

THÈSE

présentée en vue de
l'obtention du titre de

DOCTEUR

de

**L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE**

**ÉCOLE DOCTORALE : MATÉRIAUX - STRUCTURE - MÉCANIQUE
SPÉCIALITÉ : Génie mécanique**

Pierre VIALETES

**Simulation numérique et expérimentale du comportement mécanique
des ballons pressurisés stratosphériques**

Soutenue le 15 décembre 2005 devant le jury :

| | | |
|------------|---|--|
| MM. | O. POLIT Y. GOURINAT | Président - Rapporteur |
| Mme | P. GUIGUE-JOQUET | |
| MM. | M. KARAMA R. SCHIRRER J.M. SIGUIER | Directeur de thèse Rapporteur |
| MM. | J.F. MAIRE F. PETITJEAN | Membre invité Membre invité |

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier les membres du jury de l'intérêt manifesté pour ce travail. Je remercie particulièrement les professeurs Robert Schirrer et Olivier Polit qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir rapporter sur ma thèse, ainsi que Yves Gourinat, Pascale Guigue-Joguet et Jean Michel Siguier qui ont accepté de juger ce travail et Moussa Karama, mon directeur de thèse. Un grand merci également à Frank Petitjean et Jean François Maire d'avoir participé à ce jury en tant qu'invités.

Je tiens aussi à remercier les membres du département "Véhicules Porteurs" de la sous direction "intégration et ballons" du CNES de Toulouse de m'avoir accueilli.

Merci à tous les Michel (Lafourcade, Savignac et Eymard) de chez Zodiac pour leurs conseils avisés sur les matériaux ainsi que pour leur bonne humeur légendaire.

J'adresse aussi mes remerciements à Pascale Guigue du CNES pour son encadrement et son soutien durant cette thèse.

Ce travail de thèse a été réalisé au Département Environnement Spatial du centre de l'ONERA de Toulouse. Merci à Magdelaine Dinguirard de m'avoir accueilli au sein de son département. Merci à Jean Michel pour son encadrement dynamique ainsi que pour nos discussions animées et constructives autour de la mécanique des solides. Merci à Virginie de m'avoir supporté dans son bureau, à Daniel pour son aide efficace et ses soirées mémorables, à Claude pour ses conseils éclairés et pratiques sur les manipulations ainsi que pour son imagination débordante dans le domaine du divertissement, et enfin à Stéphane pour son aide indispensable dans la mise au point des essais ainsi que pour son amitié sans faille. Merci enfin à tous les thésards et tous les membres du DESP pour leur soutien, leur bonne humeur et l'excellente ambiance de travail durant ces trois ans.

Je remercie également Moussa pour son encadrement et son soutien tout au long de ces 3 ans, Sébastien pour son aide sur la partie expérimentale et Olivier sur la partie numérique. Merci à tous les 3 pour la correction du manuscrit ainsi que pour leur bonne humeur et leur accueil à Tarbes.

Merci aussi à Frank pour son aide précieuse sur les lois et modèles éléments finis ainsi que pour son soutien dans les moments difficiles et sa présence rassurante.

J'adresse aussi toute ma gratitude à Jeff et à toute l'équipe de Chatillon pour leurs conseils sur les lois ainsi que pour les soirées mémorables de fin de congrès.

Merci enfin à ma famille pour son soutien ainsi qu'à Nanou ma petite femme pour m'avoir supporté, soutenu et encouragé même dans les moments critiques.

Notations

| | |
|---------------------|---|
| x, y | coordonnées de l'image |
| x_0, y_0 | coordonnées du point principal |
| d_x, d_y | distorsions des objectifs |
| c | constante représentative des caméras |
| R | matrice de rotation |
| X_0, Y_0, Z_0 | coordonnées du centre de projection |
| X, Y, Z | coordonnées du point objet |
| σ | précontrainte |
| ΔP | différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du ballon |
| R | rayon du ballon |
| e | épaisseur de l'enveloppe |
| t_0 et t_∞ | temps de début et d'équilibre en fluage |
| ξ_i | écoulement visqueux |
| τ_i | temps de relaxation |
| μ_i | coefficient de pondération (gaussienne) |
| n_0, n_c | spectre gaussien |
| $i \in [n_1, n_2]$ | caractéristiques du spectre de la gaussienne |
| $\bar{\sigma}$ | contrainte équivalente |
| $\bar{\varepsilon}$ | déformation équivalente |
| T | température |
| A, q, c, m | coefficients |
| t | temps |

| | |
|------------------|---|
| L | tenseur d'ordre 4 d'anisotropie élastique |
| ε | déformation totale |
| ε^a | déformation anélastique |
| $g(\sigma)$ | fonction non linéarisante |
| β | paramètre |
| L_R | tenseur d'ordre 4 d'anisotropie visqueux |
| γ_R | coefficients liés à la viscosité |
| ν_R | coefficients de Poisson du tenseur relaxé |
| γ_c | coefficient représentant la viscosité en cisaillement |
| ν | coefficient de Poisson |
| $S_R = L_R^{-1}$ | tenseur de souplesse |

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 9 |
| I CADRE GENERAL DE L'ETUDE | 13 |
| <i>I.1 Généralités sur les ballons</i> | <i>13</i> |
| <i>I.2 Les ballons pressurisés stratosphériques</i> | <i>14</i> |
| <i>I.3 Objectifs de la thèse</i> | <i>17</i> |
| II BIBLIOGRAPHIE | 21 |
| <i>II.1 Lois de comportement adaptées aux polymères</i> | <i>21</i> |
| II.1.1 Modèles rhéologiques | 21 |
| II.1.2 Modèles viscoélastiques non linéaires | 27 |
| II.1.3 Synthèse | 30 |
| <i>II.2 Méthode de mesure de champs</i> | <i>30</i> |
| II.2.1 Corrélation d'images | 31 |
| II.2.2 Mesure de formes 3D par stéréovision | 32 |
| II.2.3 Appariement des images stéréoscopiques | 33 |
| II.2.4 Triangulation | 36 |
| II.2.5 Précision de mesure | 36 |
| II.2.6 Mesure 3D de déformations par stéréocorrélation et appariement temporel | 37 |
| II.2.7 Synthèse | 40 |
| III OUTILS EXPERIMENTAUX D'INVESTIGATION | 47 |
| <i>III.1 Dispositif expérimental Nirvana</i> | <i>47</i> |
| III.1.1 Description générale | 47 |
| III.1.2 Mise au point du dispositif | 50 |
| III.1.3 Systèmes d'acquisition et de mesure | 58 |
| III.1.4 Synthèse | 58 |
| <i>III.2 Système de mesure par stéréo-corrélation d'images numériques</i> | <i>58</i> |
| <i>III.3 Caractérisation du matériau</i> | <i>60</i> |
| III.3.1 Présentation du matériau | 60 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| III.3.2 | Caractérisation mécanique du matériau ----- | 62 |
| III.3.3 | Synthèse----- | 67 |
| IV | CHOIX ET IDENTIFICATION DES LOIS DE COMPORTEMENT ----- | 73 |
| <i>IV.1</i> | <i>Choix de lois de comportement-----</i> | <i>73</i> |
| IV.1.1 | Analyse des résultats d'essais ----- | 74 |
| IV.1.2 | Synthèse----- | 79 |
| <i>IV.2</i> | <i>Identification des lois de comportement-----</i> | <i>80</i> |
| IV.2.1 | Introduction aux méthodes d'identification ----- | 80 |
| IV.2.2 | Résultats de l'identification ----- | 88 |
| IV.2.3 | Synthèse----- | 101 |
| V | MODELISATION DE STRUCTURES DE BALLONS ----- | 105 |
| <i>V.1</i> | <i>Modèle prenant en compte les frottements-----</i> | <i>105</i> |
| V.1.1 | Modélisation du frottement ----- | 106 |
| V.1.2 | Analyse des résultats----- | 108 |
| <i>V.2</i> | <i>Modèle local-----</i> | <i>108</i> |
| V.2.1 | Enoncé du principe d'équivalence----- | 109 |
| V.2.2 | Application à notre étude----- | 110 |
| V.2.3 | Analyse des résultats----- | 113 |
| <i>V.3</i> | <i>Validation des lois de comportement sur structure-----</i> | <i>113</i> |
| V.3.1 | Validation de la loi mixte ----- | 114 |
| V.3.2 | Validation de la loi spectrale----- | 117 |
| <i>V.4</i> | <i>Synthèse-----</i> | <i>120</i> |
| | CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES ----- | 121 |
| | ANNEXES ----- | 123 |

INTRODUCTION

Les ballons pressurisés sont développés par le CNES pour effectuer des expériences de longue durée dans la stratosphère. Ils sont dimensionnés en considérant que le matériau a un comportement linéaire. Ces ballons ont un diamètre initial de 10m, avec un poids bien connu et donc un niveau de vol précisément calculé. L'analyse des trajectoires de vol réalisés sur plusieurs missions montre que le fluage du polymère constitutif de ces ballons entraîne une augmentation significative du volume et modifie les paramètres du vol. Il s'avère donc indispensable de bien connaître et d'identifier le comportement du matériau.

L'objectif de mon travail est de définir une loi de comportement macroscopique adaptée au matériau, de l'identifier et de la valider sur un essai de structure proche des conditions de vol.

La démarche que nous avons adoptée pour atteindre ce but consiste dans un premier temps à choisir et à identifier une loi de comportement en s'appuyant sur les résultats d'essais expérimentaux sur le matériau. La deuxième étape consiste à valider cette loi sur un essai de structure dans des conditions proches de celles du vol (Figure 1).

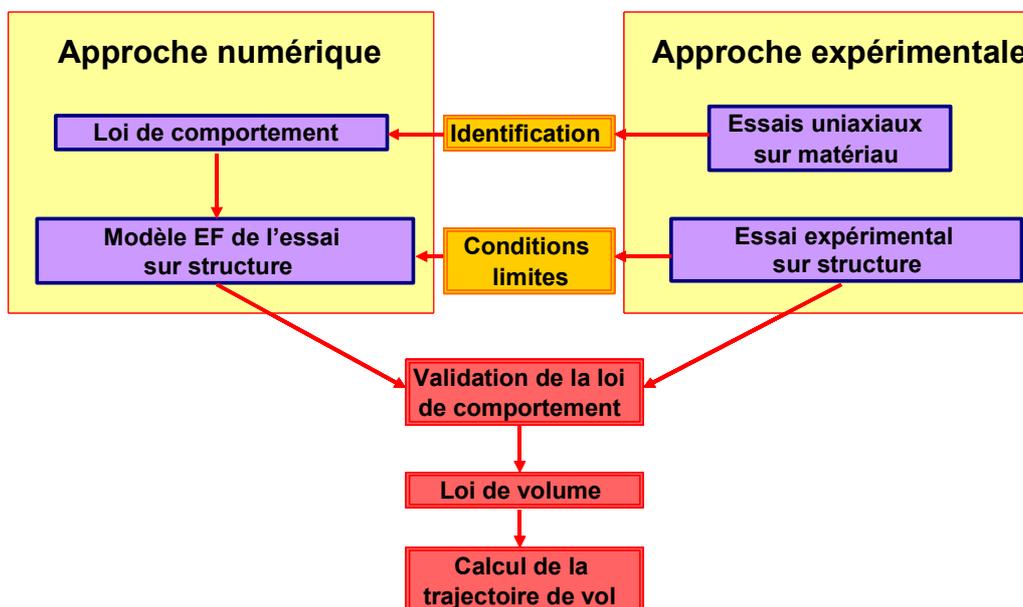


Figure 1 : Synoptique de la démarche employée

Le plan de ce manuscrit est présenté dans les paragraphes suivants.

Le chapitre 1 est consacré au contexte industriel de l'étude. Il permet au lecteur de se familiariser avec les ballons pressurisés stratosphériques (BPS). Nous décrivons le rôle du BPS, les types de mission pour lesquelles il a été conçu ainsi que son fonctionnement et son principe de vol.

Le chapitre 2 concerne les études bibliographiques. La première partie porte sur les lois de comportement adaptées aux polymères. Nous présentons les différentes approches disponibles dans la littérature pour modéliser notre matériau. La seconde partie présente le principe des techniques expérimentales de mesure de champs qui seront par la suite utilisées pour la caractérisation du matériau et les mesures sur la structure.

Le chapitre 3 est consacré aux outils d'investigation expérimentaux utilisés et développés pour les essais sur structure et la caractérisation du matériau. Le dispositif expérimental Nirvana, décrit dans ce chapitre, permet de réaliser ces essais sur des sous ensembles de ballon dans des conditions proches du vol et a été adapté à notre étude. Des méthodes de caractérisation de films minces, souples et transparents seront ensuite décrites.

Le chapitre 4 résume la démarche adoptée pour choisir les lois de comportement adaptées au matériau et aux applications. Après avoir décrit les méthodes et algorithmes d'identification utilisés lors de cette étude, nous présenterons les résultats de l'identification des lois de comportement sélectionnées.

Le chapitre 5 décrit les modèles numériques mis en place pour simuler les essais expérimentaux et valider les lois de comportements dans des conditions proches de celles du vol.

Chapitre 1

CADRE GENERAL DE L'ETUDE

| | | |
|------------|---|-----------|
| <i>I.1</i> | <i>Généralités sur les ballons</i> ----- | <i>13</i> |
| <i>I.2</i> | <i>Les ballons pressurisés stratosphériques</i> ----- | <i>14</i> |
| <i>I.3</i> | <i>Objectifs de la thèse</i> ----- | <i>17</i> |

I CADRE GENERAL DE L'ETUDE

Ce chapitre est consacré à la description des activités du CNES dans le domaine des ballons stratosphériques. Plusieurs types de ballons sont utilisés, en fonction des missions à réaliser. Nous présentons uniquement les ballons pressurisés qui font l'objet de notre étude, les types de mission pour lesquelles ils sont conçus ainsi que leur principe de vol qui permet de comprendre la problématique de cette étude.

I.1 Généralités sur les ballons

L'histoire des ballons a commencé le 4 juin 1783 avec l'ascension du premier aérostat à air chaud suivi, le 27 août de la même année, du lancement du premier ballon à hydrogène. Il faudra attendre le début des années soixante pour qu'apparaissent sur le marché des films plastiques comme le polyéthylène ou le polyester de faible épaisseur en grandes dimensions. Dès lors, il devint possible de fabriquer des ballons de grandes dimensions, donnant naissance à l'activité ballon stratosphérique dans le monde.

Depuis plus de 40 ans, le CNES est maître d'œuvre d'un programme de ballons scientifiques qui est le plus important au monde après celui des Etats-Unis. Plus de 3000 ballons ont été lâchés depuis environ 30 sites en France et à l'étranger. La France a ainsi acquis une compétence reconnue dans la conception, la fabrication et le lâcher de ballons pour l'exploration de la stratosphère. Les besoins de la communauté scientifique en matière d'aéronomie, d'aérologie, d'astronomie, d'astrophysique de géophysique ou de biologie augmentent sans cesse au cours des années. Les ballons stratosphériques sont une réponse adaptée et économique à ces besoins. Pour l'étude du climat et de l'environnement, le ballon, en tant que traceur, permet l'étude de la dynamique de l'atmosphère. Immergé dans le milieu il permet également d'analyser sa composition chimique. Utilisé conjointement avec les satellites et les avions, il est un des moyens complémentaires à mettre en œuvre pour étudier l'évolution du climat. Il a déjà largement contribué à analyser le trou de la couche d'ozone. Les essais de rentrée dans l'atmosphère de sondes d'exploration planétaires ou de véhicules de transport spatial ont été réalisés sous ballon. Le ballon, en tant que seul véhicule porteur séjournant dans la stratosphère, peut servir de moyen d'essai et de validation d'instruments (télé-détection, écoutes radioélectriques, tests de cellules solaires). Il subit moins de contraintes mécaniques et thermiques qu'une mission satellite, les expériences y sont donc soumises à des règles de conception moins sévères et sa mise en œuvre s'en trouve simplifiée.

Cette démarche entraîne des coûts de campagnes 100 fois moins élevés que ceux d'une campagne de lancement de satellites.

I.2 Les ballons pressurisés stratosphériques

Les ballons pressurisés stratosphériques (BPS) de 10 m de diamètre (Figure 2), qui sont l'objet de notre étude, sont conçus pour des missions de plusieurs mois. Ils utilisent, pour pallier la variation de température de l'effet jour/nuit, la contention du gaz aérostatique dans une enveloppe étanche et pratiquement inextensible. Les variations de température du gaz, en fonction des flux radiatifs, se traduisent par une variation de la pression du gaz à l'intérieur du ballon. Ce dernier conservant théoriquement un volume constant vole à une altitude constante d'environ 25 Km.



Figure 2 : Ballon pressurisé stratosphérique de 10m de diamètre

Un ballon pressurisé de 10 m de diamètre est composé de 32 fuseaux d'environ 1m20 sur leur plus grande largeur. Ces fuseaux sont découpés à partir d'un complexe de 3 films minces, un film de polyéthylène téréphtalate (PET) de 15 μm d'épaisseur, un film de polyamide 6.6 (PA) de 20 μm d'épaisseur et un autre film de PET de 15 μm . Le film ainsi fabriqué (PET/PA/PET) mesure 50 μm d'épaisseur et est souple et transparent. Les fuseaux sont reliés entre eux par des rubans adhésifs constitués de bandes de PET de 23 μm d'épaisseur et de 25 mm de large qui sont thermo-collés (Figure 3).

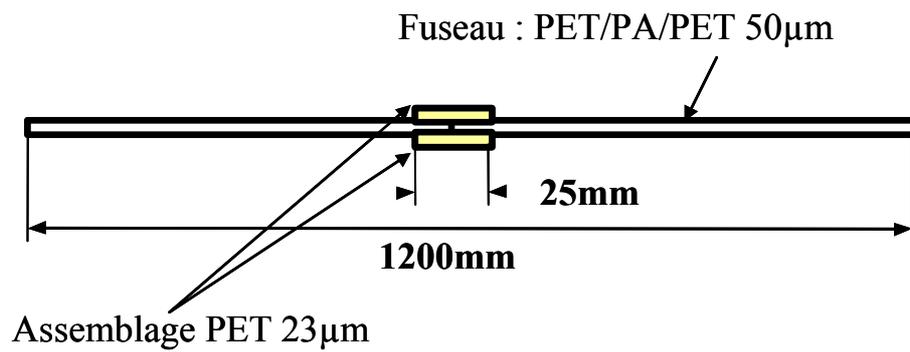


Figure 3 : Assemblage des fuseaux

L'ensemble des fuseaux se rejoint au niveau des pôles nord et sud du ballon pour former des calottes composées de plusieurs couches de PET de 23 µm d'épaisseur (Figure 4).



Figure 4 : Calotte d'un BPS 10m

Lors du lancement du ballon, on injecte dans ce dernier une quantité d'hélium calculée en fonction de la durée de vie du ballon et donc de la mission. Cette durée de vie dépend principalement de la fuite d'hélium au travers des fuseaux durant la mission.

Au sol, le ballon a donc une forme "goutte d'eau" (Figure 5) et la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du ballon est quasi nulle.



Figure 5 : BPS 10m en cours de lancement

De par le principe d'Archimède, le ballon s'élève jusqu'à atteindre son niveau de vol nominal où il est en équilibre vertical, son déplacement horizontal suit celui des vents dans lesquels il se trouve. Lorsque le ballon est à son niveau de vol nominal, il est de forme sphérique de 10m de diamètre et la pression à l'intérieur de son enveloppe est supérieure de 15hPa à la pression extérieure. Cette pression, directement liée à son niveau de vol, est calculée de manière à ce que la contrainte dans l'enveloppe soit inférieure de 25% à la limite élastique en contrainte du matériau [Casteras 1997]. Les propriétés mécaniques et optiques du matériau font que la variation de température entre le jour et la nuit a peu d'influence sur le volume du ballon qui vole donc à une altitude constante pendant toute la mission.

Cependant, les données de vol de plusieurs missions ont montré que le ballon avait tendance à dévier de sa trajectoire verticale de vol [Guigue 2001]. L'analyse de ces résultats a montré que ces variations d'altitude, liées à la variation de volume du ballon, étaient dues à la déformation au cours du temps du matériau.

Ce phénomène, appelé fluage, est dû au comportement visqueux du matériau qui ne doit pas être négligé, même aux basses températures rencontrées dans la stratosphère. Des essais de fluage sur le matériau montrent que la déformation visqueuse atteint 10% de la déformation totale au bout de 2 jours et demi d'essai pour une contrainte comparable à la contrainte nominale de vol des ballons. Ces essais démontrent qu'il faut tenir compte du fluage lors du calcul des trajectoires de vol.

I.3 Objectifs de la thèse

Le but de cette thèse est donc de mettre en œuvre une loi de comportement tenant compte de la viscosité du matériau dans les conditions de vol. Cette loi devra être intégrable dans la chaîne de calcul de trajectoire du CNES sous forme de "loi de volume". Pour calculer la trajectoire de vol, il est nécessaire de connaître l'évolution du volume du ballon soumis à l'environnement extérieur (température, pression) et à l'effet du fluage. Le volume est déterminé par un calcul mécanique simple sur une sphère de 10m de diamètre, homogène, soumise à des températures et pressions gouvernées par la physique du vol. La loi de comportement déterminée lors de cette thèse déterminera le comportement mécanique du matériau dans ce calcul.

Chapitre 2

BIBLIOGRAPHIE

| | | |
|-------------|---|----|
| <i>II.1</i> | <i>Lois de comportement adaptées aux polymères</i> | 21 |
| II.1.1 | Modèles rhéologiques | 21 |
| II.1.2 | Modèles viscoélastiques non linéaires | 27 |
| II.1.3 | Synthèse | 30 |
| <i>II.2</i> | <i>Méthode de mesure de champs</i> | 30 |
| II.2.1 | Corrélation d'images | 31 |
| II.2.2 | Mesure de formes 3D par stéréovision | 32 |
| II.2.3 | Appariement des images stéréoscopiques | 33 |
| II.2.4 | Triangulation | 36 |
| II.2.5 | Précision de mesure | 36 |
| II.2.6 | Mesure 3D de déformations par stéréocorrélation et appariement temporel | 37 |
| II.2.7 | Synthèse | 40 |

II BIBLIOGRAPHIE

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des différentes lois étudiées, adaptées pour décrire le comportement des polymères. La deuxième partie est dédiée à la mesure de champs, technique expérimentale de mesure sans contact adaptée aux mesures sur structures souples, notamment pour la caractérisation de notre matériau, l'identification ou la validation des lois de comportement.

II.1 Lois de comportement adaptées aux polymères

Nous présentons dans ce paragraphe les différentes approches existant dans la littérature pour décrire le comportement des polymères.

II.1.1 Modèles rhéologiques

Les lois empiriques reposent sur la détermination expérimentale de relations liant la déformation viscoélastique à la contrainte. Elles utilisent souvent des lois de type puissance fonction du temps et présentent un intérêt évident de part leur simplicité [Findley 1967]. Les modèles rhéologiques consistent à exprimer la sollicitation et la réponse du matériau sous la forme d'une équation différentielle linéaire du premier ordre. Ces modèles s'appuient sur des équivalents mécaniques, le ressort décrivant l'élasticité, l'amortisseur décrivant la viscosité, et le patin schématisant un seuil de contrainte. Ces éléments sont placés en parallèle ou en série suivant les modèles considérés [Besson 2001].

II.1.1.1 Modèles rhéologiques de Kelvin-Voigt et de Maxwell généralisés

Un matériau a un comportement linéaire s'il satisfait au principe de superposition de Boltzmann, c'est-à-dire si la fonction qui lie la contrainte à la déformation est linéaire. L'équation constitutive d'un matériau viscoélastique linéaire, dans le cas isotherme et uniaxial, peut être représentée par une intégrale de superposition de Boltzmann [Bruller 1995, Park 1999] qui lie la contrainte à la vitesse de déformation par une fonction linéaire dépendante du temps. Le principe de superposition de Boltzmann postule que des incréments de contrainte discrets $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ appliqués respectivement aux temps t_1, t_2, \dots, t_n agissent indépendamment sur la déformation du matériau et que les déformations respectives s'additionnent linéairement.

En généralisant à une somme d'incrémentes infiniment petits σ_i , la réponse du matériau à l'instant t , peut donc être mise sous la forme d'une intégrale :

Équation 1
$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t \frac{\delta\sigma(\tau)}{\delta\tau} J(t-\tau) d\tau$$

où $J(t-\tau)$ est la complaisance en fluage, t le temps et τ la durée d'application de la contrainte σ .

Toutes les équations rhéologiques des matériaux viscoélastiques sont exprimées par des équations différentielles linéaires à coefficients constants (Équation 2) basées sur des modèles mécaniques associant le ressort pour l'élasticité (solide élastique parfait) et l'amortisseur pour la viscosité (liquide visqueux newtonien) [Couarraze 2000] :

Équation 2
$$\sum_{n=0}^N a_n \frac{d^n \sigma}{dt^n} = \sum_{m=0}^M b_m \frac{d^m \varepsilon}{dt^m}$$

Les différents arrangements possibles entre les ressorts et les amortisseurs fournissent différentes interprétations mécaniques des constantes a_n et b_m . L'équation rhéologique du matériau s'obtient en utilisant les équations rhéologiques des constituants élémentaires et en respectant les lois d'association en série et en parallèle des différents éléments.

Toutes les associations de ressorts et d'amortisseurs imaginables correspondent à un comportement viscoélastique linéaire si, pour une expérience de relaxation, le modèle comporte un ressort seul en parallèle avec les autres modèles élémentaires et si, pour une expérience de fluage, le modèle ne comporte pas d'amortisseur seul en série avec les autres modèles élémentaires. On démontre que, quelque soit la complexité de ces associations, on peut se ramener à l'un des deux modèles suivants, le modèle de Maxwell généralisé et le modèle de Kelvin-Voigt généralisé [Besson 2001].

II.1.1.1.1 Modèle de Maxwell généralisé

Le modèle de Maxwell généralisé est approprié pour décrire le comportement d'un matériau viscoélastique lors d'un essai de relaxation (évolution de la contrainte pour une déformation constante). Il se compose d'un ressort en parallèle avec n éléments de Maxwell tel qu'illustré sur la Figure 6. L'élément de Maxwell étant constitué par l'assemblage en série d'un ressort et d'un amortisseur [Lemaitre 2001].

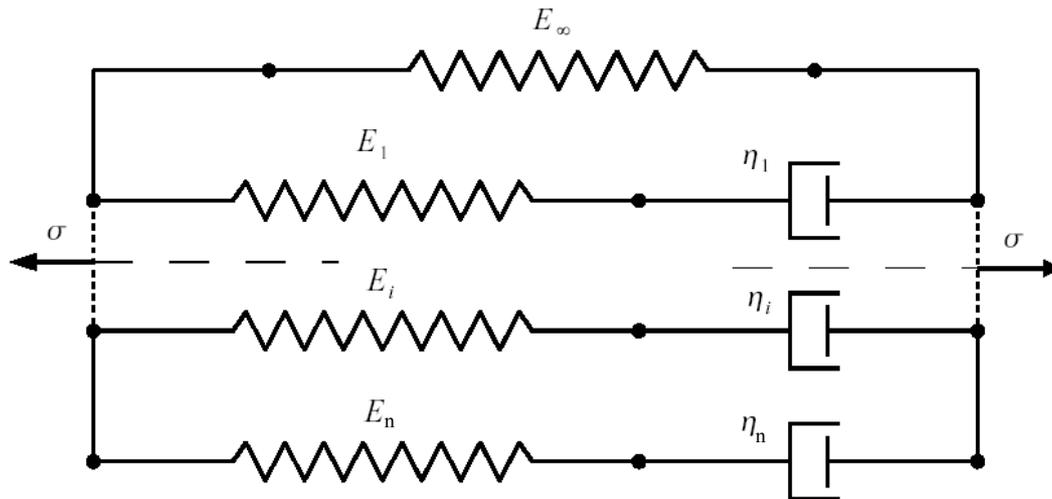


Figure 6: Modèle de Maxwell généralisé

Pour un essai de relaxation, l'équation constitutive est :

Équation 3 $\sigma(t) = E_R(t) \varepsilon_0$

où $E_R(t)$ est la fonction de relaxation du modèle de Maxwell généralisé, qui s'écrit :

Équation 4 $E_R(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\tau_i}$

Avec E_∞ le module d'Young lorsque le temps t tend vers l'infini, E_i la constante du ressort de la $i^{\text{ème}}$ branche du modèle de Maxwell et τ_i le temps de relaxation discret défini par le ratio η_i/E_i de la $i^{\text{ème}}$ branche du modèle de Maxwell.

II.1.1.1.2 Modèle de Kelvin-Voigt généralisé

Le comportement lors d'un essai de fluage (évolution de la déformation pour une contrainte constante) se décrit quant à lui par le modèle de Kelvin-Voigt généralisé (Figure 7). Ce modèle est composé de n éléments de Kelvin-Voigt en série avec un ressort.

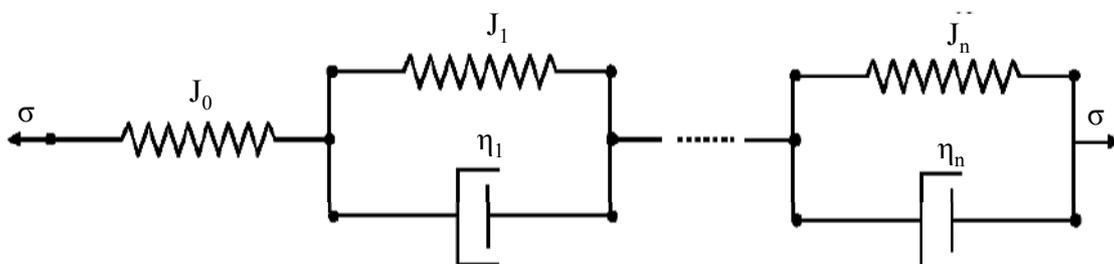


Figure 7: Modèle de Kelvin-Voigt généralisé

L'équation constitutive d'un essai de fluage est :

Équation 5 $\varepsilon(t) = J(t) \sigma_0$

où $J(t)$ est la fonction de complaisance de fluage du modèle généralisé de Kelvin-Voigt qui s'écrit alors :

$$\text{Équation 6} \quad J(t) = J_0 + \sum_{i=1}^n J_i \left[1 - e^{-t/\tau_i} \right]$$

Avec J_0 la complaisance obtenue au temps $t = 0$, égale à la complaisance du ressort seul $J_0 = 1/E_0$, J_i la complaisance du ressort du $i^{\text{ème}}$ composant du modèle de Kelvin-Voigt et τ_i le temps de retard discret défini par le ratio η_i/E_i du $i^{\text{ème}}$ composant du modèle de Kelvin-Voigt.

II.1.1.1.3 discrétisation de la loi de Maxwell généralisé en séries de Prony

La plupart des codes de calcul du commerce propose des lois de comportement de type Maxwell ou Kelvin-Voigt généralisés. Le code de calcul Abaqus utilisé dans le cadre de cette étude propose préférentiellement le modèle de Maxwell généralisé. Comme nous l'avons vu, ce modèle est linéaire et identifié à partir d'essais de relaxation. La formulation de cette loi est basée sur une discrétisation en séries de Prony. L'équation constitutive fonction du temps qui lie la contrainte à la déformation d'un matériau viscoélastique linéaire (Équation 3), peut être caractérisée par une série de Prony [Lapierre 2003]. Quand le matériau est considéré comme un solide de Maxwell, alors la fonction de relaxation peut être bâtie avec une série de Prony (Équation 7) [Bruller 1995, Chen 2000] :

$$\text{Équation 7} \quad E_R(t) = E_0 - \sum_{i=1}^n P_i \left[1 - e^{-t/\tau_i} \right]$$

Avec P_i la $i^{\text{ème}}$ constante de Prony, τ_i la $i^{\text{ème}}$ constante de temps de retard de Prony et E_0 , le module d'élasticité instantanée du matériau

On peut également définir le module à long terme par l' Équation 8 :

$$\text{Équation 8} \quad E_\infty = E_0 - \sum_{i=1}^n P_i$$

il est alors possible de mettre l'Équation 7 sous une forme équivalente à l'Équation 4 :

$$\text{Équation 9} \quad E_R(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^n P_i e^{-t/\tau_i}$$

A partir de l'Équation 7 dans le cas d'un matériau isotrope, on obtient une nouvelle forme utilisant le module de cisaillement :

$$\text{Équation 10} \quad G_R(t) = G_0 - \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{2(1+\nu)} \left[1 - e^{-t/\tau_i} \right]$$

Le module de relaxation peut être normalisé, en posant :

Équation 11 $g_R(t) = G_R(t)/G_0$

l'Équation 10 s'écrit alors :

Équation 12 $g_R(t) = 1 - \sum_{i=1}^n p_i \left[1 - e^{-t/\tau_i} \right]$

Où,

Équation 13 $p_i = \frac{P_i}{2G_0(1 + \nu)}$

Les constantes P_i et τ_i sont des propriétés intrinsèques au matériau. La connaissance de la fonction relaxation ou de la fonction fluage d'un matériau permet de déterminer toutes ses propriétés viscoélastiques. Une étude a été menée afin de déterminer le rôle et le nombre de paramètres suffisants pour décrire un essai de relaxation de notre matériau. Il ressort de cette étude que le nombre de paramètres suffisant à la description d'un essai de relaxation est fonction de la durée de cet essai, il faut généralement un paramètre par décade. Ce modèle a été identifié à partir d'essais de relaxation à différents niveaux de sollicitation. Les détails, l'analyse de cette identification ainsi que les apports et limites de ce modèle sont explicités dans le chapitre IV.

II.1.1.2 Modèle rhéologique de Maxwell non linéaire

Ce modèle est un standard des codes éléments finis et permet de décrire le caractère viscoplastique des matériaux. Il peut être schématisé par un ressort et un amortisseur en série (Figure 8)

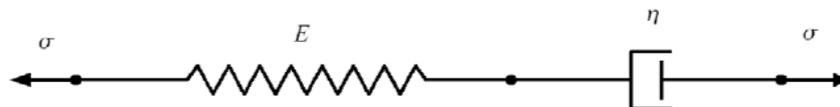


Figure 8 : Modèle de Maxwell non linéaire

Son équation constitutive telle qu'elle est présente dans les codes s'écrit, sous sa forme résolue pour un essai de fluage :

Équation 14 $\dot{\epsilon}^{vp} = A\sigma^n T^p (qt^{q-1})$

Avec A , n , p et q les constantes du modèle et σ , T , et t respectivement les contrainte, température et temps équivalents.

Cette équation peut être adaptée en fonction de la nature du matériau étudié. La puissance affectée à la contrainte permet de décrire plusieurs niveaux de contraintes en fluage si le matériau est non linéaire. La puissance affectée temps permet d'ajouter un degré de liberté au modèle en considérant une non linéarité en temps. En revanche, ce modèle est de type "fluide visqueux" et n'est pas capable de décrire des phénomènes de fluage / recouvrance.

II.1.1.3 Modèle rhéologique de Kelvin-Voigt-Bingham

Une question récurrente qui se pose sur les polymères est de savoir s'il est plus approprié de décrire leur comportement par des approches de type viscoplastique ou viscoélastique [Maire 1996]. L'étude des matériaux composites à matrices organiques [Maire 1996, Vinet,1997] fait apparaître de manière générale que le comportement est intermédiaire entre un comportement de type viscoélastique et celui de type viscoplastique. En général, ni l'une ni l'autre de ces approches n'est entièrement satisfaisante et la plupart des auteurs privilégient la mieux adaptée à leur problème. Nous étudions donc une approche viscoélastique couplé à de la viscoplasticité au travers d'un modèle combiné. Ce modèle, dit de "Kelvin-Voigt-Bingham", est issu de l'assemblage de trois cellules (Figure 9). Il est basé sur la somme des déformations, la déformation élastique (ε^e), la déformation viscoélastique (ε^{ve}) et la déformation viscoplastique (ε^{vp}) activée à un seuil de contrainte σ_y .

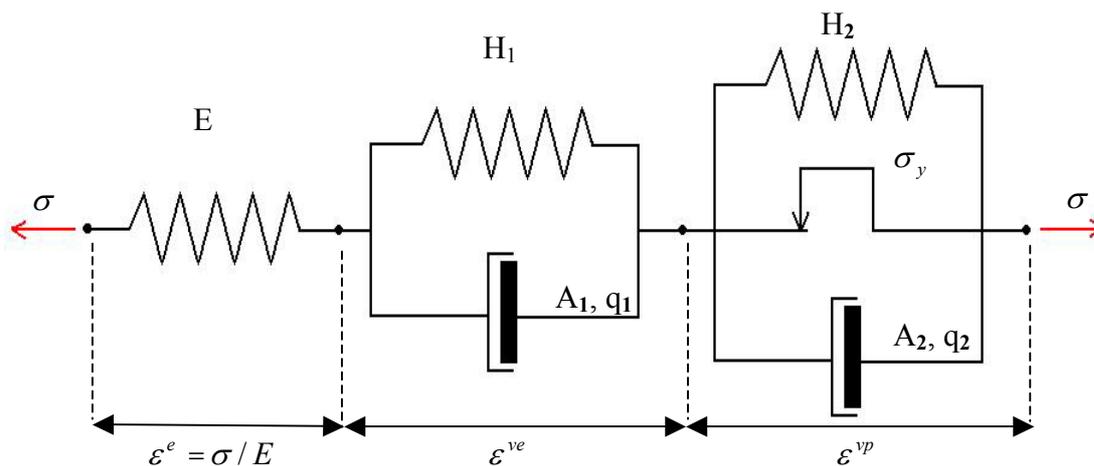


Figure 9 : Modèle rhéologique combiné de Bingham Kelvin-Voigt.

Un ressort traduit le comportement élastique linéaire et est décrit par l'Équation 15 :

Équation 15 $\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E},$

La cellule viscoélastique linéaire de Kelvin-Voigt, dont l'équation rhéologique est :

$$\text{Équation 16} \quad \dot{\varepsilon}^{ve} = A_1(\sigma - H_1\varepsilon^{ve})^{n_1} q_1 t^{q_1-1}$$

la cellule viscoplastique à seuil de Bingham, dont le comportement mécanique est décrit par l'équation :

$$\text{Équation 17} \quad \dot{\varepsilon}^{vp} = A_2(\sigma - \sigma_y - H_2\varepsilon^{vp})^{n_2} q_2 t^{q_2-1}$$

La déformation totale s'écrit $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{ve} + \varepsilon^{vp}$

La vitesse de déformation dépend donc de σ (connue lors d'un essai de fluage), de ε^{ve} et de ε^{vp} . Les déformations viscoélastique et viscoplastique apparaissent alors comme des variables internes de l'équation du modèle rhéologique. Ce modèle est constitué de cellules linéaires et leur combinaison rend le modèle non linéaire.

