**Dynamique non-linéaire des aubages: comportement multi-harmonique avec couplage torsion-flexion**

Pour faire face à la demande croissante de réduction des émissions polluantes et d'amélioration continue des performances de vol, l'industrie aéronautique se tourne de plus en plus vers des turboréacteurs de grands diamètres en vue d'augmenter leur taux de dilution. La génération de ces nouvelles architectures implique une meilleure maîtrise des risques d'origine vibratoire. Plus particulièrement, la conception d'aubes de soufflante élancées de grande dimension en matériau composite favorise l'apparition de phénomènes non-linéaires de nature géométrique. Parmi eux, les résonances internes se manifestent suite à un couplage de modes dont les fréquences propres sont commensurables et donnent lieu à des réponses multi-modes pouvant accélérer la ruine par fatigue des roues aubagées.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail de thèse est d'améliorer la compréhension du phénomène de résonance interne. Il s'agit d'une part d'évaluer durant la phase de conception le risque d'apparition du phénomène et d'autre part, de comprendre l'influence des paramètres géométriques sur celui-ci. Pour répondre à cette problématique, différentes approches reposant sur des modèles de complexité croissante sont étudiées. Un modèle non-linéaire de poutre vrillée et pré-courbée avec couplage flexion-torsion est d'abord analysé. Puis, un modèle industriel représentatif d'un aubage de soufflante de futures architectures non carénées est étudié, à la fois expérimentalement et numériquement. Pour chaque cas, des études dynamiques sont réalisées, reposant sur la méthode de l'équilibrage harmonique pour la recherche de solutions périodiques couplée à une procédure de calcul de branches secondaires de solutions.

Une étude paramétrique sur le modèle poutre a permis de montrer le fort impact de la partie non-linéaire du moment de flexion ainsi que de la forme des modes propres sur l'émergence de la résonance interne. Pour ce modèle, une étude d'influence a également mis en avant la modification de la typologie du comportement dynamique lors de la variation de paramètres géométriques et dissipatifs.

L'étude du modèle industriel a également permis d'observer une résonance interne 1:2, d'une part expérimentalement à travers une sollicitation dynamique par pot vibrant et d'autre part numériquement via l'étude d'un modèle éléments finis, réduit à l'aide de la théorie des formes normales. En particulier, il a été montré que la méthode de réduction employée permet de très bien restituer le comportement dynamique de l'aubage avec et sans couplage par résonance interne avec des temps de calcul relativement faibles.

Finalement, les résultats obtenus sur les modèles poutre et industriel peuvent aisément être intégrés dans les bureaux d'études lors des procédures de conception des aubages des futures architectures pour évaluer le risque d'apparition des résonances internes.

Mots clés : Résonance interne, couplage flexion-torsion, non-linéarité géométrique, équilibrage harmonique, aubage de soufflante, Open-Rotor

**Nonlinear dynamics of blades: multiharmonic behavior with bending-torsion coupling**

In order to cope with growing demand for reducing exhaust gas emissions and increasing flight performance, the aeronautical industry is increasingly moving toward bigger diameter turbojet engine so as to improve dilution rate. The design of these new architectures implies a better control of the vibratory risks. More specifically, the conception of slender fan blades in composite material favors geometrical nonlinear phenomena appearance. Among them, internal resonances or modal interactions occur through modes coupling whose frequencies are commensurate and lead to multi-modes responses that can potentially fasten bladed disks wreck with fatigue.

In this context, the objective of this thesis is to improve the internal resonance phenomenon comprehension. On one hand, the aim is to evaluate in design phase the risk of internal resonance appearance. On the other hand, the purpose is to understand the influence of geometrical modifications on the internal resonance behavior. To tackle the problem, several approaches with growing difficulties models are studied. A nonlinear twist and curved beam model with bending torsion coupling is first analyzed. Then, an industrial application representative of a fan blade for future unducted engines architectures is investigated, both experimentally and numerically. For each case, dynamical studies are conducted, based on the harmonic balance method for periodic solution research and coupled with an algorithm to compute and track secondary branches.

A parametric analysis for the beam model has shown the strong impact of the nonlinear part of the bending moment, as well as the mode shapes, on the internal resonance appearance. For this model, a study of influence has also revealed the modification of the dynamical behavior when varying the geometry and the damping ratios.

The internal resonance has also been observed for the industrial model. It appeared first experimentally when exciting the blade with a vibrating pot. Then it came out numerically through a finite elements model, reduced by the normal form theory. More precisely, it was shown that the used reduction method allows a very good restitution of the dynamical behavior of the blade both with and without nonlinear coupling and with relatively small computational time.

Finally, the results obtained for both models can be easily used by engineers during de design phases of future architectures fan blades to evaluate the risk of internal resonances appearance.

Keywords: Internal resonance, bending torsion coupling, geometric nonlinearity, harmonic balance method, fan blade, Open-Rotor