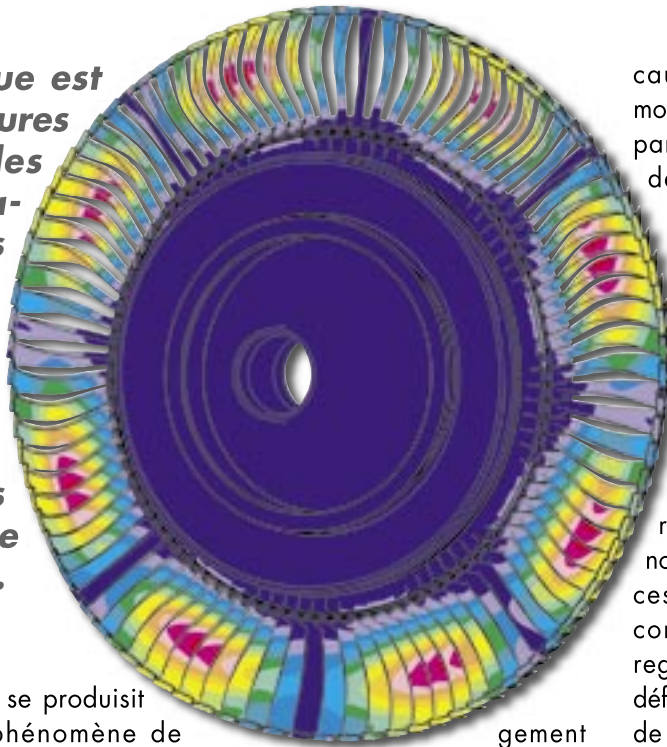


Se débarrasser des mauvaises vibrations

La fatigue polycyclique est l'une des causes majeures de crash. De nouvelles techniques de simulation des interactions fluide-structure permettent désormais de prédire le phénomène et de construire des modèles de désaccordage sélectif des aubes, permettant de réduire les dommages.



Il n'y a pas que les superstitieux que les mauvaises vibrations inquiètent. Elles sont également la bête noire des ingénieurs. Le désastre du pont du détroit de Tacoma, en 1940, en est sans doute l'exemple le plus révélateur. Il s'agissait, à l'époque, du troisième plus long pont suspendu jamais construit. De conception plus légère que ses prédécesseurs, il était malheureusement le siège d'intenses phénomènes vibratoires, en raison d'une importante exposition au vent. Un jour, le pont se mit à osciller et finit par s'écrouler lorsque la fréquence des rafales de vent atteignit la fréquence propre de sa structure, et

que se produisit le phénomène de résonance.

Les ingénieurs ont beaucoup appris de ce désastre, et il ne s'est heureusement jamais rien reproduit de semblable par la suite. Cependant, le même type de phénomène vibratoire entre en jeu dans de nombreux domaines de l'ingénierie mécanique, dont celui de la conception des moteurs, et plus particulièrement des turbines à gaz. Pour réduire le poids et booster les performances, le compresseur ainsi que les aubes de la turbine doivent être aussi légers que possible. Mais cela rend également la turbine sujette à un phénomène d'endomma-

gement vibratoire

appelé fatigue polycyclique (High Cycle Fatigue ou HCF en anglais), pouvant entraîner une défaillance prématurée.

Une cause majeure de crash

La fatigue polycyclique est provoquée par des cycles de contraintes vibratoires résultant d'une grande variété de forces aéromécaniques. Les fréquences impliquées sont de l'ordre de plusieurs milliers de cycles par seconde. La fatigue polycyclique concerne particulièrement les avions, puisqu'elle est la principale

cause des défaillances moteur constatées, pouvant parfois mener à la perte de l'appareil. Selon le HCF S&T Program (High Cycle Fatigue Science and Technology Program), un groupe de travail dirigé par l'United Air Force, entre 1982 et 1996, la fatigue polycyclique a été tenue pour responsable de 56 % du nombre total de défaillances moteur de classe A constatées. La classe A regroupe l'ensemble des défaillances entraînant plus de 1 000 000 de dollars de dommages, la perte d'un avion, la perte d'une vie ou l'invalidité totale. Les pertes annuelles causées par la fatigue polycyclique sont évaluées à 400 millions de dollars, auxquelles vient s'ajouter le coût de plus de 850 000 heures de travaux d'inspection.

