SDLL118 - Poutre soumise à une excitation fluide-élastique axiale

Résumé :

On considère un tube en PVC placé au centre d'une enceinte cylindrique de section circulaire et soumis à l'action d'un écoulement axial d'eau. Cette configuration matérielle correspond au dispositif expérimental de Tanaka et al. [bib1] qui sert à mesurer les évolutions de fréquence et d'amortissement réduit du premier mode du tube en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement.

Le but de ce cas-test est de valider la résorption du modèle MEFISTEAU [R4.07.04] permettant de calculer les caractéristiques modales d'une structure filaire sous écoulement axial confiné, en tenant compte d'une excitation de type fluide-élastique.

Les fonctionnalités particulières à tester sont les suivantes :

- opérateur DEFI_FLUI_STRU [U4.25.01] : définition des paramètres pour la prise en compte du couplage fluide-élastique, dans le cas d'une configuration du type « faisceau de tubes sous écoulement axial » (mot-clé facteur FAISCEAU_AXIAL),
- opérateur CALC_FLUI_STRU [U47.66.02] : calcul des évolutions des fréquences et amortissements réduits modaux en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement, par la mise en œuvre du modèle MEFISTEAU.

Les résultats numériques de la simulation du dispositif de Tanaka et al. sont validés par comparaison avec les résultats expérimentaux. Compte tenu des incertitudes relativement importantes sur les valeurs expérimentales, les résultats de référence pour la non régression du code sont ceux obtenus numériquement lors de la restitution du cas-test.

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

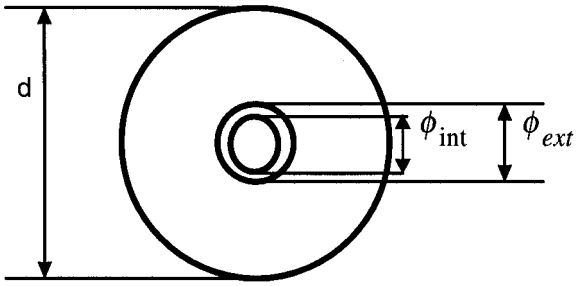
1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Le tube considéré est un cylindre creux dont les dimensions caractéristiques sont les suivantes :

longueur	$L = 1\,m$
diamètre extérieur	$\Phi_{ext} = 13\,mm$
diamètre intérieur	$\Phi_{int} = 8{,}8\,mm$

Le tube est placé au centre d'une enceinte cylindrique de section circulaire. Le diamètre intérieur de l'enceinte vaut $d = 5\,cm$.



La rugosité des parois du tube vaut $\varepsilon = 10^{-5}\,m$.

1.2 Propriétés des matériaux

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

module d'Young	$E = 2{,}80\,.\,10^{9}\,Pa$
coefficient de Poisson	$\nu = 0{,}3$
masse volumique	$\rho = 1500\,kg/m^{3}$

L'eau environnant le tube a les propriétés suivantes :

masse volumique	$\rho_{eau} = 1000\,kg/m^{3}$
viscosité cinématique	$\nu_{eau} = 1{,}1\,.\,10 - 6\,m^{2}/s$

1.3 Conditions aux limites et chargements

Les deux extrémités du tube sont reliées à des supports fixes par deux tiges métalliques. La relative souplesse de flexion de ces tiges libère les degrés de liberté de rotation des extrémités du tube. On peut donc estimer que les conditions de supportage du tube sont du type rotulé-rotulé, les tiges métalliques introduisant en chacune des extrémités une raideur de rotation supplémentaire.

En outre, ces tiges permettent d'appliquer un effort axial sur le tube, qui peut ainsi être précontraint en traction ou en compression. En pratique, deux configurations sont étudiées :

- tube non précontraint : aucun effort n'est appliqué. Cette configuration correspond à la modélisation A du cas-test,

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

- tube précontraint en compression par application d'un effort axial de $40\,N$ à une extrémité.
  Cette configuration correspond à la modélisation B du cas-test.

