

8<sup>èmes</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

5, 6, 7 MARS 2001 - NANTES

## **SIMULATION NUMERIQUE DES VIBRATIONS INDUITES PAR VORTEX DE STRUCTURES FLEXIBLES**

### ***NUMERICAL SIMULATIONS OF VORTEX INDUCED VIBRATIONS OF SLENDER OFFSHORE STRUCTURES***

**S. ETIENNE<sup>†</sup>, E. FONTAINE<sup>\*</sup>, C. LE CUNFF, J.M. HEURTIER et F. BIOLLEY**

Institut Français du Pétrole, 1 et 4 Av. de Bois Préau,  
92852 Rueil-Malmaison, Cedex, France.

<sup>†</sup> Actuellement au Bureau Veritas, Place des Reflets, La Défense, 92400 Courbevoie, France.

<sup>\*</sup> Actuellement à Principia R&D, Zone Portuaire de Brégaillon, 83507 La Seyne sur Mer, France.

#### **Résumé**

Dans cet article, on s'intéresse aux vibrations induites par vortex sur les conduites offshore. Le problème couplé fluide-structure est résolu numériquement dans le cadre d'une théorie par tranches. Dans chaque section perpendiculaire à l'axe du riser, l'écoulement turbulent bidimensionnel autour du riser circulaire est résolu numériquement. La méthode numérique spécifique a été validée par de nombreuses comparaisons entre résultats numériques et données expérimentales présentes dans la littérature. Un algorithme a été développé pour coupler le code de mécanique des fluides avec DeepLines, un logiciel d'éléments finis pour les structures filaires. Les déplacements locaux des sections sont pris en compte lors du calcul bidimensionnel de l'écoulement fluide, alors que les mouvements du riser sont obtenus par résolution tridimensionnelle du problème structurel. Les tranches s'influencent donc mutuellement au travers du mouvement global de la structure. Cette approche couplée a été validée sur des cas test simples pour lesquels des résultats quasi-analytiques existent. Finalement, des comparaisons entre résultats numériques et mesures in-situ sont présentées.

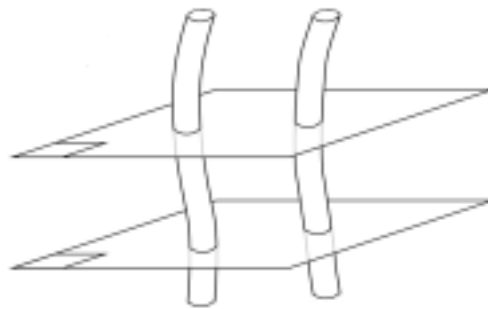
#### **Abstract**

Vortex-induced vibrations (VIV) of a slender offshore riser are studied. The coupled fluid-structure problem is solved numerically within the framework of strip theory. In each cross-section, the two-dimensional turbulent flow around the cylindrical riser is computed using a specifically designed numerical method which has been thoroughly validated through systematic comparisons between numerical and experimental results. An algorithm has been developed to couple this computational fluid dynamics (CFD) code with DeepLines, a structural software based on a Finite Element Method. The local displacements of the cross-sections are handled within the two-dimensional flow field computations, while the three-dimensional motion of the overall riser is obtained by resolution of the structural problem. Cross-sections are therefore mutually influenced through the global motion of the riser. This coupled approach is then validated on simple tests cases for which quasi-analytical results are available (CFD and modal approach). Finally, comparisons between numerical results and in-situ measurements are presented.

## I- INTRODUCTION

Les phénomènes d'interactions fluides-structures sont bien connus des ingénieurs du génie civil puisqu'ils provoquent de la fatigue structurelle, voire menacent l'intégrité de toute la structure en situation extrême. Dans le cas des faisceaux de risers offshore, des vibrations induites par vortex (VIV) ainsi que des instabilités fluidélastiques, telles que le galop induit par sillage, peuvent se produire. Par exemple, des investigations in-situ des VIV sur des structures réelles ont été présentées par Vandiver (1991) et des cas de galop ont été révélés par Price et al. (1993). Par ailleurs, les risques d'apparition de ces phénomènes augmentent puisque l'exploration-production pétrolière offshore s'effectue à des profondeurs d'eau de plus en plus grandes. En particulier, l'industrie pétrolière est amenée à introduire de nouveaux concepts, qui nécessitent des outils industriels capables de prédire les phénomènes complexes d'interactions fluides-structures avec une précision raisonnable.

