

## 2èmes JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE

13 au 15 Février 1989 - Nantes

---

**UN EXEMPLE D'UTILISATION DES RESULTATS  
D'UN CALCUL DE COMPORTEMENT SUR HOULE REGULIERE  
DANS UN CALCUL DE STRUCTURE  
L'INTERFACE HYDRO-STRUCTURE**

**F.TEISSIER, Ph.GARBAY**

**BUREAU VERITAS - BRANCHE MARINE**

### **RESUME**

A partir des résultats d'un programme de diffraction-radiation tridimensionnel sur houle régulière. (CANARI issu d'AQUADYN-ENSM), une méthode est proposée pour générer le chargement du modèle de structure d'un corps flottant. Ce chargement prend en compte de manière quasistatique les effets d'origine dynamique suivants : inertie, rappel hydrostatique, houle incidente, diffraction, radiation, amortissement visqueux.

Quelques exemples d'applications sont présentés pour illustrer la méthode.

### **ABSTRACT**

A method allowing the calculation of loads, for a finite element program, applied to the structural model of a floating body, submitted to a regular wave action is presented.

This method uses the results of a 3D diffraction-radiation program on regular sea (CANARI developed from AQUADYN-ENSM).

The generated loads take into account, in a quasistatic way, the following dynamical effects : inertia, hydrostatic restoring force, incident wave, diffraction, radiation, viscous damping.

Some examples are presented to illustrate the method.

## 0 INTRODUCTION

Le calcul d'un chargement de modèle de structure à partir des résultats d'un programme de diffraction-radiation 3D est un sujet sur lequel le Bureau Veritas travaille depuis plusieurs années, notamment pour compléter la chaîne de calcul PRISCA utilisée pour l'évaluation des efforts sur les plateformes semi-submersibles.

Les idées de départ ont pu être concrétisées lors d'un calcul de projet de remorquage de grand jacket sur barge dans le cadre d'une fiche CEP&M. La méthode a ensuite été développée jusqu'à un état opérationnel.

Cet article expose la méthode utilisée actuellement pour générer les chargements ainsi que les difficultés que l'on peut rencontrer dans son application. Quelques exemples d'applications sont ensuite brièvement cités.

L'interface hydro-structure utilise, dans la partie hydrodynamique, les principaux résultats d'un calcul de comportement sur houle régulière classique à savoir :

- . densités de doublets de diffraction et de radiation
- . masses ajoutées, amortissements potentiels, forces d'excitation
- . matrice de raideur hydrostatique
- . mouvements du centre de gravité

On notera que la nature des singularités (doublets) est uniquement liée à la méthode utilisée dans le programme de diffraction-radiation, le même principe pourrait être appliqué avec des sources.

La méthode peut être appliquée avec deux modèles distincts (de structure et hydrodynamique).

## I PRESENTATION THEORIQUE

### 1) hypothèses

#### 1.1) hypothèses hydrodynamiques

- . fluide incompressible, non visqueux
- . écoulement irrotationnel
- . houle incidente de faible cambrure
- . mouvements de faible amplitude par rapport à l'amplitude de la houle autour de la position d'équilibre au repos

#### 1.2) hypothèses "éléments finis"

- . linéarité du comportement du matériau (domaine élastique)
- . petites déformations sous l'effet des charges

NB: l'écoulement est calculé autour du corps supposé indéformable, il n'est donc pas tenu compte de déformations locales ou d'ensemble.

### 2) définition des effets pris en compte

Dans ce qui suit, un effet  $E$  s'exprime comme la somme d'une composante en phase avec la houle et d'une composante en quadrature avec la houle (pulsation  $\omega$ ) :

$$E = E' \cos \omega t + E'' \sin \omega t$$

L'équation générale du mouvement harmonique d'un corps autour de son centre de gravité, soumis à l'action d'une houle régulière de pulsation  $\omega$  s'écrit :

$$(M + M_a) \ddot{X} + B_w \dot{X} + B_v |\dot{X}| \dot{X} + (K + K_{cl}) X = T \quad (1)$$

avec :

- X : vecteur déplacement du centre de gravité
- M : matrice d'inertie propre du corps
- M<sub>a</sub> : matrice de masse d'eau ajoutée à la pulsation  $\omega$
- B<sub>w</sub> : matrice d'amortissement de radiation à la pulsation  $\omega$
- B<sub>v</sub> : matrice d'amortissement visqueux quadratique
- K : matrice de rappel hydrostatique correspondant à la surface de flottaison décrite par le corps
- K<sub>cl</sub> : matrice de correction de raideur hydrostatique prenant en compte la perte de stabilité par effet de carène liquide
- T : vecteur d'efforts d'excitation (incidents + diffractés)

( $\dot{X}$ ) signifie : dérivation de X par rapport au temps.

L'équation (1) peut être réécrite de la manière suivante :

$$0 = -M\ddot{X} - KX - K_{cl}X - M_a\ddot{X} - B_w\dot{X} + T - B_v|\dot{X}|\dot{X} \quad (2)$$

efforts :    inertiels hydrostatiques            hydrodynamiques

Les chargements calculés comprendront les 7 effets du membre de gauche de (2) et doivent donner une résultante nulle au centre de gravité du corps.

### 3) calcul du chargement

#### 3.1) définitions préliminaires

Le repère de référence est noté :

$$R = (O, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$$

avec O situé au niveau de la surface libre au repos,  $\bar{z}$  vertical ascendant .