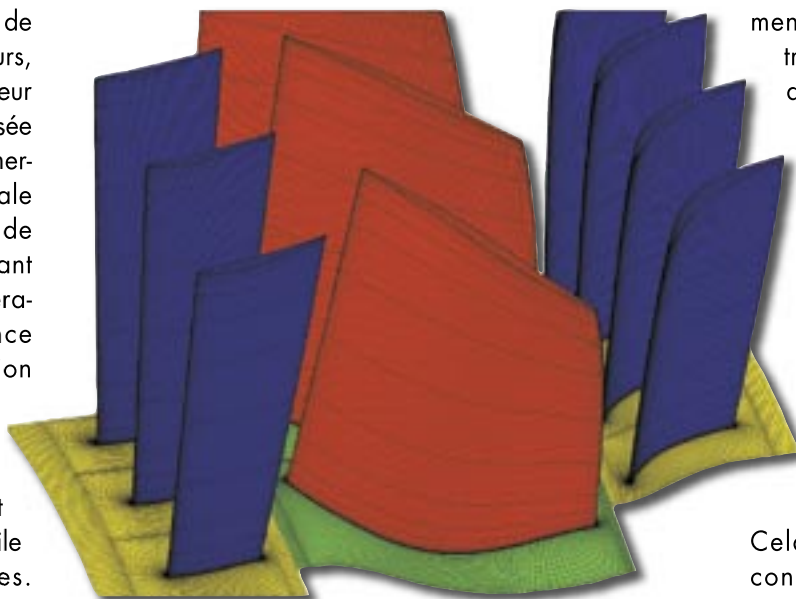
Mais le phénomène de fatigue polycyclique n'est pas seulement limité aux domaines militaire et aéronautique. Il peut également toucher des équipements commerciaux et terrestres. En fait, la fatigue polycyclique est un problème potentiel pour toutes les machines tournantes : compresseurs, pompes, turbines, ventila-

teurs, etc. A ce titre, elle concerne donc également les producteurs d'énergie qui utilisent des équipements dérivés de l'aéronautique ou d'autres types de turbines, mais heureusement dans une moindre mesure. Car si un générateur à turbine projette une aube, il y aura certes un arrêt imprévu, mais pas de perte humaine. Par ailleurs, à la différence d'un moteur d'avion, une turbine utilisée pour la génération d'énergie est en règle générale soumise à une vitesse de rotation constante, durant toute la durée des opérations. La conséquence d'une vitesse de rotation constante est que les instationnarités (interactions rotor/stator) sont connues, et qu'il est par conséquent plus facile d'éviter les résonances. Rappelons que la résonance est un phénomène qui se produit lorsqu'une contrainte est appliquée à l'aube à une fréquence proche de l'une des fréquences caractéristiques de celle-ci, par exemple la fréquence de coupure du premier mode propre. Si les instationnarités se produisent à cette fréquence, une réponse de grande amplitude se produit, limitant la durée de vie du composant.

Fatigue Polycyclique et Conception

Les concepteurs de turbomachines connaissent depuis longtemps la nécessité d'établir un compromis entre les performances aérodynamiques, l'intégrité structurale, et les propriétés

dynamiques de l'aubage. Par exemple, les performances aérodynamiques en régime stationnaire peuvent être accrues en réduisant simplement l'épaisseur des aubes, en éliminant les nageoires (part-span shrouds) ou en modifiant le pas angulaire des aubes.



On finit évidemment par atteindre une limite structurale : la tenue en fatigue de l'aube devient trop faible en raison des vibrations excessives induites par l'écoulement, et les flottements de l'aube peuvent conduire à des défaillances catastrophiques. Par conséquent, le comportement aéroélastique du profil des ailettes, et particulièrement la réponse aérodynamique instationnaire, doit se trouver au centre des préoccupations pour l'optimisation des performances aérodynamiques des turbines ou des compresseurs. Au vu de la tendance actuelle, qui est l'augmentation de la charge, des vitesses et de l'efficacité, la capacité à prédire le comportement

instationnaire prend de plus en plus d'importance. Ceci est particulièrement vrai parce que les règles de conception empiriques dérivées des expériences passées, ne peuvent pas être extrapolées aux régimes de fonctionnement des machines actuelles.

Parce que les ingénieurs sont habitués à utiliser des outils sophistiqués en phase de conception et de développement de turbomachines, il est rare que le phénomène de fatigue polycyclique se produise en un point de fonctionnement nominal du système. En général, celui-ci se produit à vitesse partielle, ou à proximité de la ligne de pompage. Les deux principaux phénomènes impliqués sont le flottement et la réponse forcée.

