



HAL
open science

Simulation de l'interaction fluide - structure dans un faisceau de tubes à nombre de Reynolds élevé

Guillaume Barbut, Thibaud Marcel, Gilles Harran, Franck Baj, Jean-Paul Magnau, Marianna Braza, Elisabeth Longatte

► **To cite this version:**

Guillaume Barbut, Thibaud Marcel, Gilles Harran, Franck Baj, Jean-Paul Magnau, et al.. Simulation de l'interaction fluide - structure dans un faisceau de tubes à nombre de Reynolds élevé. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03378656

HAL Id: hal-03378656

<https://hal.science/hal-03378656>

Submitted on 14 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Simulation de l'interaction fluide - structure dans un faisceau de tubes à nombre de Reynolds élevé

G. BARBUT¹, T. MARCEL¹, M. BRAZA¹, G. HARRAN¹,
E. LONGATTE², F. BAJ³, J.P. MAGNAUD³

¹Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, UMR CNRS N°5502

²EDF, 6 quai Watier, 78401 Chatou, France

³CEA, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

Résumé

L'interaction fluide-structure dans un faisceau de tubes est étudiée à nombre de Reynolds élevé en utilisant les approches de modélisation de la turbulence OES (Organised Eddy Simulation) en vue d'analyser les origines d'apparition des instabilités fluide-élastiques. Les simulations sont effectuées avec le code NSMB, (Navier-Stokes MultiBlock). Une étude comparative entre les modèles $k-\varepsilon$ -OES, $k-\omega$ -OES et URANS/ $k-\omega$ -SST est fournie ainsi qu'une analyse critique de leurs capacités prédictives. L'ensemble de l'étude numérique a été réalisé sur une géométrie 2D, comportant 9 cylindres, puis trois rangées de cinq cylindres, premièrement sur une configuration de tubes statique et ensuite dans le cas d'une oscillation pour un tube. La contribution des charges dues au mouvement de la structure et à la turbulence proche - paroi est quantifiée.

Abstract

The fluid-structure interaction in a cylindrical bundle is studied at high Reynolds number by means of the Organised Eddy Simulation, OES approach in the context of URANS modelling, to analyse the origins of appearance of fluid-elastic instabilities. The simulations are carried out by means of the code NSMB (Navier-Stokes Multi Block). A comparative study between the $k-\varepsilon$ -OES, $k-\omega$ -OES and URANS/ $k-\omega$ -SST models is provided with a discussion of the predictive capabilities. The study is done on a 2D geometry, made of 9 cylinders, as well as of three rows of five cylinders, firstly on a static configuration for the tubes and then in case of an oscillation for one tube. The contributions of the structure's motion and of the turbulence on the unsteady loads due to the fluid-structure interaction are quantified.

Mots-clefs: Interaction Fluide-Structure, Flow Induced Vibrations, turbulence, modélisation

1) Introduction

La prédiction des instabilités fluide-élastiques développées dans un faisceau de tubes est d'une importance majeure actuellement pour le dimensionnement des échangeurs thermiques de refroidissement des centrales nucléaires et pour la prévention des accidents associés à la fatigue des matériaux, les chocs entre faisceaux et la rupture des parois solides, (Longatte et al, (2009), Huvelin et al, (2008), Caillaud (2008)). Les instabilités fluide-élastiques dans un faisceau de tubes apparaissent dès le régime laminaire (Viničius de Morais, 2006). Dans le contexte industriel, le nombre de Reynolds élevé confère une complexité d'interaction non-linéaire entre l'instabilité due au mouvement de la structure solide et la turbulence instationnaire proche-paroi autour des cylindres du faisceau. Afin de prendre en compte correctement cette interaction et de prédire efficacement les charges instationnaires proche-paroi, (Longatte et al, 2003), il est nécessaire de développer des approches de macrosimulation de la turbulence fiables et capables de dissocier les effets dus au mouvement de basse fréquence associé à la structure et les effets de turbulence aléatoire. Le développement de la turbulence proche-paroi autour des cylindres du faisceau en mouvement produit une interaction non-linéaire avec les modes issus de la structure et nécessite des approches spécifiques de macrosimulation. En effet, les approches de type URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes), issues d'hypothèses d'équilibre statistique, ont tendance à sous-estimer les coefficients globaux (traînée, portance), ainsi que leurs amplitudes (cf. comptes-rendus du programme européen DESIDER, Detached Eddy Simulation for Industrial Aerodynamics, Haase et al, 2009). L'approche LES, Large Eddy Simulation n'est pas par ailleurs indiquée pour son application à des nombres de Reynolds élevés, caractérisant ce problème industriel. Les approches hybrides de type URANS près de l'obstacle et de type LES dans les régions plus lointaines sont mieux indiquées, dont l'approche DES, Detached Eddy Simulation (Travin et al, 2000). L'approche de macrosimulation Organised Eddy Simulation, (Braza et al,

