

Chapitre I

L'interaction fluide/structure

1 Description de l'interaction fluide/structure

Les phénomènes liés au couplage mécanique fluide/structure apparaissent, à des degrés divers d'importance, pour toute structure en contact avec un fluide. Ce type de couplage *multi-physique* se rencontre dans de nombreuses situations industrielles et l'influence qu'il peut avoir sur le comportement dynamique de systèmes mécaniques est souvent significative. Sa prise en compte devient un enjeu de première importance dans le dimensionnement de structures, en particulier en raison d'exigences de sécurité associées à leur conception.

Un problème d'interaction fluide/structure (IFS) met en jeu deux milieux continus (solide et fluide) tels que [12] :

- les milieux solide et fluide échangent des énergies d'origine *mécanique*;
- les phases solide et fluide sont *distinctes*;
- les milieux solide et fluide *n'échangent pas de masse*.

Le couplage mécanique entre les deux milieux s'opère dans les deux sens au niveau de leur surface de contact : les déformations de la structure, sous l'effet des efforts imposés par l'écoulement du fluide, modifient la configuration de l'interface fluide/structure ; les conditions d'écoulement du fluide en sont affectées, ce qui induit une modification de l'effort exercé sur la structure au niveau de l'interface, bouclant le cycle de l'interaction (voir FIG. I.1).

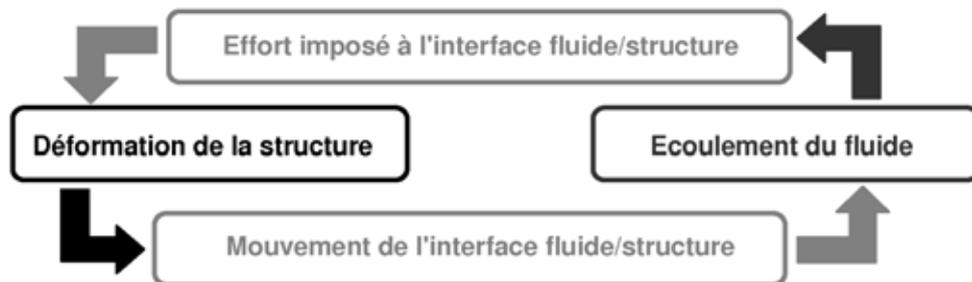


FIG. I.1 : Mécanisme de couplage fluide/structure

Cette définition recouvre une gamme très étendue de problèmes et il est difficile d'établir une classification des phénomènes physiques mis en jeu par le couplage. L'interprétation *dimensionnelle*, développée en particulier par de Langre [12], permet de caractériser, selon

les situations, les effets prépondérants du couplage. Elle consiste à identifier, pour chaque type de problème, un nombre sans dimension caractérisant l'échange d'énergie mécanique entre fluide et solide et quantifiant l'importance d'un phénomène physique caractéristique de l'interaction. L'analyse dimensionnelle constitue un outil d'analyse *a priori* particulièrement bien adapté au besoin de l'ingénieur pour distinguer différentes classes de problèmes d'IFS¹.

De façon qualitative, on propose ici une classification des problèmes en adoptant :

- un point de vue que l'on peut qualifier de "géométrique", selon que le fluide est "contenu" ou "contenant". Dans le premier cas, la structure contient le fluide, ce dernier pouvant être totalement confiné dans la structure ou présenter une surface libre ; dans le second cas, la structure est partiellement ou totalement contenue dans le fluide, qui occupe un domaine non borné ;
- un point de vue que l'on peut qualifier de "physique", selon que le fluide est "stagnant" ou "s'écoulant"². Dans le premier cas, il s'agit de décrire les petits mouvements du fluide et de la structure autour d'un état d'équilibre au repos. Sous ces conditions, une description de la dynamique de l'interaction dans le *domaine fréquentiel* est bien adaptée ; les équations de comportement de la structure et du fluide sont écrites sur la *configuration de référence* et donnent lieu, en général, à la résolution de problèmes linéaires. Dans le second cas³, il s'agit de décrire les grands mouvements du fluide et/ou de la structure. Sous ces conditions, une description de la dynamique de l'interaction dans le *domaine temporel* est adoptée ; les équations de comportement de la structure et du fluide sont écrites sur la *configuration courante* et donnent lieu, en général, à la résolution de problèmes non linéaires.

