



HAL
open science

Etude numérique de VIV sur un riser flexible

Guillaume Fontaine, D. Gross, Corentin Lothodé, Emmanuel Guilmineau, A. Wang, F. Vertallier, M Minguez, A Cinello

► **To cite this version:**

Guillaume Fontaine, D. Gross, Corentin Lothodé, Emmanuel Guilmineau, A. Wang, et al.. Etude numérique de VIV sur un riser flexible. 14es Journées de l'Hydrodynamique, Sep 2014, Val de Reuil, France. hal-01202504

HAL Id: hal-01202504

<https://hal.science/hal-01202504>

Submitted on 7 Oct 2020

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



ETUDE NUMERIQUE DU VIV SUR UN RISER FLEXIBLE

NUMERICAL STUDY OF VIV OVER A FLEXIBLE RISER

**G. FONTAINE¹, D. GROSS¹, C. LOTHODE¹
E. GUILMINEAU², A. WANG³
F. VERTALLIER⁴, M. MINGUEZ⁵, A. CINELLO⁶**

¹ K-Epsilon, 300 Route des Crêtes 06902 Sophia-Antipolis, France, guillaume@k-epsilon.com

²Ecole Centrale de Nantes, ³ Subsea7, ⁴ Saipem, ⁵ Technip, ⁶ Doris Engineering

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le contexte de l'interaction fluide-structure sur les risers. Il s'agit ici de quantifier la réponse structurelle de ces longs tuyaux plus ou moins rigides dans l'industrie offshore lorsqu'ils sont soumis aux courants marins : on parle de VIV (Vortex Induced Vibration). Cette problématique présente un enjeu majeur pour plusieurs sociétés de l'Offshore, qui se sont associées à K-Epsilon dans le cadre d'un projet Citeph (Concertation pour l'Innovation Technologique dans l'Exploration-Production des Hydrocarbures). Le but de ce projet est d'utiliser l'outil d'Interaction Fluide Structure (IFS) développé au sein de l'entreprise K-Epsilon et initialement destiné à la simulation de surface souple sans épaisseur comme des voiles pour modéliser ces phénomènes de VIV.

Summary

This study is based on the problem of fluid-structure interaction on risers. We aim to quantify the structural response of these long pipes, more or less rigid, used for offshore hydrocarbon extraction when they are subject to marine current. The occurring phenomenon is known as VIV (Vortex Induced Vibration). These problems are a relevant challenge for several offshore companies, which are associated to K-Epsilon in a Citeph project. Its goal is to use the FSI simulation tool developed by K-Epsilon and initially used for the simulation of flexible membranes such as sails, to model these VIV phenomenon.

I – Introduction

Le phénomène de VIV a été très étudié ces dernières années. Les raisons de cet engouement vont des problèmes de fatigue sur les risers de l'industrie offshore, à la production d'électricité par la mise en vibration d'un cylindre immergé. De nombreux travaux expérimentaux puis numériques ont été menés et ont montré la difficulté de prédiction de ces phénomènes. En effet, le couplage fluide-structure joue un rôle important, et la réponse des systèmes peut donc être très différente selon les paramètres fluidiques ou structurels considérés.

La simulation numérique est prometteuse pour la prédiction de ces phénomènes, mais la difficulté principale réside dans le développement d'algorithmes de couplage fort entre le code structure et le code fluide. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail présenté ici.

II – Présentation de la méthode

II – 1 Hydrodynamique

L'hydrodynamique des écoulements pouvant générer des VIV autour de riser de section circulaire est en premier lieu régie par le nombre de Reynolds (Re) défini comme suit :

$$Re = \frac{U D}{\nu}$$

Où :

U est la vitesse de l'écoulement

D le diamètre de l'obstacle

ν la viscosité cinématique du fluide (m^2/s)

Au-delà d'un certain nombre de Reynolds ($Re \sim 45$) des tourbillons alternés sont émis dans le sillage d'un cylindre: c'est le phénomène de vortex shedding. La fréquence d'émission des tourbillons F_{st} est reliée aux autres grandeurs à travers le nombre de Strouhal (St) :

$$St = \frac{F_{st} D}{U}$$

Ce phénomène de vortex shedding est une des clés dans l'apparition de phénomènes de type VIV, donc la bonne connaissance du nombre de Strouhal est primordiale.

