

ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DE LA GEOMETRIE D'UN CYLINDRE  
SUR LA CIRCULATION QUE LA HOULE GENERE EN SON VOISINAGE

A. JARNO - M. BELORGEY

Laboratoire de Mécanique des Fluides  
Université du Havre  
25, rue P. Lebon - B.P. 540  
76 058 Le Havre Cédex

Résumé

Une étude expérimentale de la circulation de fluide existant autour de cylindres horizontaux soumis à la houle, placés en dehors de l'influence de la surface libre et du fond, dans des conditions de nombre de Keulegan-Carpenter ( $K_c$ ) faible est présentée.

Dans le cas de cylindres à section circulaire, les cas  $K_c=2,3$  et  $K_c=3,1$  ont été traités. Les calculs de circulation basés sur des mesures fines de champs cinématiques instantanés moyens, mettent en évidence dans le cas  $K_c=2,3$ , l'existence d'une circulation de fluide, d'intensité relativement constante au cours de la période et dirigée dans le sens du mouvement orbital. La force induite par cet effet tend à s'opposer à la force d'inertie à chaque instant. Dans le cas  $K_c=3,1$ , une activité tourbillonnaire accrue caractérise l'écoulement par rapport au cas  $K_c=2,3$  et la circulation ne traduit alors que la globalité des phénomènes tourbillonnaires se produisant près du cylindre.

L'estimation de la circulation dans le cas de cylindres à section rectangulaire avec des géométries d'arêtes différentes (à 90°, biseautées, arrondies) conduit au résultat que celle-ci est favorisée dans le cas des bords biseautés.

Abstract

An experimental investigation of fluid circulation around horizontal cylinders beneath waves, situated out of direct influences of bed and free surface, in conditions of low Keulegan-Carpenter numbers ( $K_c$ ), is presented.

In case of circular sections,  $K_c=2,3$  et  $K_c=3,1$  are studied. Circulation calculations based on measured mean instantaneous kinematic flow fields, demonstrate, for  $K_c=2,3$ , the existing of a fluid circulation, which stays nearly constant during the period and which sense is the orbital motion one. Force induced by the effect tends to oppose to inertia force.

For  $K_c=3,1$ , flow is characterized by an increased vortex activity. Circulation is the result of all vortex phenomena occurring in the neighbourhood of the cylinder.

Circulation estimation in case of cylinders with rectangular sections and different line geometries (right angles, beveled, rounded) reveals that this one is increased by beveled lines.

## I. INTRODUCTION

On s'intéresse ici au cas de cylindres horizontaux situés en profondeur infinie, en dehors de zones d'influence directe de la surface libre et du fond et dans des conditions d'écoulements telles que le nombre de Keulegan-Carpenter ( $K_c$ ) est faible. Ces conditions permettent de simuler celles subies réellement par les pontons de plateformes semisubmersibles.

Dans ces conditions, les efforts subis par le cylindre sont le plus souvent approximés grâce à la théorie potentielle, et toute action de la viscosité est négligée.

En contre-partie, des études menées par CHAPLIN (1984) sur des cylindres à section circulaire et IKEDA (1988) sur des cylindres à section rectangulaire, mettent en évidence une réduction des efforts subis réellement par les cylindres par rapport à ceux prédits par les modèles. Chaplin va plus loin dans ses conclusions et attribue la présence d'une importante composante de force au troisième ordre de l'amplitude de la houle à l'existence d'une circulation induite par un écoulement secondaire d'entraînement généré dans la couche limite oscillante autour du cylindre. Cette force qui tend à s'opposer à la force d'inertie, pourrait atteindre la moitié de celle-ci pour des  $K_c$  autour de 2.

Des études théoriques menées par SCHLICHTING (1932), LONGUET-HIGGINS (1970) et RILEY (1971, 1978) ont mis en évidence l'existence de tels écoulements secondaires, dans le cas de cylindres à section circulaire et elliptique se déplaçant sur une trajectoire circulaire sans rotation dans un fluide au repos à l'infini, ainsi que dans le cas de cylindres oscillants dans un fluide au repos. Bien que la nature de l'écoulement généré par la houle soit instationnaire et non uniforme, l'hypothèse de l'existence d'un écoulement secondaire généré dans la couche limite oscillante autour du cylindre doit être vérifiée.

Notre approche est essentiellement expérimentale. Elle consiste à analyser l'évolution de la circulation du fluide dans le voisinage du cylindre, en nous basant sur des champs cinématiques instantanés moyens mesurés par Vélocimétrie Doppler Laser.

Après une première partie qui concerne les cylindres à section circulaire, nous aborderons les cylindres à section rectangulaire, dont la géométrie est voisine des éléments horizontaux des pontons de plateformes semi-submersibles et tenterons de comparer l'influence de trois géométries différentes d'arêtes longitudinales, sur la circulation de fluide existant autour du cylindre.

## II. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le canal dans lequel ont été menées ces expériences mesure 9 m de long, 0,80 m de large et un mètre de haut. La génération de la houle est réalisée grâce à un batteur plan. La réflexion de l'onde est minimisée grâce à une plage d'amortissement composée de trois étages de filtres répartis sur toute la hauteur d'eau. Un soin particulier a été pris pour réduire la réflexion. A ces fins, le montage de fixation du cylindre a été réduit et celui-ci est simplement plaqué contre les parois latérales du canal.

Dans tous les cas présentés, la houle générée est identique ainsi que la situation du centre du cylindre par rapport à la surface libre. L'écoulement résultant de l'interaction houle-cylindre n'est alors modifié que par les dimensions différentes des cylindres expérimentés.

Les conditions de houle générées sont regroupées sur le schéma de la figure 1, ainsi que la position des cylindres testés.