II.1.2 Modèles viscoélastiques non linéaires

L'objet de ce paragraphe est de présenter l'approche de lois de comportement définies dans le cadre thermodynamique. Cette approche est classiquement utilisée pour la description, au travers de lois de comportement, des phénomènes physiques apparaissant au sein des matériaux. Ainsi, bien que le matériau réel fasse apparaître des discontinuités physiques aux différentes échelles de la microstructure, celles-ci ne sont pas traduites explicitement, mais décrites seulement de façon globale, au niveau homogénéisé d'un élément de volume du matériau. Grâce à cette description très globale, le modèle peut être intégré dans des codes de calculs par éléments finis et permet ainsi de mener à terme les calculs inélastiques de pièces réelles.

II.1.2.1 Modèle viscoélastique non linéaire de Schapery

Ce type de modèle repose sur des formes intégrales issues du principe de superposition de Boltzmann.

Le principe de superposition de Boltzmann postule que des incréments de contrainte discrets $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ appliqués respectivement aux temps t_1, t_2, \dots, t_n agissent indépendamment sur la déformation du matériau et que les déformations respectives s'additionnent linéairement.

En généralisant à une somme d'incrémentes infiniment petits σ_i , la réponse du matériau à l'instant t , peut donc être mise sous la forme d'une intégrale :

$$\text{Équation 18} \quad \varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t \frac{\delta\sigma(\tau)}{\delta\tau} J(t-\tau) d\tau$$

où $J(t-\tau)$ est la complaisance en fluage, t le temps et τ la durée d'application de la contrainte σ .

La déformation, à un instant donné, n'est pas seulement due à la charge appliquée mais dépend de l'histoire du chargement. La généralisation de cette approche à la viscoélasticité non-linéaire est contenue dans le modèle de Schapery [Schapery 1966, Schapery 1969, Lou 1971], qui introduit des termes liés à la variation des grandeurs thermodynamiques. Ce modèle, très utilisé pour décrire le comportement des polymères et des composites à matrice organique repose sur l'équation suivante :

$$\text{Équation 19} \quad \varepsilon(t) = g_0(\sigma) S^0 \sigma(t) + g_1(\sigma) \int_0^t \Delta S(\psi(t) - \psi(\tau)) \frac{dg_2(\sigma)}{d\tau} d\tau$$

où g_0 , g_1 et g_2 sont des fonctions introduisant la non-linéarité en contrainte, S^0 est la souplesse initiale et ΔS est la souplesse retardée, exprimée en fonction du temps réduit ψ . L'introduction de ce temps réduit permet de modéliser le comportement du matériau à long terme grâce à des essais de courtes durées en utilisant des courbes maîtresses obtenues à partir des équivalences temps/température ou temps/contrainte. Le modèle de Schapery a longtemps été le seul modèle basé sur des principes thermodynamiques qui permettent une grande souplesse dans l'écriture du modèle en conciliant dans un même cadre les approches viscoélastiques et viscoplastiques.

II.1.2.2 Modèle viscoélastique spectral non linéaire

Ce modèle a tout d'abord été développé au LMARC de Besançon pour des composites verre/epoxy [Maire 1992, Thiébaud 1994] puis repris à l'ONERA pour des composites destinés à l'aéronautiques [Petitpas 2000]. Ce modèle s'inspire des travaux publiés antérieurement par Nowick & Berry [Nowick 1972]. Les lois de comportement suivantes sont développées dans un cadre qui garantit le respect des principes thermodynamiques [Maire 1996]. L'état du matériau à l'équilibre est donné par la connaissance des variables observables (température T et déformation totale ε) et les variables internes. Ces variables internes qui permettent de décrire le caractère irréversible des transformations sont la déformation anélastique (ε_a) et une famille de tenseurs d'ordre 2 (ξ_i) homogènes à une déformation correspondant aux mécanismes élémentaires d'écoulement visqueux. Cette

approche repose sur le postulat de l'existence de deux potentiels : le potentiel d'énergie libre et le potentiel de dissipation. Le potentiel d'énergie libre spécifique, appelé plus couramment potentiel thermodynamique, est une fonction scalaire (généralement quadratique) des variables d'état que nous écrivons :

$$\text{Équation 20} \quad 2\rho\psi = (\varepsilon - \varepsilon_a - \varepsilon_{th}) : C_0 : (\varepsilon - \varepsilon_a - \varepsilon_{th}) + \sum_i \frac{1}{\mu_i} (\xi_i : C_R : \xi_i)$$

où ρ est la masse volumique, C_0 et C_R sont des tenseurs d'ordre 4 qui décrivent respectivement l'anisotropie élastique et visqueuse. ε_{th} correspond à la déformation thermique $\varepsilon_{th} = \alpha (T - T_0)$, α est le tenseur des dilatations et T_0 la température de référence. Chaque ξ_i est associée à un temps de relaxation τ_i pondéré par μ_i . L'ensemble des ξ_i décrivent un spectre continu. Le potentiel de dissipation a été choisi sous la forme :

$$\text{Équation 21} \quad 2\varphi^* = 2\varphi^*(\omega_i) = \sum_i \frac{\tau_i}{\mu_i} (\omega_i : C_R^{-1} : \omega_i)$$

avec $\omega_i = g(\sigma)\sigma_a + \chi_i$ où $g(\sigma)$ est une fonction non-linéarisante, σ_a la contrainte anélastique et χ_i la force thermodynamique associée à ξ_i . Il est alors possible d'écrire les équations constitutives de ce modèle :

$$\text{Équation 22} \quad \sigma = \rho \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon} = C_0 : (\varepsilon - \varepsilon_a - \varepsilon_{th})$$

$$\text{Équation 23} \quad \sigma_a = \rho \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_a} = -\sigma$$

$$\text{Équation 24} \quad \varepsilon_{th} = \alpha \cdot (T - T_0)$$

$$\text{Équation 25} \quad \dot{\varepsilon}_a = - \frac{\partial \varphi^*}{\partial \sigma_a} = g(\sigma) \sum_i \dot{\xi}_i$$

$$\text{Équation 26} \quad \dot{\xi}_i = - \frac{\partial \varphi^*}{\partial \chi_i} = \frac{1}{\tau_i} (\mu_i g(\sigma) C_R^{-1} : \sigma - \xi_i)$$

La cohérence thermodynamique de ce modèle (inégalité de Clausius-Duhem) a été démontrée par ailleurs [Maire 1996]. Ce modèle se présente donc sous la forme d'un système d'équations différentielles du 1^{er} ordre ayant un nombre de coefficients limité :

- les deux paramètres définissant le spectre,
- les trois tenseurs C_0 , C_R et α représentant respectivement l'élasticité, la viscosité et la dilatation thermique,
- la fonction non-linéarisante $g(\sigma)$.

La description des mécanismes visqueux en un spectre de temps de relaxation présente un attrait certain en se rapprochant des phénomènes décrits pour les polymères. De plus, la formulation permet un découplage des paramètres et donc une identification plus aisée. Ce modèle permet une bonne description du comportement pour des maintiens sous charge mais ne permet pas de décrire de manière rigoureuse les décharges. Cette anomalie est souvent présente dans les modèles de types viscoélastiques non-linéaires mais peut s'avérer gênante dans un calcul de structures où des décharges locales peuvent intervenir.

II.1.3 Synthèse

Cette étude bibliographique nous montre qu'il existe différentes approches pour modéliser le comportement des polymères. La première approche repose sur les lois rhéologiques qui sont implémentées par défaut dans les codes de calcul. Ces lois sont intéressantes par leur facilité de mise en œuvre et permettent de décrire de manière satisfaisante des comportements viscoélastique ou viscoplastique. Leur formulation permet d'adapter, sous forme d'ajout de cellules, la loi au comportement du matériau selon les applications.

La deuxième approche repose sur des lois inscrites dans un cadre thermodynamique. Bien que leur implémentation dans les codes de calcul ne soit pas triviale, elles offrent l'assurance de la rigueur mathématique. Ces lois peuvent être vues comme un "juge de paix" en cas de litige sur une loi plus simple.

II.2 Méthode de mesure de champs

La principale difficulté de l'identification des caractéristiques mécaniques de matériaux souples et transparents comme le polymère constitutif des BPS est la connaissance du champ de déformation dans le plan de sollicitation. Les méthodes trop intrusives telles que les jauges de déformation influent sur le comportement global du polymère. Pour déterminer les déformations dans le plan de sollicitation de l'éprouvette lors d'un essai de traction uniaxial, on peut mettre en œuvre différents procédés d'extensométrie sans contact tels que la corrélation d'images numériques [Charron 2004]. Il en est de même pour la mesure de sous ensembles de ballons dans des conditions proches du vol. La validation des lois de comportement sur structure passe par la connaissance des déplacements 3D de la structure.

Afin de ne pas interférer dans l'essai expérimental, ces déplacements sont mesurés par une méthode de mesure de champs appelée stéréo-corrélation d'images numériques.

Nous présentons maintenant une technique dite de stéréovision qui utilise deux caméras liées de façon rigide et qui permet de mesurer à la fois la forme et les déplacements tridimensionnels d'une pièce. Peu de méthodes de mesure de déplacements permettent à la fois d'obtenir une information tridimensionnelle (dans le plan et hors plan) et d'obtenir des taux de déformations pouvant aller de quelques dixièmes de pour-cent à plusieurs centaines de pour-cent sur la surface de mesure [Garcia 2001].

L'extensométrie optique bidimensionnelle permet la mesure de champs de déplacements d'une surface plane, une caméra enregistre une séquence d'images d'un objet plan. Les déplacements de points répartis à la surface de l'objet sont calculés à partir de l'analyse des images de la séquence.

II.2.1 Corrélation d'images

Deux grandes familles de méthodes existent, le suivi de marqueurs ou de grilles et la corrélation d'images que nous utilisons dans notre étude.

Etant donné deux images correspondant à deux états de déformation d'un objet, pour déterminer le correspondant d'un pixel de la première image dans la seconde, on mesure la ressemblance entre deux pixels en calculant un score de corrélation (critère de ressemblance) déterminé sur leur voisinage (Figure 10). Habituellement, les points traités par corrélation sont répartis suivant une grille virtuelle qui facilite le calcul des déformations à partir des déplacements mesurés.

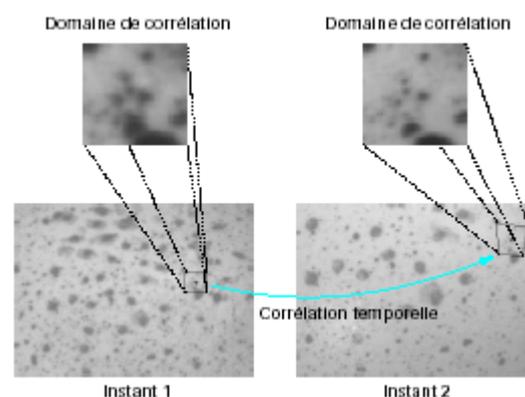


Figure 10 : Corrélation d'images [Orteu 2002]

De par son principe, la technique de corrélation ne peut fonctionner correctement qu'avec des objets présentant une surface avec une texture suffisamment aléatoire. Si l'objet n'est pas naturellement texturé ou si sa texture n'est pas suffisamment discriminante, différentes

techniques existent pour permettre l'utilisation de la corrélation : illumination de la surface avec une source laser pour faire apparaître une structure granulaire (effet speckle), projection de peinture (technique dite du mouchetis), etc.

La méthode de corrélation d'images présente de nombreux avantages :

- la facilité de préparation de la surface de l'objet (projection de peinture en quelques secondes), lorsque cela est nécessaire,
- la densité de l'information obtenue. En théorie, chacun des pixels de la matrice CCD (Charge Coupled Device) peut être apparié par corrélation ce qui fournit un champ de déplacements dense,
- le choix du pas de la grille virtuelle utilisée pour calculer les déformations à partir des déplacements s'effectue au moment du post-traitement des données et peut donc être adapté aux gradients de déformations en présence. C'est là un des gros avantages de la méthode de corrélation par rapport aux méthodes de grille qui imposent le choix du pas de la grille au moment de son dépôt sur l'objet avant déformation.

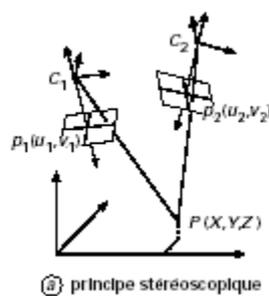
L'extensométrie bidimensionnelle, qui est maintenant couramment utilisée pour des mesures de champs de déplacements bidimensionnels, présente deux inconvénients majeurs : d'abord, elle ne permet de mesurer que des déformations planes, ensuite, d'un point de vue expérimental, elle nécessite que le plan de déformation et le plan image de la caméra soient parallèles et le restent pendant l'essai, ce qui est difficile à garantir. La technique de stéréovision qui est présentée ci-dessous apporte une solution à ces deux problèmes.

II.2.2 Mesure de formes 3D par stéréovision

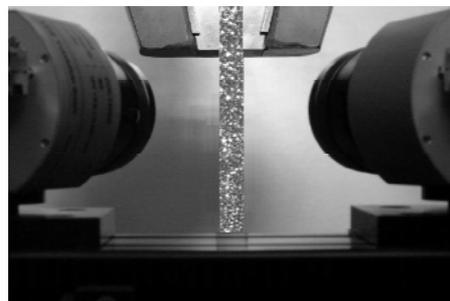
L'utilisation d'une seule caméra ne permet d'accéder qu'à une information bidimensionnelle. L'utilisation de deux caméras (technique de stéréovision) permet quant à elle d'accéder à l'information tridimensionnelle [Grediac 2004].

La stéréovision est basée sur le principe que l'information de profondeur peut être obtenue par triangulation à partir de deux images ayant une partie commune dans leur champ de vue. La Figure 11-a représente les plans images de chacune des deux caméras d'un capteur de vision stéréoscopique. C_1 et C_2 désignent les centres optiques de chacune des caméras (qui, pour des raisons de simplification, sont positionnés derrière le plan image alors qu'ils sont en réalité devant). On constate sur la Figure 11-a que le calcul de la position tridimensionnelle du point P est possible si :

- on sait reconnaître dans les deux images les points p_1 et p_2 qui correspondent à la projection dans les images du même point physique P . Cette phase porte le nom d'appariement ou de mise en correspondance des images ou également de recherche des stéréocorrespondants. C'est la phase critique de la technique de stéréovision,
- on sait calculer les droites C_1p_1 et C_2p_2 dont l'intersection fournit le point P recherché. Cette phase nécessite de connaître les paramètres intrinsèques de chacune des caméras (longueur focale de l'objectif, taille des pixels de la matrice CCD, coefficients pour tenir compte de la distorsion des images induite par l'objectif...) ainsi que la position et l'orientation d'une caméra par rapport à l'autre.



a. Principe stéréoscopique



b. Capteur de vision

Figure 11 : Stéréovision [Orteu 2002]

L'obtention de ces données passe par le calibrage du capteur de vision stéréoscopique. Le calibrage d'une caméra est une étape importante pour la métrologie dimensionnelle par vision artificielle. Calibrer un capteur de stéréovision, constitué de deux caméras liées de façon rigide, consiste à déterminer les paramètres intrinsèques de chacune des caméras, et la position et orientation relative de ces deux caméras. Ces paramètres de calibrage sont nécessaires pour calculer, par triangulation, les coordonnées tridimensionnelles d'un point correspondant à des pixels appariés dans les deux images [Orteu 1997].

II.2.3 Appariement des images stéréoscopiques

Le problème de l'appariement d'une paire d'images stéréoscopiques est un cas particulier du problème général d'appariement d'images.

On peut en effet distinguer deux cas de figure :

- L'appariement d'images acquises par une seule caméra, à des instants différents, sur un objet qui se déforme. On parlera d'appariement temporel, de suivi de pixel ou de

tracking. Ce cas correspond par exemple à la situation rencontrée en extensométrie bidimensionnelle ;

- l'appariement de deux images acquises, à un instant donné, par deux caméras stéréoscopiques liées de façon rigide. On parlera de mise en stéréocorrespondance.

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser à ce second problème.

Nous verrons plus loin que la mesure de champs de déplacements 3D par stéréovision met en œuvre à la fois une technique d'appariement temporel et une technique de mise en stéréocorrespondance.

II.2.3.1 Méthode utilisant la corrélation d'images (stéréocorrélation)

La technique de corrélation peut être utilisée pour rechercher des stéréocorrespondants à partir d'une paire d'images stéréoscopiques. On parle alors de stéréocorrélation. À noter qu'une différence essentielle distingue la mise en correspondance temporelle par corrélation (deux images acquises à des instants différents par une même caméra) de la mise en stéréocorrespondance par corrélation (deux images acquises au même instant par un capteur de vision stéréoscopique) : dans le cas de la stéréovision, il existe une contrainte géométrique qui permet de guider la recherche du stéréocorrespondant [Sutton 2000].

Grâce à cette propriété géométrique importante, la recherche du stéréocorrespondant d'un point de l'image gauche se ramène à une recherche 1D dans l'image droite (le long de la droite associée) plutôt qu'une recherche 2D (recherche exhaustive dans toute l'image droite). La prise en compte de cette contrainte permet d'accélérer et de rendre plus robustes les algorithmes de mise en stéréocorrespondance. De plus, une opération dite de rectification des images permet de transformer les images initiales en images dites rectifiées de sorte que les pixels stéréocorrespondants soient sur la même ligne dans les deux images rectifiées (Figure 12-a). Cette opération de rectification préalable (non obligatoire) simplifie la mise en œuvre de la technique. À noter que l'on appelle disparité la différence des numéros de colonne des pixels stéréocorrespondants dans les images rectifiées (leurs numéros de ligne sont les mêmes). La notion de disparité est abondamment utilisée en stéréoscopie.

Les choses sont un peu plus compliquées lorsque l'on prend en compte la distorsion induite par l'objectif (ce qui est indispensable pour des applications de métrologie). Dans ce cas, il faut d'abord corriger les points image de leur distorsion, en utilisant les coefficients de

distorsion de chacune des caméras calculés lors de l'étape de calibrage, pour se ramener dans la configuration idéale, dite de la projection perspective, de la Figure 11-a.

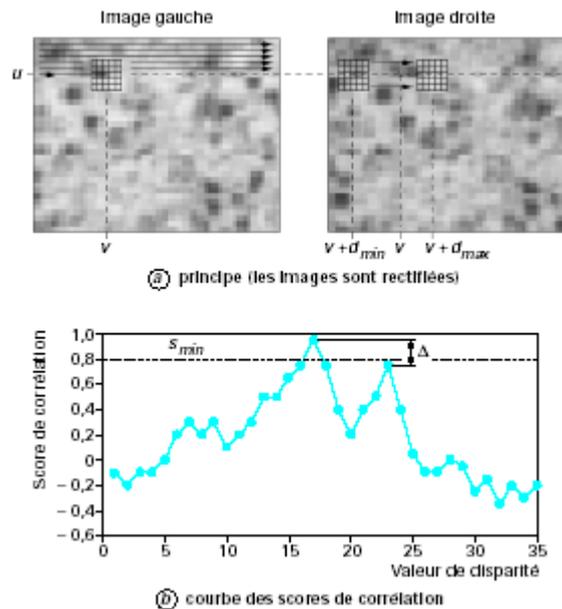


Figure 12 : Appariement par stéréocorrélation [Orteu 2002]

Le principe de la stéréo-corrélation est décrit sur la Figure 12-a : pour déterminer le correspondant d'un pixel de la première image dans la seconde, on mesure la ressemblance entre deux pixels en calculant un score de corrélation déterminé sur leur voisinage. En pratique, les voisinages considérés sont des domaines rectangulaires centrés sur les points examinés. Étant donné un pixel dans la première image et son voisinage associé, son correspondant dans la seconde image est celui qui maximise le score de corrélation le long de la ligne (Figure 12-b).

Dans la mise en œuvre classique de la technique de stéréocorrélation, la corrélation s'effectue sur des domaines rectangulaires de taille fixée a priori (Figure 12-a). Pour des applications de métrologie, où une grande précision est recherchée, une précision subpixel (jusqu'à 1/100 pixel) est obtenue en utilisant des domaines dont la forme s'adapte dynamiquement à l'information présente dans les images (prise en compte de la courbure et de l'orientation des surfaces à mesurer) [Garcia 2001] et en mettant en œuvre des techniques d'interpolation (soit des niveaux de gris des images, soit des courbes de score de corrélation au voisinage du maximum trouvé).

La technique de stéréocorrélation permet d'obtenir une carte dense d'appariements (en théorie chacun des pixels de la matrice CCD peut être apparié), ce qui conduit ensuite, après triangulation, à une carte dense de points 3D. À noter que cette technique permet également d'obtenir une reconstruction 3D éparsée si la mise en stéréocorrespondance ne porte que sur un nombre limité de points choisis par l'utilisateur.

Remarque : Lorsqu'il s'agit de mesurer la forme 3D d'un objet statique, la grille ou le mouchetis n'ont pas besoin d'être solidaires de la surface de l'objet. On peut tout simplement projeter la grille ou le mouchetis sur l'objet (avec un projecteur de diapositives) ce qui permet ensuite la mise en correspondance des images acquises par le capteur de vision stéréoscopique. On rejoint alors les méthodes de reconstruction 3D par lumière structurée qui peuvent également fonctionner avec une seule caméra.

II.2.4 Triangulation

À partir de deux points p_1 et p_2 correctement appariés, la reconstruction 3D s'effectue par triangulation, en calculant l'intersection dans l'espace des droites C_1p_1 et C_2p_2 (Figure 11-a).

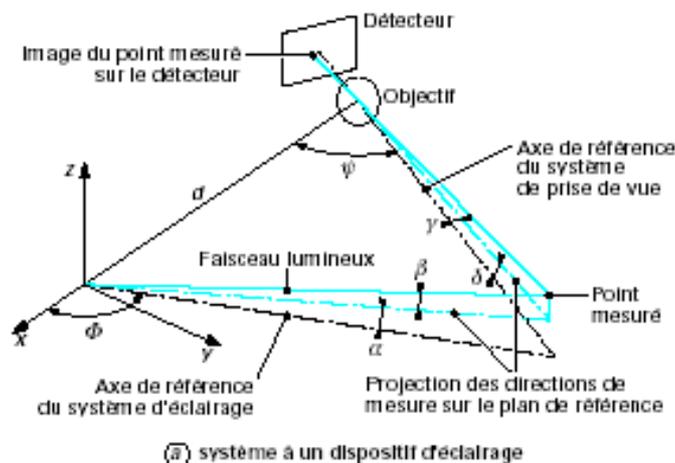


Figure 13 : Triangulation optique [Orteu 2002]

La mesure des positions des points par triangulation se fait par la détermination de l'intersection de deux directions : celle de l'éclairage du point à mesurer sur la pièce et celle d'où l'on voit le point éclairé du système de mesure (Figure 13) [Charron 2004].

II.2.5 Précision de mesure

La précision de mesure de formes 3D par stéréovision dépend de plusieurs facteurs :

- la qualité des caméras et leur résolution ;

- la configuration des caméras (angle formé par leur axe optique) qui conditionne la précision de triangulation ;
- la précision du calibrage du capteur de vision stéréoscopique ;
- la précision avec laquelle les points de mesure sont extraits dans chacune des images stéréoscopiques.

Ce dernier paramètre dépend du type de point de mesure choisi. L'extraction de marqueurs ou des nœuds d'une grille peut s'effectuer avec une précision de l'ordre de 1/30 pixel. La technique de corrélation permet d'apparier des points avec une meilleure précision (jusqu'à 1/100 pixel).

Avec des caméras numériques de résolution $1\,024 \times 1\,024$, il est possible d'obtenir par stéréocorrélation une précision de l'ordre de $D/25\,000$ (D étant la plus grande dimension de l'objet vu plein champ par les caméras), c'est-à-dire $\pm 20\ \mu\text{m}$ sur un objet de 50 cm.

Il convient de préciser que la technique de stéréovision n'est pas la technique de numérisation 3D qui fournit la meilleure précision. Pour ne parler que des techniques utilisant des caméras, il est préférable d'utiliser une technique de type vidéogrammétrie (photogrammétrie à partir d'images prises par une caméra ou un appareil photo numérique), qui utilise un grand nombre de vues de l'objet (possibilité de tourner autour de l'objet pour en obtenir la forme complète) et avec laquelle des précisions de l'ordre de $D/100\,000$ sont atteignables. La photogrammétrie [Charron 2004] est une technique qui permet de déterminer les dimensions, la forme et les positions d'objets à partir de vues en perspective de ces objets enregistrées photographiquement, c'est une méthode très proche de la triangulation. Par contre, la vidéogrammétrie (une caméra qui se déplace) ne permet pas de traiter le cas de phénomènes dynamiques et ne permet donc pas d'accéder au champ de déplacements 3D. De ce point de vue là, la stéréovision est un outil très performant comme nous allons le voir par la suite.

II.2.6 Mesure 3D de déformations par stéréocorrélation et appariement temporel

La technique de stéréovision permet de mesurer l'évolution de la forme 3D d'un objet en enregistrant plusieurs paires stéréoscopiques relatives à différents états de déformation de cet objet. Néanmoins, le but généralement poursuivi est la mesure des déformations de surface, qui peut être obtenue en suivant au cours du temps le déplacement de certains points répartis sur la surface de l'objet (on parlera de champ de déplacements). L'extensométrie bidimensionnelle permet d'accéder au champ de déplacements 2D à la surface d'un objet plan. La technique de stéréovision permet d'accéder au champ de déplacements 3D d'un objet

de forme quelconque en couplant la stéréovision par corrélation de pixels (stéréocorrélation) pour accéder à l'information tridimensionnelle et la corrélation plus classique (appariement temporel) pour mettre en correspondance des images acquises à des instants différents. La mesure proprement dite fournit des déplacements à partir desquels il est possible de calculer ensuite des déformations.

II.2.6.1 Mesure du champ de déplacements 3D

Le principe de la méthode est résumé sur la Figure 14 dans le cas de deux paires stéréoscopiques (une avant déformation et une après). Les étapes 1 et 3 permettent d'obtenir la forme 3D de l'objet aux instants t et $t+\Delta t$. L'étape 2 permet d'établir une relation temporelle entre chacun des points 3D constituant les deux nuages de points 3D correspondant aux instants t et $t+\Delta t$ (Figure 15-a).

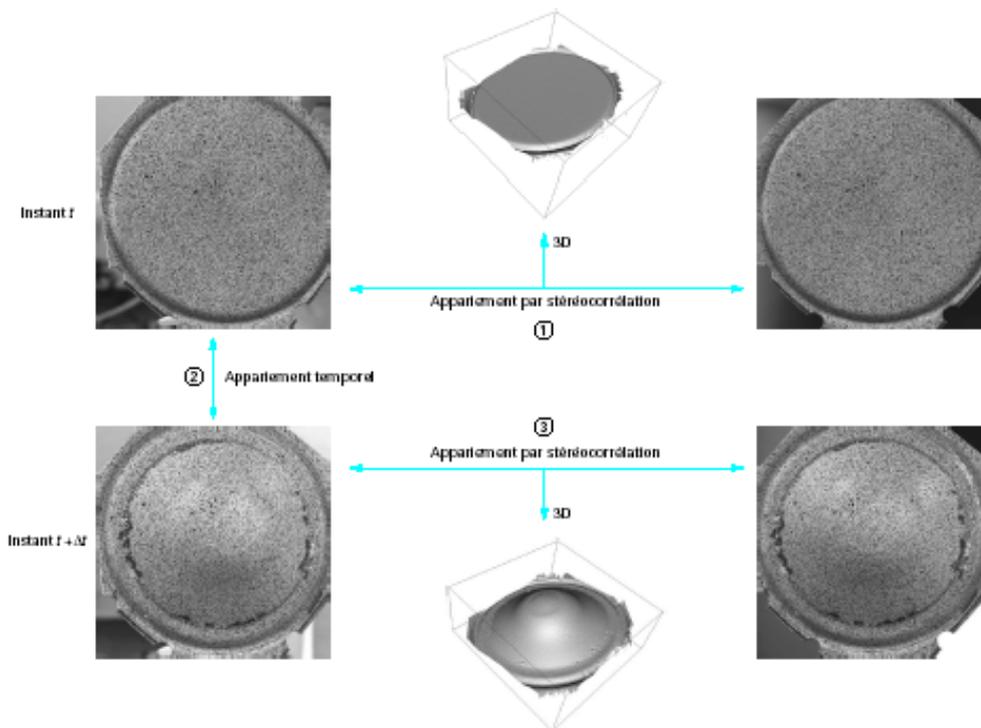


Figure 14 : Champ de déplacements 3D par stéréo-corrélation et appariement temporel
[Orteu 2002]

Habituellement, les étapes 1, 2 et 3 se font de façon séquentielle, ce qui a pour conséquence de cumuler les erreurs d'appariement de chacune des étapes. Pour minimiser globalement les erreurs commises, il est possible de mettre en œuvre une technique globale d'appariement qui exploite simultanément les quatre images de la Figure 14 (méthode de stéréotracking combiné).

Pour que l'appariement temporel par corrélation de pixels puisse fonctionner, il ne faut pas que le taux de déformation soit trop important (typiquement $< 30\%$). Pour mesurer des grandes déformations ($> 100\%$), il est nécessaire d'acquérir plusieurs paires d'images stéréoscopiques et d'effectuer un suivi temporel des pixels à travers les différentes images de la séquence. Habituellement, les points de l'image gauche à corrélérer sont répartis suivant une grille virtuelle, ce qui fournit au final un champ des déplacements 3D en chacun des nœuds de la grille. Cette grille sera exploitée par la suite pour le calcul des déformations (Figure 15-b).

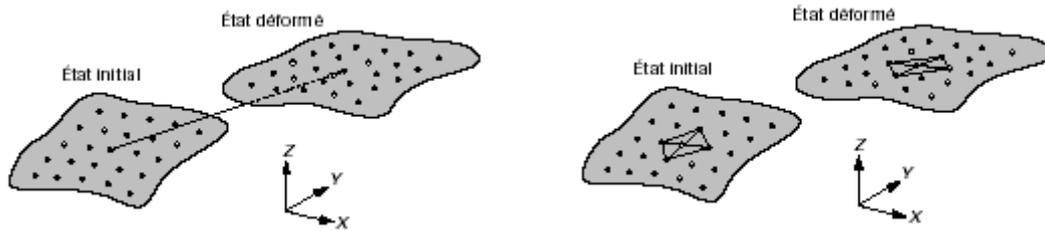


Figure 15 (a) - Mesure du champ de déplacements 3D. (b) - Calcul du champ de déformations [Garcia 2001]

II.2.6.2 Calcul du champ de déformations

La technique de stéréovision fournit un champ de déplacements 3D (Figure 15-a). Le champ de déformations est ensuite calculé à partir des déplacements au moyen d'un schéma numérique de dérivation discrète. Notons que les déformations peuvent être calculées en utilisant un code aux éléments finis. Le champ de déplacements mesuré fournit la valeur du déplacement en chaque point d'une grille virtuelle. À partir de cette grille, on crée un maillage éléments finis qui va servir de support au calcul des déformations (Figure 15-b). La valeur du déplacement mesuré est imposée en chaque nœud du maillage et le postprocesseur éléments finis calcule le champ des déformations.

Les déformations sont obtenues par dérivation discrète à partir des déplacements mesurés en un certain nombre de points d'un maillage. La déformation en un point du maillage est calculée à partir des points situés dans un voisinage (on parle de domaine d'intégration). La précision des déformations dépend du schéma de dérivation utilisé (forme du domaine), de la précision avec laquelle les déplacements sont mesurés et de la base de calcul (pas de la grille utilisée).

II.2.7 Synthèse

Cette synthèse bibliographique nous a permis de prendre connaissance des méthodes de mesure de champs adaptées à notre étude. Le procédé de corrélation d'images numérique a été employé pour caractériser le matériau alors que la stéréo-corrélation a été mise en pratique lors des essais expérimentaux sur structure. La description du système utilisé ainsi que ses performances sont détaillées dans le chapitre III.

Références bibliographiques

- [Besson 2001] Besson J., Cailletaud G., Chaboche J.L., Forest S., "Mécanique non linéaire des matériaux" éditions Hermes, 2001
- [Bruller 1995] Bruller O.S. " Common characterization of stress relaxation and creep " 1st International Conference on Mechanics of Time Dependant Materials, 1995
- [Casteras 1997] Casteras C., "Dossier de définition des ballons pressurisés sphériques Ø10" DD-BL-420 indice a 6/97 document interne CNES
- [Charron 2004] Charron J.L., Techniques de l'Ingénieur "Mesures sans contact – Méthodes optiques (partie 1 et 2)" R1332 et R1333, juin 2004.
- [Chen 2000] Chen T., " Determining a Prony series for a viscoelastic material from time varying strain data " Langley Research Center, Hampton-VA, NASA TM-2000-210123 (2000)
- [Couarraze 2000] Couarraze G., Grossiord J.L., " *Initiation à la rhéologie* ", TEC&DOC (2000)
- [Findley 1967] Findley W.N., Lai J.S., "A modified superposition principe applied to creep of non-linear viscoelastic material under abrupt changes in state of combined stress", Transactions of Society of Rheology, vol. 11, n°3, 1967.
- [Garcia 2001] Garcia D., "Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréocorrélation d'images", Thèse de l'INP Toulouse (2001).
- [Guigue 2001] Guigue P., "Revue d'avancement BPS-VORCORE" 04/07/2001 document interne CNES
- [Grediac 2004] Grédiac M., " The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations " Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 35, Issues 7-8, July 2004, Pages 751-761

-
- [Lapierre 2003] Lapierre G., "Etude et modélisation du comportement viscoélastique des ballons pressurisés stratosphériques", rapport de DEA ENIT UPS, juin 2003
- [Lemaitre 2001] Lemaitre J., Chaboche J.L., " *Mécanique des matériaux solides* " DUNOD (2001)
- [Lou 1971] Lou Y.C., R.A. Schapery, "Viscoelastic characterization of a non linear fiber reinforced plastic", Journal of composite materials, vol. n°5, pp208-234,1971.
- [Maire 1992] Maire J.-F., "Etude théorique et expérimentale du comportement de matériaux composites en contraintes planes", Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 1992.
- [Maire 1996] Maire J.-F., Lesné O., Petipas C., "Une nouvelle approche de la modélisation du comportement visqueux des composites organiques", Comptes rendus des JNC10, Paris, 1996.
- [Nowick 1972] Nowick A.S., Berry B.S., "Anelastic relaxation in crystalline solids" Materials science series 1972
- [Orteu 1997] 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)
- [Orteu 2002] Orteu J.J., Techniques de l'Ingénieur "Mesure 3D de formes et de déformations par stéréovision" BM7015, avril 2002
- [Park 1999] Park S.W., Schaper R.A., " Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions, Part I - a numerical method based on Prony series " International Journal of Solids and Structures – PERGAMON, 1999
- [Petipas 2000] Petipas C., "Analyse et prévision du comportement à long terme des composites fibres de carbone / matrice organique", Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté (thèse ONERA), 2000.
-

- [Schapery 1966] Schapery R.A., "A theorie of non linear thermoelasticity based on irreversible thermodynamics", Proc. of 5th U.S. Nat. Cong. of Appl. Mech., ASME, pp 551, 1966.
- [Schapery 1969] Schapery R.A., "On the characterization of non linear viscoelastic materials.", Journal of Polymer Eng. Sciences, vol. n°9, pp 295-310, 1969.
- [Sutton 2000] Sutton M. A., McNeill S. R., Helm J. D., Chao Y. J., " Advances in tow-dimensional and three-dimensional computer vision ". Photomechanics, topics applied physics, 77 :323-372, 2000
- [Thiebaud 1994] Thiébaud F., "Modélisation du comportement global en sollicitations quasi-statiques d'un composite stratifié verre epoxy : aspects théorique et expérimental", Thèse de doctorat de l'université de Franche Comté, 1994.
- [Vinet 1997] Vinet A., "Identification d'une loi de comportement viscoélastique-viscoplastique pour des stratifiés aéronautiques. Prévission du comportement à long terme à l'aide d'essais accélérés", thèse de doctorat, Université de POITIERS, 1997.

Chapitre 3

OUTILS EXPERIMENTAUX D'INVESTIGATION

| | | |
|--------------|---|----|
| <i>III.1</i> | <i>Dispositif expérimental Nirvana</i> | 47 |
| III.1.1 | Description générale | 47 |
| III.1.2 | Mise au point du dispositif | 50 |
| III.1.4 | Synthèse | 58 |
| <i>III.2</i> | <i>Système de mesure par stéréo-corrélation d'images numériques</i> | 58 |
| <i>III.3</i> | <i>Caractérisation du matériau</i> | 60 |
| III.3.1 | Présentation du matériau | 60 |
| III.3.2 | Caractérisation mécanique du matériau | 62 |
| III.3.3 | Synthèse | 67 |

III OUTILS EXPERIMENTAUX D'INVESTIGATION

Ce chapitre présente les différents moyens expérimentaux utilisés dans le cadre de cette thèse. Le dispositif expérimental Nirvana permet la réalisation d'essais sur des sous ensembles de ballons [Siguier 2003]. Il a été adapté afin de réaliser des mesures de champs de déplacements sur des structures de BPS. Un travail d'investigation a été mené sur la compréhension et la maîtrise des conditions d'essais.

Dans un second temps, nous décrivons le système de stéréo-corrélation employé pour notre étude ainsi que ses performances.

Enfin, nous exposerons les méthodes employées pour caractériser notre matériau.

III.1 Dispositif expérimental Nirvana

III.1.1 Description générale

L'enceinte Nirvana a été conçue dans le souci de pouvoir effectuer des essais mécaniques, de diffusion ou d'étanchéité sur des grands sous-ensembles de ballons. Sur un diamètre utile de 1450 mm et une hauteur de plus de 1 m, il est possible de tester des éléments simples ou complexes de ballons.

