# SDLL119 - Faisceau de poutres sous excitation fluide-élastique axiale

**Résumé**

On considère un faisceau à pas carré de $3\times3$ tubes en aluminium, placé dans une enceinte rectangulaire et soumis à l'action d'un écoulement axial d'eau. Les tubes contiennent des pastilles de plomb et sont maintenus entre eux à mi-hauteur par des cordes à piano. Cette configuration matérielle correspond au dispositif expérimental de Hotta et al. [bib1] qui sert à mesurer les évolutions de fréquence et d'amortissement réduit du premier mode de flexion du faisceau, 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'un faisceau de poutres sous écoulement axial confiné, en tenant compte d'une excitation de type fluide-élastique.

Les fonctionnalités à tester sont les suivantes :

- opérateur DEFI_FLUI_STRU [U4.80.08] : 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 [U4.80.03] : 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.

Ces fonctionnalités doivent être testées avec la représentation complète du faisceau et avec une représentation simplifiée.

Les résultats numériques de la simulation du dispositif de Hotta 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 de *Code_Aster* 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

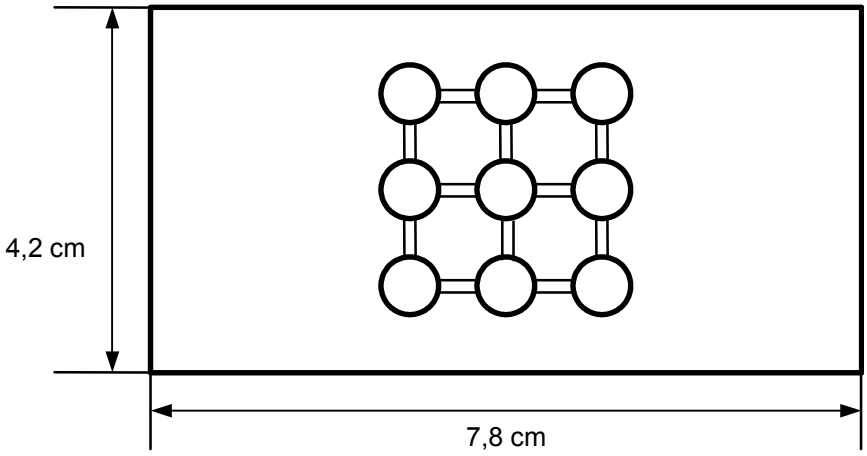
## 1.1 Géométrie

Les tubes du faisceau sont des cylindres creux dont les dimensions caractéristiques sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| longueur | $L=1,2\,m$ |
| diamètre extérieur | $\Phi_{ext}=9,5\,mm$ |
| diamètre intérieur | $\Phi_{int}=8,5\,mm$ |

Les cordes à piano maintenant les tubes entre eux à mi-hauteur sont assimilées à des cylindres pleins de $2\ mm$ de diamètre.

Le faisceau est à pas carré de $12,6\ mm$ . Il est composé de $3\times3$ tubes et est placé au centre d'une enceinte rectangulaire de dimensions $7,8\ cm\times4,2\ cm$ .




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

## 1.2 Propriétés des matériaux

Les caractéristiques physiques de l'aluminium constituant les tubes sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| module d'Young | $E_{alu}=6,89.10^{10}\,Pa$ |
| coefficient de Poisson | $\nu_{alu}=0,3$ |

Les tubes contenant des pastilles de plomb, on doit définir une masse volumique équivalente rapportée à leur section : $\rho_{eq}=20450\,kg/m^3$

Les cordes maintenant les tubes entre eux à mi-hauteur sont en acier, dont les caractéristiques physiques sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| module d'Young | $E_{acier}=2,1.10^{11}\,Pa$ |
| coefficient de Poisson | $\nu_{acier}=0,3$ |
| masse volumique | $\rho_{acier}=7800\,kg/m^3$ |

L'eau environnante a les propriétés suivantes :

| | |
|---|---|
| masse volumique | $\rho_{eau}=1000\,kg/m^3$ |
| viscosité cinématique | $\nu_{eau}=1,1.10^{-6}\,m^2/s$ |



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

## 1.3 Conditions aux limites et chargements

Les extrémités de chaque tube sont reliées à des supports fixes par des tiges métalliques. La relative souplesse de flexion de ces tiges libère les degrés de liberté (DDL) de rotation des extrémités de chaque tube. On peut donc estimer que les tubes sont rotulés-rotulés, les tiges métalliques introduisant en chaque extrémité une raideur de rotation supplémentaire.

En outre, ces tiges permettent d'appliquer un effort axial sur les tubes, qui peuvent ainsi être précontraints en traction ou en compression. La configuration étudiée correspond au faisceau de tubes précontraints en compression par application d'un effort axial de $50\ N$ en chacune des extrémités supérieures des tubes.

