



CALCUL DES EFFORTS DE LA HOULE SUR UNE STRUCTURE SEMI-IMMERGÉE COMPARAISON AVEC DES ESSAIS SUR MAQUETTES

Communication présentée au
Comité technique de la Société Hydrotechnique de France
le 20 novembre 1969

PAR J. SOMMET * ET
Ph. VIGNAT **

Objet de la recherche

L'étude d'un projet de structure flottante comporte plusieurs phases :

1. Au stade avant-projet, une première détermination assez approximative, mais rapide, des efforts sur la structure, et de ses mouvements, est nécessaire.

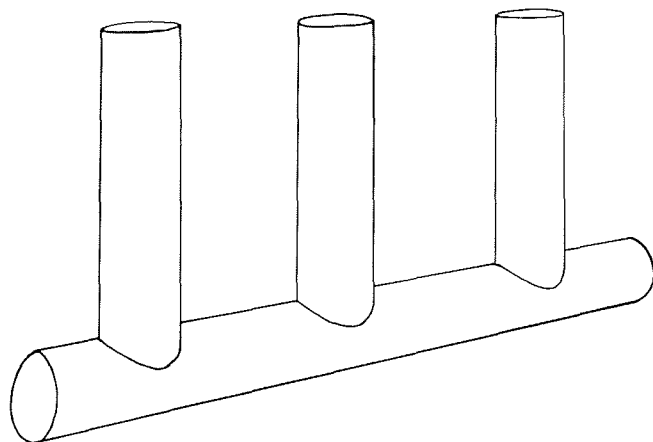
Celle-ci peut être effectuée à partir de quelques essais élémentaires sur bassin à houle classique, exploité par des modèles mathématiques simplifiés (globaux).

Pour des éléments de structure de géométrie classique, telle qu'un cylindre horizontal surmonté de piles, on peut penser établir une fois pour toutes, par une série d'essais appropriés, une liste de coefficients hydrauliques permettant la mise en œuvre immédiate, pour un projet donné, d'un modèle mathématique global.

2. Au stade du projet définitif, la connaissance précise des forces sur chaque élément de la structure, devient nécessaire, celle-ci devant alors être demandée à un calcul analytique précis, basé sur la détermination exacte du champ des vitesses et du champ de pression dus à la houle.

La prévision des mouvements peut également se déduire d'un tel modèle; toutefois, en raison de la complexité de la plupart des structures et des interactions hydrauliques entre éléments, ceux-ci ne pourront être déterminés avec sécurité que pour des essais sur modèle physique de l'ensemble de la structure.

A titre d'exemple de ce processus, la présente communication en reprend les différentes phases appliqués à un élément simple consistant en un cylindre horizontal surmonté de trois piles verticales.



1/ Élément de structure C 3 / *Structural element C 3.*

Modèle physique

Les essais ont été effectués dans un canal à houle de la SOGREAH, Grenoble.

Description du modèle.

La structure est composée d'un flotteur horizontal de 1 040 mm, de 150 mm de diamètre, sur lequel sont fixées trois piles verticales de 550 mm de hauteur et 134 mm de diamètre (pl. 1).

* Ingénieur Ecole Navale et E.I.H. Grenoble, Service d'Etudes Maritimes, SOGREAH.

** Ancien élève de l'Ecole Polytechnique, Département scientifique, SOGREAH.

Placé dans un canal à houle de 1,20 m de large où la houle attaque l'élément dans le sens transversal (direction de propagation normale au cylindre), l'élément est suspendu à deux anneaux dynamométriques fixés de façon rigide à une poutre indéformable placée en travers du canal, au moyen de tiges filetées permettant de faire varier la hauteur de l'ensemble en fonction des différents tirants d'eau.

Dans le sens longitudinal, la structure est maintenue fixe par huit haubans fixés aux sommets des piles extérieures et à la base du flotteur.

Dans le sens transversal, la structure est libre. Mais pour certaines périodes de houle, on a été obligé d'entraver son mouvement par une butée à frottement doux.

Deux tiges filetées permettent de suspendre la structure entre les essais, évitant ainsi les efforts sur les canaux dynamométriques (pl. 2).

Programme des essais.

Le programme d'essais comprend la mesure des efforts verticaux exercés sur l'ensemble par des houles régulières monochromatiques de périodes comprises entre 0,8 et 2,4 s avec trois tirants d'eau différents : 0,30 m, 0,45 m et 0,60 m; l'amplitude de la houle étant de 25 à 100 mm suivant les périodes. La hauteur d'eau dans le canal est de 1,15 m.

La houle est mesurée d'une part au droit de la structure, d'autre part en amont suivant l'axe du canal, pour obtenir le coefficient de réflexion.

Les efforts sont mesurés par deux anneaux dynamométriques sur lesquels sont fixées des jauges d'extensométrie.

Résultats.

Les résultats des essais sont portés sur les planches 4, 5 et 6 pour les différents tirants d'eau.

Les courbes F/a ($F = 1/2$ fluctuation totale de la force) sont tracées en fonction de la période de la houle. F est exprimé en grammes, a en millimètres.