Résolution de l'hydrodynamique

Le solveur ISIS-CFD, du logiciel FINE/Marine™, est développé par l'équipe DSPM du laboratoire LHEEA. Ce solveur est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds (RANSE) sous une forme fortement conservative. Il repose sur une méthode volumes finis généralisée à des maillages non-structurés composés de volumes polyédriques arbitraires.

Le champ de vitesse est obtenu à partir des équations de conservation de quantité de mouvement et la pression est déterminée selon la contrainte d'incompressibilité transformée en équation de pression. Le couplage vitesse-pression est assuré par un algorithme de type SIMPLE. L'ensemble des variables est stocké au centre des volumes de contrôle. Les intégrales de volume et de surface sont évaluées par des approximations précises au second ordre. Le mode de discrétisation temporelle utilisé nominalement pour les calculs instationnaires est une méthode du deuxième ordre décentrée à deux pas de temps. À chaque pas de temps, une boucle interne (appelée "boucle non-linéaire") associée à une linéarisation de Picard est effectuée pour résoudre les non-linéarités.

La formulation ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) des équations permet de prendre en compte des déformations de maillage, par exemple lorsque celles-ci sont liées à la déformation d'une interface fluide-structure. Celle-ci est réalisée grâce à un algorithme de type propagation de l'état de déformation développé dans Durand2012. Cette déformation est rapide (explicite), robuste et parallélisée.

Plusieurs modèles de turbulence sont implémentés dans ISIS-CFD. Dans cette étude, les modèles utilisés sont le modèle SST $k-\omega$ de Menter [Menter2003], et le modèle SST DES de Menter [MenterDES].

II – 2 Structure

Le riser est modélisé en utilisant des éléments poutres. Les conditions au bord sont les suivantes :

Rotule (libre en rotation, fixe en translation) pour le bas du riser, avec une contrainte pour la rotation en z

Rotule pour le haut du riser, avec une tension imposée (différente suivant les cas)

Plusieurs configurations pour le nombre d'éléments ont été testées. Le nombre final retenu est de 100 éléments poutres uniformément répartis.

Les caractéristiques structures sont reportées dans le tableau suivant (en U.S.I.) :

ES (compression)	EIx (Flexion x)	EIy (Flexion y)	GJ (Torsion)	Masse Linéique
5880000 N	29.90 Nm ²	29.90 Nm ²	80.66 Nm ²	1.85000 kg/m

Résolution de la structure

Le code structure ARA a été développé par la société K-Epsilon lors du projet VOILEnav Augier2012. Ce code a été développé initialement pour simuler les gréements des voiliers: voiles, mât et haubanage.

Le principe est de calculer l'équilibre dynamique à chaque pas de temps d'un ensemble de fonctions éléments. La fonction élément reçoit en entrée les variables structure, à savoir les positions, vitesses et accélérations en chacun de ses nœuds. Elle peut contenir des variables internes dans le cas de déformation plastiques ou visqueuses, et elle calcule les efforts en chaque nœuds, ainsi que la dérivée des efforts par rapport aux variables. Ces dérivées sont appelées matrice de masse $[M] = \frac{\partial F}{\partial \dot{x}}$, d'amortissement $[D] = \frac{\partial F}{\partial \ddot{x}}$, et de rigidité $[K] = \frac{\partial F}{\partial x}$. Ces fonctions éléments peuvent être différents types d'éléments finis, mais aussi des méthodes de pénalisation pour les contacts et les glissements. L'interface fluide-structure elle-même est considérée par le code structure dans le couplage comme un élément.

Le schéma en temps utilisé est celui de Newmark-Bossak. Ce schéma a été choisi pour son compromis entre le filtrage nécessaire des hautes fréquences, la précision des basses fréquences, et l'absence de création d'énergie dans le cas de non-linéarités fortes.

II – 3 Couplage fluide-structure : ARA-ISIS

L'algorithme de résolution globale est basé sur la technique quasi-monolithique. Cette technique est un couplage implicite adapté aux calculs partitionnés, tout en conservant les propriétés de convergence et de stabilité de la méthode monolithique. Pour cela, la résolution structure est insérée dans la boucle de résolution du solveur fluide. L'algorithme de résolution fluide est ainsi conservé. La résolution structure est alors réalisée jusqu'à convergence à chaque itération fluide. Enfin, un élément interface est ajouté au solveur structure. Cet élément est réalisé à partir de la matrice Jacobienne de l'interface. Dans le cas d'une matrice Jacobienne exacte, la procédure de calcul est alors identique à un calcul monolithique. De

même que dans les méthodes quasi-Newton, une matrice tangente simplifiée peut être utilisée, une matrice Jacobienne simplifiée est utilisée dans le code structure.

