

10^{èmes} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

Nantes, 7, 8 et 9 mars 2005

ETUDE NUMERIQUE DU SLAMMING DE DIÈDRES OU DE CONES RIGIDES

NUMERICAL STUDY OF WATER ENTRY SIMULATION OF RIGID WEDGES AND CONES

C. MINCU^{*}, F. GROSJEAN^{}, V. BERTRAM^{**}**

^{*} A. T. M., BUCAREST, Roumanie

^{**} Laboratoire de Mécanique des Structures Navales,

E.N.S.I.E.T.A., 2 rue F. Verny, 29806 BREST Cedex 9

Résumé

Le but de ce travail est d'étudier numériquement la pénétration violente d'un navire dans l'eau. Pour réaliser cette approche, nous utilisons le code commercial FLUENT qui résout les équations Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANSE) par la méthode des volumes finis. Pour simplifier le problème, des dièdres 2d et des cônes rigides sont choisis. Nous comparons les résultats à ceux obtenus expérimentalement et numériquement par CASTEM qui utilise la méthode des éléments finis [1]. Les simulations sont menées avec des corps fixes, un maillage fixe, le mouvement est généré par l'entrée de l'eau. L'interface est gérée grâce à la méthode VOF (Volum of Fluid) [2]. Les premiers résultats sur le dièdre sont encourageants. Pour comparer à des résultats expérimentaux [1], nous testons également le cas des cônes rigides, une étude paramétrique suivant le maillage et le pas de temps montre une grande sensibilité de la pression d'impact. La définition de ces deux paramètres par l'étude systématique en cours devrait permettre un choix raisonnable.

Summary

This paper describes a study about a violent entry (slamming) of a 2-d body in water, using a numerical approach. The two-phase simulations were realized with the commercial RANSE (Reynolds-averaged Navier-Stokes equation) solver Fluent based on the finite volume method. Results are compared to experiments and other numerical results based on a finite-element method [1]. The simulations in time domain use a body fixed grid with a surface capturing technique to capture the intersection between air and water in a Volume of Fluid Method (VOF) approach [2]. First results with rigid wedges are satisfying. To compare numerical results to experimental ones [1], we use rigid cones. The impact pressure is very sensitive to the grid and the time step. Work do define these two parameters is in progress.

I-INTRODUCTION

Un navire est soumis à de nombreux types d'efforts, ceux notamment causés par l'interaction entre le fluide et la structure comme le tossage ou « slamming » qui se produit lorsque la coque sort de l'eau et retombe en créant un impact à la surface. Ces impacts créent des efforts importants dans la structure et sont fonctions de la forme de la carène, de l'angle d'impact, etc... La prédiction de ces efforts est un problème très complexe mais important, car la carène peut être déformée, par exemple lorsque la fréquence des impacts est égale à la fréquence propre de la structure ou progressivement par fatigue.

Avant d'étudier le cas complexe d'une carène réelle, différentes études ont été menées expérimentalement ou numériquement sur des corps rigides de géométries simples. B. Donguy [1] a obtenu des résultats expérimentaux et numériques sur des dièdres et des cônes. Ces résultats numériques sont calculés grâce à un code d'éléments finis CASTEM, puis A. Constantinescu [3] a repris et modifié cette procédure avec le code ABAQUS. Ces deux codes commerciaux utilisent l'hypothèse des petits déplacements et supposent le fluide parfait.

Les équations du problème, en imposant les conditions précitées, sont:

- dans le fluide $\Delta\phi = 0$;
- sur le corps $\frac{\partial\phi}{\partial n} = \vec{u}_s \cdot \vec{n}$ - condition d'adhérence à la paroi;
- sur la surface libre

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \overrightarrow{grad\phi} \cdot \overrightarrow{grad\phi} + gh = 0$$
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \overrightarrow{grad\phi} \cdot \overrightarrow{gradh} - \frac{\partial\phi}{\partial z} = 0$$

avec:

- élévation de la surface libre
 $z = h(x, y, t)$;
- $h(x, y, 0) = 0$;
- $\phi(x, y, z, 0) = 0$;
- $\overrightarrow{grad\phi}(x, y, z, t) \rightarrow \vec{0}$ quand $(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \rightarrow \infty$

Pour l'étude expérimentale le dispositif était réalisé en utilisant deux capteurs à quartz ICP (Integrated Circuit Piezoelectric) qui transforment les forces qui sont appliquées en charges électriques.

Il est donc intéressant de voir, dans un premier temps, si un code de mécanique des fluides qui résout les équations RANSE donne des résultats comparables.

