



**HAL**  
open science

## Développement d'un modèle rhéologique de fluage-relaxation de l'aluminium 7050 pour le formage au revenu de panneaux de voilure

Guy Sola, Gilles Surdon, Yvan Chastel, André Pineau

### ► To cite this version:

Guy Sola, Gilles Surdon, Yvan Chastel, André Pineau. Développement d'un modèle rhéologique de fluage-relaxation de l'aluminium 7050 pour le formage au revenu de panneaux de voilure. 9e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01413788

**HAL Id: hal-01413788**

**<https://hal.science/hal-01413788>**

Submitted on 11 Dec 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

# Développement d'un modèle rhéologique de fluage-relaxation de l'aluminium 7050 pour le formage au revenu de panneaux de voilure

G.Sola<sup>1</sup>, G.Surdon<sup>1</sup>, Y. Chastel<sup>2</sup>, A. Pineau<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DASSAULT-AVIATION  
1 av. du Parc, 95100 Argenteuil  
[guy.sola@dassault-aviation.fr](mailto:guy.sola@dassault-aviation.fr) [gilles.surdon@dassault-aviation.fr](mailto:gilles.surdon@dassault-aviation.fr)

<sup>2</sup> Mines ParisTech  
BP207 06904 Sophia Antipolis Cedex  
[yvan.chastel@ensmp.fr](mailto:yvan.chastel@ensmp.fr) [andre.pineau@ensmp.fr](mailto:andre.pineau@ensmp.fr)

---

**Résumé** – La fabrication de panneaux de voilure d'avion d'affaire a demandé la mise en œuvre d'un procédé de formage au revenu de l'alliage d'aluminium 7050W51. Ce formage consiste à déformer le panneau à l'aide d'un outillage, et d'appliquer à ce panneau sous contrainte le cycle thermique de revenu, pour obtenir un matériau à l'état métallurgique T7651. Afin de simuler ce procédé, un modèle de comportement de cet alliage a été établi en tenant compte des transformations métallurgiques de précipitation opérées lors du traitement de revenu.

**Mots clés** – Formage au revenu – Rhéologie – Fluage Relaxation

---

## 1 Introduction

### 1.1 Problématique

Le caisson de voilure de l'avion d'affaire F7X (figure 1) comporte un grand panneau à l'extrados dont les dimensions en longueur, épaisseur, mais surtout largeur ne permettent pas de le mettre en forme uniquement par les techniques de chaudronnerie habituelles de formage au maillet, à la presse ou par grenailage. Les panneaux de voilure ont également une spécificité d'être à structure intégrée, c'est-à-dire que les raidisseurs, la zone de liaison au fuselage, et la peau aérodynamique sont issus d'un seul bloc d'alliage d'aluminium 7050 usiné dans la masse (figure 2).

