



Ifremer

## 15<sup>ÈMES</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

### EVALUATION EXPERIMENTALE DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE PLAQUES ANTI-PILONNEMENT

#### *EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF HEAVE PLATES HYDRODYNAMICS*

MARC LE BOULLUEC <sup>(1)</sup>, DOMINIQUE LE ROUX <sup>(1)</sup>,  
JEREMY OHANA <sup>(1)</sup>, NICOLAS IVANOFF <sup>(1)</sup>, SEBASTIEN CHALONY <sup>(1)</sup>,  
AURELIEN TANCRA Y <sup>(1)</sup>, YVES-MARIE SCOLAN <sup>(2)</sup>  
<sup>(1)</sup> IFREMER, <sup>(2)</sup> ENSTA Bretagne

#### Résumé

Des essais en bassin de plaques horizontales circulaires, pleines et poreuses, sont conduits en pilonnement forcé et sous l'action de la houle en configuration fixe.

Les coefficients hydrodynamiques d'inertie ajoutée et de traînée sont identifiés à partir des résultats expérimentaux. Leur dépendance vis-à-vis du nombre de Keulegan Carpenter et d'autres paramètres est évaluée.

Les données acquises ouvrent la possibilité d'investigations complémentaires et la validation de calculs numériques en fluide visqueux.

#### Summary

Tank tests of circular horizontal plates, solid and porous, are conducted in forced heave motion and under the action of incident waves in fixed configuration.

Hydrodynamic coefficients for added inertia and drag are identified from experimental results. Their dependency with the Keulegan Carpenter number and other parameters is evaluated.

The acquired data open the possibility of additional investigations and assessment with numerical calculations in viscous fluid (CFD).

# 1. Notations et relations

$\rho$ :	masse volumique de l'eau	$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$
$g$ :	accélération de la pesanteur	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
$\nu$ :	viscosité cinématique de l'eau de mer	$\nu = 1.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
$D$ :	diamètre d'une plaque circulaire	
$E$ :	épaisseur d'une plaque circulaire	
$D_c$ :	diamètre d'une colonne ou mat	
$H_c$ :	hauteur d'une colonne ou mat	
$A$ :	amplitude d'un mouvement sinusoïdal	
$T$ :	période d'un mouvement sinusoïdal	
$\omega$ :	pulsation d'un phénomène sinusoïdal	$\omega = \frac{2\pi}{T}$
$Z$ :	mouvement de pilonnement sinusoïdal	$Z = A$ (en module)
$V$ :	vitesse d'un mouvement sinusoïdal	$V = \omega A$ (en module)
$\Gamma$ :	accélération d'un mouvement sinusoïdal	$\Gamma = \omega^2 A$ (en module)
$\eta$ :	élévation de surface libre	
$a$ :	amplitude de houle régulière	
$\omega$ :	pulsation de houle régulière	
$k_o$ :	nombre d'onde en profondeur infinie	
$Z_h$ :	mouvement orbital vertical de houle	
$V_h$ :	vitesse orbitale verticale	
$\Gamma_h$ :	accélération orbitale verticale	
$F_z$ :	effort vertical	
$S_d$ :	surface de traînée suivant z	$S_d = \frac{\pi D^2}{4}$
$M_{azz}$ :	masse ajoutée en pilonnement	
$M_{azz0}$ :	masse ajoutée en pilonnement à période infinie	
$B_{zz}$ :	amortissement en pilonnement	
$K_{zz}$ :	raideur hydrostatique en pilonnement	$K_{zz} = \rho g \frac{\pi D_c^2}{4}$
Nombres sans dimensions :		
$C_d$ :	coefficient de traînée	
$C_m$ :	coefficient de masse ajoutée	
$C_b$ :	coefficient d'amortissement	
$KC$ :	nombre de Keulegan Carpenter	$KC = \frac{VT}{D} = \frac{2\pi A}{D}$
$Re$ :	nombre de Reynolds	$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{2\pi AD}{\nu T} = KC\beta$
$\beta$ :	nombre de fréquence	$\beta = \frac{Re}{KC} = \frac{D^2}{\nu T}$

mean() : moyenne d'une grandeur scalaire  
 std() : écart type d'une grandeur scalaire  
 || : module d'une grandeur sinusoïdale

Pour un mouvement de pilonnement Z de direction perpendiculaire au plan d'un disque de diamètre D, le coefficient de masse ajoutée sans dimension est évalué sur la base de la valeur de la masse ajoutée d'un disque animé de petits mouvements lorsque KC tend donc vers zéro. La masse ajoutée d'un disque plein évaluée en fluide parfait est :

$$M_{azz0} = \rho D^3 / 3$$

La masse ajoutée d'un disque plein surmonté d'une colonne concentrique peut être approchée par [10] :

$$M_{azz0} = \rho (D^3 + (D^2 - D_c^2)^{3/2}) / 6$$

Le coefficient de masse ajoutée et le coefficient d'amortissement linéaire en pilonnement sont définis comme suit :

$$C_m = \frac{M_{azz}}{M_{azz0}} \quad C_b = \frac{B_{zz}}{\omega M_{azz0}}$$

Afin de déterminer des coefficients de masse ajoutée, d'amortissement et de traînée pour l'effort hydrodynamique vertical, une loi de type Morison est employée. Deux situations sont examinées dans le contexte des essais en bassin :

- pilonnement d'un corps dans un fluide au repos

$$F_z = -M_{azz} \Gamma - \frac{1}{2} \rho S C_d V |V|$$

- corps fixe de volume fixé dans la houle incidente

$$F_z = (\rho \text{Volume} + M_{azz}) \Gamma_h + \frac{1}{2} \rho S C_d V_h |V_h|$$

Le coefficient de traînée est défini sur une période d'oscillation pour un mouvement sinusoïdal par équivalence en moyenne des travaux de l'amortissement linéaire et d'une force de traînée suivant une loi de Morison, une procédure similaire est appliquée dans le cas d'un écoulement de houle incidente :

$$\text{mean}(B_{zz} \dot{Z}^2) = \text{mean} \left( \frac{1}{2} \rho \frac{\pi D^2}{4} C_d |\dot{Z}|^3 \right) \quad \text{soit} \quad \frac{1}{2} B_{zz} \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi D^2}{4} C_d \frac{4}{3\pi} \omega^3 A^3$$

Ainsi :

$$C_d = \frac{B_{zz}}{\frac{1}{2} \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{8}{3\pi} \omega A} = \frac{M_{azz0}}{\frac{1}{2} \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{8}{3\pi} A} C_b$$

Dans le cas où  $M_{azz0} = \rho D^3 / 3$  alors  $C_d = \frac{D}{A} C_b = \frac{2\pi}{KC} C_b$

En profondeur infinie, le mouvement orbital des particules de houle décroît exponentiellement avec la profondeur z selon le modèle de houle du premier ordre d'Airy.

A la profondeur  $z = -H_c$  les modules du mouvement orbital vertical, de la vitesse et de l'accélération verticales de l'écoulement de houle incidente sont :

$$A = a \exp(-k_o H_c) \quad V = a \omega \exp(-k_o H_c) \quad \Gamma = a \omega^2 \exp(-k_o H_c)$$

## 2. Introduction

De nombreuses études ont été menées sur les caractéristiques hydrodynamiques de plaques minces animées de mouvements de translation perpendiculairement à leurs plans, il s'agit généralement d'un mouvement vertical de pilonnement pour une plaque horizontale. Les plaques sont souvent circulaires mais aussi rectangulaires, pleines ou poreuses.