2006, Bourguet et al, 2008), utilise le même système d'équations dans toute la région de l'écoulement, issu de la décomposition des équations de Navier-Stokes en moyenne de phase et fluctuation aléatoire. Dans cet article, nous proposons une étude de simulation numérique utilisant l'approche OES ainsi que des modèles URANS à deux équations pour la prédiction de l'instabilité dans un faisceau de tubes à nombre de Reynolds de 40 000, basé sur la distance inter-tube. Cette étude est une collaboration entre l'EDF, le CEA et l'IMFT. Des comparaisons avec des résultats expérimentaux provenant des partenaires industriels seront présentées lors du congrès.

2) Méthodologie

Afin de bien capter la dualité du processus physique lors de l'interaction fluide-structure, organisée et chaotique, l'approche OES est utilisée. D'après cette approche, le spectre d'énergie turbulente est séparé en deux parties (« dual spectrum splitting »), la première correspondant aux modes d'instabilité globale organisés (partie résolue) et la seconde, à la turbulence aléatoire (partie à modéliser), voir figure 1. Le fait que cette deuxième partie du spectre s'étend sur toute la gamme des fréquences (nombres d'ondes) depuis les basses fréquences jusqu'aux hautes fréquences, permet l'emploi de schémas de modélisation de type URANS, en utilisant comme moyenne statistique, la moyenne de phase ou une moyenne conditionnelle d'ensemble, dans le sens général pour la décomposition des équations de Navier-Stokes. Néanmoins, la modélisation des nouvelles contraintes turbulentes doit être effectuée en reconsidérant les hypothèses de base sur lesquelles sont bâtis les modèles de type URANS, à cause du caractère du non-équilibre du processus turbulent. Ces aspects ont été quantifiés par les études expérimentales et théoriques menées à l'IMFT à l'aide de l'approche de PIV rapide (TRPIV), (Perrin et al, (2007), Braza, Perrin, Hoarau, (2006)). Sur le plan physique, le caractère de la turbulence hors équilibre se manifeste par un désalignement fort des axes du tenseur d'anisotropie de la turbulence et du tenseur de déformation (Bourguet et al 2007), qui rend caduque l'hypothèse de Boussinesq, largement employée pour les modèles URANS à une et deux équations (à titre d'exemple, Spalart & Allmaras, (1992), modèle $k-\omega$ de Wilcox & Rubesin (1994), modèle $k-\omega$ « baseline » de Menter (1994), entre autres.

