

## MODELISATION DES STRUCTURES SOUPLES

P. VIALETES<sup>1,2,3</sup>, J. M. SIGUIER<sup>2</sup>, P. GUIGUE<sup>3</sup>, S. MISTOU<sup>1</sup>, O. DALVERNY<sup>1</sup>,  
M. KARAMA<sup>1</sup>, F. PETITJEAN<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ONERA Centre de Toulouse – 2 Av Edouard Belin BP4025 – 31055 Toulouse

<sup>2</sup> CNES Centre de Toulouse – 23 Av Edouard Belin – 31055 Toulouse Cedex

<sup>3</sup> INPT- ENIT- LGP - BP1629 – 65016 Tarbes Cedex [moussa.karama@enit.fr](mailto:moussa.karama@enit.fr)

<sup>4</sup> ICAM – Av de Grande Bretagne – 31000 Toulouse

### Résumé

La modélisation et la fabrication des ballons pressurisés stratosphériques longue durée à usage scientifique est un défi pour le CNES. Cette modélisation nécessite une bonne connaissance des lois de comportement des matériaux constitutifs des enveloppes. L'étude se fait sur un polymère constitué de 3 couches complexées : PET 15 $\mu$ m, PA 20 $\mu$ m, PET 15 $\mu$ m. Une campagne d'essais uniaxiaux nous permet d'identifier les paramètres des modèles viscoélastiques du matériau. Un ensemble d'essais sur des sous-ensembles de ballons soumis à des sollicitations complexes a été réalisé afin de déterminer, à l'aide d'un système de mesure par stéréo corrélation, les champs de déplacement et de déformation de ces structures. Ces essais sont alors simulés sur un code EF et comparés aux résultats expérimentaux afin de valider les lois de comportement pour des géométries et des sollicitations complexes.



Figure 1 : ballon pressurisé 10m

**Mots clefs :** *viscoélasticité, polymères, corrélation d'images, ballons stratosphériques.*

### 1. Introduction

Les ballons préssurisés (Figure 1) sont développés par le CNES pour effectuer des expériences de longue durée dans la stratosphère. Ils sont dimensionnés en considérant les matériaux linéaires jusqu'à leur seuil d'élasticité [1]. Durant la phase de développement, deux problèmes principaux ont été mis en évidence et doivent être résolus.

Le premier de ces problèmes est l'explosion prématurée de certains ballons en vol apparaissant à des niveaux de pression relativement faibles. Le second est apparu lors du dépouillement des résultats d'essais en vol. Ces ballons ont un diamètre initial de 10m, avec un poids bien connu et donc un niveau de vol précisément calculé. Il s'avère que le fluage du polymère constitutif de ces ballons entraîne une augmentation significative du diamètre du ballon et modifie donc tous les paramètres du vol.

Les ballons pressurisés de 10m de diamètre sont composés de 32 fuseaux assemblés par un ruban de PET et une colle thermo-réactivable. Les fuseaux se rejoignent au niveau des pôles pour former une calotte.

Le matériau constitutif des ballons étudiés est un film complexé tri-couches composé de Polyester 15 $\mu$ m, de Polyamide 20 $\mu$ m et de Polyester 15 $\mu$ m (PET/PA/PET), pour une épaisseur totale de 50 $\mu$ m. L'objectif de cette étude est de modéliser le comportement non linéaire de ces ballons pressurisés prenant en compte l'influence du temps (fluage, relaxation). Pour cela, on identifie les lois de comportement du matériau à partir d'essais uniaxiaux.

On simule ensuite à l'aide d'un code EF des essais complexes réalisés avec le dispositif expérimental Nirvana. Les lois de comportement du modèle EF sont celles déterminées précédemment. Les résultats numériques et expérimentaux sont comparés, et la loi de comportement est recalée via une méthode inverse

## 2. Comportement de structures complexes sous pression uniforme

### 2.1 Le dispositif expérimental Nirvana

Ce dispositif est une chambre à vide de 1m<sup>3</sup> (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) constituée de 2 cloches de 1,5m de diamètre entre lesquelles est tendu un échantillon représentatif d'un sous ensemble de ballon (assemblage, calotte, etc.). Une différence de pression est appliquée à l'échantillon qui assure l'étanchéité entre les 2 parties de la chambre.