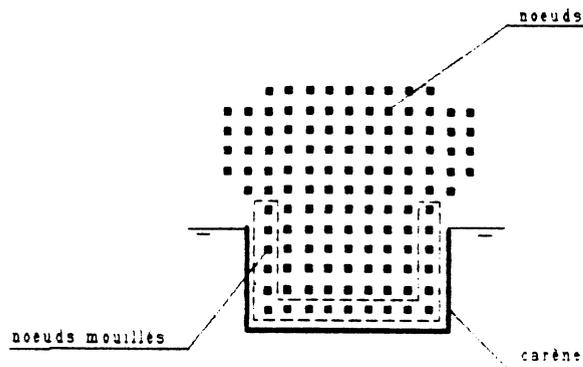
Le corps étudié, modélisé en éléments finis, peut être considéré comme un ensemble de noeuds répartis au-dessus et au-dessous de la surface libre et affectés d'une masse.

Cet ensemble est soumis à deux types d'efforts :

- .les efforts d'inertie dus au mouvement du corps autour de son centre de gravité

- .les efforts appliqués à la carène (houle incidente, diffraction, radiation, rappel hydrostatique, amortissement visqueux)

C'est pourquoi les noeuds sur lesquels sont projetés les efforts de la carène sont distingués et sont nommés noeuds mouillés, par opposition à ceux qui ne subissent que les efforts d'inertie.



Soit  $N$  le nombre de noeuds du modèle de structure affectés d'une masse ( $m_i$ ).

Soit  $V$  le volume du corps,  $M$  sa masse,

On a :

$$M = \iiint_V dm = \sum_{i=1}^N m_i$$

On définit le vecteur rotation autour du centre de gravité ( $G$ ) :

$$\vec{\Omega} = (\theta_x, \theta_y, \theta_z)$$

ainsi que le vecteur déplacement en translation de  $G$  :

$$\vec{\Delta}_M = (X_G, Y_G, Z_G)$$

Le vecteur déplacement d'un point  $P$  du corps s'écrit :

$$\vec{\Delta}_P = \vec{\Delta}_G + \vec{\Omega} \wedge \vec{GP}$$

### 3.2) efforts d'inertie

#### a) forme globale

Soit  $M$  un point courant du corps, de masse  $dm$  et d'accélération  $\vec{y}$ . on peut écrire :

$$M \ddot{X}_{i-1,3} = \iiint_V \vec{y} dm$$

$$M \ddot{X}_{i-4,6} = \iiint_V (\vec{GM} \wedge \vec{y}) dm$$

#### b) forme discrète

Soit  $P$  un point du modèle de masse  $m_p$

la force d'inertie appliquée à  $P$  s'exprime :

$$\vec{F}_{INE} = -m_p \omega^2 \vec{\Delta}_P$$

A cet effort vient s'ajouter l'effet de la projection de la gravité due au roulis et au tangage :

$$\vec{F}_{INC} = (-m_p g \sin \theta_x, m_p g \sin \theta_y, 0)$$

En sommant sur l'ensemble des noeuds du modèle on obtient :

$$M \ddot{X}_{i-1,3} = \left( \sum_{n=1}^N (\vec{F}_{INE} + \vec{F}_{INC})_n \right)_{i=1,3}$$

$$M \ddot{X}_{i-4,6} = \left( \sum_{n=1}^N \vec{GP}_n \wedge (\vec{F}_{INE} + \vec{F}_{INC})_n \right)_{i=1,3}$$

### 3.3) Efforts appliqués à la carène

#### 3.3.1) notations

Soit une facette quelconque de la carène discétisée ( $F$  facettes), elle est caractérisée par :

- un centre de facette  $M$  de coordonnées  $(x_M, y_M, z_M)$
- une normale  $\vec{n}$  dirigée vers l'extérieur du corps
- une surface  $S_M$

Les pressions sont constantes sur chaque facette.

Le déplacement absolu du centre de la facette courante est noté :

$$\vec{\Delta}_M = (X_M, Y_M, Z_M)$$

### 3.3.2) efforts hydrostatiques

#### a) forme globale

Soit K la matrice de raideur hydrostatique initiale du corps

-  $\vec{n}$  : normale de l'élément de surface dS au point M, point courant de la carène  $\Sigma$ ,

-  $p_H$  : pression hydrostatique s'exerçant sur dS

On peut écrire :

$$K X_{i-1,3} = - \int_{\Sigma} \int p_H \vec{n} dS$$

$$K X_{i-4,6} = - \int_{\Sigma} \int p_H (\overline{GM} \wedge \vec{n}) dS$$

#### b) forme discrète

Soit une facette de la carène, on distingue la pression hydrostatique s'exerçant sur elle lorsque le corps se trouve à sa position d'équilibre au repos, s'exprimant :

$$p_{HS} = -\rho g z_M$$

avec :

- $z_M$  : enfoncement du centre de la facette
- $\rho$  : masse volumique de l'eau
- $g$  : accélération de la pesanteur

et la pression hydrostatique due à l'enfoncement local de la facette au cours du mouvement du corps s'exprimant de la manière suivante : soit le déplacement vertical du centre de facette :

$$\vec{\Delta}_M \cdot \vec{z} = \vec{z}_G \cdot \vec{z} + (\vec{\Omega} \wedge \overline{GM}) \cdot \vec{z}$$

en posant :

$$G = (x_G, y_G, z_G)$$

$$\overline{GM} = (x_M - x_G, y_M - y_G, z_M - z_G)$$

$$Z_M = Z_G + \theta_X (y_M - y_G) - \theta_Y (x_M - x_G)$$

donc :

$$p_{HSM} = -\rho g Z_M$$

$$p_{HSM} = -\rho g (Z_G + \theta_Y (x_M - x_G) - \theta_X (y_M - y_G))$$

La forme globale s'écrit donc :

$$K X_{j-1,3} = - \left( \sum_{k=1}^F (p_{HSM})_k S_k n_j \right)_{j=1,3}$$

$$KX_{j-4,6} = - \left( \sum_{k=1}^F (P_{HS_M})_k S_k (\overline{GM} \wedge \vec{n})_j \right)_{j=1,3}$$

