

## Avant-propos

Au cours des dernières années, des ingénieurs, des scientifiques et des décideurs ont manifesté un fort intérêt pour la dynamique des systèmes de grandes dimensions et les problèmes inverses. Ces deux domaines ont reçu un intérêt grandissant en raison de leurs applications industrielles. Les problèmes en dynamique des structures prennent une très grande importance, notamment la tendance à construire des structures de plus en plus souples et soumises aux excitations qui fluctuent de plus en plus rapidement dans le temps. Cependant, une analyse dynamique des structures industrielles de grande taille est habituellement basée sur les techniques de réduction des modèles. Dans cet objectif, on présente des méthodes de résolution des systèmes de grande taille.

Dans le domaine du calcul des structures, la méthode des éléments finis permet de déterminer la réponse physique d'une structure à une sollicitation. Cette technique permet non seulement de déterminer les états de contrainte à l'intérieur d'une structure mécanique mais aussi de modéliser des procédés de fabrication complets par exemple. De nos jours, la réduction importante des temps de calcul permet d'aborder des problèmes dits « inverses ». En répétant les calculs par éléments finis tout en modifiant les paramètres du matériau ou la géométrie de la structure, on arrive à identifier une solution optimale pour le problème considéré. La procédure, couplant optimisation et calcul par éléments finis, est d'une importance primordiale pour l'industrie manufacturière par exemple car ce développement virtuel permet de réduire le temps et les coûts de développement de nouveaux produits. La terminologie de « problème inverse » est utilisée par opposition à celle de « problème direct » par laquelle on comprend, par exemple, à la résolution d'une équation différentielle à partir de paramètres connus pour calculer la réponse du système. Dans le cas d'un problème inverse, la réponse du système est supposée connue. On cherche alors à déterminer les paramètres physiques ou géométriques qui, utilisés dans le problème direct, permettront de retrouver la réponse du système prescrite. Le problème inverse fait

ainsi intervenir une fonction *objectif*, à construire en fonction de l'application, mesurant un écart entre la réponse connue et les réponses obtenues à partir de jeux de paramètres différents en résolvant le problème direct. Il y a deux grandes classes de techniques pour résoudre un problème inverse :

- les techniques de type gradient. Elles consistent à identifier le minimum de la fonction objectif comme un point où le gradient de cette fonction s'annule ;
- les méthodes stochastiques [ELH 16].

Cet ouvrage intègre les idées les plus récentes issues de la recherche et de l'industrie dans le domaine de la dynamique des structures de grande taille et les problèmes inverses. Il est composé de onze chapitres. Ces chapitres font le point sur les différents outils traitant des méthodes de condensation, de synthèse modale en linéaire et non linéaire, identification, recalage, sensibilité, optimisation, fiabilité et quelques problèmes inverses.

Chaque chapitre explique clairement les techniques utilisées et développées accompagnées par des exemples illustratifs complètement traités.

Le premier chapitre introduit les problèmes liés aux problèmes inverses.

Le deuxième chapitre concerne l'analyse et la résolution des systèmes d'équations différentielles linéaires du premier ordre à coefficients constants. Une application à la mécanique pour les systèmes dynamiques est présentée.

Le troisième chapitre présente une introduction à la dynamique des structures en linéaire. Dans de nombreux secteurs industriels (automobile, aéronautique, génie civil, génie nucléaire, défense, aérospatiale, génie océanique et naval, etc.), il est important de déterminer pour la conception et le dimensionnement la réponse des structures à différentes sollicitations. Pour évaluer cette réponse (déplacements, contraintes, vitesse et accélération) à une charge dynamique (variable dans le temps), on a deux approches : l'approche déterministe et l'approche stochastique ou non déterministe [ELH 16]. Dans ce chapitre, on présente les principes généraux de la dynamique des structures déterministe en linéaire. Cette étude permet d'établir les relations essentielles au calcul des réponses dynamiques, au calcul des fréquences, modes propres et des fonctions de réponse en fréquence. Enfin on propose quelques exemples simples.