## 1.4 Références bibliographiques

1.A. HOTTA, H. NIIBORI, M. TANAKA and K. FUJITA : «Parametric study on parallel flow-induced damping of PWR fuel assembly», ASME Conference, Nashville, TN, PVP Vol.191 (1990)

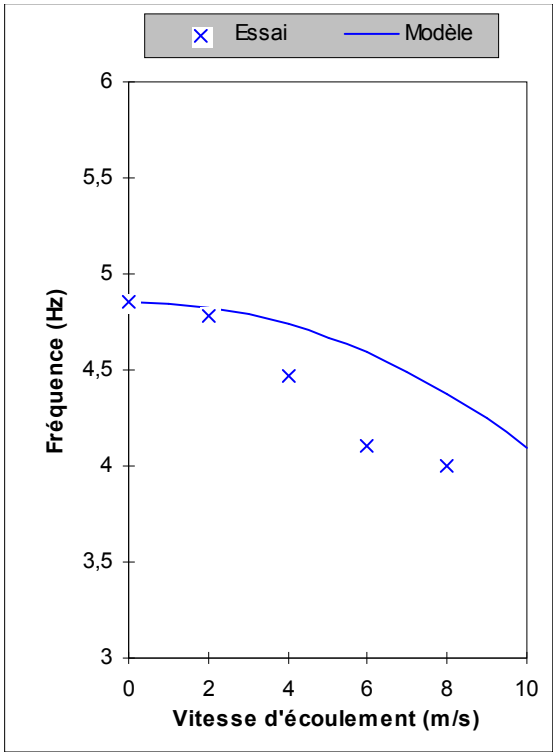


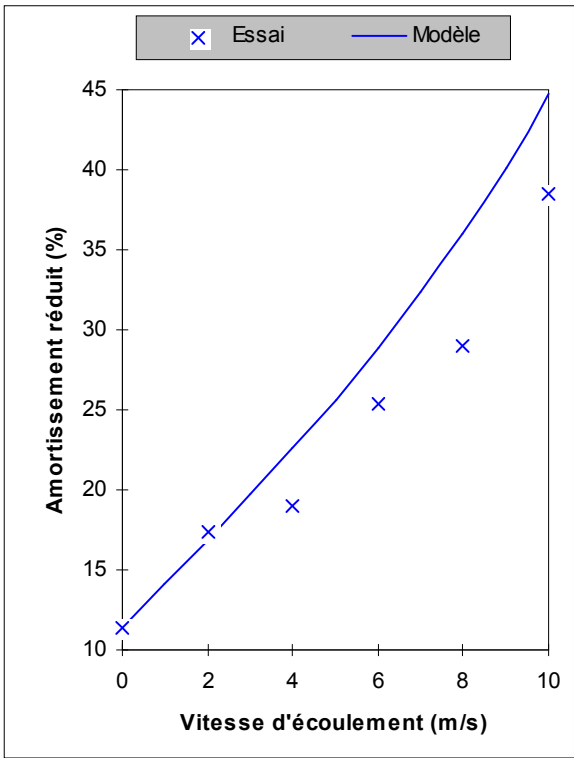
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 2 Solution de référence

Les mesures expérimentales effectuées sur le dispositif de Hotta et al. constituent les valeurs de référence pour la validation du modèle. Les caractéristiques vibratoires étudiées sont celles du premier mode vibrant suivant le plus grand côté de l'enceinte.

Les deux graphiques ci-dessous représentent les évolutions de la fréquence et de l'amortissement réduit en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement, pour le premier mode de flexion du faisceau se déformant suivant le plus grand côté de l'enceinte. Les modes de flexion du faisceau sont des modes doubles en air ; la dissymétrie du couplage fluide-structure les sépare sous écoulement et les oriente suivant les côtés de l'enceinte. Ces graphiques permettent la comparaison des résultats du modèle avec les mesures expérimentales.




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

Chacun des tubes du faisceau est représenté par 50 éléments de poutre droite de Timoshenko (MECA_POU_D_T), supportés par autant de mailles de type SEG2 (segments à 2 noeuds).
Un élément MECA_DIS_TR est ajouté en chaque noeud extrémité ; ces éléments permettent de modéliser les tiges métalliques par des raideurs de rotation discrètes.

On affecte aux éléments des tubes les caractéristiques de section circulaire :

| | | |
|---|---|---|
| rayon extérieur | $R_{ext}=4,75.10^{-3}m$ | |
| épaisseur | $e=5.10^{-4}m$ | (cf paragraphe [§1.1]) |

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

| | | |
|---|---|---|
| module d'Young | $E=6,89.10^{10}Pa$ | |
| coefficient de Poisson | $\nu=0,3$ | |
| masse volumique | $\rho=20450\,kg/m^3$ | (cf paragraphe [§1.2]) |

On affecte aux éléments discrets une même raideur de rotation autour des deux axes orthogonaux à l'axe directeur du faisceau :

$$K_r=6,29\,N.m/rad$$

Cette raideur de rotation a été ajustée afin de retrouver correctement la valeur de fréquence du premier mode double de flexion en air du faisceau.

