



**HAL**  
open science

## Études numérique et expérimentale d'un système tournant à supports flexibles variables

Cristiano Villa, Jean-Jacques Sinou, Fabrice Thouverez, Michel Massenzio

► **To cite this version:**

Cristiano Villa, Jean-Jacques Sinou, Fabrice Thouverez, Michel Massenzio. Études numérique et expérimentale d'un système tournant à supports flexibles variables. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01813026

**HAL Id: hal-01813026**

**<https://hal.science/hal-01813026>**

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.

Public Domain

---

# Etudes numérique et expérimentale d'un système tournant à supports flexibles variables

C. Villa — J-J. Sinou — F. Thouverez — M. Massenzio

*Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes CNRS-UMR 5513  
Equipe Dynamique des Structures et des Systèmes  
Ecole Centrale de Lyon  
36 avenue Guy de Collongue  
69134 Ecully Cedex, France.*

*jean-jacques.sinou@ec-lyon.fr*

---

*RÉSUMÉ. Cette étude s'intéresse à la modélisation des machines tournantes à travers des corrélations essais - calculs. La description d'un banc d'essai (développé et construit au Laboratoire LTDS, Ecole Centrale de Lyon) pour l'étude de la dynamique d'un rotor est présentée. L'objectif est de pouvoir prédire, à partir d'un modèle numérique assez fin, les phénomènes observés expérimentalement. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'influence de la raideur en flexion des supports dans un tel système sur l'évolution de la première vitesse critique.*

*ABSTRACT. This work presents a study of modelling of rotating machines and correlating the results with experimental tests. A description of a test bench (developed and built at The laboratory LTDS, Ecole Centrale de Lyon) for the study of the dynamics of a rotor is presented. The objective is to be able to predict phenomena observed in experiments, starting from a rather numerical fine digital model. Several configurations of bearing support stiffness of the test rig are tested in order to study the influence of this parameter on the evolution of the synchronous critical speed.*

*MOTS-CLÉS : dynamique des machines tournantes, calculs éléments finis, études expérimentales et numériques, vitesse critique, influence de la raideur des supports palier.*

*KEYWORDS: rotordynamics, finite element models, experimental and numerical studies, critical speeds, influence of bearing support stiffness.*

---

## 1 Introduction

Une compréhension fine des problèmes vibratoires associés aux systèmes tournants constitue à l'heure actuelle un enjeu majeur dans le domaine industriel. Afin d'optimiser le comportement dynamique des rotors et de dimensionner au mieux de tels systèmes, il est nécessaire de comprendre et prédire précisément leur comportement vibratoire (Ehrich 1992, Vance 1988). L'un des points clé réside par exemple dans la prédiction et le placement juste des premières vitesses critiques. En effet, les vitesses critiques sont fonction de la rigidité dynamique des systèmes tournants et la présence d'efforts gyroscopiques crée une dépendance entre la vitesse de rotation et les pulsations propres de telles structures: ceci implique que la détermination juste des vitesses critiques est un des éléments primordial lors du dimensionnement de tels systèmes dynamiques.

Dans ce papier, le comportement vibratoire d'un banc d'essai reproduisant la dynamique d'un rotor est discuté. Ces études, expérimentales et numériques, consistent à évaluer le diagramme de Campbell et la réponse à balourd du banc autour de la première vitesse critique en considérant trois configurations associées à des raideurs différentes des supports paliers du rotor.

## 2 Présentation du banc d'essai

Le banc d'essai « *Dynamique D'Ensemble* » (réalisé au LTDS, Equipe D2S, Ecole Centrale de Lyon) est composé d'un rotor constitué d'un disque et d'un arbre horizontal couplé avec un moteur électrique par l'intermédiaire d'un joint d'accouplement souple. Le rotor est posé sur deux supports paliers, à raideur variable, par l'intermédiaire de deux roulements. L'ensemble est monté sur une table en béton massif et isolé de l'environnement par des couches de matériau élastomère.

La caractéristique principale des supports paliers est d'avoir une raideur en flexion réglable par l'intermédiaire de la longueur active des barres. Afin d'établir cette relation, des essais statiques ont été réalisés comme illustré en Figure 2. A partir d'essais multiples avec diminution et augmentation du chargement pour différentes longueurs de barre active, une loi reliant la raideur en flexion en fonction de la longueur des barres est établie et corrélée avec une expression analytique comme illustré en Figure 2.