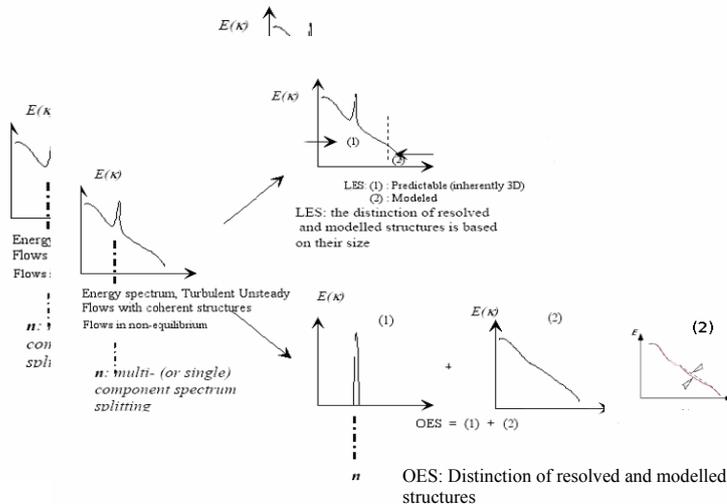


Figure 1 : Représentation schématique de l'approche OES

En effet, l'emploi de la loi Boussinesq (1) en URANS a tendance de rendre isotrope *le caractère fortement anisotrope de la turbulence instationnaire proche-paroi à cause de l'interaction fluide-structure.*

$$-\frac{\langle u_i u_j \rangle}{k} + \frac{2}{3} \delta_{ij} = -a_{ij} = 2 \frac{\nu_t}{k} S_{ij} \quad \text{with} \quad \nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

Pour pallier à cet inconvénient, une modélisation anisotrope basée sur un concept de viscosité de turbulence tensoriel a été développé quant à une loi de comportement dont la forme ressemble à celle de Boussinesq, dans le contexte de l'approche OES, Bourguet et al, (2008). Ce modèle tensoriel, dont les détails sont présentés en référence précédemment mentionnée, est issu de la modélisation au second ordre, (modèle de Speziale, Sarkar, Gatski, (1990)), en transportant un critère *directionnel du désalignement du tenseur d'anisotropie et de celui des vitesses de déformation.*

La modélisation OES avec le concept de viscosité tensoriel (Bourguet et al, 2008) conduit à un coefficient de diffusivité C_μ de la modélisation à deux équations, ($\nu_t = f_\mu C_\mu k^2 / \varepsilon$) *variable* dans l'espace.

Par ailleurs, une approche OES plus simplifiée utilisant une valeur constante de C_μ , mais différente de celle de la turbulence en équilibre ($C_\mu = 0.09$) a été élaborée à partir du modèle au second ordre, Rodes (1999), Hoarau, (2002), Bourdet et al (2007). A partir des équations de transport de la modélisation au second ordre l'énergie cinétique turbulente et sa dissipation sont évaluées. En adoptant une viscosité turbulente scalaire et l'hypothèse de Boussinesq, on peut évaluer la fonction C_μ qui varie sensiblement autour de la valeur de 0.02 dans le champ proche autour d'un obstacle. De plus, la loi d'amortissement de la turbulence f_μ associée à l'atténuation ('damping') de la viscosité turbulente dans la région proche a été reconsidérée dans le contexte de l'approche OES, (Jin, 1994, Rodes, 1999, Hoarau, 2002), $f_\mu = 1 - \exp(-0.0002 y^+ - 0.000065 y^{+2})$.

Les détails de ces développements sont consignés dans Bourdet et al (2007). Dans la première phase de l'étude, l'OES - 2D est employée, alors que les résultats de l'approche OES -3D sont en cours.

Les modèles de turbulence examinés en URANS sont le modèle de Spalart et Allmaras (1992), ainsi que le modèle $k-\omega$ de Wilcox (1994) amélioré par la correction SST (Shear Stress Transport) de Menter (1994), qui limite la viscosité turbulente et de ce fait les contraintes de cisaillement dans les régions de gradient de pression adverse. En approche OES, les modèles $k-\varepsilon$ et $k-\omega$ modifiés quant à la diffusion turbulente, sont considérés. La configuration générique d'un faisceau des tubes 'statique' (i.e. sans mouvement), ainsi que les configurations incluant le mouvement oscillatoire horizontal ou vertical du cylindre du milieu sont considérées.

