

## METHODE D'ÉQUILIBRAGE HARMONIQUE MULTI-FRÉQUENTIELLE POUR LA SIMULATION DES DOUBLETES D'HÉLICES CONTRA-ROTATIVES : APPLICATION À L'AÉROÉLASTICITÉ

**RESUME :** La mécanique des fluides numérique a permis d'optimiser de nombreux systèmes dont, notamment, les moteurs d'avions. Dans l'industrie aéronautique, les calculs numériques d'écoulements sont principalement limités à des approches stationnaires de par le coût prohibitif des simulations instationnaires. Néanmoins, les écoulements qui se développent dans les machines tournantes, à savoir les principaux composants d'un moteur d'avion, sont majoritairement périodiques en temps. En partant de cette hypothèse de périodicité temporelle, des approches dites spectrales en temps ont vu le jour il y a plus de quinze ans. Elles restent principalement limitées à des écoulements mono-fréquentiels, à savoir composés d'une seule fréquence de base et de ses harmoniques. Récemment, une méthode d'équilibrage harmonique multi-fréquentielle a été développée et implémentée dans le code de calcul *e/sA*, élargissant le champ des applications possibles. En particulier, l'étude de l'aéroélasticité des machines tournantes multi-étagées devient alors envisageable.

Cette thèse se propose d'appliquer la méthode d'équilibrage harmonique multi-fréquentielle pour étudier l'aéroélasticité d'une configuration nouvelle de moteur d'avion: les doublets d'hélices contra-rotatives. La méthode est tout d'abord validée analytiquement et numériquement sur des cas tests linéaires et non-linéaires avec succès. Deux problèmes sont soulevés pour l'utilisation d'une telle méthode sur des configurations aéroélastiques arbitraires: le conditionnement du terme source et la convergence de la méthode. Des approches originales ont été développées afin d'améliorer le conditionnement et de fournir une estimation *a priori* du nombre d'harmoniques nécessaire pour obtenir un certain niveau de convergence. La méthode d'équilibrage harmonique est ensuite validée sur un cas standard d'aéroélasticité des machines tournantes et montre des résultats très proches de ceux expérimentaux. L'applicabilité de la méthode est finalement démontrée pour la simulation de l'aéroélasticité des doublets d'hélices contra-rotatives.

**Mots clés :** Approche spectrale en temps, Doublet d'hélices contra-rotatives, Aéroélasticité, Équilibrage harmonique, Multi-fréquentiel

## MULTI-FREQUENTIAL HARMONIC BALANCE APPROACH FOR THE SIMULATION OF CONTRA-ROTATING OPEN ROTORS : APPLICATION TO AEROELASTICITY

**ABSTRACT:** Computational Fluid Dynamics (CFD) has allowed the optimization of many configurations among which aircraft engines. In the aeronautical industry, CFD is mostly restricted to steady approaches due to the high computational cost of unsteady simulations. Nevertheless, the flow field across the rotating parts of aircraft engines, namely turbomachinery blades, is essentially periodic in time. Years ago, Fourier-based time methods have been developed to take advantage of this time periodicity. However, they are, for the most part, restricted to mono-frequential flow fields. This means that only a single base-frequency and its harmonics can be considered. Recently, a multi-frequential Fourier-based time method, namely the multi-frequential Harmonic Balance (HB), has been developed and implemented into the *e/sA* CFD code, enabling new kinds of applications as, for instance, the aeroelasticity of multi-stage turbomachinery.

The present PhD thesis aims at applying the HB approach to the aeroelasticity of a new type of aircraft engine: the contra-rotating open rotor. The method is first validated on analytical, linear and non-linear numerical test problems. Two issues are raised, which prevent the use of such an approach on arbitrary aeroelastic configurations: the conditioning of the multi-frequential HB source term and the convergence of the method. Original methodologies are developed to improve the condition number of the simulations and to provide *a priori* estimates of the number of harmonics required to achieve a given convergence level. The HB method is then validated on a standard configuration for turbomachinery aeroelasticity. The results are shown to be in fair agreement with the experimental data. The applicability of the method is finally demonstrated for aeroelastic simulations of contra-rotating open rotors.

**Keywords:** Fourier-based time method, Contra-rotating open rotor, Aeroelasticity, Harmonic balance, Multi-frequential

**Keywords :**