



HAL
open science

Evaluation du risque rubbing pour des compresseurs de turbines à combustion

Franck Meissonnier

► To cite this version:

Franck Meissonnier. Evaluation du risque rubbing pour des compresseurs de turbines à combustion. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. <hal-01813049>

HAL Id: hal-01813049

<https://hal.science/hal-01813049v1>

Submitted on 12 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License

Evaluation du risque rubbing pour des compresseurs de turbines à combustion

Franck Meissonnier

Electricité de France – Recherche et Développement

Dépt. AMA

1 av. du Général de Gaulle

92140 CLAMART Cedex

franck.meissonnier@edf.fr

RÉSUMÉ. Le retour d'expérience des exploitants de turbines industrielles met en évidence des problèmes de rubbing compresseur sévère ayant conduit à une destruction partielle ou quasi-totale du compresseur. Face à ces problèmes, un constructeur a imposé des restrictions d'exploitation qui limitent fortement la disponibilité de la turbine à combustion. La restriction concerne les redémarrages à chaud. Ce papier présente le modèle thermoélastique de l'assemblage rotor/carter du compresseur utilisé pour estimer les jeux radiaux entre le sommet des ailettes et le carter au cours d'un redémarrage à chaud. Les résultats des calculs par éléments finis sont exploités afin d'évaluer le risque rubbing étage par étage au cours du transitoire thermique.

ABSTRACT. Combustion Turbines user's have experienced rubbing related problems during hot restart transients. As a consequence, manufacturers have imposed hot restart restrictions that mainly results in degradation of the CT availability. During hot restart, CT compressor casing and bladed rotor are subject to distortion due to thermal loading and inertial forces that may lead to decreasing blade tip/casing clearances until tip rubs. A Finite Element Model based on thermoelastic behaviours of the rotor/casing assembly is proposed for predicting the clearances, stage-by-stage, during the hot restart thermal transient. The calculation of the assembly component heat transfert coefficients is based on predicted boundary conditions around external surfaces of the airfoil and internal surfaces of the casing. The FE predictions are used for performing a risk rubbing analysis.

MOTS-CLÉS : Turbine à combustion, Rubbing compresseur, Modélisation éléments finis, thermoélasticité.

KEYWORDS: Combustion Turbine, Compressor Rubbing, Finite Element Modelling, Thermoelastic Predictions.

1. Contexte de l'étude

Les turbines à combustion (TAC) constituent un moyen de production d'électricité particulièrement intéressant du fait de leur flexibilité et disponibilité. Elles ont été introduites originellement sur le marché de l'électricité pour satisfaire une production de base. L'augmentation du prix du gaz au cours de la dernière décennie a amené les exploitants de TAC à s'orienter vers une utilisation en suivi de charge, ce qui a largement modifié la fréquence et la nocivité des cycles d'arrêt-démarrage.

Le retour d'expérience sur certaines acquisitions et constructions du Groupe EDF montre que ces conditions d'exploitations, conjointement avec l'introduction de nouvelles technologies et designs de TAC, avec le durcissement des normes environnementales et avec l'optimisation des rendements, a sensiblement augmenté les risques d'avaries en fonctionnement. Parmi ces risques, le risque de rubbing compresseur représente un risque majeur.

Le rubbing compresseur se caractérise par des frottements plus ou moins importants entre les parties tournantes (rotor) et les parties statiques (stator). Les dégradations du compresseur associées à un rubbing, ainsi que les pertes en terme d'exploitation (perte de rendements, perte de puissance, indisponibilité...) sont telles que les exploitants souhaitent maîtriser au mieux ce risque (Figure 1).



Figure 1. Dégradations observées sur les composants d'un compresseur de TAC lors d'un rubbing : (à gauche) trace de frottement => perte de rendement, (à droite) dégradation du sommet des aubes => risque de dégradation des étages supérieurs du compresseur et voire même de la turbine de détente.