La géométrie de cette enceinte est schématiquement celle de deux demi-cylindres de même diamètre chacun fermé à son extrémité (Figure 16).



Figure 16 : Le dispositif expérimental NIRVANA

Les deux parties de l'enceinte sont séparées par l'échantillon qui joue le rôle de membrane d'étanchéité entre la partie haute et basse. Il est ainsi possible d'introduire deux atmosphères différentes et d'effectuer un différentiel de pression entre ces deux parties (Figure 17).

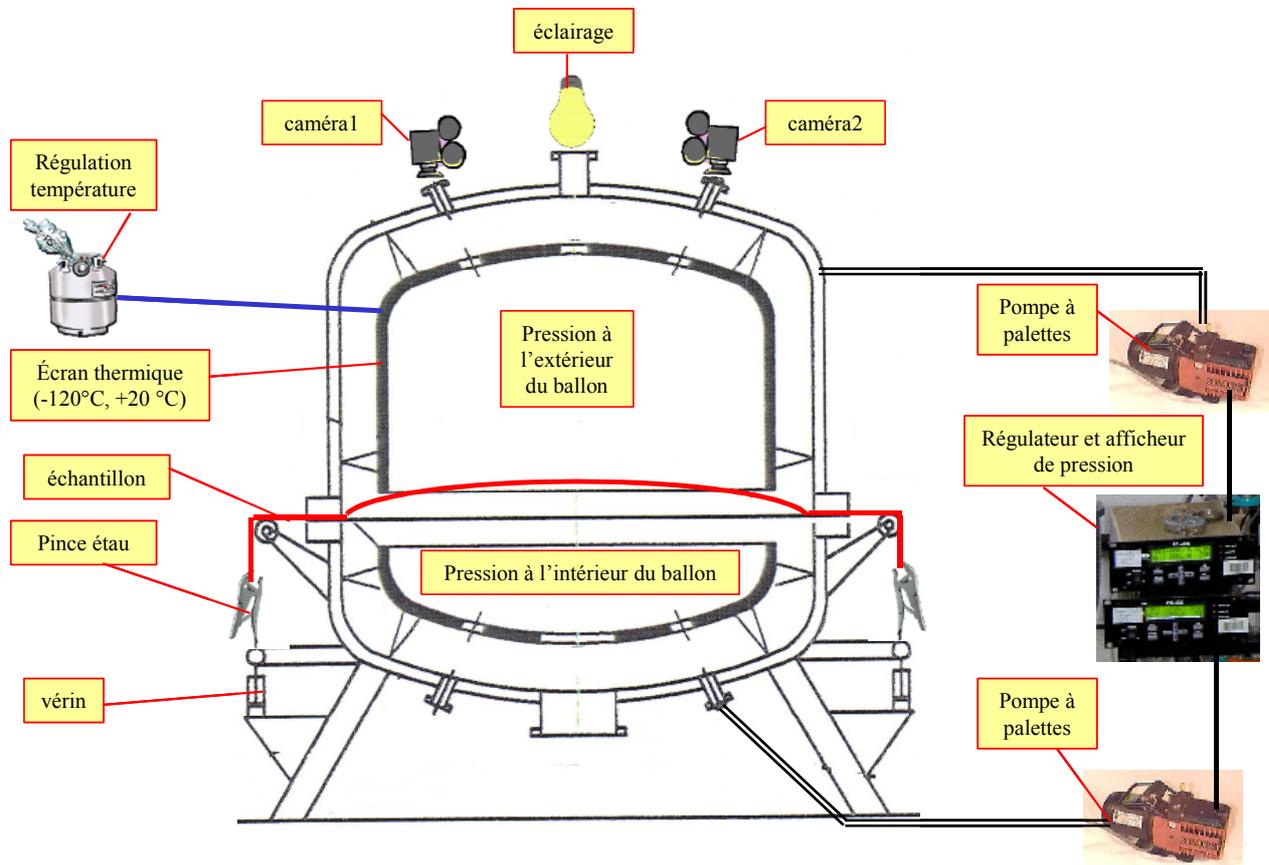


Figure 17 : Vue en coupe du dispositif expérimental NIRVANA

La périphérie de l'enceinte est constituée d'une double paroi isolée (écran thermique) sous vide scellé (Figure 17) qui garantit une isolation thermique avec l'atmosphère extérieure de l'enceinte. Un dispositif de refroidissement de l'enceinte par circulation d'azote liquide régule la température entre +20 et -120°C.

Un dispositif constitué de pinces d'accrochage de l'échantillon et de trois vérins pneumatiques (Figure 17 et Figure 18) asservis permet d'appliquer une contrainte dans la peau de l'échantillon.

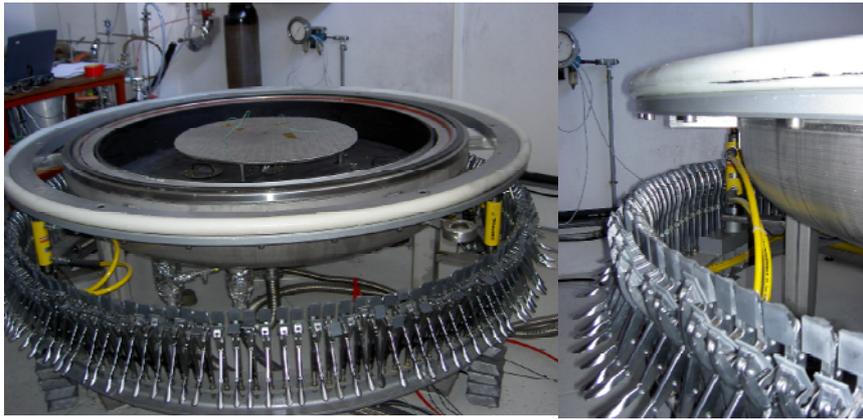


Figure 18 : Système de mise en pré-tension : 3 vérins pneumatiques et 150 pinces étouffantes.

Plusieurs types d'expériences sont réalisables à différentes températures :

- Étude de diffusion des gaz au travers de films à l'aide d'un spectromètre de masse,
- étude d'étanchéité des assemblages ou des zones polaires des ballons à l'aide d'un spectromètre de masse,
- test d'éclatométrie et de suivi de la déflexion de l'échantillon en fonction du différentiel de pression,
- essai de longue durée avec différentiel de pression constant.

Les pressions absolues dans les parties haute et basse sont assurées par 2 pompes à palettes indépendantes. Des contrôleurs à affichage (Figure 19) assurent la régulation des parties hautes et basses.

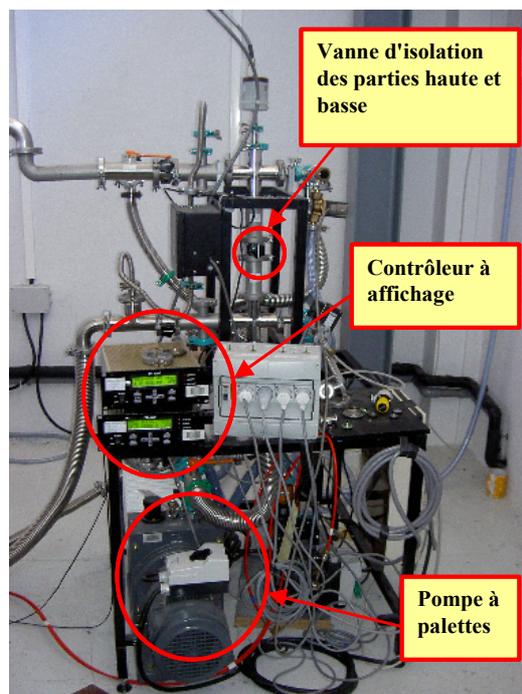


Figure 19 : Système de régulation de pression

III.1.2 Mise au point du dispositif

Différentes modifications ont été effectuées afin de réaliser des essais exploitables dans le cadre de cette étude.

III.1.2.1 Utilisation de la stéréo-corrélation

Nous décrivons dans ce chapitre les procédures développées pour l'utilisation de la stéréo-corrélation sur le dispositif expérimental Nirvana.

III.1.2.2 Positionnement des caméras

La mesure des déplacements in-situ lors d'un essai à basse température et sous des pressions inférieures à la pression atmosphérique nécessite de positionner les caméras à l'extérieur de l'enceinte, les images étant prises au travers d'hublots. Les caméras sont fixées sur des supports de manière à obtenir le plus grand champ de visualisation possible de l'échantillon (Figure 20).



Figure 20 : Système de fixation des caméras

Le champ de vision des caméras est circulaire alors que les passages prévus dans l'enceinte sont elliptiques. Nous avons donc positionné les caméras à l'aide du système de fixation permettant des mouvements dans les 3 dimensions. Cette étape est délicate car il faut d'une part avoir le champ de vision le plus important possible et, d'autre part, avoir le centre du champ de vision de chaque caméra confondu. Un bon compromis a été trouvé et permet une mesure optimale des déplacements des échantillons testés avec un champ mesuré de forme elliptique de grand rayon 600mm et de petit rayon 500mm (Figure 21).

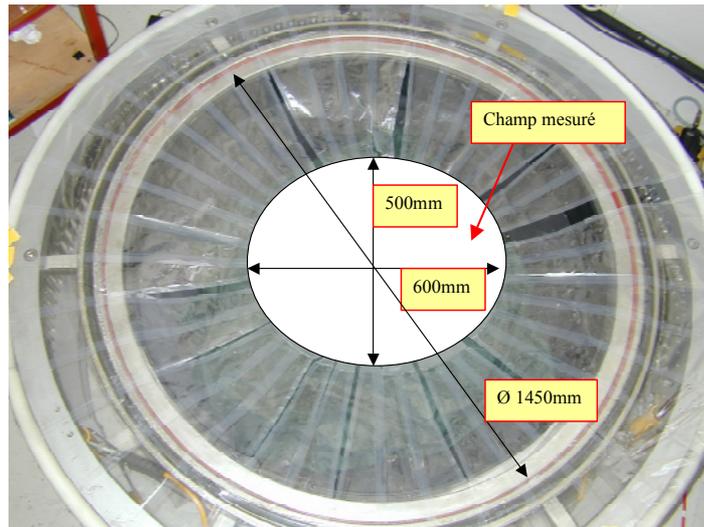


Figure 21 : Description du champ de mesure

III.1.2.3 Eclairage de l'échantillon

Le polymère constitutif des BPS est un matériau de type semi-réfléchissant spéculaire. Lorsque l'éclairage est dirigé vers l'échantillon, chaque caméra récupère un reflet spéculaire dans une zone précise.

Ce reflet spéculaire entraîne une surexposition lumineuse des zones concernées qui ne permet pas au système de mesure par stéréo-corrélation de mesurer les déplacements à l'intérieur de ces zones. La surface totale de l'échantillon mesurée est alors réduite de près de 40%.

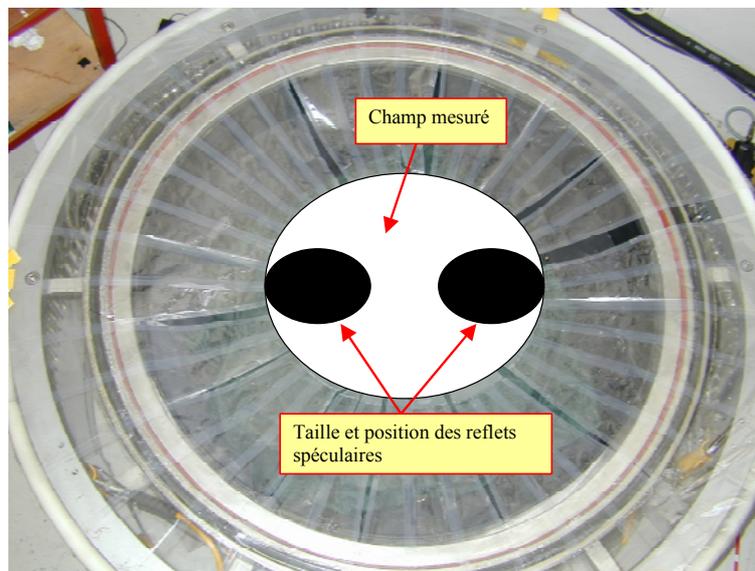


Figure 22 : Description des reflets spéculaires

Nous avons effectué des tests en agissant sur les éléments suivants : la puissance lumineuse, le type, l'épaisseur et la superposition de filtres diffusants entre l'éclairage et l'échantillon.

Nous avons aussi testé, en collaboration avec le DOTA (Département optique théorique et appliquée) de l'ONERA Toulouse, un système de lentilles divergentes afin d'obtenir un disque de lumière uniforme de 600mm de diamètre au centre de l'éprouvette.

Le résultat obtenu est légèrement meilleur mais la tâche spéculaire est toujours présente.

La solution adoptée pour supprimer ce reflet est de déposer une couche uniforme de peinture grise sur la zone à mesurer [Mistou 2003] afin de rendre l'échantillon réfléchissant et diffusant (Figure 23).

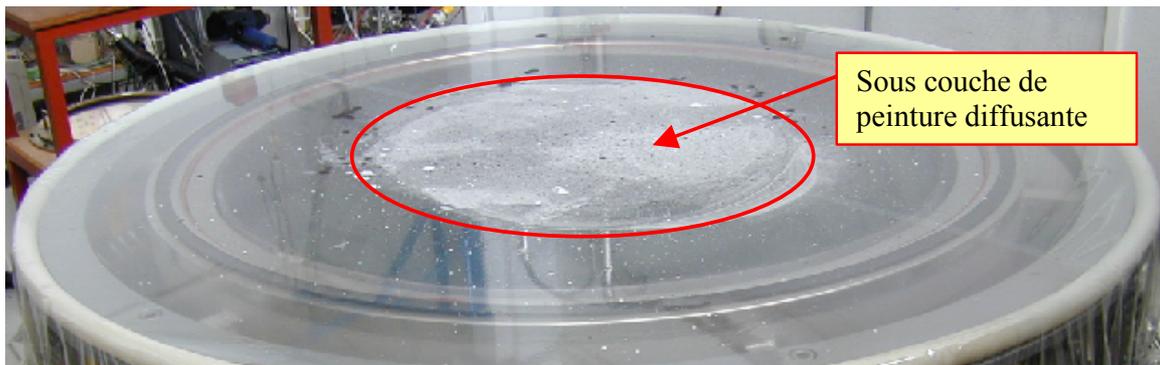


Figure 23 : Principe de diffusion de la lumière

III.1.2.4 Dépôt du mouchetis

La mesure par stéréo-corrélation d'un échantillon nécessite de déposer un mouchetis sur cet échantillon car sa surface ne présente pas une texture aléatoire [Violettes 2005].

La peinture utilisée pour le mouchetis ne doit pas modifier le comportement mécanique du matériau. Nous avons donc conçu une peinture adaptée au matériau à partir de pigments noirs et blancs dans un solvant à base d'acétate d'éthyle, produit couramment utilisé au CNES pour le nettoyage des ballons.

Contrairement aux essais de caractérisation du matériau (paragraphe III.3.2), la large zone d'application de la peinture (600mm x 500mm) nécessite la fabrication de la peinture plutôt que l'utilisation d'aérosols qui s'avèrent plus coûteux et moins adaptés.

Nous déposons ensuite, de manière aléatoire, la peinture sur la sous-couche diffusante de manière à obtenir des points de peinture noirs et blancs de différentes tailles (Figure 24).



Figure 24 : Mouchetis déposé sur l'échantillon

Ce mouchetis a été testé expérimentalement afin de vérifier la cohérence des résultats de la mesure des déplacements et du calcul des déformations avec différents niveaux de précision de mesure.

III.1.2.5 Etude de la pré-tension

La pré-tension est un effort appliqué en périphérie de l'échantillon afin de simuler la présence du reste du ballon et d'avoir une contrainte de peau équivalente à celle présente dans le ballon en vol (Figure 25)

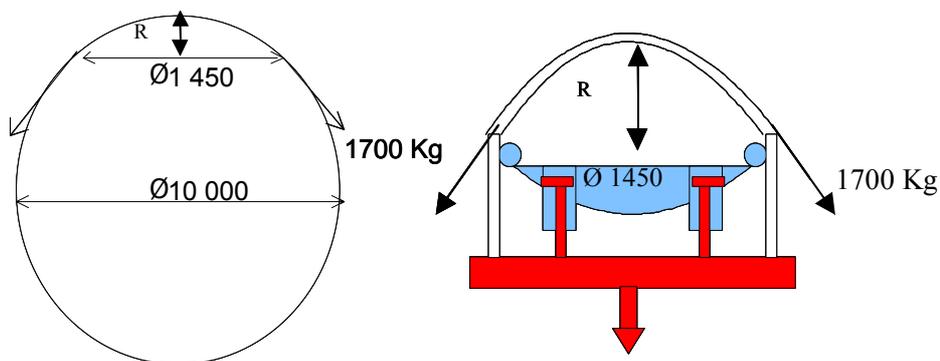


Figure 25 : application de la contrainte de peau sur l'échantillon testé

Afin de bien comprendre l'importance de la pré-tension lors d'un essai ainsi que son influence, il est nécessaire de présenter le déroulement d'un essai ainsi que les différentes phases qui nous ont permis de bien la maîtriser.

La valeur de la pré-tension appliquée est calculée de façon à reproduire la contrainte présente dans un ballon complet.

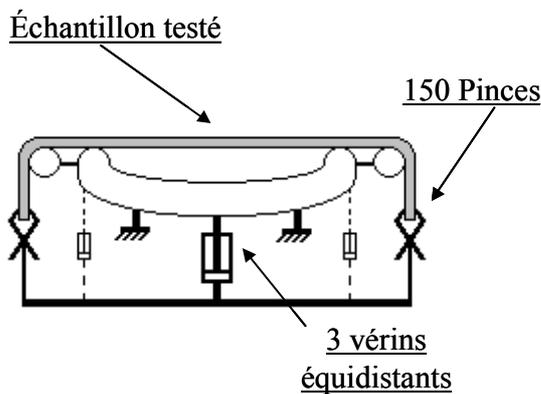
Les caractéristiques que nous avons reproduites sont celles d'un ballon pressurisé de 10 m de diamètre pressurisé à 15hPa. Cette valeur correspond à une contrainte de peau de 75Mpa inférieure de 25% à la limite élastique du matériau. C'est le critère de dimensionnement des BPS.

III.1.2.5.1 Déroulement des premiers essais

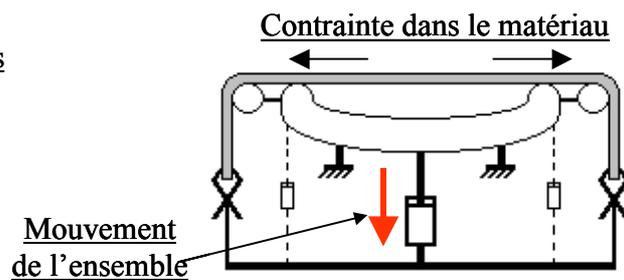
Les premiers essais réalisés consistaient à appliquer la pré-tension sur le film après sa mise en place sur la partie basse de NIRVANA (Figure 26 étape 1). Après avoir positionné la partie haute, nous effectuons le vide dans l'enceinte à environ 200hPa (Figure 26 étape 2).

A ce niveau de pression, la force qui s'applique sur l'échantillon au niveau du système de bridage (Figure 27) est d'environ 14 tonnes.

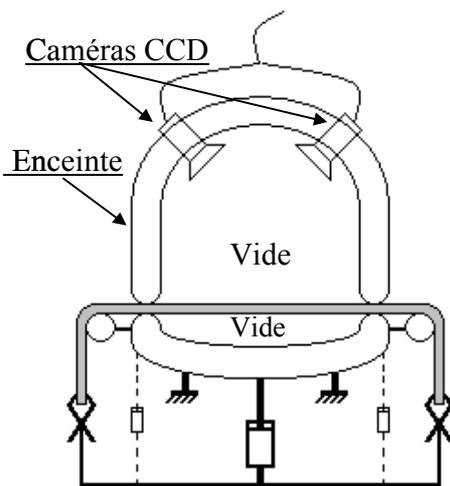
Étape 0 : Mise en place du film



Étape 1 : Mise en pré-tension



Étape 2 : Mise sous vide



Étape 3 : Mise en pression

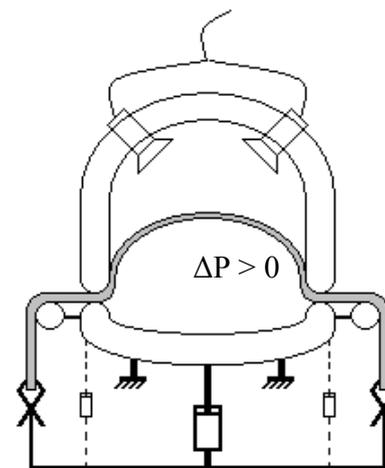


Figure 26 : Déroulement d'un essai NIRVANA

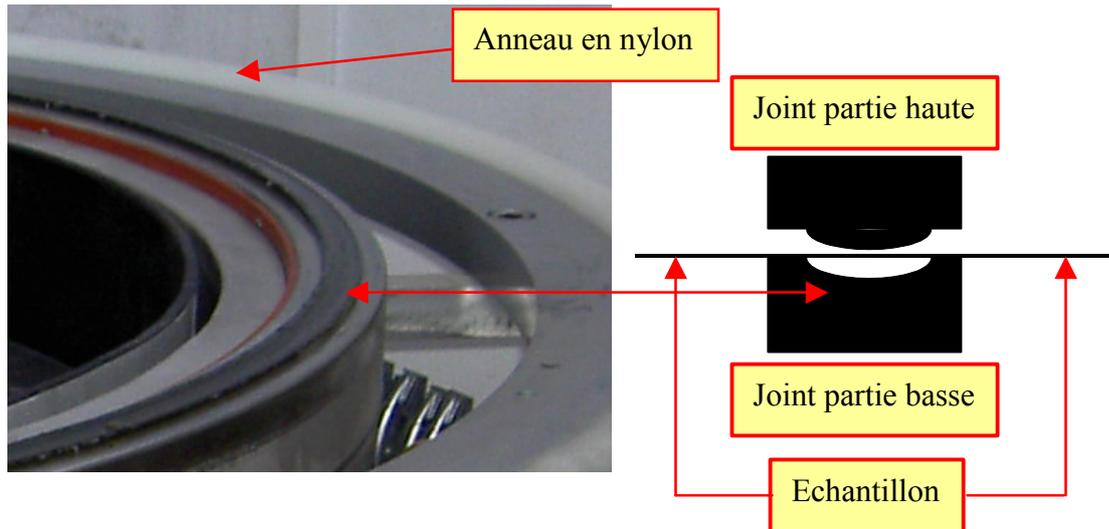


Figure 27 : Système de bridage de l'échantillon

A ce stade, l'échantillon peut être considéré comme encastré à sa périphérie.

On applique ensuite la différence de pression entre la partie haute et basse de l'enceinte, l'échantillon assurant l'étanchéité (Figure 26 étape 3). Ce différentiel de pression engendre une contrainte supplémentaire sur l'échantillon.

Dans cette configuration d'essai, on considère deux systèmes isolés. Le premier système correspond à la membrane uniquement soumise à la pré-tension. Le deuxième système correspond à la membrane soumise à la pré-tension à laquelle vient s'ajouter une contrainte due au différentiel de pression (ΔP).

Un calcul analytique couplé à un calcul EF nous a permis de vérifier que la contrainte totale dans la membrane est égale à la contrainte due à la pré-tension à laquelle s'ajoute la contrainte due au différentiel de pression.

Pour que la contrainte de peau dans l'échantillon soit représentative de celle présente dans le ballon complet équivalent, la pré-contrainte à appliquer en début d'essai (Figure 26 Etape 1) doit inclure la contrainte due au ΔP (Figure 26 Etape 3) à la fin de l'essai. Dans les conditions d'essai ainsi décrites, il n'est pas possible de faire varier la pré-tension au cours de l'essai car l'échantillon est encastré.

III.1.2.5.2 Mise en place des essais avec variation de la pré-tension

Pour obtenir une configuration représentative d'un BPS à différents niveaux de pression, il est nécessaire de pouvoir modifier la pré-tension en cours d'essai. Pour cela, nous avons rendu glissant le passage de l'échantillon entre les 2 joints et sur l'anneau nylon en y déposant de la graisse à vide. Cette procédure permet de diminuer les frottements et permet au film de glisser

entre les joints. Cependant, des frottements persistent et il est nécessaire de les quantifier pour maîtriser la contrainte de peau dans l'enceinte.

III.1.2.5.3 Quantification des frottements

La perte d'effort due aux frottement sur le joint et l'anneau est mesurée par un capteur d'efforts situé à l'intérieur de l'enceinte sur lequel est fixé une bande de notre polymère de 50 mm de large à laquelle on accroche des masses (Figure 28).

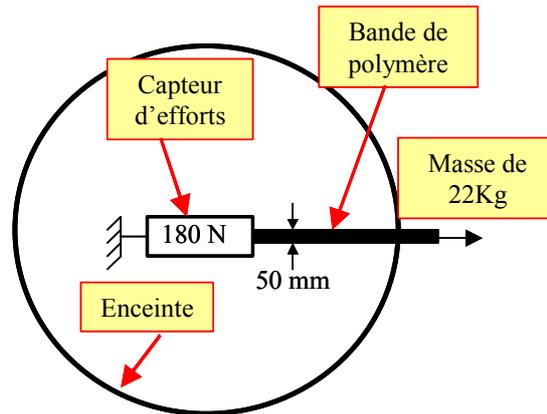


Figure 28 : Procédure de mesure des frottements sur le joint et l'anneau (vue de dessus du dispositif Nirvana)

La réduction du niveau d'effort mesuré peut être considérée comme constante au cours de l'essai car :

- le niveau de pression dans l'enceinte est constant,
- la graisse à vide est répartie de façon homogène sur le joint.

Un calcul EF a été réalisé afin de simuler un essai au cours duquel on fait varier la pré-tension. Ce type de simulation a permis de valider le fait que la contrainte de peau dans l'échantillon simulé est la même que dans un BPS réel.

Afin de vérifier qu'un échantillon est représentatif d'une calotte de BPS, il faut à présent contrôler que la forme de l'échantillon soit bien sphérique.

III.1.2.5.4 Vérification de la sphéricité de l'échantillon

L'objectif de cette étude est de vérifier que la forme des échantillon soumis à des conditions expérimentales données sont bien sphérique.

La mesure par stéréo-corrélation du déplacement d'un échantillon soumis à un ΔP et à une pré-tension le long d'une section (Figure 29) est représenté sur la Figure 30.

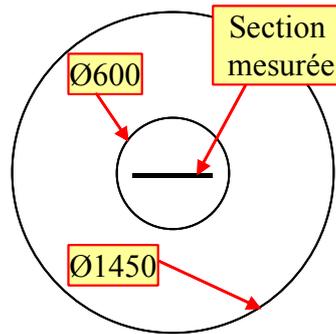


Figure 29 : Description de la section mesurée (vue de dessus du dispositif Nirvana)

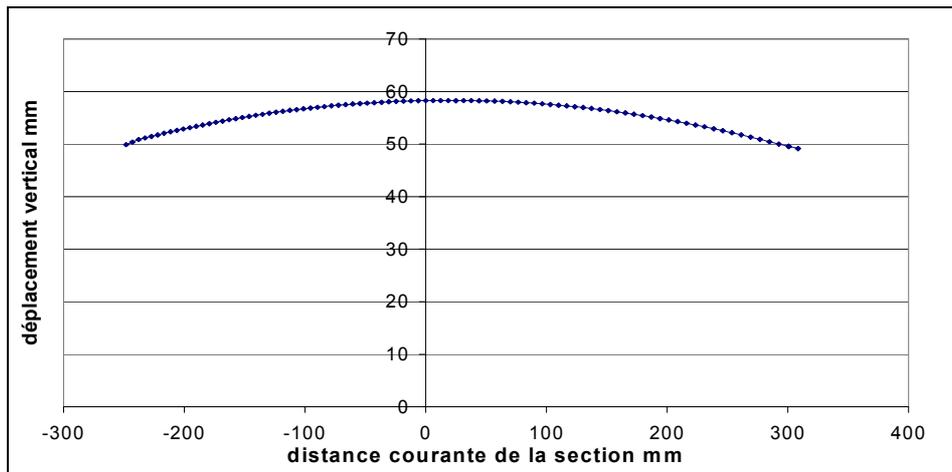


Figure 30 : Déplacement de l'échantillon le long de la section

La Figure 31 montre la comparaison entre le déplacement mesuré et le déplacement d'un échantillon parfaitement sphérique simulé par une portion de cercle. Les faibles différences observées proviennent principalement de l'incertitude de mesure.

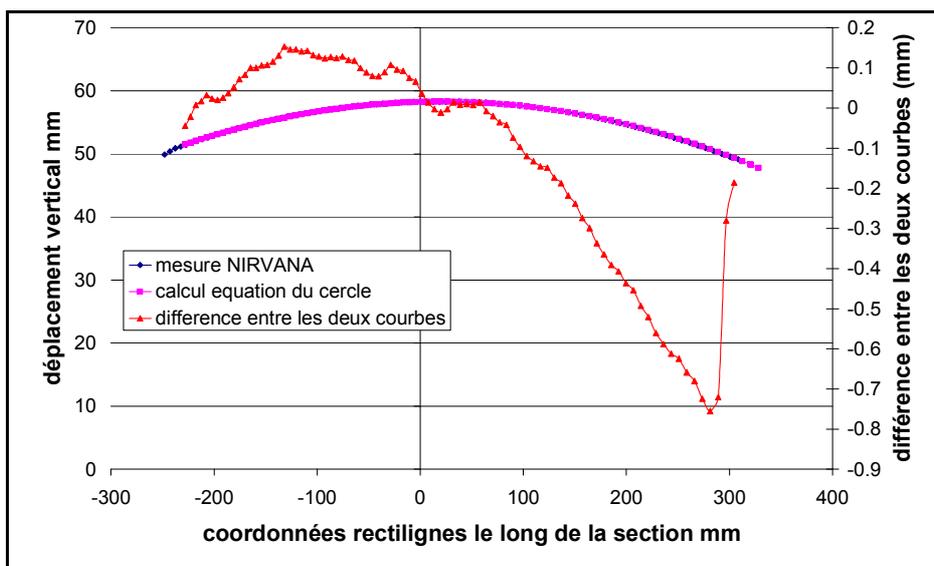


Figure 31 : Comparaison déplacement mesuré / déplacement sphérique

On constate donc que la condition de sphéricité est respectée sur la zone de l'échantillon mesuré.

III.1.2.6 Systèmes d'acquisition et de mesure

Afin de pouvoir effectuer la prise d'image pour la mesure par stéréo-corrélation à partir d'événements se déroulant lors de l'essai, nous avons relié le capteur de différentiel de pression au système d'acquisition d'images. Il est à présent possible de déclencher la prise de vue sur des niveaux de ΔP pré-programmés. Cette évolution permet de prendre automatiquement les images et de manière précise, contrairement au système initial où le déclenchement de prise de vue se faisait de manière manuelle. L'autre avantage de ce système est de faciliter l'analyse des résultats connaissant le niveau de ΔP précis correspondant à chaque prise de vue.

Nous avons ensuite mis en place à l'aide d'une centrale d'acquisition une procédure de collecte informatique de toutes les informations issues de l'essai. Nous récupérons donc, à la fin de l'essai, l'ensemble des données en température, pression, différentiel de pression et pré-tension, données précieuses pour l'analyse des essais.

III.1.3 Synthèse

Nous avons vu dans ce début de chapitre le moyen d'essais sur structures Nirvana. Une étude a été menée afin de maîtriser la pré-tension appliquée au film, paramètre primordial pour être représentatif des conditions de vol. Ce dispositif a été instrumenté d'un système de mesure par stéréo-corrélation que nous allons décrire dans le paragraphe suivant.

III.2 Système de mesure par stéréo-corrélation d'images numériques

Le système de mesure par stéréo-corrélation utilisé dans cette étude est un produit commercialisé par la société GOM. Il est constitué de deux caméras numériques et d'un logiciel d'acquisition des déplacements mesurés et de calcul des déformations appelé "Aramis". Les deux caméras numériques permettent d'acquérir des images en niveau de gris 8 bits avec une définition de 1280 par 1024 pixels. La distance de travail sur le dispositif expérimental est d'environ 1200mm. A cette distance, la zone mesurée est d'environ 600mm. Un pixel correspond donc à 450 μ m sur l'échantillon. La résolution spatiale pour le champ mesuré (\varnothing 600mm) est de 7 mm. La résolution en déplacement qui dépend, entre autre, de la qualité du calibrage est généralement égal à 10 μ m lors de nos essais. La résolution en

déformation, qui est intrinsèque au système de mesure est de $1000\mu\text{m}/\text{m}$ en 3D et de $500\mu\text{m}/\text{m}$ en 2D.

Le calibrage est l'étape fondamentale qui précède l'acquisition d'images [Orteu 1997]. Il sert à déterminer tous les paramètres géométriques nécessaires au calcul: la distance et l'angle entre les caméras, la distance foyer/objectif (cf. paragraphe II.2). Il permet de quantifier les aberrations optiques afin qu'elles puissent être prises en compte dans les calculs. On utilise une croix de calibrage de dimensions équivalentes à la surface de mesure, que l'on place à une distance de mesure fixe correspondant à la distance de mesure de l'échantillon. Au cours de ce processus, plusieurs images de la croix sont prises dans différentes positions. La croix de calibrage est constellée de marqueurs blancs dont l'éloignement et la dimension sont connus. Le centre de chaque domaine de corrélation est repéré à partir de la distribution des niveaux de gris des pixels, situés sur deux droites orthogonales passant par le centre du domaine. Quatre centres de domaine de corrélation constituent les sommets d'une maille. L'ensemble de toutes les mailles reconstitue la surface de l'objet. Lorsque le centre des domaines bouge au cours d'une déformation, les mailles se déforment, tournent et se translatent (Figure 32).

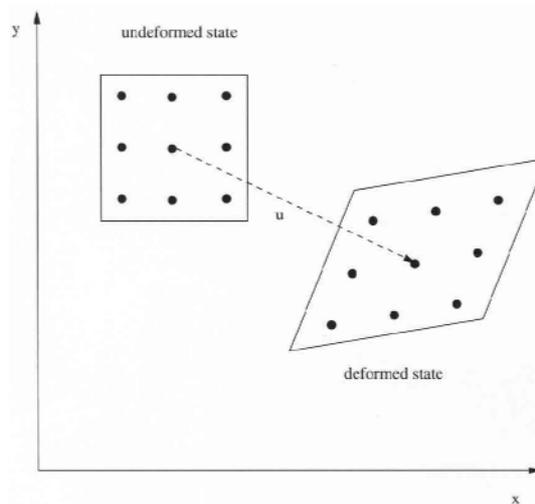


Figure 32 : Déformation d'une maille

Les pixels de la maille de l'image de référence sont alors transformés dans l'image de destination. Afin de compenser automatiquement d'éventuelles variations de luminosité au cours des mesures, une transformation linéaire est utilisée simultanément au processus de comparaison des images. La méthode de calcul « Multi Facet » consiste à utiliser neuf domaines de corrélation (Figure 33) pour calculer une maille. Elle permet d'éliminer les discontinuités qui peuvent apparaître avec la méthode à quatre jauges dite « Single Facet ».

Pour comparer deux images, le logiciel Aramis recherche des distributions horizontales et verticales de niveaux de gris qui ont des caractéristiques identiques.

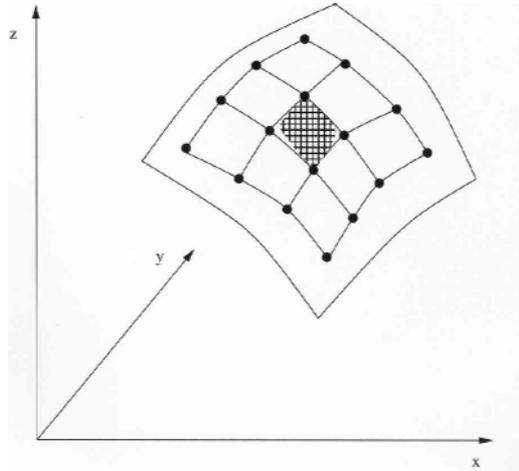


Figure 33 : Calcul « multifacet »

Il faut donner un point de départ dans les quatre images que l'on compare (images de référence et images après déformation obtenues par les caméras de gauche et de droite). Ces quatre points sont des points homologues car ils correspondent au même point physique vu par les deux caméras, avant et après déformation.

Dans le cas de la mesure de champ dans un plan de sollicitation, une seule caméra est nécessaire et le calcul des déformations dans le plan se fait via le principe de corrélation d'images numériques. C'est cette méthode que nous avons mis en œuvre pour la caractérisation de notre matériau.

III.3 Caractérisation du matériau

Ce paragraphe montre le travail effectué pour caractériser le polymère constitutif des BPS. Après avoir présenté le matériau, nous étudierons les propriétés élastiques et thermiques de celui-ci.

III.3.1 Présentation du matériau

Les ballons pressurisés stratosphériques de 10m de diamètre sont constitués de fuseaux en polymères de 50 μm d'épaisseur assemblés par collage de rubans de PET de 23 μm d'épaisseur. Le film complexe est un polymère tri-couches obtenu par collage successif de films de poly(éthylène téréphtalate) de 15 μm d'épaisseur et de polyamide de 20 μm d'épaisseur (PET/PA/PET). Les principales propriétés de ce film sont sa légèreté, sa bonne résistance mécanique alliée à une souplesse jusqu'à de très basses températures, son étanchéité aux gaz aérostatiques et sa résistance aux UV et à l'ozone [Cocquerez. 2001].

Hormis le gain en souplesse, l'intérêt du complexage de 3 films est d'éviter les fuites dues aux éventuels micro-trous pouvant apparaître sur chaque film [Siguier 2002]. Enfin, de par la mise en forme des 3 films par bi-étirage, le matériau étudié offre une bonne résistance bi-axiale avec un coefficient d'isotropie supérieur à 0.9.

