FDLV113 - Source de pression dans une boule pleine de fluide en interaction sol - fluide - structure

Résumé :

Ce test contribue à la validation du chaînage *Code_Aster* - MISS3D par la méthode fréquentielle de couplage en interaction sol-fluide-structure (ISFS).

Ce test permet de considérer tous les types d'interface: sol-structure, fluide-structure, sol-fluide, sol libre. Il permet également de tester le chargement par source de pression ponctuelle dans le fluide.

Il représente une boule, soit une sphère creuse de dimensions finies, remplie d'eau.

Pour avoir tous les types d'interface, la moitié inférieure de la sphère creuse est modélisée par *Code_Aster* comme domaine «structure» ; la moitié supérieure représentant le domaine «sol» de mêmes caractéristiques que la structure et le domaine «fluide» est modélisée par MISS3D. Une source de pression harmonique, de module unitaire constant pour chaque fréquence comprise entre $1\,Hz$ et $30\,Hz$, est imposée au centre de la boule dans le milieu fluide.

On teste le module des déplacements radiaux obtenus à l'extérieur et à l'intérieur de la boule par rapport à une solution analytique calculée. La concordance est correcte à condition de supprimer l'effet d'une résonance parasite correspondant à la première fréquence propre de la sphère avec masse d'eau ajoutée au centre. Cela est possible au moyen de l'introduction d'un paramètre `RFIC` dans MISS3D.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Miss3D utilise la méthode fréquentielle de couplage pour tenir compte de l'interaction sol-fluide-structure. Cette méthode, basée sur la sous-structuration dynamique, consiste à découper le domaine d'étude en trois sous-domaines :

- le sol,
- le fluide,
- la structure.

Il en résulte 4 types d'interface possibles :

- l'interface sol-structure,
- l'interface fluide-structure,
- l'interface sol-libre.

Le sol, le fluide, et la structure

Le sol et la structure sont constitués du même matériau homogène.

Dans le calcul couplé *Code_Aster*-MISS3D, pour représenter le cas d'une sphère creuse de dimension finie remplie de fluide, on modélise une moitié du milieu solide comme domaine "structure", pris en compte avec *Code_Aster*, et l'autre moitié comme domaine "sol" pris en compte avec MISS3D.

Le milieu fluide, qui se trouve à l'intérieur de la sphère de rayon $r=5m$, est pris en compte avec MISS3D. Le milieu solide occupe le volume compris entre les sphères de rayons $r_{interne}=5m$ et $r_{externe}=7m$.

Le domaine "structure" occupe le volume de solide délimité supérieurement par le plan horizontal équatorial passant par l'origine de la sphère et le domaine "sol" le volume de solide restant (voir figure 1.1-a ci-dessous).

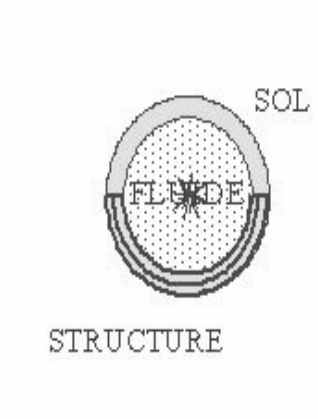


Figure 1.1-a : Domaine de la boule de dimensions finies remplie de fluide

Les éléments des interfaces sont des éléments surfaciques QUAD4. Le domaine "structure" (en jaune sur la figure 1-1.b) est modélisé avec des éléments volumiques HEXA8. L'épaisseur selon la direction radiale est partagée en quatre couches pour un total de 1024 éléments.

La taille maximale des éléments est $1.37m$, qui, avec une vitesse secondaire des ondes dans le solide de $334m/sec$, doit respecter la limite en fréquence de $30Hz$ selon les critères :

$$l_{\text{elem_max}} \leq \frac{l_{\text{onde_max}}}{8} \qquad f \leq f_{max} = \frac{c_s}{8\, l_{\text{elem_max}}}$$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les interfaces

Sur la figure 1-1.b, on représente les éléments des 4 interfaces. Il y a ici un domaine de surface de sol libre. L'interface sol - structure, en noir, est discrétisée en 128 mailles et ne comprend plus que la couronne du plan horizontal $z=0$ comprise entre les rayons $5\,m$ et $7\,m$. L'interface sol - fluide, en rose foncé, et l'interface fluide-structure, en bleu, sont discrétisées en 256 mailles. La surface libre en vert comprend toute l'enveloppe externe de la demi-sphère supérieure soit également 256 mailles.