Chaque corde à piano est représentée par un élément MECA_POU_D_T. On affecte à ces éléments la caractéristique d'une section circulaire pleine $R=10^{-3}m$ (cf paragraphe [§1.1]) et un matériau de comportement ELAS :

| | | |
|---|---|---|
| module d'Young | $E=2,1.10^{11}Pa$ | |
| coefficient de Poisson | $\nu=0,3$ | |
| masse volumique | $\rho=7800\,kg/m^3$ | (cf paragraphe [§1.2]) |

Les degrés de liberté de translation en $y$ et $z$ ( $DY$ et $DZ$ ) des noeuds aux extrémités de chaque tube sont bloqués. Afin d'interdire un mouvement de corps rigide (mouvement de translation axiale), on bloque également les degrés de liberté $DX$ des noeuds aux extrémités inférieures de chaque tube. Enfin, en chaque noeud, on bloque le degré de liberté de rotation $DRX$ pour interdire tout mouvement de torsion.

Un effort axial de compression de $26,7\ N$ est appliqué en chacun des noeuds aux extrémités supérieures des tubes. L'intensité de l'effort a donc été réajustée afin de retrouver correctement la valeur de la fréquence du premier mode double de flexion en air du faisceau. Ce réajustement peut s'expliquer par la modélisation sommaire des tiges métalliques assurant le supportage et la mise en compression.

On déduit des efforts nodaux les vecteurs élémentaires d'effort, puis un vecteur assemblé qui est construit selon la numérotation des degrés de liberté de la structure complète. La déformée statique due à la mise en compression des tubes 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 contraintes 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 après la mise en compression des tubes, qui est finalement utilisée pour le calcul des modes en air.



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

Le faisceau est immergé dans une enceinte rectangulaire de dimensions $7,8\ cm \times 4,2\ cm$ (cf paragraphe [§2.1]). Les profils de masse volumique et de viscosité cinématique de l'eau environnante sont constants le long des tubes :

masse volumique $\rho_{eau} = 1000\, kg/m^3$

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

Les évolutions de la fréquence et de l'amortissement réduit des deux premiers modes de flexion du faisceau sont calculées pour des vitesses moyennes d'écoulement variant de $0$ à $10\ m/s$ par pas de $1\ m/s$ . On tient compte d'un amortissement réduit initial de 12,3 %.

## 3.2 Caractéristiques du maillage

Le nombre total de noeuds utilisé pour ce maillage est de 459.
Les mailles sont au nombre de 470 et de type SEG2.
Le fichier de maillage est au format ASTER.

## 3.3 Etapes de calcul

Les fonctionnalités que l'on souhaite valider sont celles des opérateurs de couplage fluide-structure, pour des configurations du type «faisceau de tubes sous écoulement axial».
Dans un premier temps, on définit les paramètres de prise en compte du couplage fluide-élastique, avec l'opérateur DEFI_FLUI_STRU mot-clé facteur FAISCEAU_AXIAL.
Ensuite, on effectue le calcul des évolutions des fréquences et amortissements réduits 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.

La modélisation A permet de tester ces fonctionnalités avec la représentation complète du faisceau. En plus des opérateurs de couplage fluide-structure, d'autres modules de résolution et de calcul mécanique sont utilisés.
Dans notre cas, on calcule le champ de déplacements aux noeuds par inversion de la matrice de rigidité structurelle et multiplication de la matrice inverse obtenue par un vecteur d'effort assemblé avec les opérateurs FACTORISER et RESOUDRE.
Puis, on calcule la matrice de rigidité géométrique à l'aide d'un champ de contraintes aux éléments avec l'opérateur CALC_MATR_ELEM, option RIGI_GEOM.

## 3.4 Valeurs testées

Les tests portent sur les fréquences et amortissements réduits des deux premiers modes de flexion du faisceau, à la vitesse moyenne d'écoulement de $4\ m/s$ .
Les mesures expérimentales ne concernent que les caractéristiques du premier mode de flexion vibrant suivant le plus grand côté de l'enceinte. Ce mode est le premier déterminé par le calcul. On effectue deux types de test :

- un test de comparaison avec les mesures expérimentales sur le premier mode,
- un test portant sur les deux premiers modes afin de garantir la non régression du code.

