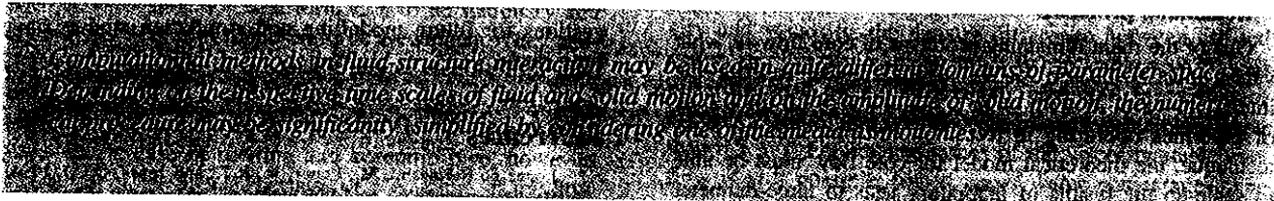


Simulation numérique en interaction fluide-structure

Computational modeling in fluid-structure interactions

par E. de Langre

LadHyX, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France



I. ■ LES DIFFÉRENTS DOMAINES DE L'INTERACTION FLUIDE-STRUCTURE

● 1.1 Analyse dimensionnelle

La Mécanique des solides considère généralement les fluides environnants comme d'influence négligeable, tandis que la Mécanique des fluides ne voit dans les solides que des frontières du domaine d'analyse.

Ces approximations sont heureusement légitimes dans un très grand nombre de cas, et l'expérience les a bien validées. Cette même expérience a montré qu'il existe aussi des situations où l'on ne peut pas négliger ces interactions. Plus précisément il faut alors utiliser conjointement la Mécanique des solides et la Mécanique des fluides pour aboutir à une modélisation satisfaisante de la réalité. On désignera par le terme de "Mécanique des interactions fluide-structure" l'ensemble de ce qui permet d'obtenir de telles modélisations.

Ce terme recouvre de toute évidence des phénomènes fort éloignés les uns des autres. Pour distinguer les différents domaines, on utilise l'analyse dimensionnelle. Ce point a été développé plus en détail dans [1], mais nous en précisons quelques éléments utiles.

Dans le fluide on connaît par exemple un ordre de grandeur de la vitesse, U , de la pression p , de la masse volumique ρ_F , de la viscosité ν et de la vitesse du son c . Dans le solide, on se donne l'ordre de grandeur des déplacements, ξ , la masse volumique ρ_S et le module d'Young E .

Enfin on se donne une dimension caractéristique du problème, L , et la gravité g .

A partir de ces dix grandeurs on peut construire sept nombres adimensionnels, par exemple :

$$R_E = \frac{UL}{\nu} ; F_R = \frac{U}{\sqrt{Lg}} ; M = \frac{U}{c} ; \Pi = \frac{\rho_F U^2}{p} ;$$

$$\mathcal{D} = \frac{\xi}{L} ; \mathcal{G} = \frac{\rho_S g L}{E} ; \mathcal{M} = \frac{\rho_F}{\rho_S}.$$

Les quatre premiers nombres sont bien connus des mécaniciens des fluides. Ce sont les nombres de Reynolds, de Froude, de Mach et de pression dynamique réduite. Les deux suivants traduisent pour le solide la mesure de l'effet de grands déplacements (\mathcal{D}) et l'importance des déformations liées à la pesanteur (\mathcal{G}). Le dernier, le nombre de masse \mathcal{M} , est le seul qui fasse intervenir simultanément une caractéristique du fluide ρ_F et une caractéristique du solide ρ_S . Ces sept nombres proposés plus haut peuvent être combinés à l'infini pour donner de nouveaux nombres, plus parlants dans tel ou tel problème. Les plus courants, que nous utilisons plus loin sont :

$$\text{Vitesse réduite} \quad V_R = \frac{U}{\sqrt{\frac{E}{\rho_S}}} = F_R \sqrt{\mathcal{G}} \quad (2)$$