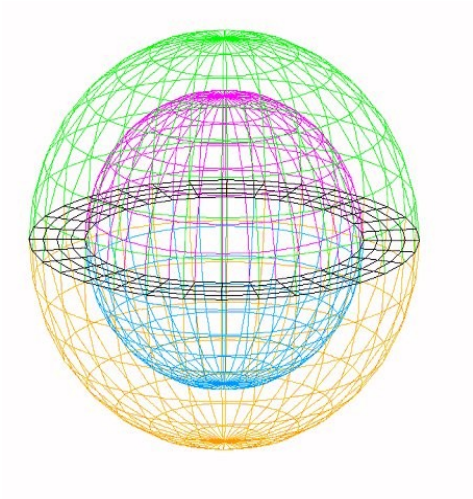


Figure 1.1-b : Modèles et maillages surfaciques des interfaces

1.2 Propriétés des matériaux

Le sol et la structure

Les caractéristiques mécaniques du sol et de la structure utilisées sont celles indiquées dans le tableau 1.1-a.

E	$700\,MPa$
NU	0.2
RHO	$2500.\,kg/m^3$
BETA	0

Tableau 1.2-a : caractéristiques du sol et de la structure

Ces caractéristiques induisent une vitesse des ondes de cisaillement : $c_s=341.56\,m/s$ ainsi qu'une vitesse des ondes de compression : $c_p=557.77\,m/s$

Le fluide

Célérité	$150\,m/s$
RHO	$1000.\,kg/m^3$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

BETA	0.

Tableau 1.2-b : caractéristiques du fluide

On introduit une caractéristique de célérité du fluide inférieure aux vitesses des ondes de cisaillement de compression dans la structure et le sol afin d'obtenir des résonances dans la gamme des fréquences étudiées.

1.3 Conditions aux limites et chargements mécaniques

On applique une condition de source fluide ponctuelle au centre de la boule de coordonnées $(0\,0\,0)$ avec un chargement harmonique $P=P_o \sin \omega t$ dont le module de la pression p_o est unitaire avec une pulsation qui varie de $1\,Hz$ à $30\,Hz$ par pas de $1\,Hz$. Cela correspond à un Dirac à l'instant initial en temporel. Cela revient dans *Code_Aster* à introduire dans CALC_MISS sous le mot clé SOURCE_FLUIDE les coordonnées de la source.

Afin de ne pas avoir un problème de mouvement de corps rigide, on a bloqué les nœuds du maillage de la structure, qui se trouvent sur les axes X, Y et Z respectivement selon (Y et Z), (X et Z), (X et Y). Ainsi, on empêche les déplacements de corps rigide, tout en permettant le déplacement radial.
En ce qui concerne les modes d'interface sol - structure, on a remarqué que les modes statiques de type contraint calculés avec cette condition limite d'encastrement à l'interface sol - structure ne peuvent pas être une base complète pour représenter une déformée à symétrie sphérique.

Pour cela, on a introduit de nouveaux modes statiques dans la base modale. Les modes introduits sont des modes de type contraint sur l'enveloppe externe de la demi-sphère inférieure (en jaune sur la figure 1,1-b). Ils correspondent à une nouvelle condition limite de blocage selon les 3 degrés de liberté de tous les nœuds de cette surface, à l'exception de ses nœuds d'intersection avec les axes. Pour ces nœuds, on n'a pas le mode unitaire correspondant au degré de liberté qui est tangentiel à la surface, car le déplacement qu'on recherche n'a pas de composante selon cette direction.

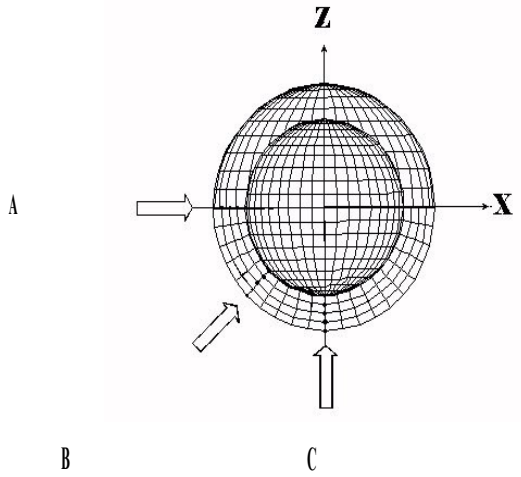


Figure 1.3-a : Points de mesure du déplacement radial.