L'utilisation de la matrice Jacobienne n'est pas nécessaire, même pour les problèmes fortement couplés. Néanmoins, sa présence permet de s'affranchir d'une sous-relaxation trop faible entraînant alors un trop grand nombre d'itérations de couplage.

Avec la méthode présentée, le ratio entre le temps de calcul fluide-structure et le temps de calcul fluide seul est compris entre 1 et 2.

III – Résultats

III – 1 Cylindre fixe

Les caractéristiques du fluide sont:

- Masse volumique de l'eau : $\rho=998.4 \text{ kg/m}^3$
- Viscosité dynamique de l'eau $\nu=0.00104362 \text{ Pa.s}$

Caractéristiques du cylindre :

- Diamètre du cylindre $D=1\text{m}$
- Aspect ratio $L/D= 8$

Les maillages mis en place ont des tailles de l'ordre de 6 millions de mailles. Un pas de temps de $D/35*U$ secondes a été utilisé pour les simulations 3D URANS, où D est le diamètre du cylindre, U la vitesse de l'écoulement. La même loi de pas de temps a été utilisée pour les DES à Reynolds 43000 et 71000 et est désignée comme $dt1$ par la suite. Une seconde loi de pas de temps définie comme $D/50*U$ a été étudiée pour les DES et est désignée comme $dt2$ dans la suite (Tableau 1). Un schéma numérique temporel du second ordre est employé, afin de s'assurer que l'émission instationnaire de vortex est capturée précisément. Dans le cas des calculs DES, le flux a tout d'abord été établi avec la méthode RANS, avant de redémarrer la simulation en utilisant la méthode DES (Figure 1)

Reynolds	U (m/s)	dt1= D/35*U (s)	dt2 = D/50*U (s)
43000	0.044948	0.635661	0.444950
71000	0.074216	0.384978	0.269484

Table 1 : Vitesses et pas de temps pour chaque nombre de Reynolds

L'émission des tourbillons en aval du riser (Vortex Shedding) est à la base du mécanisme de VIV. Sa fréquence est donnée par le nombre de Strouhal. En premier lieu, le vortex shedding est engendré par les fluctuations de la force de portance le long du cylindre. Cela mène ensuite à des variations instationnaires de la force de trainée, qui est initialement un chargement statique sur le cylindre. Dans le cas du riser, ces variations peuvent entraîner des modifications de la fréquence naturelle. Ainsi, nous comparons le nombre de Strouhal et les valeurs RMS des coefficients de portance et de trainée que nous obtenons aux expériences disponibles dans la littérature .

Le nombre de Strouhal est bien déterminé quelle que soit la méthode employée, en revanche on constate des différences significatives en terme d'estimation des efforts, comme le montrent le Tableau 2.

Re=43000						
	RANS	DES dt1	DES dt2	Exp [SB92]	Exp[Nor93]	Literature
Strouhal	0.192	0.191	0.202	0.19	0.192	0.189
Mean Cd	1.081	0.942	1.117	1.30	-	-
RMS Cd'	0.017	0.024	0.056	0.16	-	-
RMS Cl'	0.293	0.092	0.345	0.40	0.470	0.4 - 0.5

Re=71000							
	RANS	DES dt1	DES dt2	Exp[SB92]	Exp[CC83]	Exp[Nor93]	Literature
Strouhal	0.206	0.215	0.202	-	-	0.188	0.187
Mean Cd	1.060	1.018	1.103	-	1.24	-	-
RMS Cd'	0.050	0.031	0.049	-	-	-	-
RMS Cl'	0.649	0.209	0.409	0.51	-	0.50	0.45 - 0.57

Table 2 : Efforts sans dimension et nombres de Strouhal (Re=43000 et 71000)

