# **Résumé**

Ces travaux de recherche sont consacrés à l’évaluation du comportement en fissuration d’un composite à matrice métallique (CMM) subissant des sollicitations de fretting-fatigue. Ce matériau, constitué d’une matrice d’alliage d’aluminium renforcée par des particules de carbure de silicium, est notamment employé pour produire des pièces de structure de rotor d’hélicoptère. L’action combinée de chargements cycliques complexes en vol et de vibrations induisant un frottement localisé aux contacts entre les différentes pièces provoque un endommagement par fissuration précoce, dit de fretting-fatigue. L’enjeu de cette étude est de déterminer l’influence de la microstructure sur les propriétés en fretting-fatigue du CMM. En effet, la gamme de mise en forme que subit le matériau modifie fortement l’organisation des renforts SiC ainsi que la morphologie des grains métallurgiques de la matrice. Une meilleure connaissance de ce phénomène permettra de guider les élaborateurs de gamme de forgeage vers une microstructure optimisée vis-à-vis de la résistance en fretting-fatigue.

La stratégie adoptée repose sur plusieurs campagnes d’essais expérimentaux, modélisées par la suite à l’aide de simulations numériques par éléments finis. Une large sélection de configurations microstructurales diverses a tout d’abord été caractérisée afin d’identifier l’effet du procédé de mise en forme sur l’organisation des renforts, en termes d’orientation et de distribution spatiale, mais aussi sur les propriétés de la matrice telles que la taille de grain et la texturation cristallographique. Une campagne comparative d’essais de fretting simple en configuration sphère/plan effectuée sur cette sélection d’échantillons a montré que l’orientation des particules de renfort par rapport à la sollicitation de fretting gouverne l’extension de la fissuration en fretting. Le comportement en arrêt de propagation du CMM a en particulier pu être caractérisé par une approche numérique, par l’intermédiaire du calcul du seuil d’arrêt de propagation ΔKth. Une campagne d’essais de fretting-fatigue a ensuite été mise en œuvre de manière à vérifier la potentielle validité d’une transposition des résultats de fretting simple au fretting-fatigue. Il semble alors que l’effet de l’orientation des renforts sur la durée de vie en fretting-fatigue soit marginal devant celui de la taille de grain, la cinétique de propagation en fatigue pilotant majoritairement l’endurance en fretting-fatigue. Ces résultats expérimentaux ont également été simulés numériquement. Une approche basée sur le calcul du critère de fatigue multiaxiale SWT associé à une prise en compte du gradient de contrainte induit par fretting par une méthode non-locale de distance critique a ainsi permis de prévoir la durée de vie en fretting-fatigue du CMM à partir de sa courbe d’endurance en fatigue pure.

Enfin, une modification locale de la microstructure du CMM sous le contact de fretting a été mise en évidence par des observations de microscopie électronique en transmission. L’état de contrainte complexe associé à une augmentation localisée de température conduit à une diffusion de cuivre au sein de la matrice Al. L’hétérogénéité chimique, et probablement de propriétés mécaniques, ainsi créée peut mener au développement d’une fissuration secondaire.

# **Abstract**

This research work is dedicated to the study of the cracking behaviour of a metal matrix composite (MMC) submitted to fretting-fatigue loadings. This material, which is composed of an aluminium alloy matrix reinforced with silicon carbide particles, is used to produce structural components for helicopter rotor applications. The combined action of in-flight complex cyclic loadings and vibrations inducing friction between certain parts leads to a so-called fretting-fatigue damage. This phenomenon generates early crack nucleation and subsequent propagation that can lead to the failure of the assembly. The particular stake of the study is the identification of the influence of the microstructure on the fretting-fatigue properties of the MMC. Indeed, the forming process applied to the material strongly modifies the SiC particles organization, as well as the shape and the size of the matrix grains. A better understanding of this matter would allow proposing new forging suites in order to produce optimized microstructures regarding the fretting-fatigue endurance of the MMC.

The chosen strategy relies on several experimental campaigns that were subsequently modeled by finite element simulations. A large selection of diverse microstructural configurations was characterized in order to identify the effect of the forming process on the orientation and the spatial distribution of the reinforcing particles. The matrix grain size and crystallographic texture were addressed as well. A comparative plain fretting test campaign in sphere-on-flat configuration showed that the orientation of the SiC particles with respect to the fretting loading direction drives the fretting cracking extension. The crack arrest behavior of the MMC was numerically assessed by computing the crack arrest threshold ΔKth as a function of the particles banding orientation. An experimental fretting-fatigue test campaign was then launched to check if plain fretting results could be transposed to the fretting-fatigue matter. The obtained results revealed that the effect of the particles orientation in fretting-fatigue is weaker before the matrix grain size since it is the fatigue propagation kinetics that seems to drive the fretting-fatigue endurance of the composite. Those experimental results were numerically modeled as well. An approach based on the SWT multiaxial fatigue criterion coupled with the non-local method of the critical distance allowed the prediction of the fretting-fatigue lifetime of the MMC, using only its pure fatigue endurance curve.

Finally, a fretting-induced microstructural modification below the contact was highlighted by transmission electron microscopy. Indeed, the complex stress state combined with a localized temperature increase leads to the diffusion of copper atoms inside the Al matrix. The chemical heterogeneity, most probably inducing mechanical heterogeneities as well, can generate secondary cracks below the contact.

# **Titre**

Etude et formalisation du comportement en fissuration d’un composite à matrice métallique Al-SiC soumis à des sollicitations de fretting-fatigue : influence de la microstructure

# **Title**

Study and formalisation of the cracking behaviour of an Al-SiC metal matrix composite submitted to fretting-fatigue loadings: influence of the microstructure

# **Mots-clés**

Composite à matrice métallique, Fissuration, Fretting-fatigue, Fretting simple, Simulation numérique par éléments finis, arrêt de fissuration, Rotor d’hélicoptère

# **Keywords**

Metal-matrix composites, Cracking, Fretting-fatigue, Plain fretting, Finite element method, crack arrest, Helicopter rotor