De nombreuses études ont été conduites pour évaluer l'impact d'un rubbing sur le comportement vibratoire de la ligne d'arbres d'une TAC (Feng et Zhang, 2002). Deux approches sont généralement proposées pour évaluer le risque rubbing : études sur la dynamique de la ligne d'arbres (Monzi et Negro, 2001) et analyses thermomécaniques (Glezer, 2004).

L'objectif de ce papier est de présenter l'approche utilisée pour analyser le risque rubbing au cours de transitoires thermiques sévères. La méthodologie

s'appuie sur l'estimation des jeux rotor/stator obtenue à partir de calculs thermoélastiques par éléments finis 3D de l'assemblage rotor/carter effectués avec le Code_Aster®.

Le cycle d'arrêt-démarrage étudié correspond à un enchaînement d'un démarrage à froid, d'un fonctionnement à régime permanent suivi d'un déclenchement et d'un redémarrage 12mn après le déclenchement.

2. Description des phénomènes mis en jeu dans le compresseur.

Le compresseur d'une TAC a pour but de comprimer de l'air prélevé à l'extérieur (~30 °C) afin d'alimenter la chambre de combustion. L'air circule à travers plusieurs étages (16 étages pour la TAC étudiée) et sa température augmente en rapport avec le taux de compression de chaque étage. Des échanges thermiques par convection ont lieu au niveau des aubages et du carter et provoquent des dilatations différentielles qui tendent à augmenter ou diminuer, selon la nature des gradients thermiques, les jeux d'assemblage. Le Retour d'expérience montre que le risque rubbing est critique pour les redémarrages à chaud. Dans le cas de la TAC étudiée, une restriction sur les redémarrages à chaud a été imposée par le constructeur. Elle consiste à redémarrer dans les 20 mn après un déclenchement, sinon à attendre 5 heures afin que les dilatations différentielles entre le rotor et le carter soient optimales pour un démarrage sans risque.

Lors d'un redémarrage à chaud, les jeux rotor/carter sont effectivement en deçà des jeux initiaux et la centrifugation des aubages peut conduire à des frottements sévères (rubbing) du fait de l'inertie thermique du carter.

3. Analyse thermoélastique de l'assemblage rotor/carter

3.1. Modélisation éléments finis de l'assemblage rotor/carter avec Code_Aster®

Le rotor du compresseur est constitué d'un assemblage poly-disques. Chaque disque portant un nombre différent d'ailettes, la modélisation du rotor impose de considérer le rotor complet, celui-ci ne présentant aucune symétrie globale. Pour palier ce problème, nous étudions indépendamment trois étages de référence (étages 1, 7 et 13). Le fait d'étudier ces étages de façon indépendante permet d'alléger considérablement le modèle en ne considérant qu'un secteur angulaire du rotor par conditions de périodicité cyclique. L'angle sectoriel étudié dépend du nombre d'ailettes portées par le disque.

Les aubages sont en acier inoxydable (AISI 630/403) et les disques en alliage titane.

Les conditions aux limites appliquées au rotor sont les suivantes :

- Conditions de périodicité cyclique sur les plans de coupe du secteur angulaire

- Déplacements normaux nuls pour bloquer les déplacements axiaux
- Contact unilatéral sans frottement entre la queue d'arronde et le disque

Les chargements sont caractérisés par l'effort centrifuge dû à la rotation du rotor (3600 tours/mn) et par les moments de flexion causés par les forces de pression sur le voile de l'aube. Les échanges thermiques par convection sont pris en compte sur toutes les surfaces appartenant à la veine fluide (voile et plateforme de l'aube et plateforme du disque).

