

# Identification d'un modèle orthotrope viscoplastique de comportement de l'alliage aéronautique Ti-6Al-4V

**M. Ruiz de Sotto<sup>a,b,c</sup>, P. Longère<sup>a</sup>, V. Doquet<sup>b</sup>, J. Papasidero<sup>c</sup>**

- a. Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, Institut Clément Ader, Toulouse, France  
[Miguel.ruiz-de-sotto@isae-supaeero.fr](mailto:Miguel.ruiz-de-sotto@isae-supaeero.fr), [patrice.longere@isae-supaeero.fr](mailto:patrice.longere@isae-supaeero.fr)
- b. Laboratoire de Mécanique des Solides, CNRS UMR 7649, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France  
[doquet@lms.polytechnique.fr](mailto:doquet@lms.polytechnique.fr)
- c. Safran Aircraft Engines, Moissy-Cramayel, France  
[Jessica.papasidero@safrangroup.com](mailto:Jessica.papasidero@safrangroup.com)

**Mots clés :** orthotrope ; dynamique ; triaxialité ; SHPB

## Résumé

*Pour la validation d'un moteur d'avion, des essais balistiques qui simulent l'ingestion d'oiseaux 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. L'alliage de titane Ti-6Al-4V est considéré comme un candidat prometteur pour la protection du bord d'attaque des aubes du fan. Par conséquent, une caractérisation thermomécanique d'une tôle laminée de cet alliage est menée sur une large gamme de conditions de chargement. Une dissymétrie importante entre la traction et la compression est mise en évidence comme le résultat des différents mécanismes de maclage et de glissements [1]. En outre, la texture de la tôle laminée induit un comportement orthotrope du matériau. Des essais uniaxiaux dans les régimes quasi-statique et dynamique ont permis d'évaluer la sensibilité de la contrainte d'écoulement à la vitesse de déformation. De plus, pour identifier les effets de la température initiale et de l'échauffement dans le régime dynamique, des essais à différentes températures sont réalisés. Finalement, des essais de traction-compression alternées permettent d'identifier les écrouissage isotrope et cinématique. La loi de comportement formulée combine le modèle de Cazacu et al. [2] pour des matériaux de structure hexagonale pour reproduire la dissymétrie de contrainte ainsi que le comportement orthotrope et un modèle de type Norton pour reproduire la composante visqueuse. Une stratégie couplant écrouissage isotrope et cinématique est considérée, en s'inspirant de l'approche décrite en [3].*

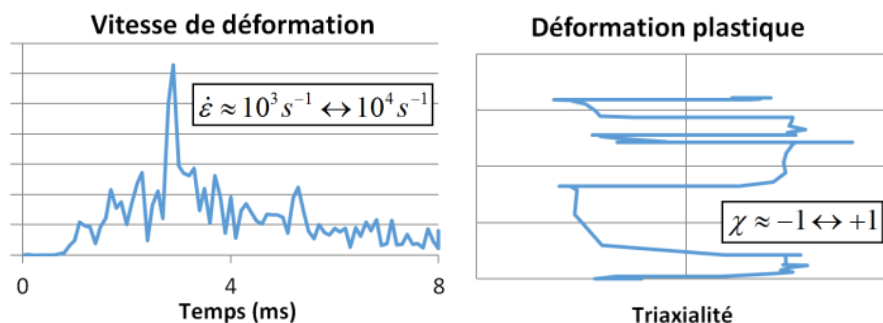
## 1. Introduction

L'utilisation de matériaux légers devient de plus en plus nécessaire pour l'amélioration de la performance des moteurs aéronautiques. La certification du moteur impose en parallèle une bonne tenue face aux événements balistiques tels que l'ingestion d'oiseaux, la perte de pales, etc. Pour alléger la structure, les aubes du fan du moteur peuvent ainsi être conçues en matériau tissé composite. Néanmoins, compte tenu de la mauvaise résistance à l'impact des matériaux tissés composites, le bord d'attaque doit donc être renforcé par un matériau ayant une bonne tenue à

l'impact. Un bon candidat pour le renforcement du bord d'attaque des aubes du fan est l'alliage de titane Ti-6Al-4V.

