

9^{èmes} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

10 - 11 - 12 MARS 2003

POITIERS - FUTUROSCOPE

SIMULATIONS D'ÉCOULEMENTS AUTOUR DE CORPS EN MOUVEMENT

FLAWS AROUND MOVING BODIES

ALBAN LEROYER, MICHEL VISONNEAU

Laboratoire de Mécanique des Fluides,
CNRS-UMR 6598, Division Modélisation Numérique,
Ecole Centrale de Nantes
B.P. 92101, 1 rue de la Noë 44321 Nantes Cedex 3

Résumé

Ce papier présente les nouvelles fonctionnalités du code de simulation d'écoulements de fluides visqueux incompressibles, ISIS, développé par la Division Modélisation Numérique, liées au mouvement des corps. Il décrit les méthodes utilisées concernant la résolution des équations du mouvement (paramétrage, utilisation d'un quaternion), la gestion du mouvement des corps pour le maillage et le couplage fluide-structure. Trois applications significatives permettent ensuite d'illustrer et de valider les possibilités du code de calcul.

- Le mouvement libre d'une caisse flottante soumise à un champ de vagues généré par un batteur
- Le lâcher puis l'impact d'un corps prismatique sur une surface libre
- La mise en mouvement d'un corps à déformation imposée s'apparentant à un poisson

Summary

This paper deals with new features which have been added to ISIS, the Navier-Stokes flow solver of the D.M.N.. It concerns motions of solid and deformable bodies. In particular, it describes the methods which are used : moving grid strategies due to bodies motion, the use of quaternion in numerical calculation of general 3D motion, interaction fluid-structure. Finally, three applications are presented in order to illustrate and validate the new possibilities of the flow solver.

- Free motion of a floating box on waves generated by a wave-maker
- Free fall and drop of a prismatic hull
- Free motion of a fish-like body

I-INTRODUCTION

L'augmentation des capacités de calcul et de stockage permet aujourd'hui d'envisager des simulations plus réalistes mais aussi plus complexes. L'étude d'écoulements réels autour de corps en mouvement fait partie de ces nouvelles applications qui deviennent désormais abordables en terme de temps de calculs, même sur des configurations tridimensionnelles.

Les applications industrielles pour ce type de simulations sont nombreuses, notamment dans le domaine de l'hydrodynamique : tenue à la mer, slamming, bio-hydrodynamique, ...

L'objet de ce papier est de présenter les nouvelles fonctionnalités du code de simulation d'écoulements incompressibles de fluides visqueux, ISIS, développé par la Division Modélisation Numérique, liées au mouvement des corps. Il décrit tout d'abord les méthodes utilisées concernant la résolution des équations du mouvement (paramétrage, utilisation d'un quaternion), la gestion du mouvement des corps pour le maillage et le couplage fluide-structure. Trois applications significatives permettent ensuite d'illustrer et de valider les possibilités du code de calcul.

II-DESCRIPTION DES POSSIBILITÉS DU CODE

Le code ISIS est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds (RANSE) sous une forme fortement conservative. Il repose sur une méthode de volumes finis généralisée à des maillages non-structurés composés de volumes polyédriques arbitraires. Le champ de vitesse est obtenu à partir des équations de conservation de quantité de mouvement et la pression est déterminée selon la contrainte d'incompressibilité transformée en équation de pression. Le couplage vitesse-pression est assuré par un algorithme de type SIMPLE.

L'ensemble des variables est stocké au centre des volumes de contrôle. Les intégrales de volume et de surface sont évaluées par des approximations précises au second ordre.

Les calculs avec surface libre sont gérés par une méthode de capture d'interface. L'ensemble des deux phases est vu comme un fluide unique dont les propriétés varient avec un taux de présence. Celui-ci est traité comme un Lagrangien emporté par le fluide global. Sa discrétisation nécessite des schémas appropriés pour éviter une diffusion trop importante de l'interface.

Le mode de discrétisation temporelle pour les calculs instationnaires est une méthode du deuxième ordre décentrée à deux pas de temps.

Le code ISIS a été étendu pour simuler les mouvements 3D d'un nombre quelconque de corps indéformables (solides) mais aussi déformables à déformation imposée (la forme du corps est alors imposée au cours du temps). Pour chaque corps, le mouvement peut être :

- imposé en donnant explicitement la loi d'évolution des paramètres représentant la position du corps dans le repère physique,
- résolu à chaque pas de temps par couplage du calcul fluide et du Principe Fondamental de la Dynamique (P.F.D.) appliqué au corps. On impose alors uniquement le torseur cinématique initial du corps et éventuellement des actions mécaniques extérieures (autres que celles exercées par le fluide). Nous avons la possibilité de bloquer ou d'imposer le mouvement de certains degrés de liberté, ce qui permet de gérer d'éventuelles liaisons.

III-LA RÉOLUTION DU P.F.D.

L'objectif est de calculer la cinématique d'un corps (solide ou déformable à déformation imposée) au cours du temps, en fonction des efforts qui s'exercent sur celui-ci.

Comme tout problème de mécanique du solide, la première étape consiste à définir le repère de référence \mathcal{R}_0 , ici lié à l'espace physique de calcul, considéré comme Galiléen. L'origine du repère est fixée au centre de gravité du corps à l'instant initial. On définit ensuite un repère \mathcal{R}_1 lié au corps qui coïncide à l'instant initial avec le repère \mathcal{R}_0 . Les paramètres définissant le mouvement du corps sont donnés par la transformation $\mathcal{R}_0 \rightarrow \mathcal{R}_1$ (position et orientation).

Remarque : concernant les corps déformables, leur forme est imposée à chaque pas de temps par rapport à la configuration de référence. La position finale est obtenue après avoir effectué la transformation $\mathcal{R}_0 \rightarrow \mathcal{R}_1$ (voir Fig. 1). Le mouvement des corps à déformation imposée se ramène alors, comme pour les corps solides, à la résolution des paramètres qui font passer de \mathcal{R}_0 à \mathcal{R}_1 . Le caractère déformable est pris en compte directement dans l'écriture du P.F.D..