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

1.4 Référence bibliographique

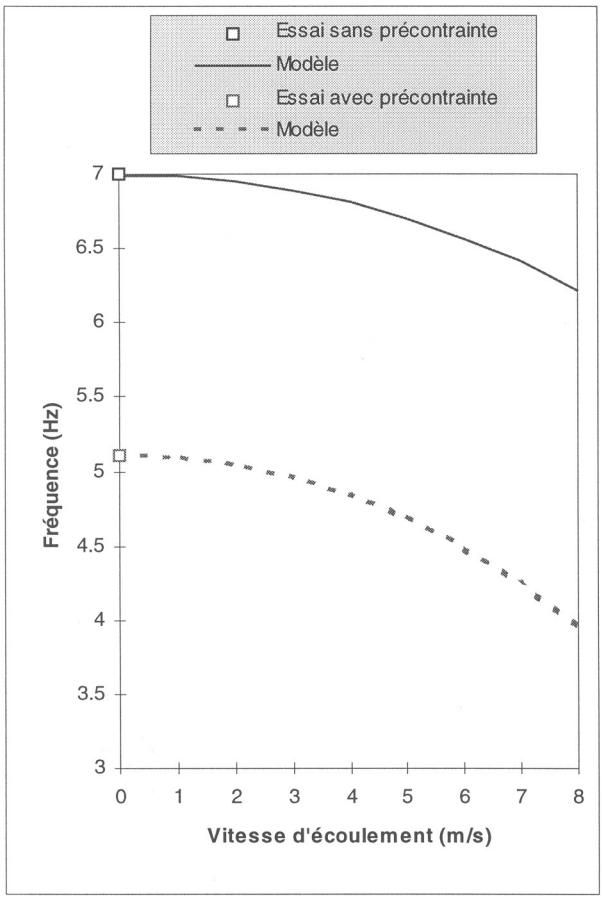
1.M. TANAKA, K. FUJITA, A. HOTTA and N. KONO : “Parallel flow-induced damping of PWR fuel assembly”, ASME Conference, Pittsburgh, PA, PVP Vol. 133 (1988)

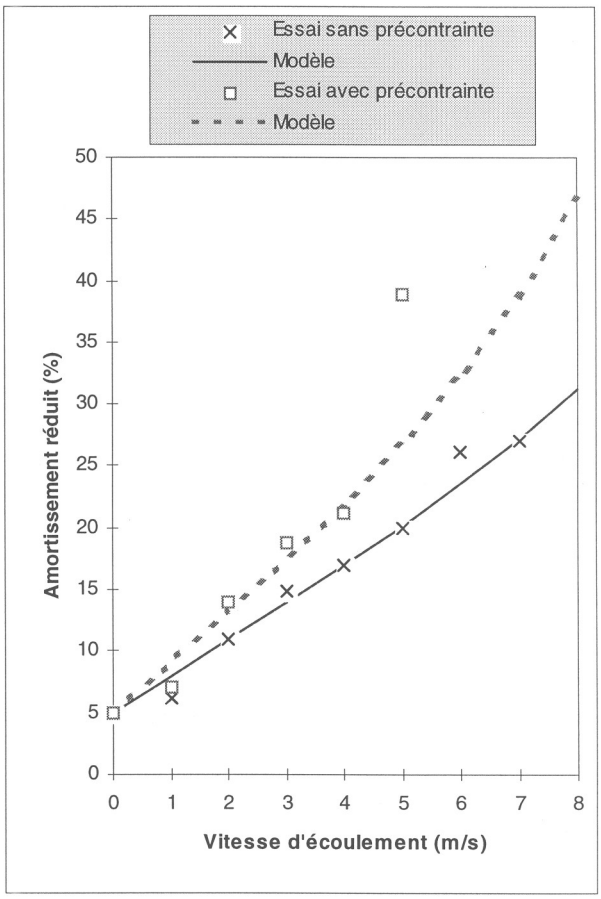
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

Les mesures expérimentales effectuées sur le dispositif de Tanaka et al. fournissent les valeurs de référence pour la validation du modèle.

Les deux graphiques ci-dessous, représentant les évolutions de la fréquences et de l'amortissement réduit du premier mode double de flexion en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement, permettent de comparer les résultats du modèle aux résultats expérimentaux.





Compte tenu des incertitudes sur les mesures, la tolérance d'écart relatif pour la validation du modèle est assez large. C'est pourquoi les mesures expérimentales ne peuvent servir de valeurs de référence pour le cas-test, une tolérance plus étroite étant requise pour garantir la non régression du code. Les valeurs de référence utilisées sont donc celles obtenues numériquement lors de la restitution du cas-test.