En général, de nombreux essais expérimentaux en grandeur réelle sont faits pour la conception du fan. Cependant, pour réduire le coût et la durée de ces essais, on a de plus en plus recouru à la simulation numérique par éléments finis. Des modèles constitutifs fiables doivent alors être implantés dans les codes de calcul pour arriver à reproduire l'ingestion d'oiseaux. Ceci impose préalablement une caractérisation expérimentale approfondie des matériaux constitutifs, à savoir l'alliage de titane Ti-6Al-4V ici, sous des conditions proches des conditions réelles.

A partir des simulations initiales des événements balistiques, on peut estimer les conditions de chargement imposées au matériau du bord d'attaque. La Figure 1 montre qu'une gamme assez étendue de vitesses de déformation plastiques pouvant aller jusqu'à  $10^4 \text{ s}^{-1}$  est observés lors de l'impact. De plus, le chemin de chargement est fortement non proportionnel avec des valeurs de taux de triaxialités des contraintes élevées et alternant des valeurs positives et négatives.



**Figure 1.** Conditions d'impact dans le bord d'attaque.

Les résultats issus de la simulation numérique offre des pistes pour la conception d'une campagne expérimentale. En effet, des essais dans les régimes quasi-statique et dynamique sont prévus pour identifier la sensibilité du matériau à la vitesse de déformation. D'autre part, des essais de traction, compression et traction-compression alternés serviront à la définition d'un critère de plasticité adapté à ce type de sollicitation. Des essais à différentes températures sont aussi considérés à cause des échauffements qui peuvent se produire lors de chargements rapides. Finalement, le matériau étant livré sous la forme d'une tôle laminée, son orthotropie sera quantifiée.

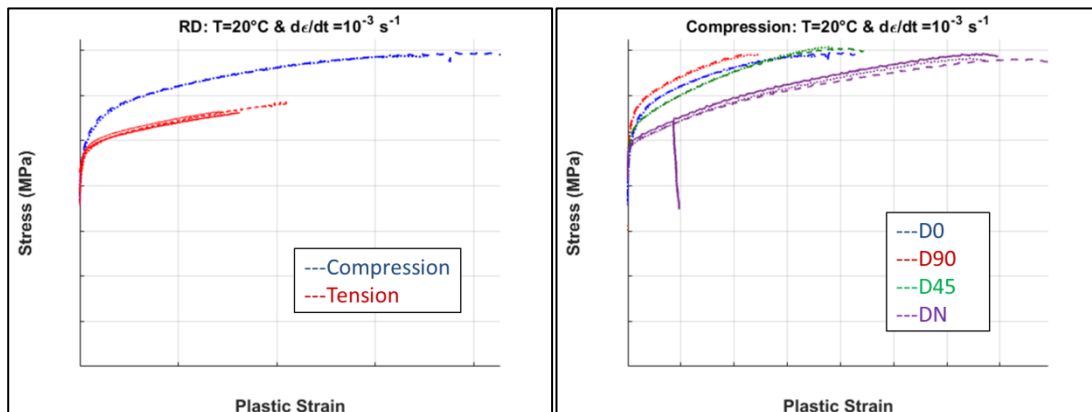
## 2. Caractérisation expérimentale

Une campagne expérimentale importante a été menée sur un alliage de titane Ti-6Al-4V livré sous la forme d'une tôle laminée pour rendre compte des effets combinés de l'écroutissage, de la vitesse, de la température, du trajet de chargement et du sens de prélèvement.

### 2.1 Régime quasi-statique

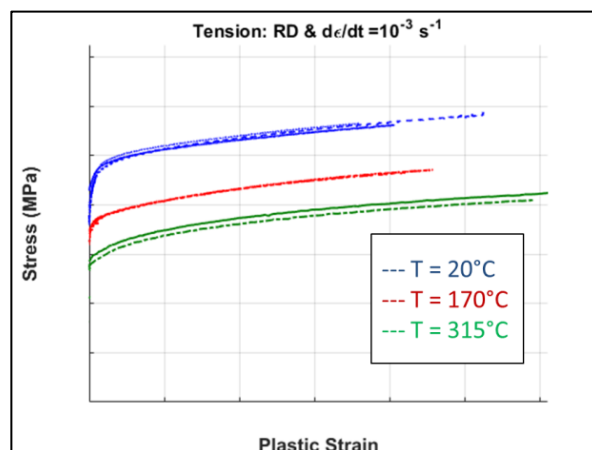
Des essais avec des vitesses de déformation de l'ordre de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  sont réalisés en traction et compression sur des éprouvettes prélevées dans plusieurs directions de la tôle laminée, voir Figure 2. Un premier constat est que la contrainte d'écoulement en compression est significativement plus élevée qu'en traction. Une activation de différents mécanismes de déformation (maclage et glissement) peut expliquer ce comportement [1]. En outre, la tôle laminée montre un comportement

orthotrope avec une résistance plus élevée selon la direction transverse et plus faible selon la direction normale qui est de fait la plus ductile.