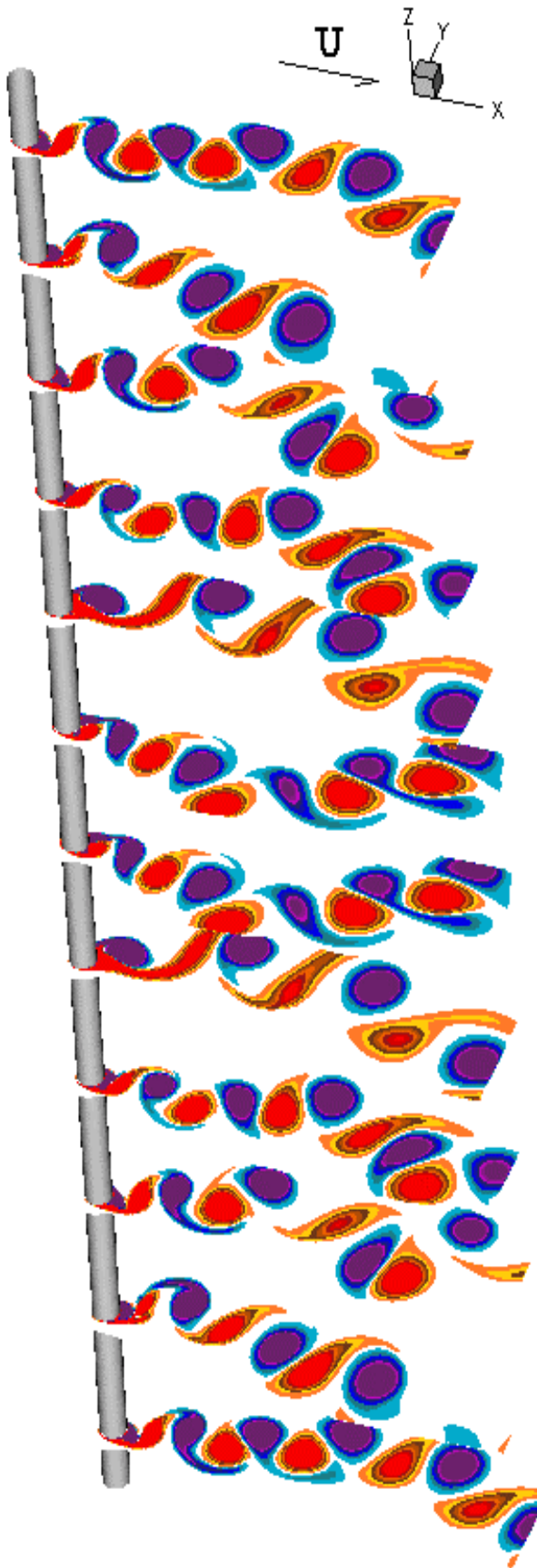
Le phénomène des vibrations induites par vortex se produit lorsque la fréquence de Strouhal associée au lâcher alterné de tourbillons est proche d'une des fréquences naturelles de la structure  $f_s$ . Cette interaction fluide-structure apparaît dans une plage limitée de vitesses réduites  $U_r = U / f_s D$ , où  $U$  et  $D$  sont respectivement la vitesse de l'écoulement et



**Figure 1. Illustration de la décomposition en tranches perpendiculaires à l'axe des structures.**

le diamètre de la structure. Les vibrations correspondantes de la structure sont auto-limitées à une amplitude d'environ un diamètre. Des amplitudes plus importantes, résultant d'instabilités fluidélastiques, ont été observées dans le cas de faisceaux de risers. Dans ce cas, les mouvements de chaque riser dépendent fortement de la configuration du faisceau ainsi que des conditions d'écoulement. Des observations détaillées de tels effets de galop induits par sillage sont présentées par Huse (1996).

Des modèles quasi-analytiques, avec différents niveaux de complexité, ont été proposés dans le but de mieux comprendre et prédire ces phénomènes ; l'état de l'art étant décrit dans Parkinson (1989) et Price (1995). Ces modèles physiques, qui supposent connus les comportements non-linéaires de la structure et du fluide, ne sont pas universels puisqu'ils ont besoin de données expérimentales pour évaluer les coefficients intrinsèques à la modélisation. Bien que l'étude présentée concentre l'attention sur les VIV, le principal intérêt de la méthode numérique proposée ci-après est sa possible application à l'étude générale des interactions fluides-structures. Ces applications, par exemple dans le cas de faisceaux de risers, seront présentées dans de futures communications.



**Figure 2. Exemple de calcul couplé fluide-structure. Les niveaux de couleurs représentent les champs de vorticité de 12 des 120 tranches réparties le long de l'axe de la structure.**

Du point de vue de la conception, les vibrations induites par vortex des risers offshore sont le plus souvent évaluées à l'aide de modèles simplifiés étroitement liés à l'analyse modale de la structure. L'excitation de la structure par l'écoulement est prise en compte à l'aide de formules semi-empiriques pour évaluer les coefficients d'efforts en ligne et transverses qui dépendent du nombre de Reynolds, de l'amplitude de vibration, et de longueurs de corrélation le long de l'axe des structures. L'analyse modale est obtenue de manière analytique pour les configurations géométriques les plus simples, ou numériquement pour les plus compliquées. (cf. par exemple, Vandiver, 1987, Lyons & Patel, 1989, Lie, 1995, Le Cunff et al., 1999). Une approche plus précise, prenant en compte les non-linéarités de la structure dans le domaine temporel, consiste à résoudre le problème structurel en utilisant un solveur éléments finis et un modèle simplifié pour le fluide (Ferrari & Bearman, 2000). Il faut également noter que les non-linéarités liées au comportement du fluide sont en partie contournées par la calibration à l'aide de données expérimentales. Des comparaisons entre ces différentes méthodes sont présentées dans Larsen & Halse (1995), où il est montré que la qualité de ces modèles peut être améliorée en utilisant des outils numériques puisque le besoin en données expérimentales est alors beaucoup plus réduit. Par ailleurs, le faible nombre de mesures pour de grandes valeurs du nombre de Reynolds met également en défaut les méthodes simplifiées. Finalement, des modélisations ont été entreprises en utilisant des modèles d'oscillateurs non-linéaires. Par exemple, l'équation de Van der Pol a récemment été utilisée par Skop & Balasubramanian (1997). Une modélisation de ce type est actuellement en développement à l'Institut Français du Pétrole, et devrait permettre d'évaluer les longueurs de corrélation le long de la structure.

Au regard des récents progrès en capacités de calcul et de stockage des ordinateurs, une approche attractive consiste à résoudre directement les équations de Navier-Stokes

