

Modélisation du comportement orthotrope viscoplastique de l'alliage aéronautique Ti-6Al-4V sous chargements complexes

M. Ruiz de Sotto^{1,2,3}, P. Longère¹, V. Doquet², J. Papisidero³

¹ Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, Institut Clément Ader, Toulouse, France, {miguel.ruiz-de-sotto, patrice.longere}@isae-supaero.fr

² Laboratoire de Mécanique des Solides, CNRS UMR 7649, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, doquet@lms.polytechnique.fr

³ Safran Aircraft Engines, Moissy Cramayel, France, jessica.papisidero@safrangroup.com

Résumé — Des chargements complexes entraînant des grandes déformations, des vitesses de déformation élevées et des variations prononcées du taux de triaxialité des contraintes sont considérés dans l'alliage de titane Ti-6Al-4V. On s'intéresse ici à une modélisation unifiée rendant compte des effets combinés d'une dissymétrie importante entre traction et compression, d'un comportement orthotrope induit par le traitement thermomécanique, d'écrouissages isotrope et cinématique et de la viscoplasticité.

Mots clefs — modélisation non linéaire, plasticité anisotrope, viscoplasticité.

1. Introduction

Pour la validation d'un moteur d'avion, des essais balistiques qui simulent l'ingestion d'oiseaux ou la perte d'aube s'avèrent nécessaires. Ces chargements entraînent des grandes déformations, des vitesses de déformation élevées et des variations très prononcées du taux de triaxialité des contraintes dans les matériaux constitutifs, ce qui a un effet direct sur leur comportement et sur leur endommagement. D'autre part, du fait du régime dynamique de l'impact, les échauffements importants induits par la dissipation plastique peuvent avoir des effets sur les mécanismes de déformation et d'endommagement.

L'alliage de titane Ti-6Al-4V est considéré un candidat prometteur comme matériau de protection du bord d'attaque des aubes du fan d'un moteur d'avion. Par conséquent, une caractérisation thermomécanique de ce matériau sous conditions de chargement complexes est nécessaire. La texture de la tôle laminée induit un comportement orthotrope du matériau ainsi qu'une dissymétrie entre la traction et compression [3]. Des dispositifs par barres d'Hopkinson en compression et traction sont utilisés pour atteindre des vitesses de déformation de l'ordre de 1500 s⁻¹. Ces essais nous permettent de mesurer la sensibilité de la contrainte d'écoulement à la vitesse de déformation. De plus, pour prendre en compte les effets induits par auto échauffement, des essais à température sont réalisés pour quantifier l'adoucissement thermique de contrainte d'écoulement.

La modélisation constitutive en cours considère le modèle Cazacu et al. pour des matériaux de structure hexagonale [2] pour reproduire la dissymétrie de contrainte ainsi que le comportement orthotrope, et un modèle de type Norton pour reproduire la composante visqueuse. Une stratégie d'écrouissage isotrope et cinématique couplé est considérée s'inspirant de l'approche décrite en [1].

2. Caractérisation expérimentale

L'alliage Ti-6Al-4V est choisie dû à ses excellentes propriétés mécaniques et sa faible masse volumique. Toutefois, sa réponse à des chargements complexes pose encore question et un modèle qui prend en compte les grandes déformations, le régime dynamique, la large plage de taux de triaxialité et les échauffements inélastiques s'avère nécessaire.

Le comportement du Ti-6Al-4V de la présente étude présente trois caractéristiques principales : un écoulement dû à la texture du titane et à ses mécanismes de déformation, une forte sensibilité à la vitesse de déformation et un adoucissement dû à la température.

2.1 Dissymétrie traction-compression et orthotropie

Le comportement du Ti-6Al-4V de l'étude est marqué par une dissymétrie entre traction et compression induite par l'activation différente des systèmes de glissement et maillage [3]. En effet, la contrainte d'écoulement en compression est significativement plus élevée qu'en traction comme observé sur la Figure 1. De plus, la texture du Ti-6Al-4V issue du laminage produit une orthotropie du comportement plastique, i.e. des réponses différentes selon les directions de laminage, transverse, diagonale et normal (Figure 2). La direction transverse est la plus résistante et la normale la plus ductile. D'autres travaux ont obtenus des résultats comparables [4]