II-METHODE

Pour réaliser les simulations bi-phasiques dans le fluide, nous choisissons le code commercial de calcul RANSE, FLUENT qui résout les équations de Navier-Stokes en utilisant la méthode des volumes finis. Pour les études numériques, effectuées dans une première étape, nous avons utilisé des modèles simplifiés : dièdres et cônes en supposant que sont des corps rigides, le fluide est considéré comme incompressible.

Les équations de Navier-Stokes moyennées pour un écoulement turbulent incompressible exprimées avec les composantes u_i de la vitesse donnent :

$$\text{Equation de continuité : } \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\text{Equation de mouvement : } \rho \cdot \bar{u}_i \cdot \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i u_j} \right]$$

Le terme $\overline{\rho u_i u_j}$, où ρ est la masse volumique, représente les tensions de Reynolds, qui sont associées aux fluctuations tourbillonnaires de l'écoulement et elles s'ajoutent aux composantes moléculaires $\mu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}$, μ est la viscosité cinématique du fluide. A partir d'un nombre de Reynolds plus grand que 500 000 nous choisissons un modèle de turbulence k- ϵ . Ce modèle tient compte de la dissipation de l'énergie cinétique de l'écoulement cascadeant des grands tourbillons vers les petits tourbillons. Les équations de transfert pour k, énergie cinétique turbulente et, taux de dissipation, sont obtenues à partir des équations de Navier-Stokes, intégrées dans un intervalle de temps. La viscosité tourbillonnaire $\mu_{tourb.}$ est alors donnée par l'expression suivante:

$$\mu_{tour} = \rho \cdot \epsilon_m = \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k^2}{\epsilon}$$

et la diffusivité tourbillonnaire ϵ_h est donnée par :

$$\epsilon_h = \frac{\epsilon_m}{\sigma_t}, \quad \epsilon_m = \overline{u_i u_j}$$

Au niveau de la surface du dièdre ou du cône, une condition d'adhérence ($u=v=w=0$) est imposée. Pour l'écoulement turbulent d'un fluide incompressible, les équations de transport sur k et ϵ sont:

$$\frac{\partial(\bar{u} \cdot k)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v} \cdot k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\epsilon_m}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \epsilon_m \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 - \epsilon ;$$

$$\frac{\partial(\bar{u} \cdot \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v} \cdot \epsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\epsilon_m}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + C_1 \cdot \frac{\epsilon}{k} \epsilon_m \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} ;$$

où :

- C_μ, C_1, C_2 - constantes du modèle
- σ_t - nombre de Prandtl turbulent de la température
- σ_k - nombre de Prandtl turbulent de l'énergie k
- σ_ϵ - nombre de Prandtl turbulent de la fonction ϵ

Les valeurs recommandées sont :

$$C_\mu = 0,09 ; C_1 = 1,44 ; C_2 = 1,92 ; \sigma_t = 0,9 ; \sigma_k = 1,0 ; \sigma_\epsilon = 1,3$$

Les équations ci-dessus sont résolues simultanément avec les équations de l'écoulement. La solution k et ϵ permet d'estimer ϵ_h et ϵ_m utilisés dans les équations du mouvement. La solution des équations du mouvement génère les composantes de la vitesse apparaissant dans les termes convectifs des équations de transport k et ϵ .

La détermination de la surface libre utilise la méthode " Volume of Fluid Method (VOF) » [2] qui impose comme condition que les deux fluides ne se combinent pas. Chaque cellule a sa propre variable : la fraction de volume, fraction du fluide présent en chaque cellule. Dans toutes les cellules, la somme des fractions de volume de tous les fluides est égale à l'unité. On considère que :

$$f_\alpha = 0 - \text{la cellule ne contient pas ce fluide;} \\ f_\alpha = 1 - \text{la cellule contient seulement un fluide;}$$

$0 < f_{\alpha} < 1$ - la cellule contient les deux fluides;

et $\sum_{\alpha=1}^2 f_{\alpha} = 1$, où α représente le fluide (l'eau ou l'air) dans chaque cellule.

L'air et l'eau sont considérés comme un seul fluide avec la densité et la viscosité variable en fonction de la fraction de volume.