Pour un nombre de Keulegan Carpenter et un diamètre de plaque donnés, la masse ajoutée diminue lorsque la porosité augmente alors que le terme de traînée demeure substantiel. La prise en compte de porosité permet ainsi de conserver un effet amortisseur sans modifier de manière trop importante l'inertie et donc la période propre de pilonnement dans le cas d'un corps flottant équipé d'une plaque horizontale.

Pour une période donnée, les termes de masses ajoutées et d'amortissement visqueux augmentent avec l'amplitude du mouvement d'oscillation s'écartant ainsi des résultats obtenus sous les hypothèses de fluide parfait et mouvement de petite amplitude.

Le développement des supports flottants de tailles variées tels ceux d'éoliennes offshore comme celui des bouées à vocation scientifique mettent en jeu des problématiques similaires à des échelles différentes.

La limitation des mouvements verticaux (pilonnement, roulis et tangage) des supports flottants d'éoliennes (envergure caractéristique : quelques dizaines de mètres) peut être obtenue par la mise en place de plaques immergées assujetties aux flotteurs et généralement placées en pied des colonnes périphériques [2, 4, 5, 7]. Ces plaques ont deux effets, d'une part une augmentation des inerties ajoutées verticales et un allongement des périodes propres, d'autre part un effet d'amortissement. La réponse aux fréquences de houle peut ainsi être atténuée.

Des plaques horizontales immergées peuvent également être intégrées dans des dispositifs de récupération de l'énergie des vagues afin de constituer une référence inertielle à faible pilonnement [3].

Les bouées océanographiques (envergure caractéristique : quelques mètres) sont munies de quilles supports de lests construites en général autour d'un pieux vertical équipé d'une base circulaire et de goussets renforts verticaux [6] (figures 1 et 2). L'abaissement du centre de gravité ainsi obtenu pour des raisons de stabilité est accompagné d'effets d'inertie ajoutée et traînée en roulis et tangage.

La mise en place de colis sur le fond marin à partir d'un navire soumis à la houle présente des phases de suspension entre deux eaux, le couplage avec le colis peut alors entraîner des mouvements de pilonnement relatif et des efforts hydrodynamiques dimensionnant.

Compte tenu des effets visqueux et tourbillonnaires des écoulements autour de ces structures minces la modélisation par les codes de diffraction-radiation de ces plaques horizontales ou verticales dans le cas des goussets, composées de voiles minces, n'est pas aisée.

Des approches spécifiques ont été entreprises et validées par des campagnes expérimentales afin de quantifier les effets d'inertie et de traînée pour des plaques pleines et poreuses animées de mouvements caractérisés par des nombres de Keulegan Carpenter en général inférieurs à 2 [1, 4, 7, 8, 9, 10].

Les travaux décrits dans [1] portent sur des plaques rectangulaires pleines et poreuses pour des  $KC < 1.72$  et mettent en avant un coefficient de traînée de plaque pleine pour un nombre de Keulegan Carpenter faible de la forme  $C_d = \alpha KC^{(-1/3)}$  avec  $\alpha = 6$  à  $8$  et une faible dépendance vis-à-vis du nombre de Reynolds ou du nombre de fréquence  $\beta$ . Un modèle

numérique semi-analytique en fluide parfait, apte à prendre aisément en compte une surface libre est associé à une loi de perte de charge au niveau des plaques poreuses [8, 9].

Dans [4] sont examinés les effets de la proximité d'un fond rigide ou d'une surface libre. Les termes de masse ajoutée et d'amortissement sont alors développés selon le paramètre de proximité de ce plan de référence. Le nombre de Keulegan Carpenter est en général inférieur à 2. L'attention est portée sur la dépendance vis-à-vis de la proximité relative de la surface libre ou du fond horizontal. Une campagne expérimentale [7] portant sur la dynamique d'une plate-forme flottante support d'éolienne est exploitée en comparaison avec des résultats de calcul numérique en fluide visqueux (logiciel OpenFOAM). A proximité d'un fond rigide, les coefficients hydrodynamiques d'un disque horizontal (masse ajoutée et amortissement) croissent avec  $KC$  jusqu'à une valeur critique du nombre de Keulegan Carpenter, égale au ratio entre distance au fond et rayon du disque, au delà de laquelle les coefficients diminuent. Un nombre  $KC$  critique est aussi mis en évidence pour un disque à proximité de la surface libre.

Une campagne d'essai [7] met en jeu une colonne verticale équipée en pied d'une structure circulaire non poreuse, plaque mince simple ou assortie de rebords à sa périphérie et de raidisseurs radiaux. Des mesures de pression dynamique sont enregistrées sur les faces inférieures et supérieures de la plaque. Une forte dépendance des coefficients hydrodynamiques avec le nombre de Keulegan Carpenter  $KC$  est observée avec une loi du type  $C_b \propto KC^p$  avec  $p = 2/3$  à  $3/4$  pour le coefficient d'amortissement. Néanmoins des variations avec le nombre de fréquence  $\beta$  sont observées lorsque celui-ci augmente.

Des travaux sur l'influence de la porosité sur les coefficients hydrodynamiques sont particulièrement développés dans [8] et [9]. [8] affirme la dépendance du coefficient de traînée d'un disque plein  $C_d \propto KC^{(-1/3)}$  pour  $KC$  inférieur à 1 et la validité du modèle de porosité aux faibles valeurs de  $KC$ .

L'originalité de [10] consiste en l'étude des actions couplées d'un mouvement de pilonnement d'un disque plein et d'une houle incidente. Un nombre de Keulegan Carpenter  $KC_w$  est introduit, il repose sur le mouvement relatif entre composante orbitale verticale de houle incidente et pilonnement du disque à la même fréquence et dépend donc de la phase relative entre ces deux mouvements. Les résultats sont présentés pour des valeurs de  $KC$  et  $KC_w$  toutes deux inférieures à 1.4 et montrent la légitimité d'introduire  $KC_w$  comme variable en présence de houle.

Une campagne expérimentale dans le bassin de l'Ifremer centre de Bretagne a été menée afin de quantifier à échelle réduite les inerties en pilonnement et effets de traînée associés pour des plaques circulaires horizontales minces, pleines et poreuses, et pour des nombres de Keulegan Carpenter atteignant 6. Elle est l'objet de cet article.

Quelques résultats d'essais en présence de houle sont également présentés.

### 3. Campagne expérimentale

#### Configuration

Une campagne d'essai est conduite dans le bassin de l'Ifremer Centre de Bretagne, de largeur 12.5 m, de longueur 50 m et de profondeur 9.70 m.

Un hexapode (générateur de mouvements à six degrés de liberté) situé au-dessus du plan d'eau est équipé sur son plateau mobile d'une balance à six composantes d'efforts. Celle-ci supporte un mât circulaire vertical semi-immersé dont l'extrémité basse est équipée d'une plaque circulaire horizontale voire de goussets (figures 3 et 4).

Le diamètre du mât support de plaque est  $D_c = 0.1$  m et sa hauteur immergée en position moyenne est  $H_c = 0.623$  m.