Pour $T = 1,2$ s, trois amplitudes de houle ont été enregistrées pour en vérifier l'influence.

Modèle mathématique

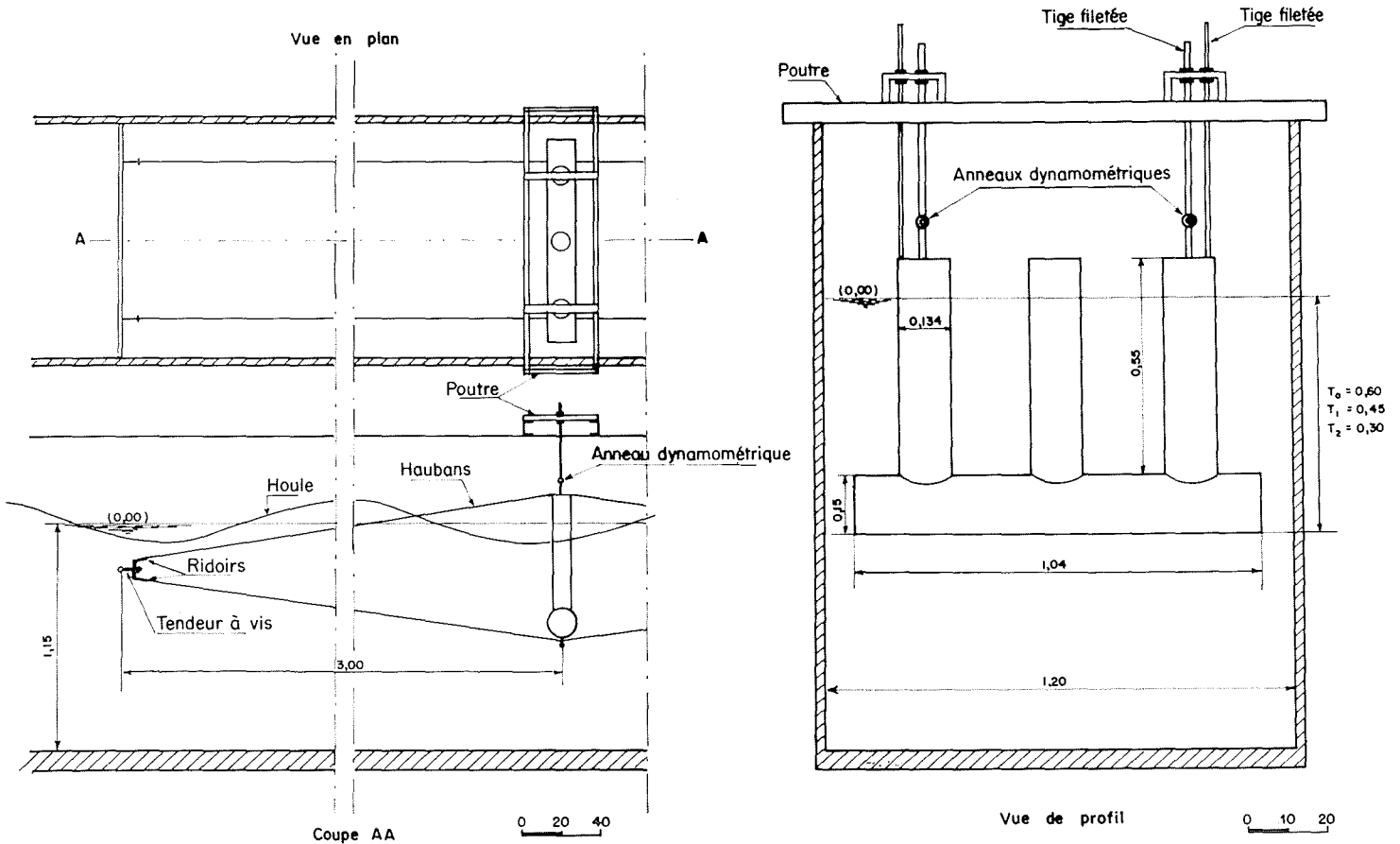
Modèle analytique.

Généralités.

La méthode numérique utilisée pour calculer les efforts de la houle sur une structure immergée est classique. Nous l'avons exposée au symposium « Research on wave action » qui s'est tenu à Delft, du 24 au 28 mars 1969 (*).

Cette méthode permet de déterminer l'action de la houle sur une structure immergée ou semi-immersée, fixe ou en mouvement.

(*) "Complexe wave action on submerged bodies", J. SOMMET et Ph. VIGNAT, Proceedings Symposium, paper 12, vol. IV.



2/ Forces verticales dans la houle. Dispositif d'essais.
Experimental vertical wave forces. Measurement layout.

Nous l'avons appliquée ici au calcul des efforts de la houle sur une structure ci-dessus, maintenue fixe, afin de pouvoir comparer les résultats obtenus par voie numérique avec les mesures effectuées sur modèle physique.

Hypothèses physiques.

La méthode de calcul des efforts de la houle sur une structure implique les hypothèses physiques suivantes :

Nous avons supposé que les forces de viscosité sont faibles et que l'assimilation de l'eau à un fluide parfait donne une bonne représentation des vitesses et des pressions à la surface de la structure.