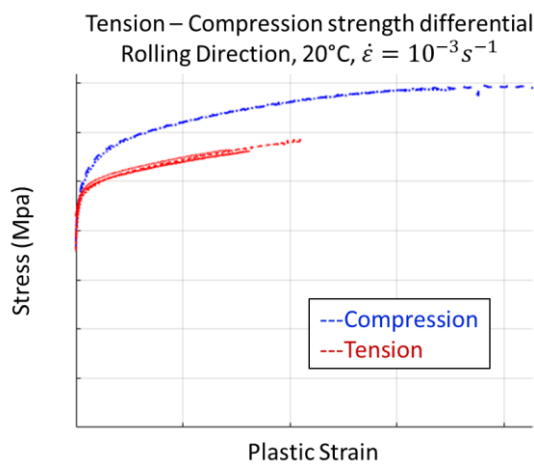


Figure 1 – Dissymétrie traction-compression

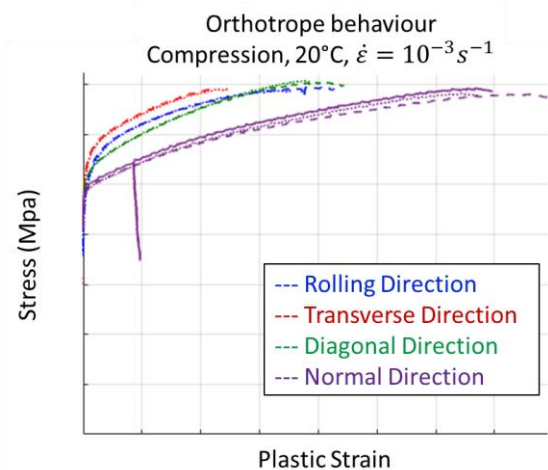


Figure 2 – Comportement orthotrope du Ti-6Al-4V

2.2 Sensibilité à la vitesse de déformation

L'alliage Ti-6Al-4V est connu pour avoir une sensibilité marquée à la vitesse de déformation dans le régime dynamique. Le dispositif de barres de Hopkinson est utilisé pour tester le matériau à des vitesses de déformation de l'ordre de 10^3 s^{-1} . La Figure 3 montre la composante visqueuse de la contrainte d'écoulement en traction en fonction de la vitesse de déformation dans le régime quasi-statique et dynamique. Une tendance linéaire dans l'échelle log-log permet de considérer une loi puissance additive de la contrainte visqueuse.

2.3 Sensibilité à la température

L'alliage Ti-6Al-4V est également connu pour avoir une sensibilité marquée à la température. Des essais quasi-statiques à différentes températures permettent de quantifier l'évolution de la contrainte avec la température, voir Figure 4. Il est donc important de prendre en compte l'adoucissement thermique dans une modélisation, en particulier dans le cas d'échauffements inélastiques produits lors des grandes déformations à haute vitesse.