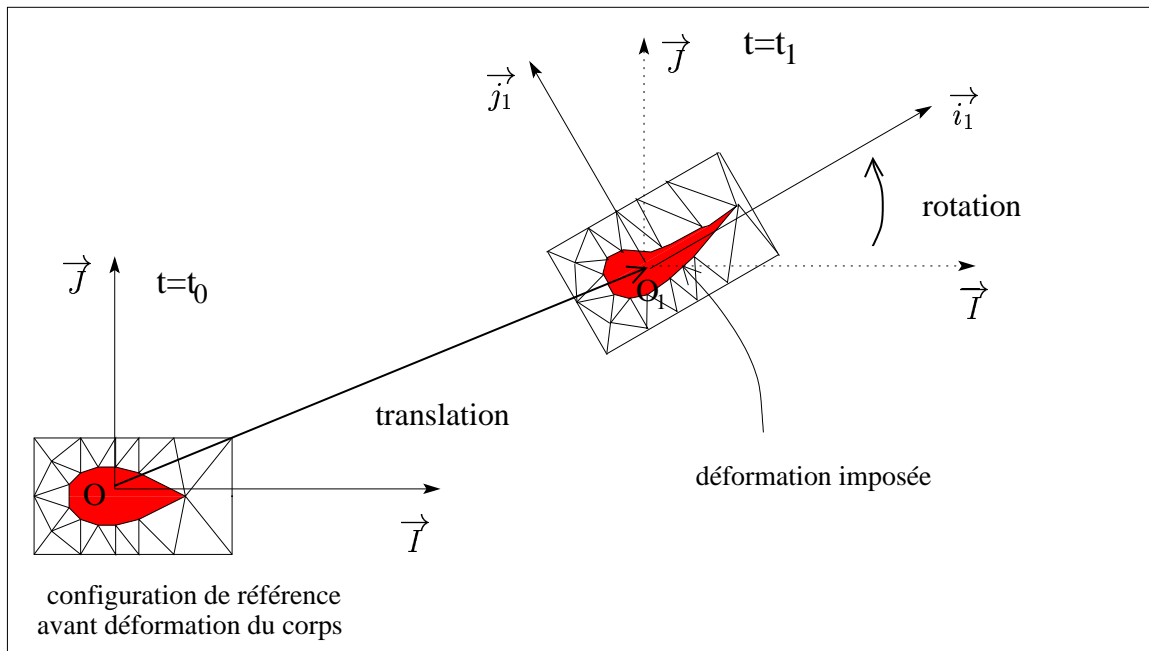


FIG. 1. Cas d'un corps déformable avec déplacement en bloc

Dans le cadre de cette résolution générale tridimensionnelle, la représentation classique de l'orientation des corps par 3 rotations successives (de type angle d'Euler), notées (ψ, θ, ϕ) s'est avérée inadaptée du fait de l'existence de configurations singulières pour lesquelles le triplet (ψ, θ, ϕ) n'est pas unique. L'utilisation de l'espace des quaternions \mathbb{H} , espace de dimension 4, (qui peut être vu comme une extension à l'espace de la représentation plane des nombres complexes) a permis de s'affranchir de ces problèmes.

En effet, on peut montrer qu'à toute rotation d'angle θ et d'axe dirigé par le vecteur unitaire \vec{u} correspond le quaternion unique $\mathbf{q} = \cos(\frac{\theta}{2})\mathbf{e} + \mathbf{u} \sin(\frac{\theta}{2})$ dans la base $(\mathbf{e}, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ de \mathbb{H} .

Ce quaternion (et sa dérivée temporelle) peut être mis en relation avec le vecteur rotation instantanée. Cela permet par intégration d'obtenir le quaternion \mathbf{q} connaissant $\vec{\Omega}$ ([1]).

L'application du P.F.D. au corps dans le repère \mathcal{R}_0 lié à la Terre et considéré comme Galiléen permet d'obtenir le système couplé suivant :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_G & -y_G \\ 0 & 1 & 0 & -z_G & 0 & x_G \\ 0 & 0 & 1 & y_G & -x_G & 0 \\ 0 & -z_G & y_G & \frac{A1}{M_S} & \frac{-F1}{M_S} & \frac{-E1}{M_S} \\ z_G & 0 & -x_G & \frac{-F1}{M_S} & \frac{B1}{M_S} & \frac{-D1}{M_S} \\ -y_G & x_G & 0 & \frac{-E1}{M_S} & \frac{-D1}{M_S} & \frac{C1}{M_S} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \frac{1}{M_S} \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathcal{R}} \cdot \overrightarrow{x_0} - \overrightarrow{S_{Res}} \cdot \overrightarrow{x_0} \\ \overrightarrow{\mathcal{R}} \cdot \overrightarrow{y_0} - \overrightarrow{S_{Res}} \cdot \overrightarrow{y_0} \\ \overrightarrow{\mathcal{R}} \cdot \overrightarrow{z_0} - \overrightarrow{S_{Res}} \cdot \overrightarrow{z_0} \\ \overrightarrow{\mathcal{M}_{O_1}} \cdot \overrightarrow{x_0} - \overrightarrow{S_{Mom}} \cdot \overrightarrow{x_0} \\ \overrightarrow{\mathcal{M}_{O_1}} \cdot \overrightarrow{y_0} - \overrightarrow{S_{Mom}} \cdot \overrightarrow{y_0} \\ \overrightarrow{\mathcal{M}_{O_1}} \cdot \overrightarrow{z_0} - \overrightarrow{S_{Mom}} \cdot \overrightarrow{z_0} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\alpha & -\beta & -\gamma \\ \alpha & 0 & -\gamma & \beta \\ \beta & \gamma & 0 & -\alpha \\ \gamma & -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

$$\text{avec } q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$$

(équation redondante mais utile pour la résolution numérique)

- (x, y, z) les coordonnées du vecteur $\overrightarrow{OO_1} = \overrightarrow{X}$ dans la base β_0
- $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ les coordonnées du vecteur $\overrightarrow{V}(O_1/\mathcal{R}_0)$ dans la base β_0
- (α, β, γ) les coordonnées du vecteur $\overrightarrow{\Omega_0^1}$ dans la base β_0
(= coordonnées du quaternion Ω_0 associé à $\overrightarrow{\Omega_0^1}$)
- (q_0, q_1, q_2, q_3) les coordonnées de \mathbf{q} dans la base β_0
- $\{\overrightarrow{\mathcal{R}}, \overrightarrow{\mathcal{M}_{O_1}}\}$ torseur des efforts extérieurs qui s'exercent sur le corps
- $(\overrightarrow{S_{Res}}, \overrightarrow{S_{Mom}})$ terme source dû à la déformation éventuelle du corps

Le schéma d'intégration pour remonter aux déplacements est un schéma décentré du 2^{ieme} ordre à 2 pas de temps identique à celui utilisé pour le calcul fluide.

IV-LA GESTION DU MOUVEMENT AU NIVEAU DU MAILLAGE

Pour intégrer la notion de mouvement dans un code de calcul fluide, il est nécessaire de gérer le déplacement au cours du temps des noeuds du maillage représentant chaque corps dans l'espace physique. Pour conserver un maillage adéquat, le code offre trois possibilités, qui peuvent être utilisées de manière hybride, suivant les degrés de liberté.