Les principaux essais en radiation consistent en la génération de mouvements forcés sinusoïdaux ou irréguliers en eau calme.

Des essais en diffraction, configuration fixe et houle incidente, sont également menés.

Un mouvement principal de pilonnement est imposé, les efforts endurés par l'ensemble mât et plaque sont mesurés, en particulier l'effort vertical principal.

La configuration retenue en termes de distance entre la plaque et le plan d'eau limite les effets de la surface libre.

Cinq plaques différentes par leurs diamètres, épaisseurs ou porosités sont ainsi animées de mouvements de pilonnement sinusoïdaux de périodes [3, 4, 5] s pour des amplitudes [10, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300] mm (tableaux 1 et 2).

Compte tenu de la course de l'hexapode et des diamètres des plaques un nombre de Keulegan Carpenter maximum de 6.3 est atteint (tableau 1).

Des plaques poreuses (porosité respectives de 25 et 40%) (tableau 2) sont également testées qui mettent en évidence les effets de la porosité sur les inerties ajoutées et les amortissements.

Les orifices répartis sur les plaques pour créer les porosités (diamètres respectifs de 8 et 10 mm sur les anneaux compris entre les diamètres  $D$  et  $D_c$ ) sont découpés par laser et présentent des angles vifs.

Quelques essais sont conduits en présence de goussets pour des mouvements de pilonnement et de cavement.

Des mouvements irréguliers forcés sont également imprimés, leurs séquences temporelles sont construites sur la base de spectres de type JONSWAP de période de pic 4 s et de hauteurs significatives [47, 95, 189, 284] mm.

Les 4 séquences de pilonnement sont homothétiques. Le nombre de Keulegan Carpenter est construit sur une amplitude égale au demi pilonnement significatif et demeure inférieur à 3.

Des séquences de houle sont générées en présence des plaques fixes. Les périodes de houle régulière sont [1.7, 2.1, 2.5] s avec des hauteurs crêtes à creux de 20 et 40 cm. Les périodes de pic des spectres de houle irrégulière sont [1.7, 2.1, 2.5] s associées à des hauteurs significatives [10, 15, 20, 25] cm.

Les analyses menées comprennent l'identification des termes d'inerties ajoutées et d'amortissement lié aux effets de traînée en configuration de radiation ainsi que les efforts d'inertie et de traînée de houle en configuration de diffraction.

### Analyse des signaux

La force mesurée par la balance interface entre l'hexapode et le mat support des plaques est la somme de :

- poids propre de la platine inférieure de la balance et d'une partie des capteurs piézo-électriques
- poids propre du mat et des plaques et goussets éventuels
- poussée d'Archimède exercée sur la partie immergée du mât et les plaques immergées, sa variation avec le mouvement de pilonnement est linéaire et caractérisée par la raideur hydrostatique en pilonnement
- inertie propre de l'ensemble des masses attelées qui participent aux poids décrits ci-dessus
- inertie ajoutée de la forme géométrique immergée (mât, plaque, goussets)
- traînée et amortissement de la forme géométrique immergée (mât, plaque, goussets)

La résultante des poids et de la poussée d'Archimède moyenne constitue un terme constant. Les termes de raideur hydrostatique et d'inertie propre de la masse attelée peuvent être identifiés aisément et soustrait de l'effort oscillant total mesuré, le résidu constitue l'effort hydrodynamique qui est analysé et dont sont extraits les termes caractéristiques : inertie ajoutée et amortissement.

Les signaux acquis lors des essais en mouvement monochromatiques sont décomposés en séries de Fourier.

Les termes en phase avec la translation et l'accélération sont associés aux effets de raideur hydrostatique, masse propre et masse ajoutée.

Les termes en phase avec la vitesse sont associés aux effets d'amortissement et de traînée.

Les coefficients hydrodynamiques sont ainsi déduits.

Les signaux acquis lors des essais en mouvement multichromatique sont identifiés au sens des moindres carrés. Un nombre de Keulegan Carpenter, un coefficient de masse ajoutée et un coefficient de traînée constants sont identifiés pour une séquence de pilonnement irrégulier donnée.

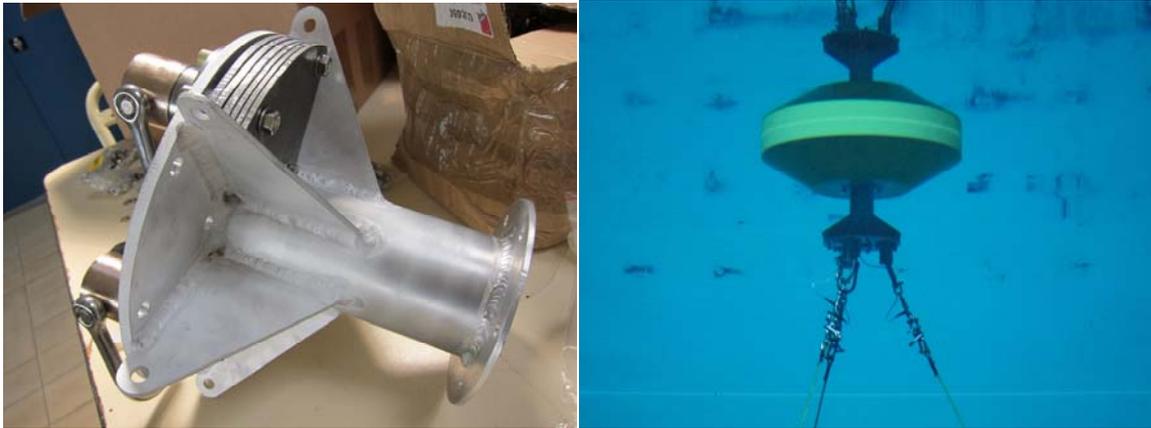
Tableau 1 : paramètres généraux des plaques

$D$ (m)	$D_c$ (m)	$E$ (mm)	$D_c$ (m)	$M_{azz0} = \rho D^3 / 3$ (kg)	$M_{azz0} = \rho (D^3 + (D^2 - D_c^2)^{3/2}) / 6$ (kg)	$A_{max}$ (m)	$KC_{max}$	$T$ (s)	$\beta$
0.3	0.1	6	0.1	9.225	8.478	0.3	6.28	3	25000
								4	18750
								5	15000
0.6	0.1	6	0.1	73.800	72.273	0.3	3.14	3	100000
								4	75000
								5	60000
0.3	0.1	3	0.1	9.225	8.478	0.3	6.28	3	25000

								4	18750
								5	15000

Tableau 2 : paramètres particuliers des plaques poreuses

$D$ (m)	$D_c$ (m)	$E$ (mm)	$D_c$ (m)	Porosité %	Nombre / diamètre des orifices circulaires (mm)	$A_{\max}$ (m)	$KC_{\max}$	$T$ (s)	$\beta$
0.3	0.1	6	0.1	25	326 / 8	0.3	6.28	3	25000
								4	18750
								5	15000
0.3	0.1	6	0.1	40	326 / 10	0.3	6.28	3	25000
								4	18750
								5	15000



Figures 1 et 2 : Exemple de quille de bouée support de lest (projet MERIFIC 2012) [6]