Les polyéthylène téréphtalates PET sont les seuls utilisés pour la fabrication des films et des feuilles parmi les polyesters thermoplastiques saturés [Fuzessery 1997]. On distingue deux familles : les homopolymères d'acide téréphtalique (PET) et les copolymères. Les films, obtenus en différentes épaisseurs par extrusion ou thermoformage, possèdent d'excellentes propriétés thermomécaniques, optiques, électriques et une bonne résistance chimique. De plus, ce sont des matériaux métallisables sous vide et, dans certaines conditions, par galvanisation. Ces films, orientés par étirage ou non orientés, ont trouvé de nombreuses applications dans l'audiovisuel, dans les domaines de l'emballage, de l'électricité et de l'électronique.

Les polyamides présentent des caractéristiques mécaniques variables [Guerin 1994]. Leur résistance mécanique varie avec la teneur en humidité et avec la vitesse de sollicitation. Le polyamide utilisé pour la fabrication des films constitutifs des BPS apporte une souplesse qui évite la détérioration de ce dernier lors de sa manipulation.

III.3.1.1 Propriétés physiques du PET/PA/PET

Les premiers paramètres importants du comportement en vol des ballons sont les propriétés thermo-optiques. L'absorptance solaire et l'émissivité infrarouge sont mesurés à l'aide de spectrophotomètres équipés de sphères intégrantes. Le calcul des valeurs effectives, qui sont utilisées dans les modèles de comportement thermique des ballons, permet de tenir compte des réflexions, transmissions et absorptions multiples de la lumière incidente dues à la transparence du matériau.

Pour les missions de longue durée, la connaissance de la perte de gaz dans le ballon est primordiale. La perméabilité des différents éléments du ballon doit donc être testée [Guigue 2001]. La quantité d'hélium traversant un échantillon par diffusion ou effusion est mesurée à l'aide d'un spectromètre de masse.

Les autres paramètres importants pour le calcul de trajectoire des ballons sont les propriétés mécaniques des matériaux que nous allons maintenant étudier.

III.3.2 Caractérisation mécanique du matériau

La principale difficulté de l'identification des caractéristiques mécaniques de matériaux souples et transparents comme notre polymère est la connaissance du champs de déformation dans le plan de sollicitation [Violettes 2005-b]. Les méthodes trop intrusives telles que les jauges de déformation influent sur le comportement global du polymère. Pour déterminer les déformations dans le plan de sollicitation de l'éprouvette lors d'un essai de traction monotone uniaxial, on peut mettre en œuvre différents procédés d'extensométrie sans contact tels que la corrélation d'images numériques.

III.3.2.1 Essais de traction monotone

Ces essais ont pour but de déterminer les caractéristiques élastiques du matériau. Ils ont été réalisés sur une machine de traction INSTRON équipée d'un capteur d'effort de 1000 N. La vitesse de sollicitation choisie pour ces essais ($0,016 \text{ s}^{-1}$) permet de s'affranchir d'une partie des effets de fluage sur l'éprouvette.

III.3.2.1.1 Etude de l'influence du dépôt sur le polymère

La mesure par corrélation d'images nécessite un dépôt de peinture sur l'échantillon à tester. Les polymères étant sensibles aux solvants, une étude a été menée afin de choisir un dépôt adéquat.

La peinture utilisée lors de ces essais est un primaire blanc en aérosol. Ce produit, dans son utilisation d'origine s'applique en sous couche afin de faire adhérer au mieux la première couche de peinture.

Une première série d'essais est effectuée sur un nombre d'éprouvettes vierges suffisant pour obtenir une bonne reproductibilité. Une deuxième série d'essais est effectuée sur le même nombre d'éprouvettes peintes avec au minimum 30 minutes de séchage.

Ces essais se font sur du complexe PET/PA/PET en traction monotone à $0,016 \text{ s}^{-1}$ jusqu'à rupture. Les valeurs observées sont le module d'élasticité tangent, la déformation et la charge à rupture. Le calcul des déformations se fait à partir du déplacement de la traverse. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous (Tableau 1) :

| | Matériau sans peinture | Matériau avec peinture | Erreur relative sur la valeur moyenne |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Module d'élasticité [MPa] | 3900 ±200 | 4000 ±200 | 2% |
| Déformation à rupture [%] | 90% ±10% | 83% ±10% | 8% |
| Charge à rupture [N] | 240 ±20 | 230 ±20 | 4% |

Tableau 1 : Influence de la peinture sur le complexe PET/PA/PET

Les variations sur les valeurs mesurées se situent dans la plage d'erreur de reproductibilité des essais. Le primaire appliqué à ce matériau n'altère donc pas de façon sensible ses caractéristiques mécaniques principales.

III.3.2.1.2 Méthode de mesure par corrélation d'images développée

Le matériau étant sensible à la vitesse de sollicitation [Akloniss 1995], une vitesse de traction relativement élevée ($0,016 \text{ s}^{-1}$) permet de s'affranchir d'une partie des phénomènes de fluage. A cette vitesse, la durée du comportement élastique du matériau lors de l'essai est de l'ordre de 3 secondes. Les caméras utilisées ne permettent de capturer qu'une image par seconde. L'acquisition d'une image se fait par un signal extérieur issu de la machine de traction. Ce signal analogique est proportionnel à la charge. Nous avons donc choisi de prendre une image tous les 20N afin d'obtenir environ 3 images dans la zone élastique, cette limite ayant été identifiée à 75N. Cette procédure permet de tracer la courbe conventionnelle de traction (Figure 35).

Dans le cas où le résultat de l'essai attendu ne nécessite pas le recoupement avec la charge, comme, par exemple, la mesure du coefficient de Poisson ou seules les déformations longitudinales et transverse sont nécessaires, la capture d'image par un signal extérieur n'est pas utile. Pour mesurer le coefficient de Poisson, nous utilisons une méthode de capture en fonction du temps qui permet de prendre jusqu'à 4 images par secondes. La différence de cadence de prise d'image avec la méthode précédente est due au fait que l'on ne perd pas de temps en lecture du signal extérieur de capture. La capture temporelle se fait avec l'horloge interne de l'ordinateur. La technique de prise de vue consiste donc à acquérir une rafale d'images à partir d'un signal de départ donné par la machine de traction. Ce signal a été réglé

afin que l'acquisition débute dès que la charge dans l'éprouvette dépasse 1,5N. Ensuite, le système de mesure prend une image toutes les 0,25 secondes.

III.3.2.1.3 Procédure expérimentale des essais en température

Le domaine de vol des ballons nécessite une bonne connaissance du comportement des matériaux jusqu'à -60°C . Des essais en traction monotone sont réalisés à -10°C , -45°C et -60°C afin d'étudier l'évolution des propriétés élastiques et thermiques du matériau en fonction de la température. Les essais sont réalisés sur la machine de traction précédemment citée équipée une enceinte thermique refroidie à l'azote (Figure 34). La procédure de prise d'images est la même que celle décrite au paragraphe précédent. Un positionnement étudié de l'éclairage permet de s'affranchir des reflets sur le hublot. Un système de maintien à la température ambiante du capteur d'effort a été mis en place afin de pallier les dérives thermiques de celui-ci.

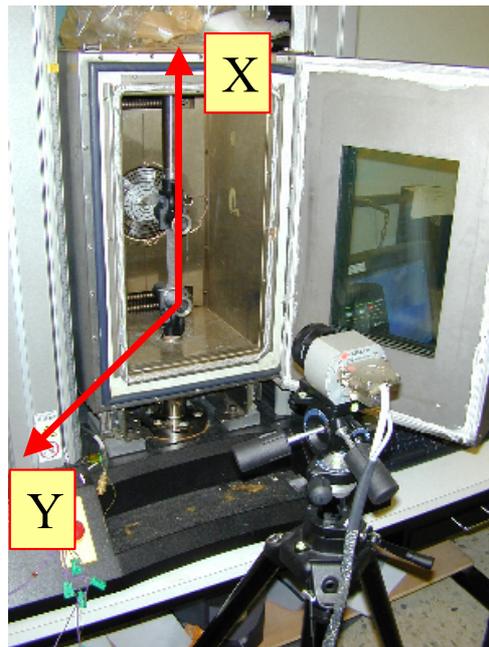


Figure 34 : Dispositif expérimental de caractérisation à froid du PET/PA/PET

III.3.2.1.4 Résultats

La Figure 35 représente la courbe conventionnelle du complexe PET/PA/PET à température ambiante. Nous constatons une bonne corrélation entre les mesures obtenues à partir du déplacement de la traverse et celles obtenues par corrélation d'images.

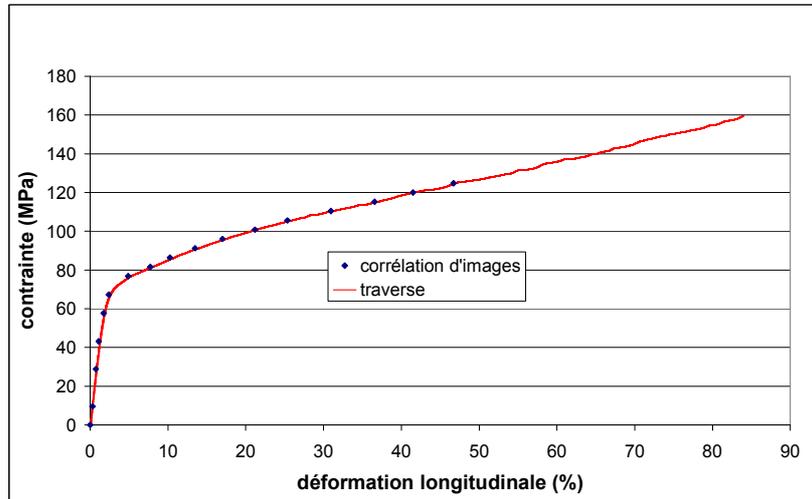


Figure 35 : Courbe conventionnelle du matériau

Ce résultat est dû au fait que les éprouvettes testées sont de forme rectangulaire et que la longueur initiale entre mors est importante (150mm), ce qui réduit les effets de bord. Le seuil d'écoulement conventionnel à 0,2% est le critère de dimensionnement des BPS. Sa valeur est mesurée, à température ambiante, à 60MPa en contrainte et 1,8% en déformation. A -60°C, ces valeurs sont de 110MPa en contrainte et 1,9% en déformation. Le module d'élasticité retenu pour la suite de l'étude est le module tangent entre 10N et 50 N, mesuré à 4000MPa \pm 200MPa

La Figure 36 montre le rapport entre la déformation dans le sens de sollicitation de l'éprouvette et la déformation dans le sens transverse.

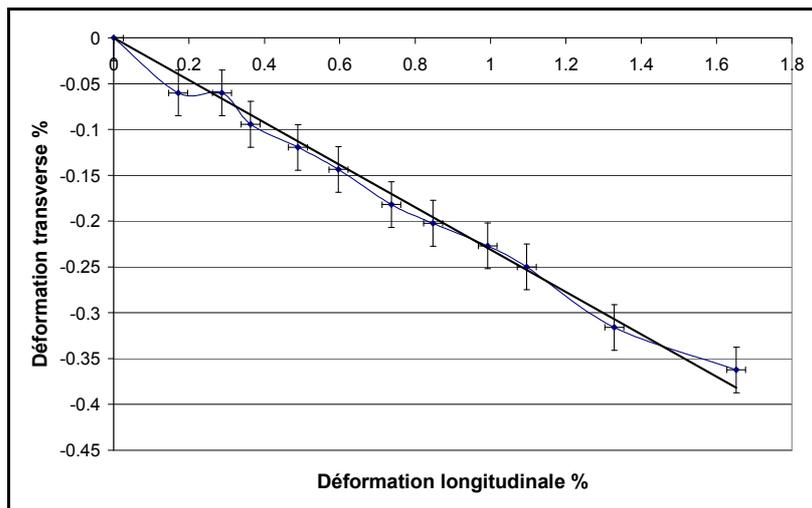


Figure 36 : Mesure du coefficient de Poisson du complexe PET/PA/PET

La courbe est quasi-linéaire et sa pente nous donne directement le coefficient de Poisson. L'incertitude sur la mesure de $\pm 0.025\%$ étant supérieure à l'incertitude sur la reproductibilité des résultats (3 éprouvettes testées), le coefficient de Poisson est pris égal à 0.23 ± 0.05 .

Les déformations précédentes sont calculées sur une section située au centre de l'éprouvette. La déformation au centre de l'éprouvette est obtenue en faisant la moyenne réduite à 95% de l'ensemble des déformations sur la section ce qui exclut les déformations imprécises dues aux effets de bord. Cette moyenne permet de s'affranchir des erreurs numériques au bord de l'éprouvette lors du calcul de la déformation par le système de corrélation d'images. La Figure 37 décrit l'évolution du coefficient de Poisson en fonction de la température. L'incertitude sur la mesure de déformation est de $\pm 0.025\%$ et de $\pm 2^\circ\text{C}$ pour la température. Cette évolution du coefficient de Poisson à basse température n'a, à notre connaissance, pas été décrite dans la littérature. Dans cette plage de température le polymère étudié ne connaît pas de transitions de phases. Un travail au niveau de la structure du polymère nous permettrait de comprendre l'évolution du coefficient de Poisson entre la température ambiante et -60°C .

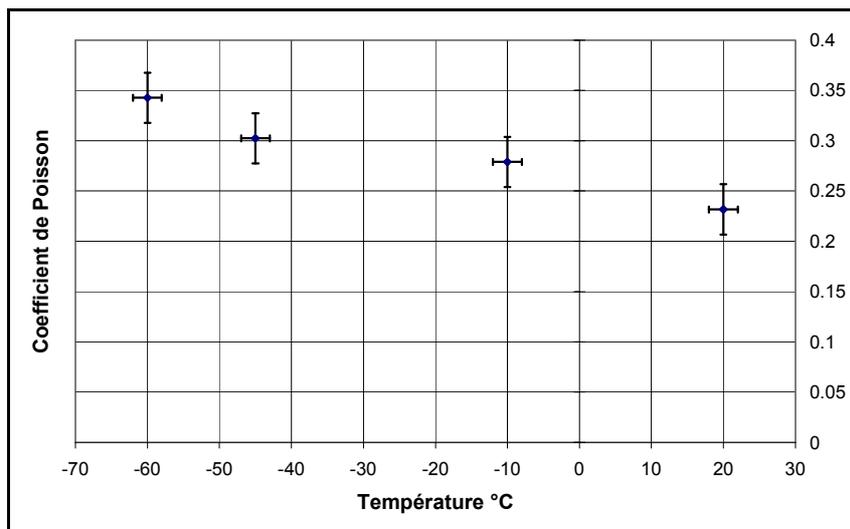


Figure 37 : Evolution du coefficient de Poisson en température

III.3.2.2 Mesure du coefficient de dilatation

Cet essai permet de mesurer le coefficient de dilatation du complexe PET/PA/PET par corrélation d'images.

III.3.2.2.1 Procédure d'essai

L'objectif de l'essai est de mesurer la déformation d'une éprouvette soumise à une variation de température. Seule la déformation due à la température doit être prise en compte lors de la

mesure de ce coefficient par corrélation d'images numériques. On effectue donc un essai de fluage à très faible charge (environ 0,5N) sur l'éprouvette à tester. Cette charge entraîne des déformations très faibles devant celles dues à la dilatation thermique. L'essai est réalisé de la température ambiante à -90°C .

La capture des images se fait tous les 5°C . Le calcul du coefficient de dilatation est obtenu par la moyenne des déformations de 4 points pris au centre de l'éprouvette. Les résultats choisis pour le calcul sont pris lors de la phase de montée en température (entre -90°C et 23°C). Ce choix permet de s'affranchir des phénomènes d'inertie thermique dans l'enceinte.

III.3.2.2 Résultats

La Figure 38 montre la déformation dans le sens de sollicitation de l'éprouvette en fonction de la température lors de la phase de montée en température (entre -90°C et l'ambiante). La courbe obtenue est une droite et sa pente correspond au coefficient de dilatation moyen entre 20°C et -90°C d'une valeur de $24\ \mu\text{m}/\text{mK}$.

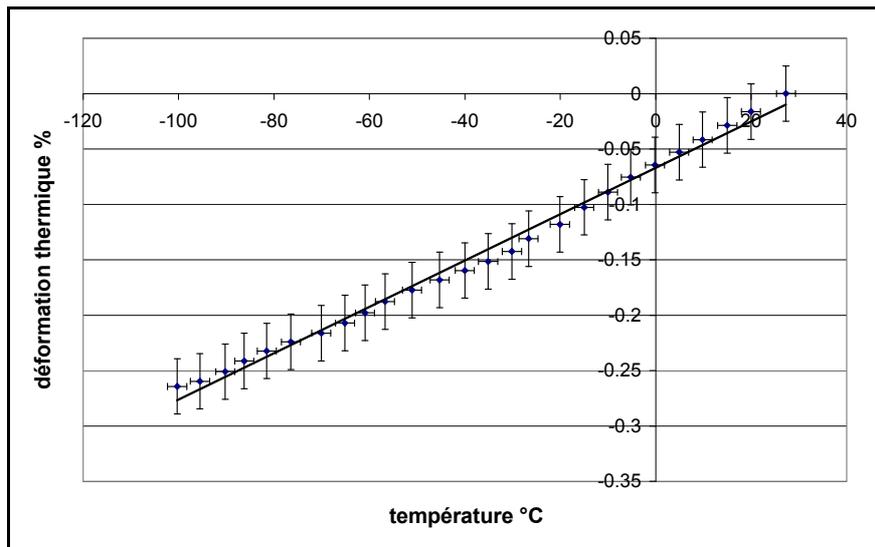


Figure 38 : Evolution de la déformation thermique en fonction de la température

L'incertitude sur la mesure de déformation est de $\pm 0,025\%$ et de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ pour la température.

Cette technique de mesure a été validée sur des matériaux rigides comme du PVC ou de l'aluminium. Les résultats expérimentaux du coefficient de dilatation de ces matériaux a été comparé aux coefficients donnés par la littérature et montrent des résultats concordants

III.3.3 Synthèse

Ce travail de caractérisation portait sur la mise en place de moyens d'essais pour la mesure des caractéristiques élastiques et thermiques du matériau. Un premier travail bibliographique (cf.

chapitre II.2) a permis de connaître et de choisir un moyen de mesure adapté à notre matériau. Des solutions innovantes ont permis de mesurer le coefficient de Poisson ainsi que le coefficient de dilatation de notre matériau à l'aide d'un système de mesure sans contact par corrélation d'images numériques. L'analyse des résultats a mis en évidence l'évolution des caractéristiques élastiques et thermique du matériau entre la température ambiante et -60°C .

Références bibliographiques

- [Aklonis 1995] Aklonis J.J., "Introduction to Polymer Viscoelasticity", Wiley , 1995
- [Cocquerez 2001] Cocquerez, P., Guigue P., Guilbon R, Phulpin T, durand M, Lefevre J.P., Eymard M, Lafourcade M. "Test flight of CNES stratospheric super-pressure balloons in experimental arctic campaigns 2000-2001. Objectives and results", Proceedings of 15th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Prog., pp. 597-601, Biarritz France, may 2001.
- [Fuzessery 1997] Fuzessery S., "Polyéthylènetéréphtalates (PET) pour films et feuilles" Techniques de l'Ingénieur AM2–A3375 par, avril 1997
- [Guerin 1994] Guerin B., "Polyamides PA" Techniques de l'Ingénieur AM2–A3360 mai 1994
- [Guigue 2001] 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.
- [Mistou 2003] Mistou S., Karama M., dalverny O., Guigue P., Siguier J.M., " Mesure 3D sans contact des déplacements et déformations sur des films plastiques transparents par stéréo-corrélation ", Mecanique et Industrie 4(6), pp. 637-643 , 2003
- [Orteu 1997] 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)
- [Siguier 2002] 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.

- [Siguier 2003] Siguier J.M., Vialettes P., Granier S., Guigue P., " The use of Nirvana facility for balloon characterization : Strain and tightness measurements of zero pressure and super-pressure balloon subsystems ", *Proceedings of 16th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Prog.*, pp. 207-213, Sankt Gallen, Switzerland, june 2003.
- [Vialettes 2005] Vialettes P.,Siguier J.M., Guigue P., Mistou S., Dalverny O., Karama M., Petitjean F., "Etude par stéréo-corrélation des champs de déplacement et de déformation de sous-ensembles de ballons stratosphériques pressurisés", *Revue Instrumentation, Mesure, Métrologie*, vol. 5, N° 1-2/2005, HERMÈS, Mars 2005
- [Vialettes 2005-b] Vialettes P.,Siguier J.M., Guigue P., Mistou S., Dalverny O., Karama M., Petitjean F., "Modélisation numérique et expérimentale du comportement de sous ensembles de ballons pressurisés stratosphériques", *Mécanique et Industrie*, Vol. 6, pp245-255, Ed. EDP, ISSN=1296-2139

Chapitre 4

CHOIX ET IDENTIFICATION DES LOIS DE COMPORTEMENT

| | | |
|-------------|--|-----|
| <i>IV.1</i> | <i>Choix de lois de comportement</i> | 73 |
| IV.1.1 | Analyse des résultats d'essais | 74 |
| IV.1.2 | Synthèse | 79 |
| <i>IV.2</i> | <i>Identification des lois de comportement</i> | 80 |
| IV.2.1 | Introduction aux méthodes d'identification | 80 |
| IV.2.2 | Résultats de l'identification | 88 |
| IV.2.3 | Synthèse | 101 |

IV CHOIX ET IDENTIFICATION DES LOIS DE COMPORTEMENT

Dans ce chapitre, nous présentons la démarche de choix des lois de comportements utilisées pour le calcul de structure en regard de leurs apports et limites respectives. Ce travail s'appuie sur l'étude bibliographique ainsi que sur les résultats de la caractérisation de l'aspect visqueux du matériau. Nous présenterons ensuite les techniques utilisées pour identifier ces lois de comportement. Enfin, nous exposerons les résultats de cette identification.

IV.1 Choix de lois de comportement

Dans le cadre de notre application, plusieurs contraintes vont nous inciter à faire des choix de lois adaptées. Il est intéressant de pouvoir tenir compte de la recouvrance car lors du passage jour/nuit, la contrainte dans l'enveloppe diminue pour se stabiliser à une valeur plus faible (Figure 39). Pour le matériau, nous avons montré son caractère non linéaire mais une incertitude persiste sur sa nature viscoélastique ou viscoplastique.

Enfin, la loi étudiée doit être implémentée dans les codes de calcul du commerce afin de réaliser les essais sur structure.

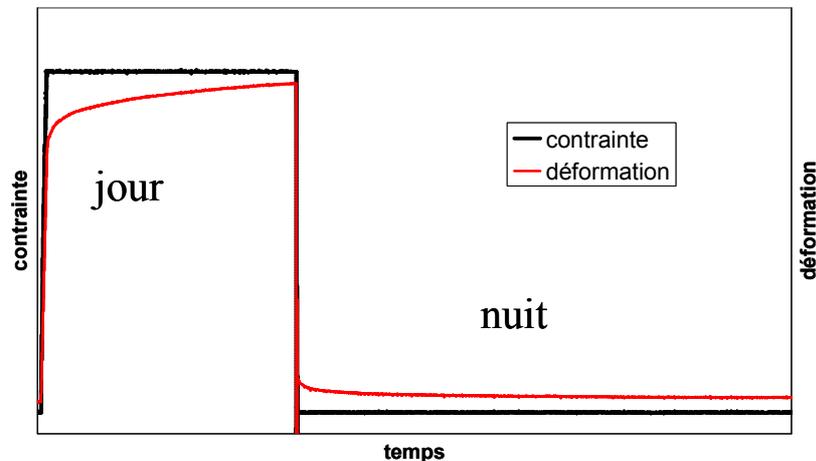


Figure 39 : Essai de fluage recouvrance

Nous décrivons ici la démarche qui nous a amené à choisir deux lois de comportement appropriées au calcul. Le choix de ces lois de comportement est basé, d'une part, sur l'analyse des essais de caractérisation du matériau et, d'autre part, sur l'étude bibliographique des lois existantes.

IV.1.1 Analyse des résultats d'essais

La fonction des lois étudiées est de décrire le comportement de notre matériau, et notamment le comportement visqueux. Un ensemble d'essais de fluage et de fluage/recouvrance ont été réalisés afin de nous aider dans ce choix. Un essai de fluage consiste à observer la réponse en déformation au cours du temps d'un échantillon soumis à une contrainte constante [Lemaître 2001]. Lors de l'application de la charge, idéalement sous forme d'échelon, l'éprouvette va se déformer de manière élastique (déformation instantanée), puis, durant la phase de maintien, la déformation de fluage vient s'ajouter. Cette déformation de fluage est fonction du temps et de la charge (Figure 40). A la suppression de la charge, on récupère la partie élastique de la déformation tandis que l'autre partie de la déformation le sera suite à un temps plus ou moins loin selon la viscosité du matériau.

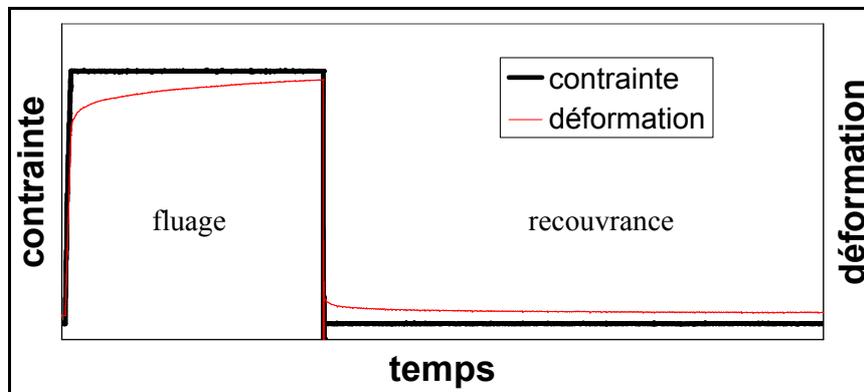


Figure 40 : Description d'un essai de traction de fluage/recouvrance

Les essais de fluage étant pilotés en contrainte, la maîtrise de l'épaisseur de l'éprouvette est donc importante. Lors de la fabrication des films du polymère étudié, le fournisseur de matière garantit son épaisseur à 10% près.

L'épaisseur moyenne de 50 μ m renseignée pour les essais entraîne donc une erreur sur la contrainte appliquée de 10%. Un recalage en contrainte a donc été nécessaire pour homogénéiser les essais. De plus, la mise en place de l'éprouvette souple dans les mors de la machine peut présenter une source d'erreur non négligeable. En effet il n'est pas évident de positionner identiquement les éprouvettes à chaque essai.

La longueur initiale de l'échantillon peut donc varier d'un essai à l'autre. Un second recalage, en déformation, a donc été nécessaire.

IV.1.1.1 Etude de la non linéarité

A partir d'essais de fluage à différents niveaux de sollicitation réalisés à température ambiante (Figure 41), nous avons tracé l'évolution de la déformation de fluage en fonction de la

contrainte (Figure 42) à deux temps de fluage différents, 1500s et 3000s. Cette courbe démontre le comportement clairement non linéaire en contrainte de notre matériau.

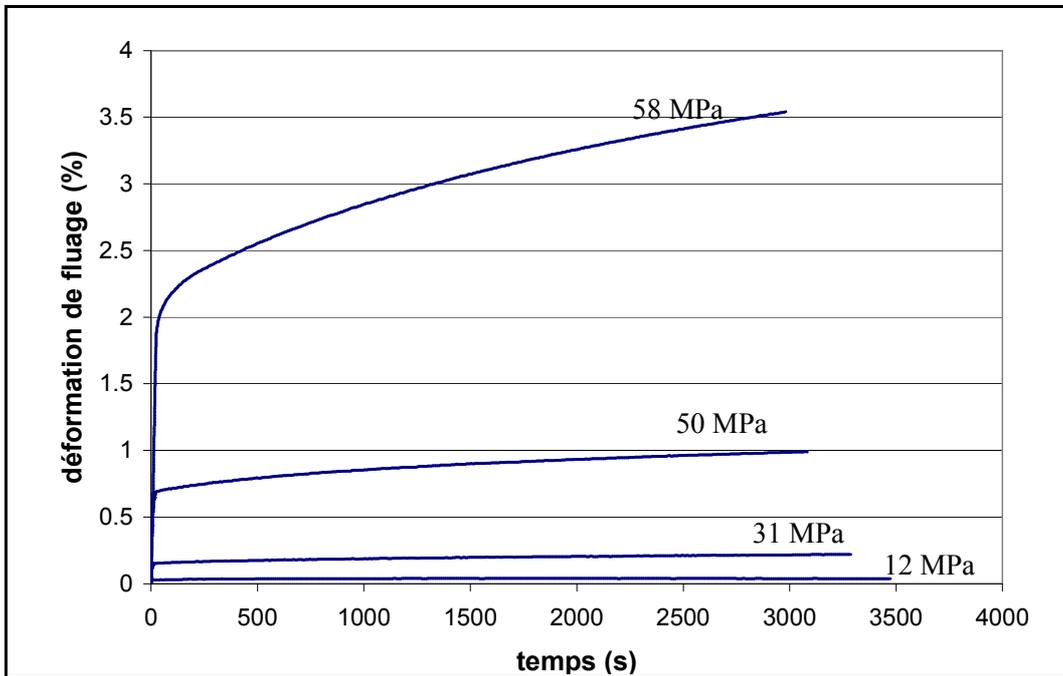


Figure 41 : Essai de fluage à température ambiante à différents niveaux de sollicitation

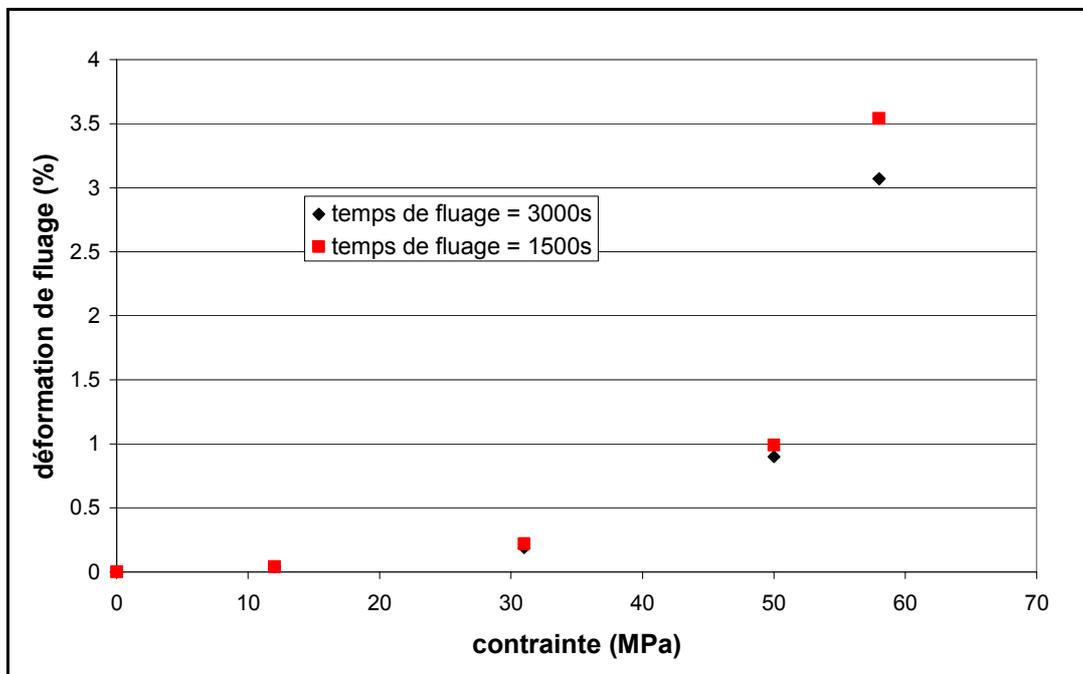


Figure 42 : Evolution de la déformation totale en fonction de la contrainte (T_{amb})

Cette non linéarité peut provenir du fait que le matériau a soit un comportement viscoélastique non linéaire (Figure 43), soit un comportement viscoélastique linéaire auquel vient s'ajouter un comportement viscoplastique qui le rend non linéaire (Figure 44).

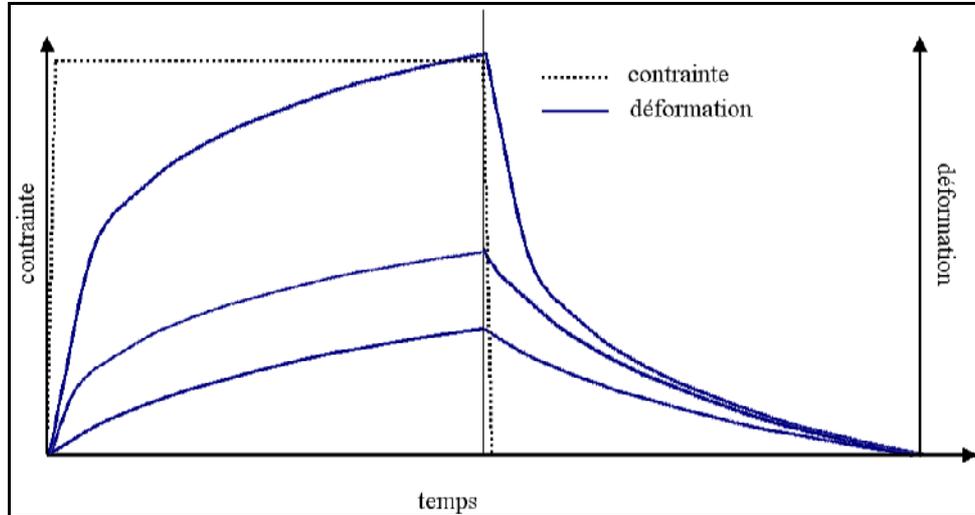


Figure 43 : Essai de fluage / recouvrance sur un matériau viscoélastique non linéaire

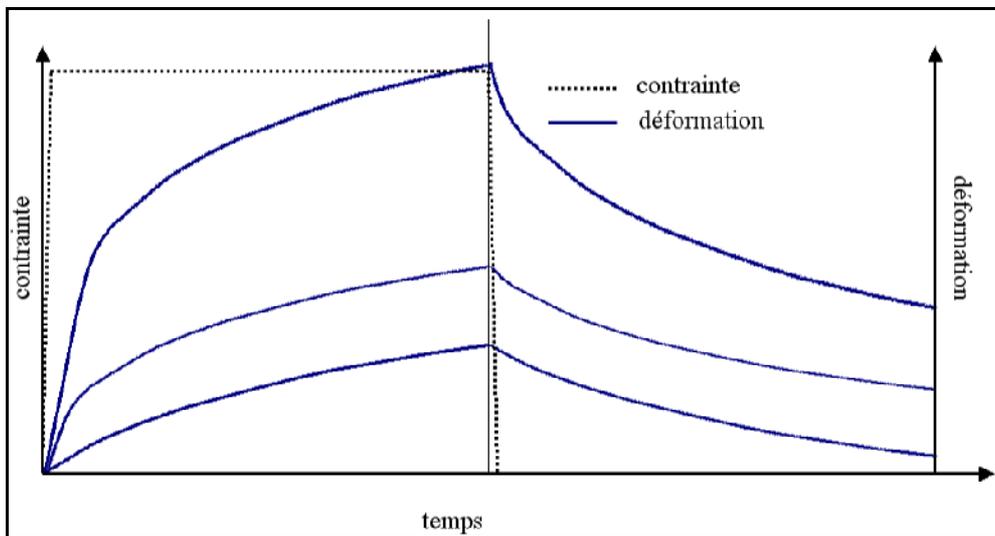


Figure 44 : Essai de fluage / recouvrance sur un matériau viscoélastique linéaire – viscoplastique

Un essai complémentaire de fluage recouvrance sur notre matériau nous permettra d'observer si une déformation rémanente en recouvrance apparaît à partir d'un niveau de contrainte.

IV.1.1.2 Comportement en recouvrance

Ces essais consistent à appliquer des paliers de charge de 1 heure avec un retour à un niveau de charge faible (10 N) pendant 30 minutes. Pour des matériaux souples et dans cette configuration, le retour à une contrainte nulle entre chaque palier n'est techniquement pas réalisable avec la machine de traction utilisée. Le très faible niveau de contrainte perturbe le régulateur d'effort qui n'arrive pas à stabiliser la charge à 0N à cause de la rigidité inexistante du film en compression.

Ces essais ont été réalisés à température ambiante ainsi qu'à -60°C jusqu'à des valeurs de contrainte proches de celles du seuil conventionnel d'écoulement relatif à chaque température, soit 60MPa à température ambiante et 110MPa à -60°C . Les Figure 45 et

Figure 46 montrent l'apparition d'une déformation rémanente pour des valeurs plus faibles que le seuil conventionnel d'écoulement (SCE) déterminé, soit à 40MPa à température ambiante pour un "SCE" de 60MPa, et 90MPa à -60°C pour un "SCE" de 110MPa. Cette déformation peut être interprétée soit comme de la viscoplasticité, et l'on considérera alors que cette déformation est irréversible, soit comme de la viscoélasticité retardée, due aux temps de relaxation longs du matériau, on considérera alors que cette déformation deviendra nulle pour des temps importants.