- Remaillage par une technique de ressorts
- Mouvement en bloc du maillage
- Remaillage par pondération analytique

1-Remaillage par une technique de ressorts

Cette méthode est basée sur l'analogie aux ressorts ([2]). Le maillage est vu comme une pseudo-structure quasi-statique, dans laquelle un ressort linéaire fictif est attaché à chaque segment connectant deux noeuds du maillage. Pour améliorer la qualité du maillage et éviter des croisements, des ressorts de torsion fictifs ont été rajoutés ([3],[4]). La figure Fig. 2 schématise l'analogie aux ressorts dans le cas bidimensionnel. Pour le cas tridimensionnel, le principe est le même, si ce n'est que les ressorts de torsion sont placés différemment pour améliorer leur efficacité.

Cette analogie conduit à la résolution d'un système dont les inconnues sont le déplacement des noeuds.

$$(K_{trac} + K_{tors})q = 0 \quad \text{avec} \quad q = q_{impose} \quad \text{aux frontières}$$

K_{trac} et K_{tors} : matrices de raideur
 q : vecteur déplacement des noeuds.

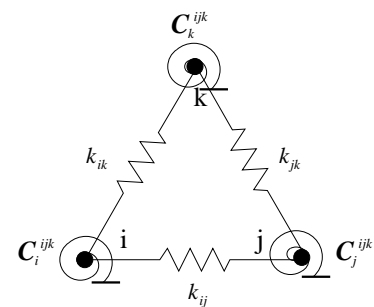


FIG. 2. Analogie aux ressorts en 2D

Cette technique est très générale car elle permet de retrouver un maillage en conservant les mêmes connectivités des noeuds, après un déplacement quelconque des frontières. L'association des ressorts de compression et de torsion permet de conserver une bonne qualité pour le maillage déformé. C'est la seule méthode du code qui est capable de gérer la partie déformation imposée des corps déformables. Elle est par contre assez coûteuse en temps de calcul.

2-Mouvement en bloc

On applique à tous les noeuds du maillage le champ de déplacement rigidifiant du corps issu de la résolution du P.F.D. ou d'une loi analytique imposée. Cette technique, applicable uniquement pour l'étude d'un corps unique en milieu infini, rend possible des déplacements importants.

3-Remaillage par pondération analytique

L'idée de cette méthode est d'obtenir un calcul direct (donc très rapide) dans le cas particulier de mouvements rigidifiants d'une partie des frontières du domaine. Elle est issue du mouvement en bloc, mis à part que l'on pondère le déplacement de chaque noeud par un coefficient qui évolue suivant la proximité du corps déplacé. Ce coefficient vaut 1 pour les noeuds du corps considéré, 0 pour les noeuds des autres frontières du domaine de calcul. Pour chaque mouvement rigidifiant, un coefficient est attaché à chaque noeud. Il est obtenu au début du calcul par résolution d'un Laplacien sur la configuration de référence.

4-Choix de la méthode

Dans le cas d'un corps unique en milieu infini, la méthode par mouvement en bloc apparaît a priori comme la méthode la plus adaptée. Celle-ci est très rapide et permet des déplacements

importants du corps dans l'espace physique. Dans le cas de calcul multi-fluides, il est cependant intéressant de limiter cette méthode aux degrés de liberté laissant invariant la surface libre au niveau des frontières extérieures du domaine. Dans ce cas, les degrés de liberté restant sont gérés par une des deux autres méthodes. Bien entendu, cela n'est possible que lorsque le déplacement de ceux-ci est assez faible.

La technique des ressorts coûtant très cher en terme de temps de calcul, son utilisation doit être limitée. La méthode par pondération analytique permet de la remplacer dans la plupart des cas. Seule la partie déformation imposée dans le mouvement des corps déformables ne permet pas l'application de cette méthode. La technique des ressorts devra alors être nécessairement employée. Ce n'est pas trop pénalisant dans la mesure où la déformation des corps n'intervient qu'une seule fois par pas de temps. En effet, ce n'est pas la forme du corps déformable qui est modifiée au cours des itérations non-linéaires, mais sa position dans l'espace. Cette dernière étant gérée par un mouvement rigidifiant, les deux autres méthodes peuvent être employées.

Dans tous les cas envisagés, on peut toujours substituer le remaillage par ressorts par une pondération analytique dans les itérations non-linéaires. L'appel au remaillage par ressorts ne se fait éventuellement qu'une fois à chaque nouveau pas de temps, ce qui reste acceptable.

Remarque : Dans la résolution de l'écoulement, la mobilité des mailles est prise en compte en calculant sur chaque face, un flux de vitesse de déplacement. Celui-ci est calculé à partir des volumes exacts balayés par la face au cours du temps. Cela permet d'assurer la loi d'identité géométrique de manière conservative ([5]).

V-LE COUPLAGE FLUIDE-STRUCTURE

Dans le cas des mouvements imposés, à chaque nouveau pas de temps, on effectue le déplacement (connu par avance puisqu'imposé) des corps. Après le calcul du nouveau maillage, on résout l'écoulement. Il n'y a donc pas réellement de couplage. Celui-ci existe réellement lorsque le mouvement (ou une partie du mouvement) est résolu par application du P.F.D. La cinématique des corps à l'instant de calcul est alors liée à l'écoulement à ce même instant par les efforts fluides qui s'exercent sur eux.

Mise à part les conditions initiales, les efforts fluides qui s'exercent sur le corps au cours du temps sont les seules données nécessaires à la résolution du P.F.D.. Par contre, ces efforts fluides dépendent fortement des caractéristiques cinématiques au cours du temps.

La première méthode, faiblement couplée, est basée sur le calcul des efforts uniquement à chaque pas de temps pour obtenir la nouvelle position des corps. Dans ce cas, il y a toujours un décalage d'un pas de temps entre le calcul fluide et le calcul du mouvement (les efforts fluides à l'instant t sont calculés à partir de la configuration cinématique à $t-dt$). Cette méthode permet d'utiliser les mêmes maillages au cours des itérations non-linéaires du calcul fluide. Mais elle pose des problèmes d'instabilités oscillatoires divergentes dès que la masse volumique d'un corps est proche de celle de l'un des fluides en contact avec le corps. C'est le cas notamment dans la plupart des applications liées à l'hydrodynamique, (corps flottant,...). Dans ce cas, un couplage plus fort est nécessaire.

1-Le couplage non-linéaire

Pour stabiliser le couplage, les efforts sont recalculés à chaque itération non-linéaire et servent à réajuster la position des corps pour l'itération non-linéaire suivante. Cela se traduit par l'algorithme Fig. 3.