Pour illustrer cette approche qualitative, on propose quelques exemples issus du domaine de la construction navale militaire, voir FIG. I.2. On y rencontre de nombreuses situations qui impliquent des problèmes de couplage fluide/structure et dont l'ingénieur doit rendre compte de façon plus ou moins approchée dans ses études de justification de tenue mécanique des systèmes [22] :

- en fluide *stagnant* – comportement vibratoire d'ensemble d'un réacteur nucléaire de propulsion (fluide *contenu*) ; rayonnement acoustique de la coque du navire sous l'effet d'une excitation mécanique interne (fluide *contenant*) ; déformation de la coque du navire sous l'effet d'une onde acoustique résultant de l'explosion d'une charge sous-marine (fluide *contenant*) ;
- en fluide *s'écoulant* – instabilité vibratoire des tubes dans le faisceau d'un générateur de vapeur (fluide *contenu*)⁴ ; réponse vibratoire d'un mât de périscope sous l'effet de détaché tourbillonnaire (fluide *contenant*) ; réponse vibratoire d'un profil portant assurant

¹Comme on le verra par la suite, une grande partie de cet exposé est consacrée à la représentation par calcul numérique de l'*effet inertiel*, dont on souhaite rendre compte pour décrire le comportement vibratoire d'une structure couplée avec un fluide stagnant : dans ce cas, le nombre sans dimension approprié à cet effet d'interaction est le rapport entre les masses volumiques du fluide et du solide.

²Axisa [2] suggère d'utiliser en anglais les termes de "Fluid-Structure Interaction" et "Flow-Structure Interaction", ce qui permet de bien distinguer les deux classes de problèmes, tout en conservant l'abréviation FSI comme élément de dénomination commun. Il faut cependant noter qu'il n'y a pas d'unanimité sur cette terminologie, en particulier le terme d'*interactions fluide/structure* est largement employé pour désigner indifféremment des problèmes où le fluide est stagnant ou s'écoulant.

³Pour être plus précis dans le cas du fluide s'écoulant, on pourrait introduire une distinction supplémentaire selon la nature de l'écoulement, qu'il soit laminaire ou turbulent, compressible ou incompressible.

⁴Dans le cas du faisceau tubulaire de générateur de vapeur, le fluide primaire est contenu dans les tubes et le fluide secondaire dans une enceinte sous pression ; c'est cependant l'écoulement de fluide externe aux tubes qui est la cause de leur vibration (voir par exemple la référence : M.J. PETTIGREW,

une fonction de contrôle (barre de plongée), ou une fonction de propulsion (hélice) en écoulement de fluide (fluide *contenant*).