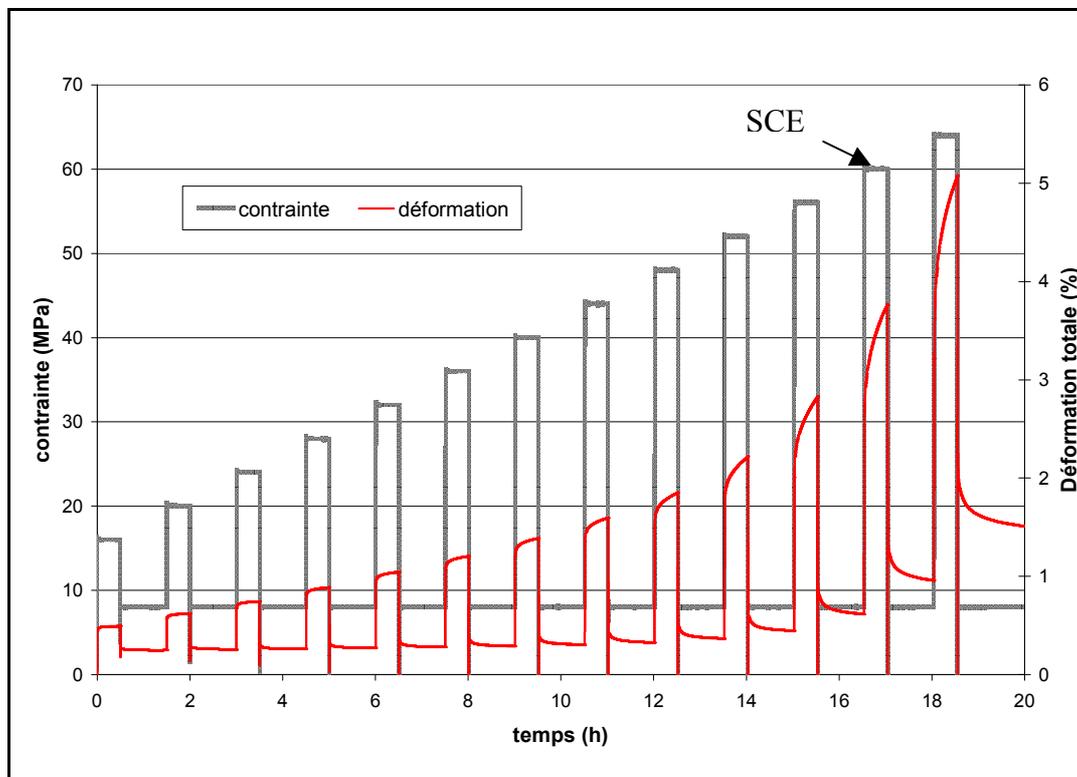


Figure 45 : Essai de fluage recouvrance au delà du SCE à température ambiante

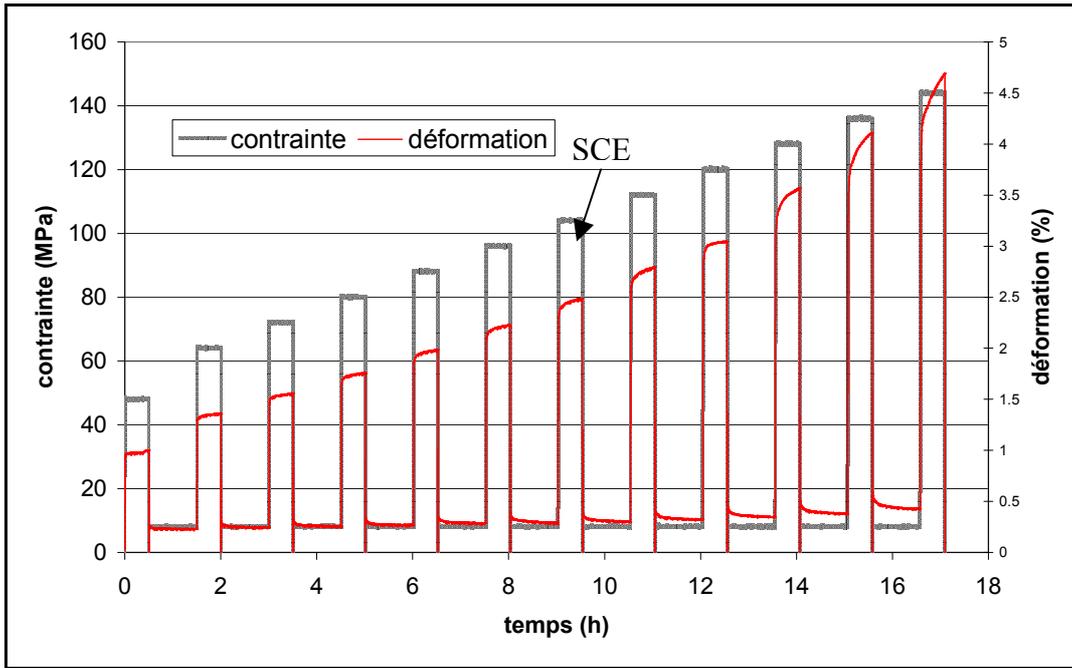


Figure 46 : Essai de fluage recouvrance au delà du SCE à -60°C

Des essais de recouvrance plus long ont été effectués afin d'estimer ce temps de recouvrance totale. Nous avons tracé, sur la Figure 47, l'évolution de la déformation lors de la recouvrance sur une échelle des temps logarithmique.

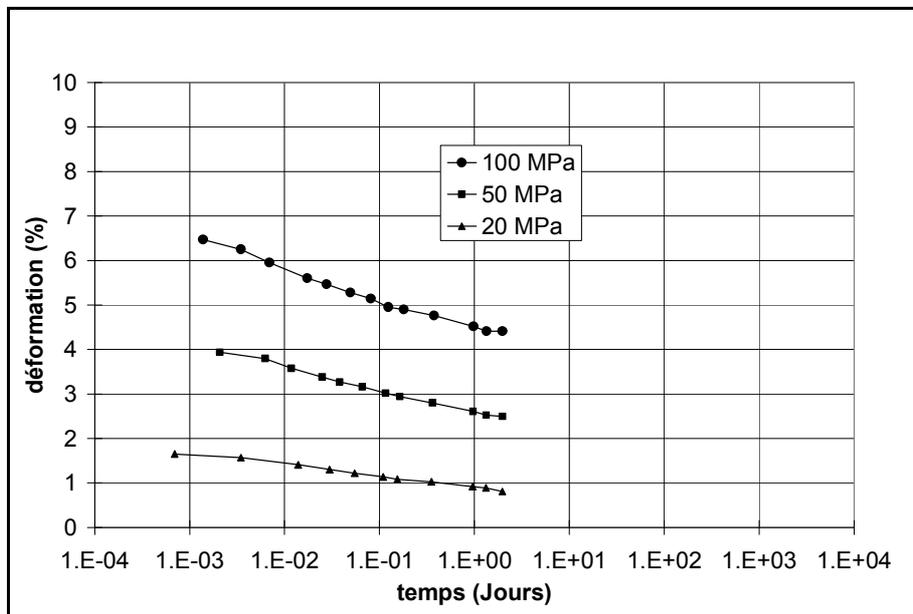


Figure 47 : Essai de recouvrance à température ambiante à différents niveaux de contrainte

Le temps de retour peut être extrapolé de manière logarithmique bien que cette approche ne soit pas rigoureuse. On peut ainsi estimer que le temps de retour la déformation initiale serait d'environ 30 ans si le matériau conserve le même comportement au cours du temps et que l'on ne considère pas le vieillissement de ce dernier. Un essai de recouvrance sur des temps aussi longs n'étant évidemment pas réalisable, nous ne pouvons conclure sur la nature viscoélastique ou viscoplastique de notre matériau.

IV.1.2 Synthèse

Plusieurs lois de comportement ont été considérées lors de notre étude bibliographique. La première loi étudiée est le modèle de Maxwell généralisé discrétisé en séries de Prony. Il a été identifié à partir d'essais de relaxation et est particulièrement adapté aux matériaux linéaires en contrainte. Il est suffisant pour décrire le comportement en fluage/recouvrance à des niveaux de contraintes faibles où la non-linéarité est négligeable mais montre ses limites à des niveaux plus élevés.

Un modèle de Maxwell non linéaire a également été identifié sur des essais de fluage à différents niveaux de contraintes et les résultats sont cohérents mais la limitation de ce modèle réside dans son caractère purement viscoplastique qui ne lui permet pas de modéliser la recouvrance.

L'ensemble de ces résultats nous a amené à étudier une loi de type viscoélastique couplée avec de la viscoplasticité. La loi de Kelvin-Voigt-Bingham, que nous nommerons loi mixte pour la suite de l'étude, répond aux différents critères évoqués en début de ce paragraphe.

Comme nous l'avons vu précédemment, ce type de lois rhéologiques ne s'inscrit pas dans un cadre thermodynamique, ce qui les rend discutables d'un point de vue théorique. Nous avons donc étudié, pour ces travaux, une loi qui respecte ces principes thermodynamiques et qui donne des résultats équivalents à ceux de la loi mixte. Pour cela, nous avons le choix entre la loi de Schapery et la loi spectrale qui présentent des performances sensiblement identiques [Schieffer 2003]. La loi spectrale a été développée et implémentée dans des codes de calcul à l'ONERA [Maire 1996]. Elle est actuellement utilisée pour modéliser le comportement mécanique des composites à matrices organiques [Petitpas 2000, Laurin 2003]. Le choix de cette loi, connue, implémentée, et utilisée pour d'autres applications, est intéressante car elle permet la confrontation et l'analyse commune des résultats.

Dans la suite de l'étude nous montrerons donc la démarche et les résultats de l'identification de la loi mixte et de la loi spectrale.

IV.2 Identification des lois de comportement

L'objectif de ce travail est de déterminer, à l'aide de différents outils informatiques et des essais expérimentaux, les paramètres des lois permettant de décrire le comportement mécanique de notre matériau, soumis à diverses sollicitations (fluage, fluage/recouvrance).

La méthode utilisée pour identifier les paramètres des lois est sensiblement la même pour la loi mixte et la loi spectrale

IV.2.1 Introduction aux méthodes d'identification

Dans le domaine du calcul de structures, un des problèmes majeur réside d'une part dans le choix de la loi de comportement employée et d'autre part dans l'identification de ses paramètres.

La détermination des paramètres d'une loi de comportement mécanique est généralement réalisée grâce à des essais très simples comme la traction, le cisaillement, la relaxation qui permettent en raison de leur caractère homogène d'obtenir de manière directe les caractéristiques désirées. Néanmoins dans certains cas, ce type d'essais n'est pas réalisable ou n'est pas souhaité, que ce soit en raison de l'impossibilité d'élaborer des échantillons au format nécessaire, du souhait d'identifier une loi de comportement à partir d'essais de chargement complexe ou de l'impossibilité d'effectuer une mesure.

Pour répondre à ces problèmes plusieurs techniques d'identification paramétrique existent et peuvent être utilisées pour déterminer les coefficients d'une loi de comportement ou tout simplement pour recalculer un modèle de comportement mécanique sur les résultats d'une ou plusieurs expériences.

L'identification paramétrique, en tant que problématique scientifique, a débuté depuis quelques dizaines d'années. L'approche utilisée consistait alors à réaliser des essais expérimentaux simples permettant de vérifier l'hypothèse d'homogénéité des contraintes et des déformations dans l'éprouvette. Ces essais (traction, compression, torsion, cisaillement, bi-poinçonnement, etc...) permettaient de transformer par différentes méthodes analytiques les mesures expérimentales réalisées (forces, couples, déplacements, angle de rotation, etc.) en valeurs de contrainte moyenne dans l'éprouvette en fonction de la déformation moyenne. L'identification des paramètres matériels était ensuite réalisée par lissage du modèle choisi avec les couples de points « contrainte-déformation » ainsi obtenus [Chaboche 1991].

Plus tard, les procédures automatiques de lissage ont fait rapidement apparition, introduisant de ce fait la notion de problème inverse en vue d'une identification du comportement de

matériaux. L'utilisation de ces méthodes de minimisation de l'écart entre une expérience et son modèle a permis le travail d'identification à partir d'essais non homogènes.

IV.2.1.1 Le problème d'identification

L'identification de certaines grandeurs ou paramètres caractérisant des structures ou des matériaux passe par la résolution de problèmes inverses ou problèmes consistant à identifier des données du problème direct à partir de résultats expérimentaux.

Diverses formulations mathématiques sont utilisables pour décrire ces problèmes, nous nous concentrerons ici sur les méthodes nécessitant la minimisation d'une fonctionnelle coût caractérisant l'écart entre « la simulation » et l'expérimentation.

Cette technique, aussi désignée par méthode de correction paramétrique, est sûrement la plus répandue dans le domaine des problèmes inverses ou de contrôle optimal.

La simulation de l'essai expérimental peut être réalisée par différentes méthodes : différences finies, éléments finis, éléments de frontière, etc. Le but de la procédure d'identification est de déterminer le jeu de paramètres réduisant la différence entre grandeurs mesurées et expérimentales en espérant fortement que la réduction de cet écart soit suffisante pour obtenir le jeu de paramètres souhaité.

On constate ainsi que le problème d'identification s'exprime maintenant comme un problème de minimisation, qui peut être résolu à l'aide d'algorithmes mathématiques.

IV.2.1.2 Identification paramétrique

IV.2.1.3 Le problème d'identification

On appelle problème direct, le problème classique qui consiste à simuler un process ou une expérience donnée pour en déduire par exemple, la géométrie finale de la pièce, les contraintes, déformations, déformations plastiques équivalentes, etc. dans la configuration finale ainsi que leur évolution au cours du processus et/ou du temps (Figure 48). Actuellement la résolution de ces problèmes est généralement traitée par la méthode des éléments finis.

D'une manière générale, on appelle problème inverse tout problème consistant à déduire certaines données du problème de base (problème direct) en se fixant comme donnée supplémentaire un des résultats (expérimental) du problème direct [Kleinermann 2000]. Un problème inverse est donc obtenu en intervertissant une ou plusieurs données avec un ou plusieurs résultats du problème direct de référence.

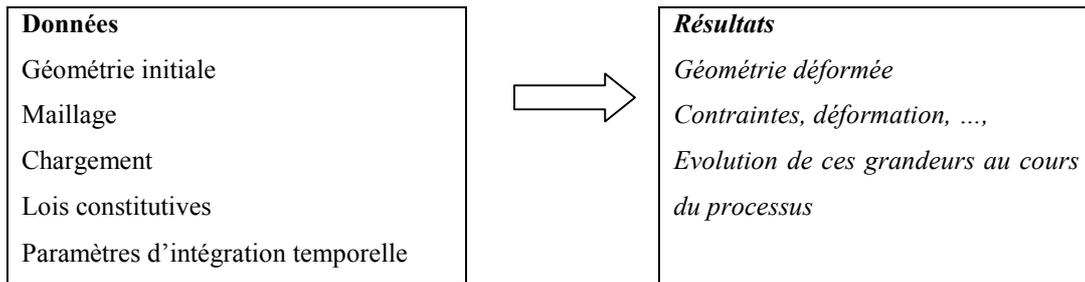


Figure 48 : Formulation générale du problème direct de simulation par éléments finis

Pour le problème direct le process est généralement simulé par la méthode des éléments finis et la comparaison des résultats obtenus permet alors de juger de la validité du modèle utilisé. Si la concordance n'est pas assez bonne, on tente d'améliorer la modélisation, soit en changeant de modèle, soit en modifiant les paramètres du modèle actuel.

Dans le second cas (Figure 49), le problème posé peut se mettre sous la forme d'un problème inverse où l'on désire obtenir les paramètres matériels du modèle choisi (donnée du problème direct) permettant d'atteindre le même résultat que celui obtenu expérimentalement (résultat du problème direct).

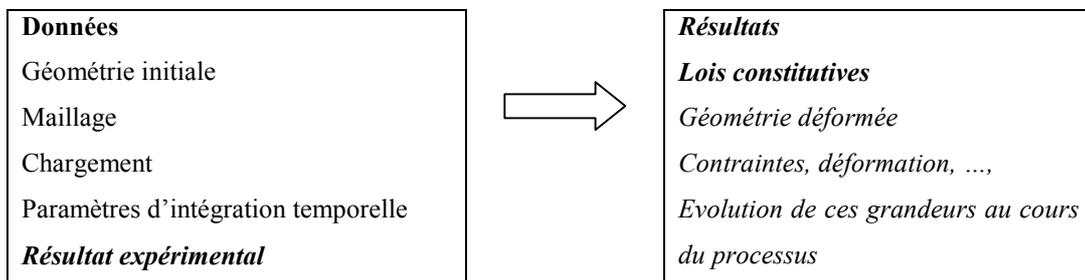


Figure 49 : Formulation générale du problème d'identification paramétrique.

IV.2.1.4 Schéma général d'un problème d'identification (de loi de comportement)

Les différentes étapes à développer pour mettre en place une procédure d'identification sont présentées ci-dessous. Elles sont d'une manière générale au nombre de quatre.

1. Mise au point d'une expérience afin de mettre en évidence le comportement du matériau qui sera observé lors du procédé que l'on souhaite simuler (exemple : écrouissage, comportements viscoplastique, superplastique, etc.). Cette expérience doit activer les mêmes phénomènes physiques que le problème que l'on désire simuler ultérieurement et/ou le même type de chargement mécanique. Le choix de l'expérience

réalisée ainsi que les grandeurs qui y seront mesurées est très important et influence significativement les résultats obtenus.

2. Proposition d'un modèle mathématique du phénomène étudié. Ce choix est basé sur des résultats expérimentaux et sur les connaissances physiques des phénomènes mis en jeu.

L'approche macroscopique souvent utilisée prend en compte des phénomènes microscopiques tels que l'écroutissage, la restauration, l'échauffement au travers de quelques variables internes, généralement non mesurables.

3. Détermination de la valeur numérique à attribuer aux différents paramètres matériels présents dans le modèle mathématique choisi. Le but est d'obtenir une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation. Cette étape consiste donc en la résolution du problème inverse d'identification paramétrique.

4. Validation du modèle obtenu précédemment. La première vérification peut s'effectuer par comparaison "visuelle" des résultats expérimentaux et de simulation. L'écart pourrait être quantifié par la mesure de la distance entre les deux courbes. Toutefois, une validation systématique du modèle par comparaison des résultats obtenus lors d'autres expériences similaires est indispensable afin de cerner le domaine de validité de ce modèle.

IV.2.1.5 Définition de la fonction objectif

De nos jours, les problèmes d'identification paramétrique par problèmes inverses sont de plus en plus répandus. La formulation du problème d'identification paramétrique comme un problème d'optimisation est unanimement accepté par tous.

La formulation mathématique de l'écart entre simulation et expérience est quasiment inchangée d'un auteur à l'autre. Seules quelques variantes apparaissent quant au choix de la méthode de prise en compte des erreurs expérimentales et à un éventuel ajout d'un terme supplémentaire de stabilisation du processus de convergence ou de prise en compte des contraintes.

Plusieurs modèles de la mesure de l'écart simulation / expérience servant à former la fonction objectif sont présentés ci-après.

- L'écart est le plus souvent formé à l'aide d'une norme Euclidienne où chaque point est pondéré par un coefficient égal à l'inverse du carré de l'erreur expérimentale correspondante. Ainsi la fonction objectif s'exprime par :

$$\text{Équation 27 } J(\underline{x}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i^{EF}(\underline{x}) - u_i^{\text{exp}}}{E_i} \right)^2$$

où \underline{x} est le vecteur contenant les valeurs des paramètres matériels, n le nombre de points de mesure expérimentale, u^{exp} le vecteur des résultats expérimentaux, E le vecteur des erreurs expérimentales associées à ces mesures et u^{EF} le vecteur des valeurs correspondantes obtenues par simulation.

- On trouve aussi une forme similaire, basée également sur une norme Euclidienne mais sans prise en compte des erreurs expérimentales. En revanche un terme de stabilisation a été ajouté. La forme de la fonction objectif est la suivante :

$$\text{Équation 28 } J(\underline{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(u_i^{EF}(\underline{x}) - u_i^{\text{exp}} \right)^2 + \beta \sum_{j=1}^p \left(x_j - x_j^{\text{estimé}} \right)^2$$

où p est le nombre de paramètres à identifier, $x^{\text{estimé}}$ est une estimation a priori des valeurs des paramètres optimaux et β est un coefficient pondérateur à déterminer suivant le problème.

Le terme supplémentaire, permet de stabiliser à la fois la solution obtenue et la convergence de la méthode d'optimisation. Le choix d'une valeur pour ce paramètre est délicat sans compter qu'un choix inapproprié peut modifier significativement la position du minimum obtenu.

- Une autre façon de former la fonction objectif à partir de l'Équation 27 consiste à prendre une écriture directe du vecteur des erreurs expérimentales "E", suivant si celles-ci sont supposées constantes ou proportionnelles à la valeur absolue de la grandeur observée. On obtient ainsi la fonction objectif suivante :

$$\text{Équation 29 } J(\underline{x}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i^{EF}(\underline{x}) - u_i^{\text{exp}}}{E_i} \right)^2$$

$$\text{où } E_i = \begin{cases} \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_j^{\text{exp}})^2} & \text{si les erreurs expérimentales sont constantes} \\ u_i^{\text{exp}} & \text{si les erreurs expérimentales sont proportionnelles à } u_i^{\text{exp}} \end{cases}$$

Une forme générale de la fonction objectif dont dérive l'Équation 27 peut être définie de la façon suivante (Équation 30). On se base sur une méthode de calcul de l'écart entre l'expérience et la simulation par une norme d'ordre "q". Si l'on n'a pas d'information sur les erreurs expérimentales associées aux différents points de mesure, on suppose souvent que celles-ci sont proportionnelles à la valeur de la grandeur mesurée. La forme de la fonction objectif devient :

$$\text{Équation 30 } J(\underline{x}) = \sqrt[q]{\sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\Omega} \left\langle \frac{u_i^{EF}(\underline{x}) - u_i^{\text{exp}}}{u_i^{\text{exp}}} \right\rangle^q}$$

$$\text{avec } \left\langle \frac{a}{b} \right\rangle = \begin{cases} \frac{a}{b} & \text{si } b > \text{tolérance} \\ a & \text{si } b \leq \text{tolérance} \end{cases}$$

où \underline{x} est le vecteur des valeurs des paramètres,

n le nombre de points expérimentaux,

u^{exp} le vecteur des résultats expérimentaux,

u^{EF} le vecteur des valeurs correspondantes obtenues par simulation,

ω_i est le poids attribué au $i^{\text{ème}}$ point expérimental et $\Omega = \sum_{j=1}^n \omega_j$ la somme des termes de ce vecteur poids.

Dans ce cas, le vecteur des erreurs expérimentales est égal, à une constante près, au vecteur des mesures expérimentales. Ce choix conduit à une fonction objectif adimensionnelle basée sur la somme des écarts relatifs entre les composantes des vecteurs u^{EF} et u^{exp} . Il est possible de modifier le poids attribué à chaque point à l'aide d'un coefficient multiplicatif ω_i .

Cette formulation permet de considérer la mesure expérimentale de plusieurs grandeurs différentes dans une même somme sans aucune modification. De plus, la valeur adimensionnelle de $J(x)$ représente l'écart relatif moyen existant entre l'ordonnée d'un point de la courbe expérimentale et celle du point de même abscisse sur la courbe de simulation. Cette valeur caractérise donc clairement la qualité du jeu de paramètres considéré, et permet une

comparaison directe des résultats obtenus avec un nombre de points de mesure différent ainsi que dans différents problèmes.

On s'aperçoit que lorsque l'erreur est proportionnelle à la grandeur mesurée, la fonction objectif représente la somme des écarts relatifs entre mesures expérimentales et simulations. En revanche, si l'erreur expérimentale est supposée constante, la fonction objectif devient une somme des écarts absolus entre le grandeur u^{exp} et u^{EF} .

IV.2.1.6 Méthodes de résolution

Une fois le problème d'identification exprimé comme un problème de minimisation, deux familles d'algorithmes sont principalement utilisées : les algorithmes exploratoires, de type Monte Carlo ou algorithmes génétiques, qui n'utilisent que la valeur de la fonctionnelle coût et les algorithmes de descente, de type Gauss-Newton ou Levenberg-Marquardt, qui utilisent en plus le gradient de la fonctionnelle coût par rapport aux paramètres à identifier.

Si le problème direct n'est pas excessivement non-linéaire, $J(x)$ se comporte bien et possède un seul extremum. Dans ce cas les méthodes de gradient conduisent à la solution. Pour les problèmes fortement non-linéaires, il y a un risque considérable que les méthodes de gradient convergent vers un minimum local.

Nous ne présentons ici que les méthodes de résolution utilisées lors de l'identification de nos lois de comportement

IV.2.1.6.1 Méthodes de descente

Le principe des méthodes de descente est de générer de manière itérative une suite $(x^k)_{k \in N}$

définie par : $x^{k+1} = x^k + \alpha^k g^k$

telle que, pour $f(\alpha) = J(x^k + \alpha g^k)$, $x \in \mathbb{R}^{+*}$

- $f(\alpha)$ est décroissante au voisinage de 0^+
- $f(\alpha^k) = \min_{x>0} f(\alpha)$

g^k est la direction de descente au pas k . C'est la méthode de détermination de g^k qui conditionne la nature donc l'efficacité de l'algorithme utilisé. Nous ne présentons ici que l'algorithme utilisée lors de l'identification de notre loi de comportement.

Algorithmes de Gauss-Newton et de Levenberg-Marquardt

Ces algorithmes sont particulièrement adaptés aux fonctionnelles coûts moindres carrés du type :

$$\text{Équation 31} \quad J(\underline{x}) = \sum_{k=1}^N j_k^2(\underline{x})$$

où par exemple $j_k(\underline{x}) = (u_k^{EF}(\underline{x}) - u_k^{\text{exp}})$.

La particularité de ces fonctionnels coûts réside dans le fait que l'on connaît la forme de leurs dérivées premières (Équation 32) et secondes (Équation 33):

$$\text{Équation 32} \quad (\nabla_x J)_i = \frac{\partial J}{\partial x_i} = 2 \sum_{k=1}^N j_k \frac{\partial j_k}{\partial x_i}$$

$$\text{Équation 33} \quad (H)_{ij} = \frac{\partial^2 J}{\partial x_i \partial x_j} = 2 \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial j_k}{\partial x_i} \frac{\partial j_k}{\partial x_j} + j_k \frac{\partial^2 j_k}{\partial x_i \partial x_j} \right)$$

Alors, en supposant que le deuxième terme de l'Équation 33 est négligeable devant le premier (ce qui est le cas quand on s'approche de l'optimum), on peut écrire :

$$\text{Équation 34} \quad \frac{\partial^2 J}{\partial x_i \partial x_j} \approx 2 \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial j_k}{\partial x_i} \frac{\partial j_k}{\partial x_j} \right)$$

Il est intéressant à ce niveau d'introduire la matrice de sensibilité ou matrice jacobienne définie par :

$$\text{Équation 35} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial j_1}{\partial x_1} & \frac{\partial j_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial j_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial j_2}{\partial x_1} & \frac{\partial j_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial j_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial j_N}{\partial x_1} & \frac{\partial j_N}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial j_N}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

On peut ainsi exprimer le gradient et le hessien par :

$$\text{Équation 36} \quad \nabla_c J = 2 \mathbf{A} \mathbf{j}$$

$$\text{Équation 37} \quad \mathbf{H} = 2 \mathbf{A}^T \mathbf{A}$$

avec $\mathbf{j} = [j_1, \dots, j_N]^T$

Si, au pas k de l'identification, $\Delta x = x_{k+1} - x_k$, alors on peut réécrire la formule de Newton :

Équation 38 $(A^T A)\Delta x = -A^T f$

Cet algorithme, connu sous le nom de Gauss-Newton, est très efficace mais il impose des conditions mathématiques sur la matrice de sensibilité. De plus, on n'a aucun contrôle sur Δx , qui peut être trop grand et donc sortir les paramètres de l'espace admissible.

Pour pallier ces inconvénients, on peut utiliser l'algorithme de Levenberg-Marquardt qui propose une régularisation de l'Équation 38 :

Équation 39 $(A^T A + \lambda I)\Delta x = -A^T f$

où λ est un scalaire et I la matrice identité.

On remarque que l'on retrouve la direction donnée par Gauss-Newton si $\lambda = 0$, et la plus grande pente si $\lambda \rightarrow \infty$.

L'algorithme de Levenberg-Marquardt consiste donc en partant d'une valeur de λ assez élevée, de la diminuer d'un facteur 10 par exemple, à chaque décroissance de J . On passe ainsi graduellement d'un algorithme de plus grande pente à l'algorithme de Gauss-Newton.

IV.2.1.7 Synthèse

Ce chapitre nous a permis de comprendre le rôle et l'importance du choix des méthodes d'identification lors de la détermination des paramètres des lois de comportement. Nous avons développé plus particulièrement l'algorithme de Levenberg-Marquardt que nous allons utiliser lors de l'identification de nos lois de comportement.

IV.2.2 Résultats de l'identification

L'identification des lois de comportement choisies a été réalisée à l'aide du module d'optimisation du code Zebulon, développé par l'Ecole des Mines de Paris. Pour des raisons de confidentialité, les paramètres des lois ne sont pas exposés dans ce manuscrit.

IV.2.2.1 Identification du modèle de Kelvin-Voigt-Bingham

Ce modèle a été identifié à partir d'essais de fluage à différents niveaux de sollicitation. L'essai de fluage tel qu'il est réalisé sur la machine de traction consiste à effectuer un déplacement de la traverse à une vitesse de déformation constante jusqu'à obtention de la consigne en contrainte. Durant cette montée, la sollicitation est donc de type "pseudo-relaxation" où l'on impose une vitesse de déformation constante. Cette "pseudo relaxation" qui a lieu sur cet intervalle de temps doit être prise en compte lors de la simulation de l'essai car elle entraîne des phénomènes visqueux sur le matériau, modifiant de manière sensible la déformation visqueuse sur la suite de l'essai.

Les modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt étudiés ne permettent pas de décrire correctement ce temps de montée. L'étude du modèle plus complexe qui combine un modèle viscoplastique à seuil, le modèle de Bingham, et le modèle viscoélastique de Kelvin-Voigt (Figure 9) permet de décrire l'ensemble de notre essai.

Pour alléger la procédure d'identification, le modèle mixte a été écrit indépendamment à l'aide d'une routine Fortran et formulé de manière uniaxiale.

Il est résolu numériquement et la consigne de l'essai est exactement la même que celle de l'essai expérimental, à savoir une vitesse de déformation constante jusqu'à atteindre la consigne en contrainte qui est maintenue dans la suite de l'essai.

Les temps de discrétisation obtenus lors du calcul ne correspondant pas au temps d'acquisition de l'essai expérimental, l'identification se fait donc sur des intervalles de temps extrapolés entre les deux fichiers.

L'algorithme de Levenberg-Marquardt implémenté dans Zebulon est utilisé. Bien que les temps de calculs ne soient pas optimum avec cette méthode, elle demeure tout de même robuste et adapté à notre application dont les temps de résolution numérique de la loi sont courts.

IV.2.2.1.1 Identification à température ambiante

Les résultats de l'identification obtenus sont présentés sur la Figure 50 et la Figure 51.

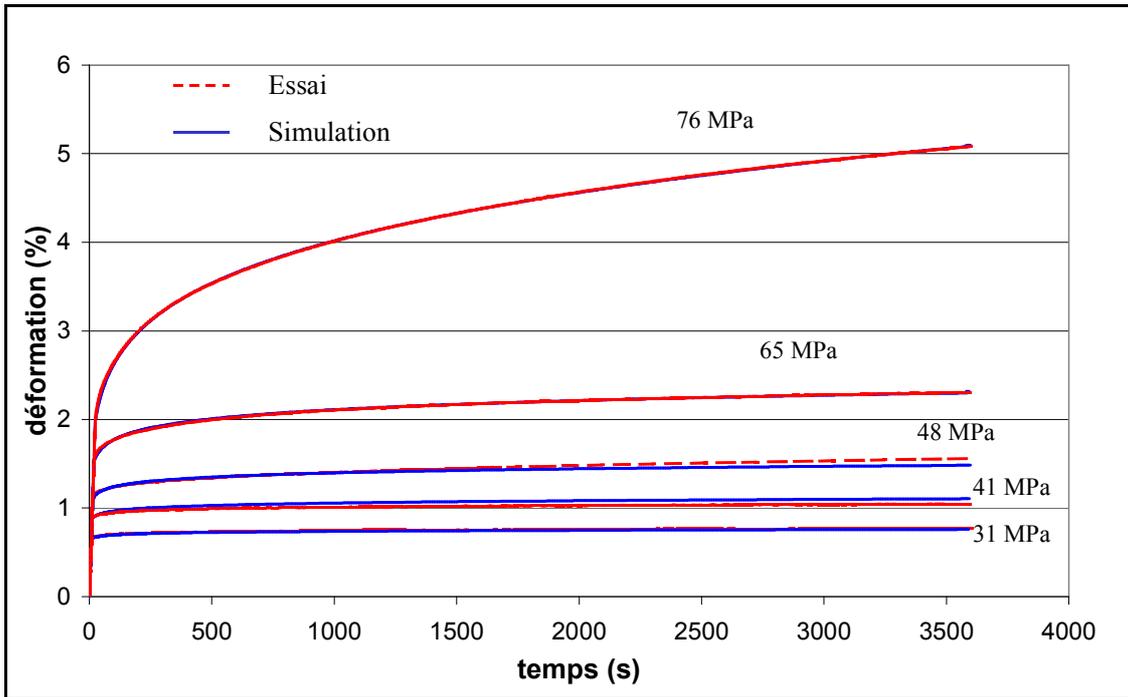


Figure 50 : Comparaison des courbes de fluage expérimentales et numériques à température ambiante

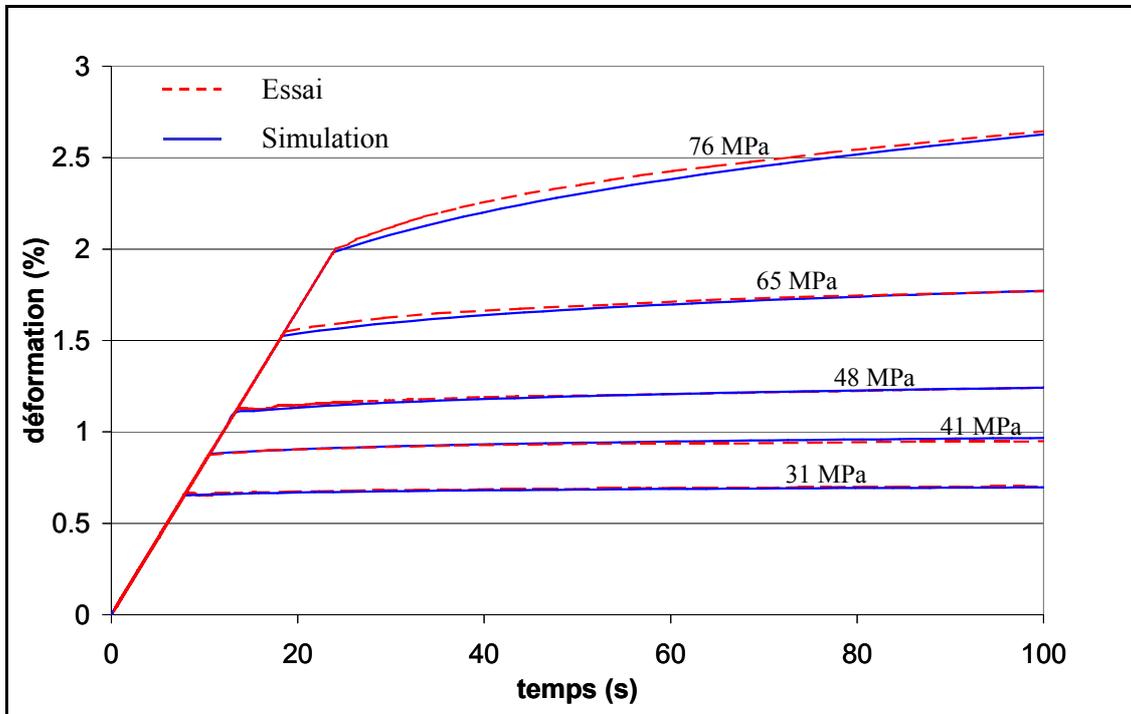


Figure 51 : Visualisation de la phase de mise en charge.

Les résultats de l'identification ont été obtenus au bout de 371 itérations pour un temps CPU de 1300 secondes. Le critère d'arrêt programmé est l'écart minimum entre deux itérations. Il a été défini à 0.001. La fonction coût optimum s'élève à 5,239, valeur satisfaisante étant donné qu'elle est le reflet de l'optimisation sur 5 essais.

Un zoom sur la mise charge permet de vérifier que la loi de comportement obtenue décrit correctement le temps de montée.

Pour les essais à des niveaux de contraintes plus élevés, on observe un léger décalage entre l'expérience et la simulation pour des temps faibles. Ce décalage est dû à notre loi de comportement qui ne « relaxe » pas assez la contrainte durant le temps de montée. Cependant cet écart est d'une part, relativement infime, et est de plus rattrapé sur le reste de l'essai.

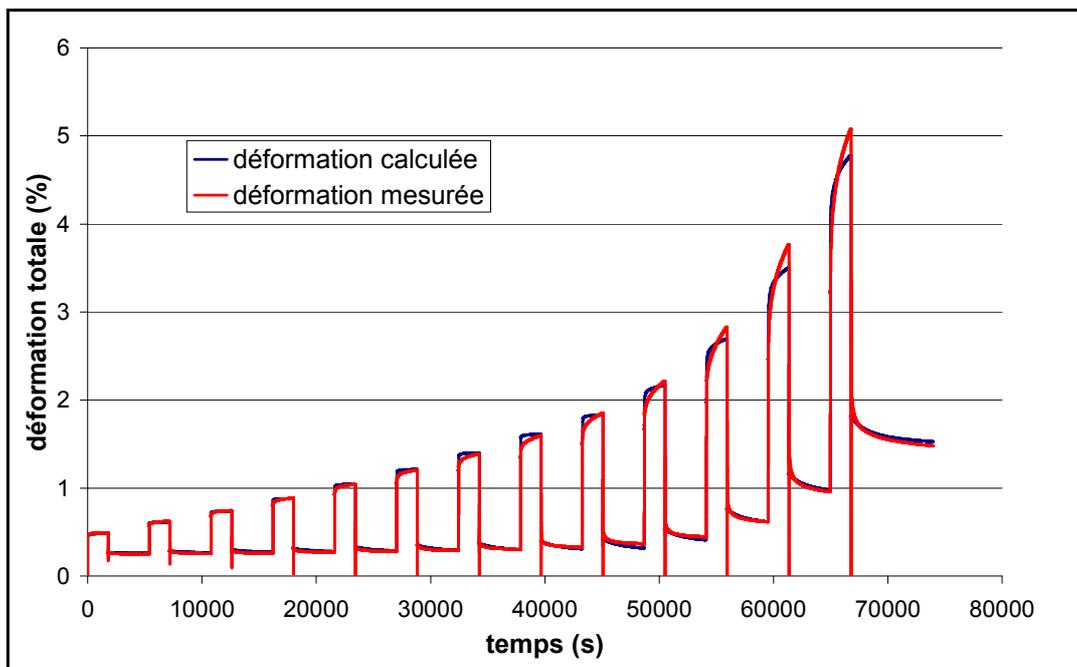


Figure 52 : Evolution de la déformation totale simulée et expérimentale sur un essai de fluage recouvrance à température ambiante

On observe également la bonne concordance des résultats dans le cas de l'identification à partir d'essais de fluage/recouvrance (Figure 52) malgré les légères différences apparaissant sur les essais de fluage à niveau de contrainte élevée.