$$\text{Nombre de Stokes} \quad S_T = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho_S}} L}{\nu} = \frac{R_E}{V_R} \quad (3)$$

$$\text{Nombre de Froude dynamique} \quad F_D = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho_S}}}{\sqrt{Lg}} = \frac{F_R}{V_R} \quad (4)$$

$$\text{Nombre de compressibilité} \quad C = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho_S}}}{c} = \frac{M}{V_R} \quad (5)$$

$$\text{Nombre de Cauchy} \quad C_y = \frac{\rho_F U^2}{E} = V_R^2 \mathcal{M} \quad (6)$$

La vitesse réduite, V_R , est le rapport entre le temps caractéristique du mouvement du solide et l'ordre de grandeur du temps de passage du fluide le long du solide.

De la même façon, le nombre de Stokes, S_T , exprime le rapport entre l'échelle de temps de diffusion visqueuse et le temps caractéristique du mouvement du solide.

Le nombre de Froude dynamique, F_D , n'a de sens que quand des ondes de gravité peuvent exister, par exemple avec une surface libre. Il représente alors le rapport entre un temps de propagation des ondes de gravité et le temps caractéristique du mouvement du solide.

De même le nombre de compressibilité C est le rapport entre un temps de propagation des ondes acoustiques et le temps caractéristique du mouvement du solide.

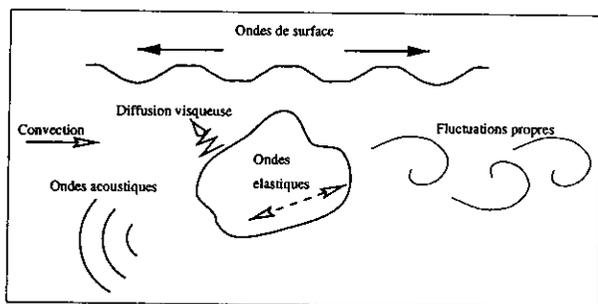
Enfin le nombre de masse M est directement un rapport de masse volumique. Il prend tout son sens à basse vitesse réduite, dans les effets de masse ajoutée.

Le nombre de Cauchy C_V est, lui, une mesure des déformations induites par la pression dynamique. Il prend tout son sens à haute vitesse réduite, dans les effets de raideur ajoutée.

On peut également définir le nombre de Strouhal, caractéristique du rapport entre deux échelles de temps du fluide.

La figure 1 illustre ces différents phénomènes physiques.

Selon les valeurs de ces paramètres, on va définir des domaines très différents de l'interaction fluide-structure, pour lesquels les méthodes numériques seront bien sûr très différentes.



1. Mécanismes physiques à l'origine des différentes échelles de temps.

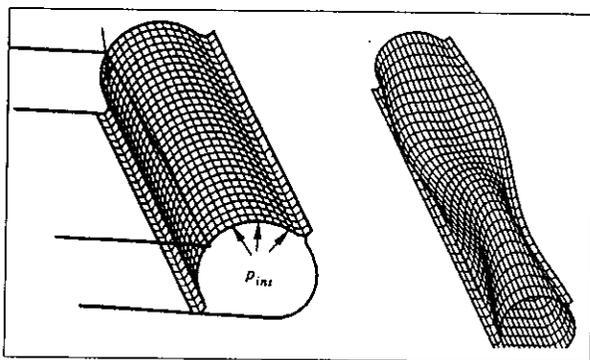
II ■ SIMULATIONS NUMÉRIQUES

● 2.1 Faibles vitesses réduites

Dans le domaine des faibles vitesses réduites ($V_R \ll 1$), le solide ne "voit pas" le fluide bouger pendant la durée caractéristique de son mouvement. Plus exactement, le mouvement du fluide n'est que la conséquence du mouvement du solide. Lorsque les déplacements sont petits ($\mathcal{D} \ll 1$), la forme des efforts exercés par le fluide sur la structure dépend de l'importance des effets visqueux, des effets de surface libre et des effets de compressibilité. Si ceux-ci sont négligeables ($F_D \gg 1$, $C \ll 1$ et $S_T \gg 1$), l'influence du fluide se traduit par une raideur et une masse ajoutée, dont le calcul se réduit à la résolution d'une équation de Laplace. En présence de forces de gravité (F_D quelconque) il suffit d'introduire une condition de raideur en surface