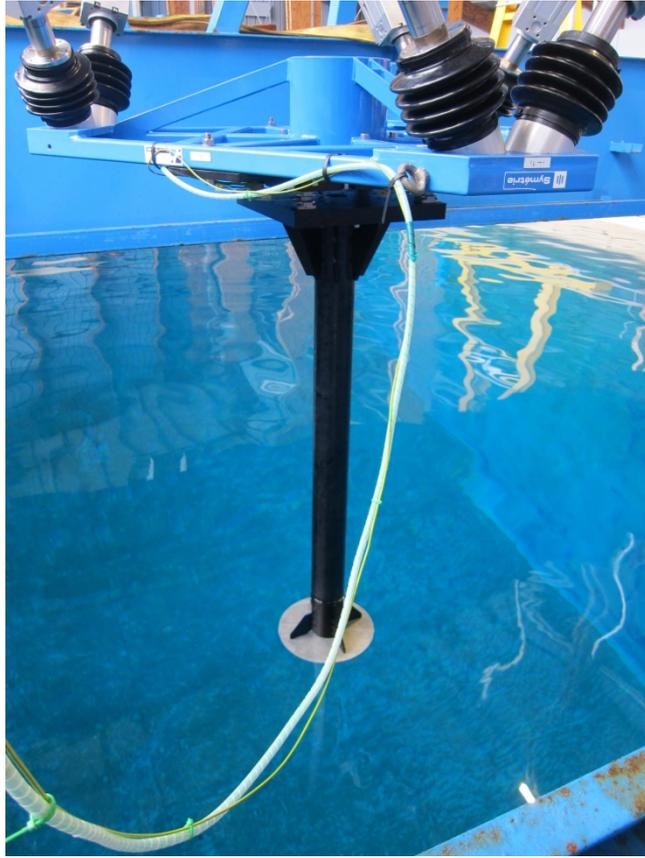


Figure 3 : De haut en bas : hexapode, balance, mât, goussets, plaque



Figure 4 : Photographie des cinq maquettes de plaques réalisées et testées #

## Coefficients hydrodynamiques identifiés en oscillations forcées régulières

Les valeurs des coefficients hydrodynamiques  $C_m$ ,  $C_b$ ,  $C_d$  sont tracées sur la figure 5. Des lois empiriques sont évaluées dont les paramètres sont donnés dans la série de tableaux 3. Deux intervalles de  $KC$  étant considérés, l'un pour  $KC \leq 2.2$ , l'autre pour  $KC > 2.2$ . Une valeur d'essai commune aux deux intervalles correspond à  $KC$  proche de 2.1.

Un seuil est introduit pour le lissage des valeurs du coefficient de masse ajoutée, différent pour chaque intervalle de  $KC$ . Pour les faibles  $KC$ ,  $C_m$  peut devenir inférieur à 1 et une loi en puissance inférieure à 1 pour des valeurs de  $C_m - 1$  négatives est alors mise en échec.

$$C_{ms} = C_m - \text{seuil} \quad KC < 2.2 \Rightarrow \text{seuil} = 0.5 \quad KC > 2 \Rightarrow \text{seuil} = 1$$

Une dépendance des coefficients hydrodynamiques  $C_m$ ,  $C_b$ ,  $C_d$  avec le nombre  $\beta$  est constatée, principalement pour les coefficients de traînée et d'amortissement et aux faibles valeurs de  $KC$  pour le coefficient de masse ajoutée. Cette dépendance visible sur la figure 2 se retrouve dans les tableaux 3.

Les disques de diamètre 300 mm et d'épaisseurs 3 et 6 mm présentent des coefficients similaires.

Le disque plein de diamètre 600 mm présente des coefficients un peu supérieurs à ceux des disques de diamètre 300 mm. Pour les plus fortes valeurs de  $KC$  la loi d'évolution du coefficient de masse ajoutée du disque de diamètre 600 mm semble modifiée, cela peut être attribué à la proximité de la surface libre pour les plus fortes amplitudes de pilonnement vers le haut.

Comme attendu, les coefficients de masse ajoutée des disques poreux chutent par rapport à ceux des disques pleins et tendent vers zéro aux faibles valeurs de  $KC$ , les termes de traînée demeurent significatifs.

Les lois de traînée des disques pleins aux faibles valeurs de  $KC$  s'apparentent à la loi théorique  $C_d = \alpha KC^{(-1/3)}$  avec  $\alpha = 6$  à 8 [1], [7], [8].

Tableaux 3 : paramètres des lois d'approximation des coefficients hydrodynamiques en pilonnement forcé

D = 0.6 m E = 6 mm Disque plein				
$C_{ms} = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
100000	1.107	0.366	0.856	0.297
75000	1.116	0.371	0.755	0.496
60000	1.126	0.383	0.800	0.413
tous	1.118	0.374	0.802	0.403
$C_b = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
100000	1.223	0.594	1.300	0.497
75000	1.141	0.624	1.264	0.471
60000	1.092	0.634	1.198	0.477
tous	1.146	0.615	1.246	0.482
$C_d = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
100000	7.527	-0.406	7.997	-0.503
75000	7.023	-0.376	7.780	-0.529
60000	6.722	-0.366	7.373	-0.523
tous	7.053	-0.385	7.669	-0.518

D = 0.3 m E = 6 mm Disque plein				
$C_{ms} = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	0.948	0.443	0.506	0.686
18750	0.960	0.456	0.531	0.669
15000	0.907	0.602	0.549	0.640
tous	0.940	0.502	0.531	0.661
$C_b = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	1.191	0.572	1.371	0.384
18750	1.035	0.638	1.220	0.404
15000	0.882	0.764	1.126	0.411
tous	1.023	0.653	1.221	0.402
$C_d = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	6.875	-0.428	7.915	-0.616
18750	5.979	-0.362	7.043	-0.596
15000	5.092	-0.236	6.504	-0.589
tous	5.907	-0.347	7.051	-0.598

D = 0.3 m E = 3 mm Disque plein				
$C_{ms} = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	0.934	0.525	0.536	0.654
18750	0.868	0.627	0.528	0.676
15000	0.772	0.739	0.471	0.739
tous	0.855	0.630	0.511	0.689
$C_b = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	1.277	0.512	1.435	0.365
18750	1.109	0.579	1.289	0.381
15000	0.972	0.675	1.196	0.386
tous	1.113	0.589	1.303	0.377
$C_d = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	7.374	-0.488	8.286	-0.635
18750	6.403	-0.421	7.442	-0.619
15000	5.615	-0.325	6.908	-0.614
tous	6.424	-0.411	7.525	-0.623

D = 0.3 m E = 6 mm Porosité 25%				
$C_m = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	0.541	0.600	0.553	0.570
18750	0.514	0.678	0.572	0.574
15000	0.457	0.816	0.561	0.594
tous	0.503	0.698	0.562	0.579
$C_b = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	0.978	0.542	0.992	0.524
18750	0.823	0.652	0.885	0.553
15000	0.683	0.843	0.814	0.564
tous	0.819	0.679	0.894	0.547
$C_d = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	5.648	-0.458	5.729	-0.476
18750	4.751	-0.348	5.108	-0.447
15000	3.944	-0.157	4.698	-0.436
tous	4.730	-0.321	5.161	-0.453

D = 0.3 m E = 6 mm Porosité 40%				
$C_m = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	0.213	0.873	0.258	0.656
18750	0.167	0.986	0.259	0.684
15000	0.182	0.537	0.206	0.844
tous	0.187	0.798	0.240	0.728
$C_b = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	0.678	0.578	0.677	0.611
18750	0.536	0.705	0.594	0.639
15000	0.402	1.050	0.525	0.685
tous	0.527	0.778	0.595	0.645
$C_d = \alpha KC^p$	KC < 2.2		KC > 2	
$\beta$	$\alpha$	$p$	$\alpha$	$p$
25000	3.914	-0.422	3.907	-0.389
18750	3.096	-0.295	3.428	-0.361
15000	2.321	0.050	3.032	-0.315
tous	3.041	-0.222	3.437	-0.355

### Coefficients hydrodynamiques identifiés en oscillations forcées irrégulières

Des essais en pilonnement irrégulier sont menés pour les plaques pleines et poreuses d'épaisseurs 6 mm.