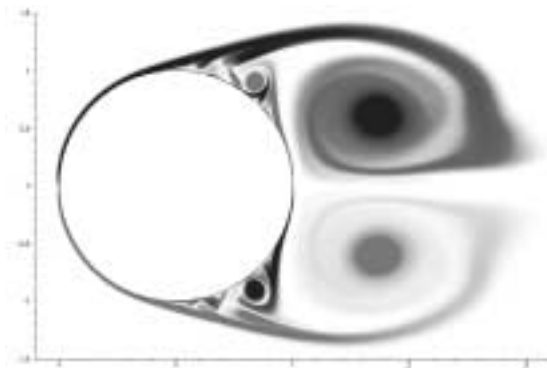
afin d'obtenir une réponse détaillée de l'écoulement et de prendre en compte toutes les non-linéarités présentes dans le système mécanique. Une telle simulation numérique directe de l'écoulement autour d'une structure flexible élançée a été accomplie par Evangelinos & Karniadakis (1999). Des temps de calculs très importants sur supercalculateurs sont néanmoins nécessaires à ces simulations puisqu'un très grand nombre de cellules de discrétisation est requis afin de représenter toutes les échelles de l'écoulement turbulent. Ces simulations sont donc limitées à des valeurs faibles du nombre de Reynolds, de l'ordre de  $10^3$ . De plus, si on définit un rapport d'aspect  $1/\varepsilon=L/D$  où  $L$  est la longueur de la structure, les plus récents calculs sont limités à des valeurs de  $1/\varepsilon$  de l'ordre de  $10^3$ , la taille des cellules du maillage le long de l'axe du riser étant de l'ordre de 10 diamètres (Lucor et al., 2000). Les applications pratiques nécessiteraient d'atteindre des valeurs de  $Re$  de l'ordre de  $10^6$ , et des tailles axiales de cellules beaucoup plus faibles en particulier dans le cas d'écoulements cisailés. Cela est donc hors d'atteinte actuellement. Même en introduisant des modèles de turbulence, la modélisation de cas réalistes reste limitée aux seuls grands projets de recherche.

Dans cette étude, une méthode alternative basée sur une théorie des tranches est proposée. Cette approche offre un compromis intéressant entre complexité, précision et efficacité en terme de temps CPU. Par la suite, la base de cette approche est décrite. La technique numérique utilisée pour résoudre les équations de Navier-Stokes-Reynolds (ENSR) dans chaque tranche bidimensionnelle est brièvement présentée. Les résultats numériques sont alors validés au travers de comparaisons détaillées avec les résultats expérimentaux présents dans la littérature. La méthode utilisée pour la résolution numérique du problème structurel est ensuite exposée. Des exemples simples de problèmes d'interactions fluide-structure permettent de valider la méthode de couplage. La compétition entre différents modes structurels excités sur un exemple permet d'illustrer les possibilités de la méthode. Les résultats de cette approche couplée (DeepFlow) sont également comparés avec l'approche modale (DeepVIV). Finalement, la méthode est appliquée à la modélisation d'un riser de forage réel pour lequel des mesures in-situ sont publiées. Un accord satisfaisant entre résultats numériques et expérimentaux est obtenu.

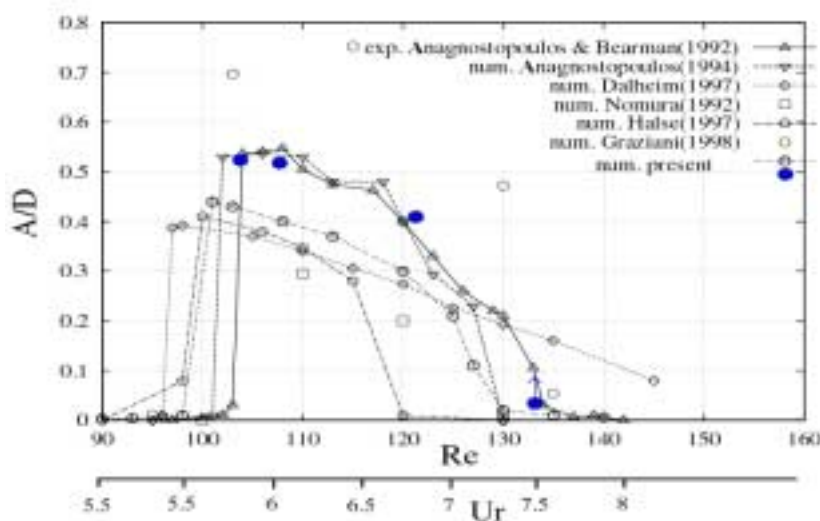
## II- DESCRIPTION DE L'APPROCHE

On considère l'écoulement tridimensionnel et turbulent autour d'un riser. En utilisant le rapport de longueur  $\varepsilon$  comme paramètre de perturbation, on montre que les équations de Navier-Stokes tridimensionnelles initiales se réduisent, au premier ordre d'approximation, à leur forme bidimensionnelle dans chaque tranche perpendiculaire à l'axe du riser. Cette approche suppose implicitement un faible taux de cisaillement de l'écoulement incident, si bien que la perturbation de l'écoulement le long de l'axe du riser est négligeable comparativement aux composantes dans le plan. En première approximation, l'écoulement peut donc être calculé dans différentes tranches; voir Fig. 1 et 2, conduisant à une distribution curvilinéaire des efforts le long du riser. Les déplacements du riser sont évalués en résolvant le problème structurel tridimensionnel pour de grands déplacements. Bien que les calculs fluides soient effectués dans des plans transverses, la contribution majeure des effets tridimensionnels est représentée par cette approche. En effet, les conditions de glissement sur le corps prennent en compte les mouvements relatifs du riser et du fluide, si bien que les tranches sont mutuellement couplées au travers du mouvement global du riser. Par ailleurs, les modèles de turbulence utilisés résultent d'une analyse intrinsèque tridimensionnelle de l'écoulement.

Des travaux précédents portant sur une modélisation similaire du problème fluide-structure ont été présentés par Herfjord et al. (1998). Toutefois, le nombre de plans de calculs fluides transverses le long de la structure reste limité à une valeur d'environ trente, à cause du coût en temps de calcul du solveur fluide utilisé. Par ailleurs, les configurations réelles sont représentées à l'aide de calculs Navier-Stokes à faibles nombres de Reynolds, transgressant ainsi la loi de similitude par rapport à la situation réelle. Des calculs aux faibles nombres de Reynolds ont également été effectués par Willden & Graham (2000), incluant quelques effets tridimensionnels intéressants. Il n'est cependant pas démontré comment leur formulation, basée principalement sur l'intuition physique, peut se justifier formellement au travers d'une analyse asymptotique du problème. En particulier, les composantes de vorticité dans le plan, qui sont du même ordre que la composante de vitesse axiale, ne sont pas considérées à proximité du cylindre.



