SDLL110 - Poutre longue en porte-à-faux sous excitations fluide-élastique et turbulente : essais ANL

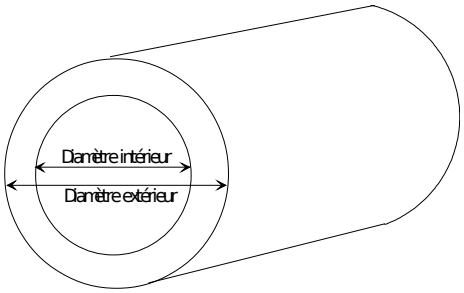
Résumé :

Ce cas-test s'inscrit dans le cadre de la résorption du logiciel FLUSTRU [bib1] [bib2]. Il s'appuie sur deux séries de résultats d'essais obtenues à l'issue d'une campagne réalisée par le laboratoire ANL (Argonne National Laboratory - USA) [bib3]. Compte tenu de la configuration de cette campagne, la comparaison calculs-essais permet de valider le calcul par une méthode fréquentielle de la réponse vibratoire linéaire d'une structure tubulaire de type poutre sur appuis et en porte-à-faux, soumise à un écoulement externe transverse sur une partie de sa longueur. Dans un premier temps, on détermine les effets du couplage fluide-élastique sur le comportement dynamique de la poutre. Ceux-ci se traduisent par une variation des valeurs des fréquences propres, des amortissements modaux et du niveau de réponse vibratoire de la poutre, en fonction de la vitesse de l'écoulement. La comparaison calculs-essais porte sur le niveau de réponse vibratoire. Ce cas-test vise par ailleurs à prévenir la régression éventuelle de l'une ou l'autre des fonctionnalités mises en œuvre dans un calcul de ce type.

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

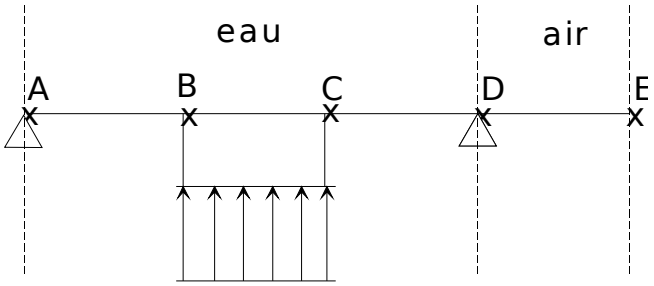
1 Problème de référence

1.1 Géométrie



Tube droit de section circulaire creuse :

Diamètre extérieur du tube : $15{,}90\ mm$
Diamètre intérieur du tube : $12{,}72\ mm$



Longueur totale du tube : $1{,}350\ m$

Longueur de la partie AB : $0{,}305\ m$
Longueur de la partie BC : $0{,}300\ m$
Longueur de la partie CD : $0{,}305\ m$
Longueur de la partie DE : $0{,}440\ m$

1.2 Propriétés des matériaux

Les valeurs des grandeurs physiques caractéristiques des éléments de la structure sont :

Tube en laiton :

$$E = 1{,}1\,10^{11}\ N/m^2 \qquad \nu = 0{,}3 \qquad \rho = 8330\ kg/m^3$$

Fluide interne : air

$$\rho_i = 1{,}3\ kg/m^3$$

Fluide externe : tube immergé en eau sur la partie de sa longueur comprise entre les deux appuis,
tube immergé en air sur la partie de sa longueur en porte-à-faux,
écoulement transverse incident sur la partie BC du tube.

$\rho_e = 1000{,}0\ kg/m^3$ ou $1{,}3\ kg/m^3$ en fonction de la zone externe

Une masse volumique équivalente est attribuée à la structure lors du calcul de sa base modale en fluide au repos ; cette masse volumique équivalente englobe la masse volumique du fluide interne, celle de la structure et celle fluide externe ; l'effet inertiel de ce dernier est évalué par l'intermédiaire d'un coefficient de masse ajoutée.

1.3 Conditions aux limites et chargements

La poutre est simplement appuyée aux points A et D. Un chargement aléatoire réparti, transverse au tube, est imposé sur le tronçon BC. Ce chargement est défini, d'une part à l'aide d'un profil de vitesse le long de la zone excitée, et d'autre part à l'aide d'un spectre adimensionnel d'excitation.

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

2 Solution de référence

2.1 Résultats expérimentaux de référence

Des résultats expérimentaux de référence sont disponibles pour ce cas-test ; il s'agit des résultats issus de deux séries d'essais de la campagne ANL [bib3].

