

1ères JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE

16 au 18 Février 1987 - Nantes

INFLUENCE DE LA TURBULENCE SUR LES EFFORTS EXERCES PAR LA HOULE SUR UN CYLINDRE DE LONGUEUR FINIE

BELORGEY M. - BROSSARD J. - GRANDJEAN A. - JARNO A.

Laboratoire de Mécanique des Fluides
Faculté des Sciences et Techniques du Havre
25, rue Philippe Lebon - 76600 LE HAVRE

Nous exploitons la vélocimétrie Doppler laser pour analyser, en laboratoire, la cinématique de la houle au voisinage d'un cylindre vertical de longueur finie. Cette technique de mesure nous permet d'aborder l'étude de l'influence du champ instantané des vitesses réelles sur la trainée, ainsi que l'influence de la turbulence.

L'étude est réalisée à différentes phases de la houle, et pour de petits nombres de KEULEGAN et CARPENIER. Elle concerne plus spécialement l'analyse des effets dus à la partie inférieure du cylindre.

Nos résultats concernant le champ cinématique mettent en évidence l'influence des vitesses verticales. La mesure des efforts nous permet d'apprécier l'influence de l'extrémité du cylindre sur les coefficients de trainée (C_D) et de masse ajoutée (C_M), ainsi que l'évolution de ceux-ci en fonction de la phase de la houle.

Turbulence effect upon the wave stresses on a cylinder having a finite length

We use laser Doppler velocimetry in laboratory, in order to analyse swell kinematic in the vicinity of a vertical cylinder having a finite length. This technics of measurement allows us to approach the study of the effect of the instantaneous field of the true velocities upon the trail, as the turbulence influence.

The study is done at different wave phases and for small numbers of KEULEGAN and CARPENTER. More espacially it concerns the analysis of effects due to the lower part of the cylinder.

Our results concerning the kinematic field show out the effect of the vertical velocities.

The measurement of the stresses allows us to appreciate the effect of the cylinder extremity upon the trail coefficient (C_D) and upon added mass coefficient, as the evolution of the last according to the wave phase.

I Introduction

Beaucoup d'articles ont traité de l'étude de structures immergées soumises aux actions de la houle, en particulier lorsque la structure est un cylindre. Cependant la description cinématique de l'écoulement perturbé par le cylindre, et les effets de cette perturbation n'ont pas encore été traités expérimentalement par manque d'une instrumentation adaptée.

En effet, la houle engendre un mouvement orbital des particules fluides, ce qui exclut toute technique de mesure des vitesses à l'aide d'un support matériel, car la perturbation créée par la sonde revient au point de mesure. De ce fait, l'étude des vagues est restée pendant longtemps l'une des très rares branches de la science pour laquelle on en savait beaucoup plus par le calcul théorique que par des observations ou par des mesures directes dans la nature. Jusqu'à ces derniers temps, la reproduction de la houle en laboratoire permettait surtout : de mieux connaître le mouvement des particules d'eau en visualisant leurs trajectoires, de mesurer globalement les efforts exercés par les vagues sur des structures en modèles réduits, et d'en apprécier les effets globaux.

La mesure des vitesses instantanées des particules d'eau dans une houle produite en laboratoire est donc à ce jour un des aspects de la houle qui est peu abordé. Or la connaissance de la cinématique des particules fluides permet de connaître les efforts hydrodynamiques instantanés et d'aborder les problèmes d'interaction houle-structures de façon plus précise.

La seule technique actuellement exploitable, pour de telles études, est la vélocimétrie Doppler laser qui seule permet la mesure des vitesses instantanées sans perturber l'écoulement. Cette technique a déjà été exploitée par BEECH (1978) pour mesurer des vitesses moyennes dans une couche limite générée par les vagues, et par ANASTASIOU, TICKEL et CHAPUN (1982) dans le cas de mesures en continu dans une houle aléatoire.

Pour notre part, nous avons adapté la vélocimétrie Doppler laser aux conditions particulières du mouvement orbital des particules fluides (BELORGEY, LE BAS (1984)). Nous exploitons la technique mise en oeuvre pour analyser le champ cinématique instantané au voisinage de l'extrémité d'un cylindre et déterminer l'influence de celle-ci, sur les efforts qu'il subit de la part de la houle.

En général la traînée totale s'exerçant sur un cylindre placé dans un écoulement non permanent s'exprime en ajoutant un terme d'inertie à la traînée visqueuse ; d'autre part la plupart des modèles connus ne prennent en compte que la composante horizontale \bar{U} de la vitesse. Ainsi à quelques variantes près, l'expression de la traînée a la forme suivante (formule de MORISSON et O'BRIEN) :

$$T = \frac{1}{2} C_D \rho D \bar{U}^2 + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{d\bar{U}}{dt}$$

où : D est le diamètre du cylindre (la longueur étant supposée égale à l'unité)

C_D est le coefficient de traînée

C_M est appelé coefficient de masse ajoutée.

Les études de MASCH (1976) et de RAMBERG (1982) apportent des éléments nouveaux. Le premier considère que le coefficient de traînée C_D est fonction de la longueur immergée (donc intègre l'effet de bord) et le second introduit les deux composantes de vitesse \bar{U} et \bar{V} .

Mais le déphasage, entre la houle et la traînée, est peu abordé, et la part respective des effets d'inertie et des effets de viscosité n'ont été abordés que très récemment par SULMONT et RAJAONA (1986).

Notre étude consiste à vérifier si les hypothèses généralement admises sont transposables à des cylindres de faible diamètre ($D \ll L$, L : longueur d'onde) ne reposant pas sur le fond. Notre intention est de décrire le champ cinématique moyen et le champ turbulent au voisinage de l'extrémité du cylindre afin de discuter de l'influence de celle-ci sur l'expression de la traînée.

II Dispositif expérimental

1 - Mesure des vitesses instantanées

Le moyen le plus approprié actuellement pour mesurer les vitesses des particules d'eau mises en mouvement par la propagation de la houle est le vélocimètre Doppler laser (VDL). Il a l'avantage de ne pas perturber l'écoulement et ne nécessite pas d'étalonnage. Le principe est basé sur la mesure du décalage de fréquence de la lumière émise par une particule, en mouvement dans un fluide et éclairée par une onde monochromatique.

La lumière émise par chaque particule traversant le domaine de mesure est recueillie par un photomultiplicateur dont le signal est analysé par un compteur (TSI type "1980") pour validation et mesure de la fréquence Doppler.

Nous ne détaillons pas ici le principe de la méthode VDL. Il a déjà fait l'objet de nombreuses publications. Yeh et Cummins (1964), Gouesbet (1973), et un nombre important d'articles dans les revues spécialisées des sociétés TSI et DISA.

Cette technique de mesure, actuellement exploitée dans le cas d'écoulements pour lesquels la composante mesurée de la vitesse moyenne est toujours positive et même le plus souvent indépendante du temps, a été adaptée ici à la mesure des vitesses des particules fluides dans la houle.

Les particules fluides dans la houle ayant un mouvement orbital, il était indispensable de connaître la position de la vague par rapport au point de mesure, de manière à définir le champ des vitesses pour des positions identiques de vagues successives.

Ceci nous a conduit à créer une interface (déclencheur) entre le détecteur de houle (qui enregistre le mouvement de la surface libre en fonction du temps), et le compteur des vitesses TSI type 1980. Cette interface inhibe le compteur tant que la vague n'est pas dans la position particulière choisie, et contrôlable, par rapport au point de mesure; puis elle autorise la mesure pendant un court intervalle de temps (réglable).