3) La configuration étudiée

3.1 Géométrie, maillage et conditions limites

Le domaine de calcul et le maillage choisis sont représentés sur la figure 1. Le maillage des 9 cylindres contient 73728 cellules regroupées en 2 types de blocs. L'épaisseur de la première couche de cellules est 0.003D. Le nombre de Reynolds basé sur la distance inter-tube est de 40 000. Pour la configuration des 15 cylindres, le maillage contient 168 144 cellules, Re amont : 40 000 et Re inter-tube : 131 000.

Des conditions limites de périodicité sont imposées sur les frontières fictives supérieure et inférieure, alors qu'en entrée et sortie les conditions sont comme suit, étant donnée une distance suffisamment grande de ces frontières par rapport aux premières et dernières rangées des tubes :

- En entrée : une condition à la limite de type écoulement libre (freestream)
- En sortie : une condition de sortie non-confinante inspirée d'équations non-reflectives
- Une condition de périodicité sur les parois inférieure et supérieure.

Le code de calcul utilisé au cours de cette étude est le solveur volumes finis structurés Navier-Stokes Multi Block (Vos *et al.* 1998) utilisé par nombre d'instituts européens du consortium NSMB. L'IMFT participe au développement des approches de modélisation de la turbulence au sein du code NSMB. L'approche multi-bloc permet de faciliter la génération de maillage autour de configurations réelles, telles que le faisceau de cylindres. Par ailleurs, elle permet d'effectuer des calculs parallèles efficaces. La formulation numérique que nous avons utilisée au cours de cette étude est un schéma upwind de Roe (1981) d'ordre 3. La discrétisation spatiale est basée sur la méthode MUSCL, (Monotone Upwind Scheme for Conservation Laws), proposée par Van Leer (1979). Il s'agit d'utiliser un schéma aux différences finies non linéaire sur trois points qui autorisera un ordre 2 tout en respectant la propriété de variation totale décroissante (TVD). Dans notre cas, nous nous servirons d'un limiteur Van Leer.

L'intégration temporelle est effectuée par une méthode implicite de Runge-Kutta d'ordre 3.

4) Résultats

4.1 Simulation instationnaire, configuration statique

Le nombre de Strouhal est calculé sur la base de la vitesse amont imposée en entrée du domaine et le diamètre du cylindre soit U/D . Les paramètres globaux ont été comparés avec différents modèles. Quelques résultats sont présentés ci-dessous. La traînée est calculée à partir de la vitesse à l'infini amont, U .