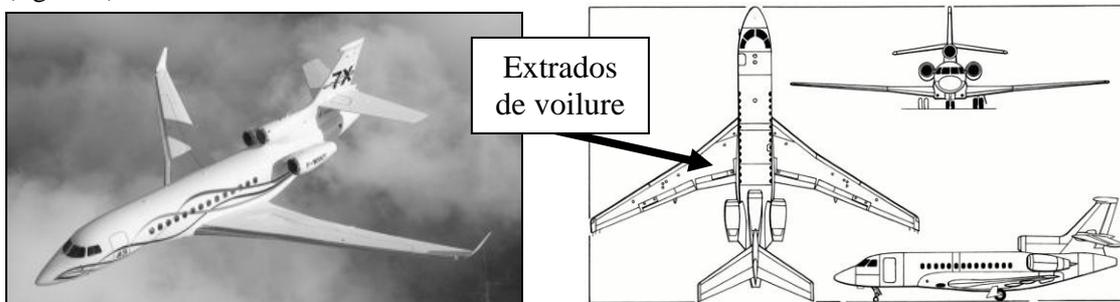


Figure 1 - Différentes vues du Falcon F7X



Figure 2 – Panneau extrados arrière F7X usiné à plat

Ainsi, le formage d'un tel panneau n'a été possible que par la mise en œuvre du procédé de formage au revenu. Cette technique, déjà utilisée par Textron ou Airbus pour des panneaux de voilure, vise à mettre à profit le cycle de traitement thermique de revenu de l'alliage d'aluminium, pour mettre la pièce sous contrainte en température [4, 8, 9]. En fin de revenu la pièce est libérée de ces contraintes et une déformée résiduelle est obtenue. Or, le retour élastique lors du démoulage de la pièce est suffisamment important pour rendre la géométrie de bridage, c'est-à-dire la géométrie outillage, significativement éloignée de la géométrie finale exigée. C'est pourquoi la forme outillage est déterminée par calcul. Ce dernier est fondé sur la simulation numérique du formage au revenu du panneau de voilure. Un tel calcul présente une forte non-linéarité de géométrie et de comportement. C'est la modélisation du comportement du 7050 qui est l'objet de notre étude. Un premier modèle de comportement a été établi grâce à une analyse macroscopique du comportement en fluage-relaxation. Ce modèle, globalement satisfaisant, a néanmoins montré des insuffisances. En particulier, il ne permet pas de restituer à la fois le comportement en haut niveau de déformation imposée ( $>1\%$ ) et en bas niveau ( $<0.3\%$ ).

Une deuxième étape a visé la prise en compte des phénomènes métallurgiques qui interviennent significativement lors du formage au revenu et qui influent sur la géométrie finale des pièces avion, avec en particulier une déformation irréversible de rétreint, dite de changement de volume, entre l'état initial W51 et l'état final T7651. Ce modèle dit de « fluage-relaxation à seuil » est détaillé dans la suite.

## 1.2 Le procédé de formage au revenu

Le panneau de voilure extrados arrière est usiné à plat dans une tôle forte de 70 mm d'épaisseur en 7050W51. Ce panneau est placé dans un outillage de type forme et contre forme, ou bien sur un simple sommier et sous une vessie dans le cas d'un formage par la pression d'un autoclave. Dans notre cas l'outillage est fermé à l'aide de vérins pour un total de plusieurs centaines de Tonne-force. Le panneau bridé dans son outillage subit le cycle thermique de double revenu, un premier revenu pour passer de l'état W51 à l'état T651 et un second revenu pour obtenir l'état métallurgique requis, le T7651. Après refroidissement le panneau est débridé, quelques retouches sont effectuées pour parfaire la géométrie, et il est livré pour assemblage après contrôle, détourage et protection anticorrosion. La figure 3 présente une schématisation du processus de déformation combinée au cycle de traitement thermique.

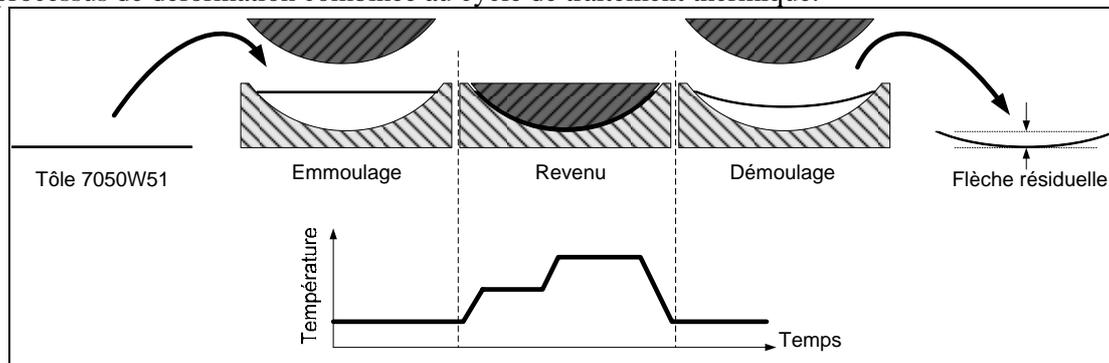


Figure 3 – Formage au revenu : déformation imposée durant le traitement thermique