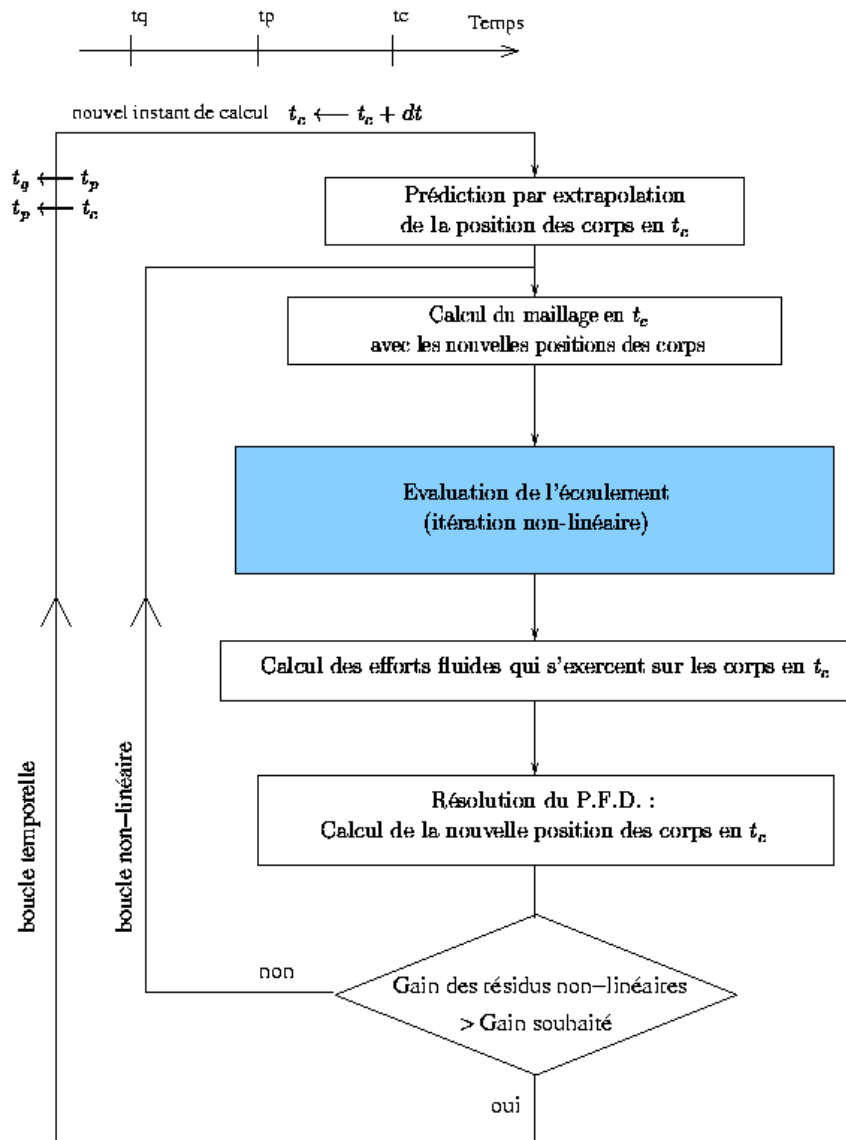


FIG. 3. Couplage non-linéaire

Ce couplage permet de calculer à la fois l'écoulement et la position des corps à l'instant de calcul sans décalage temporel. Bien que plus stable, ce couplage non-linéaire ne résoud pas à lui seul les problèmes d'instabilités. En effet, dans certains cas difficiles, il apparaît des instabilités oscillatoires au niveau des itérations non-linéaires qui aboutissent à la divergence du code. Pour parvenir à un couplage stable, il est nécessaire d'ajouter à cette méthode un traitement particulier des équations issues du P.F.D.

2-Stabilisation du couplage non-linéaire

Comme l'a montré Söding ([6]), l'instabilité provient de la dépendance des efforts à l'accélération du corps. Celle-ci est classiquement exprimée par la décomposition des efforts en une partie indépendante de l'accélération \bar{f} et une partie liée linéairement à l'accélération du corps, sous la forme d'un terme de masse ajoutée :

$$f = \bar{f} - a\gamma \text{ avec } \gamma \text{ accélération du corps}$$

L'objectif n'est pas d'évaluer ce coefficient de masse ajoutée mais d'utiliser cette propriété pour modifier la résolution des équations issues du P.F.D. et rendre le couplage stable.

Examinons le cas d'un mouvement à un degré de liberté. Le P.F.D. s'écrit : $m\gamma = f$.

On augmente alors les deux membres d'un terme de masse ajoutée en évaluant celui du second membre à l'itération non-linéaire précédente. L'équation résolue devient alors :

$$(m + a)\gamma^{itnl} = f + a\gamma^{itnl-1}$$

A convergence, ($\gamma^{itnl} = \gamma^{itnl-1}$), on retrouve bien l'équation initiale. On remarque que le terme a n'a finalement aucune influence sur la solution convergée. Il suffit de le prendre suffisamment grand pour assurer la stabilité du couplage.

VI-APPLICATIONS

1-Mouvement d'un corps flottant soumis à un champ de houle

Cette étude présente une simulation mettant en jeu plusieurs corps : un batteur en mouvement imposé forme un champ de vagues qui interagit avec une caisse flottante en mouvement libre. Ces calculs sont préliminaires à une étude plus détaillée d'un cas analogue sur lequel des résultats expérimentaux sont disponibles ([7]).

D'ores et déjà, nous pouvons donner plus de détails concernant les méthodes utilisées pour la résolution. Deux techniques de remaillage sont exploitées pour cette simulation. Au début de la boucle temporelle (passage à un nouvel instant de calcul), les noeuds composant le batteur sont déplacés selon une loi analytique sinusoidale. Ce mouvement n'est pas rigidifiant, puisque seule l'abscisse des noeuds du batteur est modifiée (Fig. 4).