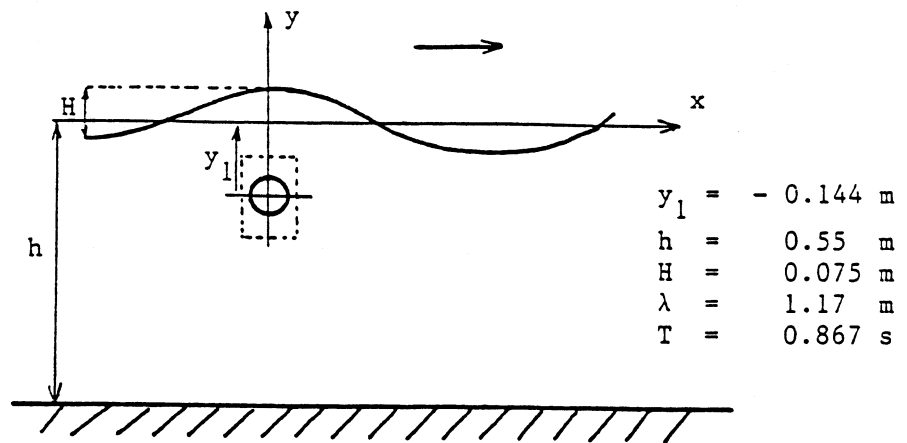


Figure 1 - Caractéristiques de la houle testée

Dans le cas des cylindres à section circulaire, les diamètres  $D$  de 40 mm et 32 mm ont été étudiés. Les nombres de Keulegan-Carpenter associés à ces diamètres et basés sur la vitesse maximum horizontale  $U_m$  mesurée au centre du cylindre en son absence sont égaux à 2,3 et 3,1. Les nombres de Reynolds ( $Re$ ) basés sur les diamètres des cylindres sont égaux respectivement à 4400 et 3712 et les coefficients  $\beta$ , rapport du nombre de Reynolds sur le nombre de Keulegan-Carpenter de 1913 et 1197.

L'ensemble de ces informations sont regroupées dans le tableau suivant.

$K_c$	2,3	3,11
$Re$	4400	3712
$\beta$	1913	1197

Dans le cas des cylindres à section rectangulaire testés, la section est de  $L=53 \text{ mm} \times l=27 \text{ mm}$ . Pour le cylindre à arêtes longitudinales arrondies, le rayon des arrondis est de 8 mm. Dans le cas du cylindre à arêtes biseautées, les biseaux sont à  $45^\circ$ . (figure 2)

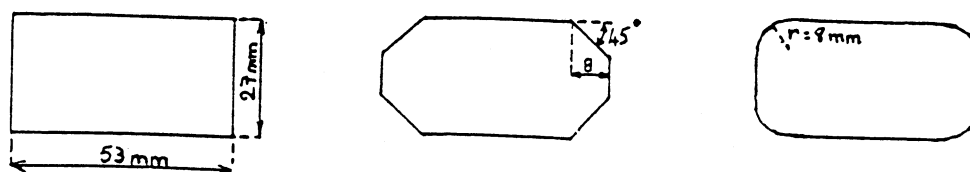


Figure 2 - Caractéristiques des cylindres à section rectangulaire

La technique de mesure de vitesse utilisée est la Vélocimétrie Doppler Laser à une composante. Après acquisition de chaque composante de vitesse de manière continue sur une vingtaine de vagues, un traitement permet d'accéder à des composantes de vitesse instantanées moyennes. Celles-ci sont obtenues en moyennant l'ensemble des vitesses mesurées qui concernent une même position de la vague, sur l'ensemble de l'échantillon. Chaque position de la vague correspond en réalité à un petit intervalle de temps ou phase de la vague. Sur chacun de ces intervalles, environ un millier de valeurs sont acquises et conduisent à la détermination d'une valeur moyenne de la composante de vitesse instantanée mesurée.

L'installation ainsi que l'instrumentation utilisée sont présentés plus en détail dans JARNO (1989). On y trouvera également l'ensemble des résultats concernant les cylindres à section circulaire présentés ici. Les résultats sur les cylindres à section rectangulaire sont regroupés dans JARNO (1990).

### III. CYLINDRES A SECTION CIRCULAIRE

#### III.1 Evolution du champ cinématique instantané moyen - Comparaison des cas $K_c=2,3$ et $K_c=3,1$ .

La période de la houle étant de 0,86s et la durée de chaque phase étant choisie égale à 0,02s, 43 "images instantanées moyennes" de l'écoulement, réparties sur la période, sont obtenues.

Quatre de ces champs cinématiques instantanés moyens sont présentés pour chacun des cas testés (figures 3 et 4). Ils correspondent au passage des sommet, front descendant, creux et front montant de la vague, à la verticale de l'axe du cylindre.

Une évolution des lignes de courant sur 11 phases réparties sur la période est également représentée en figures 5 et 6, dans les cas  $K_c=2,3$  et  $K_c=3,1$ , respectivement.

Dans le cas  $K_c=2,3$ , un tourbillon de couche limite apparaît au cours de la période. Il commence à se développer en aval du cylindre au passage du sommet de la vague et se déplace le long du cylindre dans le sens du mouvement orbital, tout en grossissant. Il disparaît dans le proche voisinage du cylindre peu avant le passage du front montant, entraînant localement une perturbation de l'écoulement moyen. Pour ces mêmes positions de la vague et les suivantes, le fluide remonte rapidement le long du cylindre par l'amont et entraîne la formation du tourbillon suivant.

Dans le cas  $K_c=3,1$ , la formation du tourbillon de couche limite à rotationnel dirigé dans le sens du mouvement orbital est beaucoup plus rapide que dans le cas  $K_c=2,3$ . Le tourbillon est bien formé avant le passage du sommet. Il est ensuite "ralenti" dans son développement par la formation d'un second tourbillon, à rotationnel opposé, qui est lâché rapidement dans le sillage. Une fois ce tourbillon lâché, le tourbillon de couche limite descend légèrement le long du cylindre avant d'être également lâché dans le sillage peu après le passage du creux.

La comparaison de ces deux cas conduit à la remarque que les deux écoulements générés diffèrent par leur activité tourbillonnaire. Dans le cas  $K_c=3,1$ , les échanges d'énergie avec l'écoulement extérieur sont amplifiés alors que, dans le cas  $K_c=2,3$ , les échanges sont très limités.