La figure 1 représente le principe de la mesure. Pour plus de précision l'interface est armée pour la mesure lorsqu'au droit de la sonde la vague passe par le niveau zéro (pente maximale de la surface libre) mais le déclenchement de la mesure est retardé d'une valeur

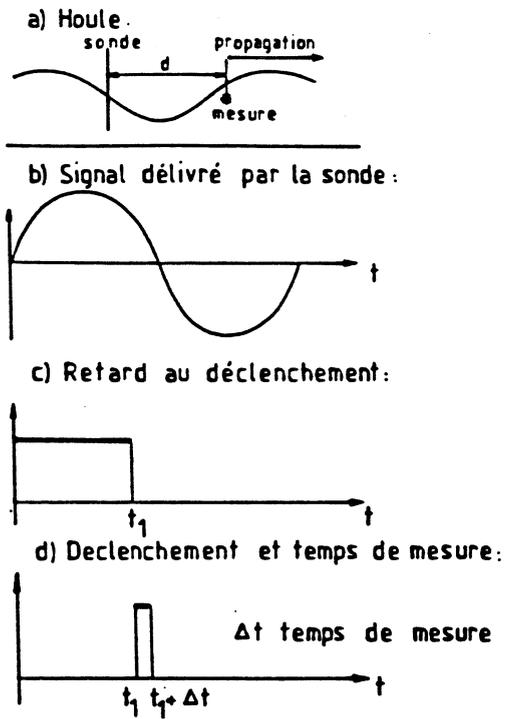


Fig 1 Principe de la mesure

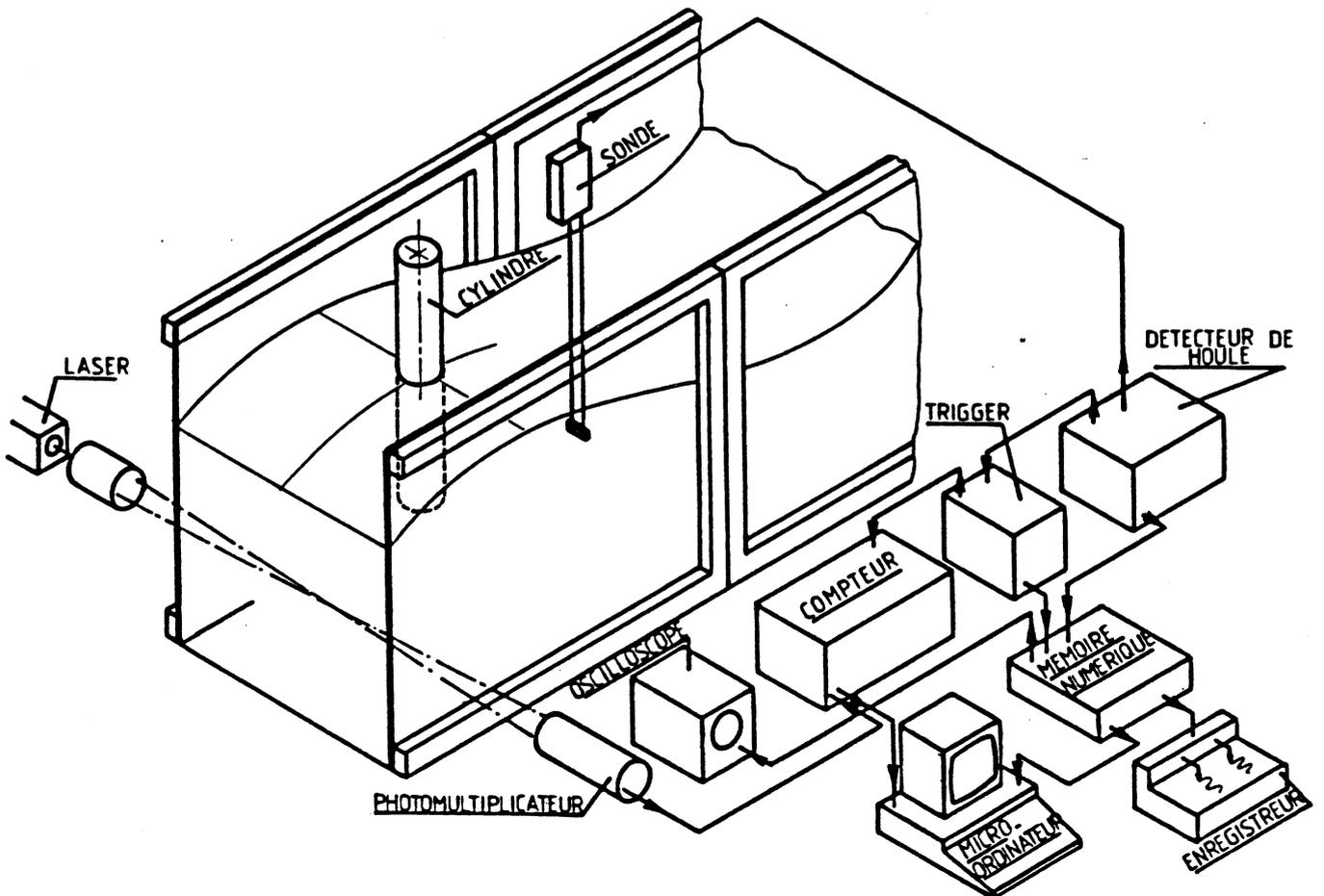


Fig 2 Schéma de la chaîne de mesure

t_1 permettant à la vague de se présenter dans la position désirée à l'endroit de la mesure. $t_1 = d/c$, où d est la distance entre la sonde pilotant l'interface, et la position du point de mesure, et c la célérité de l'onde.

La figure 2 représente l'ensemble de la chaîne de mesure et son principe de fonctionnement.

Pour une position de vague choisie, la vitesse moyenne en un point est obtenue à l'aide d'une mesure statistique sur plusieurs vagues successives. Les données fournies par le compteur pour chaque vague, sont donc stockées sur disquettes puis traitées par l'ordinateur lorsque la taille de l'échantillonnage (fixée entre 256 et 4000 valeurs) est atteinte.

Le traitement statistique des données nous permet de définir en un point :

- la vitesse moyenne ;
- l'écart type de l'échantillon de mesure (TRBI) ; représentant la fluctuation de la vitesse ;
- la fonction de densité de probabilité en amplitude de la vitesse.

La technique exploitée permet la mesure de la composante dans le plan d'intersection des deux faisceaux laser. La deuxième composante (écoulement bidimensionnel) est obtenue après rotation de 90° de l'optique d'émission.

L'étude et la mesure des vitesses orbitales dans une houle monochromatique non perturbée ont été réalisées au laboratoire de Mécanique des Fluides, et présentées par LE BAS (1983).

Les figures 3 et 4 donnent l'évolution de la composante horizontale et de la composante verticale pour la phase de sommet et la phase de flanc de la vague. Nos résultats expérimentaux mettent en évidence les points suivants :

* dans la phase de sommet, le modèle théorique de la composante horizontale des vitesses (limité au niveau au repos $y \ll 0$) peut être prolongé au sein de la crête de la vague ($y \ll \frac{H}{2}$)

* La composante verticale au flanc de la vague est légèrement supérieure (10%) aux valeurs données par le modèle théorique.

2 - Mesure des efforts

La mesure des efforts est classique, elle est réalisée à l'aide de jauges de contraintes placées sur des lames flexibles auxquelles est maintenu le cylindre, (figure 5).

La mesure des efforts est classique. Le cylindre est maintenu par des lames flexibles sur lesquelles sont collées des jauges de contraintes. Figure 5. La mesure est réalisée à l'aide d'un pont d'extensométrie et enregistrée simultanément avec le signal de la houle sur un enregistreur potentiométrique.