On remarquera que les poussées hydrostatiques calculées ci-dessus représentent seulement le rappel hydrostatique de la carène intacte c-à-d sans considérer les pertes de stabilité dues à la présence de ballasts (les mouvements autour du CDG ont toutefois été calculés avec la matrice de rappel hydrostatique corrigée).

Ces corrections sont prises en compte de la même manière que les effets d'amortissement visqueux (3.3.5).

### 3.3.3) efforts dus à la houle incidente et à la diffraction

#### a) forme globale

Soit  $p_I$  : pression sur la carène en un point courant M de surface dS et de normale extérieure  $\vec{n}$  de la houle incidente.

Soit  $p_D$  : pression sur la carène due à la diffraction du corps considéré comme fixe.

Le torseur  $T$  des efforts d'excitation peut s'écrire :

$$T_{i-1,3} = - \int \int_{\Gamma} (p_I + p_D) \vec{n} dS$$

$$T_{i-4,6} = - \int \int_{\Gamma} (p_I + p_D) (\overline{GM} \wedge \vec{n}) dS$$

#### b) forme discrète

L'expression du potentiel de la houle incidente en un point M est (houle d'Airy):

$$\phi_{iM} = - \frac{ag}{\omega} F(z_M) \cos[m_0(x_M \cos\psi + y_M \sin\psi) + \omega t]$$

on peut également écrire :

$$\phi_{iM} = \phi'_{iM} \cos\omega t + \phi''_{iM} \sin\omega t$$

en posant :

$$\phi'_{iM} = - \frac{ag}{\omega} F(z_M) \cos m_0(x_M \cos\psi + y_M \sin\psi)$$

$$\phi''_{iM} = - \frac{ag}{\omega} F(z_M) \sin m_0(x_M \cos\psi + y_M \sin\psi)$$

avec :

- a : amplitude de la houle
- $m_0$  : nombre d'onde solution de  $\text{moghthmoh} = w$
- $\psi$  : angle d'incidence de la houle

$$-k_0 = \frac{\omega^2}{g}$$

- en profondeur infinie :  $F(z_M) = e^{k_0 z_M}$

- en profondeur finie :  $F(z_M) = \frac{\text{ch} m_0(z_M + h)}{\text{ch}(m_0 h)}$

la pression due à la houle incidente s'écrit :

$$p_{IM} = -\rho \frac{\delta \phi_{IM}}{\delta t} = \rho \omega \dot{\phi}_{IM} \sin \omega t - \rho \omega \dot{\phi}_{IM}'' \cos \omega t$$

les efforts de diffraction sont estimés à l'aide des densités de doublets de diffraction calculées sur chaque facette courante par le programme de diffraction-radiation

pour une houle d'amplitude  $a$ , en  $M$ , on a :

$$\mu_{DM} = \mu_{DM}' \cos \omega t + \mu_{DM}'' \sin \omega t$$

$$a \mu_{EM} = -\phi_{DM}$$

$$p_{DM} = -\rho \frac{\delta \phi_{DM}}{\delta t} = a \rho \frac{\delta \mu_{DM}}{\delta t}$$

donc :

$$p_{DM} = a \rho \omega \mu_{DM}'' \cos \omega t - a \rho \omega \mu_{DM}' \sin \omega t$$

en recombinant les pressions de l'onde incidente et de l'onde diffractée on obtient :

$$p_{IDM} = -\rho \omega [(\dot{\phi}_{IM}'' - a \mu_{DM}'') \cos \omega t - (\dot{\phi}_{IM}' - a \mu_{DM}') \sin \omega t]$$

soit pour l'ensemble des facettes :

$$T_{i-1,3} = - \left( \sum_{k=1}^{\bar{E}} (p_{IDM})_k S_k n_j \right)_{i-1,3}$$

$$T_{i-4,6} = - \left( \sum_{k=1}^{\bar{E}} (p_{IDM})_k S_k (\overline{GM} \wedge \vec{n})_j \right)_{i-1,3}$$

### 3.3.4) efforts dus à la radiation

#### a) forme globale

On considère, dans ce type d'efforts, les efforts en phase avec l'accélération (masse ajoutée) et ceux en phase avec la vitesse (amortissement fluide parfait)

$$B_w \dot{X} + M_a \ddot{X}_{i-1,3} = - \left( \iint_{\Sigma} p_R \vec{n} dS \right)_{i-1,3}$$

$$B_w \dot{X} + M_a \ddot{X}_{i-4,6} = - \left( \iint_{\Sigma} p_R (\overline{GM} \wedge \vec{n}) dS \right)_{i-4,6}$$