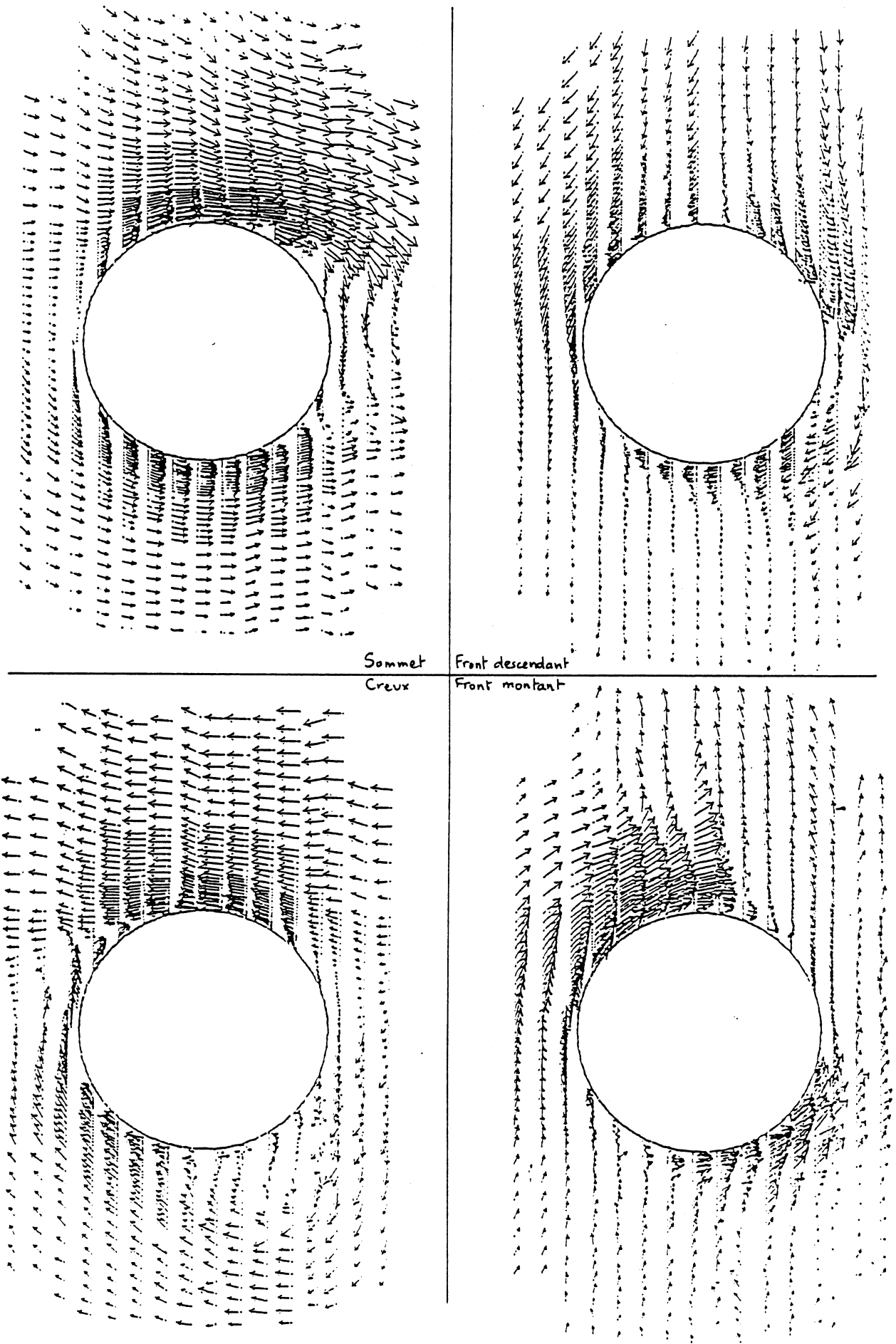


Figure 3 : cas  $KC = 2,3$

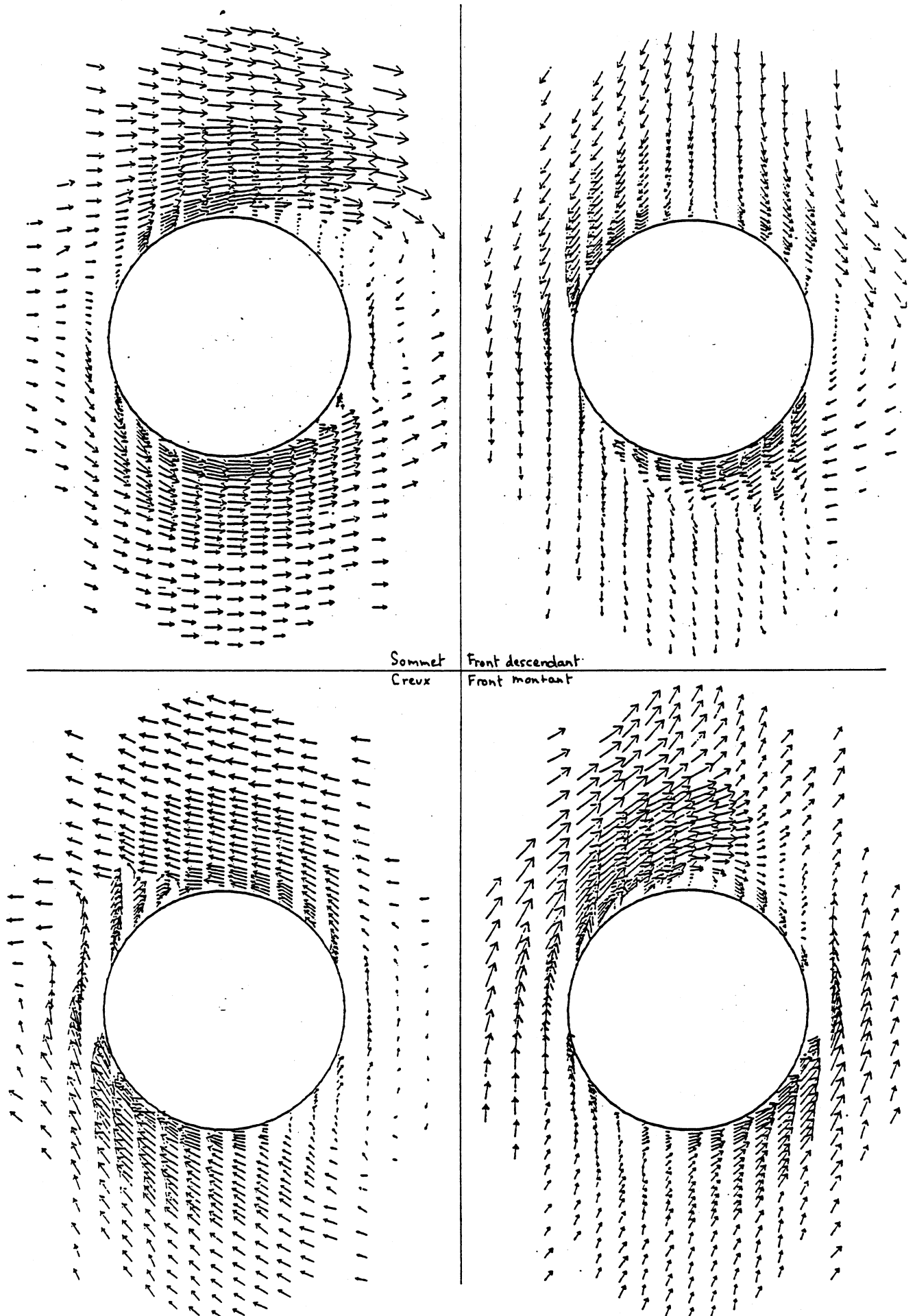