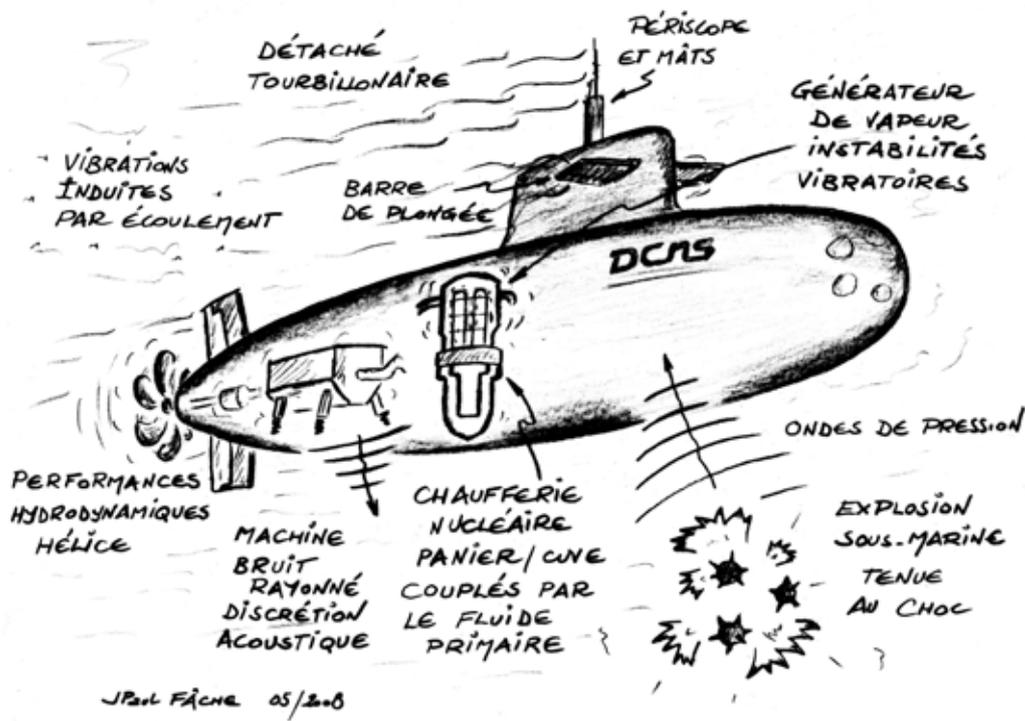


FIG. I.2 : Quelques problématiques de dimensionnement de structures en interaction avec un fluide dans le domaine de la construction navale militaire [22]

De façon générale, les effets de couplage fluide/structure se manifestent de façon très spectaculaire, en particulier dans le cas de fluide en écoulement⁵.

Dans le domaine du génie nucléaire, la ruine d'un faisceau tubulaire d'un échangeur de chaleur par instabilité sous écoulement peut prendre quelques secondes à peine; cet effet de couplage est donc pris en compte de façon primordiale pour des raisons évidentes de sûreté des installations de production d'énergie. La compréhension des effets de vibrations induites par écoulement a initié de nombreuses campagnes expérimentales et justifie aujourd'hui le développement de méthodes de calcul numérique en couplage fluide/structure [25].

Dans le domaine du génie civil, on cite fréquemment l'exemple de la destruction du pont de Tacoma, le 7 novembre 1940, dont la compréhension a donné lieu à une littérature scientifique abondante, et qui illustre l'importance des effets d'interaction fluide/structure⁶.

TAYLOR, B.S. KIM, Vibration Analysis of Shell-and-Tube Heat Exchangers : an Overview, *Journal of Fluids and Structures*, **18**, 469-500, 2003).

⁵Voir par exemple la référence suivante, qui propose une présentation très complète sur les mécanismes physiques d'instabilités de structures soumises à un écoulement transverse : M. P. PAÏDOUSSIS, S.J. PRICE, E. DE LANGRE, *Fluid-Structure Interactions – Cross-Flow-Induced Instabilities*, Cambridge University Press, 2011.

⁶Voir par exemple la référence : P. HÉMON, *Vibrations des structures couplées avec le vent*, Les éditions de l'Ecole Polytechnique, 2006. Il s'agit d'un exemple classique, montrant la nécessité de prendre en compte l'IFS dans certaines situations traitées par l'ingénieur; le caractère spectaculaire de l'IFS est manifeste pour cet accident, qu'un film d'amateur présent sur les lieux a permis d'immor-

Dans le génie naval, l'exemple de l'impact hydrodynamique est l'un des effets de couplage fluide/structure les plus parlants : il se pose pour des navires naviguant à grande vitesse et/ou dans des conditions de mer difficiles (voir FIG. I.4) ; les impacts répétés de l'étrave peuvent conduire *in fine* à sa destruction ; la prédiction du chargement fluide permet de mieux dimensionner la structure.



FIG. I.4 : *Impact hydrodynamique : exemple sur une frégate (Photo : DCNS)*

2 Simulation de l'interaction fluide/structure

Le développement continu de techniques de calcul numérique, et l'augmentation constante des capacités de calcul des machines, rendent possible la mise en œuvre de simulations numériques complexes, faisant intervenir des couplages divers.

L'enjeu d'une simulation numérique sera de reproduire les mécanismes d'échange d'énergie entre le fluide et la structure, de la façon la plus consistante possible au regard des phénomènes physiques mis en jeu. Le développement de méthodes numériques permettant des simulations couplées fluide/structure a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des décennies passées ; l'augmentation croissante des capacités de calcul et l'implémentation conjointe de ces méthodes dans des codes de calculs industriels les rendent accessibles à l'ingénieur [23] [24].

Le recours à la simulation numérique permet la compréhension et la prédiction du comportement dynamique de structures couplées avec un fluide, qui intéressent de nombreux domaines de l'industrie. On a déjà cité précédemment les exemples suivants :

taliser, voir FIG. I.3 – images de Ed ELLIOT (*The Camera Shop* - 1007, Pacific Avenue - TACOMA - Washington - USA), extraites du site www.youtube.fr.