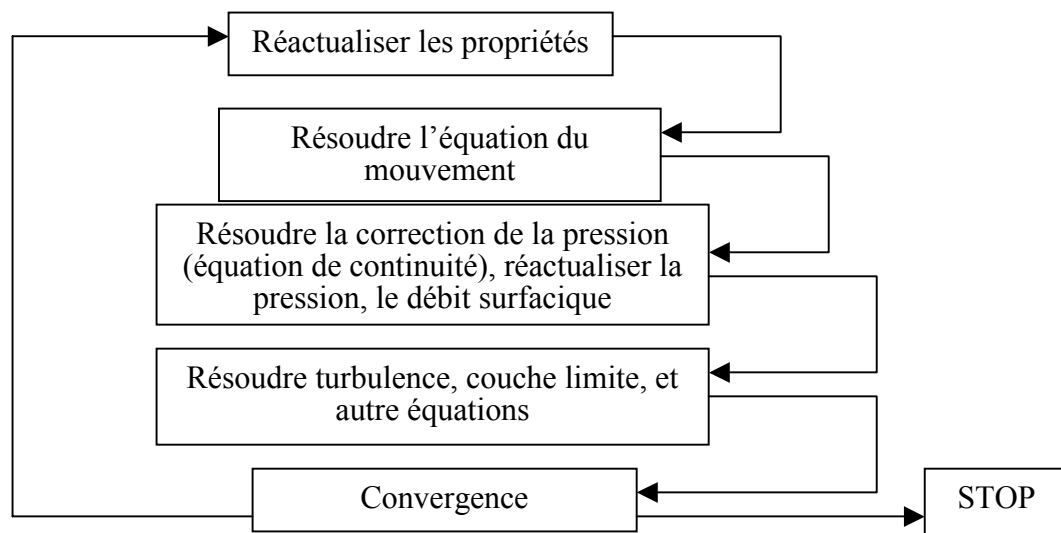
$$\begin{aligned} \rho &= f_{H_2O} \rho_{H_2O} + (1 - f_{H_2O}) \rho_{AIR}; & \text{or} & \quad \rho = \sum f_{\alpha} \rho_{\alpha}; \\ \mu &= f_{H_2O} \mu_{H_2O} + (1 - f_{H_2O}) \mu_{AIR}; & & \quad \mu = \sum f_{\alpha} \mu_{\alpha}; \end{aligned}$$

En plus des équations précédentes, une équation de transport pour la fraction de volume est résolue. Pour la représentation de l'interface des deux fluides nous choisissons la méthode « Geometric Reconstruction » qui utilise le schéma « piecewise-linear ». Dans un premier pas la position de l'interface est calculée au centre de chaque cellule qui n'est pas complètement remplie avec un seul fluide à partir de la fraction volumique obtenue dans chaque cellule, au pas précédent. Ensuite est calculé le flux de fluide qui traverse les faces pour prendre en compte la position de l'interface et la distribution des vitesses normales et tangentielles sur les faces. Enfin, la fraction volumique est calculée pour chaque cellule en employant l'équilibre des flux calculés auparavant.

Deux configurations bidimensionnelles simples sont choisies, celle du dièdre (figure 3) et celle du cône (figure 1). Le cône est représenté comme une section 2D ayant un axe de symétrie.

Pour modéliser le domaine de calcul nous avons choisi un domaine rectangulaire et nous avons fait une étude concernant les paramètres comme les dimensions, etc.. Le maillage est choisi structuré et la modélisation a été faite seulement pour un demi-objet en imposant l'axe comme condition limite. Nous avons serré les cellules dans la zone d'impact pour capter la couche limite et en même temps pour avoir des valeurs plus précises sur la pression le long du corps. La taille du domaine, après quelques essais, est choisie suffisamment grande pour ne pas influencer les résultats.

Tous les calculs sont faits en double précision avec des schémas au second ordre et par une méthode de calcul « segregated-implicit » qui résout les équations séquentiellement. Cette méthode est indiquée pour les calculs des écoulements incompressibles et bi-phasiques.



Les valeurs de pression sont enregistrées en imposant des capteurs dans deux points situés à 40 et 90 mm du sommet des corps (figure 2). 3 angles d'incidences sont étudiés, 6°, 10° et 14°. La vitesse de chute est constante, la masse ajoutée, est donc nulle. La plage des valeurs pour la vitesse est comprise entre 2,5 et 8 m/s. Nous changeons le système de référence en imposant un mouvement nul au dièdre ou cône et la vitesse est transférée au fluide.

L'étude est faite en regardant le changement des résultats en fonction des paramètres du calcul. Nous faisons varier le domaine, le maillage, les tailles de la couche limite (largeur et nombre de cellules, figure 5), la valeur des résidus, du pas de temps et le niveau de l'eau au départ.

Concernant la taille du domaine nous utilisons un domaine de 4,17 m en hauteur et 3,5 m en largeur discrétisé en cellules rectangulaires en utilisant un maillage structuré (70 000 à 350 000 cellules). Pour réaliser la couche limite nous choisissons « Boundary Layers » de GAMBIT (pre-processor de FLUENT) et l'épaisseur minimale utilisée est de 0.02 mm avec 8 ou 16 couches (figure 5). Les essais permettent de changer la valeur des résidus de 10^{-3} à 10^{-6} en même temps avec le pas de temps et le solveur double précision. Pour éviter des calculs inutiles, coûteux du point de vue du temps de calcul, pendant la période de la montée de l'eau nous avons essayé de partir avec le niveau de l'eau déjà proche du corps.