#### b) forme discrète

Soit un mouvement dans la direction  $q$  :

$$A_q = A_q' \cos \omega t + A_q'' \sin \omega t$$

la vitesse correspondante s'écrit :

$$\dot{A}_q = \omega A_q'' \cos \omega t - \omega A_q' \sin \omega t$$

les doublets de radiation sont obtenus en posant :

$$\omega A_q^* = 0 \quad , \quad \omega A_q^{**} = 1$$

on écrit :

$$\mu_R^q = \mu_{1r}^q + \mu_{2r}^q$$

$$\mu_{1r}^q = \omega A_q^* (\mu_r^{q*} \cos \omega t + \mu_r^{q**} \sin \omega t)$$

en remplaçant  $\omega A_q^*$  par  $-\omega A_q^{**}$ , on obtient :

$$\mu_{2r}^q = -\omega A_q^* (\mu_r^{q*} \sin \omega t - \mu_r^{q**} \cos \omega t)$$

$$\mu_R^q = \omega [(A_q^{**} \mu_r^{q*} + A_q^* \mu_r^{q**}) \cos \omega t + (A_q^{**} \mu_r^{q**} - A_q^* \mu_r^{q*}) \sin \omega t]$$

donc, au centre de facette M :

$$P_{RM}^q = -\rho \frac{\delta \Phi_{RM}^q}{\delta t} \quad , \quad \Phi_{RM}^q = -\mu_{RM}^q$$

l'expression de la pression de radiation subie par la facette courante dans le mouvement numéro q d'amplitudes  $A_q^*$  et  $A_q^{**}$  du corps, a pour expression :

$$P_{RM}^q = -\rho \omega^2 [(\mu_{RM}^{q*} A_q^* - \mu_{RM}^{q**} A_q^{**}) \cos \omega t + (\mu_{RM}^{q*} A_q^{**} + \mu_{RM}^{q**} A_q^*) \sin \omega t]$$

soit pour l'ensemble des facettes :

$$(M_a \ddot{X} + B_w \dot{X})_{j=1,3} = - \left( \sum_{k=1}^F \left( \sum_{q=1}^6 P_M^q \right)_k S_k n_j \right)_{j=1,3}$$

$$(M_a \ddot{X} + B_w \dot{X})_{j=4,6} = - \left( \sum_{k=1}^F \left( \sum_{q=1}^6 P_M^q \right)_k S_k (\overline{GM} \wedge \bar{n})_j \right)_{j=1,3}$$

### 3.3.5) efforts dus à l'amortissement visqueux (et aux pertes de stabilité par effet de carène liquide)

#### a) forme globale

Nous considérerons, dans ce paragraphe, la présence d'un amortissement visqueux quadratique et/ou d'une diminution de hauteur métacentrique due à la présence de ballasts.

Ces effets ne sont, dans l'état actuel de notre programmation, pris en compte que pour le cas du roulis (rotation autour de l'axe x).

L'expression de ces effets est :

$$- B_v |\dot{\theta}_x| \dot{\theta}_x = \omega^2 B_v |\theta_x| \theta_x$$

$$- \rho_{cl} g V \theta_x$$

avec V : volume de carène

$\rho_{cl}$  : correction du GM transversal

on peut écrire :

$$(B_v \dot{X} - K_{11} X)_{i-4, j-4} = - \left( \int \int_{\Sigma} (p_v + p_{cl}) (\overline{GM} \wedge \vec{n}) dS \right)_{i-1}$$

$p_v$ ,  $p_{cl}$  étant les pressions (présentes simultanément ou non) dont la répartition produit un moment autour de l'axe  $x$  égal soit au couple d'amortissement soit au couple de chavirement.

Dans le cas du moment de chavirement, il serait plus rigoureux de localiser la zone d'application à l'endroit des ballasts et non sur la totalité de la carène comme pour le moment d'origine visqueuse.

### b) forme discrète

Afin d'éviter les contributions de pression sur des bordés inclinés, produisant une résultante horizontale non nulle, on se limite à la projection verticale des pressions.

Dans la suite,  $p_M$  désignera indifféremment la pression d'origine visqueuse ou "hydrostatique" en  $M$ .

Soit :

$$\vec{F}_M = -p_M \vec{n} S_M$$

en ne considérant que la projection verticale de la force  $F$ , on obtient :

$$\vec{F}_{Mz} = -p_M S_M (\vec{n} \cdot \vec{z}) \vec{z}$$

$$\vec{n} \cdot \vec{z} = r$$

$$\vec{F}_{Mz} = -p_M S_M r \vec{z}$$

le moment généré vaut :

$$(\vec{m}_{/G})_M = -p_M S_M r (\overline{GM} \wedge \vec{z})$$

pour traiter le cas de la rotation autour de l'axe longitudinal on se restreint à la première composante de ce moment :  $m_{Mx}$  (le moment autour de l'axe transversal - tangage - est négligé).

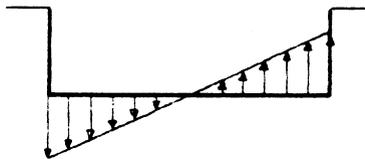
On a :

$$m_{Mx} = -p_M S_M r (y_M - y_G)$$

On se donne une répartition de pression linéaire en  $y$  :

$$p_M(y) = r(y_M - y_G) Cte$$

schéma du diagramme de pression



alors

$$m_{Mx} = -r^2 S_M Cte (y_M - y_G)^2$$

dans le cas où les deux effets sont simultanés, le moment doit respecter l'égalité suivante :

$$\sum_{k=1}^F (m_{MX})_k = \omega^2 B_v |\theta_X| \theta_X + \rho_{cl} g V \theta_X$$

ce qui permet d'évaluer la constante :

$$\sum_{k=1}^F (m_{MX})_k = -Cte \sum_{k=1}^F (r^2 S_M (y_M - y_G)^2)_k$$

$$Cte = \frac{\omega^2 B_v |\theta_X| \theta_X + \rho_{cl} g V \theta_X}{\sum_{k=1}^F (r^2 S_M (y_M - y_G)^2)_k}$$

l'expression de la force s'obtient en reportant la constante trouvée soit :

$$\vec{F}_{Mz} = -r^2 S_M (y_M - y_G) \left( \frac{\omega^2 B_v |\theta_X| \theta_X + \rho_{cl} g V \theta_X}{\sum_{k=1}^F (r^2 S_M (y_M - y_G)^2)_k} \right) \vec{z}$$