Un système de pré-tension du film, constitué de 3 vérins et de 150 pinces d'accrochage, permet de simuler la contrainte de peau dans le ballon. On est ainsi représentatif d'une calotte de ballon sous pression [2].

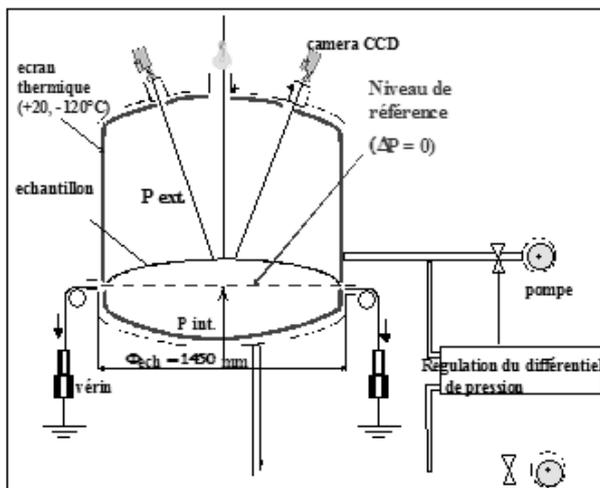


Figure 2 : dispositif expérimental Nirvana

### 2.2 Mesure de champs par Stéréocorrélation

La préparation des échantillons à tester et la calibration des caméras sont des étapes importantes qui influent sur la précision de la mesure.

La technique de calibrage est basée sur les travaux théoriques [3]. Un mouchetis de noir et de blanc est appliqué sur la zone observable par les 2 caméras soit un disque de 600mm de diamètre.

La calibration sert à déterminer l'ensemble des paramètres géométriques et optiques nécessaires au calcul : la distance et l'angle entre les caméras, la distance foyer/objectif, ainsi que la sensibilité des aberrations optiques.

La résolution obtenue en déplacement est de 15 à 20μm pour un champ de mesure de 600mm de diamètre. La résolution en terme de déformation est de 1000 à 2000μm/m pour une précision de 500 à 1000μm/m.

Les échantillons testés sont représentatifs de deux fuseaux et d'un assemblage central (Figure 3).

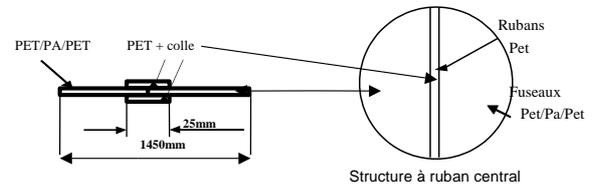


Figure 3 : échantillon testé

Les résultats expérimentaux sont obtenus à partir d'essais réalisés à température ambiante pour une rampe de pression variant linéairement de 0 à 60 hPa puis, sur un essai de fluage de 4 jours à 15 hPa. La figure 4 présente la déformation normale à l'assemblage pour un niveau de pression donné.

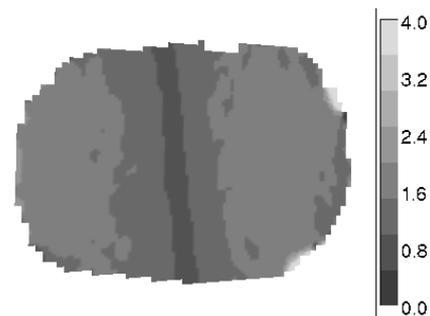


Figure 4 : déformation (%) normale au ruban

## 3. Validation de la loi de comportement

On s'applique ici à vérifier que la loi de comportement identifiée à partir d'essais uni axiaux de type traction monotone, traction de fluage et de relaxation est capable de décrire des comportements complexes en terme de géométrie et de sollicitation. Pour cela, on construit des modèles numériques des essais Nirvana présentés au paragraphe 2. Seuls les résultats de la simulation de l'essai de fluage, qui prennent en compte les phénomènes visqueux intervenant dans le matériau, sont présentés ici.