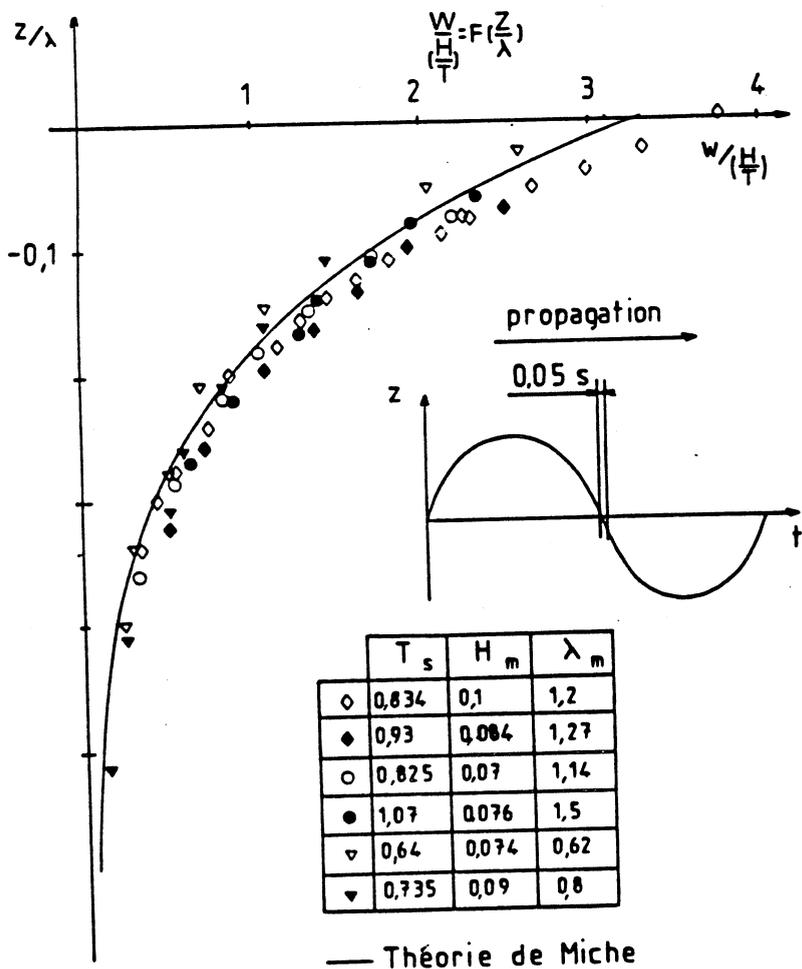


Fig 3 Evolution de la composante verticale des vitesses en fonction de la profondeur.

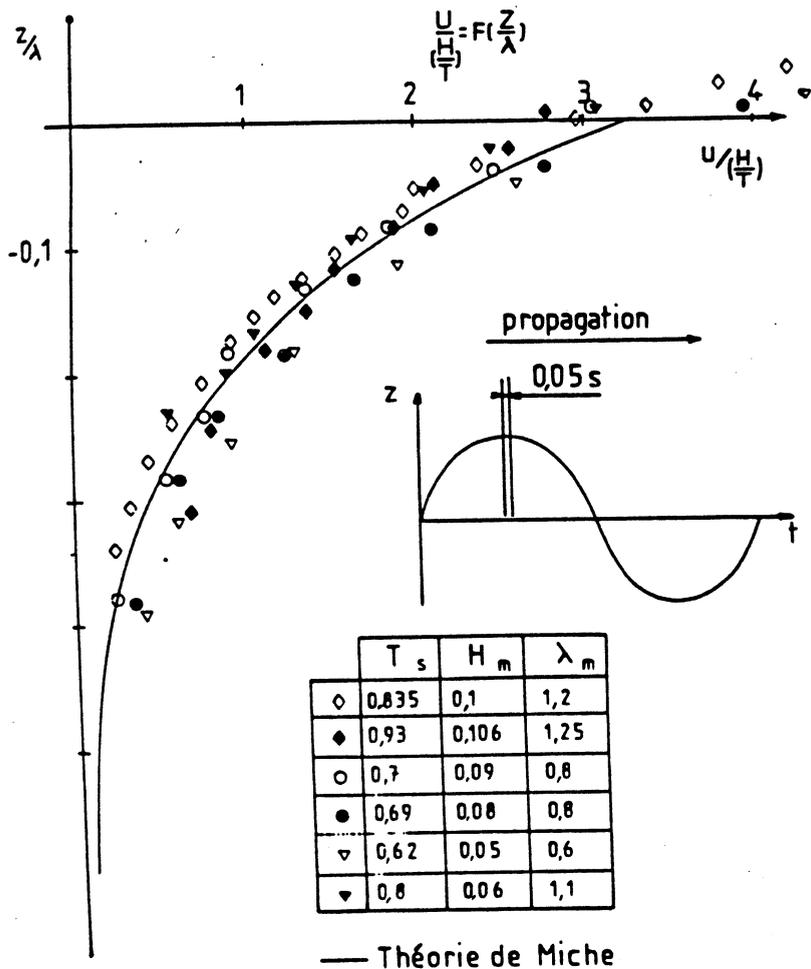


Fig 4 Evolution de la composant horizontale des vitesses en fonction de la profondeur.

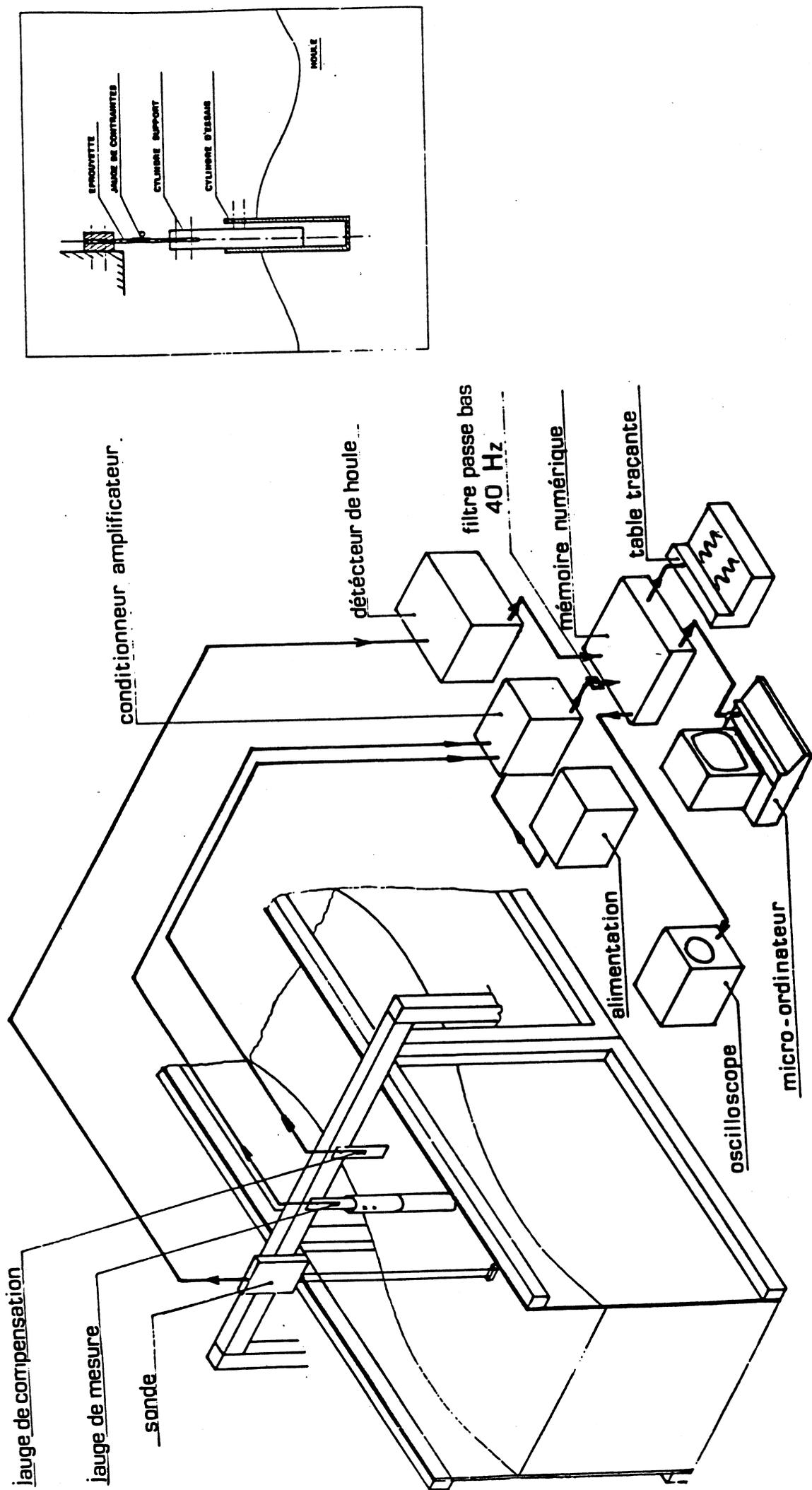


FIGURE 5 : installation d'essai permettant de mesurer en continu le moment au point O engendré par l'action de la houle sur le cylindre d'essai.

3 - Conditions expérimentales

Les expériences sont réalisées dans le canal à houle du laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Université du Havre. La longueur utile de la veine d'essais est de 6m (longueur totale 10m), la section mesure 0,8m de large sur 1m de haut, ce qui permet une profondeur d'eau de 0,75m.