Les séquences de pilonnement sont issues de spectres de type Pierson Moskowitz ou JONSWAP de paramètre d'élancement  $\gamma=1$ .

Le nombre de Keulegan Carpenter est ici construit sur une amplitude significative  $A = 2std(Z)$  qui lui donne une valeur inférieure à 3.

Les coefficients de masse ajoutée  $C_m$  et de traînée  $C_d$  sont évalués par approximation au sens des moindres carrés pour chaque séquence de pilonnement irrégulier.

Les valeurs des coefficients hydrodynamiques  $C_m$  et  $C_d$  sont tracées sur la figure 6.

### Coefficients hydrodynamiques identifiés en houle régulière sur plaques fixes

Des essais en houle régulière sont menés pour les plaques pleines et poreuses d'épaisseurs 6 mm.

Le nombre de Keulegan Carpenter est ici construit sur l'amplitude de mouvement orbital évalué au niveau d'immersion de la plaque  $A = a \exp(-k_o H_c)$  qui lui donne une valeur inférieure à 3.

Les valeurs des coefficients hydrodynamiques  $C_m$ ,  $C_b$ ,  $C_d$  sont tracées sur la figure 7.

Compte tenu du faible volume des plaques leur déplacement est négligeable devant le terme d'inertie d'une formulation de type Morison. Le terme d'inertie ajoutée en diffraction et en radiation est donc sensiblement le même.

La planche 8 représente les modules de l'effort vertical de houle et de masse ajoutée en pilonnement évalués grâce au code HydroSTAR du Bureau Veritas. Pour la plaque de diamètre 0.6 m et les périodes de houle considérées l'effort vertical est substantiel et sa phase quasiment constante, proche de  $\pi$ .

Pour la plaque de diamètre 0.3 m et les périodes de houle l'effort vertical est faible et change de signe, la phase passant de 0 à  $\pi$ .

Ces valeurs de phase indiquent une composante en quadrature quasiment nulle en fluide parfait.

L'analyse des mesures montrent des effets visqueux associés à la traînée et une influence plus faible sur le terme de masse ajoutée.

Les valeurs du coefficient  $C_m$  lorsque KC tend vers zéro sont en effet proches des valeurs identifiées en fluide parfait (figures 7 et 8).

Le terme d'inertie ajoutée pour les plaques poreuses est négatif et d'autant plus important en module que la période de houle est longue. Pour une période de houle donnée, la dépendance vis-à-vis du nombre KC est faible sur l'intervalle considéré.

### **Coefficients hydrodynamiques identifiés en houle irrégulière sur plaques fixes**

Des essais en houle irrégulière sont menés pour les plaques pleines et la plaque de porosité 40%, toutes d'épaisseurs 6 mm.

Le nombre de Keulegan Carpenter est ici construit sur une amplitude significative du mouvement orbital évalué au niveau d'immersion de la plaque à partir de l'élévation de surface libre mesurée, ce qui lui donne une valeur inférieure à 1.5.

Les valeurs des coefficients hydrodynamiques  $C_m$  et  $C_d$  sont tracées sur la figure 9.

Dans le cas des plaques pleines, à l'effort hydrodynamique vertical mesuré a été retranché l'effort vertical calculé à partir de l'élévation de surface libre mesurée et de la fonction de transfert linéaire issue du calcul de diffraction (figure 8). Le coefficient  $C_m$  tracé sur la figure 9 représente donc l'écart au modèle linéaire de fluide parfait.

La variation du coefficient de masse ajoutée  $C_m$  des plaques pleines a ainsi une allure proche de ceux identifiés en houle régulière lorsque ceux-ci sont diminués de leurs valeurs asymptotiques pour  $KC=0$ .

La valeur unique de  $C_m$  pour une séquence de houle donnée globalise les différentes contributions d'effort de houle selon les fréquences.

Dans le cas de la plaque poreuse, l'effort hydrodynamique vertical mesuré n'a pas été modifié, le calcul de diffraction linéaire en fluide parfait étant inopérant (figure 9).