libre. Ce sont des techniques classiques, présentes dans beaucoup de logiciels de mécanique des structures, pour une utilisation sous forme de calcul modal couplé fluide-structure. La figure 2 illustre ce type de calcul sur le cas d'un barrage souple [2]. En présence d'effets de compressibilité, le calcul de modes acoustiques couplés avec un solide élastique ne pose pas de difficultés particulières et est également disponible dans beaucoup de codes de calcul. L'équation de Helmholtz pour le fluide est résolue par éléments finis ou par équation intégrale. Il faut parfois cependant développer des techniques numériques spécifiques notamment pour calculer la réponse temporelle lorsque la densité modale est forte (3D). La figure 3 en donne un exemple en acoustique musicale [3].

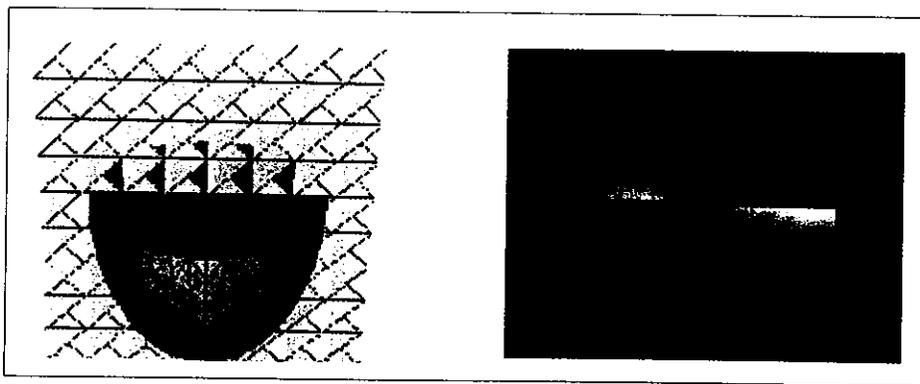
La prise en compte d'effets visqueux, qui introduisent des amortissements, est plus délicate car elle amène des effets d'histoire dans la réponse du fluide.



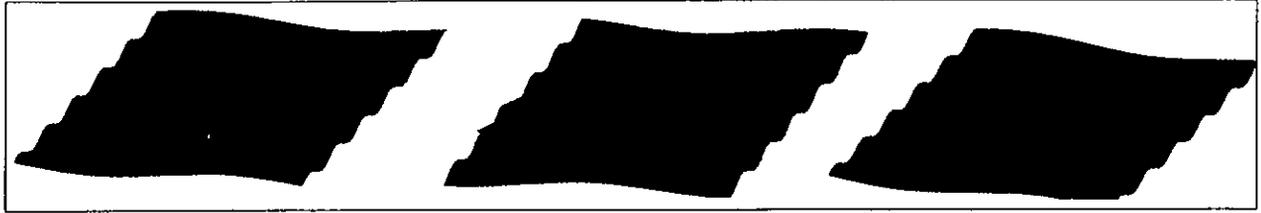
2. Barrage souple : mode propre en présence de fluide interne (masse ajoutée) et externe (ondes de surface). Mysore et al. [2].