Cette hypothèse implique que les mouvements soient lents de manière à éviter la formation de sillage.

D'autre part, nous n'avons pas tenu compte de l'influence de la déformation de la surface libre due à la présence de la structure.

Représentation de l'écoulement autour de la structure.

Nous rappellerons ici rapidement la méthode de calcul des efforts sur les structures.

L'eau étant assimilée à un fluide parfait, en mouvement irrotationnel, l'écoulement est à potentiel Φ solution de l'équation de Laplace $\Delta\Phi = 0$.

La méthode consiste à déterminer Φ en tout point de la structure. La connaissance du potentiel de l'écoulement permet de calculer la pression hydrodynamique en tout point de la structure et de déterminer les efforts hydrodynamiques par intégration de la pression sur toute la surface immergée.

Ce procédé de calcul permet donc de calculer les pressions locales, les efforts locaux qui en découlent et peut permettre de déterminer les contraintes entre les éléments.

La houle est représentée par son potentiel qui est :

— en profondeur infinie :

$$\varphi = - \frac{ak}{m} e^{-mz} \sin kt$$

— en profondeur finie :

$$\varphi = - \frac{ag}{k} \frac{\text{ch}[m(h-z)]}{\text{ch} mh} \sin kt$$

axe Oz positif vers le bas.

- T = périodes;
- k = 2 π /T pulsation;
- 2 a = amplitude crête à creux;
- λ = longueur d'onde;
- m = 2 π / λ .

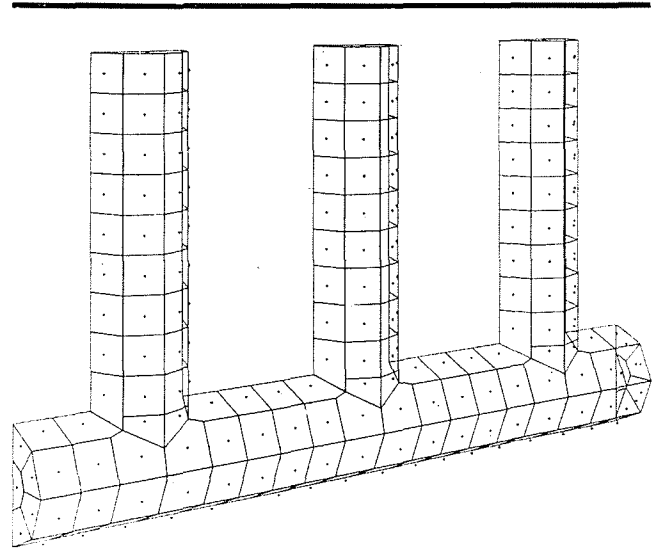
Les différentes intégrations nécessaires à la détermination du potentiel Φ , de la pression et des efforts sont effectuées par sommation et nécessitent des découpages de la surface de la structure en facettes élémentaires.

Application à l'ensemble flotteur-pile.

Nous avons appliqué la méthode précédente au calcul des efforts verticaux de la houle sur l'ensemble flotteur-pile considéré. Afin de pouvoir appliquer la méthode de calcul précédente, nous avons découpé la surface de la structure en facettes (fig. 3).

Le calcul des efforts a été effectué dans les mêmes conditions que l'essai sur modèle physique :

- la structure est maintenue fixe, transversalement à la houle;
- la houle est prise en profondeur finie (1,15 m);
- la période de la houle varie de 0,8 à 2,4 s;



3/

- l'amplitude de la houle est : 0,2 m crête à creux;
- trois tirants d'eau ont été considérés: 0,30, 0,45, 0,60 m.

Les résultats obtenus ont été tracés sur les mêmes graphiques que les mesures effectuées sur maquette.

Modèle global.

Il est possible d'établir une formule globale d'évaluation des efforts verticaux sur l'ensemble pile-flotteur considéré à partir des remarques suivantes :

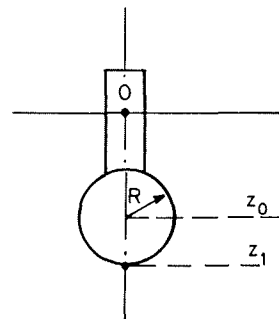
— Le mouvement de la houle en l'absence de la structure peut être donné par son potentiel :

$$\varphi(x, z) = - \frac{ak}{m} e^{-mz} \sin kt$$

— L'accélération verticale d'une particule d'eau est :

$$w' = + ak^2 e^{-mz} \cos kt$$

Les efforts de la houle sur la structure peuvent être différenciés en efforts dus à la houle incidente et en efforts dus à la houle réfractée par la structure. Si l'on fait abstraction des forces de viscosité, la force verticale se réduit aux efforts sur le flotteur horizontal.



La force due à la houle incidente s'écrit :

$$F_p = \rho V_f w'(z_0) - 3 \rho s \frac{\delta\varphi}{\delta t}(z_1)$$

où :

- V_f : volume du flotteur horizontal;
- s : section d'une pile;
- z_0 : cote de l'axe du flotteur horizontal;
- z_1 : cote du bas de la pile.