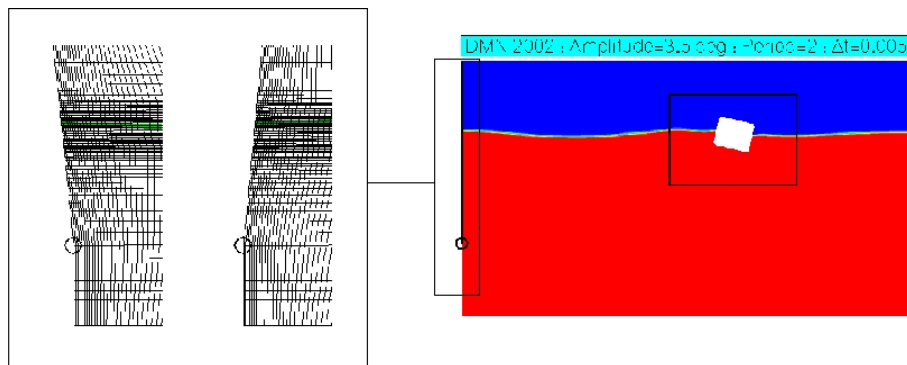


FIG. 4. Maillage à proximité du batteur à 2 instants différents (T=7.56 et T=8.36)

Par conséquent, la technique des ressorts est la seule apte à remailler le domaine à chaque nouveau pas de temps. Dans la boucle non-linéaire, le couplage avec le P.F.D. est nécessaire pour assurer la stabilité du calcul. La position de la caisse est donc réajustée à chaque itération non-linéaire en fonction des efforts. Les noeuds du maillage doivent donc être eux aussi recalculés. Cette opération, qui n'est en fait qu'une correction de positionnement du mouvement rigidifiant de la caisse, est accomplie par pondération analytique. Pour ces premiers calculs, des conditions de glissement sont requises pour les parois. Dans les calculs envisagés, un maillage adapté pour les conditions d'adhérence sera utilisé. Le problème physique sera ainsi modélisé plus finement. La figure Fig 5 montre l'évolution de la cinématique de la caisse en fonction du

temps. On remarque que celle-ci est petit à petit emportée par le champ de vagues en s'éloignant du batteur (Fig 5.1).

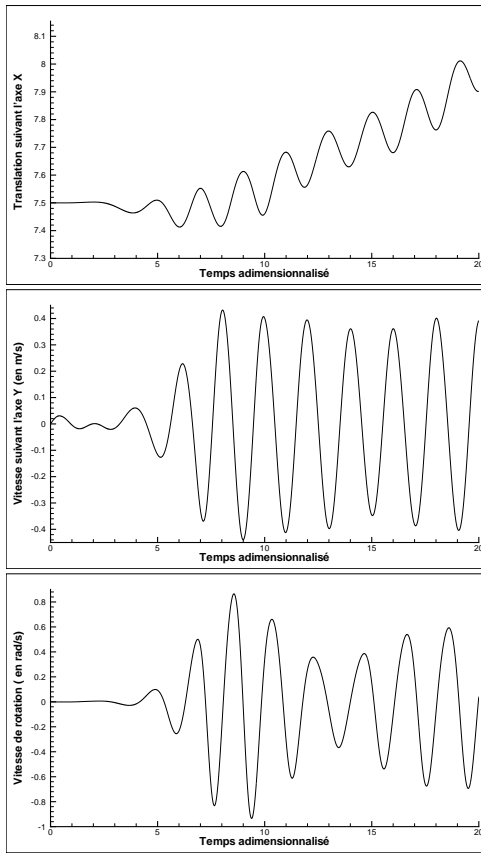


FIG. 5. Cinématique de la caisse

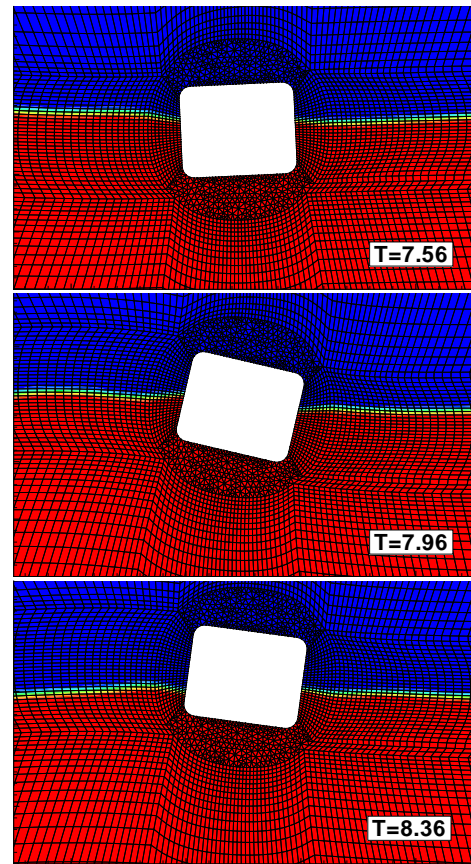


FIG. 6. Visualisation à 3 instants différents

2-*Impact d'un corps prismatique sur une surface libre*

Cette application s'appuie sur des expériences réalisées au CSS en Floride ([8]) et reprises par Azcueta ([9]). Il s'agit de l'étude du mouvement libre d'un corps prismatique (Fig. 7), lâcher dans l'air et qui vient impacter l'eau. Le dispositif de mesure, composé d'accéléromètres, permet d'avoir accès à la cinématique lors de l'impact, en translation et en rotation. Ces mesures ont été réalisées en faisant varier différents paramètres :

- les caractéristiques dynamiques du corps (masse M , moment d'inertie I_G , distance CG),
- l'angle d'inclinaison initial α
- la hauteur de lâcher H

Le tableau Tab. 1 rassemble les données pour les deux simulations effectuées.

La forme allongée du corps nous a permis d'effectuer des simulations bidimensionnelles. Pour le moment, les calculs ont été menés sur un seul maillage 2D de 13202 cellules (Fig. 9).

Pour gagner du temps et concentrer l'effort de calcul lors de l'impact et non lors de la chute, la loi de pas de temps utilisée n'est pas uniforme. Le pas de temps (qui n'a pas besoin d'être fin au début du calcul) diminue selon une forme basée sur une tangente hyperbolique jusqu'à l'instant $t = 0.3s$.

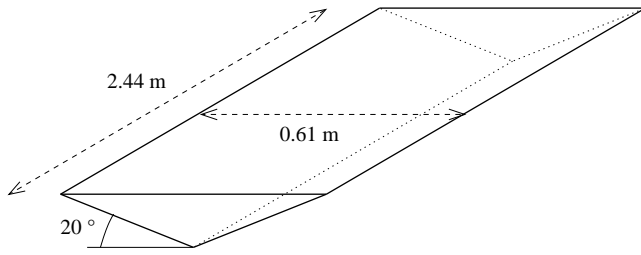


FIG. 7. Géométrie du corps prismatique

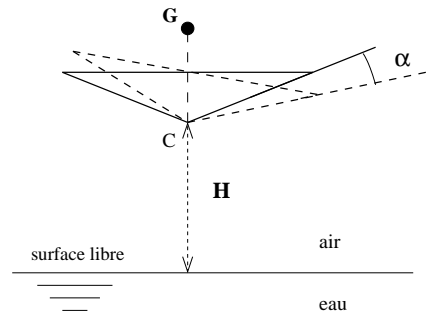


FIG. 8. Paramètres expérimentaux

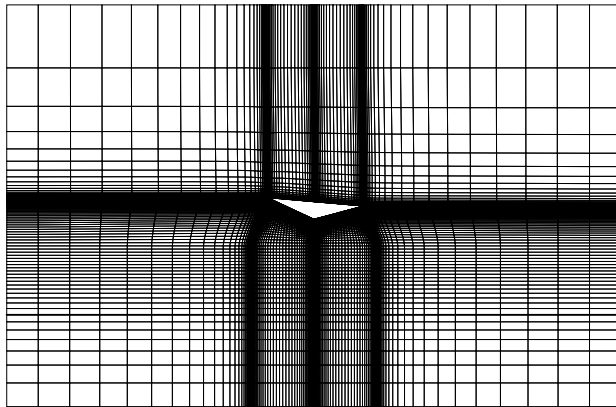


FIG. 9. Maillage initial

	Cas C1	Cas C2
H	0.61 m	0.61 m
α	5°	5°
M	124 kg	293 kg
I_G	8.85 kg.m ²	10.95 kg.m ²
CG	0.216 m	0.165 m