Si les déplacements du solide déforment fortement le domaine fluide, les non-linéarités géométriques ne peuvent plus être négligées dans le calcul de la réponse du fluide et de la réponse du solide. Les méthodes développées sont assez spécifiques. La figure 4, qui illustre une simulation de comportement à la mer, correspond à un calcul dans lequel les effets non-linéaires ne sont pris en compte que dans la géométrie, le fluide restant parfait [4]. Inversement la simulation de contraction cardiaque représentée en figure 5 prend en compte les effets visqueux [5].

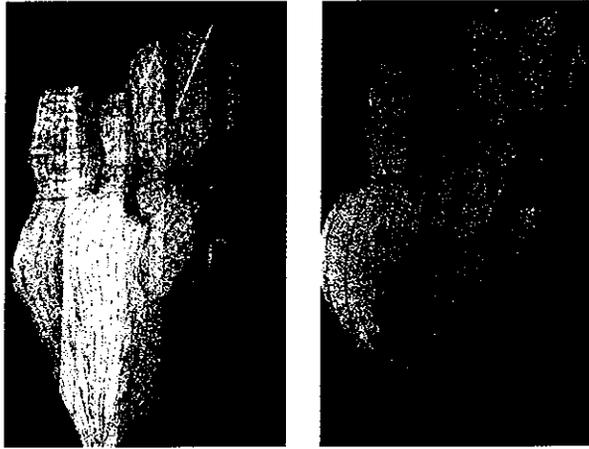
D'autres cas comme ceux des paliers fluides (effets visqueux dominants et grands déplacements dans le domaine fluide) ou des impacts d'objets sur les surfaces libres (sépa-



3. Calcul du comportement vibro-acoustique d'une timbale. Rhaouti, Chaigne et Joly [3].



4. Simulation du chavirement d'un porte-conteneurs sous l'effet d'une houle arrière. Kreuzer et Wendt [4].



5. Simulation de la contraction cardiaque. Peskin et Mc Queen [5].

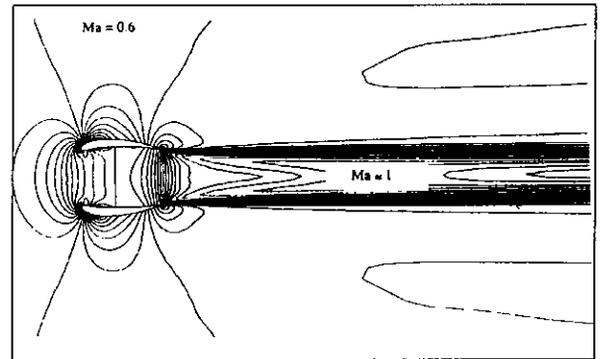
ration du domaine fluide) sont moins classiques, mais font l'objet de développements importants.

● 2.2 Fortes vitesses réduites

La limite $V_R \gg 1$ signifie que le déplacement du solide est imperceptible pendant le temps que le fluide met à parcourir celui-ci. Cette condition est souvent vérifiée dans le domaine de l'aéronautique, et plus généralement dans les écoulements industriels de gaz. Elle permet de simplifier considérablement le calcul des interactions fluide-structure. En effet, dans cette limite, on peut calculer l'écoulement en considérant le solide comme déformé mais ayant une vitesse de paroi nulle. Les efforts exercés par le fluide ainsi obtenus sont alors utilisés pour calculer la dynamique du solide, à une échelle de temps beaucoup plus lente que celle du fluide. Les coefficients de pression sont obtenus avec les mêmes techniques (et les mêmes difficultés !) que dans les calculs habituels de mécanique des fluides. Aucun logiciel

spécifique n'est nécessaire, mais seulement des transferts de données de géométrie et d'efforts entre des codes de mécanique des fluides et de mécanique des solides.