Nous avons supposé que la force due à la houle réfractée par le caisson était proportionnelle aux efforts dus à la houle incidente sur le flotteur seul, soit :

$$Fa = \rho \mu V_f w'(z_0)$$

$\mu =$ coefficient < 1 .

La force verticale globale sur la structure sera donc :

$$F = F_p + Fa = \rho (1 + \mu) V_f w'(z_0) - 3 \rho s \frac{\delta \phi}{\delta t} (z_1)$$

soit :

$$F = \rho a k^2 \cdot e^{-mz_0} \left[V_f (1 + \mu) - \frac{3s}{m} e^{-mz_1} \right] \cos kt$$

Détermination de μ .

Nous avons vu que la force verticale mesurée sur modèle physique s'annulait pour une certaine valeur T_0 de la période. Nous prendrons pour μ la valeur donnant une force nulle $F = F_p + Fa$ pour la période T_0 correspondante. μ étant déterminé, nous avons calculé la force F donnée par cette formule pour les trois tirants d'eau considérés (pl. 4, 5 et 6).

Observations

Force mesurée.

Les mesures de la force effectuées pour $T = 1,2$ s avec trois amplitudes de houle différentes confirment la linéarité des forces en fonction de l'amplitude.

Pour une période de houle donnée, peu différente pour chaque tirant d'eau, la force passe par un minimum non nul qui correspond à un déphasage de $\pi/2$ entre la houle et la force.

Pour les courtes périodes, la force passe par un maximum qui varie avec le tirant d'eau.

L'observation d'un déphasage nul entre la houle et les forces pour les périodes supérieures à T_0 , et d'un déphasage de π pour les périodes inférieures à T_0 , confirme que les forces de viscosité restent négligeables sur le modèle, devant les forces d'accélération.

Force calculée.

L'allure générale de la courbe de variation de la force est la même pour les forces calculées et la force mesurée.

Force calculée par le modèle analytique complet.

Elle correspond bien à la force mesurée pour les périodes longues et moyennes mais s'en écarte sensiblement pour les périodes courtes.

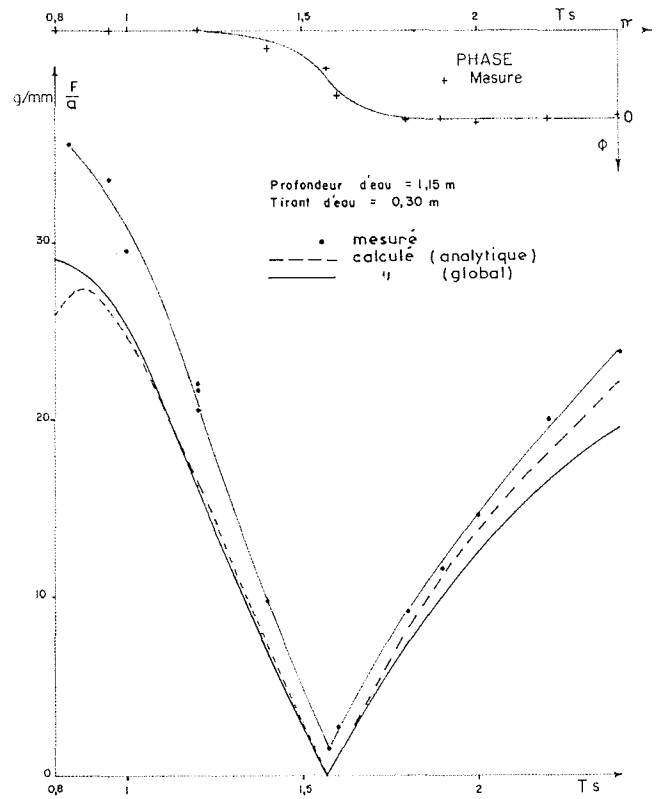
La force calculée s'annule totalement pour la période T_0 du fait des hypothèses faites sur la nature de l'écoulement.

On retrouve bien la période T_0 correspondant au minimum de la force mesurée.