La réponse forcée est une contrainte d'écoulement dynamique externe provoquant la vibration de l'aube. Ces contraintes peuvent être provoquées par les sillages des aubages situés en amont ou

encore par des champs de pression développés par les aubages avoisinants. Etant donné le nombre d'aubages, possédant tous une quantité d'aubes différente, il est pratiquement impossible d'éviter les fréquences naturelles de chacune d'elles et ce pour toutes les vitesses de fonctionnement. L'astuce consiste à traverser les conditions de résonance le plus rapidement possible, pour ne pas exciter trop longtemps chacun des aubages concernés.

Le flottement, d'un autre côté, est une instabilité d'écoulement dynamique résultant en un mouvement auto-excité de l'aube. Cela signifie qu'aucune contrainte externe n'est nécessaire pour provoquer des vibrations de grandes amplitudes. Il s'agit du cas le plus difficile à prévoir puisqu'il est tout simplement impossible de prendre en considération le nombre d'aubes et de conditions opératoires (vitesse, rapport de pression et écoulement). Au lieu de cela, il faut être capable de calculer l'amortissement aérodynamique du système. A mesure que le degré de sophistication des turbomachines augmente, que l'on atteint des rapports de pression de plus en plus élevés, une efficacité de plus en plus grande et des étages de plus en plus réduits, la probabilité d'occurrence du phénomène de flottement augmente. En aéronautique comme ailleurs, il est malheureusement très rare de pouvoir

obtenir un gain significatif en performance sans payer de contrepartie. Dans ce cas, la pénalité correspond à une réduction de la durée de vie du composant.

Modélisation des écoulements instationnaires

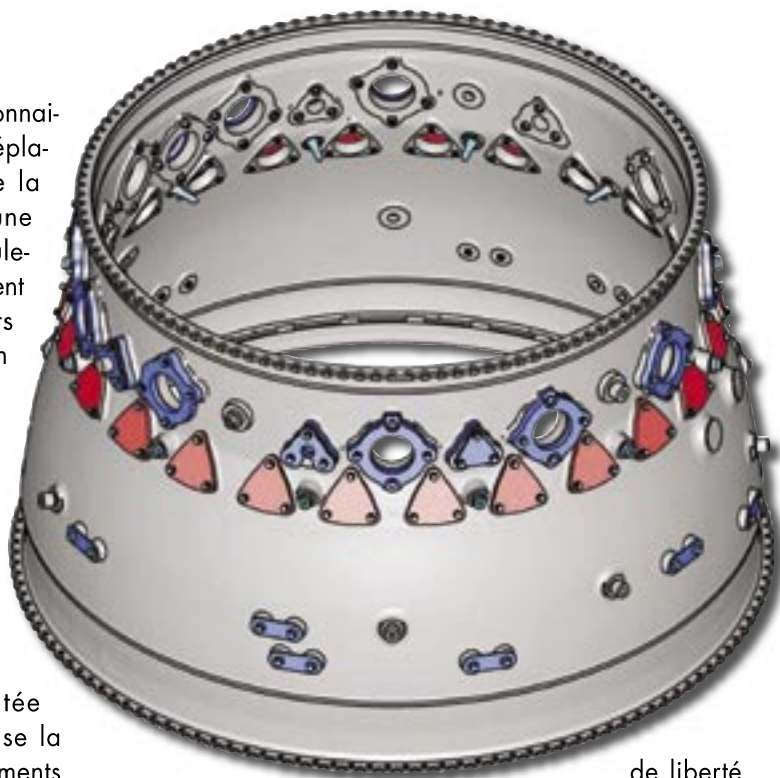
Les aéroélasticiens (personnes qui étudient les interactions entre les forces aérodynamiques et les déformations structurales) ont besoin de modèles précis et efficaces des champs d'écoulement instationnaires résultant du mouvement de l'aube et du souffle d'air incident. Ces écoulements sont en règle générale dépendant du temps, tridimensionnels, compressibles et visqueux, ce qui fait de leur modélisation une tâche particulièrement ardue. Jusqu'à récemment, les capacités de stockage et les temps de traitement requis pour une résolution précise des couches-limites adjacentes aux surfaces des profils d'aubes ainsi qu'aux parois, rendaient le calcul de tels écoulements beaucoup trop gourmand en ressources pour être intégré dans une démarche de conception routinière.