IV.2.2.1.2 Identification à -60°C.

L'identification du modèle mixte à -60°C montre une aussi bonne concordance que les résultats à température ambiante, malgré les légères différences sur les niveaux de contrainte élevés.

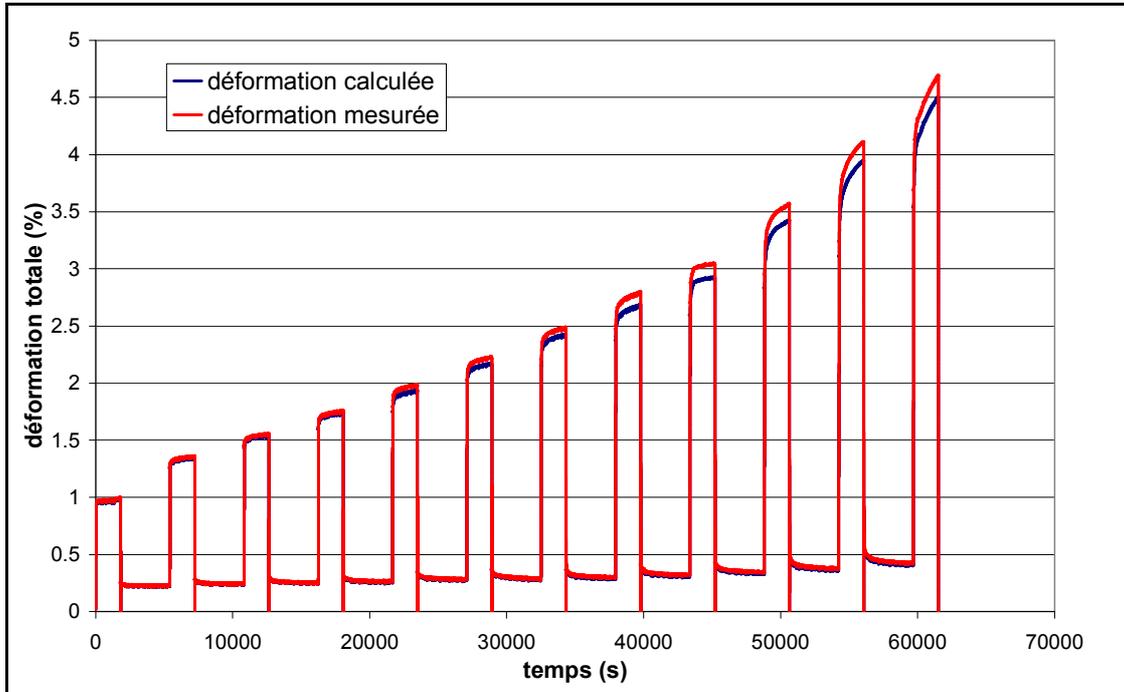


Figure 53 : Evolution de la déformation totale simulée et expérimentale sur un essai de fluage recouvrance à -60°C

En conclusion la loi viscoélastique-viscoplastique de Kelvin-Voigt-Bingham, permet d'obtenir un comportement très proche du comportement réel du matériau observé lors de l'expérience à température ambiante et à -60°C .

IV.2.2.2 Identification du modèle viscoélastique spectral

Nous présentons dans ce chapitre la procédure d'identification de la loi viscoélastique non linéaire spectrale. La procédure adoptée consiste à identifier séparément les différents paramètres à partir d'essais adaptés.

IV.2.2.2.1 Procédure d'identification

Nous regroupons dans cette partie l'analyse des procédures d'identification réalisées par divers auteurs, Petitpas puis Schieffer, en vue de l'identification de la loi spectrale [Petitpas 2000, Schieffer 2003].

Ce modèle de comportement viscoélastique comporte au total 8 paramètres dans le cas d'un matériau isotrope [Maire 1992] :

- 2 caractéristiques élastiques (E et ν),
- 2 coefficients liés à la viscosité (γ_R et ν_R),
- 2 coefficients liés à la non linéarité en contrainte (γ et p)
- 2 paramètres dédiés à la répartition spectrale des temps de relaxation (n_0 et n_c).

Une réflexion a été menée pour mettre en place un protocole d'identification nécessitant un minimum d'essais.

Nous distinguons trois contributions élémentaires caractérisant le comportement viscoélastique non linéaire [Maire 2000], la première est la contribution instantanée assurée par le tenseur de rigidité relaxé L_R , la seconde est la contribution visqueuse assurée par le spectre des temps de relaxation, la troisième concernant le comportement non linéaire en contrainte amené par la fonction $g(\sigma)$.

Par conséquent, l'influence de L_R apparaît lors de la mise en charge, celle du spectre au cours du maintien sous charge (fluage) et celle de $g(\sigma)$ sur des maintiens à différents niveaux de contrainte.

Un essai de fluage multiple, qui regroupe les trois aspects requis, permet donc de procéder à l'identification des trois entités. Cet essai consiste à appliquer des paliers de contrainte croissants et maintenus. Ce type de test limite le nombre d'essais mais aussi les incertitudes expérimentales (dispersion matériau, erreurs de positionnement au montage), les informations étant obtenues sur la même éprouvette, sans démontage

IV.2.2.2.2 Identification des propriétés élastiques

Le matériau étudié étant isotrope, la détermination du tenseur de rigidité élastique L se limite à la connaissance du module d'Young E et du coefficient de Poisson ν [Lemaitre 2001].

IV.2.2.2.3 Identification des paramètres visqueux

La démarche d'identification repose sur une connaissance précise de la vitesse de mise en charge.

Le spectre des temps de relaxation est là pour traduire le fait que la déformation anélastique du matériau est constituée d'un grand nombre de mécanismes élémentaires de déformation. Le premier mécanisme a très peu d'effet ($\mu_1=0$) et commence à $t_1=e^{n_1}$ exprimé en secondes, le dernier commence à $t_2=e^{n_2}$ et a également très peu d'effet ($\mu_2=0$) (Figure 54).

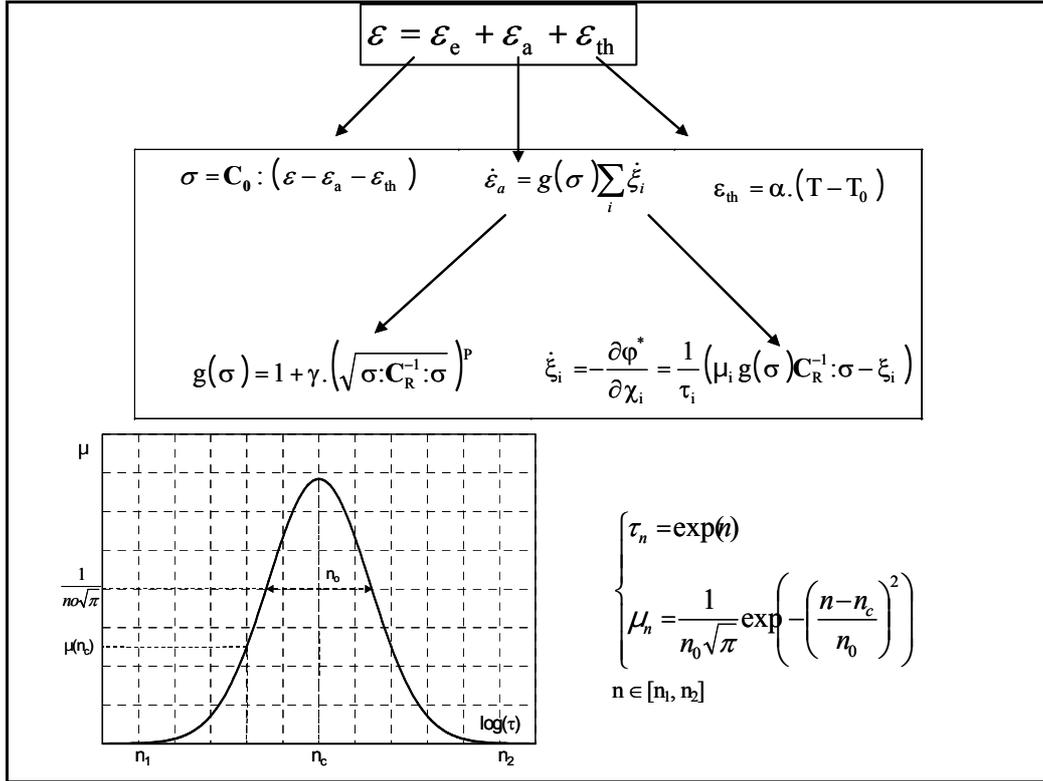


Figure 54 : Ecriture du modèle et description du spectre des temps de relaxation

Entre ces deux instants, les mécanismes voient leur effet augmenter de t_1 à $t_c = e^{n_c}$, puis décroître de t_c à t_2 . On rappelle les équations caractéristiques pour un spectre de forme gaussienne :

$$\tau_i = e^{n_i}$$

$$\mu_i = \frac{1}{n_0 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\left[\frac{i - n_c}{n_0}\right]^2\right) \quad \text{pour } i \in [n_1, n_2]$$

Le spectre des temps de relaxation est connu lorsque les deux paramètres n_0 et n_c sont identifiés [Nowick 1972].

La fonction non-linéarisante s'écrit sous la forme : $g(\sigma) = 1 + \beta(\sqrt{\sigma : L_R^{-1} : \sigma})^p$ et introduit la non-linéarité en contrainte dans le modèle.

Le tenseur d'anisotropie visqueuse, L_R , fait intervenir deux paramètres à identifier γ_R , représentant les effets de la viscosité en traction, et ν_R , le coefficient de Poisson du tenseur relaxé. Nous avons considéré que l'isotropie du tenseur des effets visqueux est conservée. Le tenseur L_R^{-1} prend alors la forme :

Équation 40 $L_R^{-1} = S_R = \begin{bmatrix} \gamma_R \cdot S_{11} & -\gamma_R \cdot S_{12} & 0 \\ -\gamma_R \cdot S_{12} & \gamma_R \cdot S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_c \cdot S_{66} \end{bmatrix}$ avec $\gamma_c = \gamma_R \frac{1 + \nu_R}{1 + \nu}$

où γ_c représente les effets visqueux en cisaillement. Les termes S_{ii} du tenseur des souplesses élastiques ayant été définis précédemment, le terme γ_R peut être obtenu en effectuant un test de fluage uniaxial. Pour les matériaux massifs, le coefficient de Poisson relaxé ν_R est identifié à partir d'un essai de fluage en cisaillement. La souplesse de notre matériau fait qu'il n'est pas possible de réaliser un tel essai de manière triviale. Une autre solution pour déterminer ce paramètre consisterait à mesurer la déformation dans le plan de sollicitation d'une éprouvette lors d'un essai de fluage longue durée. Le coefficient de Poisson relaxé serait mesuré en fin d'essai. Cependant, un tel essai n'a pu être réalisé pendant la thèse. Ce coefficient a été considéré égal au coefficient de Poisson élastique.

IV.2.2.2.4 Choix de la procédure d'identification

La procédure d'identification choisie se déroule en trois étapes :

- dans la première étape, on identifie n_o et n_c en ajustant la déformation normalisée d'un palier de fluage multiple. Un seul palier est suffisant puisque le matériau est isochronique. Un matériau est dit isochronique si, pour des essais à différents niveaux de sollicitation, à différents états d'endommagement, uni ou multi-axiaux, la réponse normalisée de fluage est la même [Maire 1992]. Cette déformation s'écrit $\bar{\varepsilon}_v = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon(t_0)}{\varepsilon(t_\infty) - \varepsilon(t_0)}$. Par conséquent, tous les paliers de fluage une fois normalisés sont superposables.
- Dans la seconde, le paramètre de non linéarité γ est identifié sur la représentation $\varepsilon = f(t)$ d'un essai de fluage multiple.
- Enfin, pour l'identification de L_R^{-1} , un essai de fluage simple présentant une part de déformation anélastique suffit.

La bibliographie préconise la réalisation de 3 essais de fluage normalisé afin d'être certains de la valeur du couple (n_o , n_c) identifié [Schieffer 2003].

Le fluage multiple en cisaillement peut être remplacé par un essai de fluage uniaxial de temps

important, tel que $E_R = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ et $\nu_R = \frac{\varepsilon_{2R}}{\varepsilon_{1R}}$

IV.2.2.2.5 Identification à partir d'essais homogènes

Nous avons étudié en détail la loi viscoélastique spectrale et la procédure d'identification à adopter pour identifier ses paramètres au regard de la bibliographie. Nous allons maintenant décrire les outils mis en œuvre pour identifier la loi spectrale. Le module d'optimisation du logiciel Zebulon nous permet de déterminer les coefficients de la loi spectrale, afin de reproduire au mieux le comportement observé lors d'essais expérimentaux.

La méthode des essais homogènes est une technique couramment utilisée pour identifier la valeur des paramètres d'une loi de comportement [Kleinermann 2000]. Elle consiste à appliquer les consignes des différents essais sur un seul élément.

Dans ce cadre, différentes méthodes analytiques, propres à l'expérience choisie et à la loi de comportement à identifier, permettent, moyennant certaines simplifications, de déduire du résultat expérimental les valeurs des paramètres à identifier. Nous utiliserons comme base expérimentale de l'identification, des courbes de fluage recouvrance à température ambiante puis à -60°C .

La précision et la validité du jeu de paramètres que nous allons identifier sont étroitement liées au choix de la procédure d'optimisation employé lors du processus d'identification.

Elles sont aussi fonction du choix des fonctions objectif à minimiser, que ce soit pour la fonction erreur (image de l'écart entre le résultat obtenu par simulation et le résultat souhaité) ou pour la fonction d'optimisation (générant les nouveaux jeux de paramètres à optimiser).

Au sein de cette méthode de nombreux paramètres influent sensiblement sur la précision et le temps des calculs. Ainsi, les paramètres qui se sont révélés les plus influents (paramètres de l'algorithme d'optimisation et paramètre de résolution de la loi de comportement par la θ -méthode) ont fait l'objet d'étude et de campagnes d'essais comparatives afin d'aboutir aux choix d'optimisation adéquats.

IV.2.2.3 Identification du jeu de paramètre optimal

IV.2.2.3.1 Identification à température ambiante

L'identification des paramètres du spectre n_0 et n_c a été réalisée à partir de trois essais de fluage normalisés. Les autres paramètres sont identifiés sur un essai de fluage multiple. L'algorithme choisi pour l'optimisation est de type Levenberg-Marquardt. La convergence de l'optimisation pour l'identification des paramètres de spectre est atteinte après 45 itérations pour un temps CPU de 34 secondes. La valeur de la fonction coût finale pour les 3 essais est de 1,26. En ce qui concerne l'identification sur l'essai de fluage multiple, la convergence est

atteinte après 150 itérations, pour un temps CPU de 4400 secondes. La valeur finale de la fonction coût est de 2,1 et le critère d'arrêt programmé est l'écart minimum entre deux itérations défini à 0,001.

Le jeu n_0 , n_c obtenu devant donner une courbe de déformation normalisée est décrit sur la Figure 55. Ces résultats nous montrent la difficulté de décrire de manière précise le fluage normalisé. Les paramètres identifiés seront utilisés pour la suite de l'identification. Ils pourront, au besoin, être recalés sur les essais de fluage multiple.

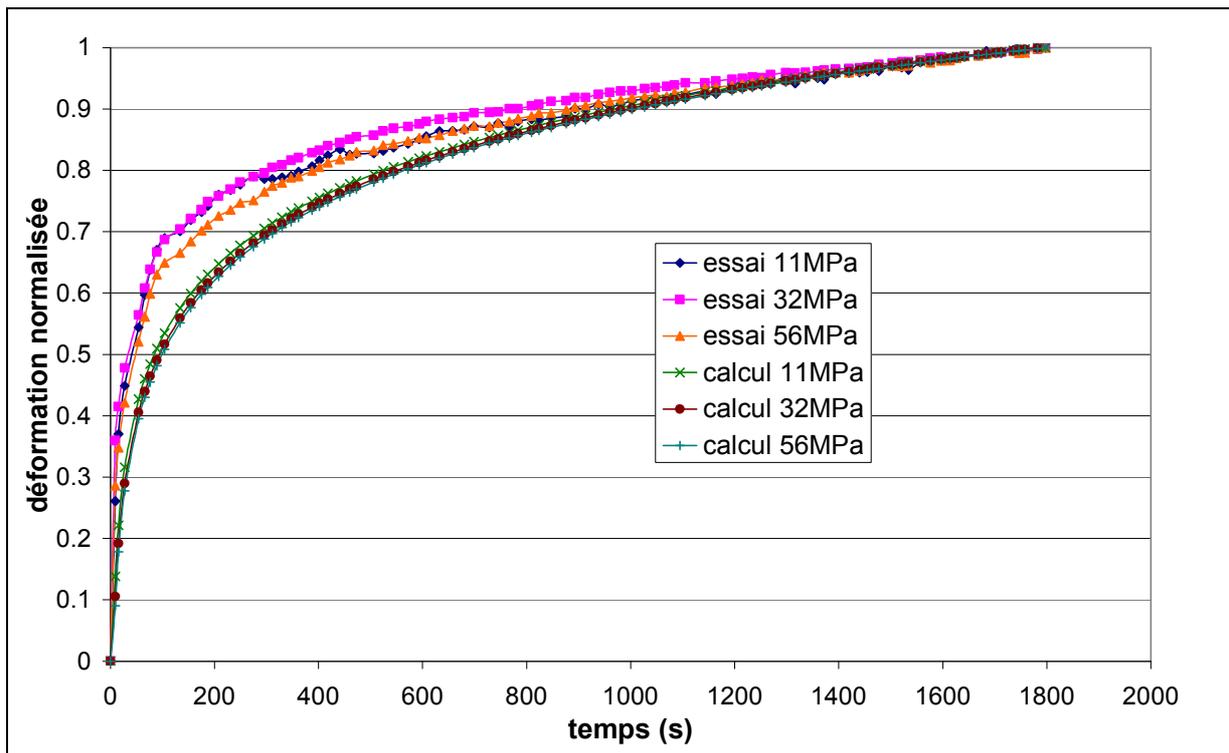


Figure 55 : Courbes des déformations normalisées en fonction du temps (identification de n_0 et n_c)

La Figure 56 décrit l'évolution de la déformation totale en fonction du temps pour un essai de fluage/recouvrance.

Bien que n'atteignant pas la déformation expérimentale lors de la recouvrance, nous observons un bon comportement de la loi spectrale lors d'un essai de fluage recouvrance.

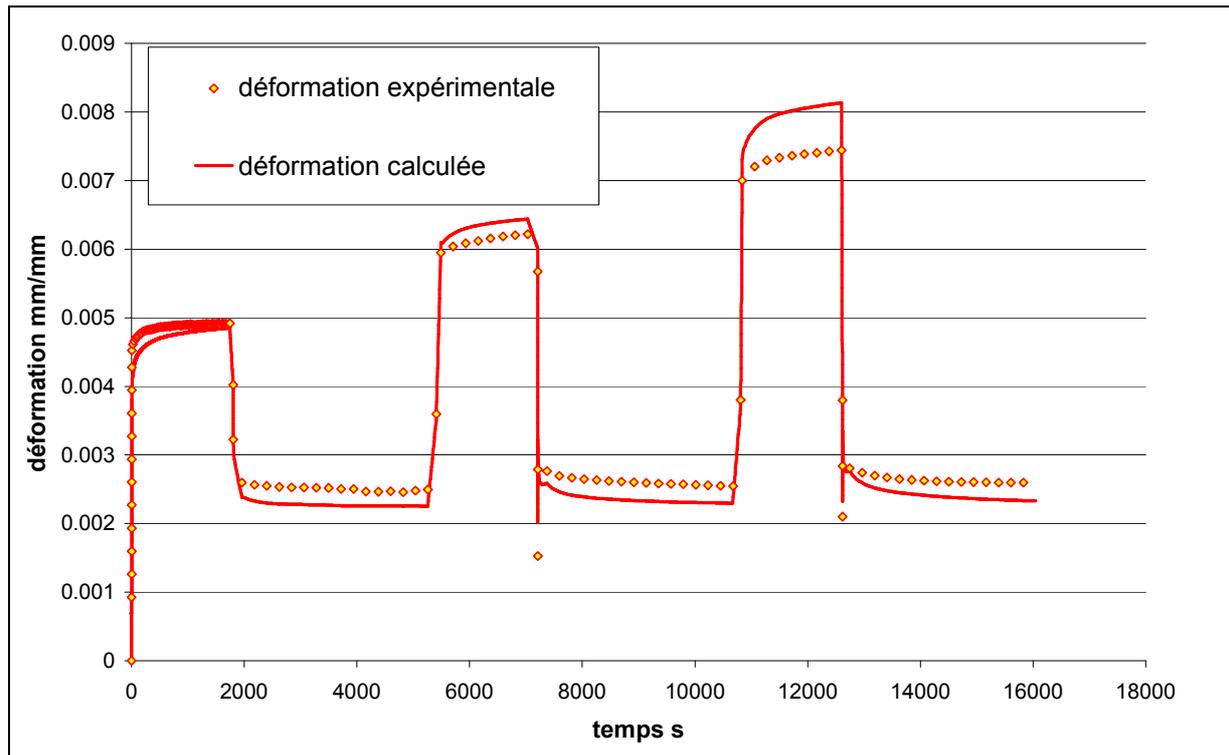


Figure 56 : Courbes des déformations en fonction du temps pour un essai de fluage recouvrance (identification de E_r , ν_r , β et p)

L'allure de la courbe de déformation au cours des paliers de fluage dépend directement des paramètres n_0 , n_c . La bonne allure de la courbe issue de la simulation indique que le jeu de paramètres spectraux obtenu est satisfaisant. On décrit ainsi correctement le comportement en fluage du matériau.

Cependant, on remarque que cette modélisation comporte des lacunes, la déformation calculée dérivant de la déformation expérimentale lors de l'augmentation de la contrainte. A ce stade, Il est difficile de dire si ce phénomène est du à la non prise en compte dans le modèle du comportement viscoplastique du matériau, ou si le jeu de paramètres identifié n'est pas optimal.

L'identification a donc été menée sur des essais de plus longue durée à des niveaux de contrainte supérieurs.

On observe, sur la Figure 57, que pour des niveaux de contrainte élevés, le modèle montre ses limites. La non linéarité n'est pas suffisante pour décrire tous les niveaux de contrainte. L'ajout dans cette loi d'une déformation de type viscoplastique, telle que celle proposée par Maire peut nous permettre de décrire tout le domaine exploité [Maire 1996].

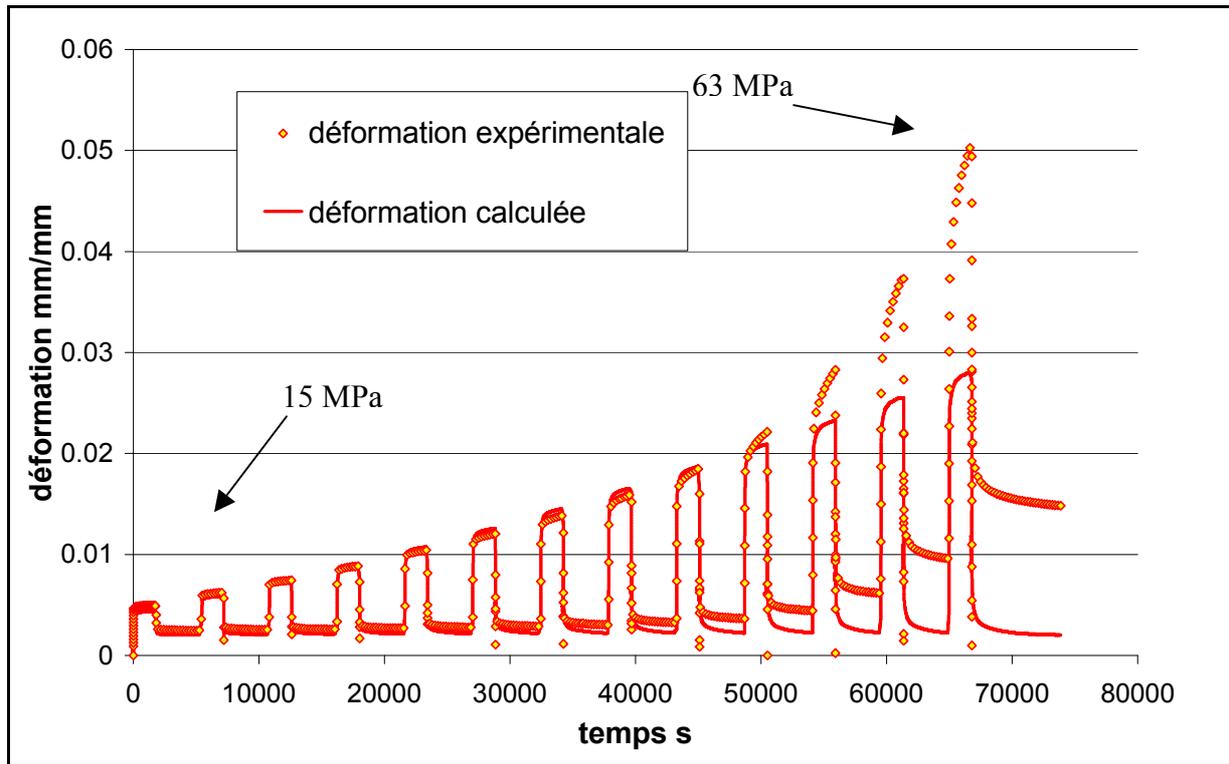


Figure 57 : Evolution de la déformation totale simulée et expérimentale sur un essai de fluage recouvrance

Cependant, pour notre application, la description des phénomènes à -60°C reste la priorité, bien que la modélisation à température ambiante soit intéressante pour la compréhension des phénomènes visqueux.

IV.2.2.3.2 Identification à -60°C

L'identification a été menée avec la même démarche qu'à température ambiante dans le but d'obtenir un nouveau jeu de coefficients à une température de -60°C .

Pour l'essai de fluage multiple, la convergence est atteinte après 195 itérations, pour un temps CPU de 5600 secondes. La valeur finale de la fonction coût est, dans ce cas, de 0,09. L'image de cette valeur de fonction coût relativement faible, pour un tel essai, peut être observée sur la Figure 58.

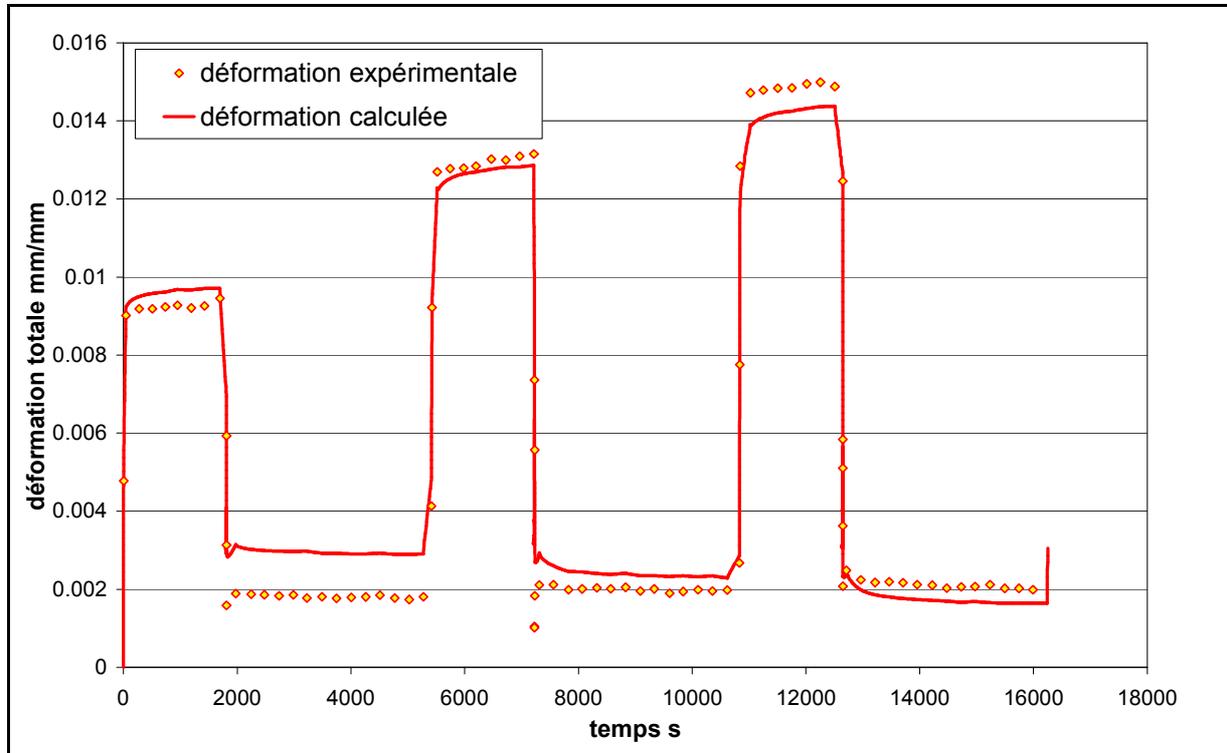


Figure 58 : Evolution des déformations en fonction du temps sur essai de fluage recouvrance (identification de E_r , ν_r , β et p)

La loi montre un bon comportement pour des contraintes faibles. L'identification sur des niveaux de contraintes plus importants semble donc prometteuse.

En effet, l'identification sur des valeurs de contraintes supérieures de 30 MPa au seuil conventionnel d'écoulement (110MPa à -60°C) donne des résultats convenables (Figure 59), la fonction coût finale étant de 1,9.

En ce qui concerne les paliers de fluage, la déformation calculée est inférieure à la déformation expérimentale jusqu'à environ 100MPa puis la dépasse jusqu'à 130MPa. Le modèle étant de nature viscoélastique, il montre ses limites, lorsque l'on observe la recouvrance.

La non linéarité permet de reproduire la déformation de recouvrance à des temps et des contraintes faibles, ainsi qu'à des temps et des contraintes élevées. Entre les deux domaines, le résultat est moins convainquant bien que le comportement général de la loi soit correct.

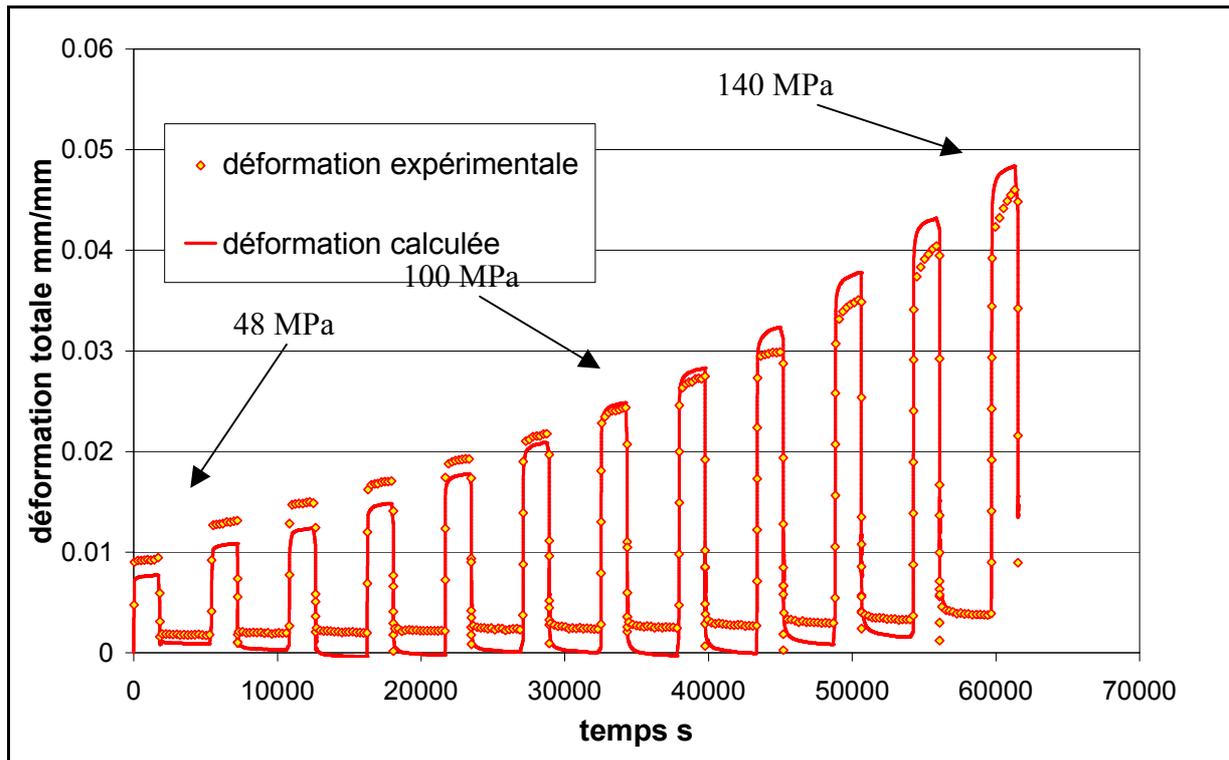


Figure 59 : Evolution de la déformation totale calculée et expérimentale sur un essai de fluage recouvrance à -60°C

Nous pouvons supposer aux vues de ces résultats d'identification que le modèle est suffisant à de faibles niveaux de contrainte et qu'il montre ses limites à des niveaux plus élevés. Une des raisons expliquant cette limite peut provenir du fait que le matériau ait un comportement viscoplastique à partir d'un certain seuil de contrainte et que le non linéarité du modèle ne suffit pas à englober cette déformation supplémentaire.

IV.3 Synthèse

Nous avons exposé dans ce chapitre les raisons de nos choix des lois de comportement. Deux lois ont été privilégiées en vue de l'application au calcul de structure.

Une loi rhéologique, présente dans les codes de calcul, de nature viscoélastique – viscoplastique.

Une loi viscoélastique non linéaire inscrite dans un cadre thermodynamique rigoureux.

Après avoir évoqué les techniques et algorithmes d'identification, nous avons mené l'identification de ces lois de comportement à température ambiante et à -60°C . Les identifications donnent des jeux de paramètres donnant des résultats satisfaisants que nous allons utiliser pour le calcul de structure.

Références bibliographiques

- [Chaboche 1991] Chaboche J. L., Nouailhas D., Savalle S., "AGICE : Logiciel pour l'identification interactive graphique des lois de comportement", *La Recherche Aérospatiale*, 3, (1991), pp 59-76.
- [Kleiner mann 2000] Kleiner mann J.-P., "Identification paramétrique et optimisation des procédés de mise à forme par problèmes inverses", Thèse de doctorat de l'Université de Liège, 2000.
- [Laurin 2003] Laurin F., Huchette C., Leroy F.H., Carrere N., Maire J.F., "Analyse multiéchelle de la défaillance des structures en matériaux composites", 13èmes Journées Nationales sur les Composites, Strasbourg, 12, 14 mars 2003
- [Lemaitre 2001] Lemaitre J., Chaboche J.L., "Mécanique des matériaux solides" 2ème édition Dunod (2001)
- [Magnin 2003] Magnin V., "Optimisation et algorithmes génétiques", <http://www.eudil.fr/~vmagnin/index.html> (2003).
- [Maire 1992] Maire J.F., "Etudes théorique et expérimentale du comportement de matériaux composites en contraintes planes", Thèses de doctorat, N°282, Université de Franche-Comté (1992)
- [Maire 1996] Maire J.-F., Lesné O., Petitpas C., "Une nouvelle approche de la modélisation du comportement visqueux des composites organiques", *Comptes rendus des JNC10*, Paris, 1996.
- [Maire 2000] Maire J.F., Schieffer A., Leveque D., "Prévision de la tenue au fluage", Programme Américo PEA N°0134059 – ONERA/DMSE (2000)
- [Petitpas 2000] Remy Petitpas C., "Analyse et prévision du comportement à long terme des composites fibres de carbone/matrice organique", Thèse de doctorat, N°801, Université de Franche-Comté (2000)
- [Schieffer 2003] Schieffer A., "Modélisation multi échelle du comportement mécanique des composites à matrice organique et effets du vieillissement thermique", Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes (2003)

Chapitre 5

MODELISATION DE STRUCTURES DE BALLONS

| | | |
|------------|--|------------|
| <i>V.1</i> | <i>Modèle prenant en compte les frottements</i> | <i>105</i> |
| V.1.1 | Modélisation du frottement | 106 |
| V.1.2 | Analyse des résultats | 108 |
| <i>V.2</i> | <i>Modèle local</i> | <i>108</i> |
| V.2.1 | Enoncé du principe d'équivalence | 109 |
| V.2.2 | Application à notre étude | 110 |
| V.2.3 | Analyse des résultats | 113 |
| <i>V.3</i> | <i>Validation des lois de comportement sur structure</i> | <i>113</i> |
| V.3.1 | Validation de la loi mixte | 114 |
| V.3.2 | Validation de la loi spectrale | 117 |
| <i>V.4</i> | <i>Synthèse</i> | <i>120</i> |

V MODELISATION DE STRUCTURES DE BALLONS

Cette modélisation a pour but de reproduire par éléments finis les essais réalisés avec le dispositif expérimental Nirvana. La comparaison entre les essais simulés et les essais expérimentaux, permettra la validation des lois de comportement. Cette comparaison implique que l'on ait une excellente fiabilité et représentativité des modèles éléments finis. Nous allons présenter dans ce chapitre plusieurs modèles ayant des degrés de complexité et de fiabilité croissants.

V.1 Modèle prenant en compte les frottements

Lors des premiers essais sur le dispositif Nirvana, l'échantillon considéré était encastré entre les parties haute et basse du dispositif au niveau du joint après l'application de la pré-tension, ce qui ne permettait pas de faire varier cette dernière en cours d'essai.

Pour remédier à ce problème, une modification du dispositif d'essais Nirvana a été nécessaire. La diminution du niveau vide lors de l'essai ainsi que l'application de graisse à vide sur les joints d'étanchéité et sur l'anneau en nylon, ont permis de modifier la pré-tension au cours de l'expérience (paragraphe III.1.2.5). Le glissement de l'échantillon entre les joints et les forces de frottement ont été pris en compte dans les modèles (Figure 60).