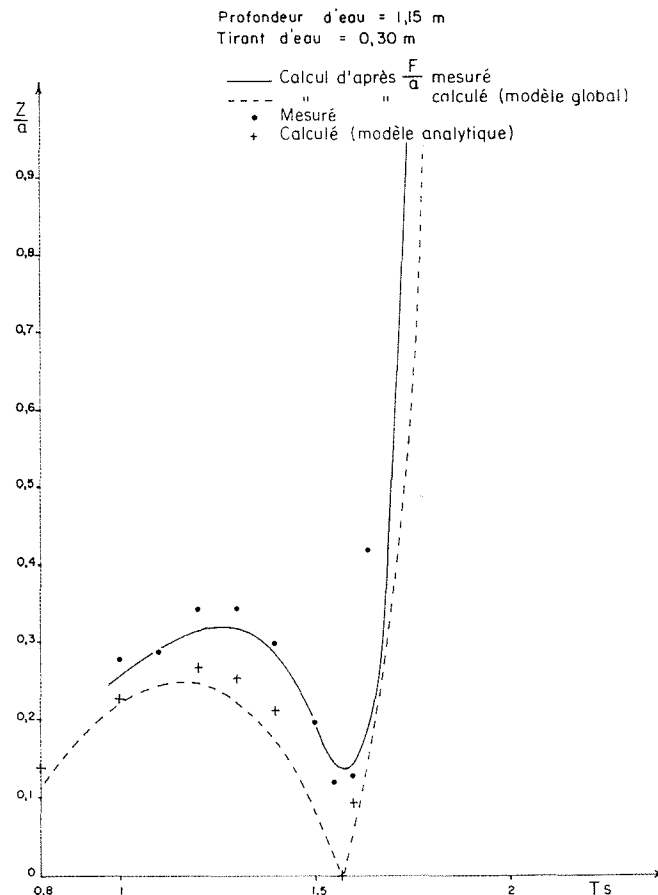
Le fait que nous avons négligé la déformation de la surface libre due à la présence de la structure peut expliquer l'écart constaté entre la force mesurée et la force calculée.

Force calculée par le modèle global.

Elle correspond bien, dans son allure générale, avec la force mesurée. Elle est, dans tous les cas, plus faible que la force mesurée, l'écart entre les deux courbes étant faible. Cette méthode de calcul peut, dans de nombreux cas, être très utile et donner une bonne approximation de la force verticale sur une structure de ce type.



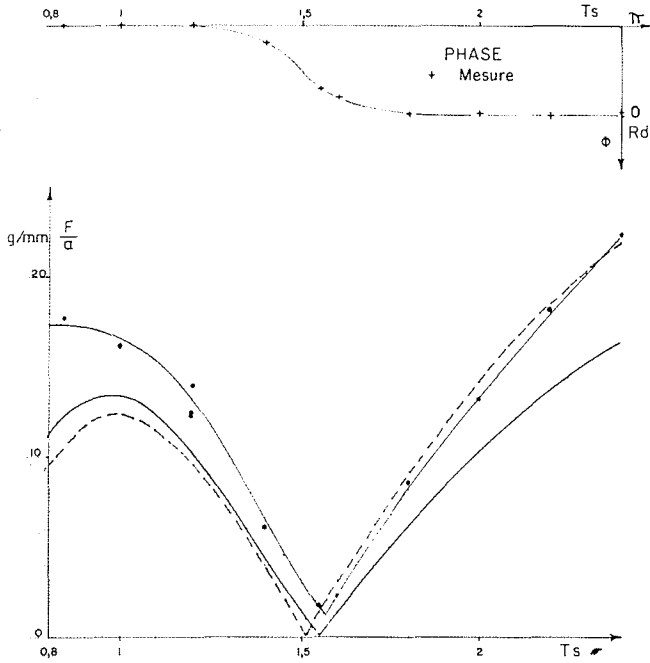
4/ Forces verticales. Elément C3 / Vertical forces. Element C3.



7/ Pilonnement / Heaving.

Profondeur d'eau = 1,15 m
Tirant d'eau = 0,45 m

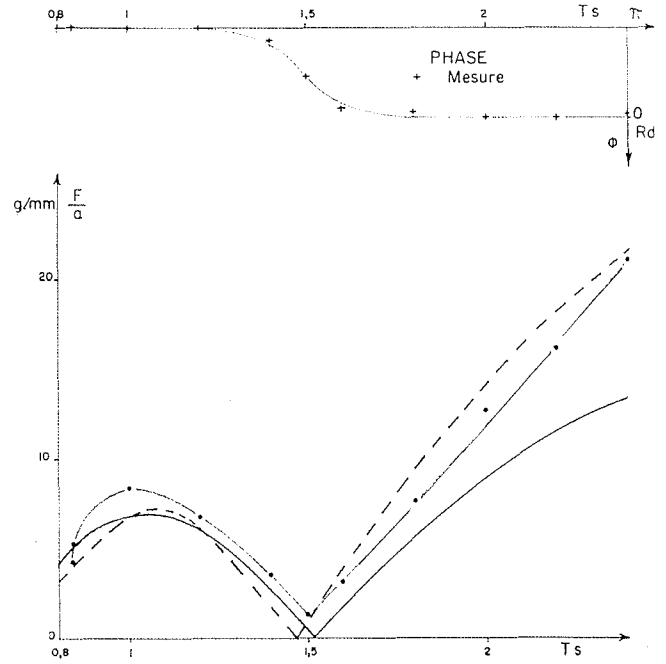
• calculé (analytique)
- - - mesuré (global)



5/ Forces verticales. Elément C3 / Vertical forces. Element C3.