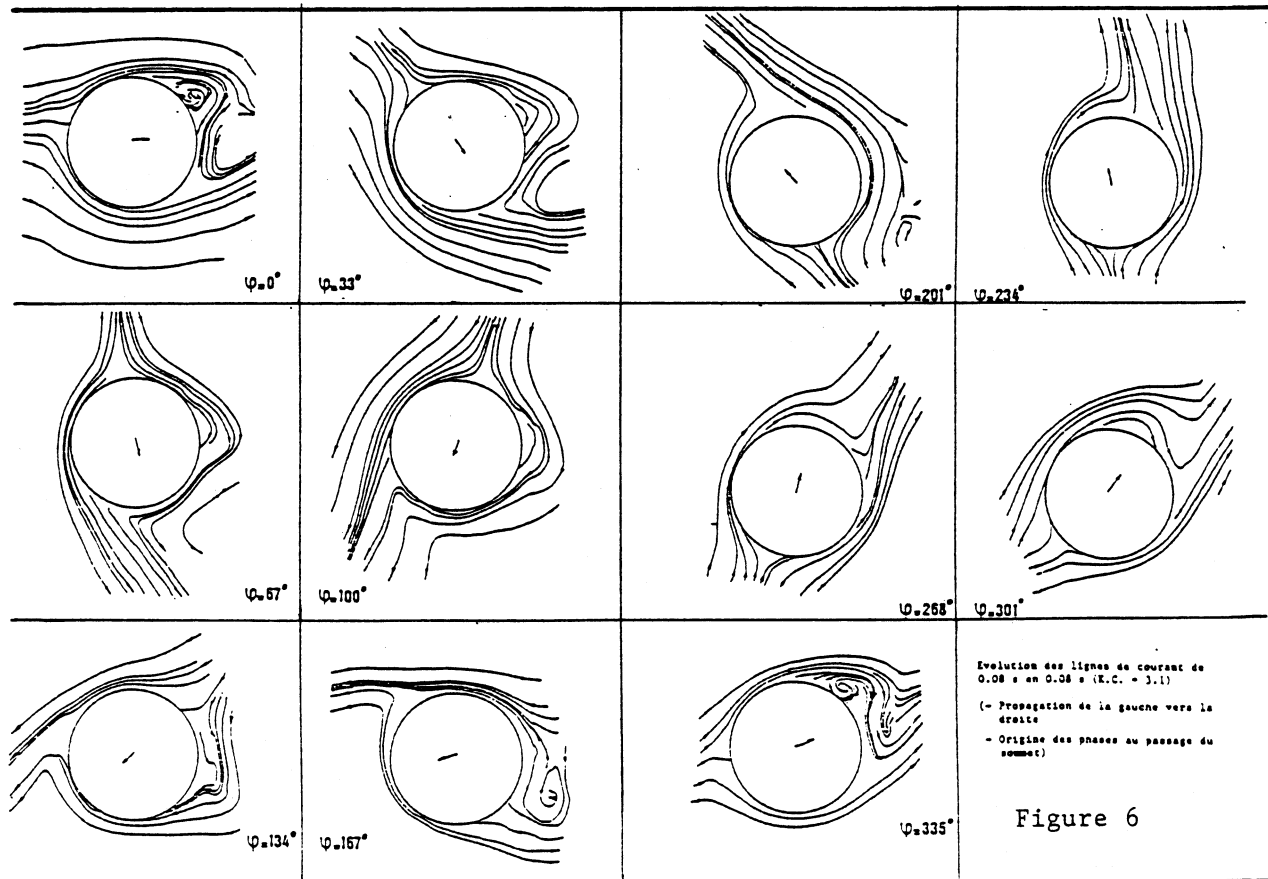
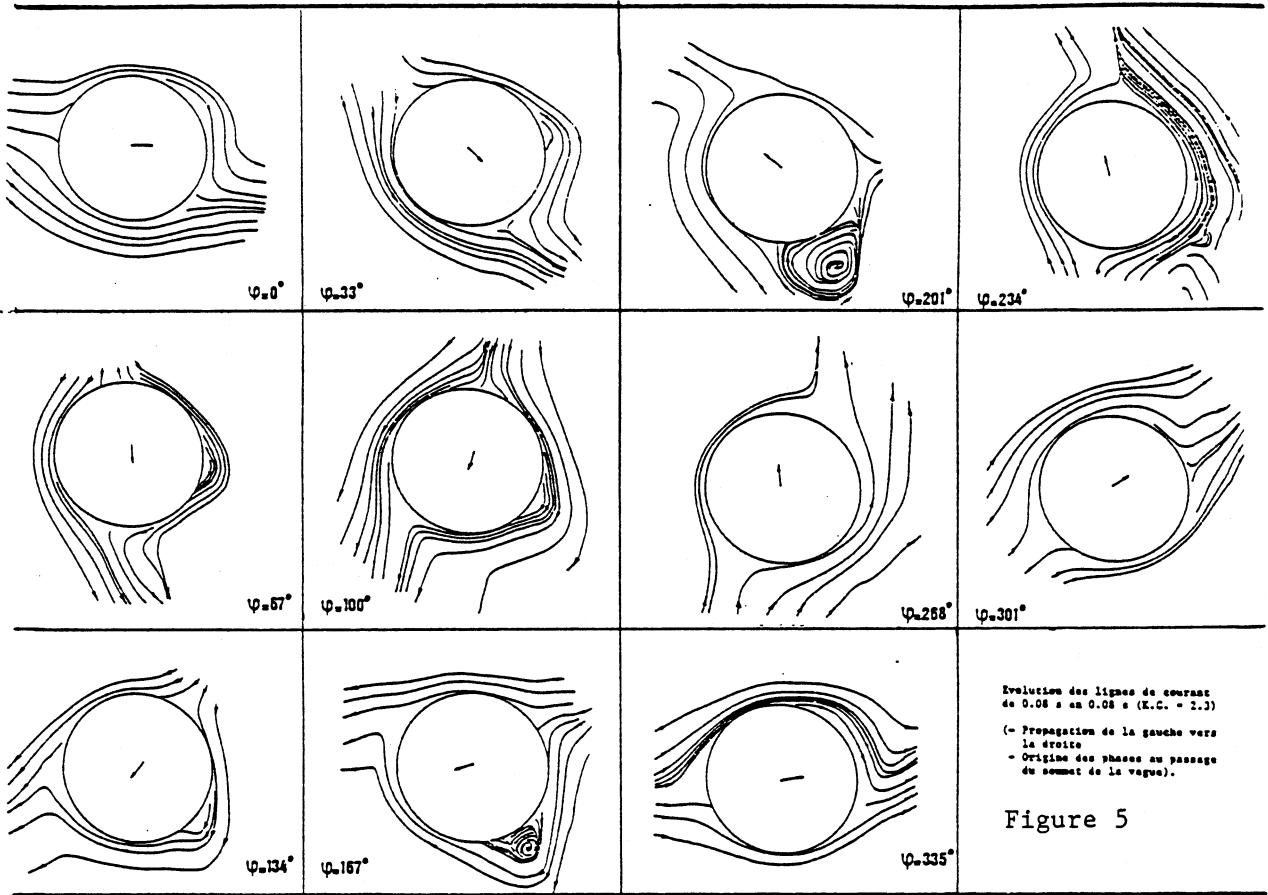