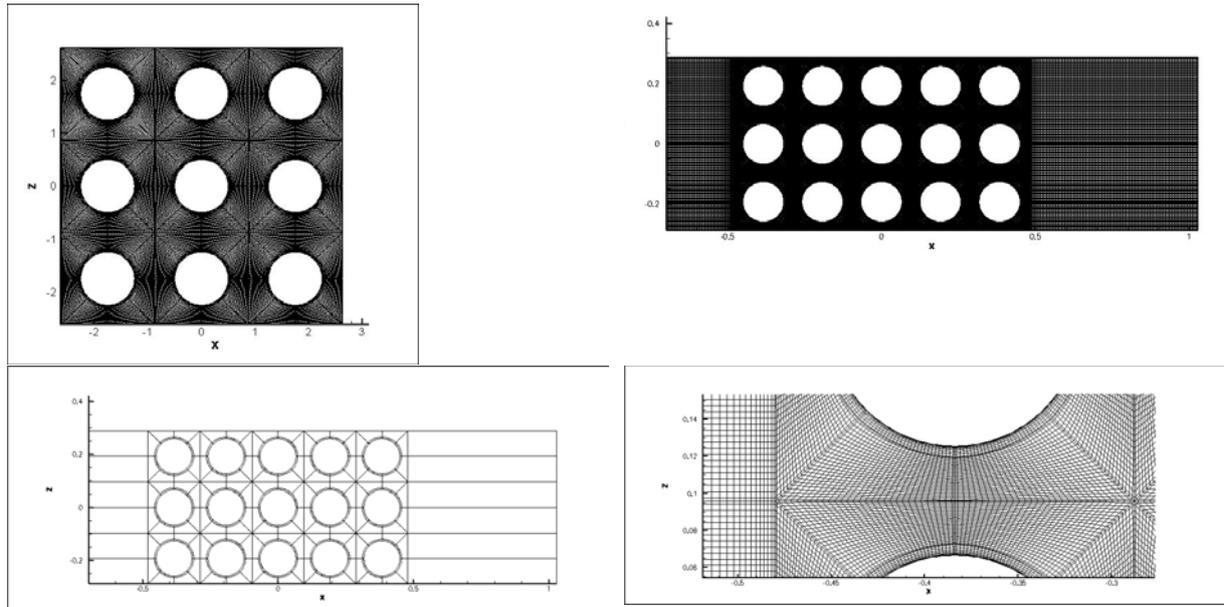


Figure 2 : Maillages et domaine de calcul

K- ω -SST : 1.58	K- ω -SST : 0.83	K- ω -SST : 0.65
K- ϵ -OES : 1.25	K- ϵ -OES : 0.63	K- ϵ -OES : 0.40
K- ω -SST : 1.45	K- ω -SST : 0.94	K- ω -SST : 0.65
K- ϵ -OES : 1.24	K- ϵ -OES : 0.70	K- ϵ -OES : 0.97
K- ω -SST : 1.49	K- ω -SST : 1.00	K- ω -SST : 0.58
K- ϵ -OES : 1.28	K- ϵ -OES : 0.64	K- ϵ -OES : 0.62

Tableau 1 : Coefficients de traînée moyenne sur les 9 cylindres par calcul URANS classique et avec l'approche OES (modèles K- ω -SST et K- ϵ -OES)

Les valeurs des coefficients de traînée obtenus avec le modèle URANS-SST sont plus élevés que ceux issus de la modélisation OES. Par ailleurs ce comportement confirme que les modèles URANS classiques ont tendance à surestimer la traînée. Les champs de vitesse-pression par la modélisation OES font bien ressortir l'effet de sillage, avec, sur les champs de vitesse moyennés, la forme triangulaire de la zone de recirculation où les vitesses axiales sont négatives, figure 5c.

4.2 Simulation instationnaire, configuration dynamique

Le cylindre central subit un mouvement d'oscillations sinusoïdales horizontales, puis verticales, de fréquence f_c . Pour le mouvement horizontal, la fréquence réduite imposée $f_c D/U$ est choisie à 0.2, ce qui est de l'ordre de celle du Strouhal d'un cylindre seul dans un écoulement à Reynolds 4.10^4 et l'amplitude est fixée à $0.1D$. Pour l'oscillation verticale, l'amplitude du mouvement est fixée à $0.25D$ et la fréquence réduite imposée est de 0.1.

Pour assurer la modification de la géométrie du faisceau, le calcul a recours à une formulation Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) (Donea *et al* (2004)) qui est bien adaptée, dans la mesure où les déformations ne sont pas trop importantes. Le maillage est déformé à chaque pas de temps.

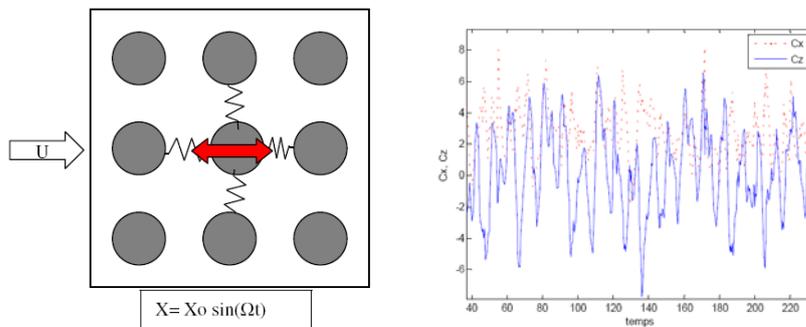


Figure 3 : a) Configuration schématique avec mouvement du cylindre du milieu ; b) Coefficients globaux dans le cas d'oscillation verticale de fréquence de Strouhal $f=0.1$ et d'amplitude $0.25D$, modèle $k-\omega$ -OES