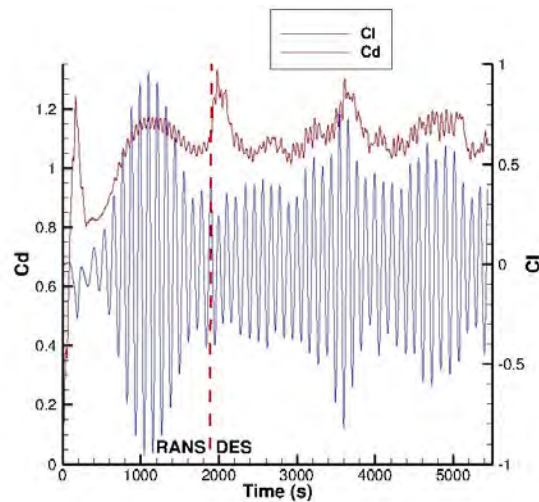


Figure 1 : Signaux temporels des coefficients de trainée et de portance, RANS/DES dt2, Reynolds : 43k

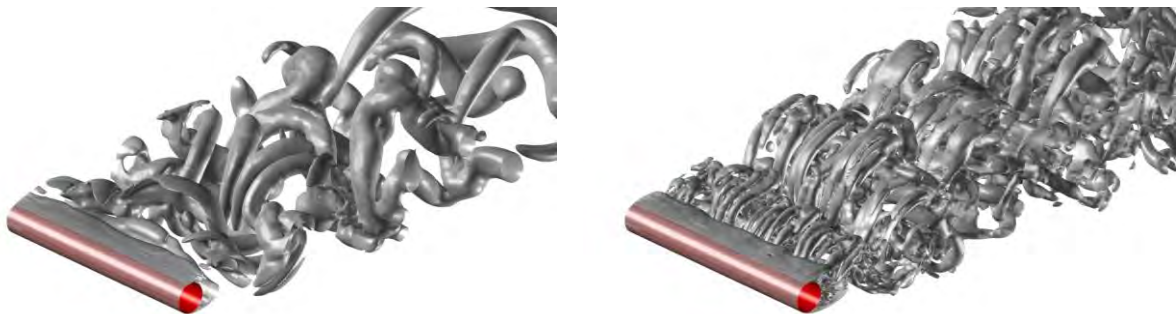


Figure 2 Vortex shedding, RANS (gauche), DES dt2 (droite), Reynolds : 43k

L'analyse des résultats et des visualisations telles que celle présentée Figure 2 montrent des différences significatives dans les calculs d'effort et dans la modélisation des structures turbulentes. Les efforts sont souvent sous évalués dans les simulations numériques présentées ici, et il aura fallu utiliser des modèles DES (avec des pas de temps très faibles) pour s'approcher des résultats obtenus expérimentalement. Il en résulte que les moyens informatiques à mettre en place pour avoir la meilleure précision sur l'hydrodynamique de l'écoulement autour d'un cylindre fixe sont actuellement peu compatibles avec les moyens industriels.

III – 2 Simulations en interaction fluide-structure sur un riser : l'expérience de Chaplin

Les études précédemment menées sur cylindre fixe ont montré que des maillages prohibitifs étaient nécessaires pour bien décrire des cylindres de rapport d'aspects similaires à ceux des risers. Cependant, les simulations 3D RANS ont montré que le Vortex Shedding pouvait être

bien décrit même sans que les efforts ne le soient. Comme le VIV est localisé dans la zone de lock-in, où la structure oscille à sa fréquence naturelle plutôt qu'à celle de Strouhal : une fois cette résonance établie, la dynamique couplée est régie par la structure et l'écoulement se synchronise dans la direction axiale. Les efforts hydrodynamiques résultants sont alors plus faciles à reproduire numériquement. Dès lors, des maillages plus légers peuvent être utilisés pour mener les simulations, car les efforts sont moins importants en regard du nombre de Strouhal. Dans ce cas, un maillage de 4 millions de cellules seulement s'est avéré suffisant pour observer une réponse satisfaisante de la structure : ce maillage permet une bonne estimation du Strouhal, mais des essais complémentaires ont montré que les efforts de portance et de trainée étaient mal estimés : cela confirme la plus grande importance de la structure quant à la modélisation du phénomène de VIV

On s'intéresse ici au cas présenté dans [CBHP05], i.e. à la réponse d'un riser de rapport d'aspect $L/D=468$. Les conditions expérimentales pour ce riser de diamètre $D=0.028\text{m}$ correspondent à un nombre de Reynolds $Re=4500$ caractéristique d'un régime turbulent sous critique (i.e couche limite laminaire et sillage turbulent). La configuration est présentée en Figure 3. La difficulté de ce cas réside dans le fait que pour de grandes déformations, la déformation de maillage peut être empêchée par la zone d'aspiration qui surmonte le riser. Le modèle turbulence URANS $k-\omega$ SST a ici été étudiés et comparé à une approche laminaire. Un modèle de turbulence RANS est nécessaire pour les nombres de Reynolds élevés, pour lesquels l'approche laminaire n'est plus suffisante pour capturer les structures se développant au sein de l'écoulement turbulent.