**Figure 3. Ecoulement impulsivement démarré.  $Re=9500$ ,  $U_t/D=4$ . Les niveaux de valeurs comme le signe de la vorticité sont représentés par l'intensité des couleurs.**



**Figure 4. Amplitude des vibrations d'un cylindre en fonction de la vitesse réduite pour un rapport de masse structure-fluide de 148.**

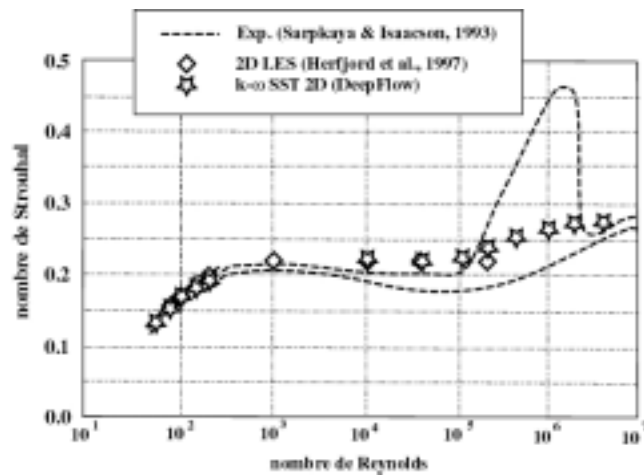


Figure 5. Evolution du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds.

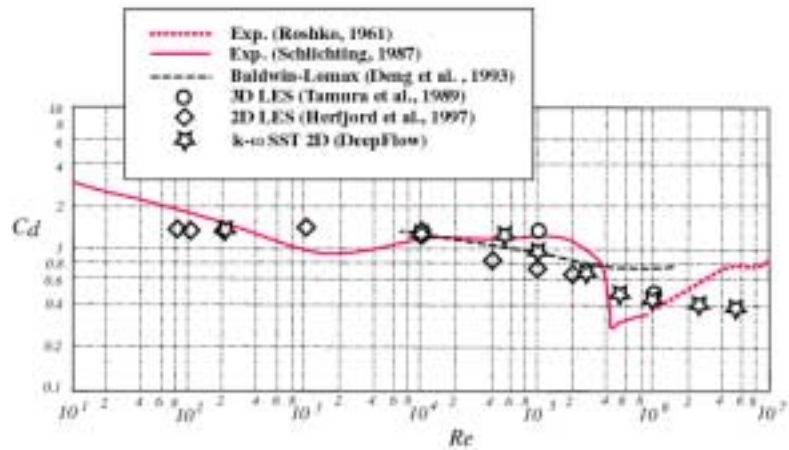


Figure 6. Evolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds.

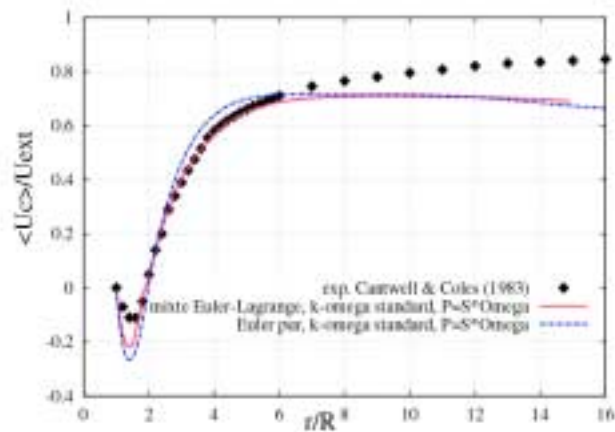


Figure 7. Evolution de la vitesse relative moyennée le long de l'axe du sillage en fonction de la distance au cylindre.

### III- MODELISATION DE L'ECOULEMENT FLUIDE

Dans cette partie, la méthode numérique utilisée pour résoudre les ENSR est présentée. Les résultats numériques sont ensuite validés par des comparaisons détaillées avec des résultats expérimentaux.

#### 1- Méthode numérique

Dans chaque plan transverse, les ENSR sont écrites en formulation de vorticité et fonction de courant. Une méthode numérique spécifique a été développée pour résoudre ces équations dans le cas général de faisceaux de cylindres (Etienne 1999, Etienne et al. 1998). Dans la présente étude, l'attention est portée sur l'écoulement autour d'un seul cylindre circulaire. Les équations de transport de la vorticité et l'équation de Poisson pour la fonction de courant, sont r solv es dans un domaine eulérien entourant le cylindre. L'équation de Poisson est r solv e en coordonnées polaires à l'aide d'une méthode spectrale pour la direction angulaire et un schéma par différences finies hermitiennes au 4<sup> me</sup> ordre dans la direction radiale. Le système linéaire résultant est formée par une matrice bande tridiagonale de matrices blocs 3×3. L'équation de transport est discrétisée en utilisant une technique de volumes finis. Les termes convectifs sont traités par des schémas QUICK et TVD, alors que les termes diffusifs sont évalués par différences finies centrées au second ordre. Un algorithme ADI est employé pour l'intégration en temps. Ce calcul eulérien peut être couplé avec une méthode lagrangienne pour décrire plus précisément le sillage lointain.

#### 2- Validation expérimentale

Les résultats numériques obtenus par cette méthode ont été soigneusement validés avec des données expérimentales pour des régimes laminaires et turbulents.

La figure 3 montre un exemple de résultats de calculs pour le champ de vorticité à l'arrière d'un cylindre fixe placé en écoulement uniforme impulsif. La morphologie de cet écoulement laminaire, en particulier l'apparition de tourbillons secondaires au voisinage proche de la paroi, a été confirmée expérimentalement (Bouard & Coutanceau, 1980).