Le formage au revenu présente plusieurs avancées par rapport aux techniques traditionnelles :

- Reproductibilité.
- Maîtrise des déformations irréversibles et donc des contraintes internes.
- Réduction des cycles de fabrication en groupant le formage et le traitement thermique de revenu.
- Réduction des coûts de fabrication.

En contrepartie ce procédé requiert un outillage pour imposer une déformation à la pièce en vue de lui conférer la géométrie finale exigée, après retour élastique lors de la libération de l'outillage. Ce retour élastique est de grande amplitude, cela implique que la géométrie de l'outillage est significativement différente de la géométrie finale de la pièce. Des abaques ou des calculs rustiques peuvent permettre de déterminer la géométrie outillage pour des pièces simples, mais dans le cas de pièces complexes, en particulier notre pièce à structure intégrée, c'est un calcul thermo-mécanique qui a donné la géométrie de l'outillage de formage du panneau de voilure extradors arrière.

### 1.3 L'alliage d'aluminium 7050

L'alliage d'aluminium 7050 a été choisi pour ses hautes caractéristiques mécaniques de limite d'élasticité, son bon comportement en fatigue et en corrosion. Ce compromis est obtenu à l'état métallurgique T7651. L'état W51 est un état moins « dur », il est consécutif à une mise en solution solide suivie d'une trempe et d'une traction contrôlée. L'état T651 est obtenu après un premier revenu à 125°C, et l'état T7651 après un deuxième revenu à 169°C. Le tableau 1 suivant donne la composition chimique de l'alliage.

Élément	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Zr	Ti	Cr
Proportion massique	5,7-6,7	1,9-2,6	2,0-2,6	0,15	0,12	0,1	0,08-0,15	0,06	0,04

Tableau 1 : Composition de l'alliage 7050

Les effets des différents revenus et les précipités ainsi formés sont connus dans le cas de l'alliage 7050. Ce sont des transformations avec précipitation. Les zones de Guinier-Preston sont des disques de l'ordre de 10 nm de diamètre et de 1 nm d'épaisseur, cohérents avec la matrice, mais de composition plus riche en cuivre. Ces zones de GP sont dissoutes et remplacées lors du premier revenu (réversion à  $T > 75^\circ\text{C}$ ) par une phase  $\eta'$ , métastable (précipité de transition).  $\eta'$  évolue (à  $120^\circ\text{C} < T < 135^\circ\text{C}$ ) en un précipité d'équilibre  $\eta$ , phase principale ( $\text{Mg}(\text{ZnAlCu})_2$ , de quelques microns à quelques dizaines de microns). En ce qui concerne la compacité des phases en présence, on retiendra que  $\eta$  est plus compacte que  $\eta'$ , elle-même plus compacte que les zones de GP.

A défaut d'une augmentation du module d'élasticité, cette transformation de phase conduit à une augmentation de la dureté, de la limite d'élasticité et à un changement de volume. Ce changement de volume sera repris pour la modélisation sous forme d'un allongement négatif.

## 2 Modèle de fluage-relaxation à seuil

Deux idées gouvernent l'établissement de ce nouveau modèle de comportement.

La première traduit le fait que, lors des différents traitements de revenu, des précipités apparaissent (GP,  $\eta'$ ), puis disparaissent pour laisser place à des précipités différents ( $\eta$ ). Or, les précipités bloquent les dislocations dont le mouvement est à l'origine des déformations irréversibles. Donc la disparition de précipités explique les déplacements importants des dislocations [1, 2, 3, 6, 7], et une déformation 'résiduelle' dite de fluage – relaxation. Le modèle rhéologique s'appuie donc sur la théorie des dislocations ainsi que sur la cinétique de précipitation dans l'alliage d'aluminium 7050.