Bien que les approches disponibles d'analyses non couplées ont permis de répondre en partie aux besoins des concepteurs de turbomachines, en leur fournissant des modèles de prédiction efficaces de la réponse aérodynamique instationnaire, celles-ci échouent dans la modélisation de phénomènes

d'écoulements instationnaires associés à un déplacement visqueux de la couche limite et à une séparation de l'écoulement. Avec l'avènement d'ordinateurs toujours plus puissants, un grand nombre de techniques de calcul de dynamique de fluides (CFD) s'appliquant au domaine de l'aéroélasticité ont été développées.

La méthode présentée dans cet article utilise la modélisation par éléments finis (FEM pour Finite Element Method) pour calculer les matrices de masse, d'amortissement et de raideur requises pour la résolution des équations transitoires de la dynamique des structures. Les matrices sont ensuite réduites aux degrés de liberté les plus importants. Ces matrices sont utilisées pour calculer les déformations de la structure au sein de l'analyse CFD elle-même. De cette façon, l'effort de calcul requis pour résoudre à la fois les équations de la dynamique des fluides et des structures est minimisé, résultant en une méthodologie viable dans un cadre de conception industrielle.

Le logiciel Star-CD, développé par CD-adapco, offre de nombreuses possibilités de modélisation des phénomènes aérodynamiques associés aux analyses classiques des interactions rotor/stator. Le solver d'écoulements tridimensionnels, visqueux



et compressibles, peut être utilisé pour résoudre des problèmes continus ou transitoires, en utilisant une grande variété de modèles de turbulence.

L'analyse de structure est réalisée par le logiciel de dynamique des fluides, en utilisant un module d'extension baptisé ES-FSI (pour Expert System – Fluid-Structure Interaction), qui calcule les vecteurs de charge ainsi que les déformations résultantes au cours du temps, tandis que se développe l'écoulement instationnaire. Une simulation d'interaction fluide structure se déroule en trois phases :

■ **Le pre-processing** : Cette étape consiste à construire les modèles des domaines solide et fluide. Ceux-ci peuvent éventuellement être maillés séparément, mais doivent correspondre au niveau des surfaces. Ensuite, certains nœuds de surface sont sélectionnés et désignés en tant que degrés

de liberté maîtres (MDOF pour Master Degree Of Freedom). Limiter la modélisation à ces MDOFs réduit la taille de la matrice utilisée pour la simulation, et accélère par voie de conséquence le traitement.

■ **La simulation FSI** : A chaque étape, le logiciel de CFD calcule les pressions fluides, les vitesses d'écoulement, les quantités scalaires telles que la température, ainsi que l'énergie cinétique turbulente et la dissipation. Ces pressions agissent sur les zones d'interface solide/fluide, de telle sorte que des forces équivalentes peuvent être calculées aux vertices correspondants aux MDOFs. Ces forces forment alors le vecteur de charge (load vector) qui prendra la place du membre droit dans l'équation du mouvement $- [M]\{u\} + [C]\{u\} + [K]\{u\} = \{F\}$, où $[M]$, $[C]$ et $[K]$ sont les matrices de masse, d'amortissement et de raideur réduites aux MDOFs. Une fois que les déplacements

des vertices correspondant aux surfaces MDOFs ont été calculés pour un pas de temps donné, les déplacements des autres vertices sont interpolés. Les nouvelles positions sont ensuite utilisées pour déplacer le maillage de surface, tandis que le maillage interne est complété et raffiné pour maintenir une bonne qualité de maillage. Les nouvelles valeurs de pressions, de vitesses et autres variables sont calculées au pas de temps suivant et le processus tout entier est répété jusqu'à ce que l'analyse transitoire soit terminée.

▣ **Le post-processing** : La tâche finale consiste à lire les valeurs de pression, calculées lors de l'analyse CFD au sein d'un code FEM, pour permettre la réalisation d'une analyse dynamique transitoire. Tout au long de la procédure de résolution, les pressions de surface sont écrites dans un fichier externe en vue de post-traitements ultérieurs. Celles-ci pourront être utilisées pour imposer les conditions aux limites à différents pas de temps de l'analyse dynamique transitoire. Les résultats de l'analyse dynamique transitoire par éléments finis incluent les efforts aux noeuds, qui pourront servir à la prédiction de la tenue en fatigue de la structure.