Comme conditions limites, le dièdre ou le cône sont des parois rigides. Pour l'axe de symétrie nous prenons dans le cas du dièdre « symmetry » et pour le cône « axis ». Nous considérons que l'eau monte et le corps reste fixe et pour imposer cette condition nous imposons une vitesse pour le fluide et pour la sortie de l'air : « pressure outlet ». Cette dernière condition extrapole les paramètres dans le domaine sur la frontière en imposant une différence nulle entre la pression dans la zone infiniment proche de la frontière et la pression à la frontière.

Tous les calculs sont faits en imposant la pression atmosphérique comme pression de référence.

III-RESULTATS

Plusieurs cas présentent un vif intérêt pour tester cette méthode. L'étude d'un dièdre rigide en deux dimensions, en chute avec une vitesse constante faible, permet de comparer les résultats numériques aux résultats théoriques [4]. L'étude d'un cône rigide est également choisie pour comparer les résultats numériques à ceux obtenus d'une part numériquement par l'approche solide grâce à des codes éléments finis et d'autre part expérimentalement [1]. Enfin nous utilisons cette méthode pour dimensionner le moyen d'essais qui sera monté très prochainement à l'ENSIETA.

III-1-DIEDRE 2D

La première forme étudiée est purement bidimensionnelle : le dièdre (figure 3). L'étude expérimentale pour cette forme n'a pas été réalisée et les valeurs obtenues sont comparées seulement avec les valeurs numériques données avec d'autres codes de calcul. Un premier calcul est réalisé pour une vitesse de 5 m/s, $Re = 9 \cdot 10^5$ et une conicité de 14. Pour le domaine nous avons utilisé un domaine 3,5m/4,2m; maillé avec un nombre des cellules compris entre 74 000 et 365 000. La couche limite est formée de 8 à 16 couches. Comme c'est un maillage structuré le nombre de cellules augmente proportionnellement avec le nombre de couches. Les calculs sont faits en double précision et pour un résidu inférieur à 10^{-3} ou 10^{-4} . Nous testons également le niveau de l'eau au départ mais ce paramètre, après plusieurs essais, n'a aucune influence. Les valeurs des pressions obtenues aux deux points sont presque identiques dans la plupart de ces tests. Mais, pour un pas de temps donné de $5 \cdot 10^{-4}$ s, nous observons que les seuls paramètres influents sont les paramètres de maillage.

Nous testons aussi ce calcul en laminaire et turbulent pour ce nombre de Reynolds

Pour le premier calcul nous avons un domaine de 365 000 cellules avec 16 cellules dans l'épaisseur de la couche limite pour un dièdre d'incidence 6° et pour une vitesse de 2,5 m/s ($Re = 4,5 \cdot 10^5$). On diminue les résidus de 10^{-3} à 10^{-5} mais les résultats sont inchangés.

Une étude analytique permet de donner un ordre de grandeur de la pression maximale et de la vitesse avec laquelle monte la surface de l'eau [4]. L'étude a été réalisée en supposant que la pression maximale est constante sur l'objet et que l'eau touche le cône/dièdre de la même façon (il n'y a pas de jet d'eau).

Pour la vitesse :

- $v_{dièdre} = \frac{\pi}{2} \frac{V}{\tan(\beta)}$
- $v_{cône} = \frac{4}{\pi} \frac{V}{\tan(\beta)}$

Pour la pression :

- $P_{\max} = \rho_{\text{fluide}} \frac{v_{dièdre_ou_cône}^2}{2}$

Comme les hypothèses imposées ne sont pas entièrement vérifiées, il y a des différences entre les valeurs obtenues analytiquement et numériquement. Pour la pression, la valeur analytique représente la moyenne de celles obtenues avec Fluent.

$$\text{Vitesse}_{\text{Fluent}} = 37,87\text{m/s}, \text{Vitesse}_{\text{Analytique}} = 37.34\text{m/s}$$

Pressions/Méthode	FLUENT	ABAQUS	CASTEM	Analytique
Point 1	6.48 bars	7.2 bars	4.5 bars	6.97 bars
Point 2	7.99 bars	6.9 bars	6.3 bars	6.97 bars

Pour le deuxième cas, nous faisons le calcul pour les valeurs extrêmes, dièdre avec incidence de 14° et une vitesse de chute de 8 m/s ($Re = 1,44 \cdot 10^6$ - turbulent). Le calcul est fait pour la même taille de domaine mais en utilisant un nombre total de cellules différent (140 000 cellules) avec la même distribution de cellules dans la couche limite. La pression obtenue analytiquement est de 12,67 bars. En comparaison avec les autres cas on peut observer une valeur de pression plus grande pour le premier point que pour le deuxième mais la différence reste assez faible.