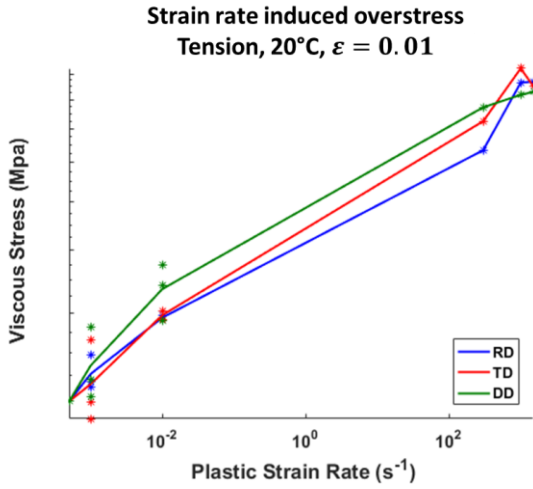


Figure 3 – Composante visqueuse de la contrainte en traction

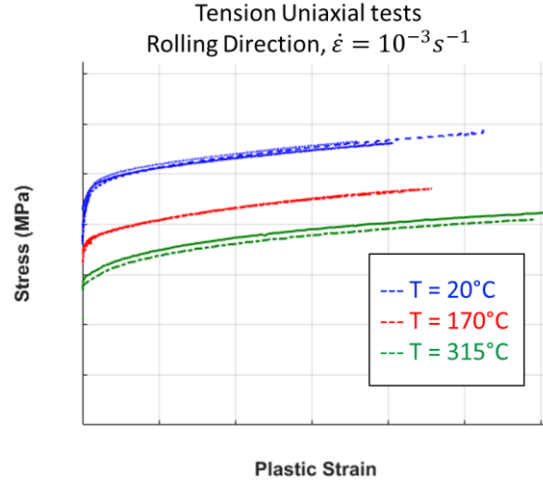


Figure 4 – Sensibilité à la température

3. Modélisation

Le modèle développé pour prendre en compte le comportement observé lors de la caractérisation expérimentale est détaillé ci-dessous, suivi par une identification du jeu des constantes.

3.1. Proposition de modèle

Afin de rendre compte de l'anisotropie et de la dissymétrie entre traction et compression, le modèle de Cazacu [2] est retenu. Une loi viscoplastique est ajoutée à la définition du potentiel plastique pour reproduire la sensibilité du matériau à la vitesse de déformation. Finalement, un écrouissage mixte isotrope et cinématique est considéré pour s'approcher au mieux des résultats expérimentaux. La sensibilité à la température se fait provisoirement par interpolation du modèle à plusieurs points de température. Dans le cadre de la viscoplasticité associée, l'équation de la surface de charge s'écrit

$$F\left(\underline{\underline{\sigma}}, R, \underline{\underline{X}}, \underline{\underline{H}}; \dots\right) = \sigma_{eq}\left(\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{X}}, \underline{\underline{H}}; \dots\right) - \sigma_y(R(T, \varepsilon^p); \dots) = \sigma_v(\underline{\underline{H}}, T, \varepsilon^p, \dot{\varepsilon}^p; \dots) \geq 0 \quad (1)$$

où σ_{eq} représente la contrainte équivalente, σ_y la contribution indépendante du temps de la contrainte d'écoulement et σ_v la contrainte visqueuse ; σ représente le tenseur des contraintes de Cauchy, R et X les forces d'écrouissage isotrope et cinématique, et H le tenseur d'anisotropie d'ordre 4 ; ε_p représente la déformation plastique cumulée et son dérivée la vitesse de déformation plastique cumulée, et T la température. A partir de l'équation, on peut encore écrire :

$$\sigma_{eq} = \sigma_y + \sigma_v \quad (2)$$

3.1.1 Définition de contrainte équivalente

Le critère de Cazacu (équation 3) propose une définition de la contrainte équivalente en fonction des valeurs propres (S_1, S_2, S_3) du tenseur déviateur des contraintes S ($\underline{\underline{S}} = \underline{\underline{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}}) \underline{\underline{I}}$ où $\underline{\underline{I}}$ le tenseur identité) :

$$\sigma_{\text{eq}}^a = (|S_1| - kS_1)^a + (|S_2| - kS_2)^a + (|S_3| - kS_3)^a \quad (3)$$

La définition de la contrainte équivalente de Cazacu (3) permet la modélisation d'une dissymétrie entre la traction et la compression qui est contrôlée par un paramètre k et un paramètre de forme a (une valeur nulle de k et la valeur 2 pour a correspondent à la contrainte de von Mises). De plus, pour décrire le comportement orthotrope, une transformation linéaire du tenseur déviateur avec un tenseur d'anisotropie $\underline{\underline{A}}$ peut se faire pour élargir les conditions du critère.

$$\underline{\underline{\Sigma}} = \underline{\underline{A}} \underline{\underline{S}} \quad (4)$$

L'expression finale de la contrainte équivalente de Cazacu [2] s'écrit ainsi :

$$\sigma_{\text{eq}}^a = (|\Sigma_1| - k\Sigma_1)^a + (|\Sigma_2| - k\Sigma_2)^a + (|\Sigma_3| - k\Sigma_3)^a \quad (5)$$

3.1.1 Comportement viscoplastique

La dépendance linéaire de la contrainte visqueuse à la vitesse de déformation en échelle logarithmique suggère une loi puissance simple comme dans l'équation (6) où seulement deux constantes λ et N sont nécessaires.