Le meilleur résultat est obtenu en utilisant une base modale de Ritz sans modes dynamiques, et avec les modes statiques complétés comme indiqué précédemment. En effet, on a ainsi exactement le nombre d'inconnues de déplacement à déterminer pour représenter un déplacement à symétrie sphérique, notamment sur l'interface structure – fluide.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

2.1 Résultats de référence

La méthode fréquentielle de couplage entre Miss3D et *Code_Aster* est décrite dans le document de référence [bib1].

On teste le module des déplacements radiaux obtenus à l'extérieur et à l'intérieur de la boule par rapport à une solution analytique calculée et détaillée dans une étude applicative [bib2]. Les solutions en pression et développement ne dépendent que du rayon et du temps. On considère que la pression totale dans le fluide est due à la somme de deux contributions:

- la pression p_d due à la vibration de la paroi à l'interface avec le milieu solide,
- la pression p_0 due à l'action de la masse de Dirac au centre de la sphère, dans un fluide infini

$p = p_d + p_0$

L'équation d'Helmholtz de propagation des ondes dans le fluide en absence de source s'écrit en coordonnées sphériques après transformation de Fourier :

$$\frac{1}{r^2}\frac{\delta}{\delta r}(r^2\frac{\delta p_d}{\delta r})(r,\omega)+\frac{\omega}{c_f^2}p_d(r,\omega)=0$$

En posant : $k_f(\omega)=\frac{\omega}{c_f}$, on obtient une solution de la forme $p_d = A(\sin\frac{(k_f r)}{4\pi r})$,

La solution pour la pression p_0 est donnée par une fonction de Green et la pression dans le fluide s'écrit : $p=\frac{e^{ik_f r}}{4\pi r}+A(\sin\frac{(k_f r)}{4\pi r})$

L'équation de Navier de propagation des ondes dans le solide en absence de source s'écrit en coordonnées sphériques après transformation de Fourier et en effectuant le changement de variables $u=\frac{\delta\phi}{\delta r}$:

$$\frac{\delta^2}{\delta r^2}(r\phi)(r,\omega)+k_p^2(r\phi)(r,\omega)=0$$

En posant $k_p(\omega)=\frac{\omega}{c_p}$, on obtient une solution de la forme :

$u=B\frac{e^{ik_p r}}{4\pi r}(\frac{ik_p r-1}{r})+C\frac{e^{-ik_p r}}{4\pi r}(\frac{-ik_p r-1}{r})$.

Les 3 coefficients inconnus A , B et C sont alors déterminés à partir de 3 conditions limites:

- Continuité des déplacements normaux à l'interface sol-fluide $\rho\omega^2 u = grad(p)$ pour $r=r_1$,
- Continuité des contraintes normales à l'interface sol-fluide $\sigma_{rr}+p=0$ pour $r=r_1$,
- Contrainte radiale nulle sur la surface externe nulle $\sigma_{rr}=0$ pour $r=r_2$,

2.2 Références bibliographiques

[1] D. CLOUTEAU : « Manuel de référence de MISS3D – version 6.3 – Centrale Recherche SA »

[2] G. DEVESA, M.FESTA : «étude avec le *Code_Aster* et son interface avec MISS3D de l'interaction Sol-Structure-Fluide : Application au calcul dynamique des barrages-voûtes», EDF/R&D HP-52/99/001/A.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Les caractéristiques utilisées et le maillage sont ceux déduits des données du paragraphe [1].
On affecte une modélisation 3D aux éléments de la structure

3.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage fourni à Code_*Aster* contient des mailles de type HEXA8 pour modéliser la structure et des mailles de types QUAD4 pour modéliser les interfaces avec une discrétisation détaillée dans le paragraphe [1.1]. Il est important d'avoir orienté les éléments de surface des interfaces selon des conventions décrites dans le document [U2.06.08].