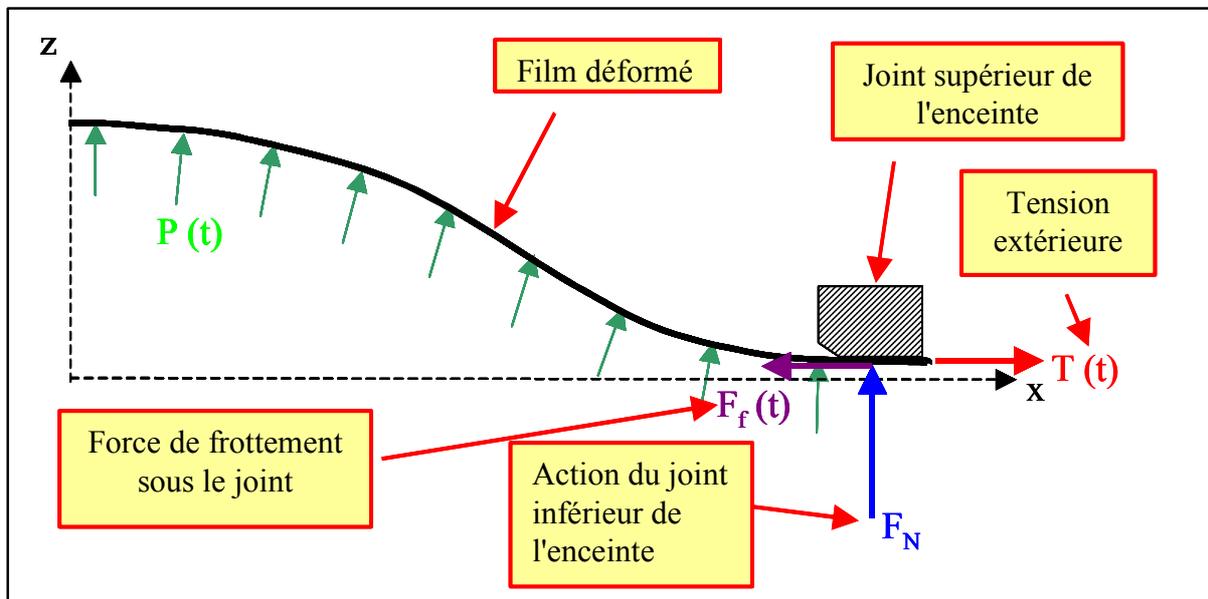


Figure 60 : Section radiale de l'échantillon sous le joint du dispositif d'essai.

V.1.1 Modélisation du frottement

Cette simulation par éléments finis a été développée dans le code de calcul "MSC. Marc-Mentat" sur lequel est implémenté la loi mixte.

Conformément à la géométrie du dispositif expérimental, ces essais simulés sont réalisés sur un disque de 1450 mm de diamètre et de 50 μ m d'épaisseur, afin de représenter un assemblage central de ballon (Figure 61). Cet assemblage est représenté par une surépaisseur de 46 μ m. Bien que les assemblages ne soient pas constitués exactement du même matériau que le fuseau, nous considérons que leurs caractéristiques mécaniques sont identiques. Nous avons vérifié cette hypothèse par une série d'essais de traction et de fluage sur assemblages.

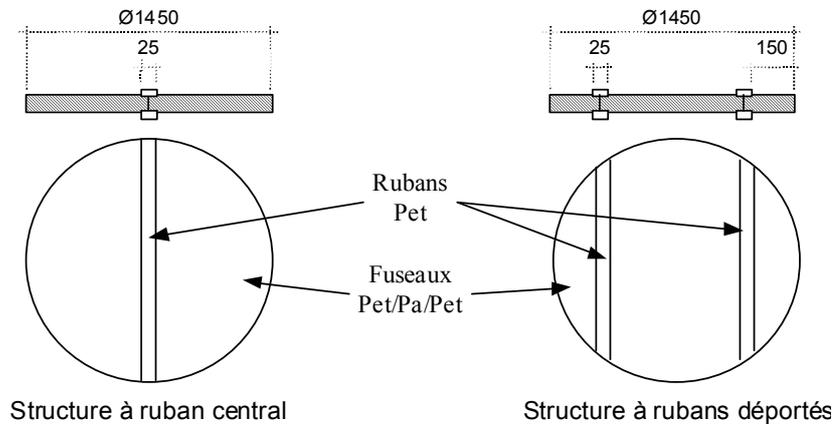


Figure 61 : Description des échantillons testés

Le maillage comprend 4792 éléments quadrangles de type coque (Figure 62).

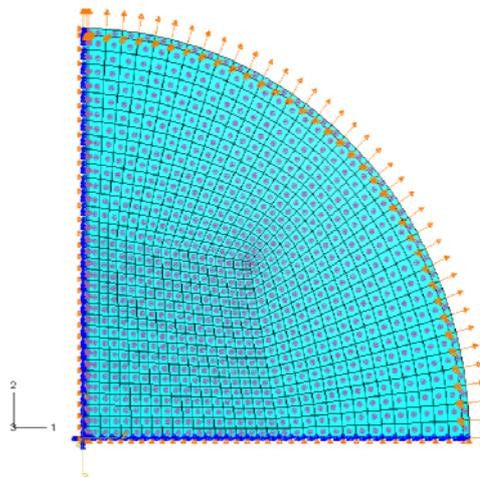


Figure 62 : Maillage du quart de disque

Des tests ont été réalisés sur des éléments de type "coque" et de type "membrane" qui semblent plus représentatifs de notre matériau. Les coques donnent des résultats comparables aux membranes avec des temps de convergence inférieurs. Notre choix c'est donc porté sur

des éléments de type coque à interpolation linéaire. Etant données les valeurs de déformation observées et les grands déplacements de la structure, la non linéarité géométrique est activée. Concernant le matériau, nous avons utilisé les coefficients des lois identifiés précédemment (IV.2).

L'essai que nous modélisons a été réalisé au préalable sur le dispositif expérimental. Les consignes de pression et de pré-tension appliquées comme conditions limites sont issues de l'acquisition au cours de l'essai et sont donc strictement identiques aux paramètres réels. L'essai consiste donc à appliquer une pré-tension représentative d'un BPS de 10m de diamètre gonflé à 15hPa. La valeur de 15 hPa est maintenue constante durant environ 2 jours à température ambiante.

Afin d'avoir un modèle le plus simple possible, le frottement ne sera modélisé que sur une ligne de nœuds. Le quart de disque modélisé est décomposé en deux corps déformables (Figure 63). La première zone (Figure 63 - film contact) vient en contact avec le joint (Figure 63 – corps rigide). La deuxième zone correspond au reste de l'échantillon sur lequel est appliqué le différentiel de pression (Figure 63 - film intérieur). Les paramètres de contact sont appliqués à la ligne de nœud frontière entre ces deux zones.

Du fait de la géométrie de la surface rigide adoptée pour modéliser le joint supérieur et de la différence de pression à l'intérieur de l'enceinte, le deuxième corps déformable (film_intérieur) peut venir en contact avec le joint. Mais le fait d'avoir créé deux corps déformables permet de définir un coefficient de frottement nul entre le joint et la partie intérieure du film, évitant ainsi l'apparition des forces de frottement parasites, qui viendraient fausser la valeur totale de la force de frottement.

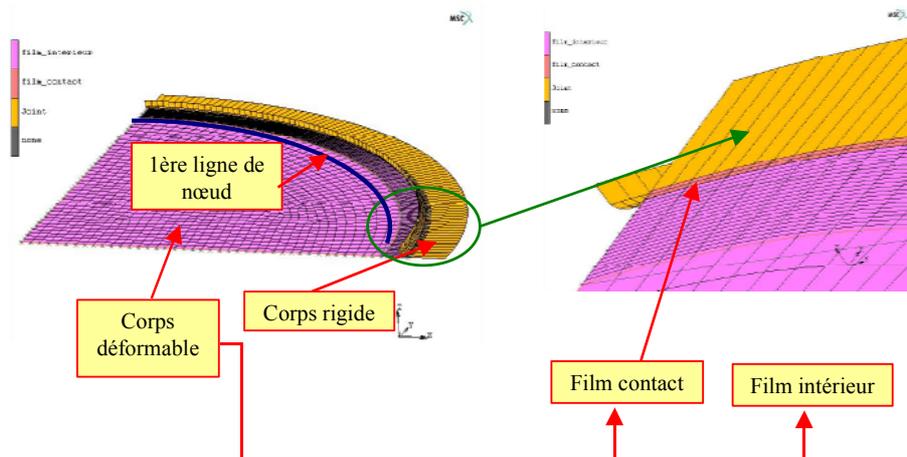


Figure 63 : Définition du corps de contact

V.1.2 Analyse des résultats

Nous présentons ci-dessous l'évolution du point central de l'échantillon au cours de l'essai dans la direction d'application de la pression (Figure 64).

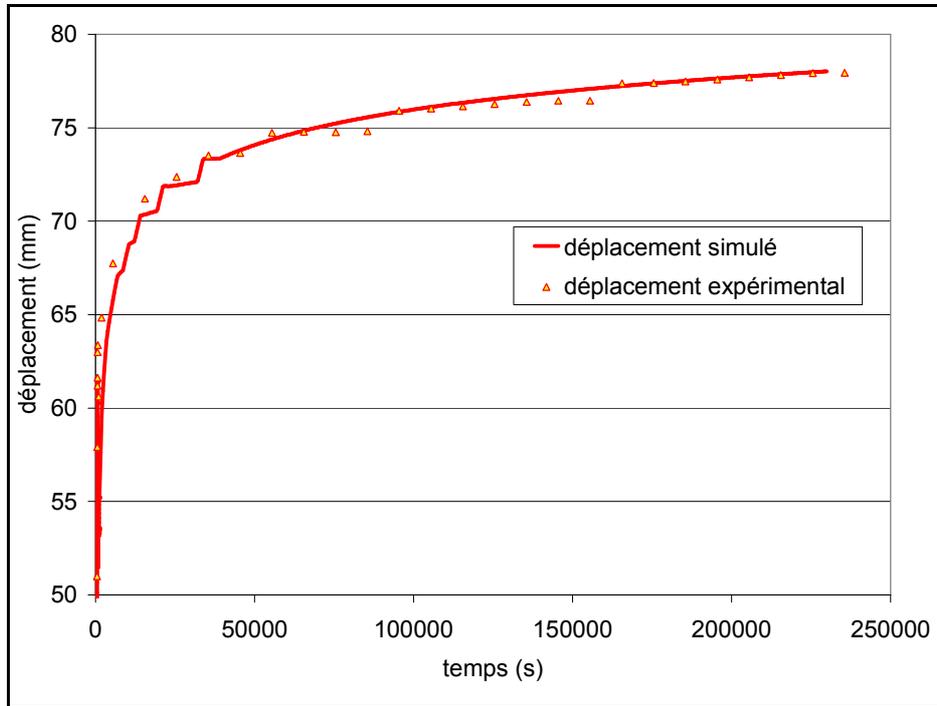


Figure 64 : flèches du point central de l'échantillon.

La modélisation éléments finis de l'essai permet de simuler le comportement collant/glissant du film observé lors de l'expérience. Le comportement glissant est observé lors de l'application de la pré-tension ainsi que lorsque la force induite par la pression sur le film est supérieure à la pré-tension exercée. Dans ce dernier cas, le film rentre à l'intérieur de l'enceinte. Dans les autres cas, le film est "collé". Ce modèle fournit des résultats convenables sur ce type d'essais. Les valeurs de frottements utilisées lors de la simulation proviennent de résultats expérimentaux (Figure 28). Ces résultats sont valables pour un certain niveau de vide dans l'enceinte, pour une certaine quantité de graisse sur le joint et pour une bande de 25mm de large. Les conditions de frottement lors d'essais sur un assemblage ou une calotte sont différentes et difficilement reproductibles. Nous avons donc choisi de développer un modèle plus fiable et adapté à tout type d'essais.

V.2 Modèle local

La précédente modélisation de l'essai expérimental a mis en évidence certaines difficultés. Il est par exemple très difficile de simuler les conditions réelles de chargement sur la périphérie du disque à cause des incertitudes sur la valeur des frottements.

L'idée de cette nouvelle modélisation est de s'affranchir de ces difficultés, en limitant la zone modélisée. Pour cela, on applique en périphérie de la nouvelle surface d'étude, les déplacements relevés par stéréo-corrélation, lors des essais expérimentaux.

Cette conception de la modélisation n'est pas triviale. Nous démontrons donc sur un cas test que cette méthode est mécaniquement équivalente à la méthode d'application de la pré-tension.

V.2.1 Énoncé du principe d'équivalence

A l'aide du schéma de principe suivant (Figure 65), énonçons dans un cas simple, le principe d'équivalence .

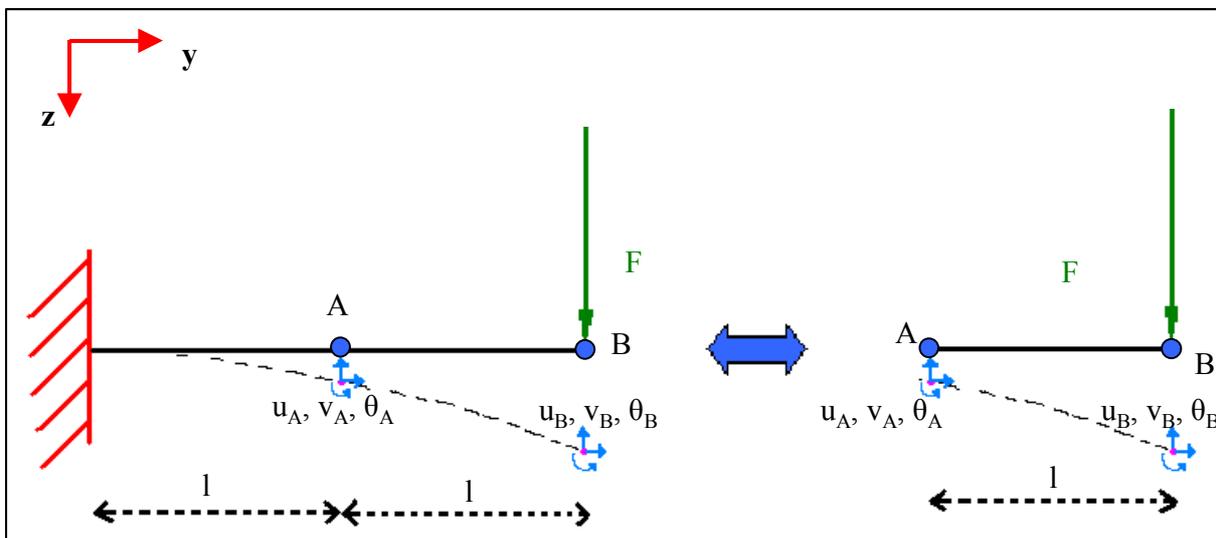


Figure 65 : Schéma du principe d'équivalence.

Soit une poutre de longueur $2l$. On encastre sa base et on applique un effort vertical F en bout de poutre. On relève alors les déplacements suivant les trois degrés de liberté u, v, θ , en milieu et en bout de poutre (points A et B).

Prenons maintenant la même poutre mais en ne conservant que la moitié droite de celle-ci. On applique le même effort F en bout de poutre, et on applique comme conditions limites au point A, les déplacements relevés dans le cas précédent.

Les résultats de ces simulations par éléments finis pour démontrer le principe d'équivalence sont présentés dans la Figure 66.

Les déplacements observés sur la poutre et sur la demi-poutre avec les conditions aux limites en déplacement sont identiques même en activant la non linéarité géométrique.

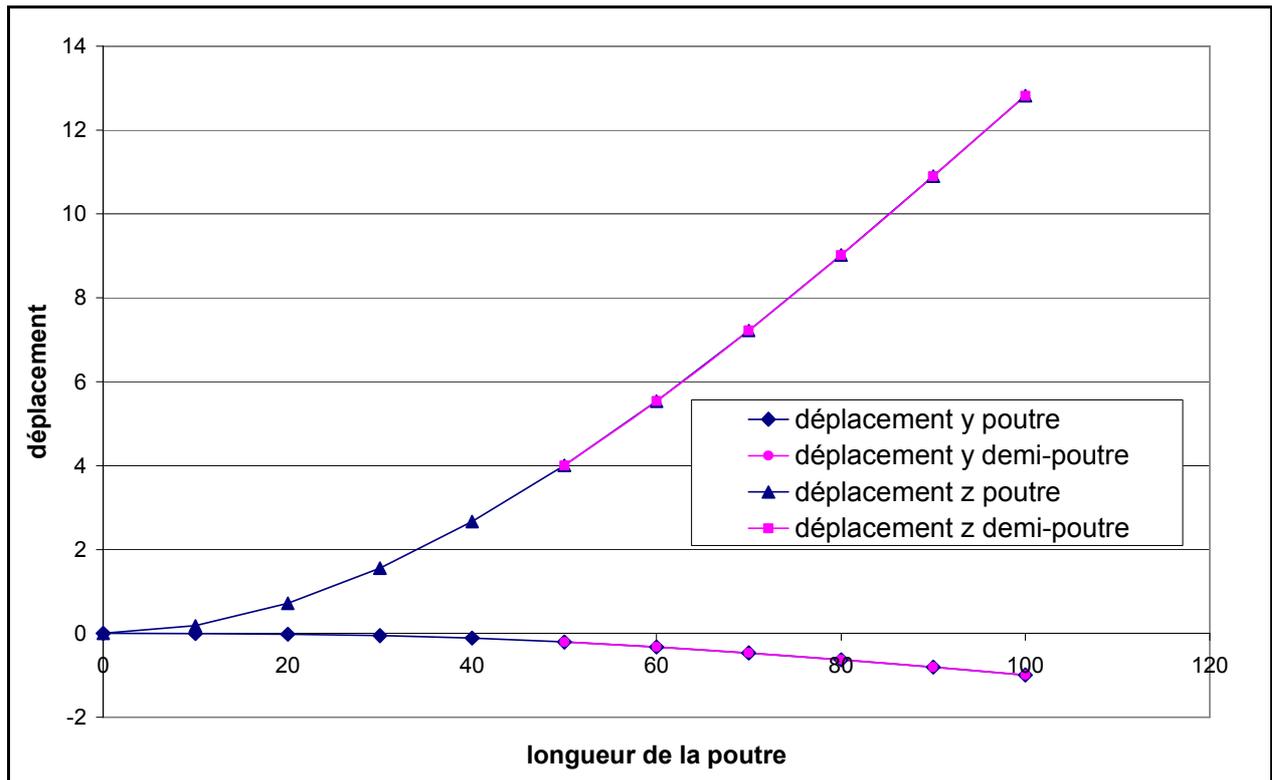


Figure 66 : Résultats EF du principe d'équivalence

Le principe d'équivalence étant respecté, nous pouvons donc appliquer la méthode à notre modélisation.

V.2.2 Application à notre étude

Le dispositif expérimental Nirvana est équipé d'un système de stéréo-corrélation qui permet de relever les champs de déplacements 3D de l'échantillon. En appliquant le principe énoncé ci-dessus, il est possible de s'affranchir des problèmes de modélisation liés à la complexité du chargement à la périphérie du disque.

En effet, on obtiendra les mêmes résultats si l'on choisit de ne modéliser qu'une portion réduite du disque, sur la périphérie de laquelle seront appliqués les déplacements relevés lors des essais expérimentaux. Il est important de noter que le repère cartésien établi par le système de stéréo-corrélation, n'est pas forcément centré sur l'échantillon (Figure 67).

Le centre du repère cartésien du modèle numérique EF devant être confondu avec celui du champ mesuré, on ne peut plus considérer les conditions de symétrie qui nous permettait de réduire l'étude à un quart de disque.

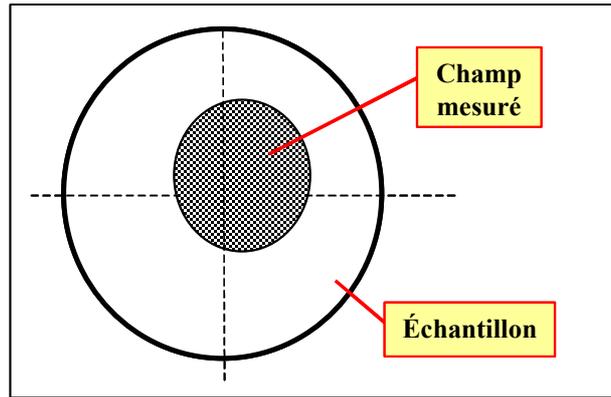


Figure 67 : Position du champ mesuré.

On modélise donc le disque entier, duquel on extrait un disque concentrique de diamètre plus petit (Figure 68).

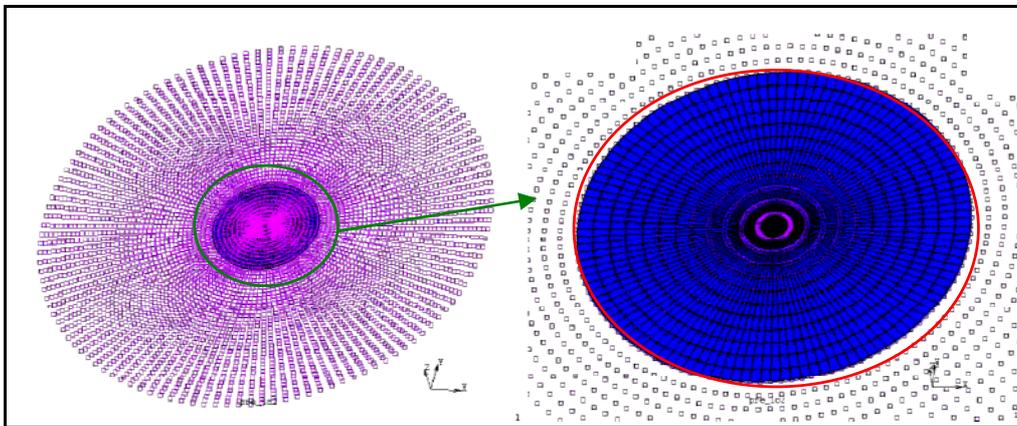


Figure 68 : Définition du modèle local

Les conditions aux limites de ce nouveau modèle sont moins complexes que le modèle avec frottement. Il suffit d'appliquer la pression et les champs de déplacements à la périphérie de ce disque réduit pour obtenir une configuration équivalente.

Toutefois, si cette technique permet de s'affranchir des difficultés de modélisation de la périphérie de l'enceinte Nirvana, l'application des conditions expérimentales de déplacements nécessite un travail d'interpolation dans l'espace et dans le temps. En effet, un point de la grille issu de la mesure expérimentale ne correspond pas exactement à un nœud de notre modèle. De plus, les relevés expérimentaux sont effectués à des temps qui ne correspondent pas non plus aux temps de la simulation. Un travail de programmation a été mené afin de mettre en forme les données et de les implémenter dans le code de calcul.

V.2.2.1 Caractéristiques du modèle

L'essai simulé consiste à maintenir la pression constante sur quelques heures à différents niveaux de pression (Figure 69). La consigne de pression appliquée sur le modèle local est identique à l'essai expérimental.

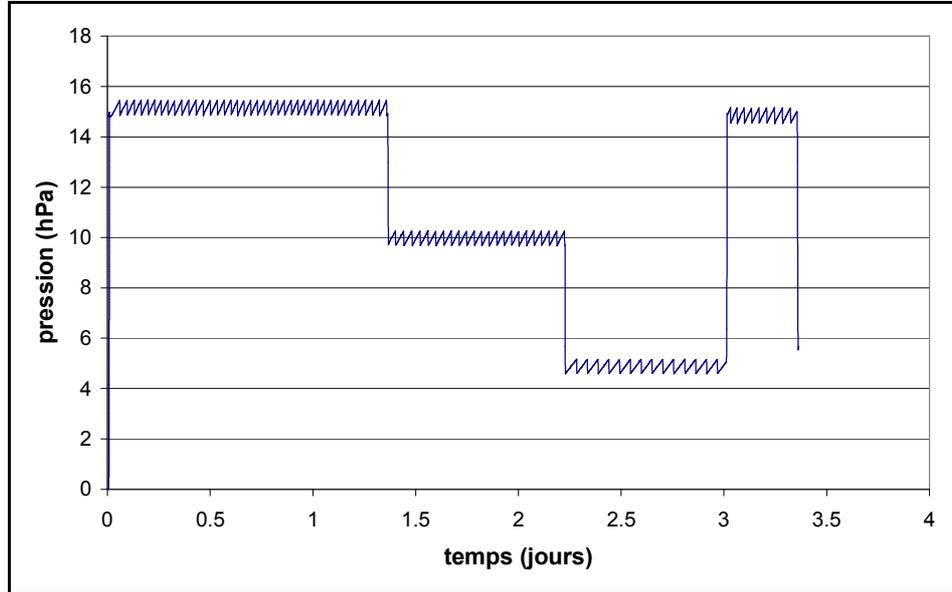


Figure 69 : Consigne en pression de l'essai

Les petites variations observées sur la consigne sont dues à la régulation de la pression. Le principe de régulation consiste à augmenter la pression dans la partie basse de l'enceinte lorsque cette valeur atteint la valeur basse programmée. De la même manière, si la pression augmente trop sur l'échantillon, un système de pompage vient diminuer cette pression de la valeur de consigne + 0,5hPa. Il n'est donc pas possible expérimentalement de conserver une pression rigoureusement constante.

Les déplacements issus de la mesure expérimentale sont imposés sur la périphérie du disque local (Figure 70).

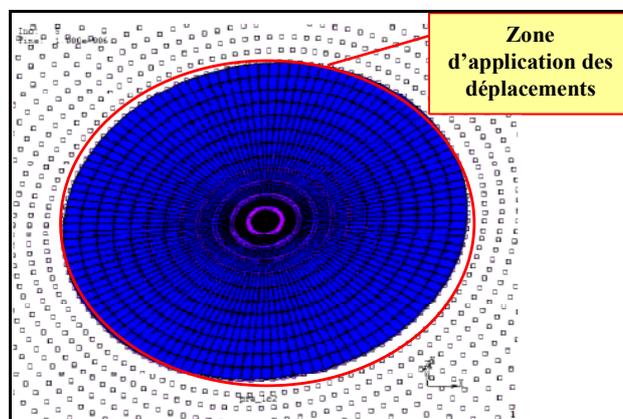


Figure 70 : Déplacements appliqués sur la périphérie du disque

La température de l'essai est de -60°C . Le modèle est composé d'un disque de rayon 500mm, maillé par des éléments quadrangles à 4 nœuds de type coque, et d'épaisseur $50\mu\text{m}$. Le maillage comprend 6000 éléments. Les données matériau sont celles issues de l'identification du modèle mixte à -60°C .

V.2.3 Analyse des résultats

La Figure 71 nous permet de montrer que le modèle local donne des résultats équivalents au modèle global pour des temps de calcul moins élevés.

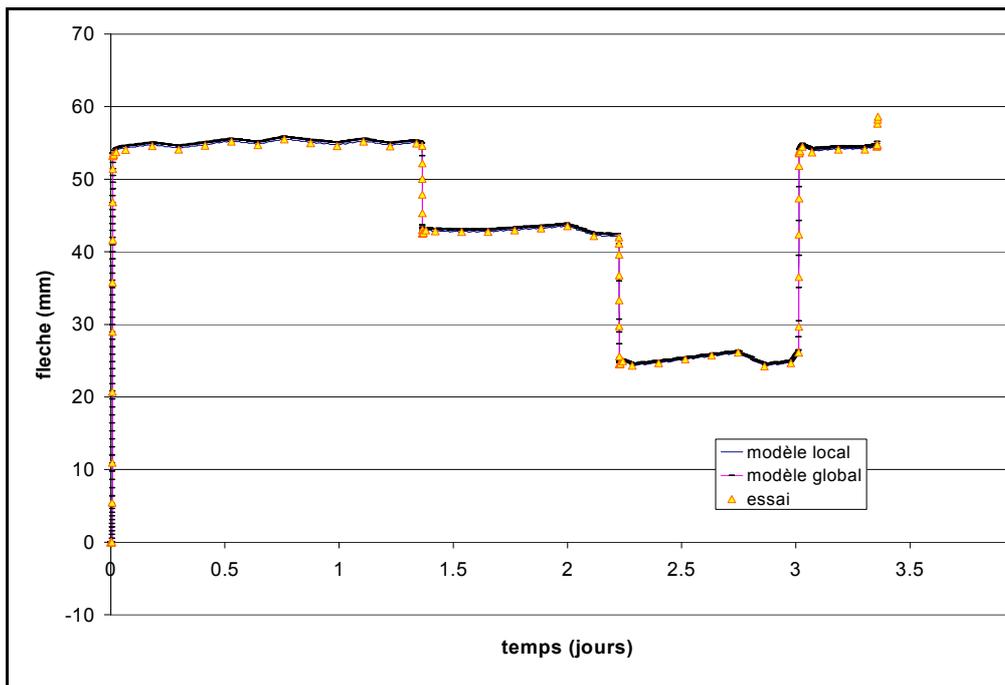


Figure 71 : Comparaison modèle local / modèle global sur un essai de fluage recouvrance à -60°C

L'implémentation des conditions aux limites en déplacement est peu coûteuse car les procédures de traitement des données expérimentales et d'implémentation dans le code sont applicables à tous les types d'essais. De plus, ce modèle est, de par sa conception, beaucoup plus fiable car il permet de s'affranchir de l'incertitude sur les conditions aux limites. Ainsi, si l'on modifie le niveau de vide à l'intérieur de l'enceinte ou que l'on change la manière d'appliquer la graisse, le modèle local restera représentatif.

V.3 Validation des lois de comportement sur structure

Afin de vérifier que les lois de comportement identifiées sur les essais uniaxiaux, donnent des résultats cohérents dans le cas de sollicitations plus complexe, nous avons mis en place des modèles numériques de l'essai expérimental Nirvana. La comparaison des résultats

numériques et expérimentaux nous permettra de valider la cohérence des lois dans des conditions de température, de pression et de contrainte proches de celles du vol.

V.3.1 Validation de la loi mixte

V.3.1.1 Essai à température ambiante

Il s'agit de mesurer les déplacements et déformations d'un échantillon, assemblage représentatif d'un fuseau (Figure 61), soumis à une pression constante et à une pré-tension représentative d'un BPS Ø10m.

La Figure 72 montre le déplacement vertical du centre de l'échantillon au cours du temps pour l'essai à pression constante. L'importance du fluage est mise en évidence par la comparaison des résultats expérimentaux avec le calcul élastique. Pour les 2 types de modélisation, on constate que les lois de comportement décrivent de manière satisfaisante l'ensemble de l'essai. On peut observer sur la zone de mise en pression (Figure 73) que les modèles décrivent bien le comportement de l'échantillon. Le temps de montée, d'environ 15 minutes est suffisant pour observer la viscosité du matériau car le calcul élastique s'écarte de l'essai.

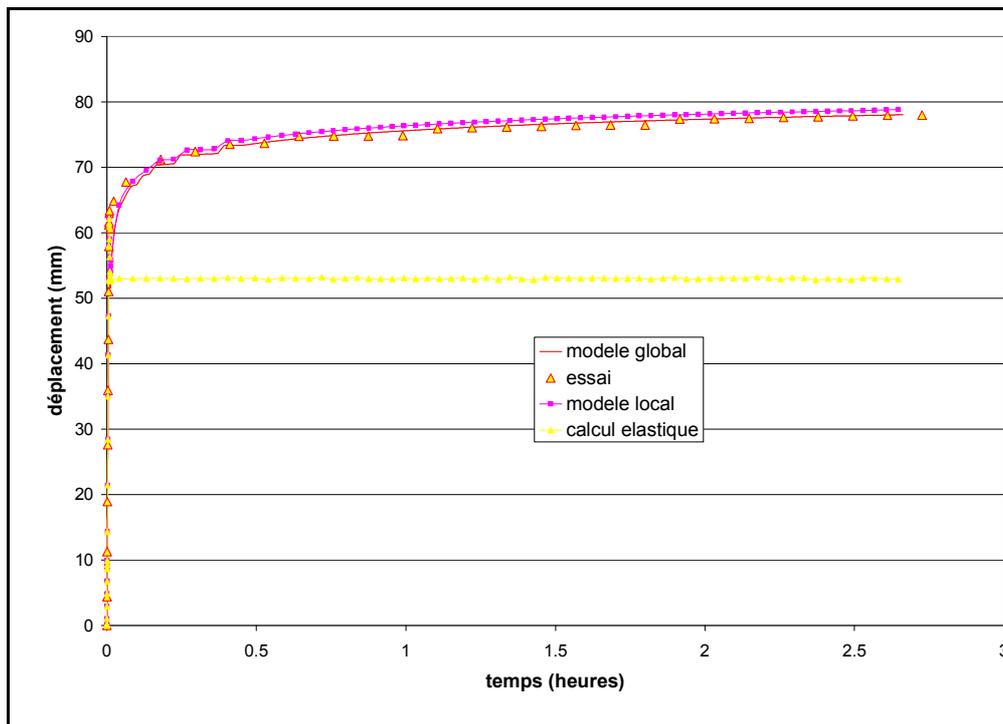


Figure 72 : Evolution de la flèche au centre de l'échantillon en fonction du temps

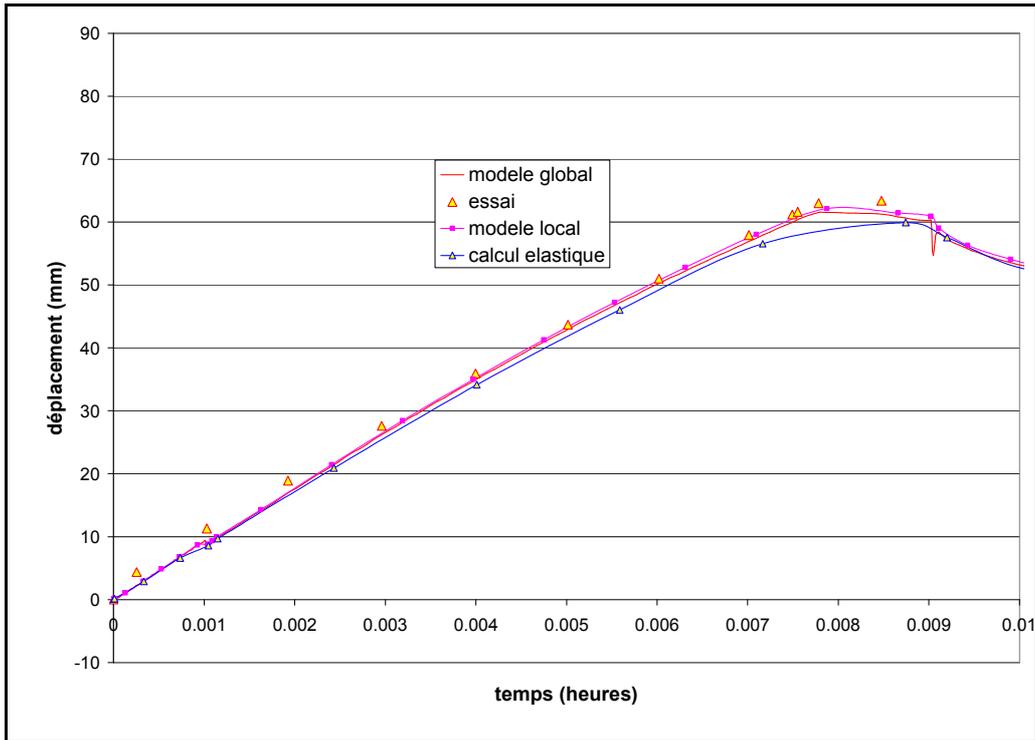


Figure 73 : Evolution de la flèche au centre en début d'essai

Les résultats que nous présentons ci-après sont issus de la comparaison entre le modèle global et la mesure par stéréo-corrélation.

On observe sur les champs de déplacement vertical calculé (Figure 74) et mesuré (Figure 75) que les lignes d'iso-déplacement ne sont pas de forme circulaire. Ce phénomène est dû à la présence de l'assemblage central qui rigidifie l'échantillon dans une direction et qui rend le champ de déplacement elliptique.

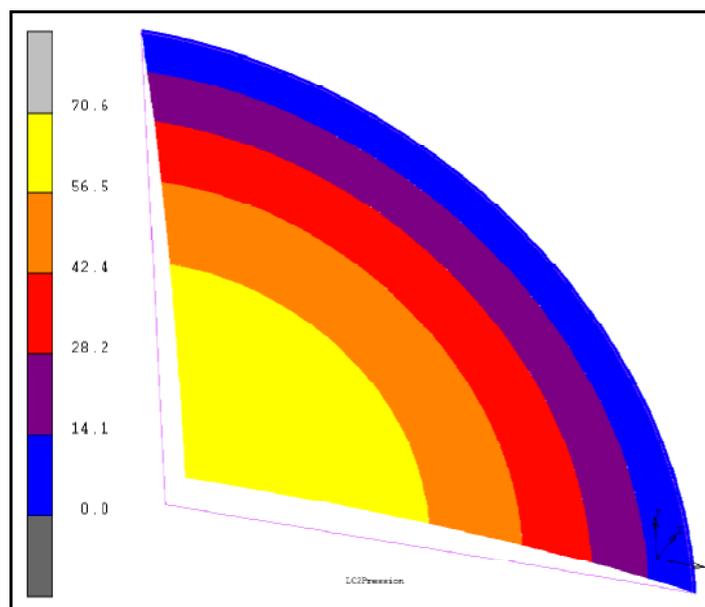


Figure 74 : Champ de déplacement vertical calculé

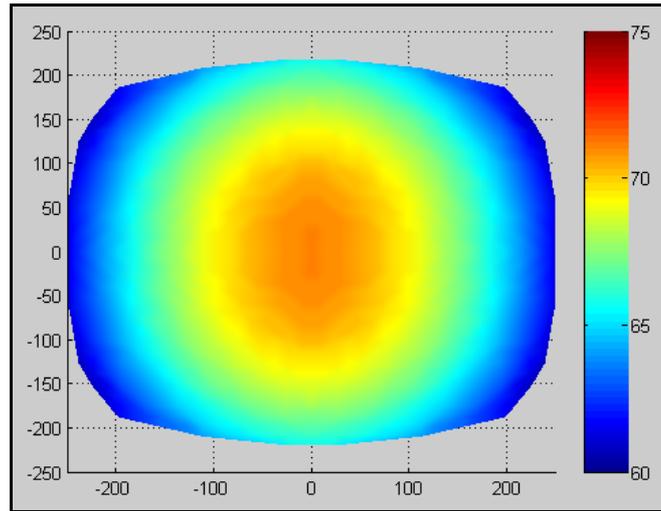


Figure 75 : Champ de déplacement vertical mesuré

La comparaison de la déflexion sur une zone centrale de l'échantillon montre la bonne concordance des résultats.