Sur la figure 4, les amplitudes de vibration d'un cylindre en mouvement libre sont présentées en fonction de la vitesse réduite. Les calculs prédisent correctement la région d'accrochage ainsi que l'amplitude des vibrations, pourvu que le sillage soit établi avant de laisser le corps libre de vibrer transversalement.

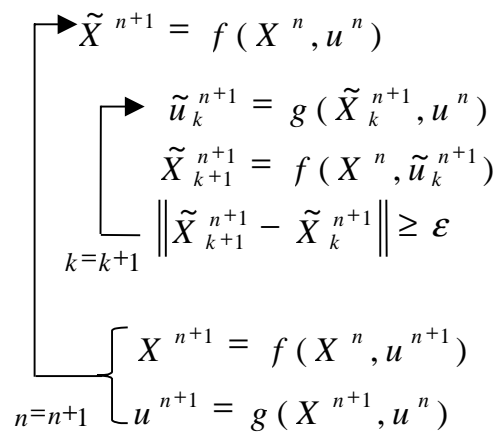
Une autre corrélation importante, tracée sur la figure 5, est l'évolution de la fréquence de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds. Les résultats numériques sont en très bon accord avec les données expérimentales aux faibles nombres de Reynolds, et ils restent satisfaisants dans la gamme de valeurs de Re comprise entre  $10^4$  et  $10^6$ . Des comparaisons plus détaillées deviennent difficiles vu la disparité des données expérimentales dans ce régime. En effet, du fait de la transition vers la turbulence, les mesures deviennent très sensibles à des paramètres tels que la rugosité et le taux de turbulence amont.

Sur la figure 6, le coefficient de traînée est tracé en fonction du nombre de Reynolds. Ici encore, l'accord entre résultats numériques et mesures expérimentales aux faibles valeurs du nombre de Reynolds est excellent. Le plateau sur la gamme allant de  $10^2$  à  $10^5$  est bien reproduit malgré la présence de structures tridimensionnelles non nécessairement turbulentes dans cette région. La transition vers le régime critique se produit de manière plus lisse comparativement aux expériences, pour lesquelles, une décroissance rapide du coefficient de traînée est observée. Dans le régime pleinement turbulent, le coefficient de traînée est

légèrement sous-estimé, ce qui est probablement lié à l'utilisation du modèle de turbulence de type k- $\omega$ . Toutefois, comparativement à d'autres résultats numériques présents dans la littérature, la méthode employée donne généralement de meilleurs résultats.

Les calculs effectués, avec la méthode eulérienne et la méthode mixte Euler-Lagrange, montrent que, dans le régime de transition  $Re=140000$ , la méthode permet de retrouver le comportement de la vitesse moyenne le long de l'axe central du sillage (cf. Etienne & Scolas, 2000). Les comparaisons avec d'autres résultats publiés précédemment (Fig. 7) indiquent que le modèle (k- $\omega$ ) donne de meilleurs résultats que d'autres modèles à deux équations, comme par exemple le modèle (k- $\epsilon$ ) standard (cf. Kassaré & Stromheier, 1997).

#### IV-MODÉLISATION STRUCTURELLE ET STRATÉGIE DE COUPLAGE



**Figure 8. Algorithme de couplage.**

La modélisation structurelle du riser est obtenue par le logiciel DeepLines, basé sur des éléments finis filaires. Une procédure de couplage spécifique a été développée afin de prendre en compte les efforts extérieurs fournis par la modélisation fluide numérique. L'algorithme de couplage est de type prédicteur-correcteur, comme illustré sur la figure 8.

Au début de chaque pas de temps, la configuration de l'écoulement, et donc, les efforts, sont connus. Une première estimation de la dynamique du riser est obtenue par résolution du principe des travaux virtuels:

$$\left( \vec{F}_{inertia} + \vec{F}_{internal} + \vec{F}_{external} \right) \cdot \delta \vec{X} = 0,$$

qui est discrétisée en utilisant un schéma implicite de type Newmark associé à la méthode des éléments finis. La résolution du système non-linéaire résultant est effectuée en utilisant l'algorithme itératif de Newton-Raphson. En vue d'améliorer le taux de convergence, la partie des efforts liée à l'écoulement de fluide parfait est traitée de manière implicite, si bien que seule la partie liée à l'écoulement de fluide visqueux est traitée explicitement. Après résolution du problème structurel, les déplacements et vitesses de la structure sont connus. Les calculs Navier-Stokes sont alors effectués sur chaque tranche, conduisant à une distribution curvilinéaire des efforts hydrodynamiques le long du riser. Ces efforts hydrodynamiques sont alors utilisés comme entrée pour un second calcul structurel. Cette procédure peut alors être répétée jusqu'à convergence pour les mouvements de la structure et la répartition des efforts. Toutefois, le pas de temps utilisé dans ces simulations étant relativement faible (puisque guidé par les calculs fluides), une seule itération est généralement



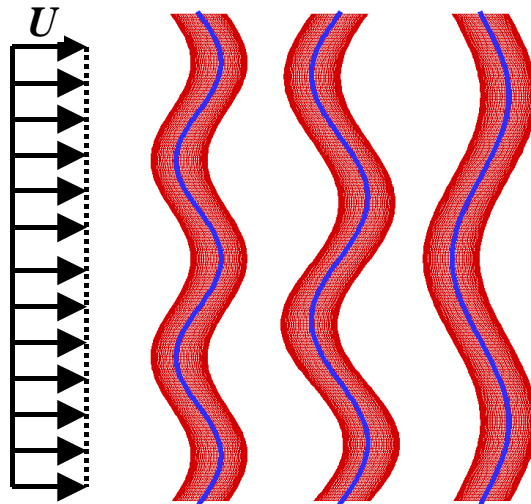
suffisante pour obtenir des résultats consistants. Par ailleurs, grâce à l'efficacité du code de calcul fluide, il est possible de calculer l'écoulement sur un grand nombre de tranches, typiquement de l'ordre de  $10^2$  sur un PC.