Désaccordage sélectif

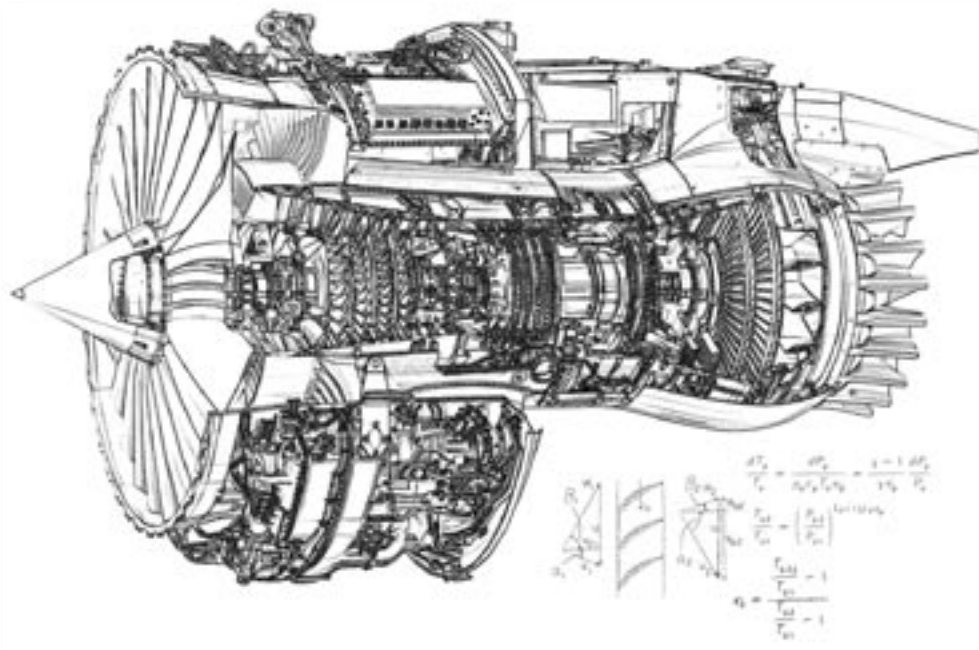
En théorie, toutes les aubes d'une roue sont sensées être identiques. Le désaccordage sélectif est un proces-

sus par le biais duquel chaque aube de la roue est légèrement altérée, au sens mécanique du terme, c'est-à-dire légèrement épaissie ou désépaissie, cambrée, etc. Ces différences, bien qu'infimes, modifient les fréquences naturelles de chaque aube. D'aucuns prétendent, et ils auront raison, que de telles

d'abord de réaliser qu'étant donné que l'aube est altérée, non seulement les propriétés structurales s'en trouvent affectées, mais également les performances aérodynamiques. La première étape d'une analyse tridimensionnelle détaillée des performances instationnaires consiste à proposer un modèle de

puisse sembler complexe, en réalité cela s'avère assez systématique. Et lorsque l'on sait que la moindre amélioration des performances instationnaires se traduit en millions de dollars d'économies...

A ce jour, des travaux de recherche fondamentale continuent d'être menés



variations sont obtenues du fait de la variabilité naturelle des procédés de fabrication. Dans le cas du désaccordage sélectif, c'est l'intensité de ces variations et la façon dont sont réparties les aubes autour de la roue durant l'assemblage, qui vont suivre un modèle établi. Si chacune des aubes de la roue est légèrement différente, il est plus difficile d'exciter l'ensemble de la roue, et cela permet d'atténuer le phénomène de fatigue polycyclique.

Pour appliquer la technique décrite plus haut au désaccordage sélectif de l'aubage, il convient

désaccordage. Ensuite, pour chacune des aubes, il faut construire un modèle informatisé intégrant à la fois les propriétés structurales (c'est-à-dire un modèle par éléments finis rendant compte des caractéristiques de masse, d'amortissement et de raideur) et de la forme aérodynamique détaillée. Comme dans toute analyse CFD, cela implique la construction d'un maillage. Ensuite, de multiples analyses doivent être réalisées pour simuler un nombre suffisant de conditions opératoires, afin de juger de l'efficacité du modèle de désaccordage proposé. Bien que cela

dans différentes universités. Une fois adoptée, l'analyse HCF (High Cycle Fatigue) et le désaccordage sélectif devraient être réalisés lors des phases de conception des équipements. Il serait difficile, voire impossible, pour quiconque autre qu'un OEM de réaliser une analyse aéroélastique complète, en raison de la quantité d'informations techniques nécessaire. ▣

Par Bill Clark,
CD-adapco, USA
Traduit de l'anglais
par cad-magazine.