2.2 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Voir référence [bib1].

2.3 Résultats de référence

Après avoir validé le calcul en comparant ses résultats aux résultats expérimentaux de référence issus de la campagne d'essais, on attribue aux résultats du calcul le statut de valeurs de référence afin de pouvoir vérifier la non régression du code lors des restitutions futures. Ces valeurs de référence sont valables à compter de la version NEW 5.03.10 de *Code_Aster*.

2.4 Incertitude sur la solution

Les écarts relatifs tolérés sur les valeurs calculées sont très faibles de manière à ce que le cas-test serve également à s'assurer de la non régression future du logiciel lors des restitutions futures.

2.5 Références bibliographiques

1. N. GAY : "Logiciel FLUSTRU, version 3.0.1, Note de principe - HT-32/97/014/A
2. N. GAY : "Logiciel FLUSTRU, version 3.0.1, Cahier de validation" - HT-32/97/017/A
3. S.S. CHEN : "Experiments on fluid elastic instability in tube banks subjected to liquid cross flow", Journal of Sound and Vibration, 1981, Vol. 78, n°3, pp. 355-381

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 modélisé à l'aide d'éléments de poutre droite de Timoshenko : POU_D_T. Il est décomposé en 270 éléments répartis sur quatre tronçons. Les tronçons AB et CD comprennent chacun 61 éléments, le tronçon BC, 60 éléments et le tronçon DE, 88. Aux points A et D les degrés de liberté sont bloqués dans les directions x, y et z en translation, et dans la direction z en rotation. Conformément aux résultats de la première série d'essais, l'amortissement en fluide au repos est pris égal à 1,3 % et le coefficient de masse ajoutée vaut 2,0711.

3.2 Caractéristiques du maillage

Le nombre total de nœuds utilisé pour ce maillage est de 271.
Les mailles, de type SEG2, sont au nombre de 270.
Le fichier de maillage est rédigé au format ASTER.

3.3 Étapes de calcul

Le profil de vitesse de l'écoulement et les paramètres prenant en compte le couplage fluide-structure sont définis à l'aide des opérateurs DEFI_FONC_FLUI et DEFI_FLUI_STRU. On calcule les paramètres modaux de la structure en prenant en compte les forces fluide-élastiques à l'aide de l'opérateur CALC_FLUI_STRU. La définition de l'excitation aléatoire est effectuée en faisant appel à l'opérateur DEFI_SPEC_TURB. L'excitation est projetée sur la base modale à l'aide de l'opérateur PROJ_SPEC_BASE. Les interspectres de réponse modale sont calculés à l'aide de l'opérateur DYNA_SPEC_MODAL. On en déduit les autospectres de déplacement aux nœuds en faisant appel à l'opérateur REST_SPEC_PHYS.
On ne peut faire le calcul de réponse spectrale que pour une vitesse de l'écoulement à la fois, ainsi ces trois dernières étapes (PROJ_SPEC_BASE, DYNA_SPEC_MODAL, REST_SPEC_PHYS) sont réalisées dans une boucle, dans le fichier de commande, où on parcourt la liste des vitesses de l'écoulement.

3.4 Valeurs testées

La [Figure 5.1-a] présente une comparaison du déplacement RMS au point E, exprimé en pourcentage du diamètre extérieur du tube, entre :

- d'une part la première série d'essais ANL qui a porté sur 3 des tubes instrumentés du faisceau de tubes en similtude d'un faisceau de générateur de vapeur,
- et d'autre part la simulation à l'aide de *Code_Aster*.

Ces résultats sont présentés en fonction de la vitesse intertube de l'écoulement incident, exprimée en m/s. Les résultats expérimentaux ont été obtenus pour des valeurs discrètes de vitesses d'écoulement. Le calcul ayant été mené pour 201 valeurs de vitesses équiréparties sur l'intervalle $[0.5 - 2.5 m/s]$, le déplacement calculé apparaît comme une courbe continue dans la gamme explorée de vitesses. Expérimentalement comme dans le calcul, on constate l'existence d'une forte augmentation du déplacement RMS. Cette augmentation est associée à une instabilité vibratoire du système dynamique, associée à l'annulation de son amortissement. La vitesse d'écoulement à laquelle se produit cette augmentation est la vitesse d'instabilité du système. Le calcul permet d'estimer cette vitesse à $2 m/s$ alors que le constat expérimental pronostique une valeur supérieure à $1,8 m/s$ (les essais d'instabilité sont souvent arrêtés avant que l'instabilité ne soit atteinte pour éviter l'endommagement des structures). Dans cette configuration, l'écart calcul-mesure sur ce

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

résultat essentiel pour la maintenance des tubes de générateurs de vapeur est donc de l'ordre de 10%.