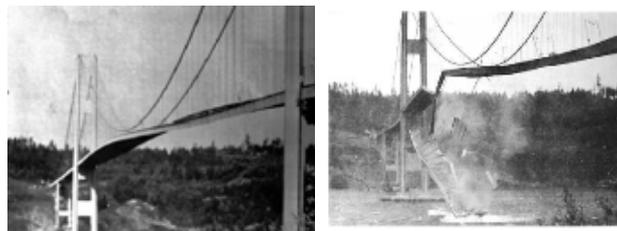


FIG. I.3 : *Destruction du pont de Tacoma : le film amateur de l'accident a largement contribué à sa renommée... et a popularisé la problématique de l'interaction fluide/structure dans les Sciences de l'Ingénieur !*

- en ingénierie civile : les études de comportement des ouvrages d'art vis-à-vis des effets du vent ;
- en ingénierie nucléaire : les études de dimensionnement d'échangeurs de chaleur vis-à-vis des risques d'instabilités vibratoires induites par la circulation des fluides primaire et secondaire ;
- en ingénierie navale : les études de comportement des structures lors d'un impact hydrodynamique, voir l'exemple de simulation numérique FIG. I.5.

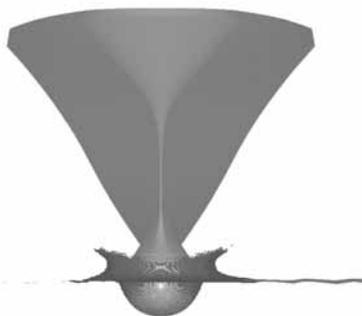


FIG. I.5 : *Calcul numérique du chargement hydrodynamique sur un bulbe d'étrave lors d'un impact (Calcul : DCNS Lorient)*

En plus des problèmes cités précédemment, on évoque les exemples suivants :

- en ingénierie automobile : les études liées aux objectifs de confort acoustique des passagers ;
- en ingénierie civile : les études de tenue au séisme de réservoirs ;
- en ingénierie aéronautique : les études de stabilité des ailes et ailerons de gouverne ;
- en ingénierie *offshore* : les études de dimensionnement des structures soumises aux effets des courants marins.

Les méthodes numériques mises en œuvre consistent à résoudre les équations mathématiques modélisant le comportement du système couplé fluide/structure ; la formulation d'un problème couplé est de façon générale basée sur la description suivante, voir FIG. I.6 :

- le problème structure est formulé en *déplacement* ; il s'agit de décrire le comportement de la structure en terme de déplacement \mathbf{u} , de déformations $\varepsilon(\mathbf{u})$ et de contraintes $\sigma(\mathbf{u})$ et de résoudre les équations de la dynamique afin de déterminer les champs \mathbf{u} , $\varepsilon(\mathbf{u})$ et $\sigma(\mathbf{u})$ dans le domaine structure ;
- le problème fluide est formulé en *pression/vitesse* ; il s'agit d'écrire le comportement du fluide en terme de pression p et de vitesse \mathbf{v} , de résoudre les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement et de déterminer les champs p et \mathbf{v} dans le domaine fluide ;
- à l'interface fluide/structure, les échanges mécaniques sont représentés d'une part, par la prise en compte de l'effort φ exercé par le fluide comme condition à la limite du problème structure et d'autre part, par la prise en compte de la vitesse $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ imposée par la structure comme condition à la limite du problème fluide.

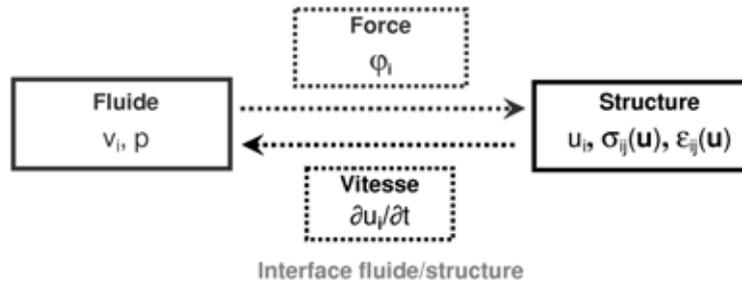


FIG. I.6 : Modélisation générale d'un problème de couplage mécanique fluide/structure

Les échanges d'énergie entre le fluide et la structure se font de façon simultanée, ce dont la simulation numérique doit rendre compte. Une simulation couplée peut mettre en jeu un code de calcul unique, résolvant à la fois les équations des problèmes fluide et structure, ou deux codes de calcul, l'un dédié au problème fluide et l'autre au problème structure. Le degré de complexité de la simulation numérique dépend du problème étudié et des méthodes de discrétisation, en espace et en temps, utilisées pour la résolution des équations du problème [25].