TAB. 1. Conditions expérimentales des cas effectués

Le mouvement du maillage est géré par mouvement en bloc pour les 2 translations et par pondération analytique pour la rotation. Cela permet de conserver les frontières latérales du domaine orthogonales à la surface libre. Concernant les conditions aux limites, une condition de glissement est requise au niveau du corps. Pour les frontières extérieures, les deux côtés latéraux sont dotés d'une vitesse imposée à zéro (écoulement lointain), et les parties supérieures et inférieures d'une condition de pression hydrostatique.

Les simulations sont réalisées avec une méthode de capture d'interface. Pour éviter une diffusion trop importante de l'interface, un schéma particulier est utilisé pour la discrétisation de l'équation de transport de la fonction de présence. Dans le cas présent, c'est la méthode HRIC qui est employée ([10]). La figure Fig. 10 permet de comparer à un instant donné les surfaces libres pour les deux cas traités : plus la masse du corps est grande, plus l'impact génère une élévation importante de la surface libre. La figure Fig. 11 donne pour le cas C1 (à gauche) et le cas C2 (à droite) la comparaison avec les données expérimentales.

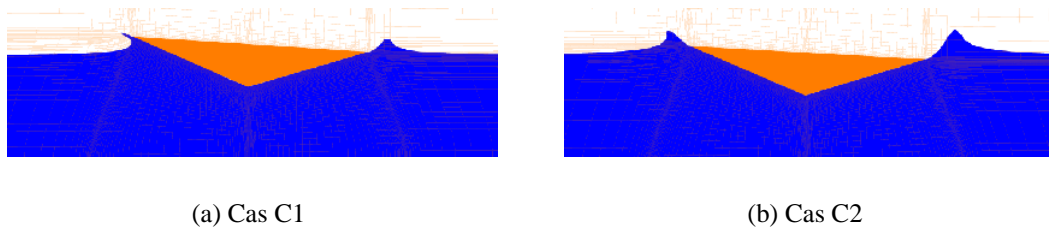
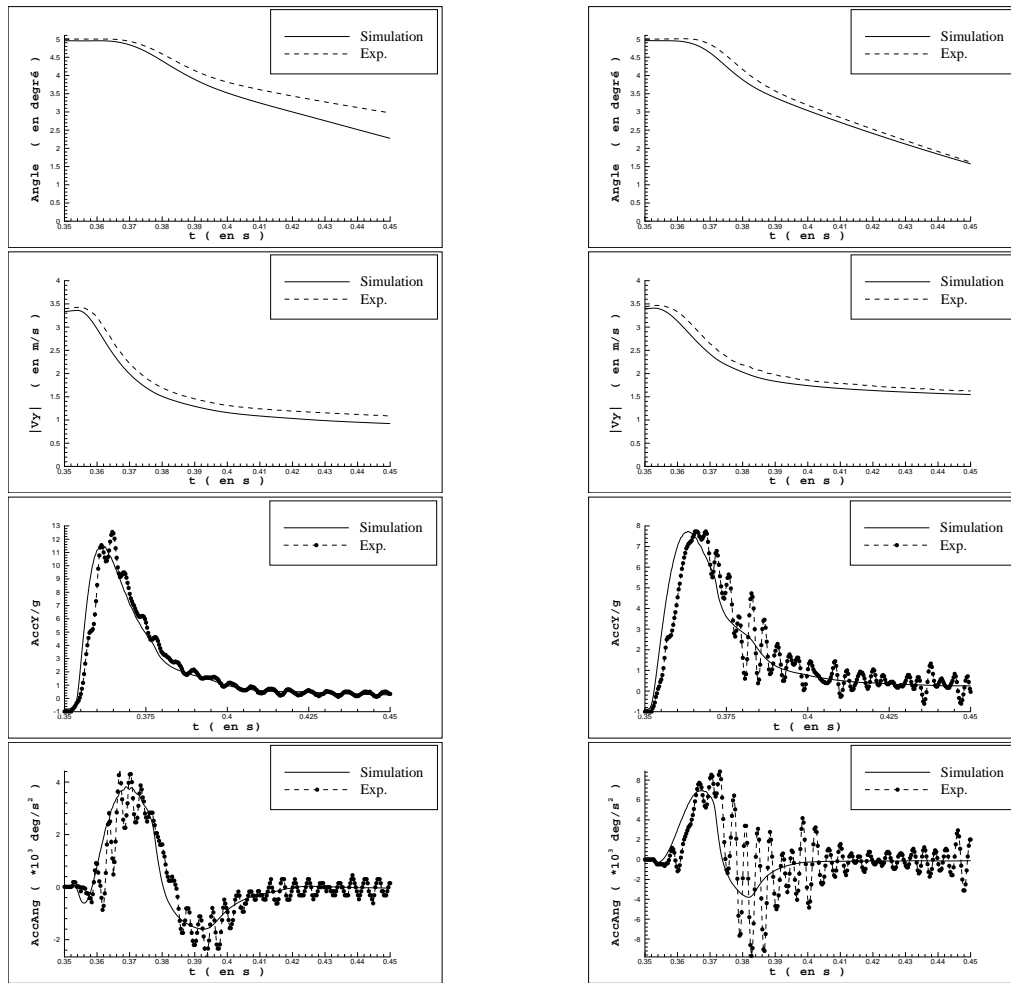


FIG. 10. Comparaison des surfaces libres pour $t=0.394$ s



(a) Cas C1

(b) Cas C2

FIG. 11. Comparaison aux données expérimentales

Malgré les simplifications pour limiter le temps de calcul (maillage 2D relativement grossier, condition de glissement au niveau du corps), les résultats des simulations sont assez proches de l'évolution moyenne des données expérimentales, comme le montrent les courbes d'accélération verticale et angulaire lors de l'impact. Par contre, les simulations sont par nature dans l'impossibilité de capter les oscillations rapides engendrées par les vibrations de la structure, puisque celle-ci est modélisée par un corps indéformable.