Profondeur d'eau = 1,15 m
Tirant d'eau = 0,60 m

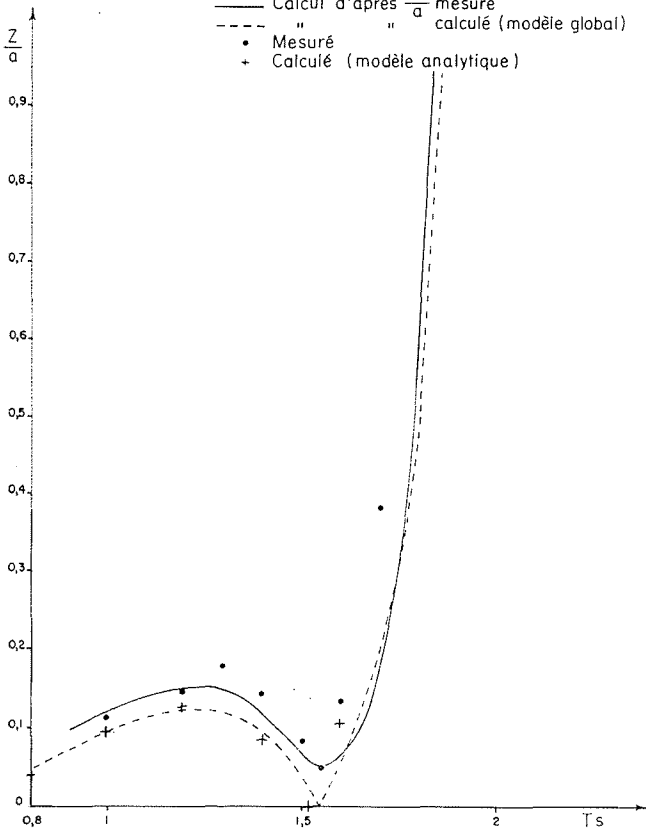
• mesuré
- - - calculé (analytique)
- - - " (global)



6/ Forces verticales. Elément C3 / Vertical forces. Element C3.

Profondeur d'eau = 1,15 m
Tirant d'eau = 0,45 m

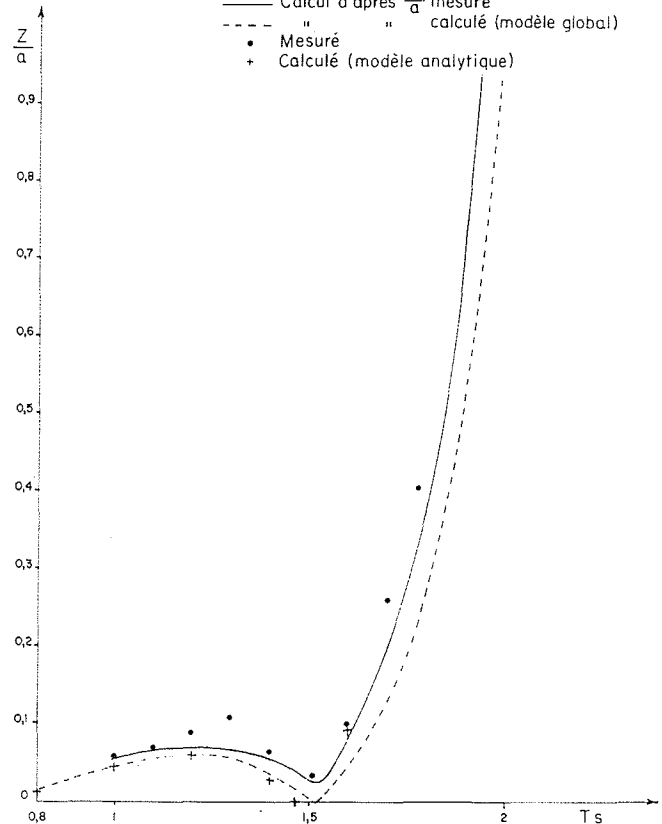
— Calcul d'après $\frac{F}{a}$ mesuré
- - - " " $\frac{F}{a}$ calculé (modèle global)
• Mesuré
+ Calculé (modèle analytique)



8/ Pilonnement / Heaving.

Profondeur d'eau = 1,15 m
Tirant d'eau = 0,60 m

— Calcul d'après $\frac{F}{a}$ mesuré
- - - " " $\frac{F}{a}$ calculé (modèle global)
• Mesuré
+ Calculé (modèle analytique)



9/ Pilonnement / Heaving.

Mouvement

Formulation du pilonnement.

Soit z , la cote de l'origine des coordonnées dans le repère lié à la structure, le mouvement vertical de la structure est donnée par l'équation :

$$(M + M') z'' + Nz' + Cz = F_0 \cos kt$$

M' : masse ajoutée;

N : amortissement;

C : coefficient de rappel (poussée d'Archimède).

La solution de l'équation précédente est la superposition d'un mouvement périodique amorti et d'un mouvement entretenu.

Seul, le mouvement entretenu nous intéresse et s'écrit :

$$z = -z_0 \cos(kt + \varphi)$$

avec :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Nk}{(M + M')k^2 - C}$$

$$z_0 = \frac{F_0}{[(M + M')k^2 - C] \cos \varphi + Nk \sin \varphi}$$

On peut déduire, à partir de la formule précédente, l'amplitude du pilonnement de la structure connaissant la force verticale $F_0 \cos kt$.

Nous avons effectué ce calcul pour les trois types de force considérée (force mesurée, force calculée) par les modèles mathématiques complet et simplifié, en supposant que l'amortissement était nul.