$$\sigma_v = \lambda \dot{\varepsilon}^{1/N} \quad (6)$$

3.1.2 Stratégie d'écrouissage

Des essais de traction-compression alternés ont montré un effet important de l'écrouissage cinématique. Le modèle d'écrouissage isotrope et cinématique couplé proposé par Carbonnière et al. [1] permet bien reproduire les essais. Cette stratégie implique deux lois cinématiques non linéaires X_m et X_s et un écrouissage isotrope non linéaire R de type Voce :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{X}_m = \frac{C_m}{\sigma_{\text{eq}}} (\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{X}})^{\dot{\varepsilon}^p} - \gamma_m \dot{\varepsilon}^p X_m \\ \dot{X}_s = \frac{C_s}{\sigma_{\text{eq}}} (\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{X}})^{\dot{\varepsilon}^p} - \gamma_s \dot{\varepsilon}^p X_s \\ R = \sigma_0 + Q(1 - \exp(-b\varepsilon^p)) - \frac{C_s}{\gamma_s} (1 - \exp(-\gamma_s \varepsilon^p)) \end{array} \right. \quad (7)$$

où $C_m, \gamma_m, C_s, \gamma_s, \sigma_0, Q, b$ sont des constantes.

3.2. Identification

La définition de la contrainte équivalente de Cazacu requiert 11 paramètres, celle de la contrainte visqueuse 2 paramètres, et les écrouissages isotrope et cinématique 7 paramètres, soit un total de 20 paramètres. Une stratégie d'identification inverse est appliquée pour trouver le jeu de paramètres optimal.

Une première étape considère des essais uniaxiaux quasi statiques à température ambiante sous plusieurs directions pour l'identification du comportement orthotrope. La figure 5 montre de manière satisfaisant la possibilité de reproduire une anisotropie avec une dissymétrie traction-compression.

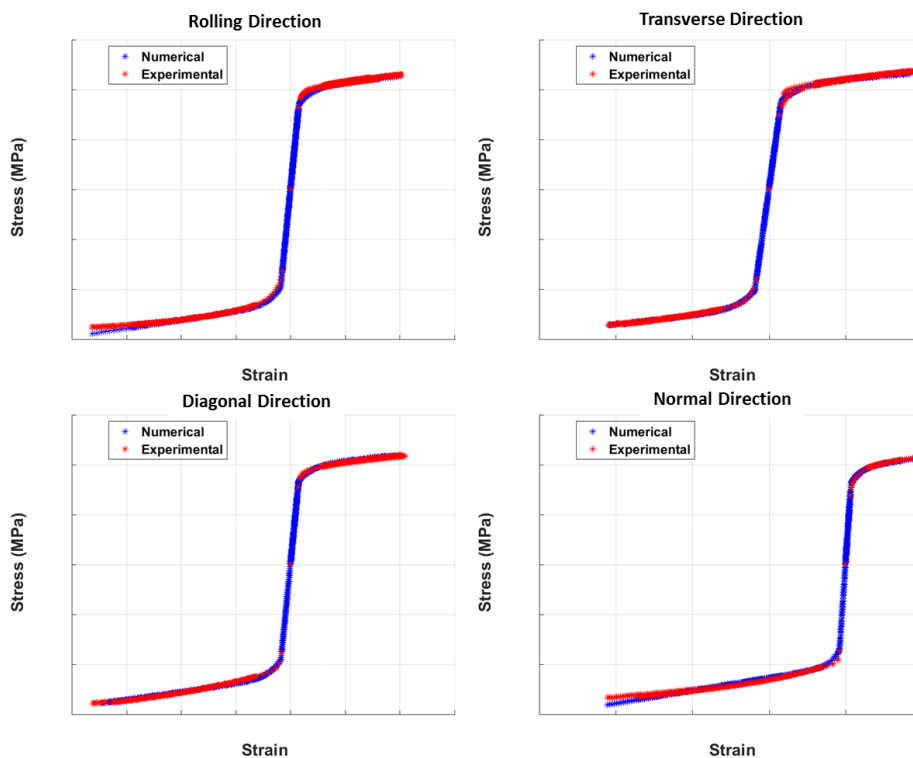


Figure 5 – Identification de l'anisotropie du Ti-6Al-4V en régime quasi statique et température ambiante

Une deuxième étape est l'identification de l'écrouissage couplé isotrope et cinématique. En fixant les paramètres qui définissent l'anisotropie montrée ci-dessus, les 7 coefficients d'écrouissage peuvent être identifiés. La Figure 6 montre la possibilité de bien reproduire l'inversion du chargement.

