

Résumé

Ce mémoire s'attache à expliciter une série de phénomènes dynamiques concernant en particulier les turbines à vapeur industrielles et les compresseurs centrifuges multi étagés dits de procédé. De nombreux cas vécus sont cités pour servir d'exemples et de support. Le mémoire pourrait apparaître parfois comme très technologique voire descriptif ou même (trop ?) proche de la vulgarisation scientifique. Néanmoins, il est important de donner un aspect historique et industriel aussi complet que possible pour replacer les développements concernés dans leur contexte et aussi de décrire le retour d'expérience obtenu sur les machines en exploitation.

Une longue introduction décrit ces turbomachines ainsi que l'état de l'art en dynamique de rotor pour les applications pétrolières et gazières, basé largement sur la philosophie des standards publiés par l'American Petroleum Institute (API).

Dans un premier temps, on présente le développement d'un outil de dynamique de rotor en flexion ayant pour but de montrer les différents phénomènes que l'on trouve sur les turbomachines concernées. Cet outil n'a pas pour but de se substituer aux progiciels de dynamique de rotor ; son objectif est d'être utilisé par les ingénieurs de bureaux d'études non spécialistes pour comprendre la réaction de certains rotors ou par le personnel de mise en service et de maintenance, ainsi que de répondre à des besoins de formation.

L'étude de la réponse des rotors aux balourds peut paraître un domaine trivial, néanmoins il apparaît que la détermination des amortissements modaux suivant les standards API reste notablement insuffisante. On propose une voie d'analyse multimodale constituant une sérieuse amélioration de ces standards. Cette méthode s'applique aussi bien à des prévisions qu'à des résultats expérimentaux, suivant le même esprit pragmatique que l'API.

On aborde ensuite de façon plus descriptive l'ensemble des travaux réalisés sur le problème fondamental de la stabilité vibratoire latérale des rotors de compresseurs centrifuges où les effets aérodynamiques modélisés par des raideurs croisées viennent consommer la capacité d'amortissement des paliers hydrodynamiques, surtout lorsque les niveaux de puissance et de pression augmentent pour des applications de récupération assistée des hydrocarbures.

L'introduction du contrôle actif dans les turbomachines a nécessité un développement assez long, certes assez technologique. On présente la constitution du savoir faire d'un constructeur en matière de paliers magnétiques actifs et on explique l'origine de quelques instabilités rencontrées. L'aspect du comportement sur les paliers auxiliaires est également abordé. Les nouvelles perspectives ouvertes par les techniques neuro-floues sont montrées comme une possibilité de synthétiser des contrôleurs à partir d'objectifs de performances.

L'ensemble des phénomènes de dynamique des lignes d'arbres en torsion est présenté. Deux aspects particuliers de modélisation sont traités pour améliorer la prévision des fréquences propres. Le premier concerne le montage avec un fort serrage des d'accouplements sur les bouts d'arbres, et le second concerne les arbres épaulés avec de grands changements de diamètre, ce qui a nécessité le

développement d'un élément fini de torsion à deux degrés de liberté par nœud d'un tronçon conique. Le cas des excitations instationnaires générées par les machines électriques est traité. On aborde également le couplage flexion torsion.

Les systèmes disques aubes sont présentés pour les deux types de turbomachines. On présente un développement original pour étudier la tenue en fatigue des étages de turbines à vapeur soumis à l'injection partielle. Pour les compresseurs centrifuges, on montre à partir de cas industriels que le diagramme d'interférence n'est parfois pas suffisant pour expliquer et éviter certains incidents survenus sur des machines en service.

Afin de compléter les phénomènes vibratoires, on montre plusieurs aspects vibroacoustiques qui ont été rencontrés industriellement sur des turbomachines et on termine ce chapitre sur une présentation des recherches poussées et indispensables qui sont en cours sur les excitations d'origine acoustique dans les étages de compresseurs centrifuges.