On peut considérer qu'il existe autant de méthodes numériques que de situations physiques en couplage fluide/structure ; du point de vue de l'ingénieur, il est néanmoins possible de proposer une vue d'ensemble des méthodes générales qui sont les plus adaptées à la simulation de problèmes d'IFS, voir FIG. I.7.

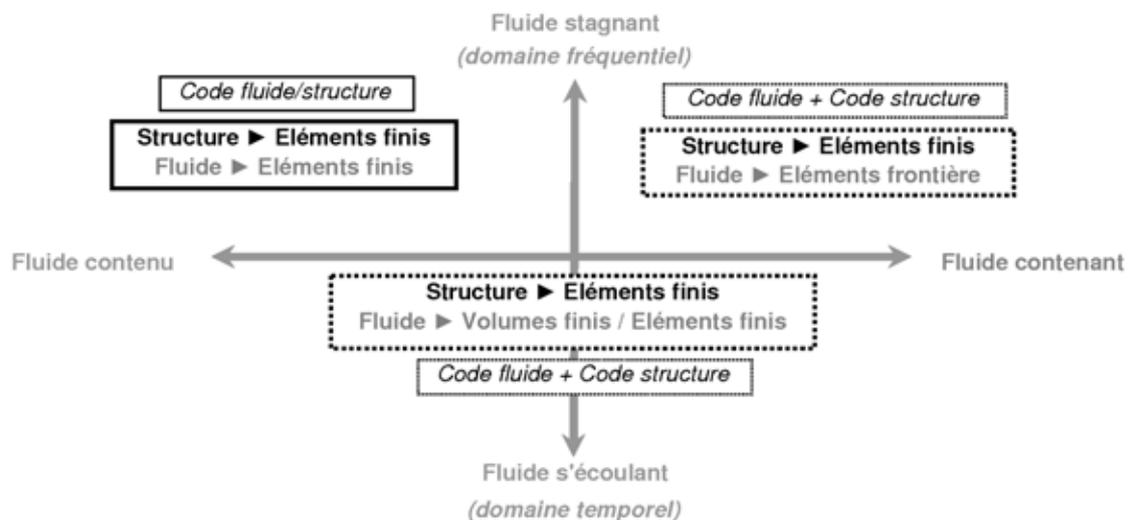


FIG. I.7 : Méthodes générales de simulation numérique en interaction fluide/structure

En utilisant la classification "fluide stagnant/fluide s'écoulant" et "fluide contenu/fluide contenant", on peut identifier les méthodes numériques basées sur l'utilisation :

- d'un code unique pour les applications en fluide stagnant et contenu. Le domaine d'intérêt est celui de la dynamique vibratoire d'une structure couplée avec un fluide : comme

on le verra dans cet ouvrage, les équations de comportement du système couplé se prêtent à une discrétisation de type éléments finis⁷ ;

- de deux codes pour les applications en fluide stagnant contenant ou en fluide s'écoulant, qu'il soit contenu ou contenant. Dans le cas où l'on cherche à décrire le comportement vibratoire d'un fluide non borné, la méthode d'éléments de frontière est la plus appropriée⁸ ; la mise en oeuvre d'une simulation en IFS requiert, dans ce cas, le couplage entre un code éléments finis et un code éléments de frontière. Dans le cas plus général où il souhaite décrire l'écoulement de fluide, l'ingénieur aura recours à des stratégies numériques complexes, fondées sur un couplage entre un code de dynamique des structures (méthode d'éléments finis) et un code de dynamique des fluides (méthodes d'éléments finis ou de volumes finis), voir FIG. I.8⁹.

Si ces méthodes de calcul sont bien formalisées sur les plans théorique et numérique¹⁰, leur application industrielle par l'ingénieur reste encore assez limitée¹¹.