Vitesse 8m/s Conicité 14°			
	Fluent	Abaqus	Castem
Point 1	11.38	13.1	12.4
Point 2	11.04	13.3	12.5

Numériquement, on constate que la valeur du deuxième pic est généralement supérieure à celle du premier pic. On observe que la valeur maximale de la pression ne s'obtient pas au moment du contact entre l'eau (figure 9) et le dièdre mais approximativement on peut dire que cette pression est obtenue quand le prolongement de la surface libre passe par ce point. Après le passage du maximum, la pression diminue lentement au fur et à mesure que le capteur s'enfonce et donc s'éloigne de la surface libre. Enfin, on constate une brusque chute de pression simultanément pour les deux capteurs (figure 8). A cet instant, la zone de formation du jet atteint le niveau du coin du corps et le dièdre est complètement immergé. Il y a un jet qui se développe dans l'air, de sorte que la pression sur le dièdre diminue brusquement.

III-2-CONE

Tous les essais expérimentaux ont comme objet d'étude le cône. Les essais numériques sont les mêmes qu'avec le dièdre, la seule différence porte sur la condition limite « axis » au lieu de « symmetry » (figure 1). Les modèles étudiés numériquement ont la même incidence, 6° mais la vitesse de chute est différente. Les premières valeurs de pression obtenues pour une vitesse de 2,5 m/s sont inférieures (figure 10) aux valeurs calculées avec les autres codes de calcul mais comparables aux résultats expérimentaux. Les vitesses entre les deux maximal de pression sont de 30,83m/s par Fluent et 30,28m/s analytiquement. La pression analytique donne une valeur de 4,58 bars.

Cône Conicité 6°/ Vitesse 2.5 m/s Pas de temps 10E-7		
Position	Point 1 (bar)	Point 2 (bar)
Fluent	2,36	3,80
Abaqus	4,77	4,85
Castem	4,0	4,0
Essais	2,3	3,0

Comme nous trouvons une instabilité en fonction du pas de temps et d'espace nous réalisons une étude sur ces paramètres. Nous procédons à une série d'essais en changeant un paramètre à chaque fois. Pour le changement en pas d'espace, comme le temps de calcul est très long, nous choisissons la manière la plus simple, proposée par FLUENT, en divisant le maillage seulement à l'endroit désiré. Avec « Adapt boundary » nous divisons successivement la longueur des cellules liées au cône par 2 (0,7 mm; 0,4 mm; 0,2 mm). L'épaisseur de la première la couche est de 0,1 mm. Le tableau suivant présente l'évolution de la pression pour le premier point.

Pas de temps (sec.) Pas d'espace (mm)	10⁻⁵	10⁻⁶	10⁻⁷	10⁻⁸	10⁻⁹
0,7	6,8	8,5	9,5	9,8	9,9
0,4	8,6	14	14,6	14,1	12,6
0,2	diverge	15	15,5	14,5	-

La valeur des résidus pour ce calcul varie entre 10^{-5} et 10^{-7} . On peut considérer comme pression maximale la valeur moyennée des résultats obtenus pour les calculs les plus précis ($P_{\text{point1}}=14,61$ bars). Le calcul déjà fait avec Abaqus donne pour un pas de temps de calcul de $2 \cdot 10^{-5}$ s et $5 \mu\text{m}$, une valeur de 19 bars et avec Castem 16,2 bars. La valeur analytique obtenue est de 18,4 bars, et par les essais 11 bars et la moyenne de 7,8 bars. On observe que la valeur obtenue, comme pour les autres cas, est plus faible que les valeurs calculées par la méthode des éléments finis et l'hypothèse de fluide parfait mais par contre plus élevée que celle obtenue expérimentalement.

