FDLL200 - Tuyauterie encastrée et libre par poutre fluide-structure

Résumé :

L'objectif est de calculer le comportement à basse fréquence d'une tuyauterie remplie d'eau. La tuyauterie a une section circulaire ; elle est encastrée à une extrémité et libre de l'autre côté.

On utilise les éléments de poutre élasto-acoustique disponible dans *Code_Aster* qui prennent en compte l'interaction fluide structure (PHENOMENE = 'MECANIQUE', MODELISATION = 'FLUI_STRU').

Les conditions aux limites sont mécaniques pour simuler l'encastrement de la structure, et acoustique pour simuler la condition de réservoir du fluide en ce point (conditions aux limites de pression nulle et de potentiel de déplacement fluide nul).

Le fluide que l'on considère est un fluide lourd de façon à mettre en exergue le phénomène de couplage entre la colonne de fluide et la structure constitutive de la tuyauterie. Les propriétés du fluide et du matériau de la structure sont choisies de manière que la célérité d'une onde se propageant dans le fluide soit la même que la célérité d'une onde mécanique se propageant dans la tuyauterie. Dans ces conditions, le premier mode de la structure résonne à la même fréquence que la colonne de fluide.

La modélisation A se base sur une section constante et une solution analytique exacte existe alors qui fournit la première fréquence propre. Sa comparaison avec les résultats produits par *Code_Aster* (recherche de valeurs propres) permet de valider la prise en compte du couplage fluide structure dans le sens longitudinal, les effets transversaux étant inexistants dans ce modèle. On teste ainsi partiellement la matrice de raideur et celle de masse.

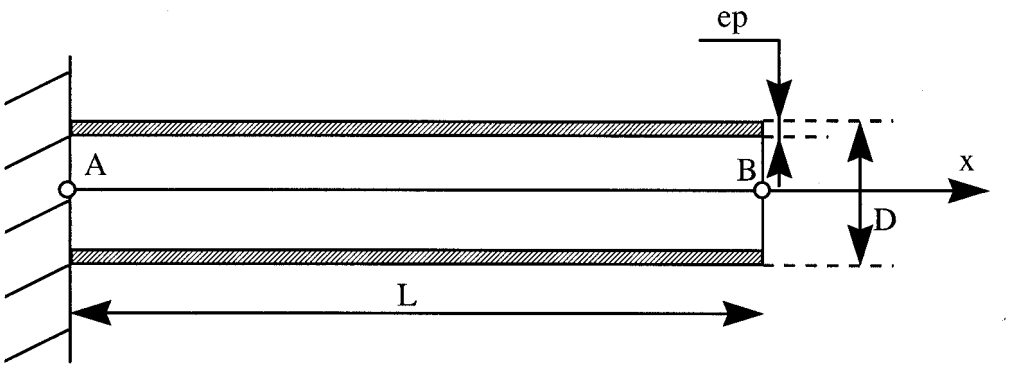
Les modélisations B et C servent à valider le cas des sections circulaires variables. Dans la première, la section est déclarée de type variable (VARI_SECT='HOMOTHETIQUE' dans AFFE_CARA_ELEM) mais les paramètres définissent une section constante. La solution est donc la même que pour la modélisation A. Dans la dernière modélisation, la section est réellement variable et on ne fait alors qu'un test de non-régression.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

La tuyauterie est un cylindre creux à section circulaire, rempli de fluide.



Caractéristiques de la tuyauterie :

longueur :	$L=1,0\,m$
diamètre extérieur :	$D=0,1\,m$
épaisseur :	$ep=0,01\,m$

Pour la modélisation C, on modifie la section qui devient variable : le diamètre varie de 0,1 à 0,11 m alors que l'épaisseur varie de 0,011 à 0,01 m.

1.2 Propriétés des matériaux

Les caractéristiques physiques du matériau constituant le tube sont les suivantes :

module d'Young : $E=1,0\cdot 10^{10}\,Pa$
coefficient de Poisson : $\nu=0,3$
masse volumique : $\rho_s=1,0\cdot 10^{4}\,kg/m^3$
célérité onde longitudinale : $c_s=\sqrt{\frac{E}{\rho_s}}=1,0\cdot 10^{3}\,m/s$

Les caractéristiques physiques du matériau fluide dans le tube sont les suivantes :

masse volumique : $\rho_f=1,0\cdot 10^{3}\,kg/m^3$
célérité du son : $c_f=1,0\cdot 10^{3}\,m/s$

1.3 Conditions aux limites et chargement

- Déplacement uniquement selon l'axe des x .
- Encastrement de la tuyauterie en l'extrémité A .
- Tuyauterie libre en l'extrémité B .
- Pour le fluide condition de réservoir en l'extrémité A .

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

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

On étudie le comportement vibratoire d'une tuyauterie remplie de fluide. La tuyauterie est encastrée à une de ses extrémités et libre à l'autre extrémité. La section de la tuyauterie est constante et circulaire. On s'intéresse aux basses fréquences du comportement longitudinal de la tuyauterie.