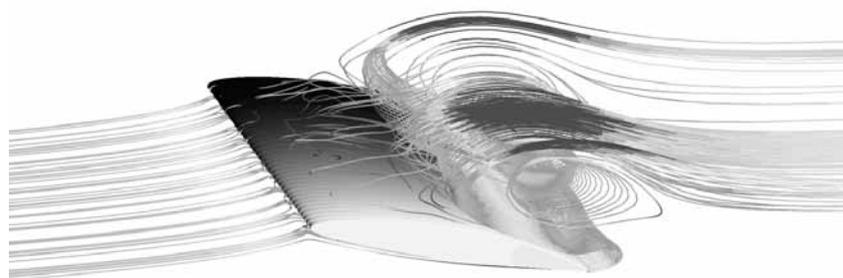


FIG. I.8 : *Simulation couplée en fluide s'écoulant : analyse temporelle du chargement hydrodynamique sur un profil portant avec interaction fluide/structure ; méthode de couplage éléments finis/volumes finis (Calcul : DCNS Nantes / IReNav)*

Dans cet ouvrage, on s'intéresse spécifiquement aux méthodes éléments finis utilisées par l'ingénieur pour la description du couplage fluide/structure *stagnant*. Du point de vue de la pratique industrielle, les techniques de calcul éléments finis restent d'un accès relativement immédiat, même s'il subsiste un certain nombre de problématiques ouvertes dans ce domaine (modélisation de système de grande complexité géométrique, réduction de la taille des modèles numériques, *etc.*).

⁷On indique cependant qu'une formulation éléments finis appropriée permet également de prendre en compte une extension "infinie" du domaine fluide, et de couvrir des cas d'applications en fluide contenant, voir par exemple la référence : P. BETTES, *Infinite Elements*, Penshaw Press, 1992.

⁸Voir par exemple la référence : T.W. WU, *Boundary Element Acoustics*, WIT Press, 2000.

⁹Voir par exemple la référence : A. DUCOIN, F. DENISET, J.A. ASTOLFI, J.F. SIGRIST, An Experimental and Numerical Investigation of Flow Over a Hydrofoil in Transient Pitching Motion, *European Journal of Mechanics. B/Fluids*, **28**, 728-743, 2009.

¹⁰Voir par exemple [25] et la référence : M. SCHÄFFER, I. TESCHAUER, Numerical Simulation of Coupled Fluid-Solid Problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **190**, 3645-3667, 2001.

¹¹Dans ces cas spécifiques, les méthodes classiques en dynamique des fluides peuvent trouver leurs limites – par exemple pour les problèmes d'impact, pour lesquels les phénomènes physiques mettent en jeu des temps caractéristiques très courts ; dans ce cas, des méthodes spécifiques peuvent être utilisées, comme les méthodes ALE (exemple de la FIG. I.5), voir par exemple la référence : D.J BENSON, M. SOULI, *Arbitrary Lagrangian Eulerian and Fluid-Structure Interaction : Numerical Simulation*, Wiley & Sons, 2010.

La plupart des codes de calcul commercialisés permettent de réaliser des simulations du comportement dynamique de structures couplées avec un fluide stagnant. Il est possible de proposer des modèles numériques de structures à l'échelle réelle avec prise en compte de l'interaction fluide/structure : on trouve de nombreux exemples d'applications de ces techniques dans des domaines industriels variés (nucléaire, aéronautique, spatial, automobile, génie civil).

A titre d'illustration, la FIG. I.9 montre un modèle éléments finis d'un navire militaire pour lequel les effets de couplage fluide/structure sont décrits à l'aide d'un maillage éléments finis/éléments infinis pour le fluide environnant : le modèle permet une description du comportement vibratoire du navire avec une précision physique acceptable pour l'ingénieur.



FIG. I.9 : *Simulation couplée en fluide stagnant : analyse fréquentielle des vibrations d'un bâtiment de surface avec interaction fluide/structure par couplage d'éléments finis fluide/structure et d'éléments infinis fluide (Calcul : DCNS Lorient)*

La mise en œuvre d'un calcul numérique nécessite une bonne compréhension des mécanismes fondamentaux qui régissent la physique du problème étudié ; dans ce contexte, la lecture d'ouvrages généraux dédiés à la modélisation du couplage fluide/structure constitue un préalable pertinent à l'application de méthodes de calcul.

3 Un premier exemple : interaction fluide/structure et effet inertiel

Dans le cas de la vibration d'une structure couplée avec un fluide stagnant, on cherchera à représenter numériquement différents effets de couplage, dont l'effet *inertiel*. Dans certaines conditions, la fluctuation du champ de pression dans le fluide, qui résulte des mouvements de la structure, entraîne un effort sur la structure proportionnel à l'accélération : la nature