Fz

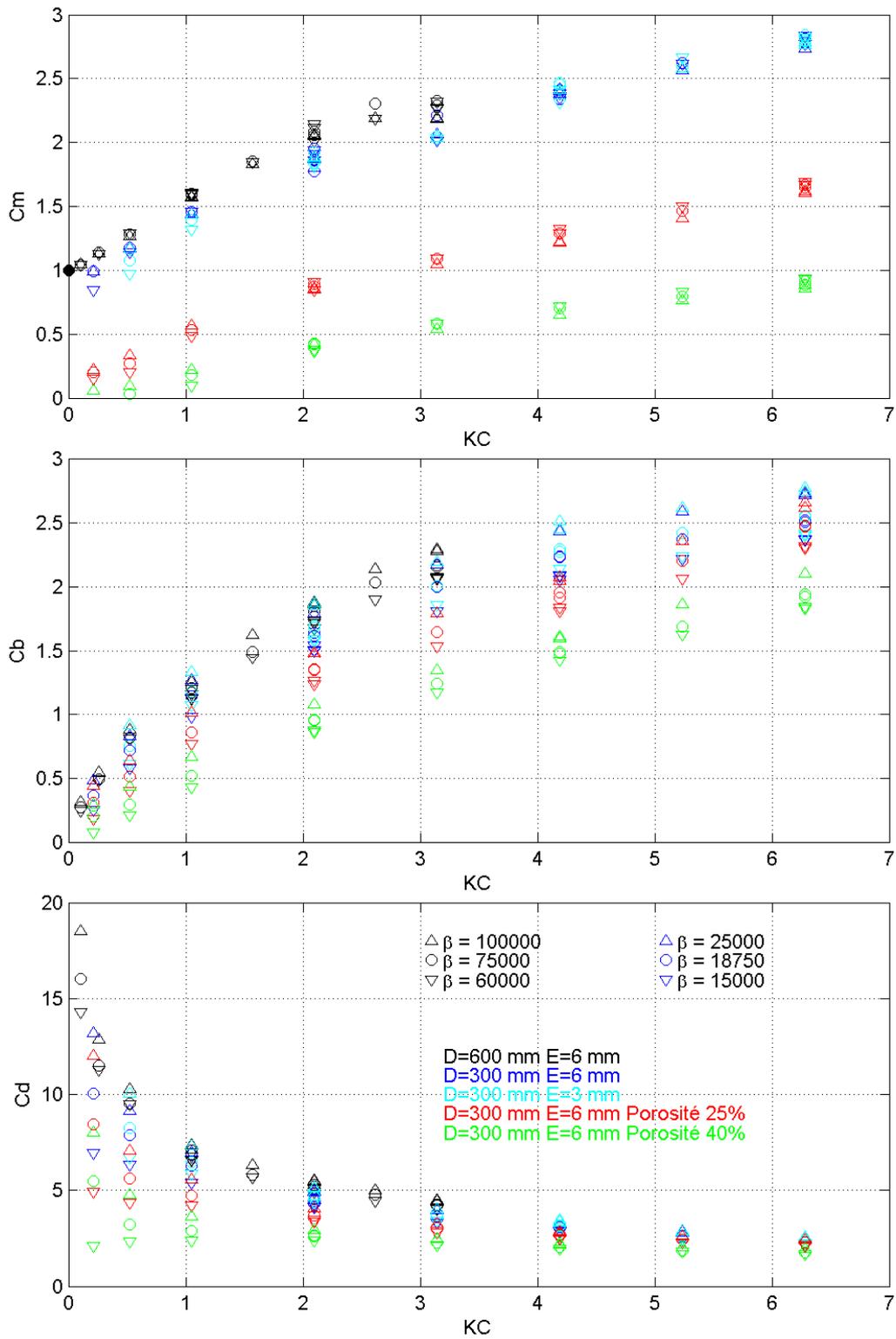


Figure 5 : Coefficients hydrodynamiques identifiés lors des essais de pilonnement forcé régulier

Fz

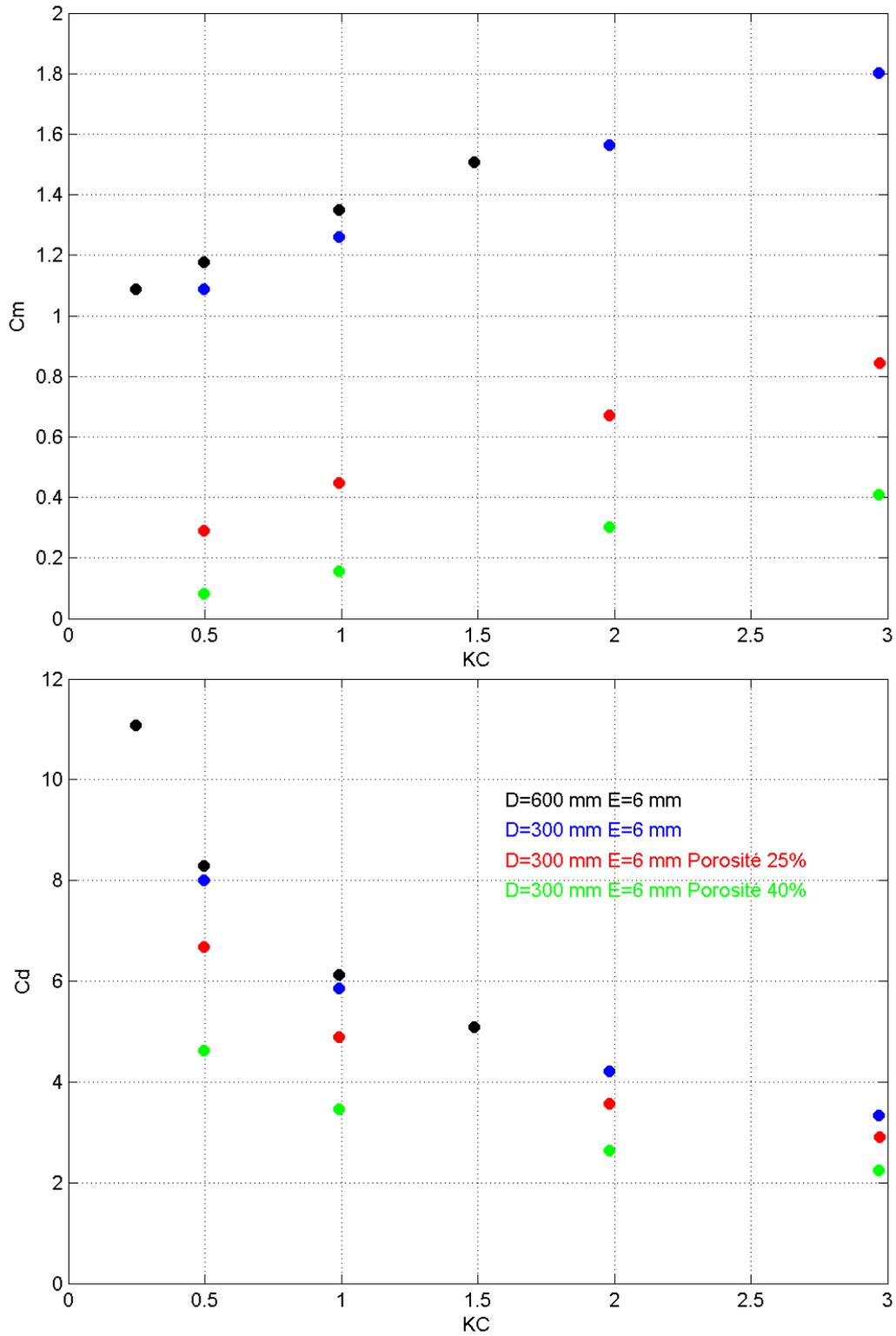


Figure 6 : Coefficients hydrodynamiques identifiés lors des essais de pinnement forcé irrégulier