**Figure 2.** Dissymétrie traction-compression (gauche) et orthotropie (droite).

Ces essais quasi-statiques ont été répétés à plusieurs températures pour quantifier l’adoucissement thermique, voir Figure 3. Ces données seront utilisées ultérieurement pour reproduire les conséquences de l’auto-échauffement plastique sous chargement rapide.



**Figure 3.** Adoucissement thermique.

## 2.2 Regime dynamique

Les dispositifs d’essais rapides par barres d’Hopkinson sont largement utilisés pour étudier le comportement des matériaux à des vitesses de déformation élevées. Dans le principe, l’échantillon du matériau à tester est fixé entre deux barres, d’entrée et de sortie. Une onde de contrainte est générée dans la barre d’entrée par impact au moyen d’un projectile. Cette onde de contrainte incidente traverse en partie l’échantillon et est donc transmise en partie dans la barre de sortie, tandis que l’autre partie de l’onde incidente est réfléchiée dans la barre d’entrée. Moyennant certaines hypothèses, la connaissance de la déformation des barres au passage des ondes incidente, réfléchiée et transmise permet d’accéder à la contrainte et à la déformation de l’échantillon. Dans le cas présent, les vitesses atteintes varient entre 300 et 1500 s<sup>-1</sup>. La Figure 4 montre les montages par barres d’Hopkinson utilisés pour la compression (Institut Clément Ader, Toulouse) et la traction (Laboratoire Mécanique de Solides, Palaiseau).

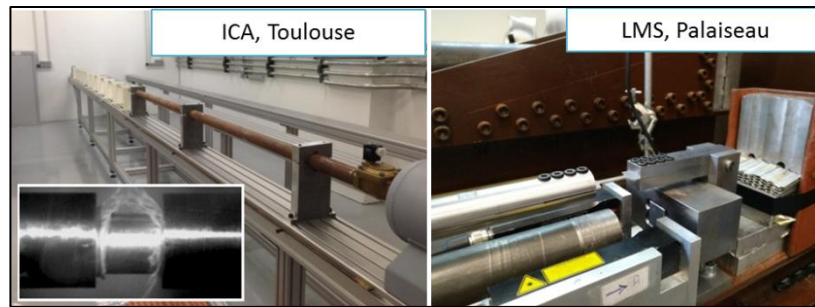


Figure 4. Système de compression (à gauche) et traction (à droite).

Les résultats des essais de traction à grande vitesse mettent en évidence une forte sensibilité à la vitesse de déformation, voir Figure 5. Un constat similaire est fait à partir des résultats des essais de compression. Il est important de noter que la dissymétrie traction-compression observée dans le régime quasi statique, voir Figure 2, est maintenue dans le régime dynamique.