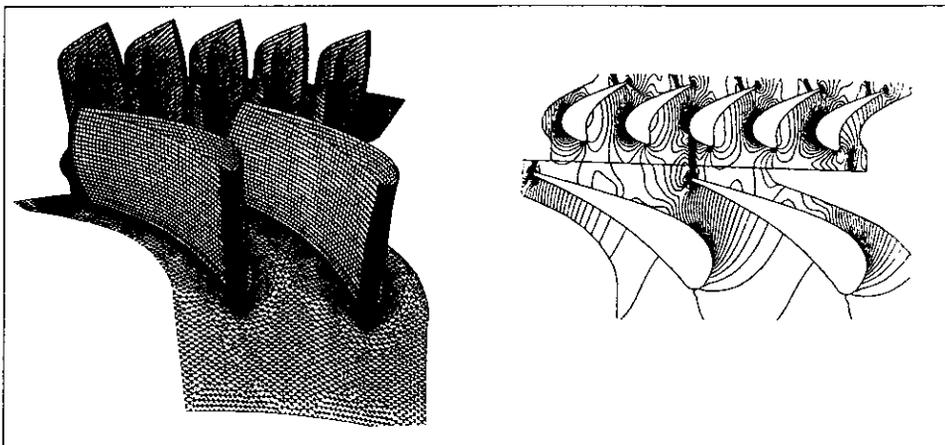
Les figures 6 et 7 illustrent deux calculs de ce type. On notera que dans ce cadre l'existence de déplacements importants de la structure et donc de déformations importantes du domaine fluide ne posent pas de difficultés de principe, puisqu'à chaque configuration doit être associé un calcul fluide complet. Dans la figure 7, la dynamique du système solide est particulièrement simple, représentée par quelques degrés de liberté seulement [6]. Dans la figure 6, la complexité de la structure nécessite de prendre en compte un nombre important de modes vibratoires, qui sont obtenus par un code de calcul de structure classique [7].



7. Calcul du comportement aéroélastique d'une nacelle de réacteur. Knipfer [6].

● 2.3 Coupages forts

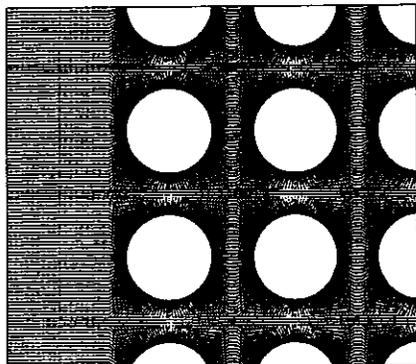
On peut considérer comme fortement couplées les situations dans lesquelles les échelles de temps du fluide et du solide sont comparables, ce qui correspond à des vitesses réduites ni très petites ni très grandes. Il faut cependant distinguer, dans ces cas, ceux où les mouvements des parois sont petits ($D \ll$



6. Calcul du comportement aéroélastique d'aubes de compresseur. Vadhati et al. [7].

$l)$ et induisent des petites fluctuations dans l'écoulement. Des techniques de linéarisation permettent alors de représenter le mouvement du solide et la déformation du domaine fluide sur une géométrie fixe. Selon les caractéristiques de l'écoulement de base (nombre de Reynolds notamment) l'écoulement fluctuant sera plus ou moins simple à calculer. Dans certains cas, une succession de calculs d'écoulements potentiels fluctuants donne

de bons résultats, avec des techniques numériques très simples (équation de Laplace). Pour des écoulements de base avec de forts effets visqueux, on peut prendre en compte le mouvement des parois par une technique dite de "transpiration", figure 8, [8], ou simplement en résolvant les équations dynamiques du fluide dans le repère de la structure, figure 9, [9].