Comparaison des amplitudes de pilonnement calculée et mesurée.

Des mesures de mouvement ont été effectuées à SOGREA pour la structure étudiée. Les résultats de ces mesures sont comparés :

a) aux mouvements déduits des forces mesurées sur modèle réduit;

b) aux mouvements déduits des forces calculées par le modèle simplifié;

c) aux mouvements déduits des forces calculées par le modèle complet.

La comparaison a) fait apparaître un bon accord des résultats, sauf au tirant d'eau de 0,60 m.

Les comparaisons b) et c) conduisent à des amplitudes de mouvement trop faibles d'environ 30 %.

On peut en conclure que la formulation ci-dessus du mouvement est valable et que les forces de viscosité peuvent effectivement, dans ce cas particulier, être négligées.

La période d'équilibrage en mouvement correspond exactement à la période de houle donnant les forces minimales; il en résulte qu'une simple mesure de mouvement, plus facile à réaliser que la mesure d'une force, permet la détermination du coefficient μ et par suite, de la courbe des forces.

Conclusions

1. Les essais sur modèle physique effectués sur un élément de structure montrent que le modèle mathématique analytique constitue une approche satisfaisante de l'évaluation des forces dues à la houle.

2. Pour le cas de cet élément simple, un modèle mathématique simplifié peut être utilisé en première approximation.

3. En conclusion, on dispose actuellement, pour la détermination des efforts de la houle sur une structure immergée, et des mouvements de celle-ci, de plusieurs moyens allant du modèle physique au modèle purement mathématique plus ou moins élaboré.

Le choix du moyen à utiliser est à effectuer dans chaque cas particulier en fonction des données et des objectifs de l'étude :

- type de structure;
 - détermination des mouvements;
 - détermination des efforts internes (réactions entre éléments et efforts locaux);
 - détermination de la réponse des ancrages à des conditions de mer données;
- etc.

Discussion

Président : M. L. GRESLOU

M. le Président remercie M. SOMMET d'avoir exposé la comparaison des résultats obtenus par le modèle mathématique d'une part, et par le modèle physique correspondant d'autre part.

Il ouvre la discussion en donnant la parole à M. VIGNAT qui apporte les compléments ci-après :

« Le principe du modèle mathématique présenté dans cette communication est très général et peut être appliqué dans chaque cas où les hypothèses faites sur la nature du fluide permettent de l'assimiler à un fluide parfait.

« Deux types d'application de cette méthode de calcul peuvent être dégagés suivant que l'on cherche à déterminer les efforts locaux ou globaux sur un corps fixe ou que l'on s'intéresse au mouvement du corps dans l'eau avec ou sans effet de la houle.

« Nous pouvons citer comme premier type d'application, le calcul des pressions et des efforts exercés par la houle sur des réservoirs immergés. Nous l'avons appliqué ici au calcul des efforts verticaux sur un ensemble de « pile-flotteur » de plate-forme de forage afin d'en vérifier la validité.

« Comme deuxième type d'application, nous avons appliqué la

méthode avec succès à l'étude des mouvements d'un sous-marin évoluant sous la houle. Dans cette étude, nous avons tenu compte des variations de pression sur les carènes, dues à la vitesse d'écoulement de l'eau, variations qui induisent des efforts non négligeables d'attraction à la surface. Dans ce cas, la détermination du mouvement a été effectuée pas à pas en calculant à chaque instant les efforts globaux sur la carène.

« Les effets de viscosité étaient pris en compte localement en fonction de la vitesse relative de l'eau par rapport à la carène (calcul effectué en houle irrégulière donnée par son spectre défini par huit raies.)

« Dans le même ordre d'idées, cette méthode a été appliquée au calcul des efforts sur l'aile immergée d'un hydroptère. Un premier calcul bi-dimensionnel permet de déterminer les coefficients de portance et de préciser les phénomènes liés à la vibration de l'aile. Un deuxième calcul, tridimensionnel, permet de déterminer la forme globale de l'écoulement et d'en déduire, éventuellement, les points de l'aile où risque de se produire la cavitation.

« La méthode présentée, permettant de déterminer l'écoulement

global autour de la structure, tient compte évidemment des interactions des divers éléments de la structure entre eux. Elle permet, en théorie, d'étudier des structures très complexes. En pratique, nous sommes limités en complexité par la taille et la vitesse des ordinateurs disponibles.

« A l'heure actuelle, on peut définir la structure par 200 « faces » élémentaires. On peut, dans certains cas, prendre jusqu'à 400 ou 500 faces.

« A titre d'indication, il est possible d'effectuer des calculs de mouvement d'un sous-marin, défini par 200 faces, en temps réel, c'est-à-dire « d'effectuer » un pas de calcul de 1 seconde réelle en moins d'une seconde d'ordinateur sur IBM 360-65.

« Nous comptons, dans l'avenir, améliorer notre méthode de calcul en prenant en compte l'effet de surface libre dans les cas où nous jugerons que cet effet a une importance significative sur les résultats ».