Figure 1. Banc d'essai « *Dynamique D'Ensemble* » mono-rotor

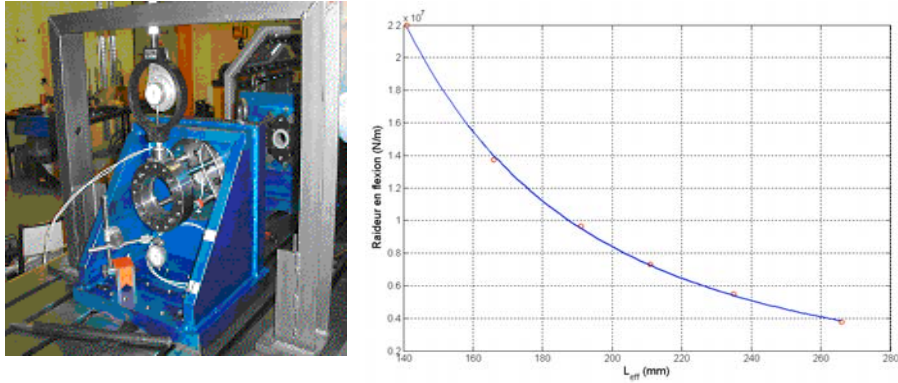


Figure 2. Etude expérimentale de la variation de raideur en flexion

### 3 Modèle éléments finis

Afin de mener des études numériques permettant de reproduire le comportement dynamique du banc d'essai, un modèle éléments finis (Lalanne et Ferraris 1990) est défini comme illustré en Figure 3. Le système dynamique associé au rotor peut donc s'écrire comme suit:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{C} + \mathbf{\Omega}\mathbf{G})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (1)$$

où  $\ddot{\mathbf{x}}$ ,  $\dot{\mathbf{x}}$  et  $\mathbf{x}$  définissent des vecteurs caractérisant l'accélération, la vitesse et le déplacement des différents degrés de liberté;  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{G}$  et  $\mathbf{K}$  définissent respectivement les matrices de masse, d'amortissement, gyroscopique et de raideur du système.  $\mathbf{F}$  représente le vecteur contenant les excitations externes et le balourd associé au système. Des recalages modaux (organe par organe puis par assemblage des pièces) ont été réalisés pour permettre d'affiner les paramètres structuraux de chacun des éléments et des liaisons entre pièces. De plus, les matrices de masse et de raideur des supports paliers sont déterminées numériquement et recalées, à partir d'une géométrie CAO maillée finement.

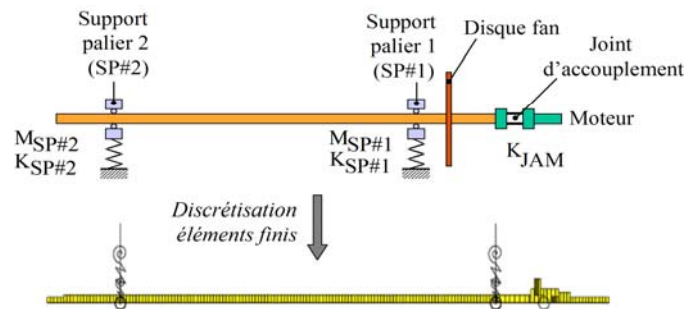
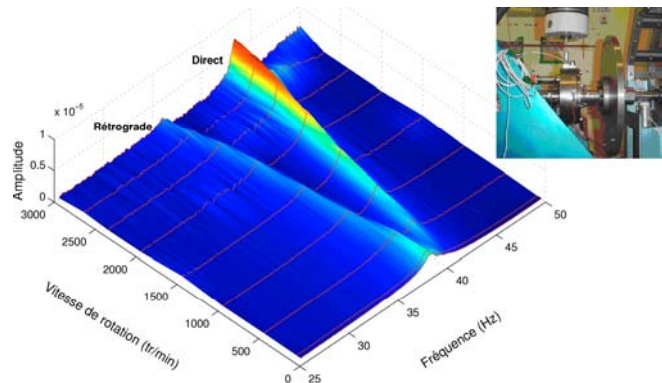