La forme globale s'écrit donc :

$$(B_v \dot{X} + K_{cl} X)_{i-4, j-4} = - \sum_{k=1}^F (\overline{GM} \wedge \vec{F}_{Mz})_k$$

## II MISE EN OEUVRE DE LA METHODE

Pour calculer le chargement, 3 phases ont été identifiées:

- a) lecture dans le modèle de structure des coordonnées des noeuds et masses associées, calcul du CDG du corps, calcul des inerties.
- b) attribution, pour les noeuds mouillés, des facettes de la carène discrétisée.
- c) calcul des efforts.

### 1) détermination de la position du CDG

Cette étape est en réalité d'une grande importance dans le cours du calcul, car elle permet de vérifier et éventuellement de corriger la position du centre de gravité.

On peut considérer qu'il existe 4 centres de gravité :

- celui calculé à partir du devis de poids,
- celui du modèle de structure,
- celui du modèle hydrodynamique
- et bien sûr, le centre de gravité réel !

NB : le modèle hydrodynamique détermine seulement les coordonnées du CDG dans le plan XOY.

Dans la majorité des cas, le CDG issu du devis de poids sera considéré comme une position de référence.

Il importe donc, d'obtenir pour le modèle de structure, une position aussi proche que possible de la valeur de référence, ce qui est souvent difficile du fait des approximations liées à la nature du modèle de structure :

- répartition de masse à partir d'un ensemble de d'éléments de type membrane
- répartition de masse à partir d'un modèle constitué de barres (en général moins fin que le précédent).

Cette première étape réalisée, la recherche de l'équilibre statique du flotteur peut être abordée :

- recherche de la position de la carène (tirant d'eau, assiette, gîte) donnant un centre de carène situé à la verticale du CDG.

NB : ceci oblige à effectuer un changement de repère pour le modèle de structure (rotations)

- modification, par déplacement de masse (ballast) de la position du CDG du modèle structure pour le placer au dessus du centre de carène.

En pratique, la superposition des CDG des modèles hydrodynamique et structure est cherchée avec une tolérance de l'ordre du millimètre.

La conséquence d'un écart trop important est de générer un chargement non équilibré et donc de faire apparaître des zones de concentrations de contraintes erronées.

Un résultat annexe important de cette phase est de fournir la matrice de masse complète du corps contenant les produits d'inertie souvent difficiles à calculer.

## 2) attribution facettes/noeuds mouillés

Les efforts appliqués à la carène sont des pressions sur chaque facette.

La projection de ce champ de pressions connu de manière discrète, sur les noeuds de la structure, s'effectue de la manière suivante :

- calcul de la résultante des pressions au centre de la facette
- projection de la résultante

a) soit sur le noeud structure le plus proche

Soit  $\vec{F}$  la force résultante des effets pris en compte,

Le torseur appliqué au noeud N s'écrit :

$$\overrightarrow{Tor}_{i-1,3} = \vec{F}$$

$$\overrightarrow{Tor}_{i-4,6} = \overrightarrow{MN} \wedge \vec{F}$$

On obtient ainsi un chargement constitué de 3 forces et 3 moments en 1 noeud.

b) soit sur les trois noeuds structure non alignés les plus proches

Soit M le centre de la facette courante,

soient les trois noeuds structure sélectionnés :

$$N_1, N_2, N_3$$

soient les 3 forces appliquées en ces noeuds :

$$\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$$

on recherche des pondérations  $p_i$  telles que :

$$\sum_{i=1}^3 p_i \vec{F}_i = \vec{F} \Rightarrow \sum_{i=1}^3 p_i = 1$$

$$\sum_{i=1}^3 p_i \overline{N_i M} \wedge \vec{F} = \vec{0}$$

On obtient ainsi un chargement constitué de 3 forces en 3 noeuds.

Remarques : 1) Le choix entre les deux options s'effectue en considérant quel est le type d'éléments du modèle de structure à charger : dans le cas de membranes ou plaques, il sera préférable de projeter sur 3 noeuds, et dans le cas de poutres, seule la projection sur 1 noeud sera possible.

2) pour pallier à une trop grande différence de finesse entre les maillages hydrodynamique et de structure, il est possible de définir à partir des facettes du modèle hydrodynamique, des sous-facettes permettant une meilleure répartition des charges.

### 3) calcul du chargement

Les différents types d'efforts rencontrés sont des pressions sur les facettes (à l'exception des efforts d'inertie). Toutes les pressions sont cumulées, pour une facette donnée et projetées sur le modèle de structure.

Chaque couple période/incidence de houle donne lieu au calcul d'un chargement en phase avec la houle (\*) et en quadrature avec la houle (\*\*).

Le chargement hydrostatique au repos est généré par le programme.

