

Étude de l'interaction/compétition entre instabilités matérielles et structurelles dans des structures aéronautiques sous chargements statiques

Mots-clés : instabilités matérielles et structurelles ; comportement élastoplastique ; implantation numérique ; Abaqus ; chargements statiques multiaxiaux ; structures aéronautiques.

1. Contexte industriel

Dans le cadre de la certification des trains d'atterrissage, les réglementations aéronautiques exigent que toutes les pièces de la structure de l'atterrisseur soient capables de supporter des charges ultimes statiques sans rupture. Pour répondre à cette exigence, une analyse confirmée par des essais technologiques, y compris un essai structurel à l'échelle du train d'atterrissage complet, est réalisée. Les chargements statiques multiaxiaux peuvent entraîner une variété de modes de rupture potentiels, allant des instabilités matérielles et structurelles jusqu'à la rupture finale (Defaïsse, 2018 ; Al Kotob, 2019). La nature combinée de ces modes résulte des nombreux cas de chargement au sol variant considérablement en intensité et en direction, ainsi que de l'élancement géométrique des composants et du comportement élastoplastique inhérent aux différents matériaux utilisés dans la structure.

2. Objectifs de la thèse

L'objectif de cette thèse est de mieux comprendre les mécanismes de rupture des structures aéronautiques soumises à des chargements multiaxiaux complexes. Plus précisément, notre attention se concentrera sur la compréhension de l'interaction et la compétition entre les instabilités matérielles (telle que la striction localisée) et les instabilités structurelles (telles que la striction diffuse ou le flambage élastoplastique) dans ce type de structures. Des études antérieures ont examiné ces deux types d'instabilités séparément (Ben Bettaieb et Abed-Meraim, 2015 ; Wang et al., 2001), de sorte que leur interaction et leur compétition ne sont pas encore bien comprises ni modélisées. Pour autant, il a été mis en évidence expérimentalement que ces deux types d'instabilités peuvent se produire simultanément et interagir les uns avec les autres, ce qui peut avoir des effets significatifs sur le comportement global de la structure. Par exemple, les instabilités matérielles peuvent entraîner une dégradation progressive de la résistance de la structure, ce qui peut favoriser l'apparition du flambage élastoplastique. De même, les instabilités structurelles peuvent induire des déformations qui peuvent accentuer les effets des instabilités matérielles. Des résultats numériques préliminaires ont montré que cette compétition dépend du chargement appliqué et des propriétés géométriques et mécaniques des structures étudiées. Du point de vue théorique, la compréhension de cette compétition nécessite la sélection de critères d'instabilité appropriés (ou le développement de nouveaux critères alternatifs). Dans cette optique, nous utiliserons le critère de bifurcation de Rice (Rice, 1976) et le critère de perte d'unicité globale de Hill (Hill, 1958) comme points de départ pour prédire l'apparition des instabilités matérielles et structurelles, respectivement. Le comportement mécanique des structures étudiées sera supposé isotrope (élasticité, plasticité et écrouissage isotropes), où le critère de von Mises sera utilisé pour modéliser l'écoulement plastique. Du point de vue numérique, l'atteinte des objectifs précédemment cités nécessite des développements logiciels significatifs dans ou en connexion avec le code de calcul par éléments finis Abaqus/Standard (Abaqus, 2014). Le choix de ce code de calcul est motivé par son efficacité et sa robustesse dans la modélisation des applications industrielles étudiées dans le cadre de cette thèse. À titre d'exemple, le modèle de comportement élastoplastique et le critère de bifurcation de Rice seront implantés dans une 'User Material Subroutine' (UMAT) dans Abaqus, tandis que le critère de perte

d'unicité de Hill sera implanté dans un outil logiciel (en Python ou C++) qui post-traitera les résultats de calculs par éléments finis. Une attention particulière sera accordée, dans la mise en place de ces outils, à quelques particularités des applications industrielles visées (la gestion du contact frottant entre les différents composants de la même structure dans l'outil de prédiction des instabilités structurelles...). Les différents critères appliqués et les développements logiciels associés seront validés en comparant les prédictions numériques avec les expériences obtenues sur la base d'essais technologiques sur tubes sous chargement simple (flexion ou torsion) et combiné (flexion et torsion) et sur chapes chargées axialement et transversalement. La validité des approches et critères numériques développés pour prédire les instabilités matérielles et structurelles dans les structures métalliques plastiquement anisotropes et matériellement hétérogènes sera analysée à la fin de la thèse.

Ce projet doctoral permettra une meilleure compréhension des mécanismes de rupture des structures métalliques aéronautiques soumises à des chargements multiaxiaux complexes et pourra contribuer au développement de stratégies de conception et de maintenance plus efficaces pour ces structures.

3. Références

- R. Hill (1958), "A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 6, pp. 236–249. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(58\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0022-5096(58)90029-2).
- J.R. Rice (1976), "The localization of plastic deformation". In: *14th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, pp. 207–220.
- C.M. Wang, Y. Xiang, J. Chakrabarty (2001), "Elastic/plastic buckling of thick sheets", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 8617–8640. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(01\)00144-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00144-5).
- ABAQUS (2014), User's Manual 6.14, Abaqus Inc.
- M. Ben Bettaieb, F. Abed-Meraim (2015), "Investigation of localized necking in substrate-supported metal layers: Comparison of bifurcation and imperfection analyses", *International Journal of Plasticity*, Vol. 65, pp. 168–190. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2014.09.003>.
- C. Defaïsse (2018), "Rupture Ductile des Aciers Aéronautiques". *Thèse de l'Université PSL-Mines ParisTech*, Centre des Matériaux.
- M. Al Kotob (2019), "Competition between Global and Local Instabilities in the Failure of Aeronautical Structures". *Thèse de l'Université PSL-Mines ParisTech*, Centre des Matériaux.

Profil recherché : Vous êtes ingénieur(e) ou titulaire d'un Master 2 à forte composante en Mécanique Numérique/simulation par éléments finis. Une première expérience en modélisation par éléments finis (de préférence avec le code ABAQUS), au travers d'un projet académique ou d'un stage, serait un plus.

Contact Safran Landing Systems

Nicolas Antoni – Encadrant industriel – Responsable Equipe Méthodes Calcul de Structures / Division Trains et Intégration.

Contacts LEM3/ENSAM

Farid Abed-Meraim – Directeur de thèse – Professeur à l'ENSAM de Metz / LEM3.

Mohamed Ben Bettaieb – Co-directeur de thèse – Maître de Conférences à l'ENSAM de Metz / LEM3.