Les symétries au niveau du plan de joint et du plan transverse du carter ont permis de ne modéliser qu'un quart du carter. La Figure 2 présente les maillages éléments finis 3D des roues portant les aubages 1, 7 et 13 et du carter du compresseur. La géométrie et les maillages 3D de l'assemblage ont été réalisés sous I-DEAS 10 NX Series m3. Le maillage du carter est réalisé avec des hexaèdres quadratiques et les aubages avec des tétraèdres quadratiques. Aucun jeu n'est modélisé entre les sommets d'aubes et la paroi interne du carter.

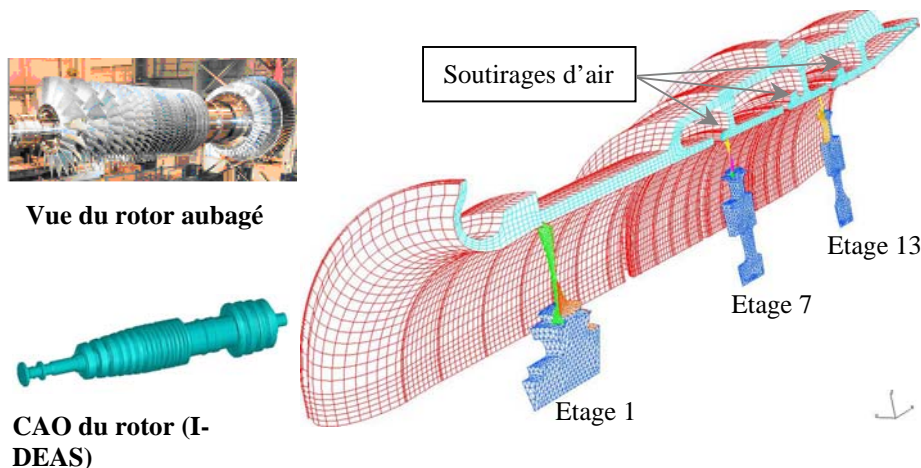


Figure 2 : Maillage éléments finis du carter et des aubages 1, 7 et 13 du rotor compresseur (51344 éléments)

Le matériau du carter est un acier inoxydable.

Le carter est libre de se dilater dans la direction axiale. Il est ancré au niveau du plan de joint en amont de la roue 1, zone où les variations thermiques sont négligeables. Des conditions de symétrie sont appliquées sur les deux plans de coupe (plan de joint et plan transverse).

Les échanges thermiques par convection à la paroi interne du carter sont pris en compte sur toutes les surfaces appartenant à la veine fluide et au niveau des

soutirages : les soutirages #1 (resp. 2 et 3) reprennent les chargements estimés en amont de l'étage 7 (resp. 11 et 14). Le carter étant calorifugé, une condition de flux thermique nul est imposée à la surface externe du carter.

3.2. Modélisation des échanges thermiques dans la veine fluide

L'air circulant dans la veine compresseur s'échauffe par compression au passage des différents étages. Un calcul de rendement isentropique permet, à partir du taux de compression d'un étage, d'estimer la température de cet étage. En effectuant un calcul en chaîne sur tous les étages du compresseur, il est alors possible d'estimer la température de l'air au droit d'un étage. Le calcul des températures en fonctionnement à régime permanent a été validé par comparaison à des mesures de température effectuées sur site en sortie compresseur. Les prédictions conduisent à une température de 436 °C en aval de l'étage 16 contre 420 °C mesurée sur site (erreur estimée à 3.6%). La méthodologie de calcul des températures a été appliquée pour les différents régimes transitoires rencontrés dans le cycle d'arrêt-démarrage étudié et permet d'alimenter le calcul thermique de l'assemblage.

Le calcul des coefficients d'échanges aux parois de la veine fluide et au niveau du voile des aubages a été réalisé en appliquant la relation de Colburn à chaque étage et pour chaque vitesse de rotation. Pour l'étage 16, en fonctionnement à régime permanent, le coefficient d'échange est estimé à 273 W/m²/°C.

