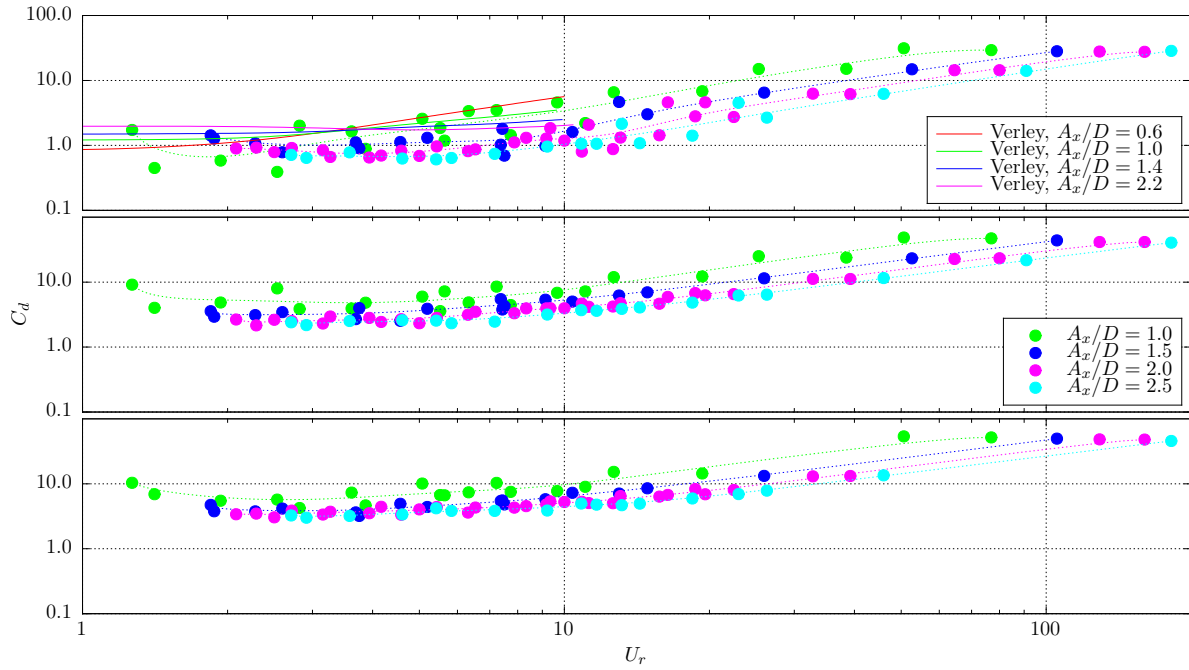


Figure 7: Coefficients de traînée C_d obtenu pour le cylindre sans rugosité (en haut), avec macro rugosité (au centre) et avec macro + micro rugosité (en bas), en mouvement imposé et courant, en fonction de U_r , pour différentes valeurs de A_x/D .