Fz

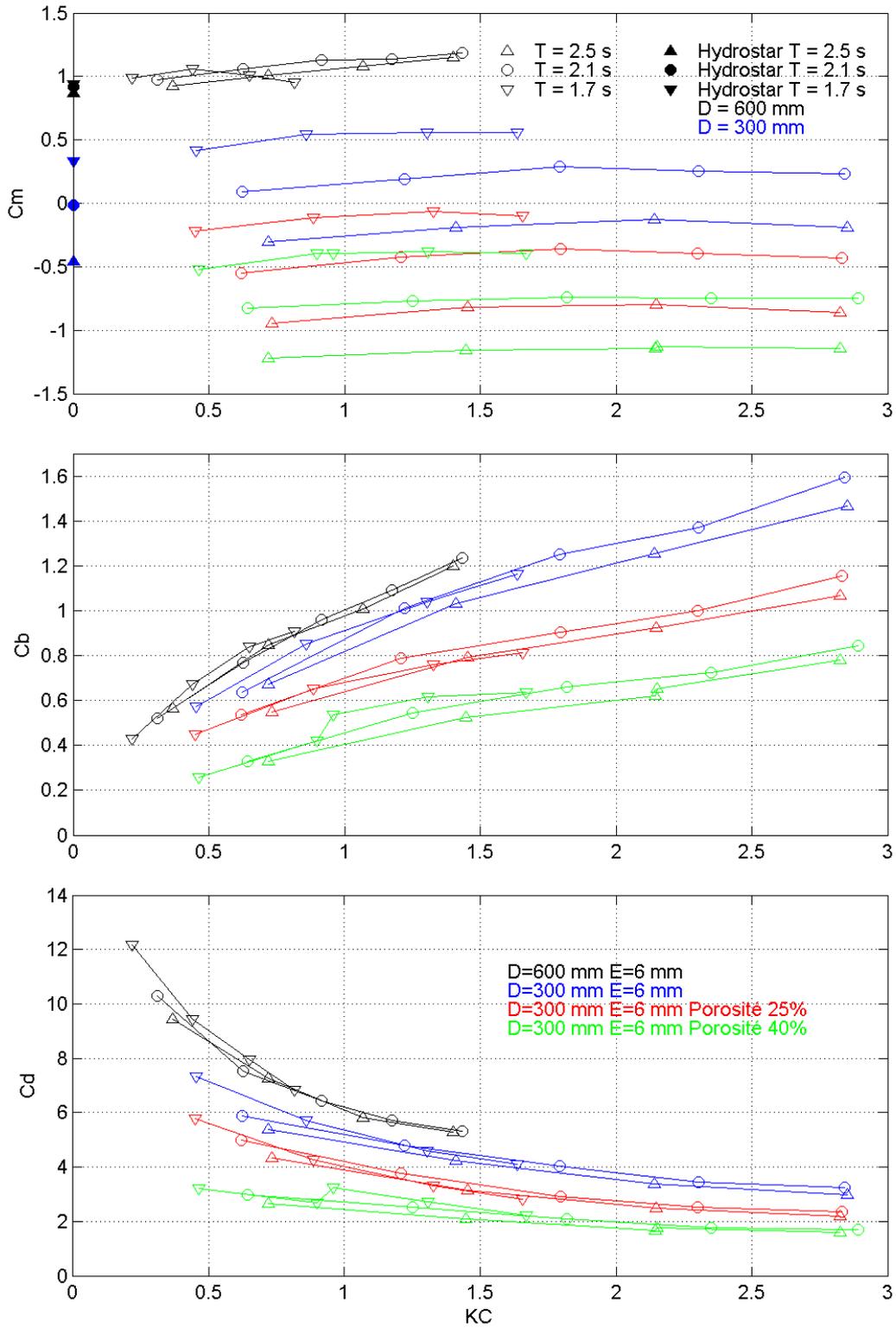


Figure 7 : Coefficients hydrodynamiques identifiés lors des essais en houle régulière

### Diffraction - Radiation

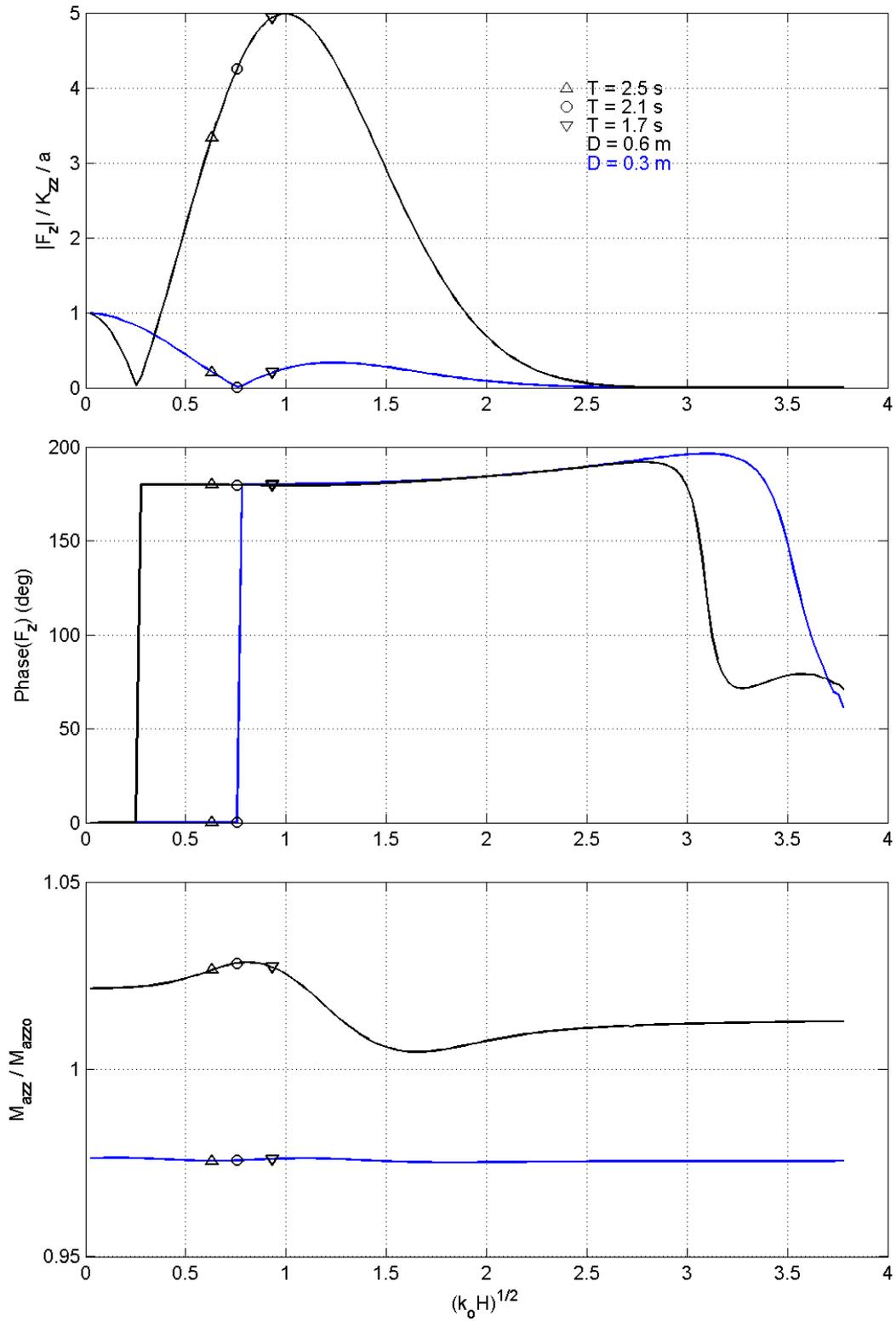


Figure 8 : Coefficients hydrodynamiques issus d'un calcul de diffraction-radiation (logiciel HydroSTAR du bureau Veritas)