III-3-DIMENSIONNEMENT

Cette année à l'ENSIETA va être mise en fonction la machine d'essais de choc. Le bâti est formé de quatre colonnes et entre ces colonnes il y a la possibilité de placer un bassin amovible. Les caractéristiques principales de ce moyen d'essais sont :

- Bassin 3m x 2m, hauteur h=1,75m, hauteur d'eau $h_{H_2O}=1,4\text{m}$
- Capacité vérin
 - 100 kN, vitesse $v=20\text{m/s}$ (72km/h), course 150 mm
 - 200 kN, vitesse $v=10\text{m/s}$ (36km/h), course 300 mm
- Fréquence d'essais: 1 choc toutes les 15mn

Nous réalisons deux simulations numériques pour donner un ordre de grandeur à la pression qui se réfléchit sur les murs de ce bassin (figure 11). Pour ces cas, nous modifions le domaine pour épouser la grandeur du bassin réel (hauteur de 3,17 m, largeur 1,17 m et hauteur d'eau 1,17m) et les vitesses de calcul sont de 7 m/s ($Re=1,26 \cdot 10^6$) et 20 m/s ($Re=3,6 \cdot 10^6$). L'incidence du dièdre est de 6° et le domaine est discrétisé en 175 000 cellules.

La pression maximale qui se développe sur les murs de bassin est obtenue au moment où le dièdre est complètement immergé et elle est la plus forte au fond du bassin (figure 12). Cela permet d'indiquer où la structure doit être renforcée ou la limite de la vitesse de chute pour ce type d'essais.

IV-CONCLUSION

Pour l'impact d'un corps rigide avec la surface de l'eau, Fluent par son modèle bi-phasique, donne des résultats, a priori, comparable à la réalité car seulement l'incompressibilité du fluide est imposée. Une comparaison stricte avec les autres codes de calculs comme Abaqus ou Castem est délicate parce que les hypothèses prises en compte sont différentes et en plus Fluent tient compte des effets de la turbulence et du modèle de couche limite (conditions d'adhérence). Les valeurs obtenues pour les deux pressions maximales sont plus faibles que celles obtenues par les codes d'élément finis. Par contre elles sont plus élevées que celles obtenues expérimentalement et cela peut-être à cause des capteurs et de la fréquence d'acquisition des données.

Les paramètres les plus importants dans ce type de simulations sont les pas de temps et le raffinement du maillage. Pour le dièdre et pour le cône, il y a des phénomènes instables que l'on peut trouver pour des discrétisations en temps très fines.

Deux aspects intéressants peuvent être remarqués dans ce calcul, le premier est que la pression maximale n'est pas atteinte au moment où l'eau touche le point mais en prolongeant la surface libre et le deuxième est qu'il y a une grande chute de pression au moment où le cône est totalement immergé.

Le prochain but est de lier les deux codes de calcul Fluent et Abaqus pour étudier l'interaction fluide-structure [5] entre l'eau et le corps. Un modèle plastique a été déjà réalisé par Constantinescu Adrian (figure 4) [3] en utilisant seulement le code d'élément finis Abaqus.

[1] DONGUY, B., 2002, Study of the fluid interaction structure at the time of the hydrodynamic impact, PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes, FRANCE

[2] HIRT, C.W., NICHOLS, B.D. (1979), Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics,39, pp. 201-225

[3] CONSTANTINESCU, A., NEME, A., PESEUX, B., 2004, Finite element simulations of dihedral and conical shell structures in slamming, 8th International conference on Flow-Induced Vibrations, Ecole Polytechnique, Paris, FRANCE

[4] ZHAO, R., FALTINSEN, O., 1992, Slamming loads on high-speed vessels, 19th Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, KOREA

[5] MIHAILA, A., GROSJEAN, Fr., FUIOREA, I. 2003, Simulation numérique des phénomènes d'interaction fluide-structure à l'aide de codes commerciaux, The 30th internationally attended scientific conference of the Military Technical Academy, Bucarest, ROMANIA