L'étape finale du calcul consiste à vérifier la qualité des résultats en recalculant le torseur total au CDG suivant deux méthodes :

. cumul au CDG des chargements générés par l'interface

. calcul des composantes globales des différents effets à

l'aide des matrices citées en (1)

ceci permet d'apprécier rapidement :

. pour chaque composante, l'écart de la sommation discrète par rapport à la valeur globale théorique.

. le cumul total de tous les effets c-à-d la précision avec laquelle la nullité du torseur total au CDG est atteinte.

Remarque : le résidu des moments en roulis et tangage qui apparaît après cumul des efforts au CDG, provient en grande partie d'une différence entre les torseurs hydrostatiques calculés d'une part par l'interface hydro-structure (cumul des efforts élémentaires), d'autre part en utilisant la matrice de raideur hydrostatique calculée par le programme de diffraction-radiation.

Cet écart trouve sa justification dans le fait que le calcul des hauteurs métacentriques repose sur l'hypothèse que le flotteur tourne autour de son centre de surface de flottaison alors que les chargements sont générés par un mouvement autour du CDG du corps.

On peut remédier à cet écart en corrigeant la matrice K (ou au moins les termes  $K_{44}$  et  $K_{55}$ ), de façon à ce que les mouvements du flotteur soient calculés avec des coefficients de raideur tels que l'on ait bien :

$$KX = \Sigma(\text{moments induits par efforts élémentaires})$$

#### 4) aspects informatiques et numériques

L'interface hydro-structure est constituée de 3 programmes : IHSLECG, IHS1Z, IHS2Z reprenant les étapes décrites ci-dessus.

Les temps de calcul constatés sur IBM 9370 (1.14 MIPS) sont de l'ordre de quelques centaines de secondes CPU en tout pour des modèles de structure de quelques milliers de noeuds associés à des modèles hydrodynamiques de quelques centaines de facettes.

Le calcul est effectué en simple précision IBM, nous montrerons dans les exemples, que les réactions aux appuis, après passage du calcul de structure, sont d'un ordre de grandeur acceptable. Pour le calcul proprement dit la double précision ne s'impose donc pas en l'état actuel de l'interface, par contre, elle pourrait être envisagée au cours de la vérification (transport des torseurs au CDG).

#### 5) exploitation des résultats

Le chargement généré est exploité en calculant par le programme de structure la combinaison suivante :

$$\bar{F}_{TOT} = M\bar{g} + \bar{F}_{HYDROSTATIQUE} + \bar{F}_{IHS}' \cos \phi + \bar{F}_{IHS}'' \sin \phi$$

$\phi$  variant de 0° à 360° par pas intermédiaires.

Le cas de charge donnant la combinaison la plus défavorable est sélectionné parmi les cas intermédiaires donnés ci-dessus.

#### 6) Exemples d'applications

##### 6.1) Etude d'un remorquage de grand jacket sur barge

Caractéristiques générales :

barge	: longueur	: 310 mètres
	largeur	: 61 mètres
	creux	: 16 mètres
	tirant d'eau	: 7 mètres
	déplacement	: 131800 tonnes
jacket	: longueur	: 375 mètres
	embase au pied	: 80 mètres
	poids	: 26700 tonnes

Caractéristiques du modèle de structure (GIFTS + STRUDL):

nombre d'éléments : 5768  
nombre de noeuds : 3844

Caractéristiques du modèle hydrodynamique :

nombre de facettes : 480

La planche I présente une vue du modèle de structure ainsi que des visualisations de chargement obtenus par l'interface pour une des carlingues de la barge (cas phase et quadrature), le fond de la barge, un plan transversal du jacket.

##### 6.2) Etude d'un remorquage de travée de pont sur barge

Caractéristiques générales :

barges	: longueur	: 91.44 mètres
	largeur	: 30.50 mètres
	creux	: 7.62 mètres
travée	: longueur	: 144 mètres
	poids	: 12000 tonnes
	distance entre barges	: 69.50 mètres

Caractéristiques du modèle de structure (STRUDL):  
 nombre d'éléments : 566  
 nombre de noeuds : 369  
 Caractéristiques du modèle hydrodynamique :  
 nombre de facettes : 224 par barge

La planche II présente une vue des deux modèles dans leur positions respectives. Le tableau de chiffres représente une sortie de IHS2Z permettant de vérifier en partie la validité du calcul : valeur des différents torseurs au CDG, valeur théorique, écart relatif. Ce tableau montre les ordres de grandeurs respectifs des composantes du chargement ainsi que celui du cumul total qui doit être théoriquement nul.

A titre de comparaison il est indiqué, dans les lignes TOTVER, les résidus obtenus en sommant les valeurs globales des différents torseurs. On constate que, si il existe une différence notable entre les deux cumuls -TOT1 et TOTVER-, les ordres de grandeur des résidus obtenus par cumul sont au moins 100 fois plus petits que ceux des différentes composantes. L'équilibrage du chargement semble donc satisfaisant.

Pour un même cas de calcul, (T=6.54 s, mer de travers, phase (\*)), les résultats de vérification sont présentés avant et après correction des termes  $K_{44}$  et  $K_{55}$  de la matrice de raideur hydrostatique.

Valeurs initiales (calcul CANARI) :

$$K_{44} = 0.141109 \cdot 10^{12} \text{ N.m.rad}^{-1}$$

$$K_{55} = 0.356992 \cdot 10^{11} \text{ N.m.rad}^{-1}$$

Valeurs corrigées (IHS) :

$$K_{44} = 0.140988 \cdot 10^{12} \text{ N.m.rad}^{-1}$$

$$K_{55} = 0.356013 \cdot 10^{11} \text{ N.m.rad}^{-1}$$

Soit une variation relative maxi de 0.9% .

