

Thèse (collaboration industrielle) — Safran Landing Systems & ENSAM (LEM3, Metz)

Titre : "Virtual Testing" pour la certification : compétition localisation/striction – flambage élastoplastique sur pièces réelles de structures aéronautiques sous chargements statiques

Mots-clés : instabilités matérielles/structurelles, localisation/striction, flambage élastoplastique, plasticité anisotrope, transformations finies, Abaqus/Standard, post-traitement Python/C++, corrélation essai–calcul, admissibles statiques (statistique).

Contexte industriel — de la simulation à la prise de décision

La certification des trains d'atterrissement (Fig. 1), et plus largement des structures métalliques aéronautiques, repose sur une démonstration rigoureuse de leur tenue aux charges ultimes statiques. Cette validation s'appuie traditionnellement sur une synergie entre des calculs non linéaires complexes (plasticité, grandes déformations, et éventuellement contact) et des essais physiques progressifs, allant de l'éprouvette à la structure complète. Dans ce cadre, l'enjeu central pour l'ingénierie de simulation est de prédire avec robustesse le mode de ruine et la charge critique afin de dimensionner les pièces au plus juste. Un tel niveau de précision permet d'assurer des marges suffisantes sans surdimensionnement inutile, tout en minimisant les risques lors des essais de certification.

Toutefois, la prédiction est rendue difficile par la compétition entre plusieurs mécanismes qui s'activent selon le type de chargement ou de géométrie, notamment les instabilités matérielles liées à la localisation des déformations plastiques et les instabilités structurelles, tel que le flambage élastoplastique. Ces différents modes de défaillance sont interdépendants : le phénomène de striction peut dégrader localement la rigidité et favoriser une instabilité globale, tandis qu'un mode global peut induire des déformations localisées pouvant entraîner une striction. Cette interaction est particulièrement critique sous chargements multiaxiaux et dans les zones géométriquement complexes.

Pour répondre à ces défis, l'objectif industriel s'inscrit dans une logique de "Virtual Testing" visant à transformer les simulations brutes en une aide à la décision. À partir de simulations par éléments finis, il s'agit de produire un diagnostic standardisé indiquant les zones à risque, le mécanisme dominant et le niveau de confiance associé. La thèse bénéficiera d'un accès privilégié aux données industrielles de Safran Landing Systems, constituant une base de validation sur pièces réelles sans qu'une campagne d'essais supplémentaire ne soit nécessaire pour le doctorant. Alors que les outils théoriques de détection/prédiction (critères de localisation de Rice et de flambement de Hill) seront développés en parallèle dans le cadre d'un post-doctorat, le doctorant se concentrera sur leur mise en œuvre industrielle, la validation sur des cas réels et le transfert de la méthode vers l'ingénierie.

Objectifs et approche — corrélation à rupture & workflow du "Virtual Testing"

L'ambition scientifique de ce projet est de proposer un modèle de prédiction de ruine/défaillance directement exploitable en ingénierie pour des structures sous chargements complexes. Le travail consiste à reproduire numériquement la charge critique et le mode de ruine observés afin d'en déduire un diagnostic actionnable pour le dimensionnement. La recherche sera ainsi guidée par une question centrale : pour une pièce réelle, quel mécanisme gouverne la ruine et quelle est la robustesse/fiabilité de sa prédiction face aux dispersions de fabrication ou de matériau ? Pour répondre à cette question, la démarche combine quatre briques complémentaires, structurées pour aboutir à un workflow industriel :

- 1. Modélisation du comportement mécanique en transformations finies (socle prédictif) :** Identification d'un critère de plasticité anisotrope et description fine du comportement en grandes

déformations, afin de reproduire fidèlement les cinématiques de localisation observées et de garantir la pertinence du diagnostic d'instabilité sur des cas industriels réels.