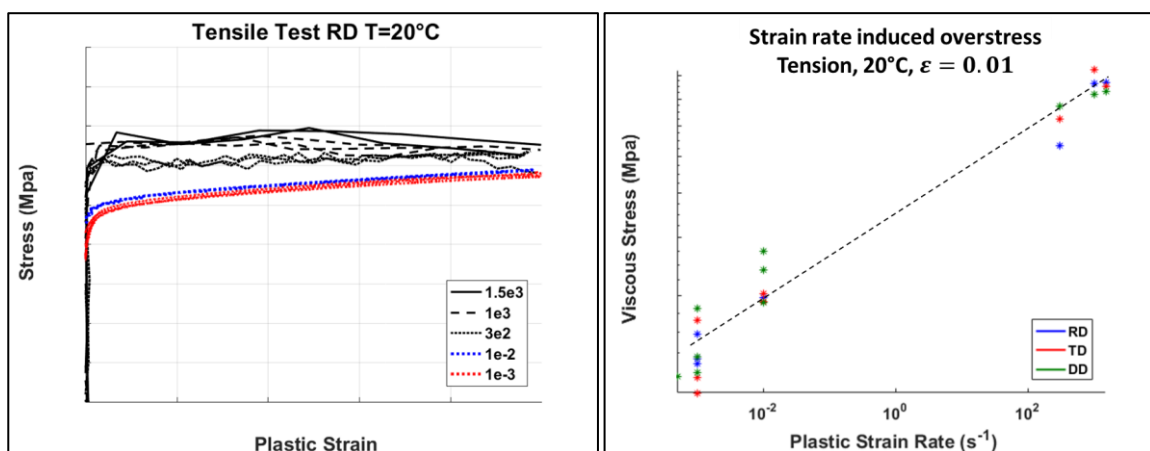


Figure 5. Effet de la vitesse de déformation (traction).

### 3. Modélisation et calibration

A partir des données extraites de la campagne expérimentale résumée dans le chapitre précédent, une modélisation est débutée. Quatre effets sont à reproduire :

- distorsion de la surface de charge induite par la dissymétrie traction-compression et le comportement orthotrope
- écrouissages isotrope et cinématique à considérer pour bien prédire les chargements non proportionnels des simulations de l'ingestion d'oiseaux
- forte dépendance du comportement à la vitesse ou viscoplasticité
- fort adoucissement thermique

L'adoucissement thermique n'est provisoirement pas pris en compte.

On cherche ici à reproduire d'une part les effets combinés de l'anisotropie et de la dissymétrie traction-compression et d'autre part les effets combinés de l'écrouissage et de la viscoplasticité. Le travail suivant consistera à reproduire tous ces effets dans un modèle couplé unifié.

La suite logicielle Zset est utilisée pour calibrer les constantes matériau.

### 3.1 Distorsion de la surface de charge

Le modèle de Cazacu [2] implanté par défaut dans Zset est utilisé pour reproduire les effets combinés de l'orthotropie initiale et de la différence traction-compression. Le critère détaillé dans l'équation (1) est fonction des valeurs principales du tenseur déviateur des contraintes et des paramètres de dissymétrie et forme  $k$  et  $a$  respectivement.

$$\sigma_{eq} = ((|S_1| - kS_1)^a + (|S_2| - kS_2)^a + (|S_3| - kS_3)^a)^{1/a} \quad (1)$$

Afin de rajouter le comportement orthotrope, une transformation linéaire du tenseur déviateur est faite

$$\underline{\underline{\Sigma}} = \underline{\underline{A}} \underline{\underline{S}} \quad (2)$$

Finalement, le critère de Cazacu à considérer est

$$\sigma_{eq} = ((|\Sigma_1| - k\Sigma_1)^a + (|\Sigma_2| - k\Sigma_2)^a + (|\Sigma_3| - k\Sigma_3)^a)^{1/a} \quad (3)$$

Une identification des constantes est réalisée avec Z-set pour vérifier la pertinence du modèle utilisé par rapport aux essais expérimentaux, voir Figure 6.

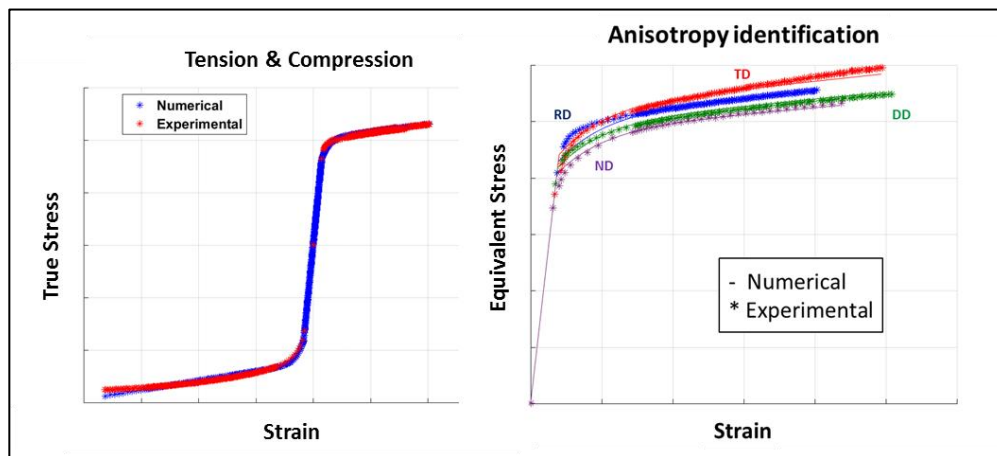


Figure 6. Vérification du modèle utilisé pour la distorsion de la surface de charge.