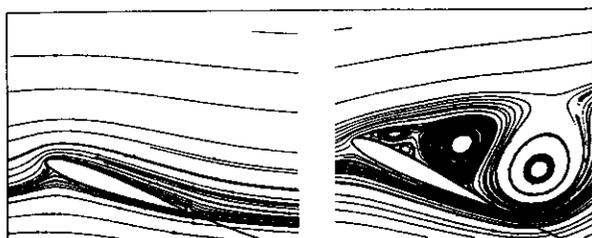


8. Calcul de l'instabilité d'un tube dans un faisceau par une méthode de transpiration. Renou [8].

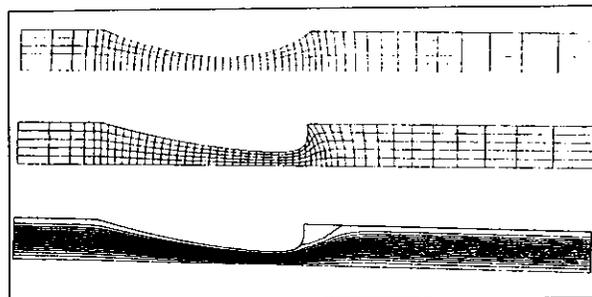
Dans le cas plus général de déplacements de paroi importants (\mathcal{D} quelconque), les techniques numériques sont particulières à chaque cas. La figure 10 illustre un cas de mouvement rigide avec écoulement externe, dans lequel il suffit de résoudre les équations de Navier-Stokes dans le repère mobile avec l'aile [10]. Au contraire, le calcul d'une déformation complète de paroi, figure 11, est souvent réalisé dans une approche A.L.E. qui permet de traiter de façon cohérente des déformations des domaines fluides et solides, [11]. La figure 12 montre un modèle de veine pincée, dont le calcul, quasi statique, est en fait proche de la méthode décrite au paragraphe précédent pour les grandes valeurs de la vitesse réduite [12]. Enfin les situations dans lesquelles le domaine fluide est déformé au point de perdre sa connectivité, figure 13, sont bien adaptées au calcul par des méthodes particulières [13].



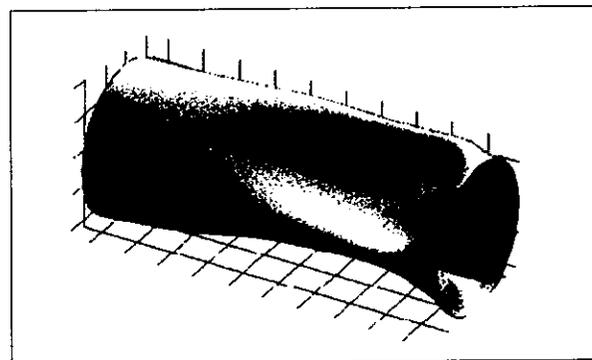
9. Effet de la rigidité d'un cylindre sur les modes de von Karman dans le sillage. En haut, cylindre rigide, en bas, cylindre souple. Cossu et Morino [9].



10. Décrochage dynamique d'un profil d'aile. Cinnella [10].



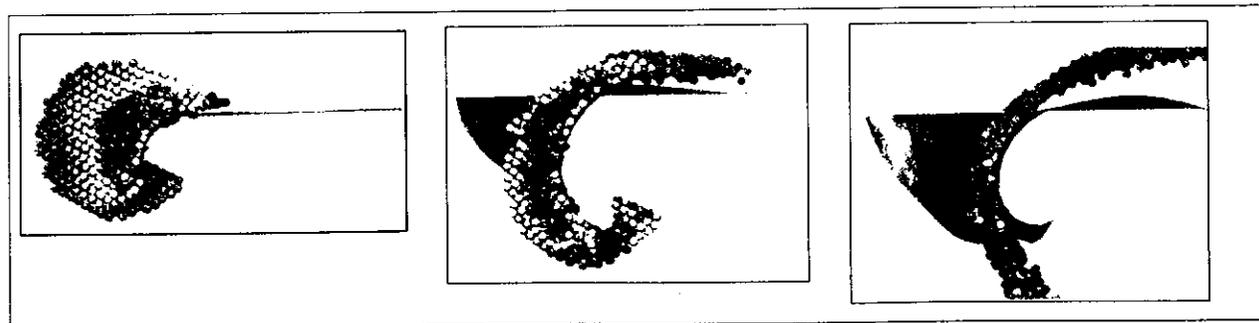
11. déformation de paroi sous l'action d'un écoulement visqueux. Combescure et Greffet [11].