On remarquera que le terme du moment autour de X (roulis) a un résidu (ligne TOT1 OU TOT2) qui est passé de  $0.674 \cdot 10^06$  à  $0.124 \cdot 10^05$ , ce qui améliore l'équilibrage du chargement.

Les réactions recueillies aux appuis du modèle de structure après calcul, sont de l'ordre de 2 tonnes.

### III CONCLUSION

L'interface hydro-structure permet une approche fine des efforts induits par une houle régulière sur une structure. Que ce soit au cours d'un avant-projet, ou d'une étude approfondie, un calcul rapide de chargement peut être réalisé prenant en compte les phénomènes au premier ordre dus à l'action de la houle.

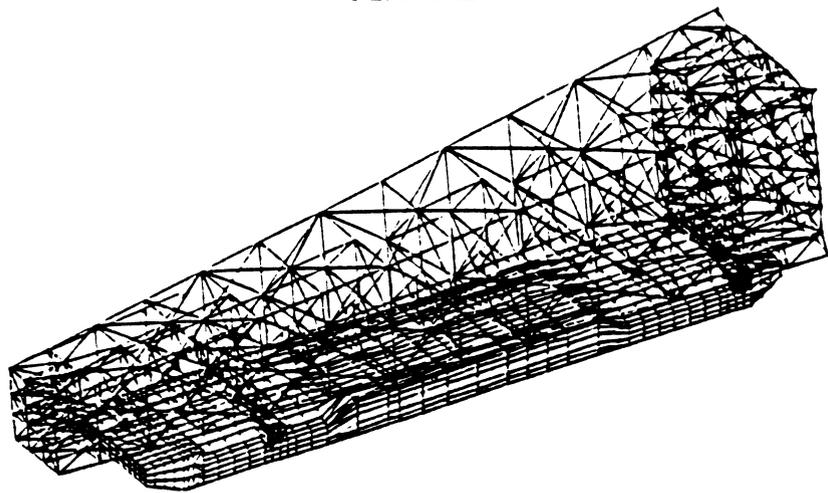
Les applications de ce programme peuvent donc être nombreuses, et le seront d'autant plus que les calculs hydrodynamiques situés en amont s'effectueront avec une rapidité et une facilité accrues.

Toutefois, il convient de rappeler que la partie "structure" du calcul nécessite le volume de travail le plus considérable que ce soit au niveau de la réalisation du modèle, ou du dépouillement des résultats (un chargement de l'interface induit un dizaine de cas de charge).

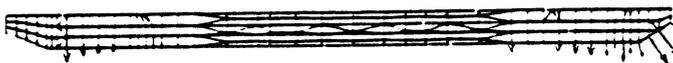
L'établissement de la fonction de transfert d'une contrainte en un point de la structure conduira donc à un volume de calcul important. C'est pourquoi, dans un premier temps, on préférera procéder à un étude de comportement sur houle régulière équivalente, plutôt qu'à une étude spectrale court terme ou long terme.

### REFERENCES

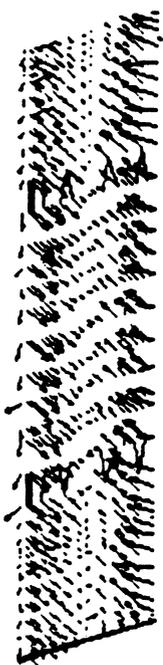
- Les problèmes de diffraction-radiation et de résistance de vague  
Etude théorique et résolution numérique par la méthode des singularités G.Delhommeau 1987
- Interface Hydro-structure . Développements, Applications  
Stage ENSM 1988 S.Ricard



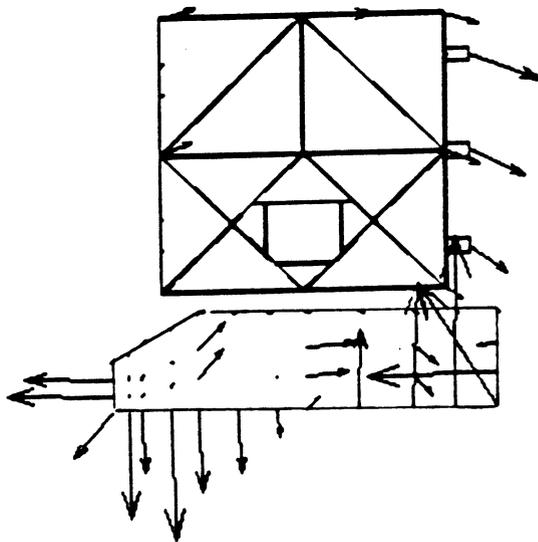
chargement d'une carlingue de barge (mer de face phase et quadrature)