La seconde idée suppose l'existence d'une contrainte seuil. En pratique on constate qu'une contrainte relaxée va tendre vers une valeur asymptotique. En outre, il existe des contraintes qui ne se relaxent pas. On introduit alors le concept de contrainte seuil. Cette contrainte seuil est strictement positive, et fonction uniquement de la contrainte initiale en début de relaxation. Le signe de la fonction seuil est directement lié au rétreint métallurgique évoqué plus haut.

Partant d'un potentiel viscoplastique et introduisant une contrainte seuil, il a été montré [5] que la vitesse de déformation inélastique peut se mettre sous la forme :

$$\dot{\varepsilon}_{inélastique} = -2B(1-\nu^2) \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \left( \sinh\left(-\frac{bA}{kT}(\sigma - \sigma_s)\right) - \frac{\nu}{1-\nu} \sinh\left(-\frac{bA}{kT}\sigma_{so}\right) \right) \quad (1)$$

avec :

$\dot{\varepsilon}_{inélastique}$  vitesse de déformation inélastique dans la direction principale « i »,

$\sigma$  contrainte dans la direction principale « i »,

$\sigma_s$  seuil de contrainte local au point considéré dans la direction principale « i »,

$\sigma_{so}$  seuil de contrainte correspondant à une contrainte appliquée nulle

A valeur moyenne de l'aire balayée par les dislocations (caractéristique du matériau et du procédé),

B coefficient d'amplitude de la vitesse de fluage (caractéristique du matériau et du procédé),

b constante de Burgers,

k constante de Boltzmann,

Q énergie d'activation, ou énergie d'autodiffusion dans l'aluminium.

Ce modèle a été programmé en fortran dans une routine utilisateur UMAT du logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS.

D'autre part, on peut effectuer des calculs simples en 1D en écrivant la formulation (1) sous la forme d'une équation différentielle du 1<sup>er</sup> ordre résolue en  $\dot{\sigma}$ . Dans le cas d'une relaxation à déformation totale imposée :

$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_{inélastique} = \text{constante, donc } \dot{\varepsilon}_{inélastique} = -\dot{\varepsilon}_e = -\dot{\sigma} / E$$

$$\dot{\sigma} = 2EB(1-\nu^2) \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \left( \sinh\left(-\frac{bA}{kT}(\sigma - \sigma_s)\right) - \frac{\nu}{1-\nu} \sinh\left(-\frac{bA}{kT}\sigma_{so}\right) \right) \quad (2)$$

### 3 Résultats

Une base expérimentale a été constituée pour couvrir les différents niveaux de déformation imposée lors du formage d'un panneau de voilure. Les essais canoniques reprennent 3 rayons de formage (500, 3000 et 7000 mm) pour 4 épaisseurs présentes sur le panneau (4, 6, 10 et 52 mm). Le paramètre exploité sur ces essais est la flèche de la tôle après formage au revenu.

Sur la base de ces essais canoniques, une optimisation des différents paramètres de la rhéologie a été effectuée par une méthode de type PSO (particule swarm optimisation) bien adaptée à une problématique comportant une multitude de minima locaux. Les coefficients déterminés de la sorte sont cohérents avec les grandeurs physiques attendues pour un alliage d'aluminium (valeurs des paramètres A et B), et la contrainte seuil fonction de la contrainte initiale prend un profil monotone, comme le montre la figure 4.

La figure 5, qui donne la vitesse de déformation inélastique initiale en fonction de la contrainte initiale, indique que la prise en compte du changement de volume métallurgique du 7050 lors du revenu est dans le sens du rétreint. En effet, sous des contraintes *positives*, jusqu'à 213MPa, la vitesse de déformation irréversible négative engendre un allongement final *néгатif*.