Les figures 3b et 4 montrent les évolutions des efforts dans le cas de forçage vertical et horizontal respectivement du cylindre central en fonction du temps. Le mouvement oscillatoire engendre une augmentation des amplitudes des coefficients, comparés avec le cas statique en fig. 4. L'approche OES

fournit une multitude de fréquences, plus nombreuses qu'avec l'approche URANS classique, ainsi qu'une augmentation des amplitudes.

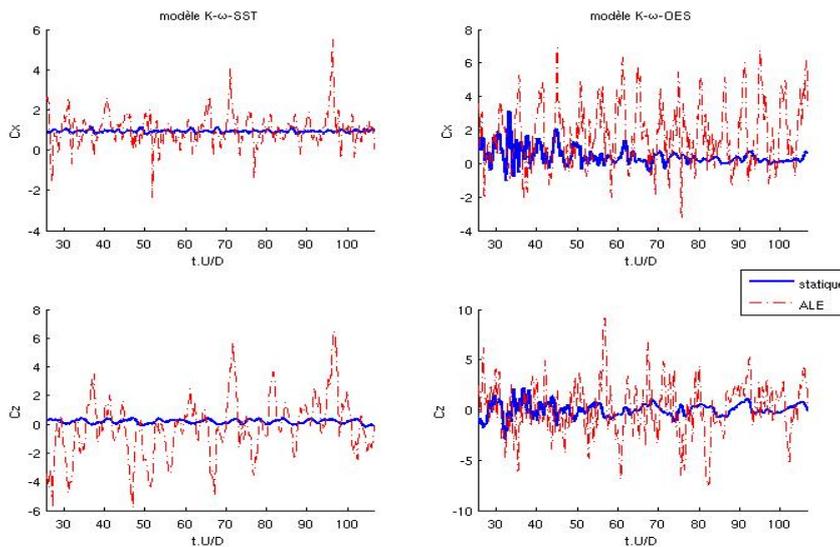


Figure 4: Coefficients de portance en configuration statique (trait plein) et dans le cas dynamique (tirets) calcul $k\text{-}\omega\text{-SST}$ à gauche et $k\text{-}\omega\text{-OES}$ à droite.

4.2.1 Cylindre du milieu en vibration libre

Dans cette partie, le cylindre du milieu est soumis à un degré de liberté d'écoulement vertical, en tenant compte des paramètres propres à la structure figurant sur le tableau 2.

Tableau II. Les paramètres caractéristiques du cylindre mobile.

Masse m [kg]	3.384
Amortissement c [kg/s]	0.00286
Raideur k [N/m]	1.44
Fréquence propre f_0 [Hz]	0.1
Vitesse réduite	1.18
Masse-amortissement	0.013

La variation des charges instationnaires indique la contribution du mouvement du cylindre et des structures tourbillonnaires cohérentes de son sillage proche, issues de l'interaction turbulence - mouvement pariétal. Une approche détaillée par des techniques de traitement de signal appropriées sera disponible pour évaluer l'apport respectif de ces deux contributions sur les charges

instationnaires issues de l'instabilité fluide-élastique.