Le générateur de houle monochromatique est du type piston plan immergé, associé à un diffuseur. Il est entraîné par un moteur électrique à courant continu pourvu d'un excentrique permettant de faire varier de façon continue la longueur d'onde L et la hauteur H de la houle.

La plage d'amortissement est constituée de trois éléments filtrants permettant l'absorption de l'énergie cinétique des vagues dans toute la masse du fluide. Bien qu'elle soit de faible longueur (1m), elle nous permet d'obtenir un coefficient de réflexion moyen de l'ordre de 5%.

Le schéma du canal est représenté sur la figure 6.

Pour l'étude proposée, les conditions de houle étaient les suivantes :

longueur d'onde $L = 1,43$ m

amplitude $H = 0,075$ m

période $T = 1$ s

profondeur d'eau $h = 0,5$ m

La cambrure de la houle est à la limite d'une bonne stabilité des vagues lors de leur propagation ($H/L = 0,052$).

La figure 7 présente la configuration expérimentale. Le cylindre est immergé de 0,14 m par rapport au niveau de l'eau au repos.

Compte tenu de la houle générée dans le canal, les caractéristiques de l'écoulement propres à l'expérimentation sont les suivantes:

Pour le cylindre de plus gros diamètre : ($\emptyset = 0,08$ m)

nombre de Reynolds $Re = \frac{UmD}{\nu} = 12\ 800$

nombre de Keulegan Carpenter $K = \frac{UmT}{D} = 2$

Dans une publication récente, SARPKAYA (1985) étudie l'action de la houle sur les cylindres pour de faibles nombres de Keulegan Carpenter, et analyse les résultats en fonction d'un nombre particulier

$$\beta = \frac{Re}{K} = \frac{D^2}{\nu T}$$

Etant donné que nos études concernent également les faibles nombres de Keulegan Carpenter, nous comparerons nos résultats à ceux de SARPKAYA.

Dans le cadre de nos expériences, nos conditions pour le cylindre de plus gros diamètre conduisent à une valeur de β égale à : 6 400.

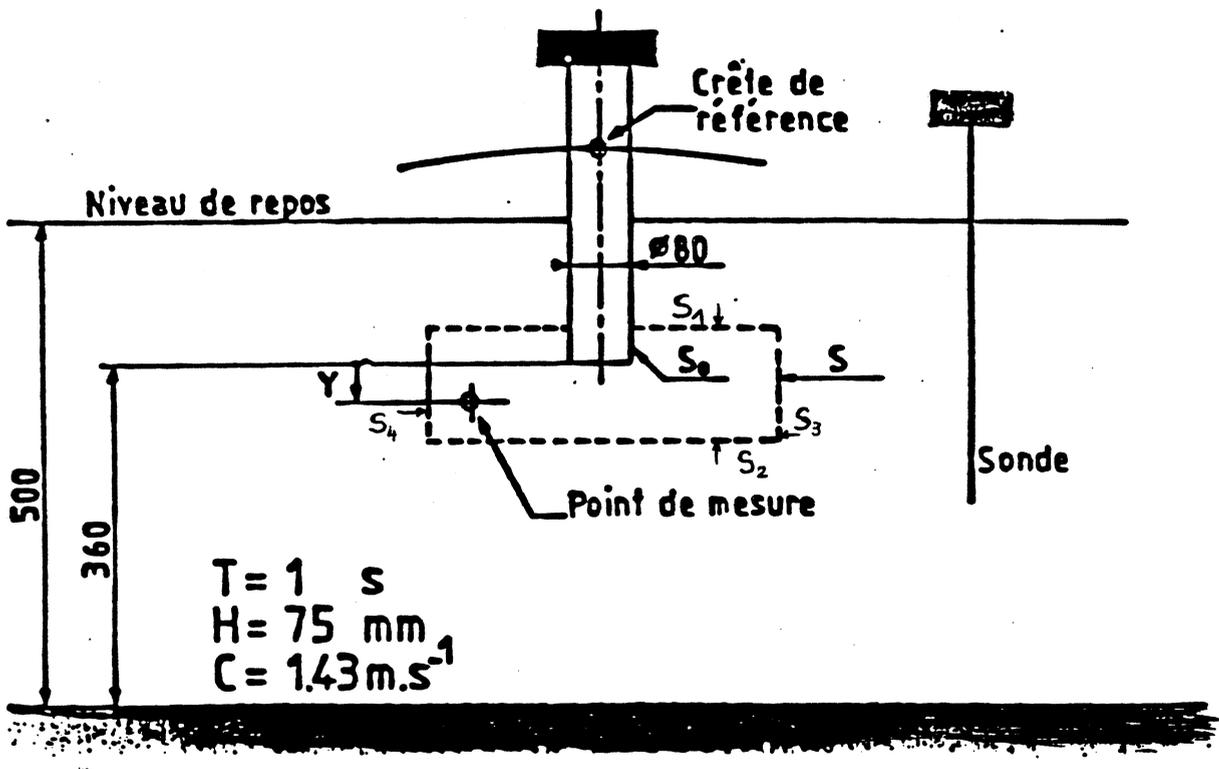


Fig 7 Configuration expérimentale

III Etude théorique

Pour un domaine fluide \mathcal{D} , de frontière S_0 U S , dans lequel est immergé l'obstacle, la résultante des actions sur le cylindre présentant une surface mouillée S_0 s'exprime par la relation :

$$\vec{R} = - \int_{S_0} \vec{\sigma} \cdot \vec{n} \, ds = - \int_{\mathcal{D}} \rho \frac{D\vec{U}}{Dt} \, dv + \int_{\mathcal{D}} \rho \vec{F} \, dv + \int_S \vec{\sigma} \cdot \vec{n} \, ds$$

Ceci indépendamment des hypothèses que nous pouvons formuler sur le fluide (parfait, visqueux, incompressible ...) ou sur l'écoulement (laminaire, turbulent, permanent ...).

S_0 est la surface mouillée limitant le cylindre à l'intérieur du domaine fluide

S est la surface entourant le domaine fluide

$\vec{\sigma}$ est le tenseur des contraintes en un point des surfaces S ou S_0 .

Notre contribution vise à mettre en évidence les effets dûs à l'extrémité du cylindre. Nous avons donc limité le domaine d'analyse du champ cinématique au domaine \mathcal{D} tel que l'indique la figure 7.

En faisant l'hypothèse d'un écoulement bidimensionnel avec $\vec{U} = u \vec{x} + v \vec{y}$ la trainée $T = \vec{R} \cdot \vec{x}$ sur cet élément de cylindre s'exprime alors sous la forme :

$$T = - \int_{\mathcal{D}} \rho \frac{\partial u}{\partial t} \, dv - \int_S \rho u \cdot (\vec{U} \cdot \vec{n}) \, ds + \vec{x} \cdot \int_S \vec{\sigma} \cdot \vec{n} \, ds$$

La détermination de T nécessite alors de quantifier les termes de la forme :

$$\int_S \rho u (\vec{U} \cdot \vec{n}) \, ds \quad \text{et} \quad - \int_{\mathcal{D}} \rho \frac{\partial u}{\partial t} \, dv$$

Pour tenir compte des effets dus à la turbulence, nous écrivons les composantes des vitesses sous la forme :

$$u = \bar{U} + u'$$

$$v = \bar{V} + v'$$

où \bar{U} et \bar{V} sont les valeurs moyennes et u' , v' les composantes fluctuantes.

De ce fait, la détermination de cette trainée T nécessite la mesure des termes de la forme :

$$\int_{S_0} \bar{U}_i^2 \, ds, \quad \int_{S_0} \bar{u}_i'^2 \, ds, \quad \int_{S_0} \bar{U}_i \bar{U}_j \, ds \quad \text{et} \quad \int_{S_0} \overline{u_i' u_j'} \, ds$$

Il nous faut alors mesurer les vitesses moyennes (au sens statistique) et les fluctuations sur toute la frontière définie.

IV Résultats expérimentaux

1 - Mesure des efforts

Une première série d'expériences fut consacrée à l'étude des efforts globaux sur toute la longueur du cylindre, en fonction de la phase de la houle.

Le cylindre est immergé de 0,14 m par rapport au niveau au repos.

La figure 8 donne l'enregistrement de la mesure des efforts en fonction de la phase de la houle pour des cylindres de diamètres différents.