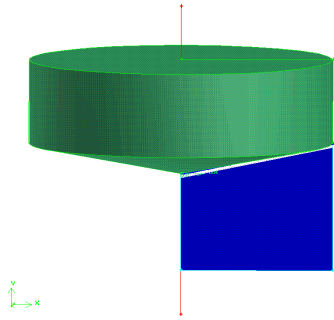


Fig. 1 Corps axisymétrique

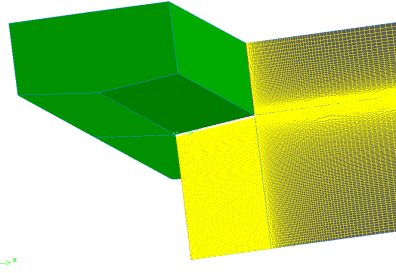


Fig.3 Le dièdre

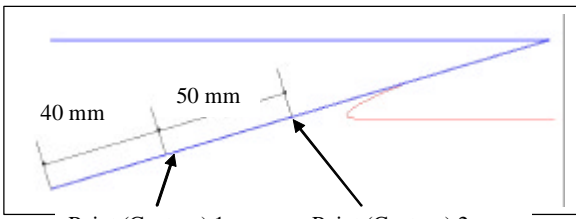


Fig. 2 Position des capteurs de pression

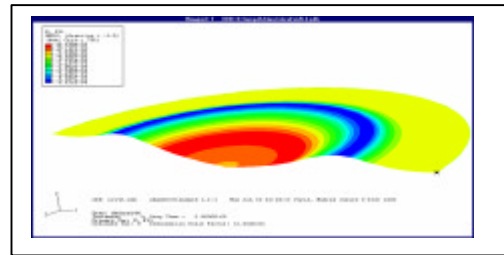


Fig. 4 Couplage fluide-structure, cône déformé

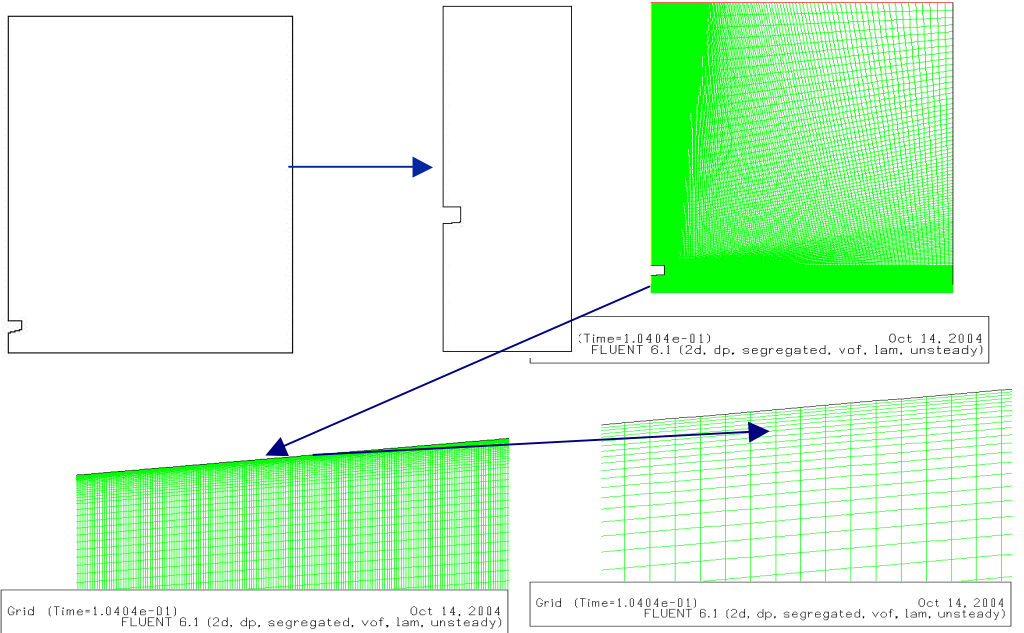


Fig. 5 Changement de domaine et maillage structuré

Fig. 6 Vitesses dans la couche limite

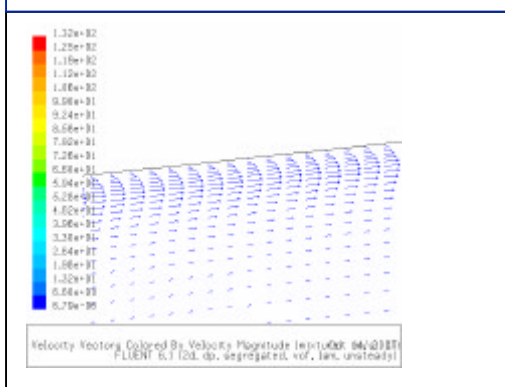
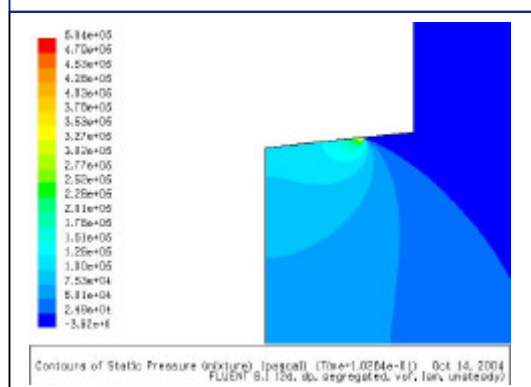