Conclusions

Cette étude présente la prédiction de l'instabilité fluide-élastique et des charges instationnaires dans un faisceau de tubes à nombre de Reynolds élevé, en utilisant le code NSMB. Une comparaison de modèles de turbulence URANS et OES est effectuée pour le cas 'statique'. Le caractère oscillatoire est bien reproduit, notamment en ce qui concerne la traînée, dont les amplitudes sont souvent atténuées lors de l'emploi des approches URANS classiques. La modélisation OES laisse ressortir des structures dans le sillage des cylindres. Les deux cas dynamiques incluant le mouvement oscillatoire du cylindre du milieu forcé et libre permettent d'évaluer les charges issues de l'interaction entre le mouvement et la turbulence. L'oscillation du cylindre du milieu à une fréquence proche de celle de l'instabilité globale naturelle d'un seul cylindre produit une augmentation drastique des amplitudes des paramètres globaux et une multitude de fréquences en plus de celle du forçage. En perspective, il y aura une comparaison avec les résultats d'une campagne de mesures expérimentales menées par le CEA, l'EDF et l'IMFT pour cette configuration. Cette étude a été réalisée en utilisant les moyens de calcul haute performance des centres nationaux CINES, IDRIS, CALMIP et GRID-5000. Les auteurs expriment leurs remerciements aux Dr. J. Vos, (CFS Engineering et EPFL) et Dr. Y. Hoarau, ainsi qu'à V. Bodoc pour leur contribution quant à l'adaptation du code NSMB à ce problème.

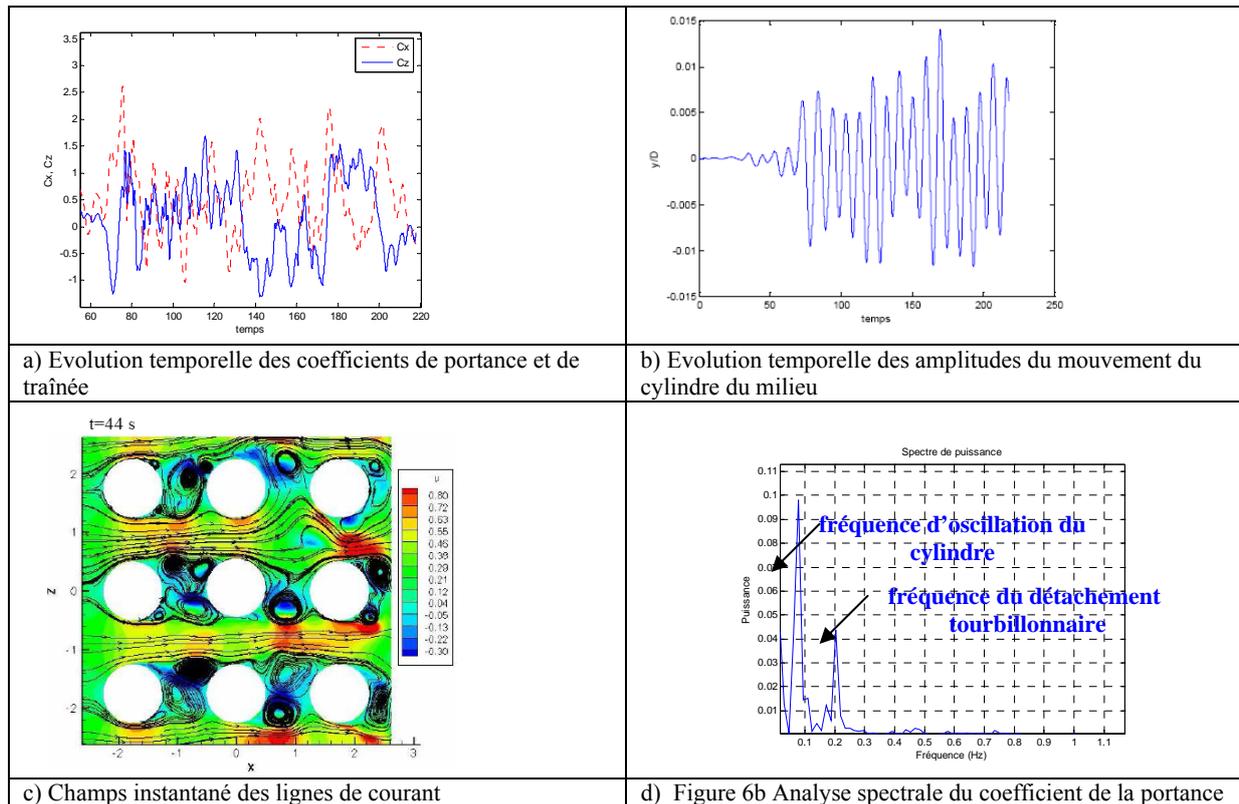


Figure 5 : Interaction fluide-structure due au mouvement libre du cylindre du milieu