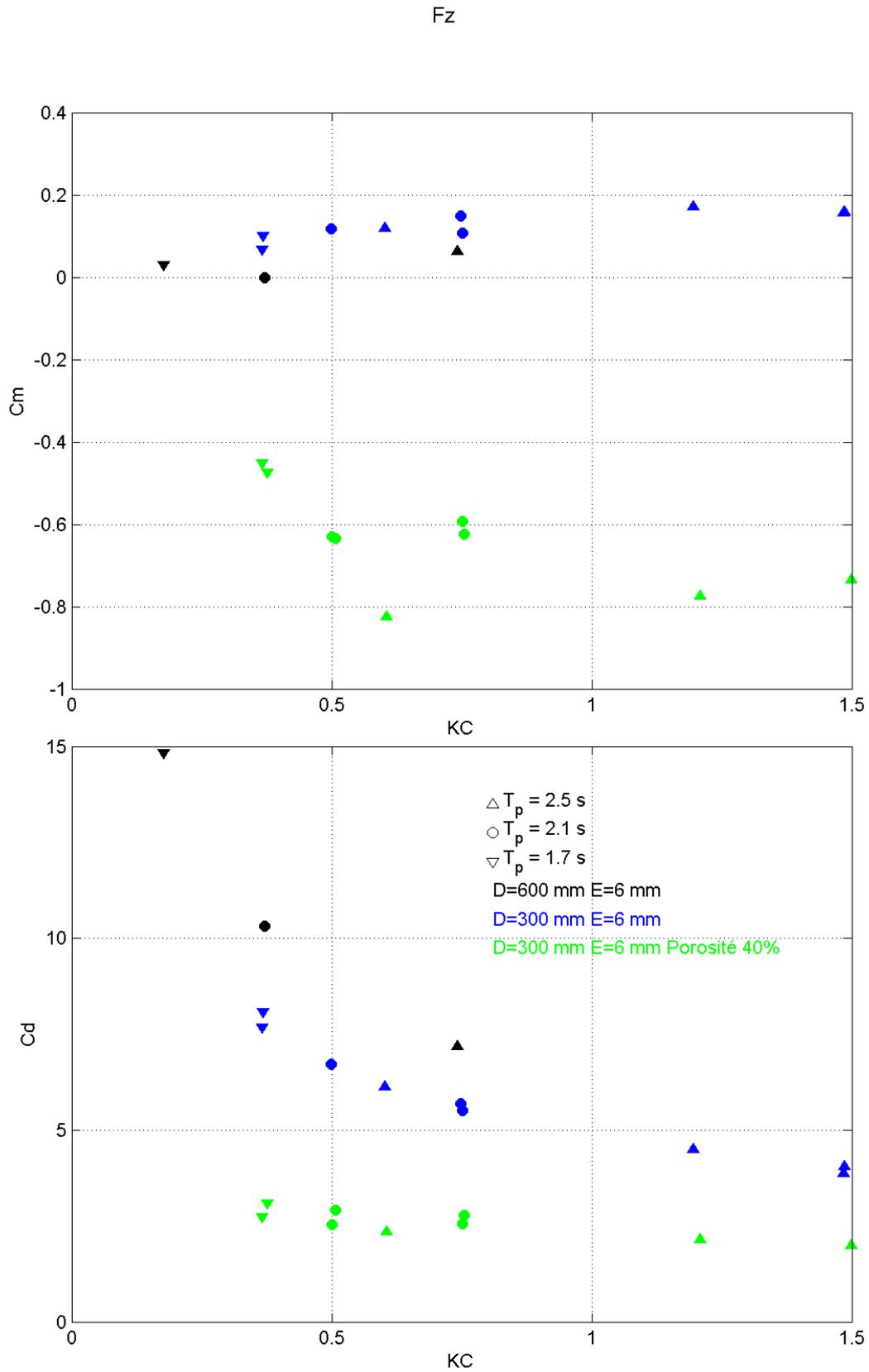


Figure 9 : Coefficients hydrodynamiques identifiés lors des essais en houle irrégulière

## 4. Conclusion

Les essais conduits dans le bassin de l'Ifremer Centre de Bretagne sur un ensemble de plaques horizontales circulaires pleines ou poreuses en oscillations forcées verticales ou fixes en houle régulière et irrégulière ont permis d'acquérir une base de données substantielle propre à l'identification des coefficients hydrodynamiques de ces composants et leur dépendance vis-à-vis du nombre de Keulegan Carpenter.

Les résultats recourent ceux déjà obtenus [1], [7], [8] pour les valeurs de  $KC < 2$  en oscillations forcées régulières et étendent la gamme de  $KC$ .

Les allures des variations du coefficient  $C_m$  en mouvements de pilonnement forcé régulier et irrégulier sont similaires. Elles le sont également par comparaison des résultats en houle régulière et irrégulière.

Les allures des variations du coefficient  $C_d$  sont du même ordre de grandeur dans les différents cas.

Néanmoins, les amplitudes  $A$  de référence retenues pour les évaluations de  $KC$  conduisent à des intervalles de valeurs de  $KC$  différents selon les configurations : pilonnement forcé régulier et irrégulier, houle régulière et irrégulière.

Les travaux futurs devraient compléter les données acquises par des essais complémentaires pour de nouvelles valeurs de porosités et la prise en compte de goussets.

Une analyse plus poussée des résultats en mouvements irréguliers doit être conduite afin de déterminer des lois plus fines d'interaction grâce à des coefficients d'inertie ajoutée et de traînée variables au cours d'une séquence irrégulière.

Les harmoniques des mesures qui n'ont pas été exploitées en mouvements forcés réguliers (ordres 3 et 5 notamment) demandent un examen plus approfondi.

Enfin, des calculs numériques en fluide visqueux compléteraient la compréhension des phénomènes comme la validation de codes « CFD ».

## Remerciements :

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de la politique de site initiée par la Direction Scientifique de l'Ifremer dont le financement a permis le développement de la balance d'effort et des maquettes employées lors des essais du projet RheoKC associant l'Ifremer et l'ENSTA Bretagne.

## Références :

- [1] Song An, Odd M.Faltinsen. An experimental and numerical study of heave added mass and damping of horizontally submerged and perforated rectangular plates. *Journal of Fluids and Structures* 39 (2013) 87–101.
- [2] Alexia Aubault, Christian Cermelli, Dominique Roddier. Parametric optimisation of a semi-submersible platform with heave plates. *Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. June 10-15, 2007, San Diego, California, USA. OMAE2007-29391
- [3] Adam C Brown, Jim Thomson. Heave plate dynamics for a point absorbing wave energy converter. *Proceedings of the 3rd Marine Energy Technology Symposium. METS2015*. April 27-29, 2015, Washington, DC
- [4] Carlos A. Garrido-Mendoza. Hydrodynamic forces on heave plates for offshore systems oscillating close to the seabed or the free surface. Technical University of Madrid (UPM). School of Naval Architecture and Ocean Engineering (ETSIN). Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Maritime Technology. April 2015.
- [5] Marit I. Kvittem, Erin E. Bachynski, Torgeir Moan. Effects of hydrodynamic modelling in fully coupled simulations of a semi-submersible wind turbine. *Energy Procedia* 24 ( 2012 ) 351 – 362.
- [6] Le Roux Dominique. Etude d'un ancrage textile pour la bouée SWMTF destinée à l'analyse du comportement des systèmes houlo-moteurs. Ifremer. 2012.
- [7] Carlos Lopez-Pavon, Antonio Souto-Iglesias. Hydrodynamic coefficients and pressure loads on heave plates for semi-submersible floating offshore wind turbines: A comparative analysis using large scale models. *Renewable Energy* 81 (2015) 864-881
- [8] B. Molin. Hydrodynamic modeling of perforated structures. *Applied Ocean Research* 33 (2011) 1–11
- [9] B. Molin, F.G. Nielsen. Heave added mass and damping of a perforated disk below the free surface. *Proceedings of the 19th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Cortona, Italy. 2004.
- [10] Javier Moreno, Krish P. Thiagarajan, Matthew Cameron, Raul Urbina. Added mass and damping of a column with heave plate oscillating in waves. *Proceedings of the 31th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Plymouth, Michigan, USA. 2016.