Le modèle est un quart de structure maillée sous MSC. MARC en éléments de coque représentant l'échantillon testé sous Nirvana. Les conditions de pression et de précontrainte en fonction du temps de l'essai de fluage sous Nirvana sont implémentées directement comme

conditions aux limites du calcul. La loi identifiée à partir d'essais de fluage puis de relaxation est testée. Aucune de ces lois n'est capable de décrire le comportement combiné en fluage et relaxation des essais.

Ce comportement est dû au blocage du film sur la zone de contact entre la partie haute et basse de NIRVANA. Le couplage du logiciel élément fini avec un logiciel d'optimisation permet de recalibrer le modèle. Cette méthode inverse consiste à comparer la flèche au centre de l'échantillon issue de la mesure par stéréo-corrélation avec la même donnée obtenue par le calcul. Le module d'optimisation du code Zebulon [4] vient alors modifier via une sous-routine les coefficients de la loi de comportement dans le code éléments finis.

Les résultats obtenus montrent que le modèle choisi est représentatif du comportement des sous-ensembles de ballons soumis à des sollicitations complexes (Figure 5). L'étude d'une nouvelle loi de comportement permettra à partir d'une loi unique de modéliser, sans recalage, des essais de type Nirvana.

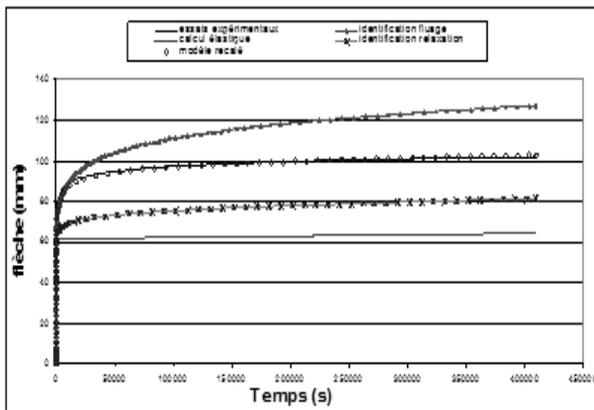


Figure 5 : comparaison essais / calculs de la flèche au centre sur un essai Nirvana à pression constante.

#### 4. Conclusion

Cette étude concerne la modélisation du comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques validée par la corrélation entre simulations numériques et mesures expérimentales.

La partie expérimentale est réalisée avec le dispositif Nirvana équipé d'un système de mesure par stéréo-corrélation. Ce procédé d'extensométrie sans contact mesure les déplacements 3D de grands sous-ensembles de ballons constitués de matériaux souples et transparents. Les déformations calculées nourrissent une base de données expérimentale utilisée pour la connaissance du comportement des ballons ainsi que pour la validation des lois de comportement.

La partie simulation numérique est réalisée sur un code de calcul éléments finis prenant en compte les non-linéarités matériau. Une loi de comportement identifiée à partir d'essais uni axiaux en fluage et relaxation est

implémentée. Un recalage par une méthode inverse est actuellement nécessaire pour la modélisation de ce type d'essais. La loi de comportement utilisée semble bien adaptée à ce type de sollicitations complexes.

Un travail de développement sur les lois de comportement est nécessaire afin d'optimiser cette modélisation. Il permettra d'obtenir un processus de calcul prévisionnel complet applicable au dimensionnement des ballons.

#### Références (12 gras)

- [1]Guigue P., Siguier J.M., «Engineering of stratospheric balloon materials: selection procedure, experimental characterization and aging techniques», *Proceedings of 15th ESA Symp on European Rocket and Balloon Prog.*, 2001, p. 547-552.
- [2]Siguier J-M., Guigue P., Karama M., Mistou S., Dalverny O., Granier S., « Numerical and experimental simulation of the mechanical behavior of super-pressure balloon subsystems », *34th COSPAR*, 10-19 octobre 2002, Houston, USA.
- [3]Orteu J-J., Garric V., Devy M., « Camera calibration for 3D reconstruction : application to the measure of 3D deformations on sheet metal parts. European Symposium on Lasers, Optics and vision in manufacturing, juin 1997, Munich (Allemagne)
- [4]Zebulon Software v8.2, « Z-set user manual », 2003.