## V- EXEMPLES D'APPLICATIONS

Dans un premier temps, deux cas d'étude sont présentés afin de valider l'approche : le cas d'un courant uniforme et celui d'un courant ayant un profil en marche. Ensuite, la réponse dynamique d'un riser réel est comparée avec des mesures in-situ.

### 1- Cas du courant uniforme

Comme attendu, les vibrations induites par vortex sont observées pour les modes structurels correspondant à la fréquence de Strouhal. Une superposition des vibrations adimensionnelles du riser avec la forme du mode associé est présentée sur la figure 9, pour trois vitesses différentes du courant incident.

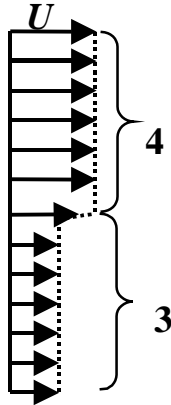


**Figure 9. Vibrations du riser comparées aux déformées analytiques correspondant aux vitesses d'écoulement excitant les modes 3, 4 et 5.**

### 2- Cas du courant avec profil en marche – compétition de modes structurels

Comme cas d'étude, les résultats sont présentés pour un profil de courant de type marche dans le cas d'une conduite idéalisée de 1000m de longueur et 0.1 m de diamètre. La structure est non pesante dans l'eau et est tendue à 8707N. Supposant un coefficient de masse ajoutée de 1, les fréquences propres de la structure sont:

Numéro du mode	Fréquence (Hz)
1	0.09389
2	0.18779
3	0.28170
4	0.37565
5	0.46963



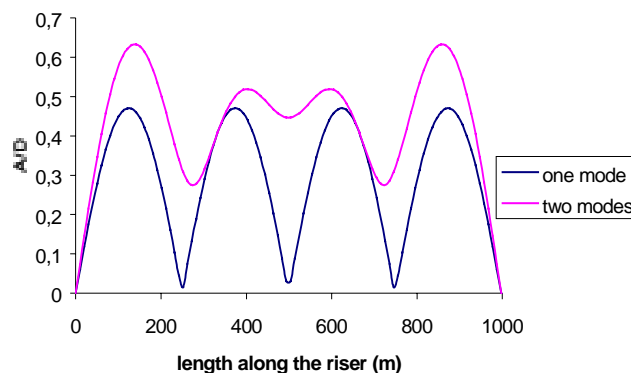
**Figure 10. Schéma du profil en marche du courant.**

La vitesse du courant vaut 0.188m/s de 0 à 500m et 0.141m/s de 500m au fond. L'approche modale, utilisant DeepVIV et  $St=0.2$ , indique que le mode 4 est excité dans la partie haute du riser et le mode 3 dans la partie basse comme cela est montré sur la figure 10.

La distribution d'énergie modale de la réponse, qui est un équilibre entre l'excitation transverse et l'amortissement hydrodynamique (le coefficient d'amortissement structural étant nul) vaut:

- Mode 3: 26%
- Mode 4: 74%.

Comme le riser est non pesant et le mode 4 dominant, une réponse unimodale est attendue. Dans ce cas, l'excitation de la structure à son 4<sup>ème</sup> mode empêche l'apparition du mode 3. Une comparaison entre les amplitudes RMS des deux scénarios est présentée sur la figure 11. Dans le cas spécifique du profil en marche, l'excitation bimodale montre une amplitude de vibration plus élevée que dans le cas d'une réponse unimodale. Comme les vitesses du courant sont différentes, la zone d'accrochage du mode 4 n'est pas étendue jusqu'au bas de la structure.



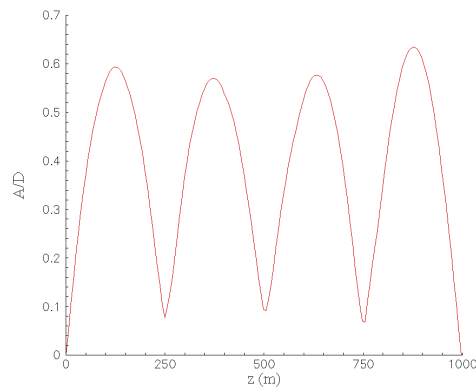
**Figure 11. Amplitudes RMS amplitude des vibrations obtenues par l'approche modale. Comparaisons de calcul unimodaux et bimodaux.**

Le même cas est étudié à l'aide de DeepFlow. Les calculs sont conduits sur 260s. Les dernières 80s sont analysées afin de comprendre le comportement de la structure. La figure 12 montre les maxima de vibrations de la structure. Les quatre pics indiquent une réponse au

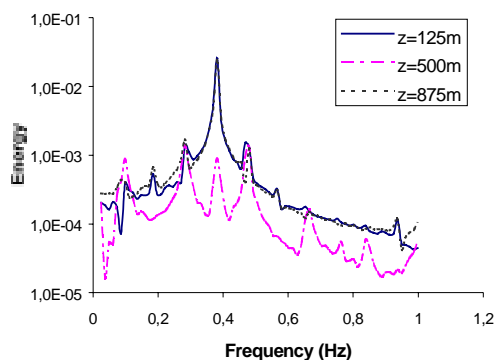
mode 4. L'analyse modale prédit une amplitude maximale pour le mode 4 de  $0.67D$  ce qui est en accord avec  $0.63D$  de la figure 12. Une transformée de Fourier du signal est représentée sur la figure 13 à trois altitudes différentes (125, 500 et 875m). A 125m et 875m de profondeur, le mode 4 est dominant, son énergie étant au moins un ordre de grandeur plus grand que pour les autres modes. Ces deux altitudes correspondent à des ventres du mode 4. Afin de rechercher l'influence d'autres modes, le point milieu du riser a été inspecté puisqu'il correspond à un ventre pour les modes impairs. Les deux modes dominants à cet endroit sont les modes 3 et 5, mais avec très peu d'énergie. L'analyse FFT montre donc clairement que l'approche numérique couplée prédit une réponse de type unimodal dans ce cas.