12. Modèle de veine pincée par l'écoulement interne. Heil [12]

2.4 Forçage par l'écoulement

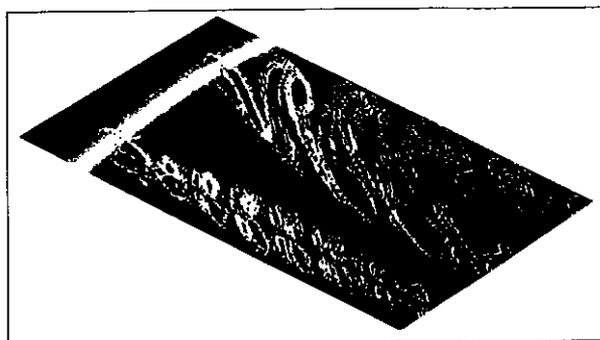
Un autre domaine des interactions fluide-structure, dans lequel les simulations numériques commencent à apporter des contributions intéressantes, est celui du forçage des structures par les fluctuations propres de l'écoulement. A la différence des cas précédents, ces efforts existent même lorsque la structure ne bouge pas. Ils sont le résultat des instationnarités de l'écoulement, telles que des modes de sillage (détachement tourbillonnaire) ou la turbulence. Une première approche est donc de calculer ces fluctuations en considérant la struc-



13. Impact liquide sur une plaque métallique. Méthode particulière. Letellier [13].

ture comme fixe et d'obtenir ainsi des efforts fluctuants aux parois. Le cas du détachement tourbillonnaire ne pose pas de grosses difficultés pour les codes de calcul Navier-Stokes instationnaire. On obtient assez bien les fréquences et les amplitudes des fluctuations. Le cas de la turbulence est plus subtil : il n'est en général pas possible d'effectuer des simulations directes dans les nombres de Reynolds d'intérêt pratique. Par contre, comme on s'intéresse à des efforts résultants et non pas à des fluctuations très locales, il n'est pas nécessaire de représenter les petites échelles. Les simulations des grandes échelles (L.E.S.) sont souvent suffisantes.

Lorsque ces efforts produisent des mouvements des structures non négligeables, on retombe dans la problématique plus générale décrite plus haut. Des simulations couplées sont possibles, mais restent très lourdes. On privilégie aujourd'hui des modèles simplifiés des instationnarités, que l'on couple avec la dynamique de la structure. Les figures 14, 15 et 16 illustrent ces différents approches [14, 15, 16].



14. Détachement tourbillonnaire derrière un câble souple. Newman [14].

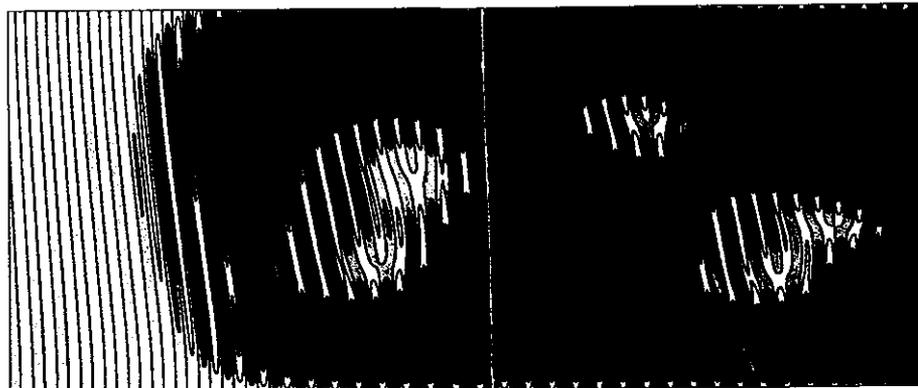
III ■ CONCLUSIONS

Il apparaît clairement que les simulations numériques en interaction fluide-structure concernent en fait des domaines très variés, dans l'espace des paramètres adimensionnels. Une bonne réflexion préalable au calcul, à partir des temps caractéristiques de l'écoulement et de la structure, permet souvent de réduire la complexité de la modélisation couplée. Les cas dans lesquels on doit résoudre simultanément le problème fluide et le problème solide sur des domaines qui se déforment sont en fait assez rares. La simulation numérique des

écoulements peut apporter des contributions très intéressantes, même sans techniques numériques spécifiques aux interactions fluide-structure.

