

Modélisation et simulation numérique du comportement des machines tournantes

M. Torkhani, L. May, M. Hélène, P. Voinis, X. Raud, E. Boyère, I. Nistor (EDF / R&D / AMA)

Contexte et objectifs

En tant qu'exploitant de centrales électriques, EDF a pour objectifs d'assurer la sûreté et la sécurité de ses installations, d'optimiser le suivi et la maintenance en fonctionnement pour améliorer la performance de ses centrales. À ce titre, les machines tournantes (Groupe Turbo-Alternateur, Pompes, etc.) portent un enjeu capital pour l'exploitant, car elles représentent des investissements financiers importants et ont un impact majeur sur la disponibilité du parc.

Outre le suivi et le diagnostic en fonctionnement des matériels, la simulation numérique associée aux essais expérimentaux en laboratoire et in situ permet d'améliorer la compréhension et la quantification des phénomènes pour envisager les actions palliatives pour le parc. La simulation numérique appliquée aux machines tournantes autorise l'investigation des situations accidentelles (pertes d'une ou plusieurs grandes ailettes) ou des

défauts extrêmes (fissurations des rotors) à des fins de sécurité ou de critères de diagnostic vibratoire.

C'est pour répondre à ces objectifs qu'EDF R&D s'est dotée de capacités de modélisation et de simulation numérique du comportement dynamique des machines tournantes dans *Code_Aster*. Ces développements autoriseront à terme des capacités de simulation complémentaires (propagation des défauts critiques, approche multiphysique ou fiabiliste, etc.).

Comme pour toute application, il est nécessaire que les outils et méthodologies de simulation numérique soient validés et éprouvés sur la base d'essais expérimentaux. Pour le comportement dynamique

des lignes d'arbres, EDF R&D s'appuie sur le banc expérimental semi-industriel EURoPE pour faire la démonstration de la validité de ses outils numériques.

Modélisation et simulation numérique des machines tournantes

Le concept de modélisation d'une ligne d'arbres est construit à partir des composants suivants :

- Les rotors ou parties tournantes modélisés par des éléments finis filaires de type poutre de section quelconque (constante ou variable, pleine ou creuse, etc.);

- des masses ponctuelles variables le long de la ligne d'arbres : disques, ailettes ou masses quelconques modélisés par des éléments discrets caractérisés par des masses et inerties équivalentes;

- des paliers dont le comportement, selon leur configuration et le type de modélisation souhaitée, peut être soit linéaire alors modélisé par des éléments discrets non symétriques dont les caractéristiques en raideur et amortissement dépendent de la vitesse de rotation (coefficients dynamiques), soit non linéaire alors modélisé par couplage avec le code Edyos qui résout l'équation de Reynolds du film d'huile des paliers hydrodynamiques;

- un support qui modélise les parties statiques représentées par un système simplifié de type masse ressort amortisseur au droit des paliers ou par un modèle généralisé du Génie Civil (communément appelé table de groupe pour le GTA) éventuellement complété des structures internes des corps BP (pour certain type de tranche).

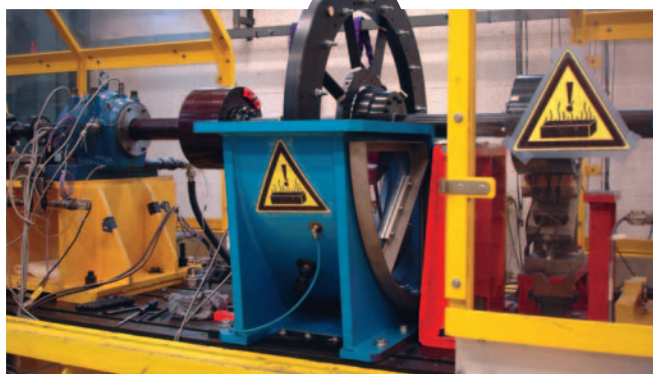


Figure 1 : Vue du banc expérimental EURoPE.

Modélisation et simulation numérique du comportement des machines tournantes

M. Torkhani, L. May, M. Hélène, P. Voinis, X. Raud, E. Boyère, I. Nistor (EDF / R&D / AMA)

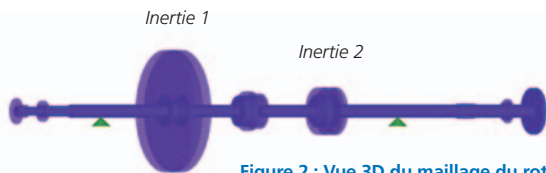


Figure 2 : Vue 3D du maillage du rotor du banc EUROPE avec extrusion des sections.