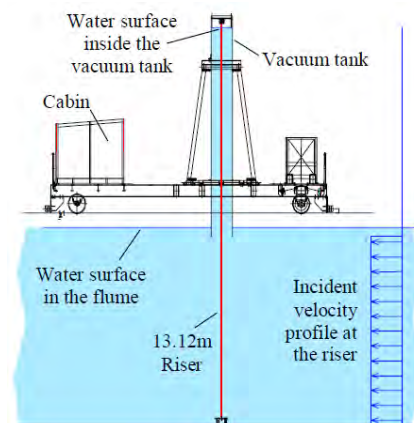


Figure 3 : Dispositif modélisé extrait de CBHP05

Le domaine de simulation est décomposé en deux parties. La partie supérieure est de la dimension de la zone d'aspiration (vacuum tube) et la partie inférieure accueille la région où le riser est soumis à l'écoulement.

Le maillage est 100% hexaédrique non structuré. Pour assurer une taille de maillage raisonnable, les cellules sont très allongées dans la direction z , et on conserve dans les directions x et y la discrétisation mise en place précédemment dans le cas 2D. Une grande zone de raffinement sert à capturer le sillage qui se développe en aval du riser. Les couches limites visqueuses du riser sont définies avec un y^+ de 0.5.

La structure du riser est représentée par 100 noeuds et 99 éléments poutres. Les extrémités sont fixes en translation et peuvent pivoter autour des axes x et y , mais sont restreints en rotation autour de l'axe z .

Les déformations du riser résultent de l'action conjointe des efforts de portance, de trainée et de la dissipation hydrodynamique (Figure 4).