Dans une troisième étape, la composante visqueuse peut être identifiée de façon similaire. Plusieurs vitesses de déformation sont considérées afin de reproduire au mieux la sensibilité à la vitesse de déformation (Figure 7).

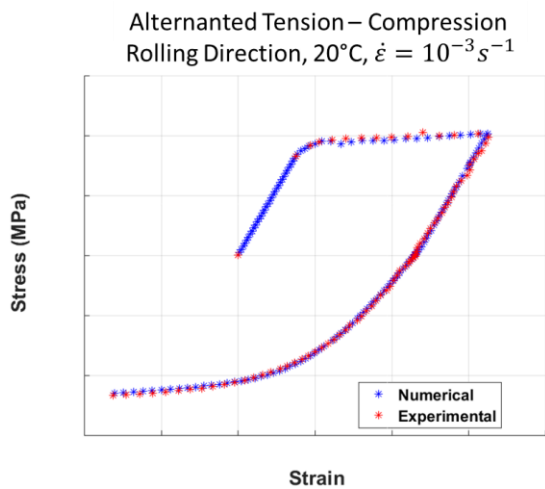


Figure 6 – Identification de l'écroutissage du Ti-6Al-4V en régime quasi statique et température

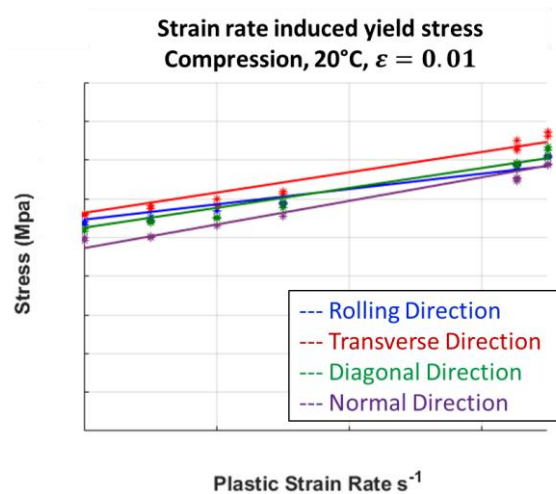


Figure 7 – Identification de la sensibilité à la vitesse de déformation

4. Conclusions

Un modèle orthotrope viscoplastique est développé pour l'alliage aéronautique Ti-6Al-4V afin d'élargir son champ d'applications à des chargements complexes invoquant de grandes déformations, de hautes vitesses de déformation, des échauffements et des variations significatives du taux de triaxialité des contraintes.

Le modèle développé combine plusieurs approches. Il utilise la définition de la contrainte équivalente proposée par Cazacu et destinée à reproduire la dissymétrie entre la traction et la compression liée aux différents mécanismes de déformation activés lors de la déformation et le comportement orthotrope typique d'un matériau fortement texturé. Il s'applique au régime dynamique avec une contrainte visqueuse. Il considère enfin un écroutissage isotrope et cinématique couplé qui permet de rendre des inversions du chargement en sollicitation réelle. Ce modèle est interpolé à plusieurs températures pour prendre en compte les échauffements induits par la dissipation plastique qui pourraient se produire dans le matériau constitutif en conditions adiabatiques.

Références

- [1] J. Carbonnière, S. Thuillier, F. Sabourin, M. Brunet, and P. Y. Manach, "Comparison of the work hardening of metallic sheets in bending-unbending and simple shear," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 51, no. 2, pp. 122–130, 2009.
- [2] O. Cazacu, B. Plunkett, and F. Barlat, "Orthotropic yield criterion for hexagonal closed packed metals," *Int. J. Plast.*, vol. 22, no. 7, pp. 1171–1194, 2006.
- [3] M. A. W. Lowden and W. B. Hutchinson, "Texture strengthening and strength differential in titanium-6Al-4V," *Metall. Trans. A*, vol. 6, no. 2, pp. 441–448, 1975.
- [4] V. Tuninetti, G. Gilles, O. Milis, T. Pardoën, and A. M. Habraken, "Anisotropy and tension-compression asymmetry modeling of the room temperature plastic response of Ti-6Al-4V," *Int. J. Plast.*, vol. 67, pp. 53–68, Apr. 2015.