Figure 4 : cas  $KC = 3,1$



### III.2 Analyse de la circulation

A partir des champs de vitesses instantanées moyens, nous avons déterminé l'évolution de la circulation du vecteur vitesse  $\int_C \vec{V} \cdot d\vec{l}$  sur différents cercles concentriques entourant le cylindre, en fonction de la position de la vague.

Dans le cas  $K_c = 2,3$ , l'évolution de la circulation instantanée moyenne au cours de la période est représentée en figure 7 pour 3 distances adimensionnelles  $r/r_{cyl}$  au cylindre : 1,1, 1,15 et 1,75.

Dans le cas  $K_c = 3,1$ , les distances adimensionnelles sont de 1,125, 1,5 et 1,875. (figure 8)

Le sens positif de parcours des contours est choisi dans le sens trigonométrique direct.

Les courbes obtenues sont très différentes entre un cas et l'autre.

Dans le cas  $K_c = 2,3$ , quelque soit la distance adimensionnelle étudiée (dans la gamme 1,1 - 1,75), on constate que, quelque soit la position de la vague, la circulation du vecteur vitesse est toujours dirigée dans le sens du mouvement orbital. Il est de plus intéressant de remarquer que pour les contours de rayon proche de celui du cylindre, la circulation subit peu de variation d'amplitude au cours de la période.

Dans le cas  $K_c = 3,1$ , la circulation du vecteur vitesse atteint en instantané des valeurs qui peuvent être beaucoup plus élevées que dans le cas  $K_c = 2,3$ . De plus, plus on s'éloigne du cylindre, plus la circulation évolue de manière sinusoïdale, les circulations positives et négatives s'alternant au cours du temps.

L'interprétation que l'on peut donner à ce calcul de circulation est différente suivant le cas étudié.

En effet, dans le cas 2,3, l'évolution relativement constante de la circulation peut supporter l'hypothèse de l'existence d'un courant stationnaire généré dans la couche limite entourant le cylindre. Par contre, le calcul de circulation dans le cas  $K_c = 3,1$ , ne paraît traduire que la globalité de phénomènes tourbillonnaires qui se produisent dans le voisinage du cylindre.

### III.3 Approche de la force induite par la circulation

Un certain nombre d'hypothèses et simplifications ont été faites pour approcher la force induite par la circulation instantanée moyenne mesurée.

Pour estimer cette force, nous avons choisi le contour défini par  $r/r_{cyl} = 1,5$  qui correspond à une distance au cylindre de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la couche limite. Nous avons de plus considéré l'écoulement incident de houle comme une succession d'écoulements stationnaires et donc, pour cette première approche de la force, négligé tout effet dynamique.

Dans le cas d'un écoulement stationnaire et uniforme de vitesse à l'infini  $V_\infty$  et de circulation du fluide  $\Gamma$ , la force induite par la circulation a pour module  $F_{circ} = \rho V_\infty \Gamma$ , par unité de longueur de cylindre. Sa direction est perpendiculaire à la vitesse de l'écoulement.

Dans le cas de la houle, la force induite par la circulation va changer de direction au cours de la période. La vitesse de l'écoulement non perturbé, à chaque instant, est celle du modèle d'Airy calculée à la profondeur du cylindre.



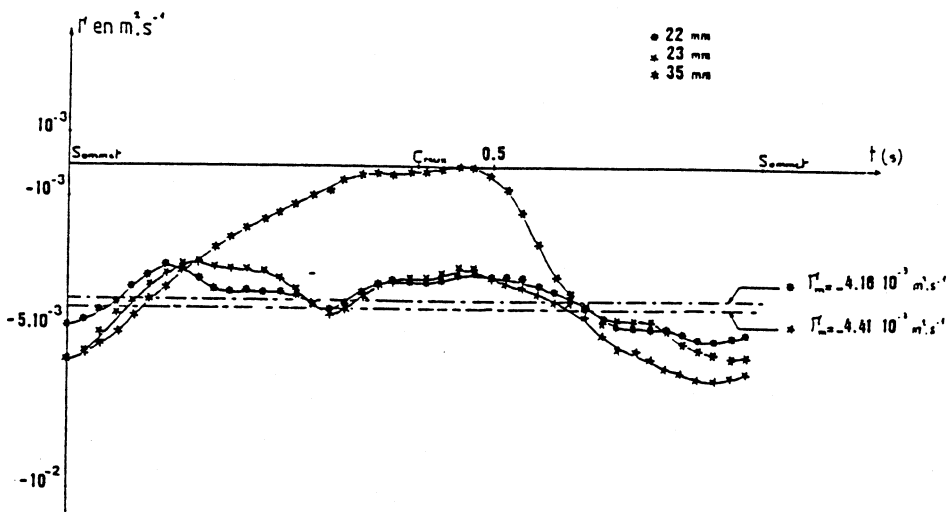


Figure 7 : Evolution de la circulation en fonction de la position de la vague pour différents rayons (KC = 2,3)