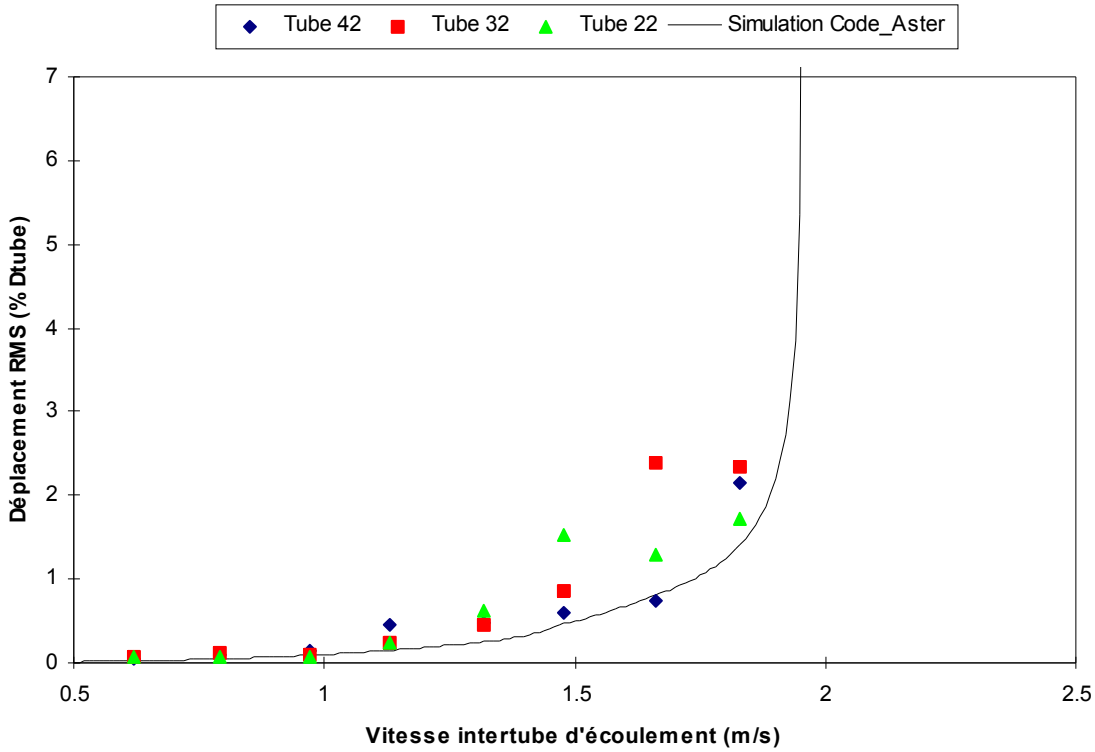


Figure 5.1-a : Déplacement RMS au point E, en fonction de la vitesse intertube d'écoulement, exprimé en pourcentage du diamètre extérieur du tube.

3.5 Remarques

Les déformées modales sous écoulement sont supposées demeurer inchangées par rapport à celles calculées en fluide au repos.

3.6 Tests de non régression

Pour assurer la non régression du code, on utilise les opérateurs TEST_FONCTION et TEST_TABLE dans le fichier de commande. Ces deux opérateurs permettent de tester respectivement, d'une part les valeurs des fréquences propres et des amortissements réduits, et d'autre part le déplacement RMS. La tolérance est fixée à 1E–03 %.

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Les caractéristiques de la modélisation B sont identiques à celles de la modélisation A, à l'exception de l'amortissement en fluide au repos et du coefficient de masse ajoutée auxquels, conformément aux résultats de la deuxième série de d'essais, ont attribue les valeurs respectives de 1,1% et de masse ajoutée de 2,01188.

4.2 Caractéristiques du maillage

Identiques à celles de la modélisation A.

4.3 Étapes de calcul

Identiques à celles de la modélisation A.

4.4 Fonctionnalités testées

Identiques à celles de la modélisation A.

4.5 Valeurs testées

La deuxième série d'essais diffère de la première essentiellement par la valeur de l'amortissement du système dynamique couplé en fluide au repos ; ce dernier n'est plus de 1.1 % mais de 1.3%. La [Figure 6.1-a] présente la comparaison calcul/essais pour cette nouvelle configuration. L'instabilité vibratoire du tube se traduit par une brusque et forte augmentation du déplacement RMS calculé. La vitesse à laquelle se produit cette augmentation est la vitesse d'instabilité du système. Le calcul permet d'estimer cette vitesse à $1.85 m/s$ alors que le constat expérimental est plus proche de $1,95\ m/s$. L'écart calcul/mesure pour ce résultat essentiel est donc de l'ordre de 5% pour cette autre configuration.

