

# Résumé

Les freins aéronautiques sont soumis à des instabilités vibratoires induites par le frottement. Il en résulte des vibrations qui présentent un risque pour la structure du frein et de l'atterrisseur et posent des problèmes d'intégration. Safran Landing Systems doit donc répondre à des spécifications avionneurs strictes sur les niveaux des vibrations générées par son équipement. Le respect de ces spécifications est actuellement contrôlé par la réalisation d'essais de freinage longs et coûteux. L'objectif de ces travaux de recherche est de reproduire numériquement ces phénomènes vibratoires *via* des outils intégrables au processus de conception d'un frein.

Le crissement de frein, bien qu'il soit l'objet de recherches depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, demeure un phénomène assez mal compris, notamment dans l'aéronautique. Des vibrations instables apparaissent régulièrement sur l'ensemble de la plage fréquentielle 0-2 kHz. Au cours de la dernière décennie, une instabilité vibratoire vers 200 Hz dénommée *whirl 2* s'est manifestée de manière récurrente et souvent critique sur la plupart des nouveaux freins développés. On cherche donc à mettre en place une méthode permettant de simuler l'apparition et les amplitudes des instabilités vibratoires, notamment du mode de *whirl 2*.

Dans une première partie, on présente des analyses d'essais vibratoires réalisés en conditions opérationnelles et expérimentales. On décrit ensuite la modélisation par la méthode des éléments finis du frein instable au sens de Lyapunov. La stabilité du système linéarisé est étudiée et on montre une corrélation en fréquence et déformée entre le modèle et les essais.

Ce modèle éléments finis est trop volumineux en l'état pour permettre la simulation d'amplitudes de vibrations non linéaires. On propose donc dans une seconde partie deux méthodes de réduction adaptées à l'architecture complexe d'un système de freinage aéronautique et permettant la prise en compte du frottement. La première est une méthode semi-analytique qui se révèle très performante jusqu'à 500 Hz. La seconde méthode de réduction mise en œuvre est la double synthèse modale. Elle est implémentée dans sa version classique, puis une amélioration est proposée avec succès : la double synthèse modale complexe.

La troisième partie est consacrée à l'étude de la dynamique non linéaire du *whirl 2* par la réalisation d'intégrations temporelles. La simulation des amplitudes de vibration nécessite la prise en compte réaliste du comportement non linéaire du frein. Or, on fait d'abord le constat que, contrairement à une hypothèse communément admise, les non-linéarités de contact situées aux interfaces frottantes ne suffisent pas à expliquer à elles seules la saturation des amplitudes vibratoires constatée expérimentalement. La recherche des phénomènes physiques non linéaires influents nous amène à considérer l'interaction de la structure vibrante avec le circuit hydraulique de commande du frein. La modélisation du couplage hydrodynamique fournit alors des éléments de compréhension inédits et permet de formuler des règles de conception. Enfin on étudie l'impact du frottement sec dans les contacts périphériques des disques de freinage avec la structure. Ce phénomène, jusque là négligé, apparaît largement prépondérant. Des études d'influences, présentant une bonne corrélation avec les essais, permettent de mettre en évidence de manière robuste l'influence du design et des scénarios de freinage sur les amplitudes vibratoires.

**Mots-clés :** Crissement de frein, Dynamique non-linéaire, Réduction de modèle, Analyse transitoire, Hydrodynamique, Frottement, Modèle éléments finis.