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Le tube est représenté par 100 éléments de poutres droites de Timoshenko (MECA_POU_D_T), supportés par autant de mailles segments à 2 nœuds (SEG2). Deux éléments MECA_DIS_TR sont ajoutés aux nœuds extrémités du tube, permettant de modéliser les tiges métalliques par des raideurs de rotation discrètes.

On effectue aux éléments de poutre les caractéristiques de section circulaire :

rayon extérieur	$R_{ext}=6,5.10^{-3}m$	
épaisseur	$E=2,1.10^{-3}m$	(cf paragraphe [§1.1])

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

module d'Young	$E=2,80.10^{9}Pa$	
coefficient de Poisson	$\nu=0,3$	
masse volumique	$\rho=1500kg/m^{3}$	(cf paragraphe [§1.2])

On affecte aux éléments discrets une même raideur de rotation autour des deux axes orthogonaux à la fibre neutre du tube :

$$K_r=6,29\,Nm/rad$$

Cette raideur de rotation a été ajustée afin de retrouver la fréquence propre du premier mode double en air.

Les degrés de liberté en translation DX et DZ des nœuds extrémités $N1$ et $N101$ sont bloqués afin d'interdire un mouvement de corps rigide du tube (mouvement de translation axiale). On bloque également le DY du nœud $N1$. De plus, en chaque nœud, on bloque le degré de liberté de rotation DRY, afin d'interdire tout mouvement de torsion.

Le tube est immergé dans une enceinte cylindrique de $2,5\,cm$ de rayon intérieur (cf paragraphe [§1.1]). Les profils de masse volumique et de viscosité cinématique de l'eau environnante sont supposés constants le long du tube :

masse volumique	$\rho_{eau}=1000kg/m^{3}$	
viscosité cinématique	$\nu_{eau}=1,1.10^{-6}m^{2}/s$	(cf paragraphe [§1.2])

Aucun effort axial n'est appliqué au tube qui n'est donc pas précontraint.

Les évolutions de la fréquence et de l'amortissement réduit du premier mode double de flexion sont calculées pour une plage de vitesses moyennes d'écoulement de 0 à $8\,m/s$, par pas de $1\,m/s$.
On tient compte d'un amortissement réduit initial du tube du 4,8 %.

3.2 Caractéristiques du maillage

Le nombre total de nœuds utilisé pour le maillage est de 101.
Les mailles (de type SEG2) sont au nombre de 100.
Le fichier de maillage est au format ASTER.

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

3.3 Etapes de calcul

La validation des opérateurs de couplage fluide-structure, pour des configurations du type « faisceau de tubes sous écoulement axial » est faite en deux étapes principales.

La première consiste à définir les paramètres de prise en compte du couplage fluide-structure avec l'opérateur DEFI_FLUI_STRU suivi du mot-clé FAISCEAU_AXIAL.
La seconde est le calcul des évolutions de fréquence et d'amortissement réduit modaux en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement, avec l'opérateur CALC_FLUI_STRU et par la mise en œuvre du modèle MEFISTEAU.

3.4 Valeurs testées

Les tests portent sur la fréquence et l'amortissement réduit du premier mode double de flexion du tube, à la vitesse moyenne d'écoulement de $0 m/s$ et $4 m/s$. On effectue 2 types de test :

1) un test de comparaison avec les mesures expérimentales,
2) un test pour garantir la non régression du code.

3.4.1 Fréquence du premier mode double de flexion

1) Test de comparaison avec l'expérience, à la vitesse d'écoulement de $0 m/s$:

La tolérance d'écart relatif par rapport à la valeur expérimentale vaut 0,1 %.

Numéro du mode	Valeur expérimentale	Valeur calculée	Ecart relatif
1	7 Hz	7.000871 Hz	1.2E-02%
2	7 Hz	7.000871 Hz	1.2E-02%

3.4.2 Amortissement réduit du premier mode double de flexion

1) Test de comparaison avec l'expérience, à la vitesse d'écoulement de 4 m/s :

La tolérance d'écart relatif par rapport à la référence vaut 1 %.