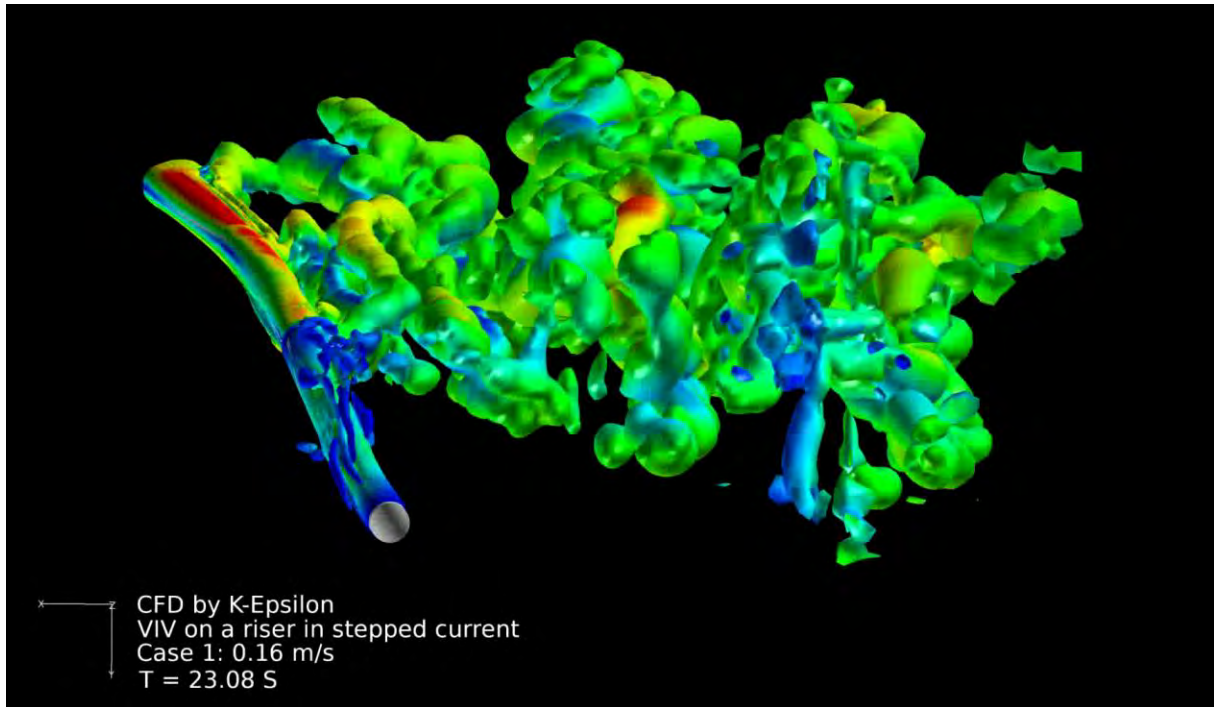


Figure 4 : VIV sur un riser, $Re=4500$, $L/D=468$

La traînée étant en moyenne nulle, nous nous intéressons directement aux déformations dans la direction y pour quantifier la réponse crossflow du riser. La force de traînée quant à elle met en évidence une déformation moyenne, qu'il convient de filtrer, et une déformation fluctuante, qui est de premier intérêt. Les déformations sont adimensionnées par le diamètre du riser, et la position verticale est adimensionnée par la longueur du riser.

Nous présentons en Figure 5 et Figure 6 les résultats obtenus par les différentes approches (i.e laminaire ou turbulente) en comparaison avec les résultats expérimentaux extraits de CBHP05 et exprimés respectivement en terme de déformation et de courbures. Il est intéressant de constater que si on retrouve les modes de déformation expérimentaux avec les deux méthodes, la prise en compte de la turbulence par la modélisation RANS a tendance à maximiser les déformations mais reproduit mieux les courbures et l'allure générale de la déformation, notamment dans la direction transverse.

A travers ces simulations, nous avons pu reproduire le comportement du riser dans un cas académique à faible nombre de Reynolds, tant en terme d'amplitude de déformation qu'en terme de nombre de modes. Les travaux menés actuellement ont pour but de mettre en place des méthodologies visant à obtenir des résultats similaires à plus haut nombre de Reynolds sur des configurations plus réalistes et ce dans des temps de simulation raisonnables.

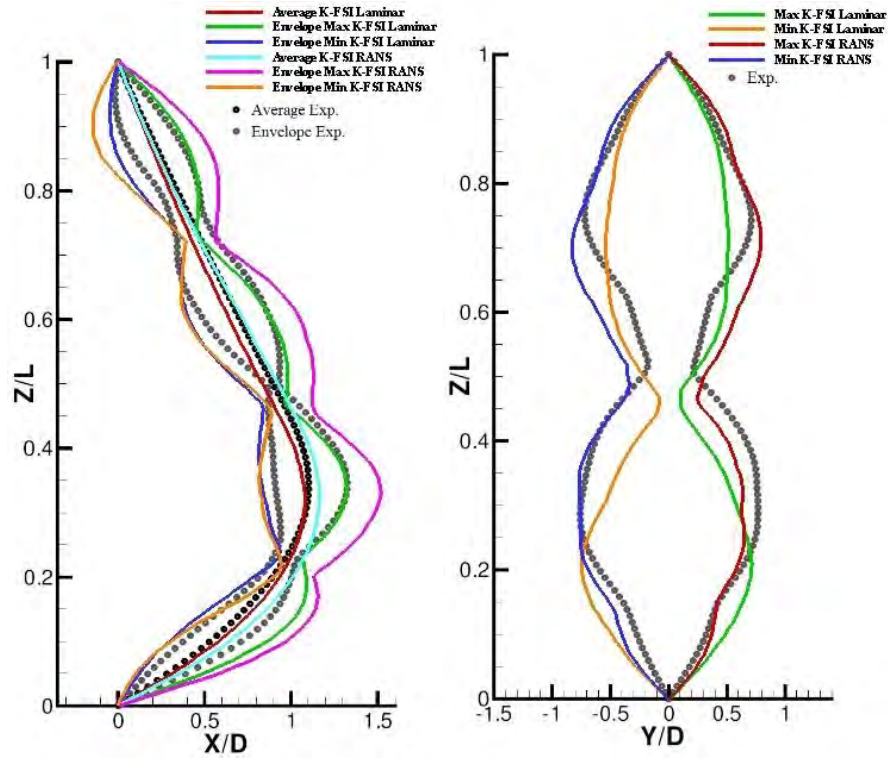


Figure 5 : Déformations *inline* et *crossflow* du riser, comparaison de l'outil K-FSI Laminaire vs Exp[CBHP05]