L'analyse du comportement du signal à la station  $z=500m$  est étudiée plus finement afin de comprendre la présence du mode 5 dans le signal, puisqu'il n'est pas prédit en appliquant le critère de résonance à la fréquence de Strouhal. Pour ce faire, une analyse par ondelettes est employée suivant la technique décrite par Weggel et al. (1999). Les tracés de contour de la figure 14 représentent la distribution d'énergie spectrale en fonction du temps. L'analyse par transformée de Fourier précédente montrait une énergie comparable entre les modes 3 et 5. Les calculs par ondelettes indiquent que le mode 5 disparaît progressivement au profit du mode 3, indiquant ainsi que la présence du mode 5 est un phénomène transitoire.

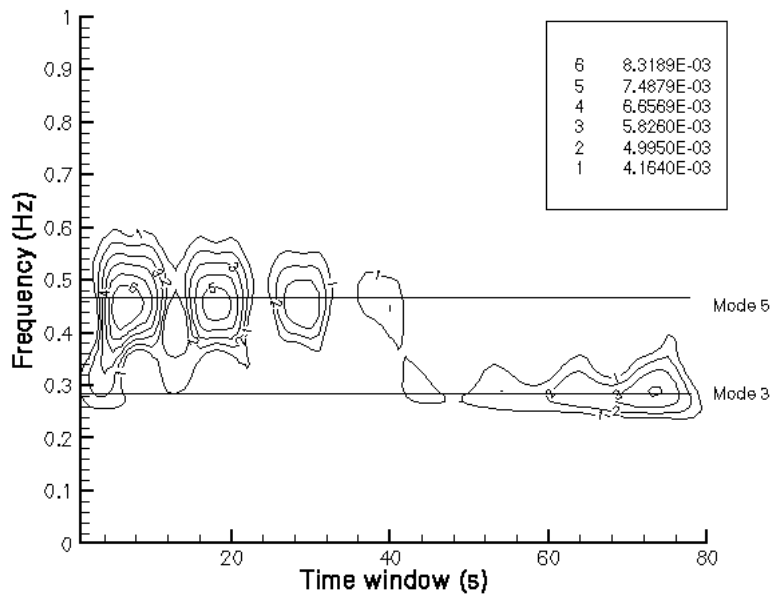
Cette étude limitée montre que même si les modes 3 et 4 sont présents, la réponse globale du riser non pesant calculée par la méthode couplée est complètement dominée par le mode 4. Supposant une réponse unimodale, comme cela est attendu pour une telle configuration (cf. Vandiver et al., 1996), l'amplitude prédite est également similaire à celle obtenue par l'analyse modale.



**Figure 12. Maximas d'amplitude des vibrations le long du riser par l'approche**

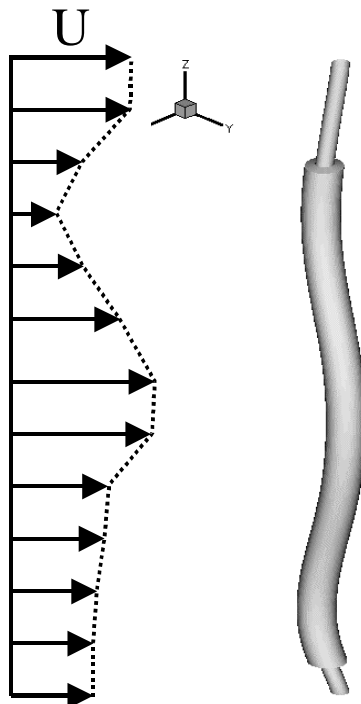


**Figure 13. Transformée de Fourier du signal de  $t=180s$  to  $t=260s$  à trois différentes hauteurs.**



**Figure 14. Analyse par ondelettes en temps des mouvements du riser pour  $z=500\text{m}$ . Le mode 5 devient de moins en moins excité au profit du mode 3. Les modes 3 et 5 sont également tracés sous la forme de traits horizontaux. Le temps réel est compris entre 180s et 260s.**

### 3- Comparaisons avec des mesures in situ



**Figure 15. Modèle du riser de forage équipé du champ de Hellen-Hansen.**

Un riser de forage sur le champ de Helland-Hansen a été instrumenté dans le cadre du « Norwegian Deepwater Program » (cf. Kaasen et al., 2000). Les profils de vitesse du courant et les accélérations structurales ont été mesurées à différentes profondeurs. Ce cas réel a été simulé à l'aide de la méthode couplée.

La modélisation du riser est présentée sur la figure 15 où l'on voit que le riser est nu sur les parties hautes et basses et que des modules de flottabilité le recouvrent sur sa partie médiane. La simulation montre que la réponse structurelle est caractérisée par une compétition entre les modes 2 et 3. Ce comportement est en accord qualitatif avec les mesures effectuées in-situ. Des analyses plus détaillées sont actuellement menées pour étudier les mouvements en ligne et transverses ainsi que pour déterminer leurs fréquences principales d'excitation.

## **VI-CONCLUSION**

Les vibrations induites par vortex ont été étudiées en utilisant une méthode couplée grâce à laquelle les interactions fluide-structure sont simulées en temps. L'évolution temporelle de l'écoulement est calculée dans des tranches perpendiculaires à l'axe de la structure. Les efforts hydrodynamiques résultants sont utilisés dans une modélisation structurelle basée sur la méthode des éléments finis. La précision du code de calcul fluide a été démontrée au travers de nombreuses comparaisons avec des résultats expérimentaux. Un très bon accord est obtenu dans le régime laminaire pour le nombre de Strouhal, le coefficient de traînée et les zones d'accrochage. Les résultats sont satisfaisants dans le régime turbulent pour lequel il est démontré que le modèle (k- $\omega$ ) permet une meilleure modélisation de l'écoulement que le modèle (k- $\epsilon$ ).