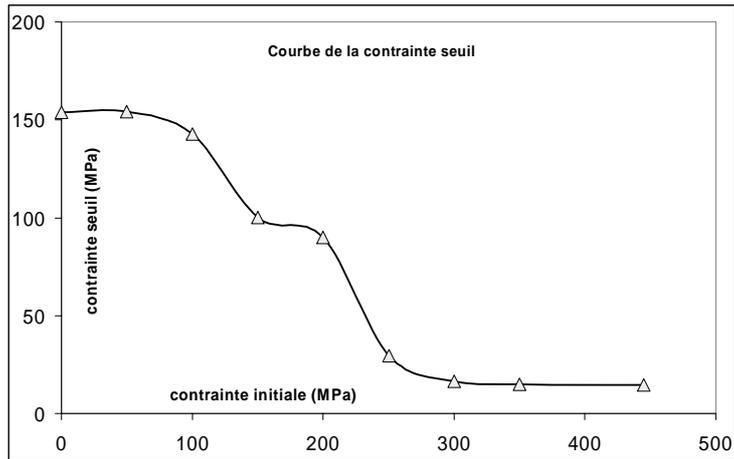


Figure 4 – Valeur du seuil en fonction de la contrainte initiale

Une tentative de corrélation de la courbe de la fonction seuil avec le changement de volume d'origine métallurgique a été amorcée. La difficulté principale est que la base expérimentale en la matière ne comporte qu'un point : à contrainte imposée nulle, l'alliage 7050 se contracte d'environ -0.03%. Pour les autres niveaux de contrainte/déformation on ne sait pas isoler la part métallurgique de la part mécanique dans la déformée résiduelle.

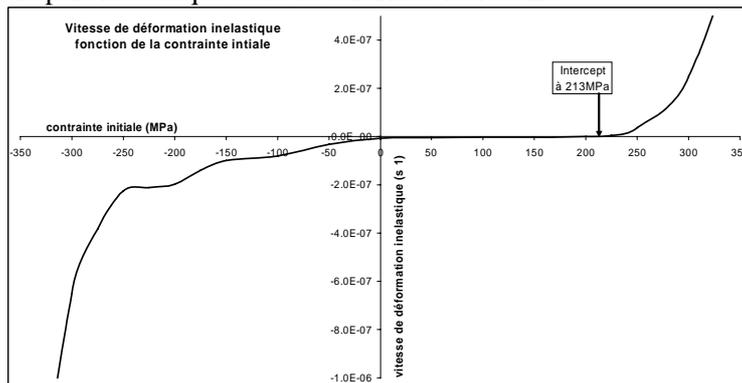


Figure 5 – Vitesse de déformation inélastique initiale fonction de la contrainte initiale