Dans les deux cas, on peut noter que les fortes variations d'accélération dues à l'impact s'amorcent un peu plus tôt dans les simulations que dans les mesures expérimentales. Ceci peut s'expliquer par l'étalement de l'interface sur quelques mailles. Ainsi, dans la simulation, le corps rencontre avant la position effective de la surface libre un "mélange" air-eau qui commence à le freiner.

3-Mise en mouvement d'un poisson numérique

Cette application s'attache aux calculs d'écoulement autour d'un corps à déformation imposée s'apparentant à un poisson. L'étude porte sur la mise en mouvement d'un tel "animal numérique". Pour cela, on impose une loi de déformation simple mimant celle d'un véritable poisson ([11]).

Deux cas ont été traités, l'un bidimensionnel en coupe, l'autre tridimensionnel. Pour limiter la taille du maillage de ce dernier (calcul mono-processeur 3D instationnaire !), le calcul est effectué uniquement autour d'un demi-poisson (Fig. 12). Le mouvement 3D ne possède alors que 3 degrés de liberté (2 translations, 1 rotation d'axe orthogonal au plan de symétrie). Le maillage d'environ 100000 cellules est composé principalement de tétraèdres sauf près du corps où il est extrudé.

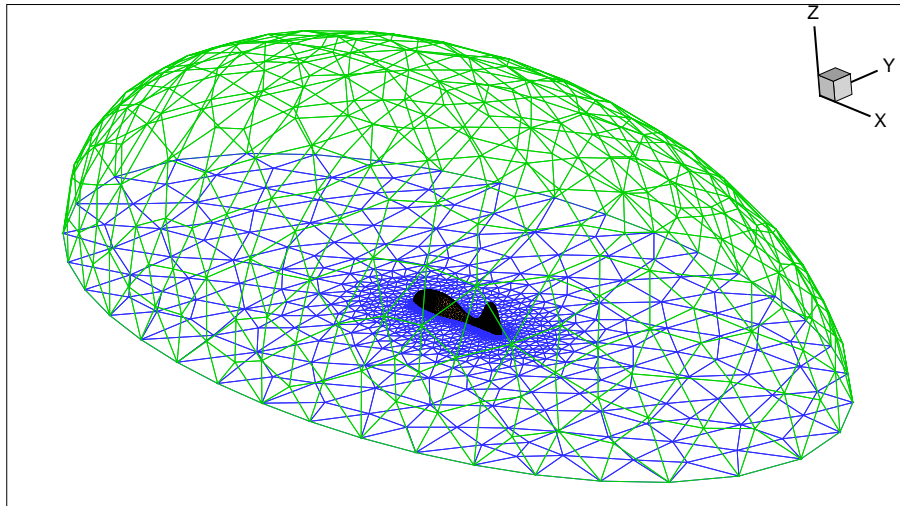


FIG. 12. Vue globale du maillage 3D

A chaque pas de temps, les frontières du corps sont déformées selon une loi de la forme :

$$y(x,t) - y_{ref}(x) = a(x) \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) - 2kt \right]$$

L'application de la procédure de remaillage par ressorts permet de retrouver un maillage fluide autour du corps déformé. Le maillage interne du corps est quant à lui remaillé de manière analytique, en appliquant la loi de déformation à tous les noeuds. La mise en position dans l'espace physique est assurée par un mouvement en bloc dont les paramètres sont issus du P.F.D.. Le mouvement de ce poisson est donc uniquement régi par la réponse du fluide à sa déformation.

Pour ce cas, un couplage non-linéaire a été utilisé. Il s'est même avéré nécessaire d'ajouter un coefficient de masse ajoutée pour stabiliser celui-ci. Sans ce traitement stabilisant, un phénomène d'oscillations divergentes entre la cinématique et les efforts (réponse du champ de pression à la déformation imposée) apparaît dès lors que l'on commence à déformer le poisson à partir d'une position au repos.

Dans cette étude, nous nous sommes attachés à valider le couplage fluide-structure pour des corps déformables. Les simulations proposées, préliminaires à des calculs plus conséquents lorsque la procédure de remaillage par ressorts sera parallélisée, sont réalisés sans modèle de turbulence. Pour le cas 2D, une condition d'adhérence est requise au niveau de la paroi du poisson, alors que pour le cas 3D, une condition de glissement a été utilisée pour éviter de mailler trop près de la paroi et ainsi diminuer le nombre de points.

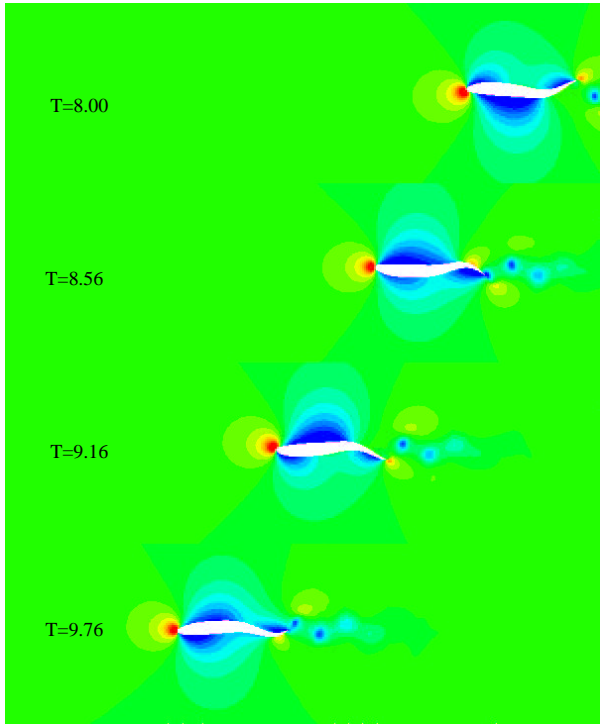


FIG. 13. Cas 2D : Champ de pression à différents instants

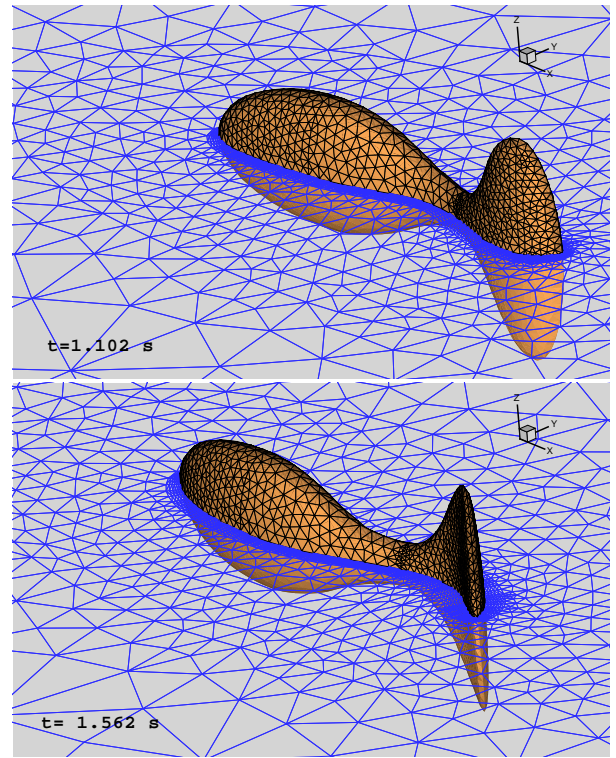


FIG. 14. Cas 3D : Maillages autour du corps à $t=1.102\text{s}$ et $t=1.562\text{s}$