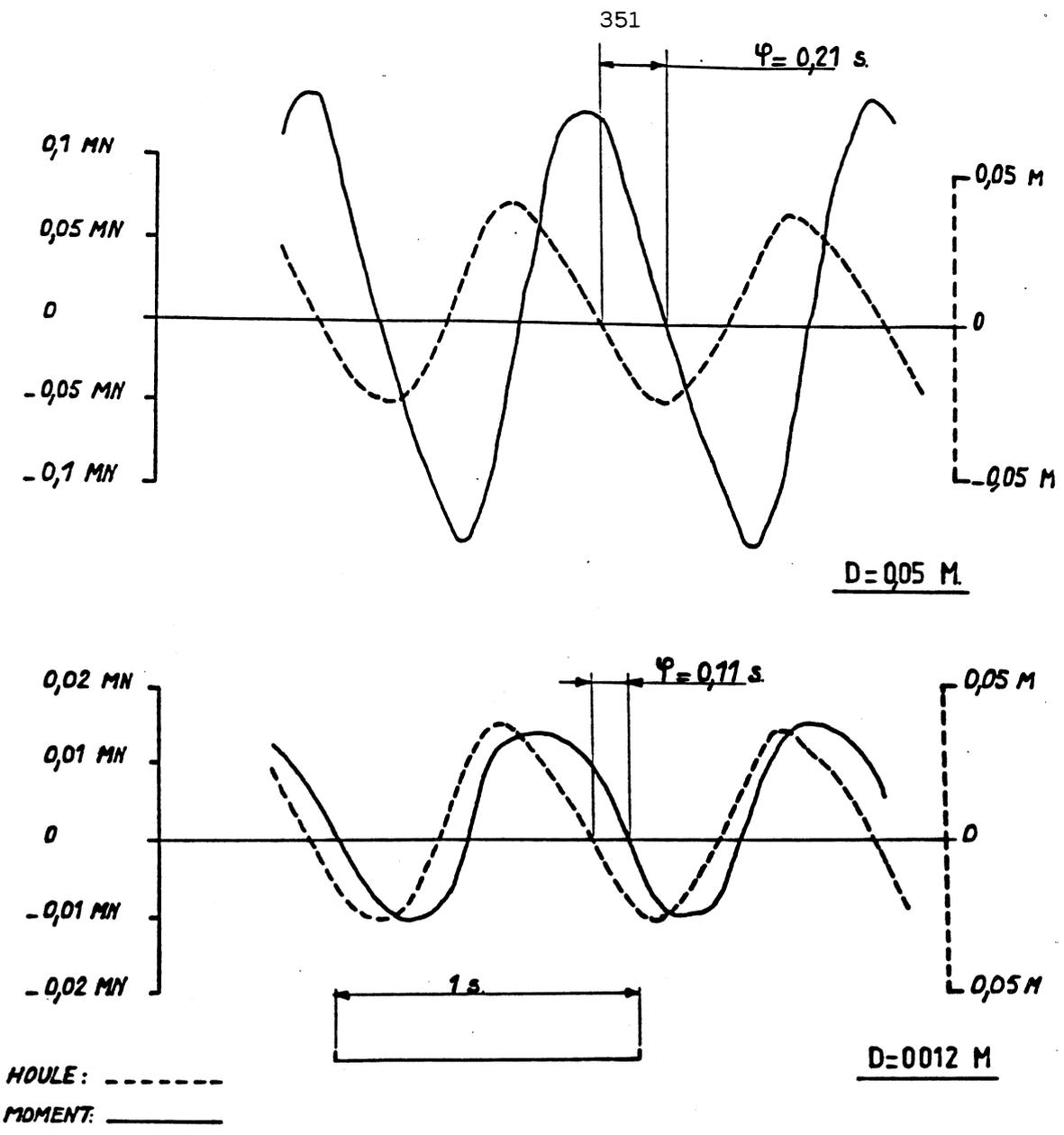


Fig 8 : enregistrement des efforts

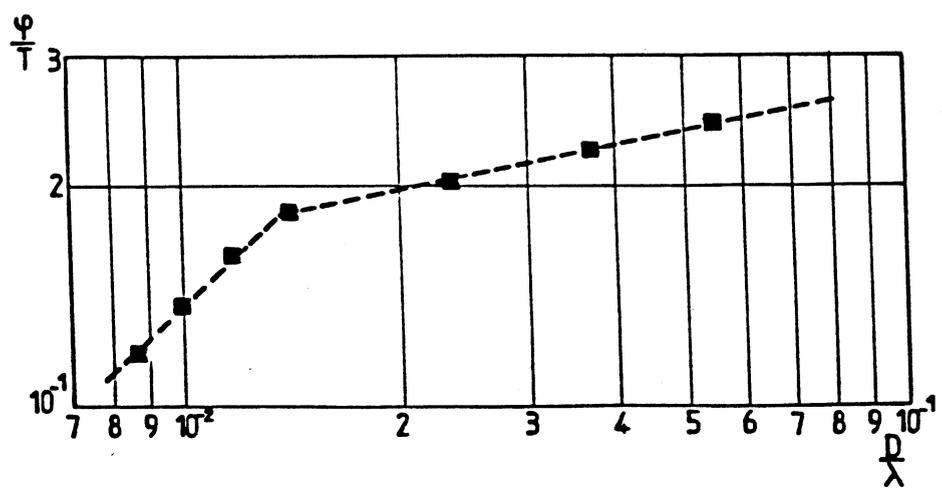


Fig 9 : Evolution du déphasage efforts / houle en fonction du diamètre du cylindre.

Nos résultats mettent en évidence un déphasage $\Delta \varphi$ des efforts par rapport à la phase de la houle. Ce déphasage, qui est normal car les termes d'inertie sont prépondérants pour les cylindres de petits diamètres, est fonction du diamètre du cylindre. CAMPION (1984).

La figure 9 donne l'évolution de ce déphasage en fonction du diamètre du cylindre. En ce qui concerne notre domaine d'étude, nous constatons deux évolutions distinctes. Le point critique correspond à un nombre de Reynolds de 3 000.

Dans une deuxième étude, nous avons porté notre attention sur le cylindre de diamètre 0,08 m, qui est celui pour lequel nous avons analysé le champ des vitesses au voisinage de l'extrémité inférieure.

Les résultats expérimentaux sont donnés dans le tableau ci dessous :

phase de la houle	180° creux	225°	270°	315°	360° sommet
Trainée T (mesurée)	0,64 N	1,56 N	2,11 N	1,46 N	0,22 N

On constate :

* l'importance des termes d'inertie au flanc de la vague (ici front montant = 270°)

* une trainée positive dans la phase de creux de la vague (180°), supérieure en intensité à celle correspondant au sommet de la vague (360°), alors que la profondeur d'immersion du cylindre est plus faible lors du passage du creux, que lors du passage du sommet.

Cette dissymétrie entre les effets correspondants à la phase de sommet et la phase de creux de la vague a déjà été mise en évidence lors de l'étude d'autres phénomènes BELORGEY, LE BAS, GRANDJEAN, (1986) LE BAS (1986)

Il semble donc qu'il ne soit pas souhaitable d'appliquer la formule de MORISON à des cylindres partiellement immergés quelle que soit la phase de la houle.

Par ailleurs, la détermination des coefficients de trainée (C_D) et de masse ajoutée (C_M) conduit aux résultats suivants :

* Pour la phase de sommet : $C_D = 0,68$ pour $\beta = 6\ 400$.

Dans des conditions analogues ($K = 2$) SARPKEYA (1985) obtenait les résultats suivants :

$$\begin{aligned} C_D &= 1 && \text{pour } \beta = 1380 \\ C_D &= 0,69 && \text{pour } \beta = 11240 \end{aligned}$$

La valeur obtenue est donc inférieure à celle de SARPKEYA, mais reste en accord avec son étude car dans notre cas le cylindre est de longueur finie (ce qui diminue la valeur de C_D) et placé verticalement.

* Pour la phase de flanc : $C_M = 2,36$

Cette valeur est supérieure à celles trouvées par SARPKEYA. Peut être faut-il voir dans cette différence le fait que dans notre cas le cylindre est placé verticalement dans la houle, et qu'il n'est donc pas possible de négliger l'effet des vitesses verticales.