3.3 Grandeurs testées et résultats

Les valeurs testées sont les modules en m des réponses aux points A (équatorial) et C (polaire) pour le rayon externe de 7 mètres.

Identification	Type référence	Référence	Tolérance
$MDXA$ ($1\ Hz$)	Non régression	2.433100E-04	0.1%
$MDZC$ ($21\ Hz$)	Non régression	0.01679100	0.1%
$MDXA$ ($1\ Hz$)	Source externe	2.648E-04	9.0%

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Synthèse des résultats

On représente sur les figures 4a et 4b le déplacement radial analytique en fonction de la fréquence comparé à ceux obtenus par le calcul aux points A, B et C (positionnés sur la figure 1.3-a ci-dessus) pour un rayon de $7m$ à l'extérieur du domaine structure en post-traitant avec *Code_Aster* .

On constate une concordance des résultats correcte dans l'ensemble. En particulier, on retrouve assez bien les fréquences de résonance en général vers $19Hz$ et $25Hz$ malgré un léger décalage et les allures de déplacements hors résonance aux points A et C dans les plans équatorial et vertical. On constate cependant une différence significative au niveau des amplitudes à la résonance liée au moins au léger décalage précédent. D'autre part, on constate au moins une autre perturbation avec une résonance parasite vers $10Hz$. Cette fréquence est la première fréquence propre de la sphère avec masse d'eau ajoutée au centre qu'on peut retrouver par un calcul d'analyse modale. Le mode correspondant est un mode de fluide incompressible différent des modes de gonflement recherchés ici. On peut atténuer cette perturbation par l'introduction du paramètre RFIC (ici valant 0.5) comme donnée de MISS3D.

L'utilisation de modes statiques contraints sur l'enveloppe externe de la sphère est donc exhaustive pour représenter des modes de gonflement à symétrie sphérique mais elle est donc également susceptible de représenter des modes d'une autre nature pouvant perturber la solution, notamment au point B où on n'a pas imposé explicitement de conditions limites pour retrouver cette symétrie sphérique des déplacements. L'introduction d'un amortissement structurel serait également de nature à diminuer les différences d'amplitude aux fréquences de résonance entre les résultats analytiques et le calcul.

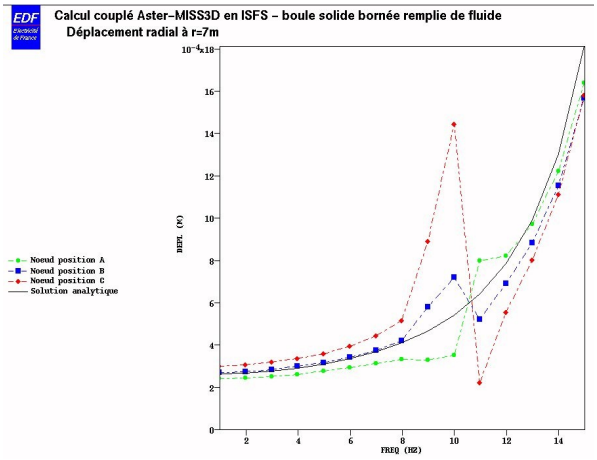
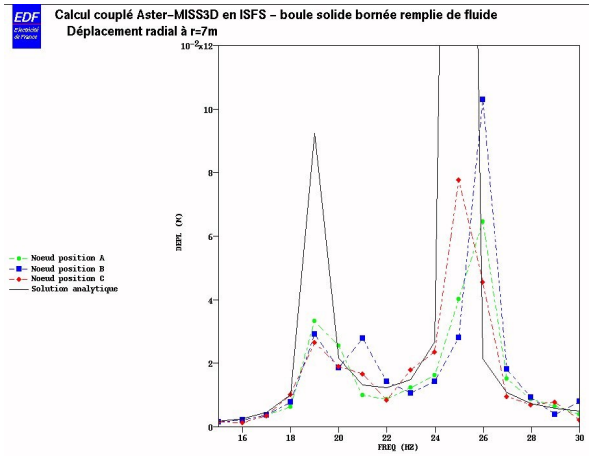


Figure 4a : déplacements analytiques et calculés du test de la sphère de dimension finie (fréq < 15Hz)



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Figure 4b: déplacements analytiques et calculés du test de la sphère de dimension finie (fréq > 15Hz)

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)