### 3.4.1 Fréquences des deux premiers modes de flexion du faisceau

- Test de comparaison avec l'expérience sur le premier mode :

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

| Numéro du mode | Valeur expérimentale | Valeur calculée | Ecart relatif |
|---|---|---|---|
| 1 | 4,47 $Hz$ | 4,735 $Hz$ | 5,90% |



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

### 3.4.2 Amortissements réduits des deux premiers modes de flexion du faisceau

- Test de comparaison avec l'expérience sur le premier mode :

La tolérance d'écart relatif par rapport à la valeur expérimentale vaut 20 %.

| Numéro du mode | Valeur expérimentale | Valeur calculée | Ecart relatif |
|---|---|---|---|
| 1 | 19 % | 22,6474% | +19,20 % |

## 3.5 Remarques

Les valeurs de référence sont 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

La modélisation B est identique à la modélisation A (cf paragraphe [§3.1]), mais on utilise cette fois une représentation simplifiée du faisceau.

On désigne un groupe de mailles correspondant à l'un des tubes, qui définit la seule classe d'équivalence pour tous les tubes du faisceau. La géométrie du faisceau est définie en donnant les coordonnées des centres des tubes dans le plan orthogonal au faisceau. On suppose ensuite, dans la résolution du couplage fluide-structure, que tous les tubes ont la même déformée modale, qui est celle du tube définissant la classe d'équivalence. En effet, le mode étudié correspond à un mouvement d'ensemble des tubes du faisceau.

Les évolutions de la fréquence et de l'amortissement réduit des deux premiers modes de flexion du faisceau sont calculées pour des vitesses moyennes d'écoulement variant de $0$ à $10\ m/s$ par pas de $1\ m/s$ . On tient compte d'un amortissement réduit initial de 12,3 %.

Compte tenu de la nature du mode étudié (mode d'ensemble du faisceau), la modélisation B doit conduire à des résultats très proches de ceux de la modélisation A.

## 4.2 Caractéristiques du maillage

Les caractéristiques du maillage de cette seconde modélisation sont les mêmes que celle de la modélisation A, soit :
459 noeuds utilisés et 470 mailles de type SEG2.

Le fichier de maillage est au format ASTER.

## 4.3 Etapes de calcul

Les fonctionnalités que l'on souhaite valider sont les mêmes que celles énumérées pour la modélisation A (cf paragraphe [§3.3]), mais en utilisant cette fois une représentation simplifiée du faisceau.

La définition des paramètres prenant en compte le couplage fluide-élastique d'une représentation simplifiée du faisceau est réalisée avec l'opérateur DEFI_FLUI_STRU, mot-clé facteur FAISCEAU_AXIAL.
Le 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 s'appuyant sur une représentation simplifiée du faisceau est effectué par l'opérateur CALC_FLUI_STRU.

## 4.4 Valeurs testées

Les tests portent sur les fréquences et amortissements réduits des deux premiers modes de flexion du faisceau, à la vitesse moyenne d'écoulement de $4\ m/s$ . Les mesures expérimentales ne concernent que les caractéristiques du premier mode de flexion vibrant suivant le plus grand côté de l'enceinte. Ce mode est le premier déterminé par le calcul. On effectue deux types de test :

- un test de comparaison avec les valeurs expérimentales sur le premier mode,
- un test portant sur les deux premiers modes afin de garantir la non régression du code.

### 4.4.1 Fréquences des deux premiers modes de flexion du faisceau

- Test de comparaison avec l'expérience sur le premier mode :



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

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

| Numéro du mode | Valeur expérimentale | Valeur calculée | Ecart relatif |
|---|---|---|---|
| 1 | 4,47 *Hz* | 4,735 *Hz* | 5,90% |

### 4.4.2 Amortissements réduits des deux premiers modes de flexion du faisceau

- Test de comparaison avec l'expérience sur le premier mode :

La tolérance d'écart relatif par rapport à la valeur expérimentale vaut 20 %.

| Numéro du mode | Valeur expérimentale | Valeur calculée | Ecart relatif |
|---|---|---|---|
| 1 | 19 % | 22,6474% | 19,20% |



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

# 5 Remarques

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

Les résultats obtenus pour les amortissements réduits sont très légèrement différents entre les modélisations A et B. Ceci s'explique par le fait que la modélisation B, qui utilise une représentation simplifiée du faisceau, suppose que tous les tubes ont une déformée modale rigoureusement identique : la déformée commune est celle d'un tube choisi arbitrairement dans le faisceau. La modélisation A, qui utilise la représentation complète du faisceau, tient compte des variations infinitésimales de la déformée d'un tube à l'autre. Il est donc normal qu'apparaissent des différences très légères sur les résultats.

En outre, les faibles écarts observés sur les résultats mettent en évidence l'intérêt d'utiliser une représentation simplifiée du faisceau quand on a des modes d'ensemble. Le gain en temps de calcul est assez conséquent.



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