3.3. Simulation numérique d'un cycle d'arrêt-démarrage avec un redémarrage à chaud avec Code_Aster®

Le transitoire étudié correspond à un redémarrage à chaud 12 mn après un déclenchement. Il a été simulé numériquement par éléments finis avec le Code_Aster® en assignant au carter et aux aubages un comportement thermoélastique. La méthodologie consiste à évaluer les températures métal du carter et du rotor, puis à estimer les dilatations d'origine thermique du carter et du rotor, le rotor étant soumis en sus à la centrifugation. La différence entre les déplacements radiaux de l'ailette, dr_a , et du carter en vis-à-vis, dr_c , permet d'estimer la consommation des jeux pour chaque étage.

4. Analyse de risque rubbing

4.1. Définition du risque rubbing

Le risque rubbing est défini par le rapport du jeu résiduel estimé, $\delta_{res} = \delta_0 + dr_c - dr_a$, sur le jeu initial spécifié par le constructeur δ_0 : $\delta = \delta_{res} / \delta_0$. Lorsque $\delta > 1$ alors il y a interpénétration aube/carter (rubbing), sinon le rubbing ne peut avoir lieu. La notion de risque est basée sur l'évolution du rapport δ vers l'unité.

4.2. Evaluation du risque rubbing au cours d'un cycle d'arrêt-démarrage avec un redémarrage à chaud

Le risque rubbing a été évalué à partir des résultats des calculs thermoélastiques par éléments finis effectués sur l'assemblage rotor/carter et en prenant en considération les jeux spécifiés par le constructeur. La Figure 3 présente l'évolution du risque pour les trois étages étudiés, au cours d'un cycle présentant un démarrage à froid et un fonctionnement en régime permanent pendant 12 heures, suivi d'un déclenchement et d'un redémarrage 12mn après. L'évolution des jeux en sommet d'aube #7 et du carter en vis-à-vis sont également présentés.

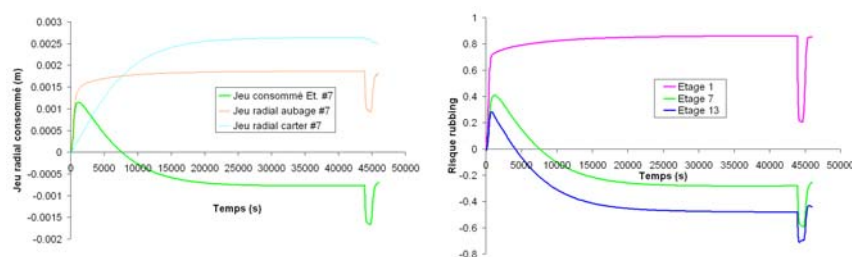


Figure 3. Evolution des jeux et risque rubbing compresseur sur les étages 1, 7 et 13

Les résultats montrent que le risque est essentiellement porté par l'étage #1. Il est intéressant de noter que le constructeur à procéder, entre autres, à un usinage important de cet étage pour lever la restriction de redémarrage à chaud.

5. Conclusions et perspectives

La modélisation par éléments finis de l'assemblage rotor/carter compresseur permet d'évaluer la consommation des jeux d'assemblage au cours de transitoires thermiques spécifiques et de déduire le risque de rubbing associé. La méthodologie de calcul mise en place sera utilisée pour simuler différents temps de redémarrage à chaud (dans l'intervalle de temps 10 mn à 6 heures) afin de valider la restriction sur les redémarrages à chaud.

6. Bibliographie

- Feng Z.C. , Zhang X.Z., « Rubbing phenomena in rotor-stator contact », *Chaos, Solitons & Fractals*, V.14, 2002, pp. 257-276.
- Monzi G., Negro R., « FEM Analysis of rotor-casing interaction in a gas turbine », Users' Conference 2001, SAMTECH, 2001.
- Glezer B., « Control of thermal displacements and clearance reduction methods », *Turbine Blade Tip Design and Tip Clearance Treatment-VKI Lecture Series*, January 19-23 2004.