

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Modélisation et simulation du comportement vibratoire d'un arbre de turbine obtenu par fabrication additive avec prise en compte des défauts d'impression**

Référence : **SNA-DMAS-2025-23**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse : octobre 2025**

**Date limite de candidature : mai 2025**

### Mots clés

Simulation, mécanique numérique, réduction de modèle, homogénéisation, fabrication additive

### Profil et compétences recherchées

Ingénieur/M2 en mécanique, mathématiques appliquées ou dans une discipline connexe, avec un fort attrait pour les méthodes numériques (éléments finis, analyse numérique des EDP, calcul scientifique) et des compétences en programmation

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

La fabrication additive constitue une avancée technologique majeure, transformant notre approche de la conception et de la production de systèmes complexes, en particulier dans les secteurs de l'aéronautique et du spatial. Cette technologie de rupture devrait faciliter la transition vers une aviation plus respectueuse de l'environnement, en réduisant de manière significative l'empreinte carbone.

Dans ce contexte, notre attention se tourne tout particulièrement vers l'optimisation des arbres de machines tournantes, élément essentiel des turbomachines et des réacteurs, en explorant les bénéfices que la fabrication additive peut apporter à ces composants. D'une part, la fabrication additive permet de structurer la matière déposée à différentes échelles, offrant ainsi de nouveaux degrés de liberté pour optimiser le comportement vibratoire de la pièce résultante. Toutefois la géométrie d'un arbre de machine tournante est fortement contrainte en raison des exigences fonctionnelles et des interactions avec les systèmes qui l'entourent, ce qui rend complexe toute optimisation de son comportement vibratoire par une simple modification de forme. D'autre part, le comportement mécanique des pièces dépend des paramètres d'impression ainsi que des conditions de l'environnement de travail. Ainsi la maîtrise de la forme finale de la pièce est particulièrement complexe. Le développement de boucles de contrôle (température, position) permet de limiter ces erreurs, mais, dans l'état actuel des technologies, elles ne peuvent être complètement éliminées.

L'objectif de cette thèse vise ainsi à prendre en compte la variabilité inhérente à ce processus de fabrication afin d'en étudier son impact sur la réponse vibratoire de l'arbre tout en contrôlant les temps de calcul via le développement de modèles dits « réduits ». Ces derniers permettent la construction de bases d'approximation de faible dimension tout en contenant la quasi-totalité de l'information nécessaire pour reconstruire la solution recherchée.

Le premier volet de la thèse porte sur la caractérisation des défauts de la structure. Ces défauts peuvent être globaux (imprécisions géométriques) ou très localisés (inclusions de porosités) affectant les propriétés mécaniques du matériau. Il s'agira ici de proposer un modèle paramétré pertinent pour notre cas d'application, en particulier en rendant compte de la nature multi-échelles de la pièce produite.

Le second volet sera consacré à la mise en œuvre d'une technique d'homogénéisation numérique générique (FE2) [1,2]. Bien que cette technique offre une réduction importante des coûts de calculs, la résolution du problème à l'échelle micro nécessite toujours un nombre important de degrés de liberté, ce qui entraîne un coût informatique non négligeable, limitant ainsi la possibilité d'utiliser ces modèles multi-échelles de grande dimension dans un cadre industriel pour mener des études paramétriques. Or les modèles réduits sont bien adaptés à ce type d'étude.

Nous nous intéresserons alors au développement d'une méthodologie de calcul couplant une technique de réduction de modèles avec une approche FE2 en vue de pouvoir prendre en compte les effets microstructuraux. Concernant la méthode de réduction, la décomposition généralisée propre (PGD) [3] est retenue. Son principal avantage réside dans son caractère *a priori*, c'est-à-dire que seuls les opérateurs du problème entrent en jeu dans la construction de l'approximation réduite, contrairement à des approches *a posteriori*, où la connaissance d'un certain nombre de solutions du problème « complet » est requise. Pour

des chargements quasi-statiques, de tels couplages ont été proposés pour les problèmes linéaires [4] ou présentant des non-linéarités matérielles [5].

Cette thèse a pour ambition de simuler le comportement vibratoire d'arbres tournants. L'obstacle majeur consiste à surmonter les singularités présentes de manière inhérente dans les réponses fréquentielles. Plusieurs travaux ont traité cette difficulté, via des approches de type adaptative [6] ou collocation [7], en supposant le modèle linéaire. Or ici, nous considérons des structures en rotation, et la modélisation de telles structures fait apparaître un terme additionnel non-linéaire (raideur géométrique). Il faudra donc surmonter cette difficulté.

[1] Feyel F. (2011). « Multiscale non-linear FE2 analysis of composite structures: Fiber size effects ». *Le Journal de Physique IV*. 11(PR5).

[2] Feyel F. (1999). *Application du calcul parallèle aux modèles à grand nombre de variables internes*. Thèse de Doctorat. École nationale supérieure des mines de Paris.

[3] Chinesta F., Ladevèze P., Cueto, E. (2011). « A Short Review in Model Order Reduction Based on Proper Generalized Decomposition ». *Archives of Computational Methods in Engineering*. Vol. 18 (4): 395 – 404.

[4] El Halabi F., González D., Chico A., Doblaré M. (2013). « FE2 multiscale in linear elasticity based on parametrized microscale models using proper generalized decomposition ». *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 257: 183 – 202.

[5] El Halabi F., González D., Sanz-Herrera J.A., Doblaré M. (2016). « A PGD-based multiscale formulation for non-linear solid mechanics under small deformations ». *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 305: 806 – 826.

[6] Chevreuil M., Nouy A. (2012). « Model Order Reduction based on Proper Generalized Decomposition for the Propagation of Uncertainties in Structural Dynamics ». *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. Wiley, vol. 89: 241 – 268.

[7] Lee G.L., Park K.C., Park Y.H. (2022). « Reduced-order modeling via proper generalized decomposition for uncertainty quantification of frequency response functions ». *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 401, part B.

#### **Collaborations envisagées : ESTIA**

La thèse sera réalisée en collaboration avec l'ESTIA dans le cadre de la chaire PROVE visant à développer des nouveaux outils et méthodes pour la conception de systèmes d'avion à zéro émission de gaz à effet de serre.

La durée de préparation de la thèse devra se répartir de manière équilibrée entre les deux établissements.

#### **Laboratoire d'accueil à l'ONERA**

Département : Matériaux et Structures

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

**Contact** : Riad SANCHEZ

Tél. : 01 46 73 37 16

Email : [riad.sanchez@onera.fr](mailto:riad.sanchez@onera.fr)

**Contact** : Véronique KEHR-CANDILLE

Tél. : 01 46 73 46 57

Email : [veronique.kehr-candille@onera.fr](mailto:veronique.kehr-candille@onera.fr)

#### **Directeur de thèse**

Nom : Pierre JOYOT

Laboratoire : ESTIA Recherche

Tél. : 05 59 43 84 00

Email : [p.joyot@estia.fr](mailto:p.joyot@estia.fr)

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>