Le quatrième chapitre présente une introduction à la dynamique des structures en non linéaire. Il a pour objectif une sensibilisation aux spécificités du non linéaire sur des cas élémentaires et donne quelques pistes d'analyse par retour au linéaire qui peuvent s'avérer suffisantes pour certaines applications industrielles.

Dans le cinquième chapitre, on présente quelques méthodes de condensation. Actuellement les modèles discrets établis en vue des calculs prévisionnels de comportement des structures sont très fréquents du type éléments finis. Vu la complexité des structures industrielles, ces modèles de connaissance comportent souvent un nombre important de degrés de liberté. Lors d'une analyse dynamique de tels modèles, la taille peut dépasser la capacité des calculateurs disponibles. Les modèles mécaniques discrets considérés sont des modèles linéaires conservatifs du second ordre.

Le sixième chapitre est consacré à la présentation des méthodes de synthèses modale en linéaire. On rappelle la stratégie de la sous-structuration, initialement formulée pour des problèmes en statique. Elle consiste à traiter une structure comme un assemblage de sous-structures interconnectées les unes aux autres. Les méthodes de synthèse modale diffèrent dans le choix des modes pour représenter la dynamique de chaque sous-structure et dans les procédures d'assemblage. On propose ensuite une stratégie de réduction des d.d.l. (degrés de liberté) de jonction, après assemblage. Cette stratégie est basée sur l'utilisation des modes de l'interface. Ces modes sont obtenus à partir de la condensation aux interfaces de Guyan de la structure complète.

Le septième chapitre présente les différentes méthodes de réduction de modèles en dynamique non linéaire.

Le huitième chapitre est consacré à l'analyse de la sensibilité d'un modèle. Elle étudie les variations des paramètres de sortie par rapport aux paramètres d'entrée. Elle permet d'améliorer la compréhension du comportement du modèle et de quantifier l'influence des différents paramètres d'entrée sur la variabilité de la sortie du système. On est fréquemment conduits à évaluer les variations du comportement dynamique dues à des modifications données des variables de conception : ce sont les « problèmes directs ». Les modifications des variables de conception conduisant à une variation donnée du comportement dynamique sont les « problèmes inverses ». Dans ce chapitre, on présente les méthodes de sensibilités directes et inverses.

Le dixième chapitre présente la fonction robustesse en dynamique des structures pour les problèmes inverses. Dans l'approche probabiliste, les paramètres sont décrits par des densités de probabilité et on cherche à propager cette caractérisation probabiliste à travers le modèle mécanique. L'approche par modèles convexes des problèmes d'incertitudes en mécanique a été principalement abordée par Y. Ben-Haim [BEN 90], les modèles convexes d'incertitude « info-gap » sont définis comme l'écart entre ce qui est connu, valeurs nominales des paramètres, ce que l'on souhaite déterminer et les incertitudes, afin de satisfaire à un critère de conception donné. On présente deux méthodes de résolution du problème inverse. La première est

basée sur l'arithmétique des intervalles. La deuxième est un problème de minimisation sous contraintes. Enfin on présente des applications numériques. La pulsation propre d'une structure est choisie comme fonction performance. On utilise les différentes méthodes de synthèse modale pour calculer cette fonction. On compare les résultats obtenus par rapport au modèle complet.

L'objectif du onzième chapitre est une méthodologie couplant les techniques de synthèse modale et l'optimisation fiabiliste de conception. On présente un algorithme qui permet d'intégrer les méthodes de synthèse modale dans le processus d'optimisation fiabiliste. Finalement, nous évaluons cet algorithme sur différentes applications pour montrer l'efficacité et la robustesse de la méthode présentée.

Enfin, l'ouvrage constitue un support précieux pour les enseignants et les chercheurs. Il s'adresse aussi aux élèves ingénieurs, aux ingénieurs en activité et aux étudiants universitaires du niveau master et doctorat.

## Remerciements

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

Abdelkhalak EL HAMI  
Bouchaïb RADI  
janvier 2017