M. LEBRETON pose la question suivante.

« Dans le cas du sous-marin avançant à vitesse constante, quelle était la méthode employée pour calculer l'effort hydrodynamique résultant de l'effet de sillage à la surface libre ? A-t-on utilisé, en particulier, la méthode des sources déjà utilisée pour la houle ? »

M. VIGNAT répond, qu'en raison de la vitesse très lente du sous-marin, il a été jugé inutile de simuler sa résistance de sillage.

M. P. GUEVEL intervient en ces termes :

« Dans la méthode globale que vous avez exposée pour calculer les efforts sur la plate-forme, vous avez décomposé les actions hydrodynamiques s'exerçant sur le flotteur en :

- a) forces de pressions ;
- b) forces dues à l'effet de « masse ajoutée ».

« Dans le terme a) correspondant aux forces de pression, il apparaît la dérivée du potentiel par rapport au temps. L'effet de masse ajoutée n'est-il pas inclus dans ce terme ?

« Pouvez-vous m'éclairer sur la décomposition proposée, que je n'ai pas comprise, très certainement pour une question de vocabulaire ? »

Il est commode, répond M. SOMMET, de décomposer ces forces en deux parties, l'une due à l'écoulement de la houle non perturbée et l'autre concernant la perturbation due à la présence du corps. En fait, ces forces devraient intéresser l'ensemble du volume de la structure et non pas simplement le volume du cylindre.

M. MICHE demande confirmation des quelques hypothèses de base introduites (ou implicites) dans le modèle mathématique proposé :

- a) Fluide parfait ;
- b) Influence négligeable de la structure partiellement ou totalement immergée sur le potentiel de l'écoulement ;

c) Traînée nulle et ceci en opposition avec la traînée se manifestant lors de l'action des houles sur des pieux (formule de Morison - O'Brien ou analogues).

M. SOMMET se déclare d'accord avec cette interprétation des hypothèses admises.

En ce qui concerne le point c) et sauf s'il y a point anguleux avec traînée locale, l'expérience a montré que la traînée peut être négligée par suite de l'importance relative des dimensions de la structure vis-à-vis de la longueur d'onde de la houle. Les dimensions transversales des pieux sont relativement beaucoup plus faibles, d'où le comportement différent trouvé.

M. MICHE examine alors les efforts sur la structure dans le sens horizontal (non analysés en détail dans la communication). Il déduit de ce qui précède que ces efforts changent alternativement de sens lors de la propagation de la houle, les valeurs extrêmes étant égales en valeur absolue lorsque la structure possède un plan vertical de symétrie, comme dans le cas considéré.

M. SOMMET confirme ces résultats dans le cas où la traînée est très faible.

M. LEBRETON s'intéresse à la notion de période d'équilibrage apparaissant dans les mouvements verticaux des plates-formes semi-submersibles.

Il ressort, dit-il, des études actuelles que la réponse R d'un mouvement vertical (ou de tangage), exprimée en fonction de la période de l'excitation, dépend essentiellement de deux paramètres : la période d'équilibrage T_e et la période propre T_p .

D'après les figures projetées, il semble que pour certains flotteurs T_e et T_p soient très rapprochées. Ma question est donc la suivante : « Dans le cas où T_e et T_p se rejoignent, est-ce que la méthode de calcul n'est pas en défaut puisqu'elle conduit à rechercher R comme quotient de deux infiniment petits ? »

Que se passe-t-il, alors dans la réalité ? Doit-on introduire dans le modèle mathématique l'amortissement linéaire ou non ? L'a-t-on fait dans le cas exposé ici ?

Effectivement, répond M. SOMMET, l'intervalle entre ces deux périodes peut, dans certains cas, se trouver très réduit : il en résulte un risque important au point de vue du comportement de la structure. Il est alors nécessaire d'introduire un amortissement dans la formulation. Aussi, dans la pratique, il faudra dimensionner la structure pour travailler en deçà de cette période d'équilibre (aux périodes plus courtes), c'est-à-dire dans la partie de la courbe de réponse où les forces d'amortissement jouent un rôle négligeable.

M. le Président clôt la discussion en remerciant tous les artisans du succès de celle-ci et en indiquant que certains des points évoqués pourront être repris à la suite de la communication de M. DAUBERT.

Abstract

Calculation of wave forces on a semi-submerged structure Comparison with model tests

The development of offshore drilling has brought with it a demand for increasingly large floating rigs. One of the main problems in building such large rigs is how to reduce wave forces and the motion they cause to a minimum.

The object of the investigation described was to test an overall mathematical model designed to calculate these wave forces, considering their application to a simple submerged horizontal element with vertical columns emerging above water.

A description of the mathematical model was given at the Symposium on research on wave action held in Delft in March 1969 (see Proceedings).

The calculated results were compared with vertical forces measured on a wave flume model, which showed that the mathematical model accurately rendered wave/force transfer function variations with changing wave period. Some discrepancies occurred in the short period range, but it is hoped to clear these by closer consideration of the free surface.

An overall mathematical model based on simple formulation and a few preliminary model tests also gave very satisfactory results in this connection. Thus, a whole range of research facilities are now available for the various design stages for this type of structure, by means of which both local and overall wave forces and motion can be determined.