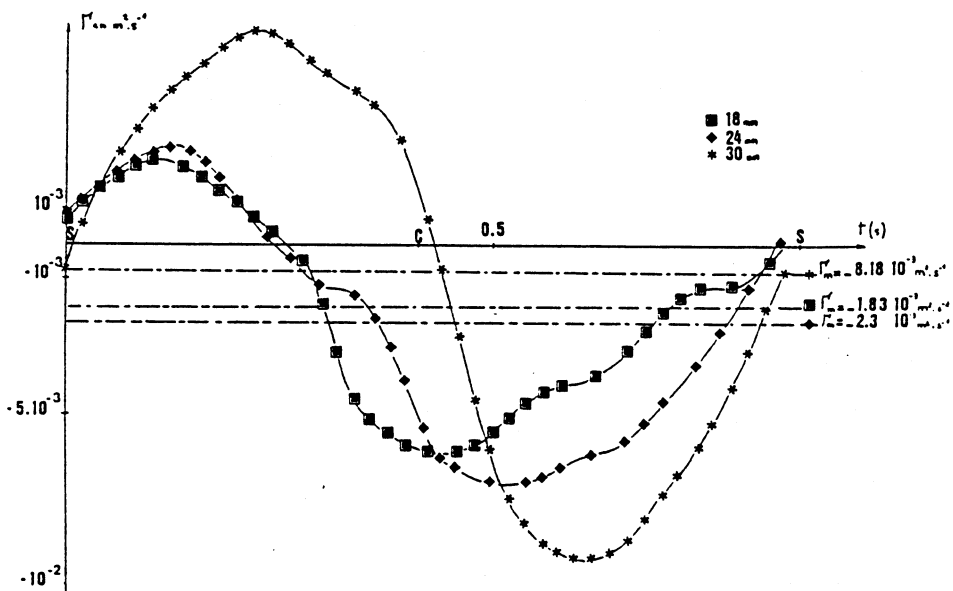


Figure 8 : Evolution de la circulation en fonction de la position de la vague pour différents rayons (KC = 3,1)

Une représentation de l'évolution de la force induite par la circulation approchée par cette méthode est donnée en diagramme polaire, en figure 9 et figure 10 pour les deux cas étudiés.

Dans le cas  $K_c=2,3$ , la circulation  $\Gamma$  du fluide restant négative tout au long de la période, la force induite par cet effet évolue continûment au cours de la période en prenant toutes les directions angulaires entre 0 et  $2\pi$ .

Dans le cas  $K_c=3,1$ , la circulation  $\Gamma$  évolue de façon très différente, présentant deux lobes qui correspondent aux changements de signe de la circulation du fluide au cours de la période. La force instantanée dans ce cas ne décrit pas toutes les positions angulaires et en moyenne, les effets s'ajoutent. La force moyenne sur la période a un module 2,5 fois plus grand dans le cas 3,1 que 2,3. Cette force moyenne est dans les deux cas dirigée vers l'amont, mais vers le haut dans le cas  $K_c=2,3$  et vers le bas dans le cas  $K_c=3,1$ .

#### III.4 Influence de la circulation sur l'effort subi par le cylindre (cas $K_c=2,3$ )

Nous avons axé la détermination sur le cas  $K_c=2,3$  où les effets visqueux restent limités et où l'évolution de circulation relativement constante au cours de la période semble cohérente avec l'hypothèse de l'existence d'un courant stationnaire fluide dans la couche limite du cylindre.

Une analyse en fréquence de la force induite par la circulation met en évidence l'importante composante de force à la fréquence  $f$  de la houle, due à une circulation constante  $\Gamma_c$ . Si on se limite à cet ordre, ajouter linéairement la force induite par cet effet à la force d'inertie tend à réduire l'effort total instantané.

En effet, en projection sur  $Ox$ , ajouter ces deux composantes de force conduit à l'expression  $F_x$  de la force suivante :

$$F_x = \rho \frac{\pi D^2}{4} C_M^{\text{total}} \frac{dU}{dt}$$

$$\text{avec } C_M^{\text{total}} = C_M + \Gamma_c \frac{2T}{\pi^2 D^2}$$

Dans cette expression,  $C_M$  représente le coefficient d'inertie et  $U$ , la composante horizontale de la vitesse non perturbée.

Comme la circulation instantanée moyenne du fluide est négative tout au long de la période, à chaque instant, la force de circulation tend à s'opposer à la force d'inertie.

La circulation  $\Gamma_c$  mesurée étant égale à  $-4,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , la réduction du  $C_M$  est de 24%, celui-ci passant de 2, valeur en écoulement potentiel à 1,52.

Le résultat trouvé confirme l'hypothèse de Chaplin quant à l'influence de la circulation sur l'effort, à faible nombre de Keulegan-Carpenter.

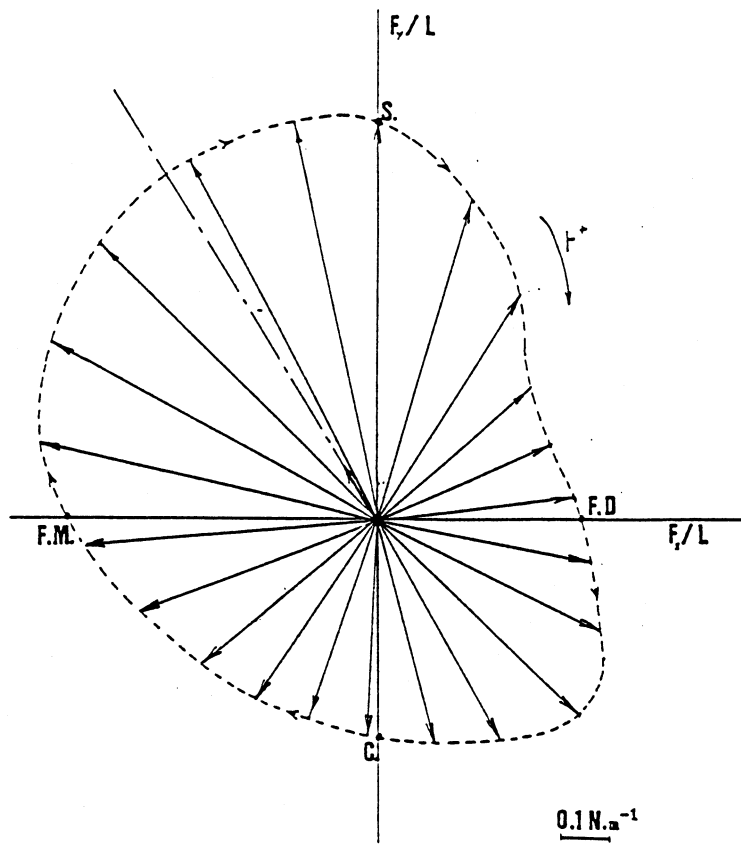


Figure 9 : Evolution de la force induite par la circulation  
(cas  $KC = 2,3$ )