2. **Détection d'instabilités (Rice/Hill) et diagnostic "mécanisme gouvernant" (sortie décisionnelle)** : Exploitation de méthodes de détection d'instabilités matérielles (type Rice) et structurelles (type Hill) pour produire des sorties directement utilisables : cartes de risque, charges critiques, identification du mode gouvernant, et indicateurs de confiance (robustesse / sensibilité). Une analyse critique des limites des critères sera menée et, si nécessaire, l'applicabilité des critères ou la nécessité de critères alternatifs (notamment vis-à-vis de la compétition avec/sans endommagement) seront discutées.
3. **Chaîne numérique industrielle (Abaqus/Standard + post-traitement automatisé)** : Simulations non linéaires sous Abaqus/Standard et post-traitement Python/C++ pour automatiser l'analyse (extraction d'indicateurs, cartographies, génération de rapports de diagnostics). Les implémentations "coeur" des critères (Rice/Hill) pourront s'appuyer sur des travaux menés en parallèle dans le cadre d'un post-doctorat ; la thèse vise l'architecture du workflow, son industrialisation (scripts, templates, vérifications) et son déploiement sur des cas représentatifs.
4. **Corrélation essai-calculation et robustesse (validation + admissibles statiques)** : Corrélations à la ruine (charge critique + mode de ruine) à partir : (i) d'une base d'essais technologiques sur tubes (flexion, torsion, flexion-torsion Fig. 2) et chapes (chargements axial et transversal), et (ii) d'essais Safran Landing Systems sur pièces réelles déjà réalisés.
Des études de sensibilité aux paramètres matériau et, si nécessaire, aux caractéristiques de géométrie/conditions aux limites permettront de produire des admissibles statiques et des recommandations de marges dans un cadre statistique compatible avec les exigences de certification.

Missions du doctorant

- Construire et qualifier des modèles EF non linéaires représentatifs : chargements statiques multiaxiaux, conditions aux limites réalistes, contact/frottement si pertinent, sous Abaqus/Standard.
- Exploiter les sorties prédites par les critères pour un diagnostic opérationnel : zones à risque, charge(s) critique(s), mode gouvernant, indicateurs de confiance.
- Réaliser une corrélation essai-calculation sur (i) base de tests tubes/chapes et (ii) essais Safran Landing Systems sur pièces réelles (données existantes) : analyse des concordances/écarts et recommandations.
- Mener des études de sensibilité aux paramètres matériau (et aux caractéristiques de géométrie/conditions aux limites) pour guider la génération d'admissibles statiques dans un cadre statistique compatible avec les attentes réglementaires.
- Extension possible : analyse de l'applicabilité des critères de ruine identifiés (ou besoin de critères alternatifs) sur un matériau plus hétérogène en comparaison au matériau homogène initial.

Retombées attendues

Pour le doctorant (valorisation scientifique & compétences)

Le doctorant développera une expertise solide à l'interface entre mécanique non linéaire, instabilités, calculs par EF industriels et validation sur données réelles. Les retombées attendues incluent :

- la rédaction de plusieurs articles scientifiques (revues internationales et/ou conférences) autour de la détection d'instabilités, de la corrélation à la ruine et de l'industrialisation d'un diagnostic EF ;
- la participation à des conférences académiques et/ou workshops industriels, avec présentations des résultats et échanges avec la communauté ;
- une montée en compétences fortement valorisable : Abaqus/Standard, modélisation non linéaire, post-traitement Python/C++, automatisation de workflow, pratique de validation et transfert de méthodes vers l'industrie.

Pour Safran Landing Systems (impact industriel & certification)

À l'issue de la thèse, Safran Landing Systems disposera d'une méthode éprouvée et validée sur données industrielles pour sécuriser les essais, réduire les itérations de dimensionnement et mieux maîtriser les marges statistiques dans une logique de "Virtual Testing". Plus concrètement, la thèse délivrera :

- un workflow standardisé de diagnostic à partir de calculs EF non linéaires (zones à risque, charge(s) critique(s), mécanisme gouvernant, indicateurs de confiance) ;
- des outils de post-traitement et de reporting (scripts, gabarits, check-list de vérification) facilitant l'appropriation par l'ingénierie de simulation ;
- une méthodologie de corrélation essai-calculation (règles de comparaison, critères d'acceptation, analyse des écarts) ;
- des recommandations de dimensionnement (admissibles statiques, sensibilités, recommandations de marges) compatibles avec les exigences de certification.

Profil recherché

Ingénieur(e) / Master 2 avec forte composante mécanique numérique / éléments finis. Intérêt pour la mécanique non-linéaire (plasticité, grandes déformations, instabilités). Une expérience sur Abaqus/Standard et/ou Python (post-traitement) est un plus. Goût pour les sujets appliqués : produire une méthode robuste/éprouvée et la valider sur données industrielles.

Contacts

- **Safran Landing Systems** : Nicolas Antoni – Encadrant industriel – Responsable Equipe Méthodes Calcul de Structures / Division Trains et Intégration.
- **LEM3/ENSA** :
 - Farid Abed-Meraiem – Directeur de thèse – Professeur à l'ENSA de Metz / LEM3.
 - Mohamed Ben Bettaieb – Co-directeur de thèse – Maître de Conférences à l'ENSA de Metz / LEM3.



Fig. 1



Fig. 2