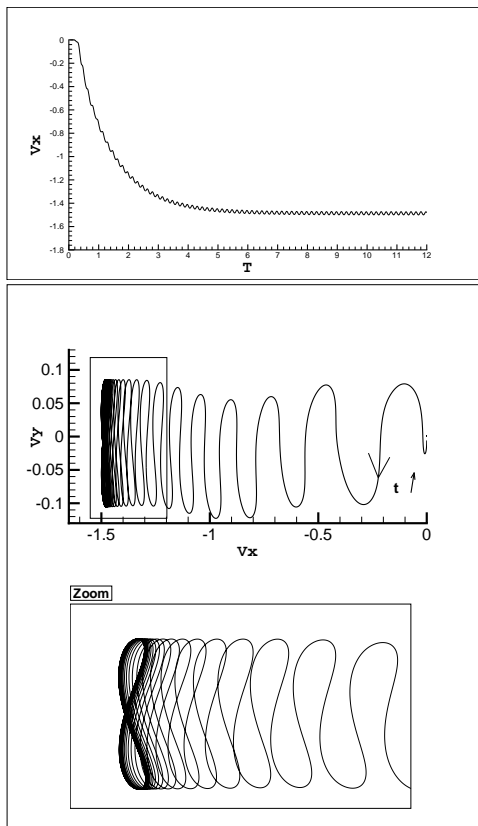


FIG. 15. Cas 2D

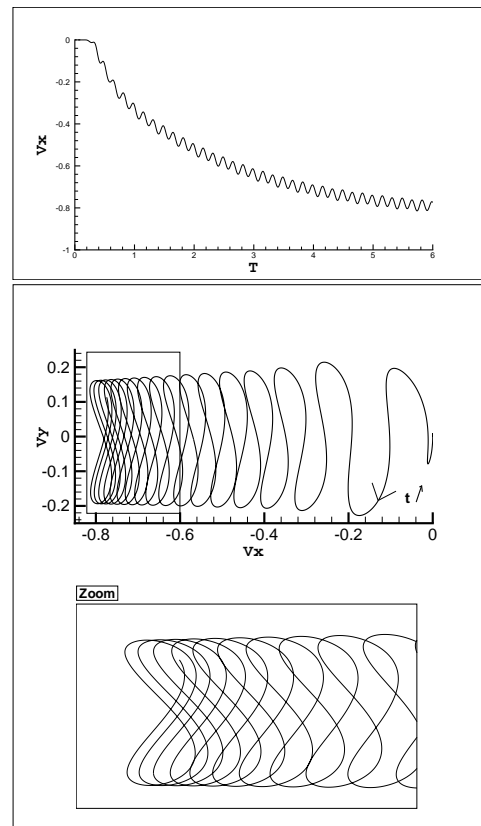


FIG. 16. Cas 3D

Dans les deux cas (2D et 3D), on remarque que la mise en mouvement due à une ondulation périodique de la forme tend après une phase transitoire vers un état lui aussi périodique (Fig. 15 et Fig. 16).

VII-CONCLUSION

Les nouvelles fonctionnalités du code ISIS liées au mouvement de corps (solides ou à déformation imposée) sont désormais opérationnelles. Les applications envisagées sont nombreuses : comportement de bateaux dans la houle, biomimétisme,...

Les trois cas décrits permettent d'illustrer et de valider les méthodes : gestion des corps, techniques de remaillage, couplage entre le P.F.D. et le calcul fluide. Pour le moment, les maillages sont relativement grossiers pour conserver des temps de calcul raisonnables (calcul mono-processeur). Cependant, la parallélisation des algorithmes de remaillage est en cours. Une fois terminé, ce développement technique va permettre de mener des calculs multiblocs sur des maillages plus fins avec des conditions d'adhérence au niveau des parois du corps et des modèles de turbulence bas-Reynolds.

REFERENCES

- [1] R. Guiziou, "Mécanique spatiale," *Cours en ligne* : <http://artemis.univ-mrs.fr/cybermeca/Formcont/mecaspa/>, 2000.
- [2] J. Batina, "Unsteady Euler airfoil solutions using unstructured dynamic meshes," in *AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting*, AIAA Paper 89-0115, (Reno, Nevada), January 1989.
- [3] C. Farhat, C. Degand, B. Koobus, and M. Lesoinne, "Torsional springs for two-dimensional dynamic unstructured fluid meshes.," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 163, pp. 231–245, 1998.
- [4] G. Deng, E. Guilmineau, P. Queutey, and M. Visonneau, "Capture et suivi d'interfaces d'écoulements visqueux incompressibles non miscibles," in *8^{ième} Journées de l'Hydrodynamique*, 2001.
- [5] J. H. Ferziger and M. Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, ch. 12.1. Springer, 1996.
- [6] H. Söding, "How to Integrate Free Motions of Solids in Fluids," in *4th Numerical Towing Tank Symposium, Hamburg*, 2001.
- [7] Y. Xing, I. Hadzic, and P. M., "Predictions of Floating-Body Motion in Viscous Flow," in *4th Numerical Towing Tank Symposium, Hamburg*, 2001.
- [8] L. Xu, A. W. Troesch, and R. Peterson, "Asymmetric hydrodynamic impact and dynamic response of vessels," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 121, pp. 83–89, 1999.
- [9] R. Azcueta, *Computation of Turbulent Free-Surface Flows Around Ships and Floating Bodies*. PhD thesis, Université d'Hambourg, 2001.
- [10] S. Muzaferija and M. Peric, *Nonlinear Water Wave Interaction*, ch. 2.
- [11] H. Liu and K. Kawachi, "A Numerical Study of Undulatory Swimming," *Journal of Computational Physics*, vol. 155, pp. 223–247, 1999.