Références

- [1] Berkooz G., Holmes P. & Lumley J. L. (1993). The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows, *Annual Rev. Fluid Mech.* **25**, 539-75.
- [3] S. Bourdet, M. Braza, Y. Hoarau, R. El Akoury, A. Ashraf, G. Harran, P. Chassaing, H. Djeridi, "Prediction and physical analysis of unsteady flows around a pitching airfoil with the dynamic mesh approach in the context of fluid-structure interaction", *Revue Européenne de Mécanique Numérique*, **16/3-4**, pp.451-476.
- [4] Braza M., Perrin R., Hoarau Y., 2006 Turbulence Properties in the cylinder wake at high Reynolds number, *J. Fluids and Structures*, **22**, pp. 757-771.
- [5] R. Bourguet, M. Braza, G. Harran, R. El Akoury "Anisotropic Organised Eddy Simulation for the prediction of non-equilibrium turbulent flows around bodies", *J. Fluids and Structures*, **24** (8), 2008
- [7] Caillaud, S. (2008) « Excitation forcée et contrôle actif pour la mesure des forces fluide-élastiques », Thèse de Doctorat, CEA, Univ. Paris VI.
- [9] Donea J., Huerta A., Ponthot JP. Rodriguez-Ferran A., 2004 Arbitrary lagrangian-eulerian methods. In Stein E., de Borst R., Hugues JR. *Encyclo. of computational mechanics*, vol 1, chap 14. Wiley & sons.
- [10] Hoarau Y., 2002 Analyse physique par simulation numérique et modélisation des écoulements décollés instationnaires autour de surfaces portantes. *Thèse de doctorat de l'INPT*.
- [11] W. Haase, M. Braza, A. Revell, (Sci Eds.) "DESider - A European Effort on Hybrid RANS-LES Modelling", *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, **103**, Publisher Springer, to appear in 2009.
- [12] Longatte, E., Baj, F. (2009), Flow-induced vibrations in tube and tube array. Conference on Fluid and Elasticity. Marseille.
- [13] Longatte E., Bendjeddou Z., Souli M., 2003 Methods for numerical study of tube bundle vibration in cross-flows. *J. Fluids and Structures*, **18**, pp. 513-528.
- [14] Menter, F.R., 1994 Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA-Journal*, **32**(8), pp. 1598-1605.
- [15] Roe P.L., 1981 Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes, *J. Comp. Phys.*, vol. 43, pp. 357-372.
- [16] Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., 1992, "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows" AIAA Paper 92-0439.
- [17] Speziale C.G. , Sarkar S. & Gatski T.B. 1990 Modeling the pressure strain correlation of turbulence-an invariant dynamical system approach, *J. Fluid Mech.* **227** , 245-272.
- [18] Travin, M. Shur, M. Strelets and P. Spalart, 2000. "Detached-eddy simulations past a circular cylinder", *Flow, Turbulence and Combustion* **63**.
- [19] Van Leer, B., 1979 Toward the ultimate conservation difference scheme: A second-order sequel to Godunov's method, *J. Comp. Phy.*, Vol 32, pp 101-136.
- [20] Vinicius Girao de Morais, M. « Modélisation des Forces Fluide-Elastique en Faisceau de Tubes », Thèse de Doctorat, CEA, Saclay, 22 Nov. 2006.
- [21] Vos J., Chaput E., Arlinger B., Rizzi A., and Corjon A., 1998 Recent advances in aerodynamics inside the NSMB (Navier-Stokes Multi-Block) consortium. In *36th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA Paper 1998-0802, Reno, USA.,
- [22] Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD, DCW Industries, La Canada, California, 1993.