Le mémoire se termine sur une modélisation dynamique originale du comportement d'un compresseur centrifuge dans ses réseaux d'aspiration et de refoulement. A partir des caractéristiques aérodynamiques du compresseur et thermodynamiques du gaz et des réseaux, on explique facilement l'adaptation de la machine lors de ses changements de régime de production. Le modèle établi est aussi utilisé pour démontrer l'instabilité près du point de pompage de la caractéristique de compression et aussi pour étudier le comportement lors du pompage.

Enfin, la conclusion remet en exergue les points forts issus de ce travail avec les développements originaux, des prescriptions pour la conception, des propositions pour l'amélioration de normes, dans un domaine où il est indispensable de raisonner en multi physique.

Abstract

This dissertation deals with the explanation of a series of dynamical phenomena concerning particularly the industrial steam turbines and the multistage centrifugal compressors (process compressors). Several historic cases are reported as examples and support. The dissertation could appear sometimes as very technological, even descriptive or even (too much?) closed to scientific popularisation. Nevertheless, it seems important to explain the historical and industrial aspects as completely as possible to put the concerned developments back in their context and also to show the feedback from the machines in operation on the fields.

A long introduction deals with the description of these turbomachines and to the state of the art in rotordynamics for oil and gas applications, mainly based on the philosophy of the standards edited by the American Petroleum Institute (API).

In a first step, the development of a lateral rotordynamics tool is presented the purpose of which being to show the different phenomena encountered on the concerned turbomachines. The purpose of this tool is not to replace any rotordynamics software; its aim is a use by non-specialist design engineers to help understanding of particular behaviours of some rotors, or the use by field engineers for commissioning and maintenance, or also for training needs.

One can think that the analysis of the response of rotors to unbalance is a trivial field; nevertheless, it seems that the determination of damping according to API standards remains notably insufficient. A new way of multimodal analysis is proposed, which would constitute a deep improvement in these standards. This method can be applied as well from prediction than experimental results, according to the same pragmatic aspect than API.

The whole works performed on the fundamental question of the stability of lateral vibrations of centrifugal compressors rotors is then presented. Aerodynamical effects are modelled by cross couplings which consume the damping capability of hydrodynamic bearings, especially with the increase in power and pressure levels for enhanced hydrocarbons recovery.

The introduction of active control in turbomachinery has needed a rather long development, with more technological aspects. The constitution of a manufacturer's know-how in the field of active magnetic bearings is presented and the root causes of some instabilities are investigated. The aspect of the behaviour on the auxiliary (back-up) bearings is also discussed. The new perspectives brought by neuro-fuzzy techniques are shown as a possibility to synthesise controllers from performances objectives.

The whole shaft lines torsional phenomena are presented. Two special modelling aspects are investigated in order to improve the prediction of natural frequencies. The first one considers the assembling of couplings with high interference fits on the shaft ends. The second one deals with shouldered shafts with big changes in diameter, which needs the development of a torsional finite element with two degrees of freedom per node for conical sections. The unstationary excitations generated by

electric machines are also taken into account. At last, the lateral-torsional coupling is also discussed.

The disk-blade systems are presented for both types de turbomachines. An original development is proposed for the fatigue resistance assessment of steam turbine stages under partial arc injection. In the case of centrifugal compressors, it is shown that the interference or coincidence diagram is not always sufficient to explain and to avoid incidents happening on machines in operation.

In order to be more complete on vibratory phenomena, several vibroacoustic aspects industrially observed on turbomachines are presented. This chapter is then closed by a presentation of on-going very sophisticated researches on acoustical excitations in centrifugal compressors stages.

The dissertation takes end with an original dynamic modelling of the behaviour of a centrifugal compressor in its suction and discharge piping systems. From the aerodynamical characteristics of the compressor and the thermodynamical properties of the gas and the piping systems, the adaptation of the machine is easily explained when its operating conditions are changed. The model which is thus built is also used to demonstrate the instability around the surge point of the compressor characteristics and to study the behaviour during surge.

At last, the conclusion points out the major aspects of this work with original developments, prescriptions for the design, proposals for standardization improvement, in a domain where it is necessary to think multi-physics.