Figure 3. Modèle éléments finis du banc Dynamique D'Ensemble

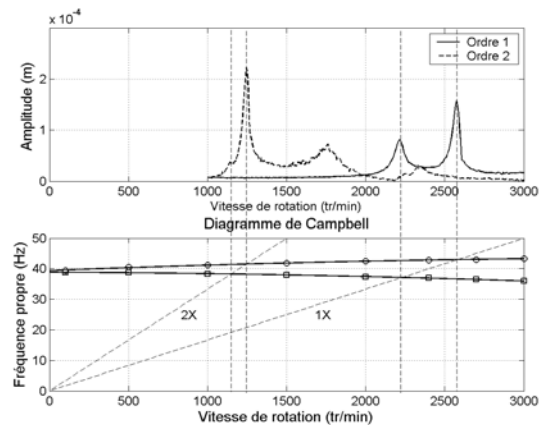
#### 4 Essais expérimentaux

Dans cette étude nous focalisons notre attention sur la détermination des vitesses critiques. Deux type d'essais sont donc considérés plus particulièrement :

- des essais nous permettant d'établir le diagramme de Campbell par l'intermédiaire d'une excitation externe sur les parties fixes. La fonction de réponse en fréquence pour différentes vitesses de rotation est établie à l'aide d'un essai en sinus balayé. L'ensemble des essais ainsi réalisés permet alors l'évolution des premiers modes directs et rétrogrades (Figure 4).
- des essais de type « order tracking » consistant à étudier les réponses harmoniques lors d'une montée en vitesse sous un excitation à balourd. Dans ce type d'essai les grandeurs mesurées correspondent aux harmoniques d'ordre  $n$  de l'amplitude vibratoire en fonction de la vitesse de rotation du rotor. La Figure 5 montre les ordres 1 et 2 d'un essai de montée en vitesse (mesures prises au niveau du support palier côté disque).



**Figure 4.** Waterfall expérimental et dispositif expérimental associé



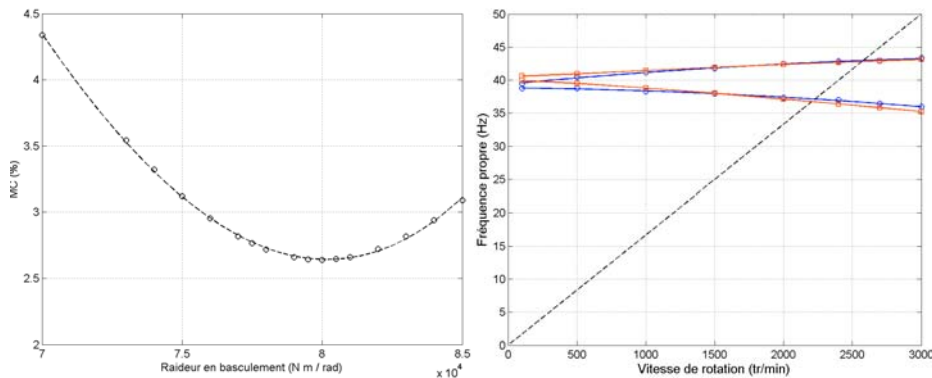
**Figure 5.** Essais de type « Order Tracking »

## 5 Recalage du modèle éléments finis

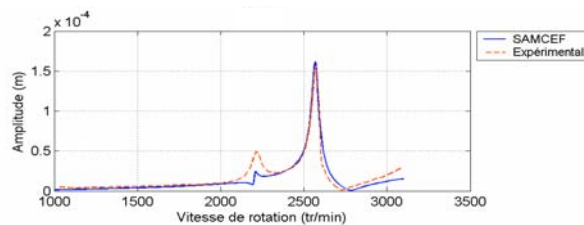
Le recalage du modèle éléments finis se base sur la déformée du rotor sur la première vitesse critique et sur les diagrammes de Campbell expérimental et numérique en se basant sur la fonction objective :

$$MC^2 = a \left( \frac{F_1^{(est)} - F_1^{(mes)}}{F_1^{(mes)}} \right)^2 + b \left( \frac{F_{1'}^{(est)} - F_{1'}^{(mes)}}{F_{1'}^{(mes)}} \right)^2 + c \left( \frac{VC_{ret}^{(est)} - VC_{ret}^{(mes)}}{VC_{ret}^{(mes)}} \right)^2 + d \left( \frac{VC_{dir}^{(est)} - VC_{dir}^{(mes)}}{VC_{dir}^{(mes)}} \right)^2 \quad (2)$$