On définit :

longueur du tube :	L
module de Young du tuyau :	E
diamètre extérieur du tuyau :	D
épaisseur des parois :	ep
aire de la section solide :	S_s
aire de la section fluide :	S_f
célérité dans le tuyau (structure) :	c_s
célérité dans le fluide :	c_f

On a choisi les caractéristiques du fluide et du tuyau de façon à avoir la relation suivante :

$$c_f = c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho_s}} = c = 1000\, m/s$$

Dans ce cas particulier d'égalité des célérités, on montre [bib2] que la première fréquence propre du problème couplé est telle que :

$$tg\left(\frac{\omega L}{c_s}\right) = \sqrt{\frac{S_s}{S_f} \cdot \frac{E}{\rho_f c^2}}$$

Elle vaut dans ce cas : $f = 157{,}94\, Hz$

2.2 Résultats de référence

Une seule modélisation est utilisée. Le calcul des modes est en formulation u, p, φ . Il n'y a pas de solution de référence dans le cas où la section est variable (modélisation C).

2.3 Incertitude de la solution

Solution analytique.

2.4 Références bibliographiques

1. WAECKEL F., DUVAL C. : Note de principe et d'utilisation des éléments de tuyauterie implémentés dans le *Code_Aster*. Note interne R&D HP-61/92.138

2. DUVAL C. : Réponse dynamique sous excitation aléatoire dans le *Code_Aster*. Note interne R&D HP-61/92.148

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation des poutres élasto-acoustiques est en formulation u, θ, p, ϕ.
Elle est réalisée par l'affectation sur des mailles de type SEG2 (segments à 2 nœuds) d'éléments PHENOMENE = 'MECANIQUE', MODELISATION = 'FLUI_STRU'.

On affecte aux éléments les caractéristiques de section circulaire :

rayon extérieur	$R_{ext}=0,100\,m$	
épaisseur	$ep=0,010\,m$	cf. [§1.1]

On affecte également à ces éléments un matériau mixte de comportement à la fois ELAS :

module d'Young	$E=1,0.1010\,Pa$	
coefficient de poisson	$\nu=0,3$	
masse volumique	$\rho_s=1000\,kg/m^3$	

et FLUIDE :

célérité	$c=1000\,m/s$	
masse volumique	$\rho_f=1000\,kg/m^3$	cf. [§1.2]

Les degrés de liberté (DDL) de translation en y et z (DY et DZ) et tous les degrés de liberté de rotation (DRX, DRY et DRZ) de tous les nœuds sont bloqués.
Afin d'encastrer l'extrémité A de la tuyauterie, on bloque également le degré de liberté de translation en x (DX) du nœud $NO1$.
Pour le fluide la condition de réservoir à l'extrémité A est imposée par PRES = 0. et PHI = 0. au nœud $NO1$.

3.2 Caractéristiques du maillage



Le nombre total de nœuds utilisé pour ce maillage est de 26.
Les mailles sont au nombre de 25 et de type SEG2.
Le fichier de maillage est au format ASTER.

3.3 Calcul

On souhaite valider les éléments de poutre élasto-acoustique.
On calcule la fréquence du premier mode couplé axial avec l'opérateur CALC_MODES.

3.4 Valeurs testées

Le test porte sur la fréquence du premier mode axial couplé de la tuyauterie contenant un fluide.
La tolérance d'écart relatif par rapport à la valeur analytique vaut 0,1 %.

Numéro du mode	Valeur analytique
1	$157,93981\,Hz$ Valeur non régression

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

3.5 Remarque

Les valeurs de référence sont à la fois les valeurs analytiques et également celles obtenues par *Code_Aster* lors de la restitution du cas-test, ce qui permettra donc de vérifier la non régression ultérieure du code au cours de son évolution.

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

On reprend la modélisation A en modifiant uniquement la déclaration de la section de la tuyauterie. Sous le mot-clé AFFE_CARA_ELEM, on déclare un cas de section variable avec VARI_SECT='HOMOTHETIQUE', mais avec des paramètres de rayon et diamètre restant constants. On cherche ainsi à valider l'option de section variable, au sens du mot-clé, mais en retrouvant la même solution que pour la modélisation A.

4.2 Valeurs testées

Le test porte sur la fréquence du premier mode axial couplé de la tuyauterie contenant un fluide qui doit être identique à celle de la modélisation A.
La tolérance d'écart relatif par rapport à la valeur analytique vaut 0,1 %.

Numéro du mode	Valeur analytique
1	$157{,}93981\ Hz$
	Valeur non régression

4.3 Remarque

Les valeurs de référence sont à la fois les valeurs analytiques et également celles obtenues par *Code_Aster* lors de la restitution du cas-test, ce qui permettra donc de vérifier la non régression ultérieure du code au cours de son évolution.

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

On reprend la modélisation A en modifiant uniquement la section circulaire qui devient variable. Le diamètre varie de 0,1 à 0,11 m alors que l'épaisseur varie de 0,011 à 0,01 m.

5.2 Valeurs testées

Le test porte sur la fréquence du premier mode axial couplé de la tuyauterie contenant un fluide. Comme la section est variable, on ne peut plus se comparer à la solution de référence et seule la non-régression est vérifiée pour cette modélisation.

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

6 Synthèse des résultats

On constate que la valeur calculée de la fréquence du premier mode axial couplé reproduit très exactement la valeur analytique avec une précision relative de 0.004%, dans le cas d'une section constante.

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