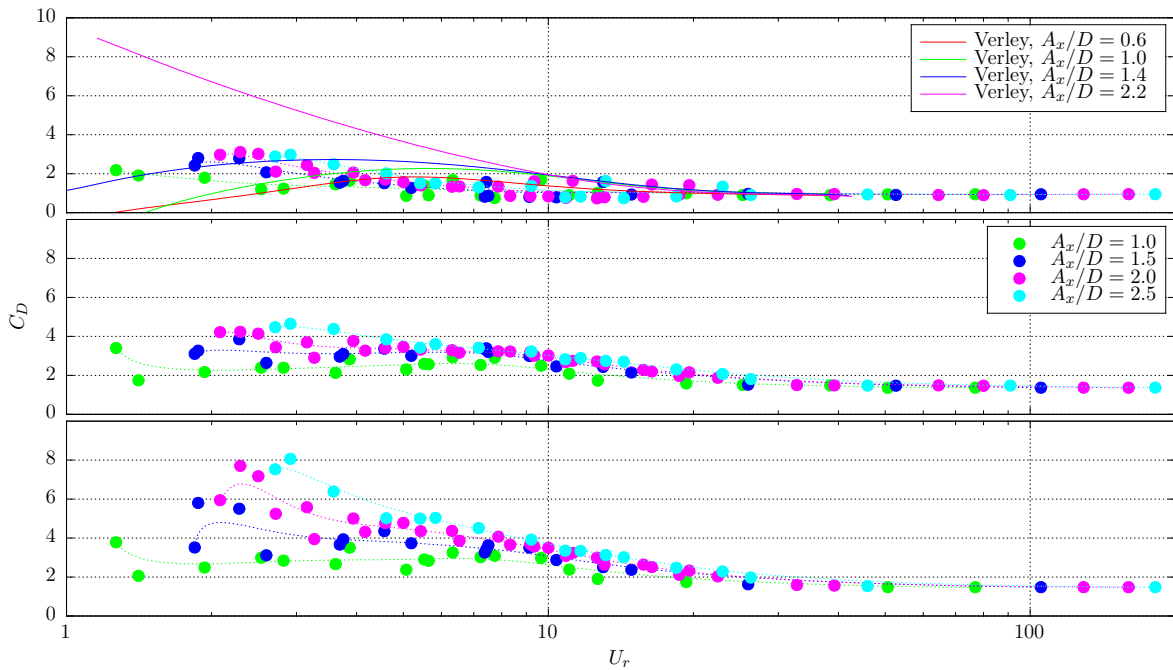


Figure 8: Coefficients de traînée moyenne C_D obtenu pour le cylindre sans rugosité (en haut), avec macro rugosité (au centre) et avec macro + micro rugosité (en bas), en mouvement imposé et courant, en fonction de U_r , pour différentes valeurs de A_x/D .

croît globalement avec la vitesse réduite tout en se dispersant avec des valeurs comprises entre 2 et 6. Comparativement au cylindre de référence non rugueux, ce coefficient est donc entre 2 et 1,5 fois plus élevé pour les vitesses réduites respectivement inférieures à 5 et comprises entre 5 et 20. Pour $U_r > 20$ ce ratio est d'environ 2 également, mais la

grande dispersion des résultats rend l'interprétation délicate.

Le coefficient de traînée fluctuante (figure 7) des cylindres rugueux est compris entre 3 et 10 pour les vitesses réduites inférieures à 10 puis augmente de manière linéaire avec U_r ensuite. Comme pour le cylindre de référence, ce changement de pente intervient d'autant plus tôt que le rapport A_x/D est faible. Ces valeurs sont également largement supérieures à celle du cylindre de référence avec un ratio moyen d'environ 4 pour les vitesses réduites inférieures à 10, puis ce ratio semble diminuer à moins de 2 à partir de $U_r \simeq 20$.

Enfin, en ce qui concerne le coefficient de traînée moyen (figure 8), on note d'abord une différence entre les deux types de rugosité pour $U_r \leq 5$ avec une dispersion des valeurs plus marquée pour le cylindre avec macro + micro rugosité entre 2 et 8. Cette différence est d'autant plus marquée que le rapport A_x/D est grand. Il est d'ailleurs intéressant de constater que les valeurs obtenues pour cette rugosité et pour des amplitudes de mouvement de 2 et 2,5 fois le diamètre correspondent assez bien avec celles de la courbe de Verley pour $A_x/D = 2,2$. Mis à part cette portion de courbe, les différences par rapport aux résultats obtenus pour le cylindre de référence sont un peu plus faibles : le ratio vaut approximativement 1,5 pour l'ensemble de la gamme de U_r , ce qui correspond à l'écart relevé pour les essais en courant seul pour le régime subcritique (figure 3).

IV – Conclusion

L'étude présentée ici permet de comparer les résultats obtenus en terme de coefficients de traînée moyen, de masse ajoutée et de traînée fluctuante entre un cylindre de référence non rugueux et deux cylindres rugueux. Plusieurs configurations ont été testées avec des essais en courant seul, en mouvements forcés ainsi qu'en courant et mouvements forcés. Les gammes couvertes sont des nombres de Reynolds variant entre 5.10^4 et 30.10^4 pour les essais en courant seul, des nombres de Keulegan-Carpenter compris entre 4 et 14 pour les essais en mouvements imposés et des vitesses réduites entre 1 et 100 pour les essais combinant courant et mouvements.