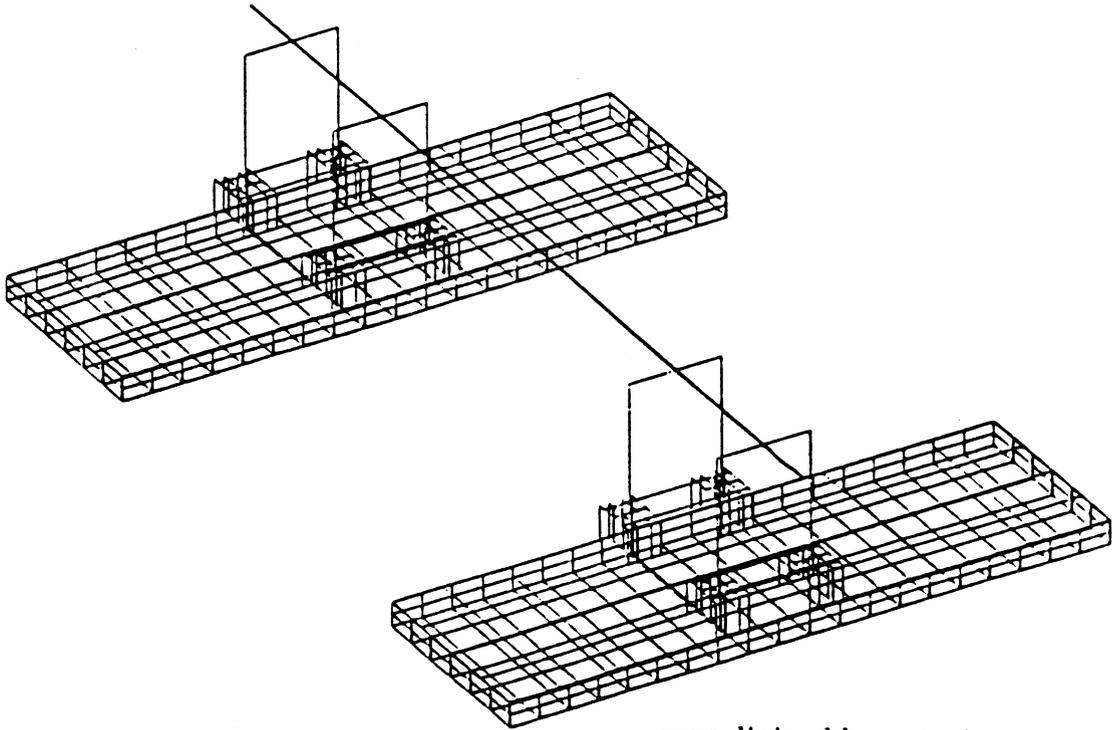
chargement du fond de la barge (mer de travers)



chargement d'un plan transversal de jacket (mer de travers)



## PLANCHE II



avec l'aimable autorisation de BOUYGUES

sortie de vérification de IHS2Z

INCIDENCE 90.00 DEGRES PERIODE : 6.54 S AMPLITUDE : 1.00 M  
AVANT CORRECTION

	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
HYDRODYN*	0.239E+01	0.334E+07	0.229E+07	0.553E+09	-0.424E+03	-0.457E+06
VERIF *	0.279E+01	0.334E+07	0.229E+07	0.553E+09	-0.567E+03	-0.457E+06
ERREUR *	17.10 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	33.58 %	0.02 %
HYDROSTA*	0.364E+01	0.114E+07	-0.351E+07	-0.774E+09	0.421E+03	-0.183E+03
VERIF *	0.000E+00	0.000E+00	-0.351E+07	-0.774E+09	0.749E+03	0.000E+00
ERREUR *	99.99 %	99.99 %	0.00 %	0.09 %	78.10 %	99.99 %
INERTIE *	-0.646E+01	-0.448E+07	0.122E+07	0.221E+09	-0.690E+03	0.455E+06
VERIF *	-0.279E+01	-0.334E+07	0.122E+07	0.221E+09	-0.183E+03	0.457E+06
ERREUR *	56.71 %	25.42 %	0.00 %	0.00 %	73.50 %	0.40 %
CORRECTI*	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
VERIF *	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
ERREUR *	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
TOT1. *	0.915E+00	0.135E+02	-0.256E+02	0.574E+06	-0.693E+03	-0.213E+04
TOT2 *	0.915E+00	0.135E+02	-0.256E+02	0.578E+06	-0.625E+03	-0.196E+04
TOTVER. *	-0.114E-04	-0.100E+02	0.800E+01	-0.154E+04	0.000E+00	-0.100E+01

APRES CORRECTION

HYDRODYN*	0.264E+01	0.334E+07	0.229E+07	0.550E+09	-0.508E+03	-0.451E+06
VERIF *	0.283E+01	0.334E+07	0.229E+07	0.550E+09	-0.570E+03	-0.451E+06
ERREUR *	7.39 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	12.32 %	0.02 %
HYDROSTA*	0.365E+01	0.113E+07	-0.351E+07	-0.770E+09	0.389E+03	-0.166E+03
VERIF *	0.000E+00	0.000E+00	-0.351E+07	-0.770E+09	0.755E+03	0.000E+00
ERREUR *	99.99 %	99.99 %	0.00 %	0.00 %	94.35 %	99.99 %
INERTIE *	-0.648E+01	-0.447E+07	0.122E+07	0.220E+09	-0.680E+03	0.449E+06
VERIF *	-0.283E+01	-0.334E+07	0.122E+07	0.220E+09	-0.185E+03	0.451E+06
ERREUR *	56.30 %	25.33 %	0.00 %	0.00 %	72.81 %	0.41 %
CORRECTI*	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
VERIF *	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
ERREUR *	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
TOT1. *	0.938E+00	0.188E+01	-0.223E+02	0.124E+05	-0.799E+03	-0.210E+04
TOT2 *	0.938E+00	0.188E+01	-0.223E+02	0.111E+05	-0.531E+03	-0.186E+04
TOTVER. *	-0.153E-04	-0.500E+01	0.800E+01	-0.179E+04	-0.171E-02	0.110E+02