* Par ailleurs, nos résultats expérimentaux montrent que ces coefficients évoluent en fonction de la phase de la houle, mais d'une manière difficile à préciser. Il semble cependant que dans notre cas on ne puisse prendre des valeurs de C_D identiques lors de la phase de sommet et lors de la phase de creux.

2 - Analyse du champ cinématique

Le domaine étudié est défini à l'aide d'un repère centré sur la face inférieure du cylindre. Il est compris entre les plans horizontaux $Y = + 6\text{mm}$ et $Y = - 8\text{mm}$, et les plans verticaux $X = - 60\text{mm}$ $X = + 60\text{mm}$. L'écoulement est supposé bidimensionnel.

La figure 10 donne l'évolution des composantes horizontales et verticales des vitesses pour la phase de sommet de la vague dans le plan $Y = 0$. On constate :

* une augmentation de la composante horizontale des vitesses à l'aval du cylindre (par rapport au sens de propagation de l'onde)

* une importante composante verticale

La figure 11 donne l'évolution des fluctuations des composantes des vitesses à différents niveaux par rapport au fond du cylindre.

Reprenant l'expression de la trainée définie dans l'étude théorique, nous avons quantifié les termes des différentes intégrales relatives au domaine

* Pour la phase front montant (270°)

$$\begin{aligned}
 T = & \underbrace{\int_{s_1} \mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) ds}_{\approx 0} - \underbrace{\int_{s_1} \rho \bar{u}'v' ds}_{-0,070\text{ N}} - \underbrace{\int_{s_1} \rho \bar{u}\bar{v} ds}_{0,411\text{ N}} - \underbrace{\int_{s_2} \mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) ds}_{\approx 0} \\
 & + \underbrace{\int_{s_2} \rho \bar{u}\bar{v} ds}_{0,454} + \underbrace{\int_{s_2} \rho \bar{u}'v' ds}_{-0,048} - \underbrace{\int_{s_3} \rho \bar{u}^2 ds}_{0,027} - \underbrace{\int_{s_3} \rho \bar{v}^2 ds}_{0,004} \\
 & + \underbrace{\int_{s_4} \rho \bar{u}^2 ds}_{0,016} + \underbrace{\int_{s_4} \rho \bar{v}^2 ds}_{0,013} - \underbrace{\int_D \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} dv}_{1,581} + \underbrace{\rho g \Delta \gamma (y_2 - y_1)}_{\approx 0}
 \end{aligned}$$

$$T = 0,0629\text{ N} - 1,581\text{ N}$$

①

②

① effets des termes produits ($\bar{u}\bar{v}$)

② effets des termes d'inertie ($\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$)

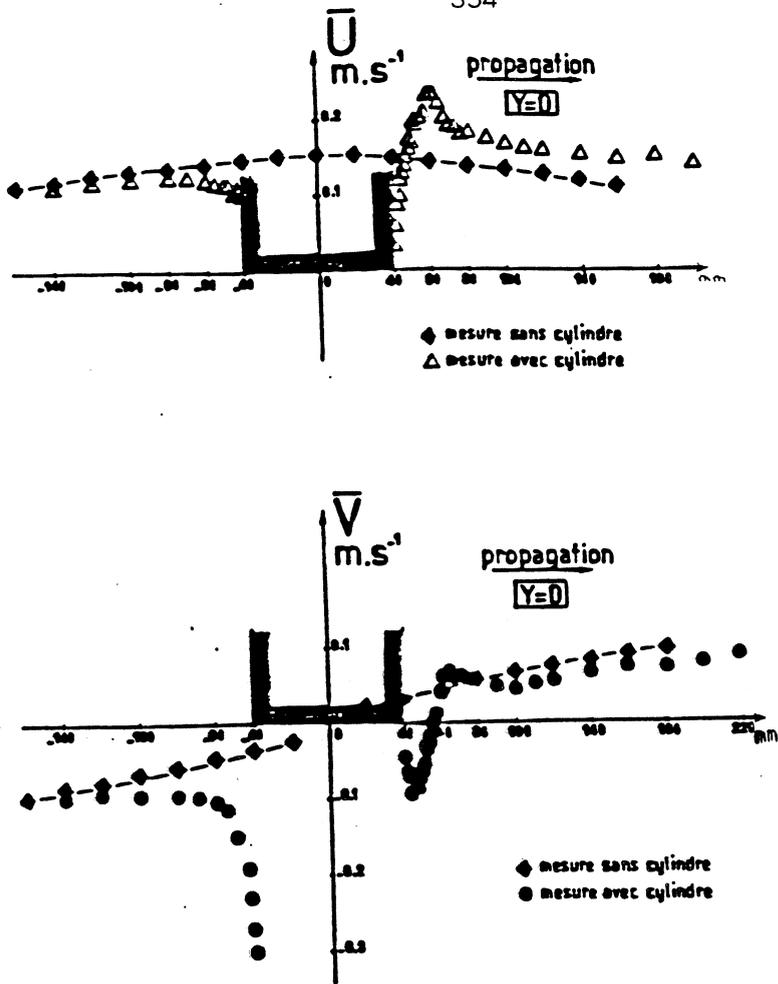


Fig 10 : Evolution des vitesses au niveau du fond du cylindre, (phase de sommet de la vague).

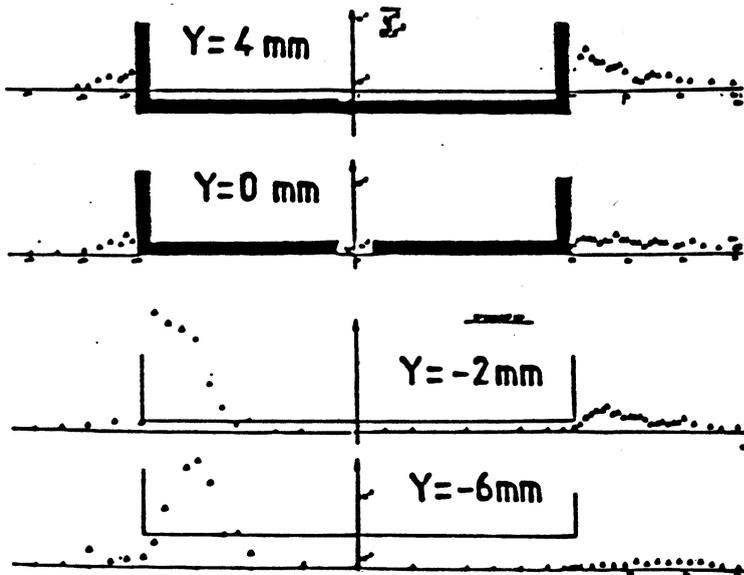


Fig 11 : Mesure des fluctuations pour la phase de sommet de la vague.

On constate :

* que les termes de fluctuation sont négligeables, et que les termes d'inertie sont prépondérants. Cependant, les termes déduits des produits des vitesses moyennes sont à prendre en compte.

* qu'au niveau de la partie inférieure du cylindre, les efforts sont de sens opposé à la trainée globale, et leur intensité, comparée à celle-ci, est très importante.

* pour la phase de sommet :

$$T = 0,66 \text{ N} - 0,103 \text{ N} - 0,411 \text{ N}$$

① ② ③

① effet des termes produits ($\bar{U} \cdot \bar{V}$)

② effet des termes d'inertie ($\frac{\partial \bar{U}}{\partial t}$)

③ effet des termes de pression

Le tableau ci dessous permet de comparer la trainée T relative à l'extrémité du cylindre pour différentes phases de la houle dans les cas suivants :

* par calcul à l'aide de la formule de MORISON (T_M). Les coefficients C_D et C_M sont ceux qui ont été déterminés à l'aide des mesures globales d'efforts.

Nous avons considéré C_D constant égal à 0,68, valeur au sommet de la vague. De ce fait, C_M lorsqu'il était possible de le déterminer, dépendait de la phase de la houle.

* par calcul à l'aide de l'analyse du champ des vitesses (T_u)

	180°	225°	270°	315°	360°
C_D	0,68	0,68	-	0,68	0,68
C_M	-	3,35	2,36	3,35	-
T_M	-0,005 N	0,086 N	0,089 N	0,054 N	0,004 N
T_u	-	-	-1,581 N	-	0,147 N

On constate une très grande différence dans les mesures de la trainée T selon le mode de calcul. Cette différence est due en partie à l'influence des vitesses verticales qui sont prises en compte lors de l'analyse du champ des vitesses.