### 3.2 Ecrouissage et viscoplasticité

Une stratégie d'écrouissage isotrope et cinématique couplé est considéré basé sur les travaux de Carbonnière et al [3]. Cette définition d'écrouissage permet de bien modéliser les retours en plasticité lors de chargements non proportionnels.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\underline{X}}_m = \frac{c_m}{\sigma_{eq}} (\underline{\sigma} - \underline{X}) \dot{\varepsilon}^p - \gamma_m \dot{\varepsilon}^p \underline{X}_m \\ \dot{\underline{X}}_s = \frac{c_s}{\sigma_{eq}} (\underline{\sigma} - \underline{X}) \dot{\varepsilon}^p - \gamma_s \dot{\varepsilon}^p \underline{X}_s \\ R = \sigma_0 + Q(1 - \exp(-b\varepsilon^p)) - \frac{c_s}{\gamma_s} (1 - \exp(-\gamma_s \varepsilon^p)) \end{array} \right. \quad (4)$$

Finalement, une loi Norton est utilisée pour modéliser le comportement viscoplastique du matériau. Donc, une loi puissance est considérée :

$$\sigma_v = \lambda \dot{\varepsilon}^{1/N} \quad (5)$$

Les modèles (4) et (5) ont été implantés dans Zset et les résultats de l'identification montrent un bon accord entre les simulations et les essais expérimentaux, voir Figure 7.

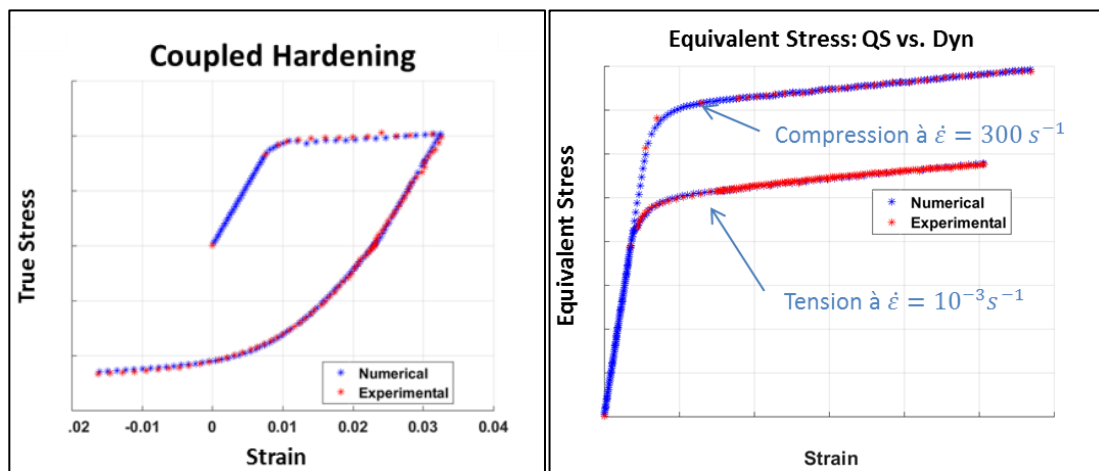


Figure 7. Identification de l'écroutissage et composant visqueuse.

## 4. Conclusion

Une caractérisation expérimentale d'une tôle laminée d'une nuance d'alliage de titane Ti-6Al-4V a été réalisée dans une large gamme de vitesses de déformation, de températures, de taux de triaxialité et d'orientation. Une forte dissymétrie entre la traction et la compression ainsi qu'une orthotropie est observée. En plus, une sensibilité importante à la température et la vitesse de déformation doit être considérée. Un modèle a été proposé où la distorsion de surface est décrite par le modèle de Cazacu et l'écroutissage est basé sur les travaux de Carbonnière. En outre, une loi viscoplastique est ajoutée pour prendre en compte les effets viscoplastiques.

## Références

- [1] 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.
- [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] 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.