L'implémentation de la matrice de gyroscopie dans Code_Aster autorise la simulation numérique des machines tournantes. Cette matrice a été développée et validée pour tous les éléments de poutres droites ainsi que les éléments discrets supportés par Code_Aster.

Le calcul des modes des machines tournantes peut se faire dans l'espace physique ou sur base modale (opérateur MODE_ITER_SIMULT). La dernière option permet d'optimiser les performances en temps de calcul pour une géométrie détaillée et se décompose en 3 étapes :

- calcul d'une base de modes propres non amortis, représentative du problème ;
- projection du problème quadratique sur cette base réduite ;
- calcul modal quadratique avec des méthodes robustes.

La validité physique et la représentativité des modèles utilisés à des fins d'expertise et de diagnostic vibratoires doivent être maîtrisées. Pour le cas du banc expérimental EUROPE, l'identification des premières vitesses critiques expérimentales en fréquence et amortissement a permis d'entreprendre un premier recalage, dans Code_Aster (opérateur MACR_RECAL), du modèle numérique.

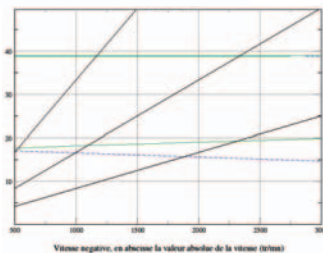


Figure 3 : Diagramme de Campbell de la ligne d'arbres EUROPE.

Le diagramme de Campbell (opérateurs CALC_MODE_ROTATION et IMPR_DIAG_CAMPBELL) est une représentation graphique permettant le suivi des fréquences d'un système tournant en fonction de sa vitesse de rotation ainsi que l'identification des vitesses critiques (intersection avec la première bissectrice) et des zones d'instabilité (amortissements modaux associés).

Un calcul statique permettra d'évaluer la déformée de la ligne d'arbres sous l'action de forces ou de moments avec ou sans poids propre (pour une validation élémentaire du modèle) et de calculer les efforts statiques repris par les paliers (nécessaires aux calculs des coefficients dynamiques des paliers).

Les réponses linéaires harmonique (opérateur DYNA_LINE_HARM) ou transitoire (opérateur DYNA_LINE_TRAN ou DYNA_TRAN_MODAL) de la ligne d'arbres soumise à un effort peuvent aussi être calculées dans Code_Aster.

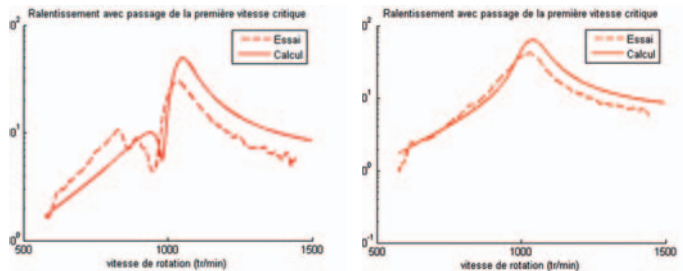


Figure 4 : Réponses numérique et expérimentale à un défaut de masse (balourd).

L'effort appliqué peut être du type (f est la fréquence) :

- poids propre ;
- harmonique : effort de direction fixée, constant, proportionnel à f ou f² ou donné sous la forme d'une fonction dépendant de la fréquence ;
- balourd : effort tournant, proportionnel à f², défini par son amplitude et sa phase.

Pour des besoins en performance ou de validation croisée, les calculs harmonique et transitoire linéaires avec gyroscopie peuvent aussi se faire directement sur base physique ou sur base modale.

Les résultats numériques obtenus pour un balourd simulé sur l'inertie 2 de l'arbre EUROPE ne sont que partiellement cohérents avec le comportement observé. En effet, si les pics de fréquence sont correctement évalués, l'amplitude de la réponse au balourd montre un certain écart par rapport aux résultats expérimentaux.

Des travaux complémentaires seront nécessaires pour parvenir notamment à un meilleur calibrage du modèle, une meilleure modélisation de l'amortissement et une prise en compte suffisamment précise des vibrations résiduelles dues au faux-rond de l'arbre.

Conclusion

La version actuelle de Code_Aster intègre les fonctionnalités d'analyse linéaire des machines tournantes. Celles-ci ont été validées en ce qui concerne la mise en donnée, les calculs modaux et les calculs harmonique et transitoire.

Des travaux sont en cours et concernent les aspects suivants : le transfert des modèles patrimoniaux des machines tournantes existantes dans Cadyro et la construction des nouveaux modèles (GTA des différents parc nucléaire), la qualification expérimentale, l'industrialisation, IHM, la prise en compte des non linéarités (couplage avec code de paliers non linéaires, fissure, contact), le traitement des incertitudes et le recalage des modèles.