Les figures 12, 13, 14 rendent compte de l'importance des vitesses verticales, et des produits des vitesses. Elles montrent bien la différence et l'évolution de l'état cinématique du domaine fluide \mathcal{D} en fonction de la phase de la houle.

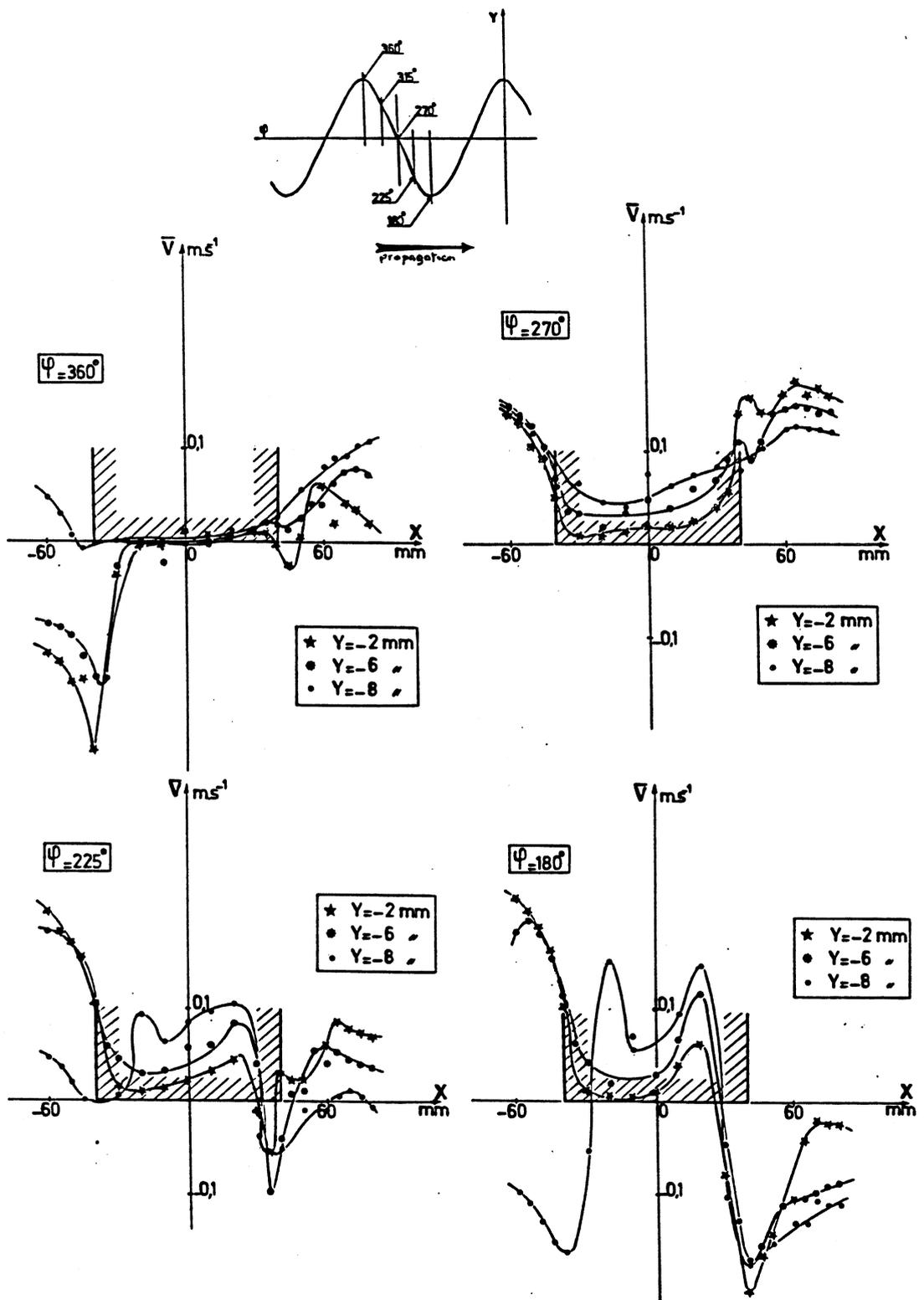


Fig 12 : Evolution des vitesses verticales en fonction de la phase de la houle ($Y < 0$).

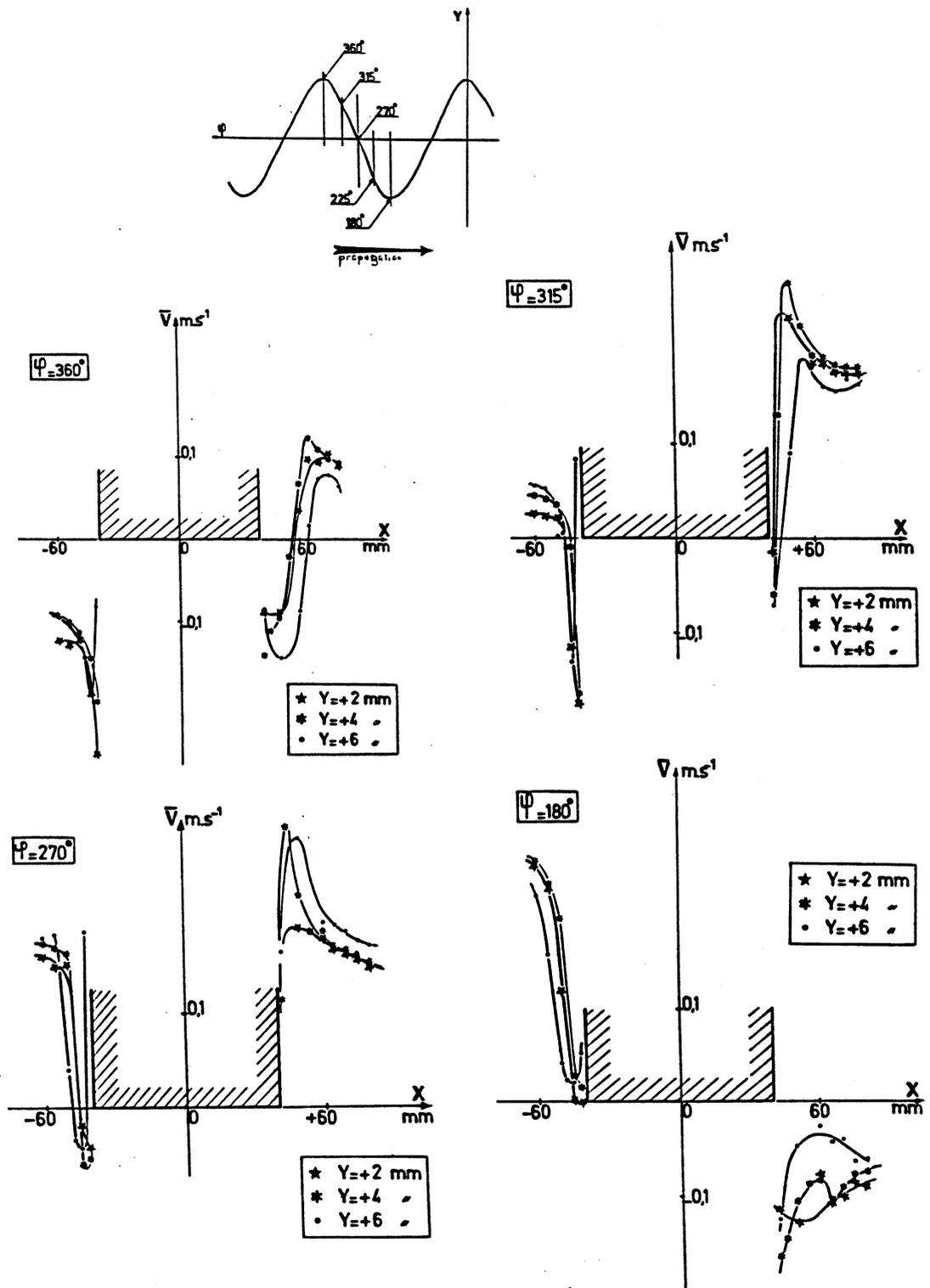


Fig 13 : Evolution des vitesses verticales en fonction de la phase de la houle ($Y > 0$).