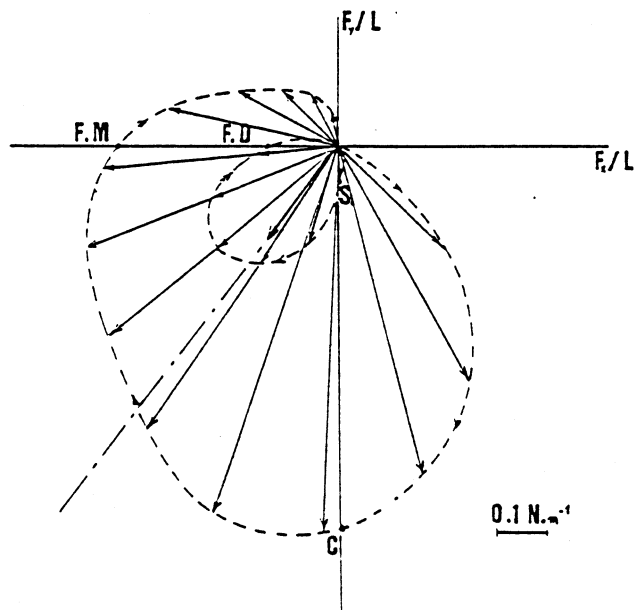


Figure 10 : Evolution de la force induite par la circulation  
(cas  $KC = 3,1$ )

#### IV. CYLINDRES A SECTION RECTANGULAIRE

Des conditions de houle identiques au cas des cylindres à section circulaires ont été testées.

Une schématisation du développement des structures tourbillonnaires, issue de l'analyse des champs cinématiques instantanés moyens mesurés et de visualisations de l'écoulement est présentée en figure 11, pour le cas  $K_c = 1,78$  étudié.

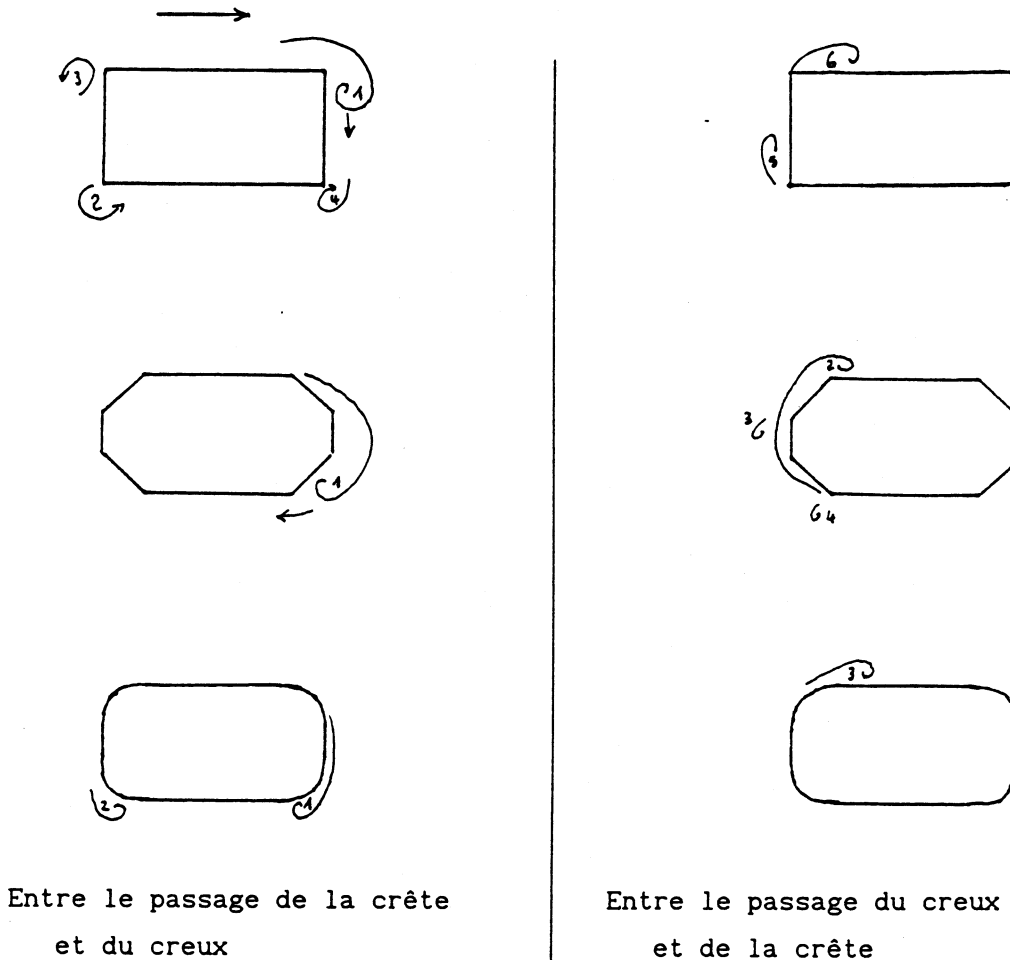


Figure 11 - Schématisation du développement des tourbillons

Il apparaît que les structures tourbillonnaires à sens de rotation identique à celui du mouvement orbital soient favorisées dans leur développement, quelque soit la forme des arêtes. D'autre part, les arêtes longitudinales à  $90^\circ$  favorisent la formation de tourbillons à la différence des arêtes arrondies, qui tendent à réduire les décollements et à entraîner la formation de quelques tourbillons peu intenses.

Dans le cas des arêtes biseautées, l'essentiel de l'activité tourbillonnaire est concentrée dans deux tourbillons à rotationnel négatif (tourbillons 1 et 2) se développant sur des temps assez longs en se déplaçant le long du cylindre dans le sens du mouvement orbital.

L'évolution de la circulation moyenne du fluide a été déterminée sur deux contours rectangulaires distants de 3 et 6 mm du cylindre, à partir des mesures de vitesses instantanées moyennes sur ces contours, en faisant les mêmes hypothèses que dans le cas des cylindres à section circulaire.

