

Avant-propos

Les progrès réalisés par les outils numériques et informatiques durant les quarante dernières années ont permis aux scientifiques d'améliorer considérablement leur compréhension du monde. Les modèles mathématiques traitent des problèmes de plus en plus pointus dans de nombreux domaines : prédiction du comportement des outils de production, transport, environnement, etc. La gestion de ces problèmes complexes en a été facilitée tant du point de vue d'une discipline donnée que du point de vue multidisciplinaire où des phénomènes plus généraux ont pu être abordés.

Le domaine de l'interaction fluide-structure regroupe l'étude de tous les phénomènes présentant le couplage du mouvement d'une structure avec celui d'un fluide. La gamme des phénomènes étudiés est très étendue, allant de l'étude de cylindres vibrants dans des écoulements comme c'est le cas dans l'industrie nucléaire, à des structures vibrantes dans des écoulements turbulents, en passant par des phénomènes de surface libre dans des réservoirs. Un exemple connu de l'interaction fluide-structure et de la complexité des couplages mis en jeu reste celui de la rupture du pont de Tacoma en 1940, qui sous l'effet d'un vent violent entra en vibration jusqu'à sa fréquence de résonance, ce qui entraîna sa destruction totale. On comprend bien alors l'importance d'établir au préalable de toute réalisation des modèles fiables permettant de prédire de tels comportements.

Les souffleries, dans le domaine aéronautique par exemple, ont permis de vérifier au sol le comportement de la structure sans faire d'essais en vol. Grâce aux équations d'Euler et de Navier-Stokes, il a été possible de définir de façon rigoureuse un cadre physique permettant de caractériser le comportement de l'avion en fonction de différents paramètres, comme la vitesse ou le nombre de Mach. Les modèles à éléments finis ont permis une grande simplification de la représentation d'un modèle d'avion et de sa structure, ainsi que la manière dont il réagit à l'effort.

Cependant, la complexité des phénomènes étudiés se répercute par des coûts de calculs prohibitifs, ce qui nous amène à rechercher des modèles réduits dont le temps de calcul serait plus réaliste. Par modèle réduit on entend l'écriture de systèmes de faibles dimensions obtenus à partir de l'analyse d'une formulation numérique classique. Cette réduction a donc un coût initial, mais ce coût peut être largement compensé par la suite si le modèle réduit est utilisable pour une gamme de paramètres différents de ceux de la formulation initiale.

À l'image des autres domaines de l'industrie, la recherche en optimisation est donc intense dans le secteur aéronautique. Une évolution importante de la fin des années 1980 est l'introduction de paramètres incertains dans les modèles numériques. L'étude de techniques d'optimisation en présence d'incertitudes en aérodynamique est plus récente et n'a commencé qu'au début des années 2000. Cette incorporation a été effectuée pour tenir compte de certaines situations pouvant rendre difficile une évaluation précise du comportement de l'avion. Par exemple, au cours de la phase de conception d'un avion, afin de répondre à différents critères ou dans le but d'éliminer certains problèmes que rencontre le modèle, ce dernier est amené à évoluer pour répondre efficacement aux demandes et aux besoins qu'il est censé satisfaire. Le modèle n'est pas figé dès les premières ébauches, mais pour des raisons de sécurité, il est nécessaire de vérifier, tout au long du processus de développement, que la structure est capable de résister aux contraintes auxquelles elle est susceptible d'être soumise durant son exploitation. Pour tenir compte de ces possibles modifications, une procédure envisageable est d'introduire des incertitudes dans le modèle.

De plus, lors de la conception d'un avion, les constructeurs souhaitent naturellement optimiser les performances du véhicule : réduire les émissions polluantes, le bruit, la traînée, étendre le rayon d'action, maximiser sa stabilité, etc. La minimisation de la masse de la structure est un objectif important pour les constructeurs, qui aura pour impact de satisfaire d'autres critères d'optimisation, comme la réduction des pollutions ou l'allongement du rayon d'action. Mais cela aura également un effet négatif sur d'autres critères, notamment la stabilité de l'appareil en vol, pouvant entraîner par exemple le phénomène de « flottement ».

Le constructeur doit donc réaliser une optimisation sous contraintes : minimiser le poids de l'aile tout en s'assurant que le phénomène de flottement ne pourra pas affecter l'avion dans son domaine de vol. Dans ce cas, les problèmes d'optimisation sont des problèmes multidisciplinaires car mettant en jeu à la fois les comportements structurels et aérodynamiques.

On souhaite à présent inclure les aspects incertains précédemment évoqués dans des processus d'optimisation. Mais pour ce faire, il faut en premier lieu identifier la nature de ces incertitudes et comment les représenter. Plusieurs types d'incertitudes ont été identifiés et classés selon leur nature.

La prise en compte des incertitudes est un sujet d'étude dans de nombreux domaines de recherche, mais pendant longtemps dans la recherche aéronautique, il n'a pas été possible de prendre en compte, voire de quantifier, ces incertitudes structurelles dans les procédures d'optimisation à cause de la limitation des outils numériques et de la connaissance théorique de leur impact dans les études de fiabilité. Les ingénieurs ont donc dû mettre en place des procédures alternatives permettant de simplifier l'incorporation des incertitudes structurelles dans les modèles développés. Ce n'est que depuis les années 1990 que des études sont menées sur ce sujet dans le secteur aérien et que ce domaine de recherche commence à produire des résultats tangibles.

En ce qui concerne les problèmes d'optimisation sous contraintes probabilistes, l'optimisation fiabiliste, très répandue dans le milieu industriel, substitue à la contrainte probabiliste un second problème d'optimisation déterministe par le biais de techniques d'approximation. La difficulté majeure réside dans l'évaluation de la fiabilité de la structure qui, elle-même, se fait par une procédure d'optimisation particulière. Au point optimal, l'analyse de fiabilité est effectuée pour déterminer l'indice de fiabilité correspondant à l'état limite considéré.

Cet ouvrage présente les différents aspects de l'interaction fluide-structure : vibroacoustique et aérodynamique et les différentes méthodes numériques utilisées pour faire de la simulation numérique.

Un chapitre est consacré à la réduction du modèle dans les problèmes d'interaction fluide-structure. On commence par une présentation des méthodes de sous-structuration dynamique dans le cas linéaire et non linéaire. Après, une description de la méthode de décomposition orthogonale aux valeurs propres (POD) pour les écoulements de fluide est illustrée. Enfin une méthode de synthèse modale est proposée pour la résolution de problèmes fluide-structure couplés de grande taille. La méthode développée couple une méthode de sous-structuration dynamique de type Craig et Bampton et une méthode de sous-domaines acoustiques basée sur une formulation acoustique en potentiel des vitesses.

Pour tenir compte des incertitudes, un chapitre présente des notions de fiabilité ainsi que ses objectifs et son intérêt en mécanique, les méthodes de calcul de la probabilité de défaillance et les méthodes de simulations telle que la méthode de Monté Carlo et surface de réponse, et les méthodes approchées d'analyse de fiabilité et de calcul d'indice de fiabilité par FORM et SORM. On détaille par la suite l'implémentation de ce dernier dans le cadre des problèmes d'optimisation fiabiliste de conception des structures en interaction avec un fluide en écoulement dans le but de détecter les bandes fréquentielles critiques qui peuvent mener à la destruction ou à l'endommagement de la structure à optimiser.

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cet ouvrage, en particulier les élèves-ingénieurs et les doctorants de l'INSA de Rouen que nous avons eu en charge au cours de ces dernières années.