Fig. 7 Courbes des iso-pressions



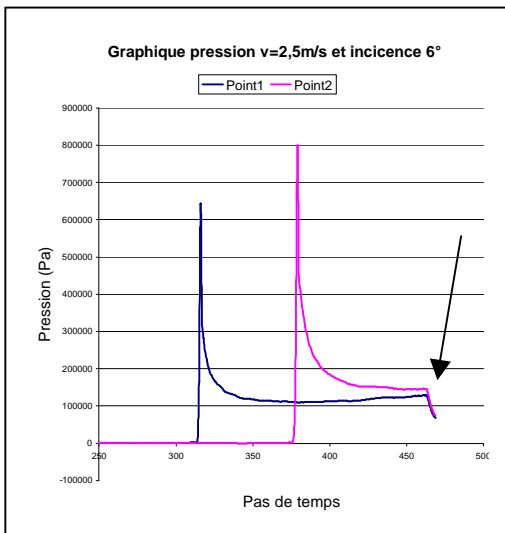


Fig. 8 Dièdre totalement immergé – chute de pression

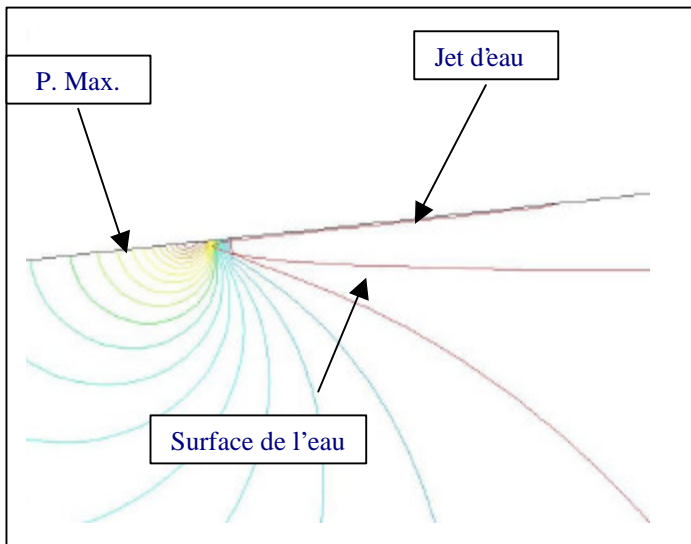


Fig. 9 Le pression maximale ne s'obtient pas au moment où l'eau touche le cône/dièdre

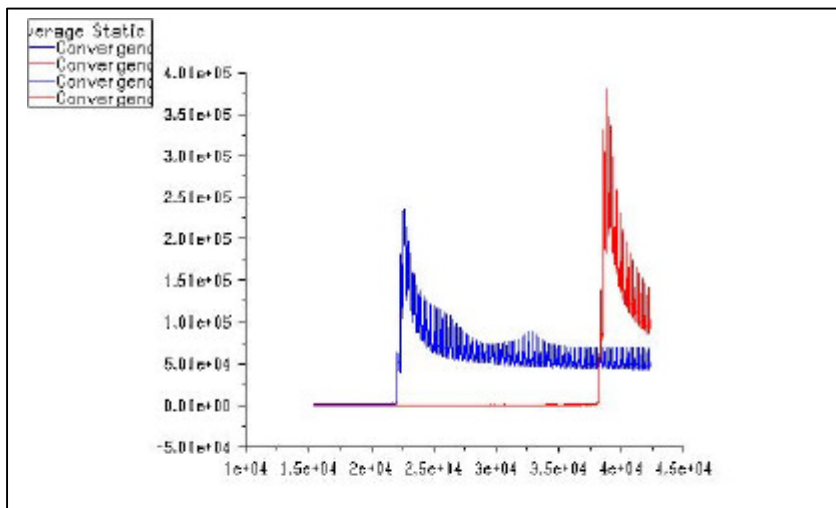


Fig. 10 Pression pour les deux capteurs (instabilité associée à la vitesse =2,5 m/s et incidence=6°)

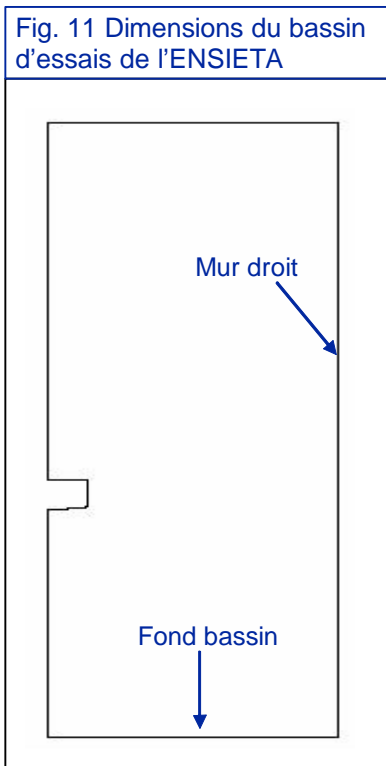


Fig. 12 Graphiques de pression sur les murs du bassin d'essais vitesse=20 m/s et vitesse=7 m/s et incidence=6°

