



# Mastère Spécialisé

## Design des Matériaux et des Structures

(DMS)

### OFFRE DE SUJET MASTERE DMS 2024/2025

#### Encadrement

---

Alexiane Arnaud, Clément Remacha (Safran PFX), Henry Proudhon (CDM - Mines Paris)

#### Titre

---

**Vers un jumeau numérique des aubes de turbines grâce au contrôle non destructif par tomographie et diffraction Laue**

#### Contexte

---

Les aubes de turboréacteur qui subissent les plus importantes sollicitations mécaniques endurent des températures de l'ordre de 1700 °C et des vitesses de plus de 20000 tours par minutes. Pour que ces pièces puissent fonctionner dans ces conditions extrêmes, elles sont fabriquées avec un procédé de solidification particulier leur permettant d'être constituées d'un unique cristal, dont l'orientation est contrôlée.

Pour vérifier que les pièces correspondent bien aux spécifications du bureau d'étude, un certain nombre de contrôles non destructif sont effectués tout au long du procédé de fabrication. Parmi l'ensemble de ces contrôles, on trouve notamment deux contrôles numériques : la tomographie aux rayons X, qui assure la conformité dimensionnelle des pièces et la diffraction en transmission qui garantit l'orientation cristalline.

Le calcul par élément finis est très utilisé dans de nombreux domaines pour évaluer le comportement mécanique, thermique, thermodynamique, etc. de pièces. Actuellement, les modèles géométriques utilisés pour réaliser ces calculs sont toujours ou presque, issues des modèles CAO idéaux.

Grâce à la mesure tomographique, il est désormais possible d'obtenir un maillage 3D de chacune des pièces provenant de la production. Cette mesure numérique, ouvre donc la voie à l'application des calculs de durée de vie sur géométrie réelle, au lieu d'utiliser uniquement la géométrie nominale provenant de la CAO. Ceci permettrait d'augmenter drastiquement la fiabilité du contrôle de chaque pièce grâce à des simulations sur mesure.

Le maillage généré à partir de la tomographie de chaque pièce sera évidemment unique. Cette multitude de géométrie à gérer représente un défi important à relever pour automatiser la chaîne de calcul. D'autant plus qu'au-delà de la différence dimensionnelle, les pièces peuvent avoir différents types d'accidents géométriques : zones de fortes variations locales, indications métallurgiques telles que des inclusions ou des porosités. En parallèle des mesures dimensionnelles 3D, il est maintenant possible d'obtenir la cartographie de l'orientation cristalline sur l'ensemble de la pale à grâce à la mesure de diffraction en transmission [Thèse A. Arnaud].

#### Objectif et travail proposé

---

L'objectif de ce stage est donc de définir la stratégie la plus efficace et la plus automatique pour injecter ces éléments dans un calcul de durée de vie par élément finis.

Durant ce stage, on pourra utiliser cette information 2D de la cartographie pour la réattribuer au volume géométrique de la pièce qui l'a généré. Il faudra alors mettre en place une méthode pour

associer l'information cristalline locale au maillage élément finis 3D, pour réaliser des nouveaux calculs mécaniques intégrant cette caractéristique.

Une partie du stage consiste à définir une méthode de traitement des accidents géométriques apparus sur les pièces réelles :

- Mettre en place une stratégie pour traiter les zones de fortes variations locales non paramétrable par des modèles géométriques de types CAO ;
- Automatiser l'injection des défauts géométriques et des éléments exogènes, dus au procédé de fabrication, dans un maillage 3D. Exemple : Zoom structural [Thèse A.Aublet] ;
- Validation de la méthode, par des simulations numériques, sur des pièces réelles avec des défauts métallurgiques et des variations locales.

L'autre partie centrée sur la désorientation cristalline consistera à :

- S'assurer de la trajectoire du faisceau incident sur la pièce ;
- Réattribuer chaque zone illuminée par les rayons X dans le volume global pour générer la projection en 3D.

Une ouverture vers la corrélation des calculs éléments finis avec des essais mécaniques est envisageable.

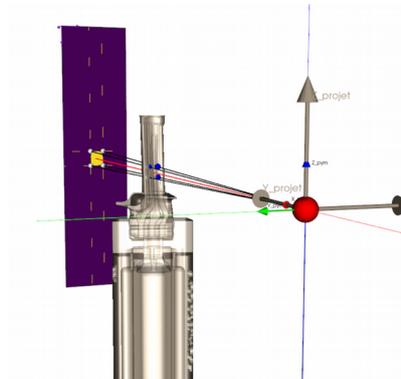


Figure 1: Reconstruction 3D de la mesure de diffraction en transmission pour la détermination de la zone illuminée lors de la mesure.

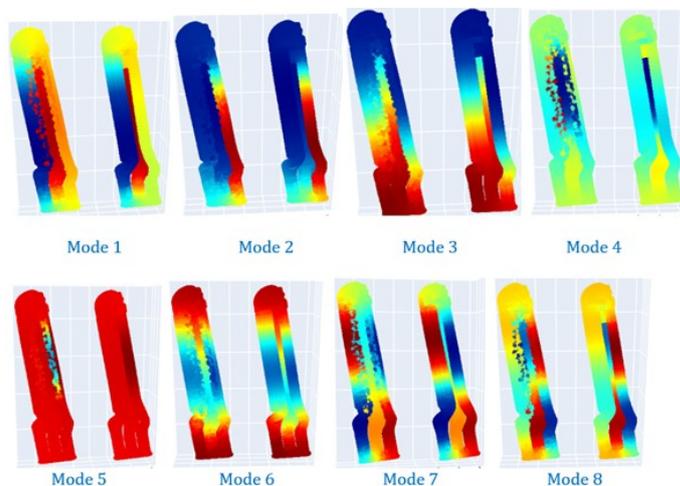


Figure 2 : Exemple de calcul de mode (travaux en cours) pour la gestion des différents maillages de pièces réelles pour le calcul élément finis.



# Mastère Spécialisé Design des Matériaux et des Structures (DMS)

## Profil demandé

---

Un profil mécanique des matériaux et des structures avec une appétence pour la mécanique numérique. Des notions de programmation en C++ et Python est un gage de réussite dans la réalisation de ce projet.

## Références

---

[Thèse A. Arnaud] : Etude et développement d'un système de contrôle volumique de la qualité cristalline des aubes de turbines. 2020.

[Thèse A. Aublet] : Métrologie fonctionnelle par imagerie 3D et apprentissage de jumeaux numériques : application à la fatigue thermo-mécanique dans les superalliages monocristallins. 2023.