L'approche couplée permet d'obtenir un compromis intéressant entre complexité, précision et efficacité en temps CPU. Les simulations sont effectuées en utilisant une centaine de tranches réparties le long du riser, ce qui assure la convergence numérique du schéma même pour les modes élevés. Plusieurs cas ont été étudiés qui démontrent les possibilités de la méthode couplée. Sur les cas simples le comportement attendu est correctement prédit à la fois du point de vue modal que du point de vue des amplitudes des vibrations. Une réponse unimodale a été observée comme prévu dans le cas d'un courant uniforme, mais également dans le cas de compétition de modes. Finalement, l'approche couplée a été appliquée à des configurations réelles caractérisées par des valeurs élevées du nombre de Reynolds et un rapport d'aspect L/D très important. Les résultats numériques sont en accord qualitatif avec les mesures effectuées in-situ.

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions le support financier du Comité d'Etudes Pétrolières et Marines par le contrat référencé CEP&M M.7502/99 ainsi que la contribution scientifique de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Marseille (ESIM). Une version anglaise de cette étude a par ailleurs été publiée (Etienne et al., 2001).

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Bouard, R. & Coutanceau, M., 1980, "The early stage of development of the wake behind an impulsively started cylinder for  $40 < Re < 10^4$ ," J. Fluid Mech., Vol. 101, part.3.
- DeepLines<sup>TM</sup>, 2000, "Keywords manual", IFP/PRD Report V2r2.
- Etienne, S. & Scolan, Y.M., 2000, "Résolution lagrangienne d'écoulements bidimensionnels turbulents," C.R. Acad. Sci., t. 328, Série IIB, pp. 91-96.
- Etienne, S., 1999, "Contribution à la modélisation de l'écoulement de fluide visqueux autour de faisceaux de cylindres circulaires," Thèse de Doctorat de l'Université de la Méditerranée, Aix -Marseille II – Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Marseille.

- Etienne, S., Scolan, Y.M., Molin, B., & Biolley, F., 1998, "A numerical study of complex flow around an array of circular cylinders in various arrangements," Proc. Hydro-elasticity in Marine Technology, Fukuoka, Japan.
- Etienne, S., Biolley, F., Fontaine, E., Le Cunff, C., & Heurtier, J.-M., 2001, "Numerical simulation of vortex-induced vibrations of slender offshore structures," ISOPE 2001.
- Evangelinos, C. & Karniadakis, G.E., 1999, "Dynamics and flow structures in the turbulent wake of rigid and flexible cylinders subject to vortex-induced vibrations," JFM, vol. 400, pp. 91-124.
- Ferrari, J.A. & Bearman, P.W., 2000, "A three-dimensional model for wave and vortex-induced vibration of deepwater riser pipes," Flow-Induced Vibrations 2000, pp 3-10.
- Herfjord, K., Drange, S.O., & Kvamsdal, T., 1998, "Assessment of vortex-induced vibrations on deep water risers by considering fluid-structure interaction," 17th OMAE Conf.
- Huse, E., 1996, "Large scale testing of deep water risers in current," oral presentation, Seminar on Hydroelasticity in Marine Technology, Trondheim (1 Nov. 96).
- Kaasen, K.E., Lie, H., Solaas, , Vandiver, J.K., 2000, "Norwegian Deepwater Program: analysis of Vortex-induced Vibrations of Marine risers based on full-scale measurements," Proc. OTC 2000, paper OTC11997.
- Kassera, V. & Stromheier, K., 1997, "Simulation of tube bundles vibrations induced by cross-flow," J. Fluid Struct., Vol 11, pp. 909-928.
- Larsen, C.M. & Halse, K.H., 1995, "Comparison of models of Vortex induced vibrations of slender marine structures," Flow Induced Vibrations, pp. 467-482.
- Le Cunff, C., Biolley, F., & Durand, A. 1998, "Prediction of the response of a structure to vortex-induced vibrations: comparison of a modal and a wave approach," Proc. 18<sup>th</sup> OMAE, St John's, Canada.
- Lie, H., 1995, "A time domain model for simulation of vortex induced vibrations on a cable," Flow Induced Vibrations, pp. 455--462.
- Lucor, D., Evangelinos, C., & Karniadakis, G.E., 2000, "DNS-derived force distribution on flexible cylinders subject to VIV with shear inflow," Flow-Induced Vibrations 2000, pp 281-294.
- Lyons, G.L. & Patel, M.H., 1989,"Application of a general technique for prediction of riser vortex-induced response in waves and current," ASME, Vol. 111, pp. 82--91.
- Nedergaard, H., Ottesen Hansen, N.-E. & Fines, S., 1994, "Response of free hanging tethers," Proceedings of BOS 94, pp "315-332.
- Parkinson, G., 1989, "Phenomena and modelling of flow-induced vibrations of bluff bodies," Prog. Aerospace Sci., Vol. 26, pp. 169--224.
- Skop, R.A. & Balasubramanian, S., 1997, "A new twist on an old model for vortex-excited vibrations," J. Fluids and Structures, Vol. 11, pp. 395--412.
- Vandiver, J.K., 1998, "Research challenges in the vortex-induced vibration prediction of marine risers," OTC 8698.
- Vandiver, J.K., Allen, D. & Li, L., 1996, "The occurrence of lock-in under highly sheared conditions," Journal of Fluids and Structure, Vol 10, pp 555-561.
- Vandiver, J.K., 1991, "Dimensionless parameters important to the prediction of long, flexible cylinders in ocean currents," J. Fluid & Structures, Vol. 7, pp. 423--455.
- Weggel, D.C., Jordan, D.A., Roesset, J.M. & Miksad, R.W., 1999, "Wavelet Ridge analysis of the nonlinear response of Spars subjected to irregular wave excitation," OMAE 99.
- Willden, R.H.J. & Graham, J.M.R., 2000, "Vortex induced vibrations of deep water risers, Flow-Induced," Vibrations Proc.