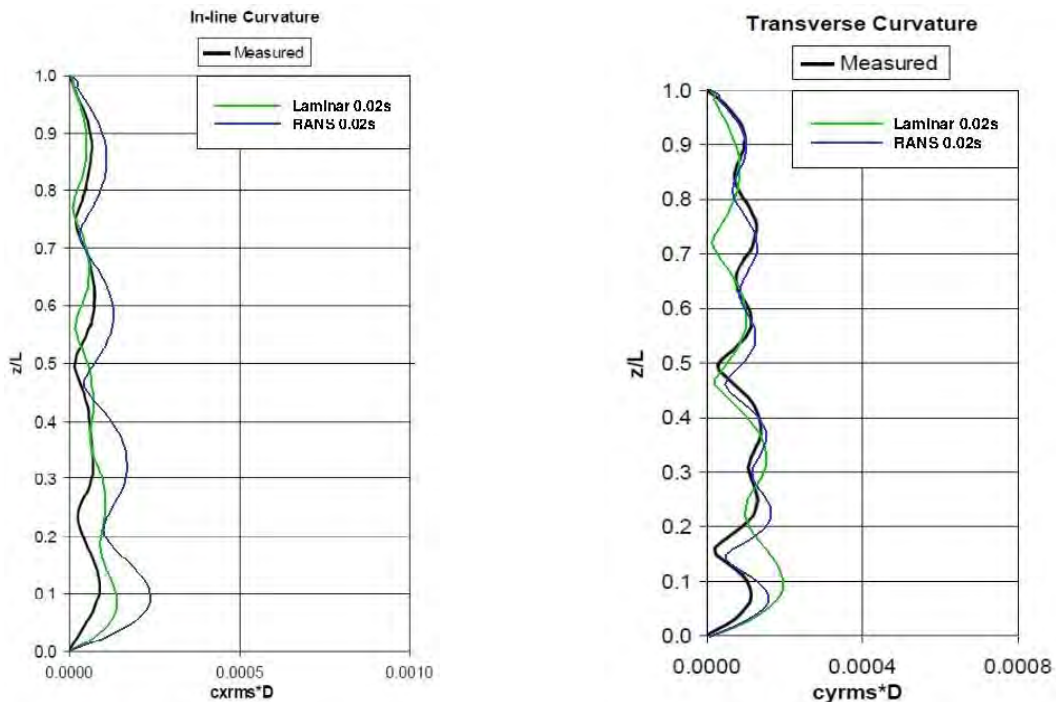


Figure 6 : Courbures *inline* (g) et *crossflow* (g) vs Exp[CBHP05]

Conclusions générales

Cette étude a permis de dissocier la problématique hydrodynamique de la problématique de l'interaction fluide-structure. Si les difficultés classiques peuvent être rencontrées dans l'étude hydrodynamique de cylindres fixes, notamment pour déterminer avec précision les efforts, on

a pu constater qu'il était possible de limiter la précision sur le comportement hydrodynamique sans pour autant détériorer la réponse structurelle dans le cas de l'interaction fluide-structure. Les prochaines étapes de ces travaux seront donc de confirmer ou d'infirmier cette tendance dans les cas où la turbulence devient importante.

Références

- [Durand2012] : Interaction fluide-structure souple et légère, application aux voiliers
- [Menter2003] : Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, ed: K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, Begell House, Inc., 2003, pp. 625 – 632
- [MenterDES] Menter, F. R., Kuntz, M. , « A zonal SST-DES Formulation », DES workshop, 2003 St-Petersburg
- [CC83] B Cantwell and D Coles. An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder *Journal of fluid Mechanics*, 136: 321-374, 1983.
- [CBHP04] Laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a vertical tension riser in a stepped current. Proceedings of the 8th International Conference on Flow-Induced Vibration, FIV2004, Paris.
- [CBHP05] JR Chaplin, PW Bearman, FJ Huera Huarte, and RJ Pattenden. Blind predictions of laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a tension riser. *Journal of Fluids and Structures*, 21(1):3–24, 2005.
- [Nor93] C Norberg. Pressure forces on a Circular Cylinder in Cross Flow. IUTAM Symposium on Bluff-Body Wakes, Dynamics and Instabilities 1992, 1993.
- [Nor03] C Norberg. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. *Journal of Fluids and Structures*, 17(1):57–96, 2003.
- [SB92] S Szepessy and PW Bearman. Aspect ratio and end plate effects on vortex shedding from a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 234:191–217, 1992.