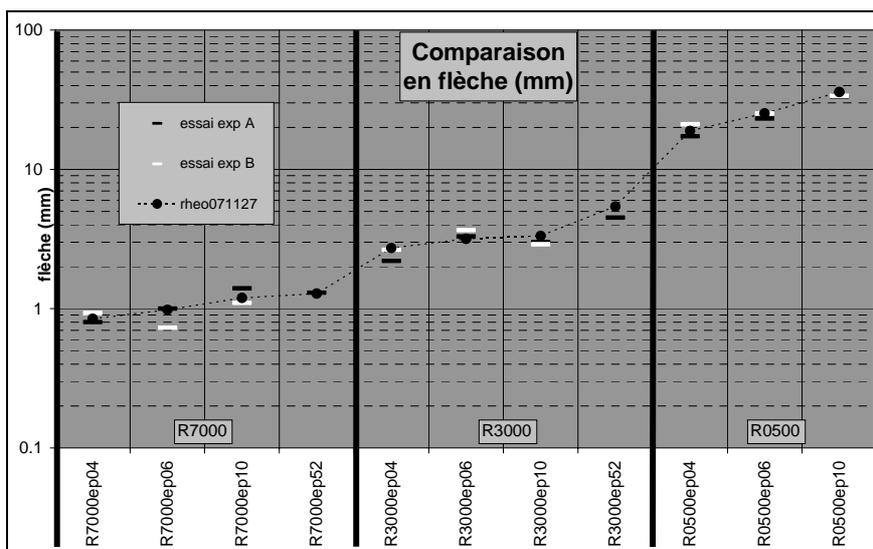


Figure 6 – Flèche résiduelle après formage sur 2 lots de matière différents (expA et expB) comparée à la flèche obtenue par le modèle.

Finalement, la rhéologie obtenue s'est montrée adaptée aux bas niveaux de déformation imposée (partie gauche de la figure 6), comme aux hauts niveaux (partie droite de la figure 6). Cette avancée fondamentale, et la qualité des résultats obtenus sont à porter au crédit de la notion de contrainte seuil, qui seule permet de moduler les vitesses de relaxation en fonction des niveaux de déformation, ou de contrainte, initiaux.

## 4 Conclusion et perspectives

Sur des essais à sollicitations uni axiales les résultats sont très satisfaisants. L'apport de la fonction seuil contribue à moduler correctement la vitesse de déformation inélastique initiale qui conditionne d'une part la prise en compte du changement de volume métallurgique du 7050 lors de passage de l'état W51 à l'état T7651, et d'autre part à créer de la déformation irréversible à bas niveau de déformation imposée.

Une fois acquis ces bons résultats sur des sollicitations uni axiales, un autre défi à relever consiste à traiter les chargements multiaxiaux. Les phénomènes de fluage-relaxation sont probablement sensibles aux différentes composantes et combinaisons de composantes de la contrainte, comme pour toute approche de la plasticité. Aujourd'hui la loi de fluage-relaxation a été formulée en valeurs principales, sans interdépendance des différentes directions. Des essais en double courbure devraient nous indiquer si cette hypothèse conduit à des erreurs acceptables ou non.

## Références

- [1] D. Bakavos, P.B. Prangnell, B. Bes, F. Eberl, J.G. Grossmann. Microstructural Interactions during Stress Ageing a 7475 and 2022 Creep - Ageformed Bend Coupons.
- [2] S.P. Chen, N.C.W. Kuijpers, S. van der Zwaag. Effect of microsegregation and dislocations on the nucleation kinetics of precipitation in aluminium alloy AA3003. *Materials Science and Engineering A341* (2003) 296-306
- [3] A. Deschampand Y.Brechet. Influence of predeformation and ageing of an Al-Zn-Mg ALLOY-II. Modelling of Precipitation kinetics and yield stress. *Acta Mater.* Vol 47, No 1, pp.293-305, 1999
- [4] F. Eberl, S. Gardiner, G. Campanile, G. Surdon, M. Venmans, P. Prangnell. Ageformable panels for commercial aircraft. *25th international congress of the aeronautical sciences*
- [5] B. Escoffier, Y. Chastel, A. Pineau, G. Sola, G. Surdon. Physical and mechanical modeling of ageforming in 7050 Al Alloy. *22<sup>nd</sup> 3 AF Colloquium, Material For Aerospace Applications*, Nov. 27-28 2007.
- [6] R. Gomez-Ramirez, G.M. Pound. Nucleation of a second solid phase along dislocations. *Metallurgical transactions* volume 4, June 1973
- [7] A. Pineau. Influence of Uniaxial stress on the morphology of coherent precipitates during coarsening-elastic energy considerations. *Acta Metallurgica*, Vol 24, pp.559-564
- [8] H.M. Brewer. Age forming integrally stiffened aluminium aerospace structures in an autoclave, *AIAA*, 1989
- [9] M.C. HOLMAN. Autoclave age forming large aluminium aircraft panels. *Journal of Mech. Working Technology*, volume 20, pp 477-488, 1989