A partir des résultats présentés dans ce papier, il ressort que les différences observées entre les deux cas de rugosité testés sont relativement faibles ou inexistantes. Un écart maximal de 0,2 pour la traînée moyenne est constatée pour les essais en courant seul, uniquement pour le régime d'écoulement critique. Le coefficient de masse ajoutée ainsi que celui de traînée obtenus pour les essais en mouvements forcés sont quasiment identiques. Seules quelques différences apparaissent sur la courbe du C_d , pour les plus grands nombres de Reynolds et les plus faibles nombres de Keulegan-Carpenter, autrement dit pour les grandes fréquences de mouvement, donc les plus grandes vitesses et accélérations de déplacement. Pour la dernière configuration en mouvements forcés et courant, le coefficient de masse ajoutée est sensiblement identique ainsi que le coefficient de traînée. La traînée moyenne montre cependant des différences en particulier pour les plus faibles vitesses réduites et les plus grands rapport A_x/D , donc de nouveau pour les plus grandes vitesses et accélérations de mouvement.

Les différences obtenues entre les cylindres rugueux et le cylindre de référence sont, *a contrario*, bien marquées pour l'ensemble des sollicitations imposées. Tous les coefficients mesurés avec les rugosités sont supérieurs à ceux du cylindre de référence d'un rapport compris entre 1,5 et 4. Ainsi, la traînée moyenne est 1,5 fois plus élevée pour les essais en courant seul dans le régime subcritique. Ce ratio atteint 4 dans le régime critique, puisque les cylindres avec rugosités ne montrent pas de chute de traînée lors du changement de

régime. De même, les résultats d'essais en mouvements forcés montrent des C_d et C_m globalement deux fois supérieurs. Enfin, les coefficients obtenus pour la configuration en mouvements forcés et courant sont également environ deux fois supérieurs pour le C_m , entre deux et quatre fois plus élevés pour le C_d et 1,5 fois supérieurs pour la traînée moyenne.

A la vue de ces résultats, il semble donc que ces bio-salissures de grandes rugosités et de forte densité aient, outre leur poids, une influence non négligeable sur les paramètres hydrodynamiques dimensionnant la structure. Une comparaison des résultats obtenus lors de cette étude avec les modèles numériques utilisés pour dimensionner les *jackets* et appliqués à ces configurations d'essais permettrait d'apporter d'éventuelles corrections aux valeurs des coefficients utilisés dans ces modèles, afin de tenir compte d'une telle colonisation.

Une caractérisation plus poussée de la rugosité, avec notamment une variation de la densité de présence ou une répartition non-uniforme des concrétions sur la longueur du cylindre, permettrait de compléter cette étude.

Références

- [1] E. ACHENBACH et E. HEINECKE : On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6 . *Journal of Fluid Mechanics*, 109:239–251, 8 1981.
- [2] M. L. BOUKINDA MBADINGA : *Surface de réponse des efforts de houle des structures jackets colonisés par des bio-salissures*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, faculté des sciences et des techniques, sept. 2007.
- [3] J. R. MORISON, M. P. O'BRIEN, J. W. JOHNSON et S. A. SCHAAF : The forces exerted by surface waves on piles. *Journal of Petroleum Technology*, 2(5):149–154, mai 1950.
- [4] T. SARPKAYA : Vortex shedding and resistance in harmonic flow about smooth and rough circular cylinders at high Reynolds numbers. Rap. tech. NPS-59SL76021, Naval postgraduate school, Monterey, CA, USA, 1976.
- [5] T. SARPKAYA : In-line and transverse forces on cylinders in oscillatory flow at high Reynolds numbers. *Journal of ship research*, 21(4):200–216, 1977.
- [6] H. SCHLICHTING : *Boundary layer theory*. McGraw-Hill book compagy, New York, 1979.
- [7] A. THEOPHANATOS : *Marine growth and the hydrodynamic loading of offshore structures*. Thèse de doctorat, University of Strathclyde, 1988.
- [8] R. L. P. VERLEY : *Oscillations of cylinders in waves and currents*. Thèse de doctorat, Loughborough University of Technology, mai 1980.