Numéro du mode	Valeur expérimentale	Valeur calculée	Ecart relatif
1	17 %	17 %	0,2 %
2	17 %	17 %	0,2 %

3.5 Remarques

Les valeurs de référence sont celles obtenues par *Code_Aster* lors de la restitution du cas-test, ce qui permet donc de vérifier la non régression 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

La modélisation B est identique à la modélisation A (cf paragraphe [§3.1]), mais cette fois le tube est précontraint en compression.

Un effort axial de compression de $23,7N$ est appliqué au nœud extrémité $N101$. L'intensité de l'effort a donc été réajustée par rapport à la valeur expérimentale fournie de $40N$, afin de retrouver correctement la valeur de fréquence du premier mode double en air (cf paragraphes [§1.2], [§1.3]). Ce réajustement peut s'appliquer par la modélisation sommaire des tiges métalliques assurant le supportage et la mise en compression.

On déduit de l'effort nodal le vecteur d'efforts élémentaires, puis un vecteur assemblé qui est construit selon la numérotation des degrés de liberté du tube. La déformée statique due à la mise en compression est alors obtenue en multipliant le vecteur assemblé par l'inverse de la matrice de rigidité structurelle. A l'aide de cette déformée statique, on calcule ensuite un champ de contrainte aux éléments, duquel est déduite une matrice de rigidité géométrique. Celle-ci est alors ajoutée à la matrice de rigidité structurelle afin d'obtenir la matrice de rigidité du tube en compression, qui est finalement utilisée pour le calcul des modes en air.

Les évolutions de la fréquence et de l'amortissement réduit du premier mode double de flexion sont calculées pour une plage de vitesses moyennes d'écoulement de 0 à $8m/s$, par pas de $1m/s$. On tient compte d'un amortissement réduit initial du tube de 4,3%.

4.2 Caractéristiques du maillage

Les caractéristiques du maillage de cette seconde modélisation sont les mêmes que celles de la modélisation A, soit :
101 nœuds utilisés et 100 mailles de type SEG2.

Le fichier de maillage est au format ASTER.

4.3 Etapes de calcul

De même que pour la modélisation A, les fonctionnalités à valider sont celles des opérateurs de couplage fluide-structure pour des configurations du type « faisceau de tubes sous écoulement axial » (cf paragraphe [§3.3]).

En outre, la modélisation B permet de tester d'autres fonctionnalités.
La première permet de réaliser le calcul d'un champ de déplacements aux nœuds par inversion de la matrice de rigidité structurelle et produit de l'inverse par un vecteur d'effort assemblé, avec les opérateurs FACTORISER et RESOUDRE.
La seconde permet le calcul d'une matrice de rigidité géométrique à l'aide d'un champ de contrainte aux éléments, avec l'opérateur CALC_MATR_ELEM, option RIGI_GEOM.

4.4 Valeurs testées

Les tests portent sur la fréquence et l'amortissement réduit du premier mode double de flexion du tube, à la vitesse moyenne d'écoulement de $0m/s$ et $4m/s$. On effectue 2 types de test :

1) un test de comparaison avec les mesures expérimentales,
2) un test pour garantir la non régression du code.

4.4.1 Fréquence du premier mode double de flexion

1) Test de comparaison avec l'expérience, à la vitesse d'écoulement de $0m/s$:

La tolérance d'écart relatif par rapport à la référence vaut 0,1 %.

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

Numéro du mode	Valeur expérimentale	Valeur calculée	Ecart relatif
1	5,1 Hz	5.10426 Hz	8.4E-02%
2	5,1 Hz	5.10426 Hz	8.4E-02%

4.4.2 Amortissement réduit du premier mode double de flexion

1) Test de comparaison avec l'expérience, à la vitesse d'écoulement de $4\,m/s$:

La tolérance d'écart relatif par rapport à la référence vaut 10 %.

Numéro du mode	Valeur expérimentale	Valeur calculée	Ecart relatif
1	21,10%	21,94%	4,00%
2	21,10%	21,94%	4,00%

4.5 Remarques

Les valeurs de référence sont celles obtenues par *Code_Aster* lors de la restitution du cas-test, ce qui permet de vérifier la non régression du code au cours de son évolution.

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