où  $F_1$ ,  $F_{1'}$ ,  $VC_{ret}$  et  $VC_{dir}$  représentent respectivement les fréquences à l'arrêt des modes direct et rétrograde et les vitesses critiques rétrograde et directe. Les exposants (*est*) et (*mes*) indiquent respectivement que les valeurs ont été estimées et mesurées. Les coefficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  permettent de faire varier le poids de chacune des variables de la fonction objective. La variable de design recalé est la raideur en basculement du roulement à billes (Figure 6). Le diagramme de Campbell numérique obtenu est tout à fait conforme au diagramme de Campbell expérimental (moins de 0.5% d'erreur au passage de la première vitesse critique pour le mode direct). De plus, des simulations de réponses à balourds (avec la détermination numérique d'un balourd résiduel) indique une très bonne corrélation entre les essais expérimentaux et numériques sur les niveaux d'amplitudes (au divers points de mesure) en fonction de la vitesse de rotation, comme illustré en Figure 7 (mesure support palier côté moteur).



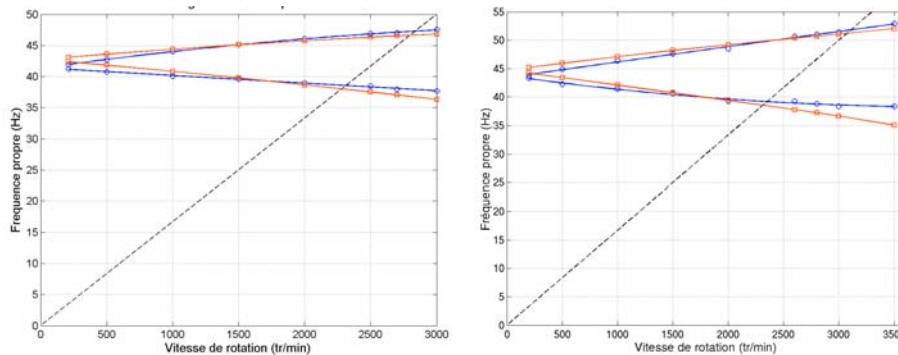
**Figure 6.** Recalage du modèle numérique et comparaison des diagrammes de Campbell numérique (bleu) et expérimentaux (rouge).



**Figure 7.** Comparaison expérience-calcul des réponses à balourd

## 6 Influence de la raideur en flexion des supports

Connaître l'impact de certains paramètres sur l'évolution des vitesses critiques est primordial pour effectuer un dimensionnement optimal des systèmes tournants. Dans ce contexte, des études numériques et expérimentales sont réalisées en considérant deux nouvelles configurations du banc d'essai (configuration 2 et 3) en faisant évoluer la raideur de flexion des supports paliers. Les résultats montrent une très bonne corrélation entre les estimations numériques et les résultats expérimentaux pour l'évolution des premières vitesses critiques directe et rétrograde, comme illustré en Figure 8 sur les diagrammes de Campbell pour ces deux nouvelles configurations.



**Figure 8.** Diagrammes de Campbell expérimentaux (rouge) et numériques (bleu) pour deux configurations (gauche= configuration 2, droite=configuration 3)

## 7 Conclusion

Cette étude présente un banc d'essai dédié à l'étude de la dynamique des machines tournantes. Des approches à la fois expérimentales et numériques sont menées afin de caractériser et comprendre la dynamique propre à de tels systèmes tournants. L'influence de la raideur en flexion des supports paliers sur les premières vitesses critiques est étudiée à partir des diagrammes de Campbell.

### Remerciements

Le premier auteur remercie la CAPES (agence du Ministère de l'Education du Brésil) pour le financement de ses études en France. Les auteurs tiennent à exprimer leur profonds remerciements à L. Charles, S. Leone et P. Perrard pour la réalisation électrique et la fabrication des différents organes du banc d'essai.

### Références

- Ehrich, F.F., *Handbook of rotordynamics*, Macgraw-Hill, 1992.
- Lalanne, M., and Ferraris, G., *Rotordynamics - prediction in engineering*, John Wiley and Sons, 1990.
- Vance, J.M., *Rotordynamics of turbomachinery*, John Wiley & Sons, 1988.