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

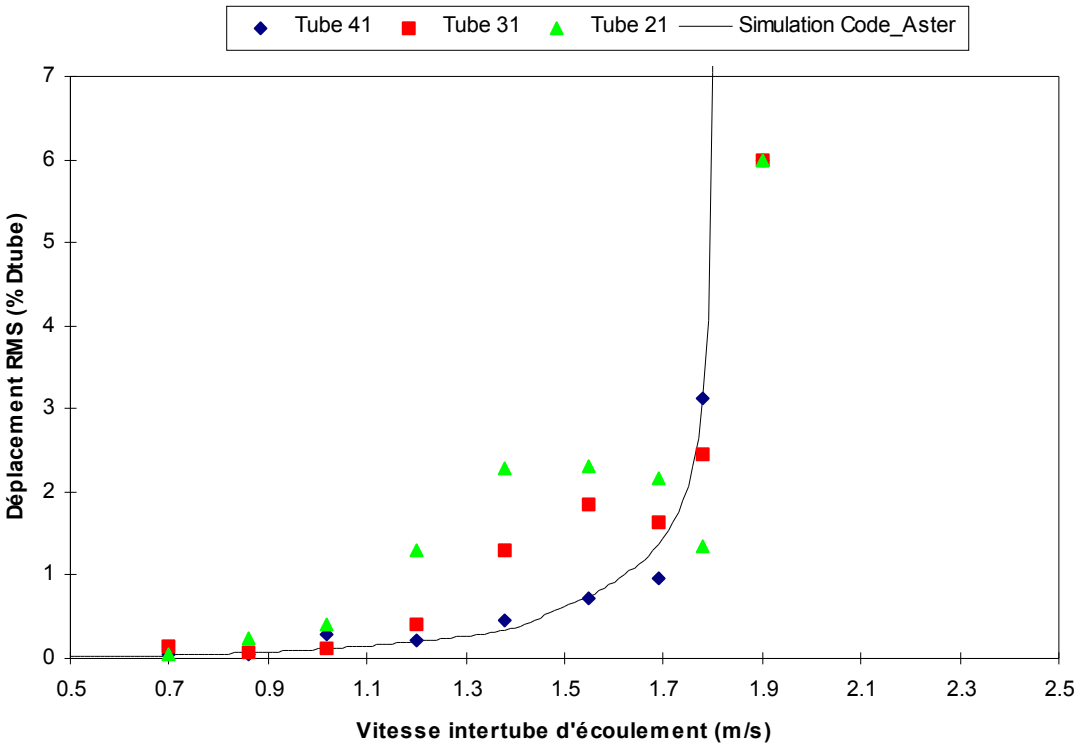


Figure 6.1-a : Déplacement RMS en fonction de la vitesse intertube d'écoulement, exprimé au point E en pourcentage du diamètre extérieur du tube.

4.6 Remarques

Les déformées modales sous écoulement sont supposées demeurer inchangées par rapport à celles calculées fluide au repos.

4.7 Tests de non régression

Pour assurer la non régression du code, on utilise les opérateurs TEST_FONCTION et TEST_TABLE dans le fichier de commande. Ces deux opérateurs permettent de tester respectivement, d'une part les valeurs des fréquences propres et des amortissements réduits, et d'autre part le déplacement RMS. La tolérance est fixée à 1E–03 %.

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

5 Conclusion

Ce cas-test contribue à la vérification de la validité du calcul par la méthode fréquentielle disponible dans *Code_Aster* de la réponse vibratoire linéaire d'une structure tubulaire de type poutre simplement appuyée en porte-à-faux, soumise à un écoulement externe transverse sur une partie de sa longueur. Il s'appuie sur deux séries de résultats expérimentaux obtenus lors d'une campagne d'essais réalisée par le laboratoire ANL (USA). Il apparaît que pour cette configuration, la vitesse d'instabilité du système dynamique, une grandeur très importante dans l'optimisation de la maintenance des tubes de générateurs de vapeur, est approchée de 5 à 10 % près. Par ailleurs, le cas-test aboutit à des résultats qui seront utilisés en tant que valeurs de référence pour éviter la régression des principaux opérateurs employés dans le calcul vibratoire des tubes de générateurs de vapeur.

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