La comparaison des circulations obtenues est présentée en figure 12 pour le contour distant de 6 mm du cylindre.

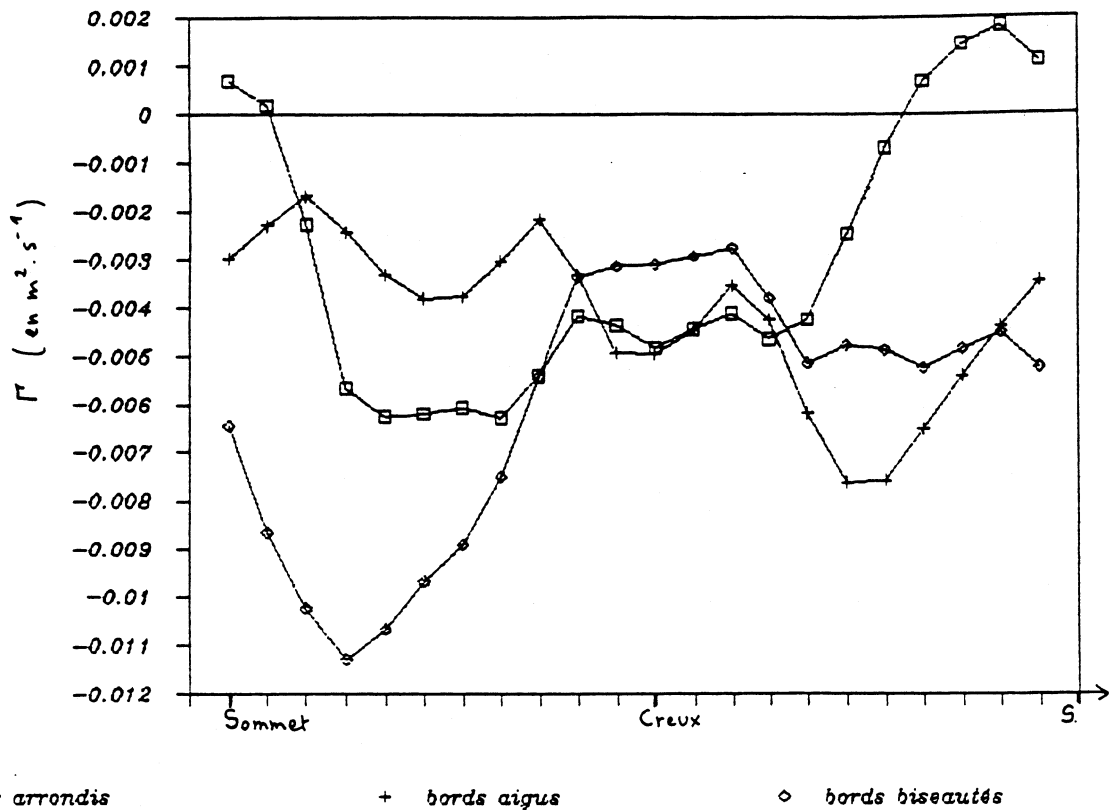


Figure 12 - Comparaison des évolutions de circulation

Les circulations moyennes sur la période sont données dans le tableau suivant.

CIRCULATION MOYENNE $\bar{\Gamma}$ ( $m^2 s^{-1}$ )		
arêtes aigus	arêtes biseautées	arêtes arrondies
-0,0042	- 0,006	- 0,0029

Dans les trois cas, la circulation moyenne est dirigée dans le sens du mouvement orbital. La plus forte circulation moyenne se rencontre dans le cas des bords biseautés. Ce résultat s'explique par l'influence du développement de deux structures à rotationnel négatif se déplaçant dans le sens du mouvement orbital. Les tourbillons 3 et 4, de sens de rotation inverse du mouvement orbital sont peu intenses et diffusent très vite : Une circulation moyenne dans le sens du mouvement orbital peut s'établir.

## V CONCLUSIONS

Nos résultats expérimentaux mettent en évidence l'existence d'une circulation de fluide importante dans le voisinage d'un cylindre à section circulaire pour  $K_c=2,3$ . Celle-ci reste relativement constante tout au long de la période et peut être interprétée comme la conséquence d'un courant stationnaire d'entraînement généré dans la couche limite du cylindre. Cette circulation induit une force dont l'amplitude est non négligeable de vant la force d'inertie. Elle tend à la réduire tout au long de la période.

Dans le cas  $K_c=3,1$ , la circulation traduit la globalité de phénomènes tourbillonnaires intenses dans le voisinage du cylindre.

Lorsque la section est rectangulaire, la forme des arêtes longitudinales est un paramètre important quant à l'établissement ou non d'une circulation de fluide. Nos résultats mettent en évidence que les arêtes biseautées favorisent davantage la circulation dirigée dans le sens du mouvement orbital que les arêtes arrondies et à angles droits. Cette circulation aura pour effet de réduire les efforts instantanés subis par le cylindre.

### Remerciements.

Cette étude a été effectuée grâce à un financement de l'I.F.P (contrat n° 11 344) que nous remercions.

### Références.

- Chaplin, J.R., 1984, "Nonlinear force on a horizontal cylinder beneath waves", *J. Fluid. Mech.*, Vol. 143, pp. 449-464.
- Ikeda, Y.; Otsuka, J.K.; Tanaka, N., 1988, "Viscous forces acting on a submersible", *7th Int. Conf. on Offshore Mech. and Arctic Eng.*, pp. 101-108.
- Schlichting, H., "Boundary layer theory", Mc Graw Hill Ed., 1968.
- Longuet-Higgins, M., 1970, "Steady currents induced by oscillations around islands", *J. Fluid. Mech.*, Vol.42, pp. 702-720.
- Riley, N., 1971, "Stirring of a viscous fluid", *Z. angew. Math. Phys.*, 22, pp. 645-653.
- Riley, N., 1978, "Circular oscillations of a cylinder", *Z. angew. Math. Phys.*, 22, pp. 645-653.
- Jarno, A., 1989, "Interaction houle-cylindre horizontal à faible nombre de Keulegan-Carpenter", Thèse de l'Université du Havre.
- Jarno, A., 1990, "Etude expérimentale de l'action de la houle sur des cylindres horizontaux, de section circulaire ou rectangulaire, à faible nombre de Keulegan-Carpenter", Rapport fin de contrat IFP n°11 344.