Références

- [1] E. de Langre, Analyse dimensionnelle en interaction fluide-structure, La houille blanche, 3-4:14-18, 2000.
- [2] G.V. Mysore, S. I. Liapis, and R. H. Plaut, Analysis of single-anchor inflatable dams, Journal of Sound and Vibration, 215(2):251-272, 1998.
- [3] L. Rhaouti, A. Chaigne, and P. Joly, Time-domain modeling and numerical simulation of a kettle-drum, Journal of the Acoustical Society of America, 105(6):3545-3562, 1999.
- [4] E. Kreuzer and M. Wendt, Ship capsizing analysis using advanced hydrodynamic modelling, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A, 358:1835-1852, 2000.
- [5] C. S. Peskin and D. McQueen, A three-dimensional computational method for blood flow in the heart. Immersed elastic fibers in a viscous incompressible fluid, Journal of computational physics, 81(2):372, 1989.
- [6] A. Knipfer, Numerical investigations of the aerodynamics and the aeroelastic stability of oscillating annular wings, Journal of Fluids and Structures, 13(2):209-224, 1999.
- [7] M. Vadhati, A. I. Sayma, and M. Iregun, A integrated nonlinear approach for turbomachinery forced response prediction. Part II : Case studies, Journal of Fluids and Structures, 14(1):103-126, 2000.
- [8] J-Y. Renou, Une méthode eulerienne pour le calcul numérique de forces fluide-élastiques, 1998, Thèse, Université de Paris VI.
- [9] C. Cossu and L. Morino, On the instability of a spring mounted circular cylinder in a viscous flow at low Reynolds number, Journal of Fluids and Structures, 14(2):183-196, 2000.
- [10] P. Cinnella, Simulation d'écoulements compressibles turbulents autour de profils oscillants par une méthode numérique de haute précision, 1999, Thèse, Ecole Nationale des Arts et Métiers.
- [11] A. Combescure and N. Greffet, Coupled fluid-structure simulation : non-linear instability problems under steady viscous flow, European Conference on Computational Mechanics, ECCM'99, Munchen, 1999.
- [12] M. Heil, Stokes flow in collapsible tubes : computation and experiments, Journal of Fluid Mechanics, 353:285-312, 1997.
- [13] A. Letellier, Contribution à la modélisation des impacts d'oiseaux sur les aubes des réacteurs d'avions, 1996, Thèse, Université d'Evry.
- [14] D. J. Newman and G. E. Karniadakis, Simulations of flow over a flexible cable : a comparison of forced and flow-induced vibration, Journal of Fluids and Structures, 10:439, 1996.
- [15] M. Facchinetti, Vibrations induites par vortex : longueurs caractéristiques, 2000, Rapport interne, LadHyX, Ecole Polytechnique.
- [16] M. Marti-Moreno, E. de Langre, and P. Le Quéré, A large eddy simulation of the turbulent forcing spectrum induced by axial flow on a rod, 7th International Conference on Flow-induced Vibrations, Lucerne, 295-302, 2000.



15. Détachement tourbillonnaire derrière un câble rigide, avec courant variable. Décrochement de fréquence avec un modèle simplifié de Van der Pol diffusif. Facchinetti [15].



16. Pression instantanée dans un écoulement annulaire turbulent. Calculs LES. Marti-Moreno, de Langre et Le Quéré [16].