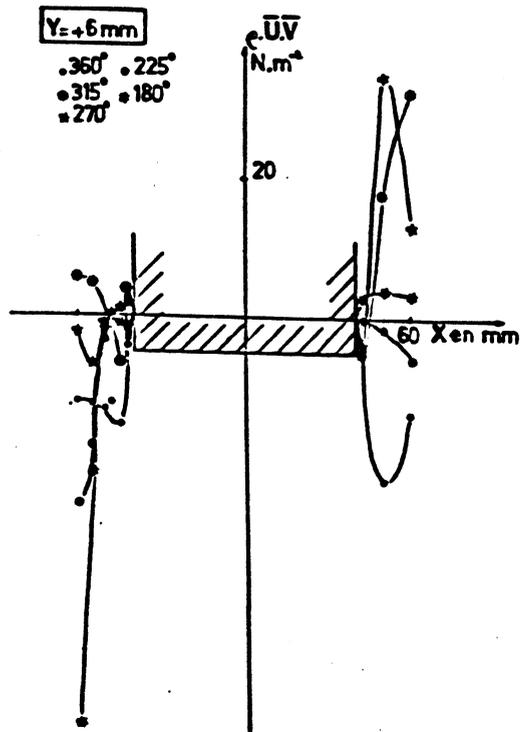
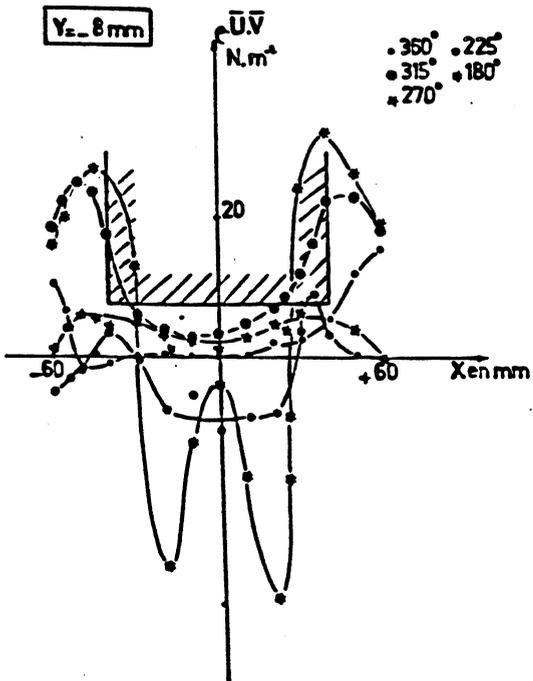
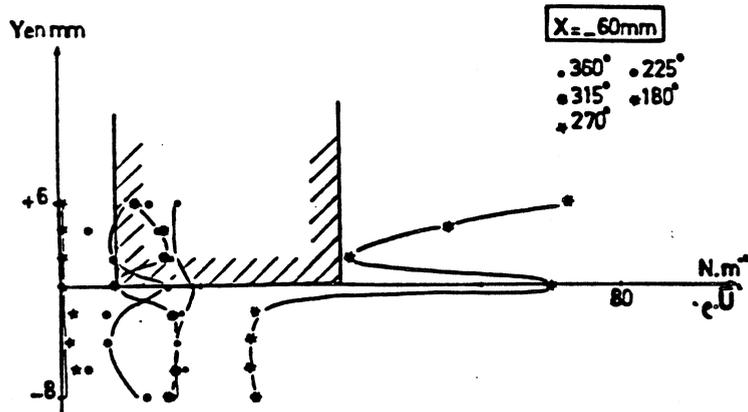
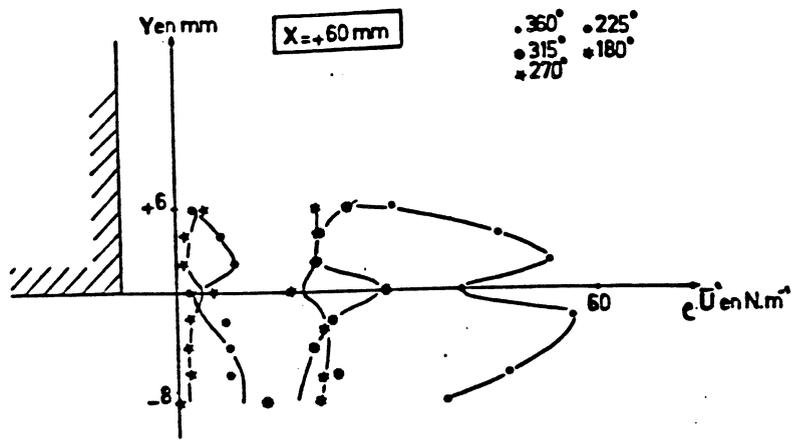


Fig 14 : Evolution des termes produits \bar{U} et \bar{V} et \bar{U}^2 en fonction de la phase de la houle.

V Conclusion

Les études des actions de la houle sur les cylindres de faibles diamètres restent encore peu nombreuses, et celles concernant les cylindres verticaux partiellement immergés sont encore plus réduites.

Nos résultats expérimentaux concernant l'étude du champ des vitesses instantanées au voisinage de l'extrémité inférieure du cylindre montrent:

* que la composante verticale des vitesses est très importante, y compris pour des phases de la houle pour lesquelles elle serait nulle sans la présence du cylindre.

Ce phénomène, associé à la présence d'un tourbillon à la partie inférieure du cylindre, introduit localement des efforts relativement importants comparés à la trainée totale.

* que la présence d'un fort taux de turbulence à la partie inférieure du cylindre ne semble pas apporter de modifications sensibles sur la valeur moyenne de la trainée à un instant donné (moyenne statistique). Par contre, il serait intéressant d'analyser les effets de la turbulence sur les vibrations de la structure.

* que la formule de MORISON et O'BRIEN doit être considérée avec beaucoup de prudence car :

- le déphasage des efforts par rapport à la houle ne permet pas de définir des valeurs de C_D et C_M cohérentes pour toutes les phases de la houle.

- les coefficients C_D et C_M dépendent eux même de la phase de la houle de façon non négligeable.

VI Bibliographie

ANASTASIOU, TICKEL and CHAPUN (1982)

Measurements of particle velocities in laboratory sole random waves.
Coastal Engineering 6 p 233 - 254

BEECH (1978)

Laser Doppler measurements in the oscillatory Boundary Layer beneath water waves.

DISA information n°23 p 6 - 10

BELORGEY, LE BAS (1984)

Mesure par vélocimétrie Doppler laser, de la vitesse instantanée des particules fluides dans une houle produite en laboratoire.

La Houille Blanche Vol n°5

BELORGEY, LE BAS, GRANDJEAN (1986)

Application of the Laser Doppler velocimetry to the study of the turbulence generated by the swell in the vicinity of walls or obstacles.

3d International Symposium on applications of laser anemometry to fluid mechanics.

LISBON 7-9 JULY

CAMPION (1984)

Contribution à l'étude de l'interaction houle - cylindre.
Mémoire CNAM Le Havre

GOUESBET (1973)

Réalisation d'un anémomètre Doppler laser.
Application à l'étude des écoulements liquides.
Thèse de 3^e cycle Université de Rouen

LE BAS (1983)

Etude expérimentale du champ des vitesses instantanées dans un canal à houle.
Thèse de 3^e cycle Université de Rouen

LE BAS (1986)

Etude de la couche limite turbulente générée par les vagues sur le fond d'un canal à houle.
Thèse d'Etat Université du Havre

MASCH, ASCE, MOORE (1960)

Drag forces in velocity gradient flow.
Journal of the hydraulics Division

BAMBERG, NIEDZWECKI (1982)

Horizontal and vertical cylinders in waves.
Ocean Engineering.

SARPKAYA (1985)

Force on a circular cylinder in viscous oscillatory flow at low KEULEGAN - CARPENTER numbers.
J. of Fluid Mechanics Vol 165 p 61-71

SULMONT et RAJAONA (1986)

Etude expérimentale des limites d'application de la formule de "MORISON" aux cylindres en accélération uniforme dans un fluide.
Congrès A.T.M.A. Paris

YEH and CUMMINS

Localized fluid flow measurement with on the Ne laser spectrometer.
Applied physics letters Vol 4 p 176 - 178.