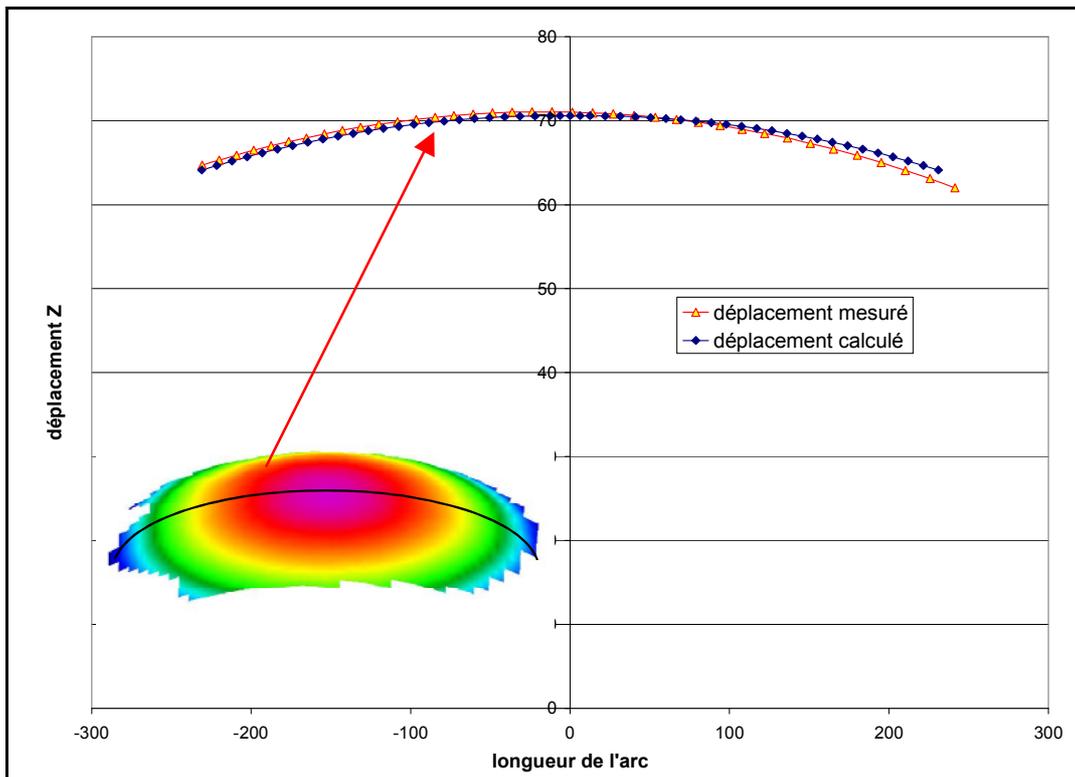


Figure 76 : Comparaison du déplacement vertical au centre de l'échantillon

V.3.1.2 Essai à -60°C

L'essai de validation a été réalisé sur un assemblage central avec pré-tension constante. La consigne en pression permet de vérifier que le modèle est apte à décrire la recouvrance. La

consigne en pression est donnée par la Figure 69. Cette pression ainsi que la pré-tension appliquée sont représentatives des paramètres de vol d'un BPS de 10m de diamètre.

La comparaison des déplacements verticaux mesurés et calculés au centre de l'échantillon (Figure 77) montre la bonne adaptation de la loi de comportement, notamment sur le modèle local.

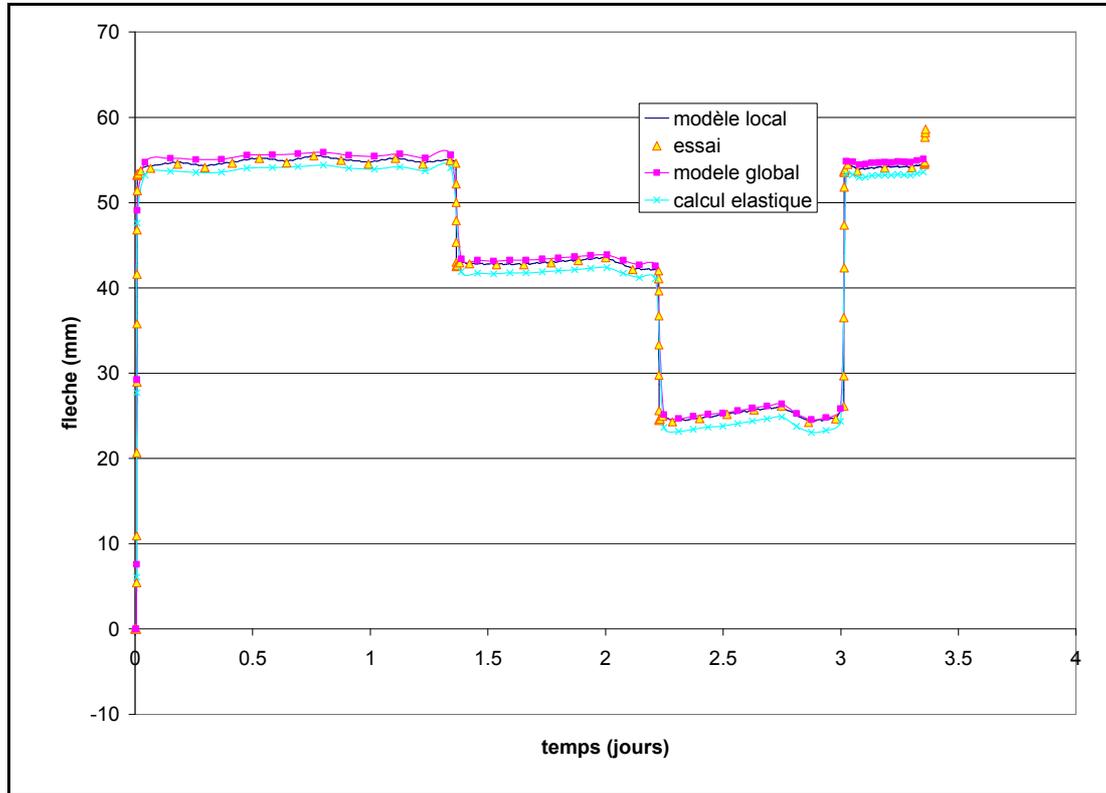


Figure 77 : Comparaison du déplacement vertical mesuré et calculé

A cette température, pour les niveaux de pression utilisés et pour la durée de cet essai, les phénomènes visqueux sont relativement faibles comme le montre le calcul élastique. Il n'est cependant pas possible de valider les lois sur des temps plus long car le dispositif expérimental ne permet d'effectuer des essais à froid que de quelques jours.

V.3.2 Validation de la loi spectrale

Le développement des modèles avec frottement ainsi que le modèle local ont été développés sur un code de calcul éléments finis (MSC. Marc Mentat). L'implémentation de la loi spectrale dans ce code n'a pu être menée pour des raisons d'incompatibilité mais cette loi est déjà implémentée dans un autre code de calcul (Abaqus). Nous avons ainsi pu la valider mais à partir de modèles plus simples en appliquant la consigne en effort du à la pré-tension minorée d'une valeur constante de perte d'effort du au frottement. Les essais de validation sont identiques à ceux utilisés pour valider la loi mixte.

V.3.2.1 Validation à température ambiante

La comparaison des déplacements mesurés et calculés (Figure 78) montre une bonne concordance des résultats. Les déplacements calculés ont tendance à être plus importants que ceux mesurés. Cette tendance peut être due soit à un comportement visqueux plus marqué soit à une sous estimation de la pré-tension. La réponse à ces incertitudes passe par l'implémentation du modèle local dans le code de calcul Abaqus.

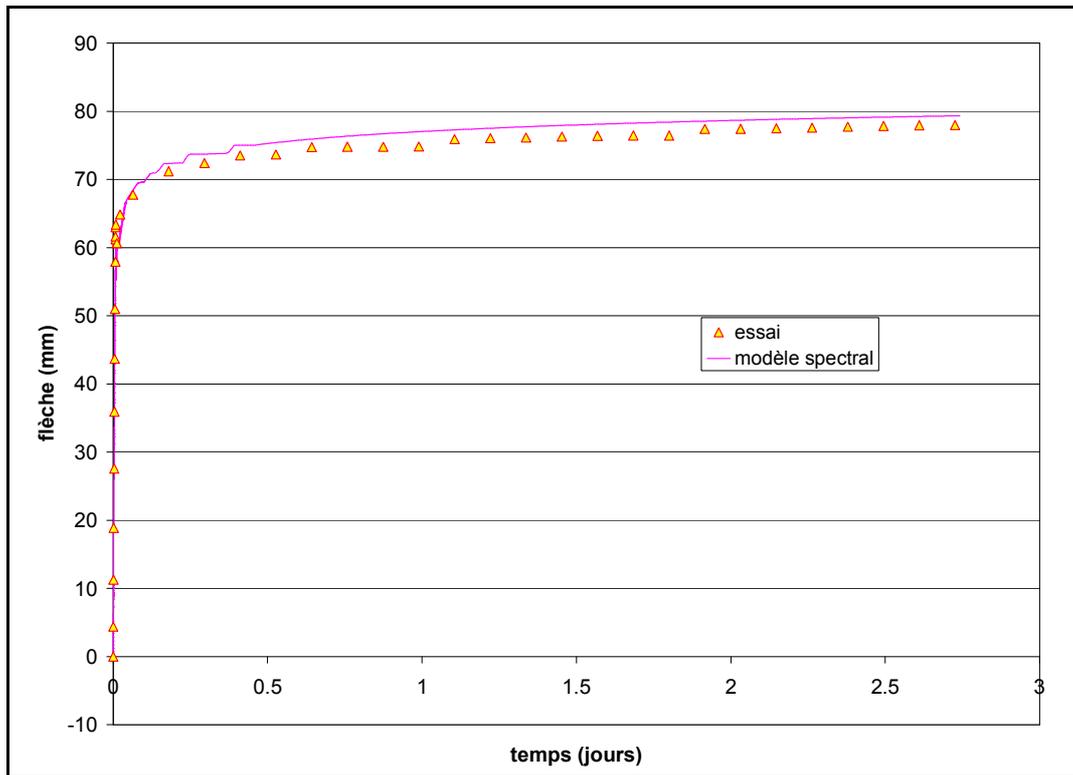


Figure 78 : Comparaison des déplacements mesurés et calculés au centre de l'échantillon

V.3.2.2 Validation à -60°C

Comme dans le calcul à température ambiante, les déplacements simulés et expérimentaux au centre de l'échantillon sont concordants (Figure 79)

Les déplacements sont également semblables sur l'ensemble de la section (Figure 80). Les rayons de courbure mesuré et simulé sont comparables.

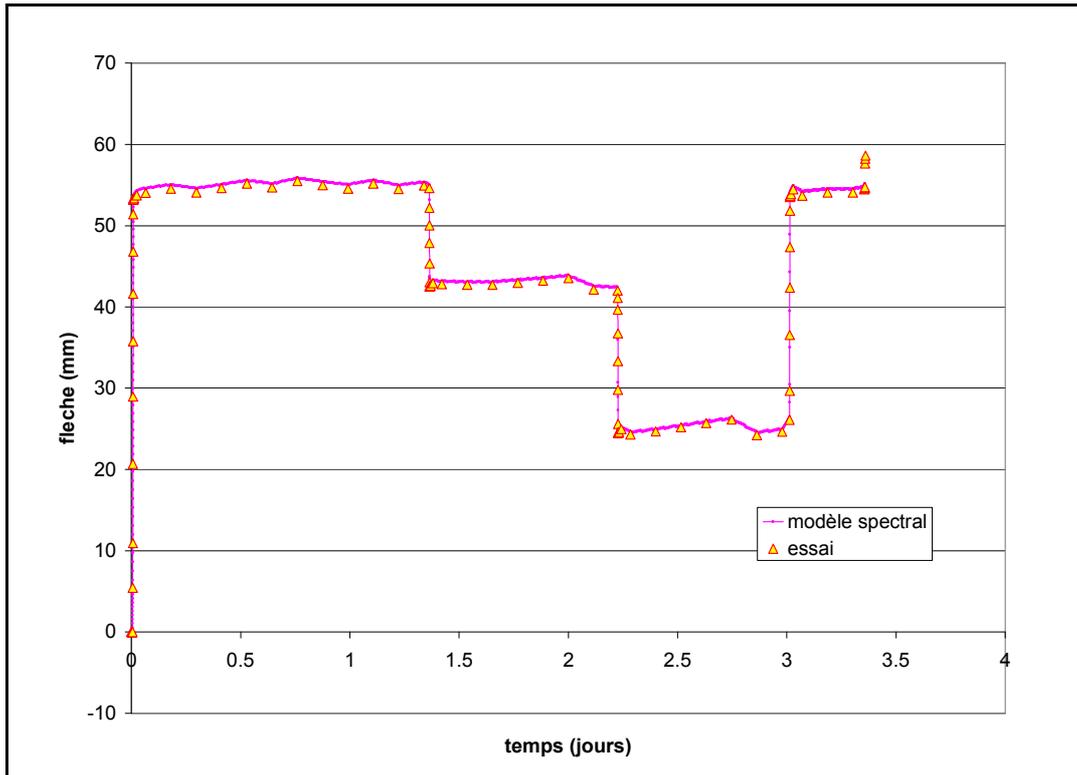


Figure 79 : Comparaison des déplacements mesurés et calculés au centre de l'échantillon pour différents niveaux de fluage à -60°C

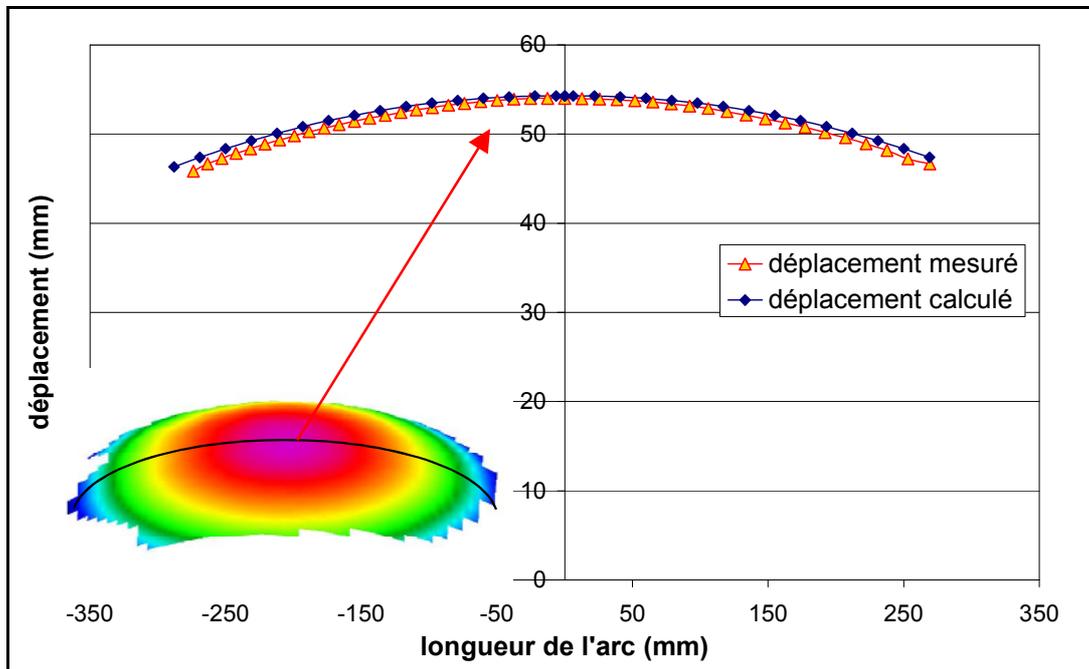


Figure 80 : Comparaison du déplacement vertical au centre de l'échantillon

On constate également, lors de l'essai à froid, une légère surévaluation des déplacements calculés. Comme dans l'essai à température ambiante, cette surévaluation peut être due soit à une évaluation trop importante des phénomènes visqueux soit à l'incertitude sur les valeurs de

frottement. L'implémentation du modèle local sous Abaqus permettrait de répondre à ces interrogations.

V.4 Synthèse

Nous avons décrit dans ce chapitre les différents modèles mis en place pour simuler le dispositif expérimental Nirvana. Un premier modèle prenant en compte les frottements à la périphérie de l'enceinte a été développé. Il donne des résultats satisfaisant sur les essais réalisés mais est difficilement généralisable à tout type d'essais. Un modèle plus "généraliste" a été développé sur la base du dialogue essais/calculs. Les conditions aux limites implémentées dans le modèle éléments finis sont issus de la mesure lors de l'essai expérimental. Ce modèle présente l'intérêt d'être applicable à tous les essais en restant moins coûteux en temps de calcul. La loi mixte a été validée à partir de ces 2 modèles. Les résultats obtenus à température ambiante et à -60°C sont encourageants et pourront être implémentés dans la chaîne de calcul de trajectoire des BPS afin de prévoir le volume du ballon au cours de sa mission. Le modèle spectral donne lui aussi de bons résultats malgré l'incertitude existante sur la fiabilité du calcul. Un travail complémentaire peut être mené afin de valider ce modèle dans les mêmes conditions que le modèle mixte.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions

L'objectif de cette thèse est l'analyse du comportement mécanique du matériau constitutif des ballons pressurisés afin d'établir des modèles de comportement en vue de prévisions de trajectoires de vol.

Un travail important a été effectué sur l'adaptation des méthodes de mesure de champs au dispositif expérimental Nirvana afin de caractériser de grandes structures souples. Nous avons ainsi présenté des mesures de champs de déplacements 3D à partir desquels nous obtenons des champs de déformation dans le plan de sollicitation de la structure. Outre la mise au point de ce dispositif d'essai expérimental, nous avons établi et validé une procédure de mesure sans contact permettant la caractérisation de films minces souples et transparents jusqu'à des températures de -60°C .

Dans un second temps, plusieurs lois de comportement ont été étudiées puis identifiées à température ambiante et à -60°C . Les deux lois les plus à même de retranscrire le comportement mécanique des films polymères multicouche complexés sont la loi mixte et la loi spectrale. La loi mixte décrit un comportement viscoélastique linéaire combiné à un comportement viscoplastique linéaire. La loi spectrale présente un caractère viscoélastique non linéaire en contraintes et en temps. L'identification paramétrique de ces deux lois effectuée à l'aide de l'outil d'optimisation du code Zebulon a donné des résultats satisfaisants. Bien que la loi spectrale soit inscrite dans un cadre thermodynamique rigoureux, la loi mixte a donné des résultats sensiblement meilleurs, notamment sur les niveaux de contrainte élevés à température ambiante ainsi qu'à -60°C . Sa nature viscoélastique-viscoplastique semble plus appropriée à décrire le comportement de notre matériau sur toute la plage de contrainte étudiée.

Enfin, dans la dernière partie de notre étude, nous avons construit différents modèles éléments finis de structure représentant le dispositif expérimental Nirvana. Le premier modèle prend en compte les frottements influant sur la pré-tension appliquée sur le film testé. Ce modèle est valable pour l'essai réalisé mais comporte des incertitudes sur l'application de cette pré-tension. Un second modèle, plus fiable, permet de s'affranchir de ces conditions limites en implémentant les déplacements expérimentaux d'une zone de l'échantillon comme conditions aux limites du calcul.

Ces modèles ont été implémentés avec la loi mixte afin de la valider. La loi spectrale a été validée à partir d'un modèle prenant en compte la pré-tension de manière simplifiée. Bien que la loi spectrale ait tendance à légèrement surévaluer les déplacements expérimentaux, les résultats obtenus sont satisfaisant pour les deux lois de comportement. De par ces résultats et son écriture simplifiée, la loi mixte semble pourtant plus apte à être intégrée dans la chaîne de calcul de trajectoire de vol des ballons pressurisés.

Perspectives

La validation de la loi spectrale a été réalisée à partir d'essais numériques plus simples que ceux développés dans le cadre de la loi mixte. L'Ecole des Mines de Paris est en cours d'implémentation de la loi spectrale dans le code de calcul "MSC. Marc Mentat". La validation ultérieure de la loi spectrale à partir d'un modèle éléments finis plus fiable pourra donc faire l'objet d'un travail complémentaire.

La continuité de ce travail consiste maintenant à intégrer les lois de comportement validées dans la chaîne de calcul de trajectoire des BPS au CNES. Pour cela, la loi de comportement doit donner des résultats à toutes les températures comprises entre l'ambiante et -60°C . L'identification de la loi à 3 températures intermédiaires ainsi que le développement d'une loi liant les différents coefficients de la loi en température permettrait de finaliser ce travail.

Afin d'effectuer une validation complémentaire, il serait possible de réaliser un essai sur un ballon complet, modèle réduit d'un BPS 10m, dans des conditions proches du vol et de comparer les résultats à la simulation par éléments finis de ce ballon soumis aux mêmes conditions.

Une autre perspective intéressante consisterait à modéliser un ballon complet dans une phase de vol afin d'analyser la cartographie des contraintes et déformations de peau en vue de l'amélioration éventuelle de la conception des BPS.

L'ensemble de ce travail a été réalisé dans une perspective plus générale qui consiste à pouvoir établir des lois de comportement de ballons ayant des caractéristiques géométriques et matériau différentes. Il peut venir en support au développement actuel du CNES de ballons de 12m de diamètre ou constitués de matériaux renforcés.

Annexe 1

Ensemble des publications dans des revues à comité de lecture

R1. Vialettes P., Siguier J. M., Guigue P., Mistou S., Dalverny O., Karama M., PetitJean F., Modélisation des structures souples - Identification du comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques, Revue des Composites et des Matériaux Avancés V13 n°3, 241-250 (2003)

R2. Siguier J.-M., Vialettes P., Granier S., The use of "Nirvana" facility for balloon characterization: Strain and tightness measurements of zero pressure and super-pressure balloon subsystems, European Space Agency, vol. 530, pp. 207-212, ISSN: 0379-6566, Ed. Elsevier, ISSN: 0273-1177(2003)

R3. P. Vialettes, J. M. Siguier, P. Guigue, S. Mistou, O. Dalverny, M. Karama, F. Petitjean, Modélisation numérique et expérimentale du comportement de sous ensembles de ballons pressurisés stratosphériques, Mécanique et Industrie, Vol. 6, p245-255, Ed. EDP, ISSN=1296-2139

R4. P. Vialettes, J. M. Siguier, P. Guigue, S. Mistou, O. Dalverny, M. Karama, F. Petitjean, Etude par stéréo-corrélation des champs de déplacement et de déformation de sous-ensembles de ballons stratosphériques pressurisés, Revue Instrumentation, Mesure, Métrologie, vol. 5, N° 1-2/2005, HERMÈS, Mars 2005

R5. P. Vialettes, J. M. Siguier, P. Guigue, M. Karama, S. Mistou, O. Dalverny, S. Granier, F. Petitjean, Experimental and numerical simulation of super-pressure balloon apex part mechanical behavior in realistic flight conditions, Advances in Space Research, Vol. 6, pxxx-xxx, Ed. Elsevier, ISSN: 0273-1177

Modélisation des structures souples

Identification du comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques

Pierre Vialettes*, — Jean Michel Siguier* — Pascale Guigue**
Sébastien Mistou*** — Olivier Dalverny***
Moussa Karama*** — Frank Petitjean******

* ONERA Centre de Toulouse, 2 Av Edouard Belin, BP4025, F-31055 Toulouse cedex

** CNES Centre de Toulouse, 23 Av Edouard Belin, F-31055 Toulouse cedex

*** LGP – ENIT, BP1629, F-65016 Tarbes cedex

**** ICAM, Av. de Grande Bretagne, F-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 µm, PA 20 µm, PET 15 µm. 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 stéréocorrélation, 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.

ABSTRACT. Long duration super-pressure balloons design and manufacturing is a great challenge for CNES in scientific ballooning. The good knowledge of the mechanical behavior of envelopes is necessary for this design. The study deals with polymer of 50µm thickness made of 3 complexed films: PET 15µm, PA 20µm, PET 15µm. A test campaign allows to identify viscoelastic law parameters. Substructure balloons are tested to measure, via a stereocorrelation system, displacement and strain of the structure in complex sollicitation. A simulation campaign of this tests on a finite element software permits to correlate these results and to validate the behaviour laws implemented in the software.

MOTS-CLÉS : viscoélasticité, polymères, corrélation d'images, ballons stratosphériques.

KEYWORDS: viscoelasticity, polymers, image correlation, stratospheric balloons.

1. Introduction

Les ballons pressurisés (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 (Guigue *et al.* 2001). 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 10 m, 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.

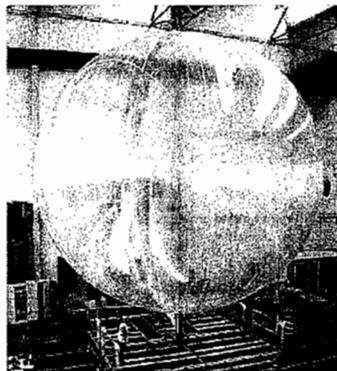


Figure 1. *Ballon pressurisé 10 m*

Les ballons pressurisés de 10 m 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 μm , de Polyamide 20 μm et de Polyester 15 μm (PET/PA/PET), pour une épaisseur totale de 50 μm . 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. Caractérisation du PET/PA/PET

2.1. Identification des caractéristiques élastiques par corrélation d'images

La principale difficulté dans l'identification de matériaux polymères souples et transparents est la connaissance des déformations des éprouvettes testées. En effet, les méthodes classiques d'extensométrie telles que les jauges de déformation sont trop intrusives et modifient le comportement du film. La solution réside dans les procédés de mesure sans contact comme la corrélation d'images. Une caméra CCD capture des images successives de l'éprouvette lors de son évolution au cours de l'essai. Le principe fondamental de cette méthode est basée sur le fait que la distribution des niveaux de gris d'une aire donnée (facette), à l'état initial, correspond à la distribution des niveaux de gris de la même aire à l'état déformé (Gom, 2003).

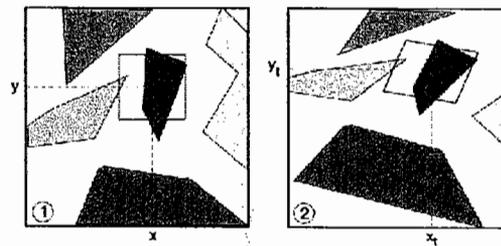


Figure 2. Facette à l'état non déformé et déformé

Sur la figure 2, un « point de départ » est défini par l'utilisateur sur l'image de gauche correspondant à l'état initial (image de référence). Ce point doit également être défini par l'utilisateur sur l'autre image correspondant à l'état déformé. La relation existant entre les niveaux de gris de ces deux points est régie par l'équation [1].

$$g_1(x,y)=g_2(x_1,y_1) \quad [1]$$

Les pixels de cette facette dans l'image de référence sont transformés dans l'image de destination suivant les relations [2] et [3] :

$$x_1=a_1+a_2x+a_3y+a_4xy \quad [2]$$

$$y_1=a_5+a_6x+a_7y+a_8xy \quad [3]$$

Les constantes a_1 et a_5 décrivent la translation du centre de la facette, tandis que les autres décrivent les rotations et déformations de la facette. Afin de compenser

automatiquement d'éventuelles variations de luminosité au cours des mesures, une transformation linéaire radiométrique est utilisée simultanément à ce processus de comparaison d'images. Les paramètres géométriques et radiométriques de la transformation sont calculés de manière à minimiser la somme des déviations quadratiques des niveaux de gris équivalents des deux images. Le calcul des déformations résulte de l'analyse des configurations initiales et finales des facettes formant un maillage de la surface de l'éprouvette. La résolution théorique des valeurs de déformations est de 500 à 1 000 $\mu\text{m/m}$ pour une précision de 100 à 200 $\mu\text{m/m}$. La connaissance des déformations dans le plan de sollicitation de l'éprouvette permet d'accéder au module d'Young et au coefficient de Poisson du PET/PA/PET.

2.2. Identification du comportement viscoélastique non linéaire du PET/PA/PET

L'objet de ce chapitre est d'identifier les paramètres d'une loi de comportement viscoélastique à partir d'essais uniaxiaux en traction de fluage et de relaxation. Le comportement du PET/PA/PET est non linéaire, c'est à dire que la déformation à un temps donné pour un essai de fluage n'est pas proportionnelle à la déformation au même temps pour un essai de fluage à un niveau de sollicitation proportionnel au premier. Pour un essai de fluage, $\varepsilon(t) = f(\sigma, t)$, un matériau non linéaire ne respecte pas la relation [4].

$$\lambda\varepsilon(t) = f(\lambda\sigma, t) \quad [4]$$

Il est donc nécessaire de réaliser des essais à différents niveaux de sollicitation (Maire 1992) et de choisir une loi permettant de décrire la non linéarité en contrainte. Pour être représentatif d'un ballon en vol, la loi doit, de plus, décrire le comportement en fluage et en relaxation du ballon.

La loi choisie est de type Maxwell non linéaire en temps et en contrainte. Le choix de cette loi s'appuie sur sa facilité d'implémentation dans les codes E.F. et sur sa résolution analytique simple. Sa forme non intégrée est implémentée dans les codes sous forme de sommation des déformations (équation 5).

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_v \quad [5]$$

avec ε_t = déformation totale
 ε_e = déformation élastique
 ε_v = déformation visqueuse

et

$$\dot{\varepsilon}^v = A \cdot \sigma^n(t) \cdot q \cdot t^{q-1} \quad [6]$$

La forme résolue analytiquement de l'équation [6] est intégrée dans un modèle d'optimisation du code (Zebulon 2003). Ce modèle modifie, *via* un algorithme de type Levenberg Marquadt, les coefficients A, n et q de la loi afin d'ajuster au mieux les essais expérimentaux et les modèles EF de ces essais (figure 3).

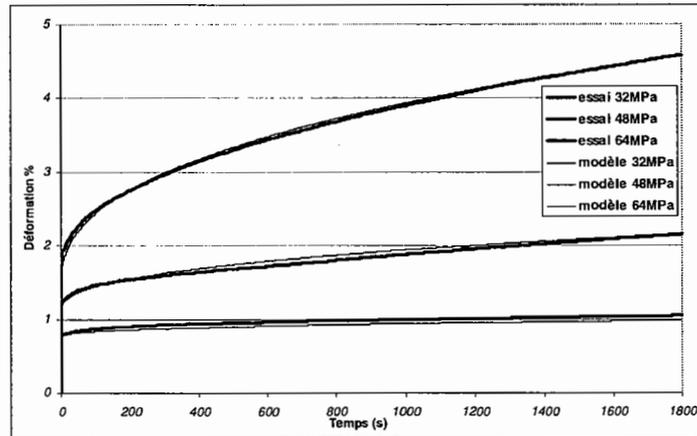


Figure 3. Comparaison essai/calcul en fluage

La loi de Maxwell étudiée ne permet pas, à partir d'un jeu de coefficients unique de décrire du fluage et de la relaxation. Elle doit être enrichie afin de prendre en compte ces deux aspects.

3. Comportement de structures complexes sous pression uniforme

Cette étude expérimentale a pour but de tester le comportement de sous-ensembles de ballons.

3.1. Le dispositif expérimental Nirvana

Ce dispositif est une chambre à vide de 1m^3 (figure 4) 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 (Siguier *et al.*, 2001).

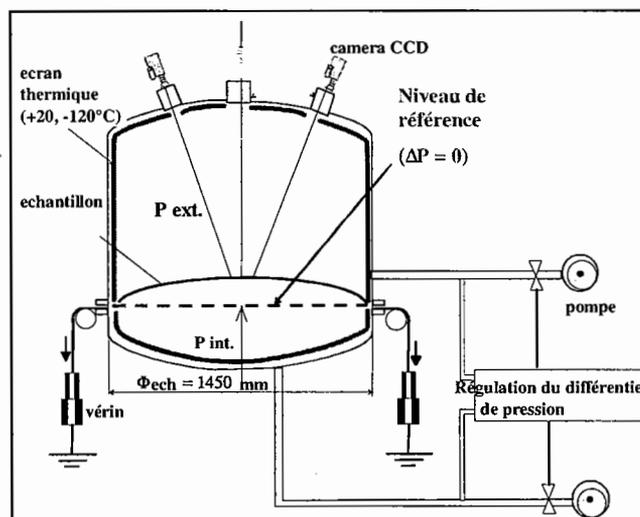


Figure 4. Dispositif expérimental Nirvana

Différents types d'essais sont réalisables sur Nirvana :

- étude de diffusion des gaz au travers de l'échantillon ;
- étude d'étanchéité des assemblages ou des zones polaires des ballons ;
- test d'éclatométrie et de suivie de la déflexion de l'échantillon avec le différentiel de pression ;
- essais en traction axisymétrique avec ou sans prétension ;
- essais en fluage axisymétrique avec ou sans prétension (Violettes *et al.*, 2004).

La partie haute du dispositif est équipée de deux caméras CCD, d'une définition de 1 280 x 1 024 pixels codant les niveaux de gris en 8bits, qui mesurent le champ de déplacement et de déformation de l'éprouvette. Cette mesure est basée sur le principe de photogrammétrie qui consiste à reconstituer une image en trois dimensions à partir de deux images en deux dimensions. La photogrammétrie s'appuie sur la méthode d'intersection spatiale (Mistou, 2003) pour déterminer les coordonnées 3D d'un point à partir de l'intersection de deux droites. Physiquement, ces droites peuvent être vues comme la trajectoire du faisceau de lumière entre les deux objectifs des caméras et l'angle entre les deux caméras. Le principe de mesure des déplacements en 2D est décrit dans la section 2.1.

3.2. 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 de (Orteu, 1997). 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 20 μm pour un champ de mesure de 600 mm de diamètre. La résolution en terme de déformation est de 1 000 à 2 000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour une précision de 500 à 1 000 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Les échantillons testés sont représentatifs de deux fuseaux et d'un assemblage central (figure 5).

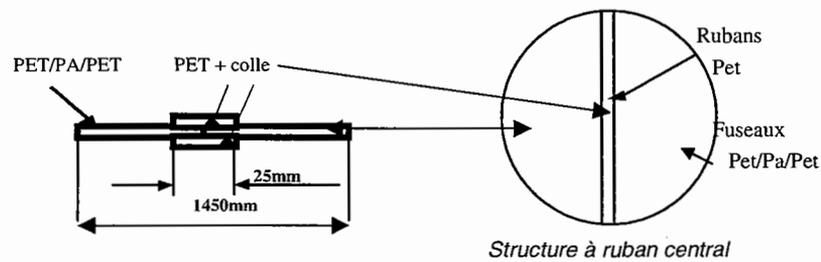


Figure 5. Echantillon testé

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 6 présente la déformation normale à l'assemblage pour un niveau de pression donné.

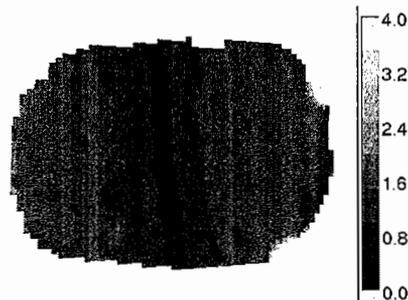


Figure 6. Déformation (%) normale au ruban

4. Validation de la loi de comportement

On s'applique ici à vérifier que la loi de comportement identifiée à partir d'essais uniaxiaux 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 section 3. 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 stéréocorrélation avec la même donnée obtenue par le calcul. Le module d'optimisation du code Zebulon 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 7). L'étude d'une nouvelle loi de comportement permettra à partir d'une loi unique de modéliser, sans recalage, des essais de type Nirvana.

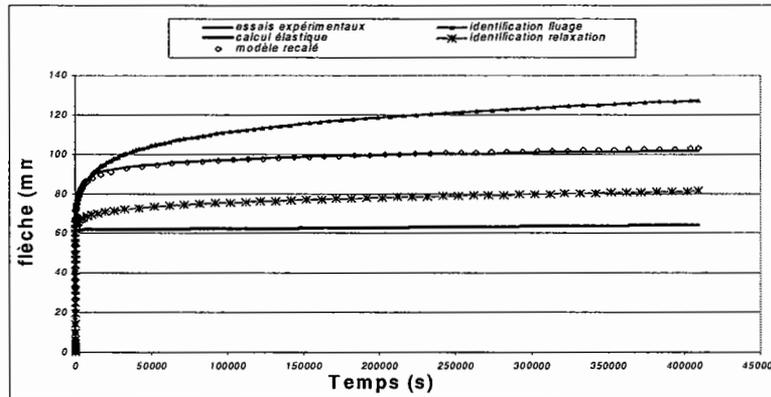


Figure 7. Comparaison essais/calculs de la flèche au centre sur un essai Nirvana à pression constante

5. 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 expérimentales 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 uniaxiaux 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.

6. Bibliographie

Gom France, Aramis user manual, 2003.

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.

Maire J.-F., Etude théorique et expérimentale du comportement de matériaux composites en contraintes planes, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 1992.

Mistou S., Karama K., Desmars B., Peres P., « Caractérisation par stéréo-corrélation d'images des déformation d'une liaison collée elastomérique en cisaillement », *Journée Scientifique et Technique AFM*, 16 mai 2003, Futuroscope Poitiers.

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).

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.

Vialettes P, Siguier JM, Guigue P, Dalverny O, Mistou S, Petitjean F, Karama M.,
« Modélisation du comportement non linéaire de films minces constitutifs des ballons
pressurisés stratosphériques » *16^e Congrès Français de Mécanique*, Nice, 2003.

Zebulon Software v8.2, Z-set user manual, 2003.

THE USE OF "NIRVANA" FACILITY FOR BALLOON CHARACTERIZATION : STRAIN AND TIGHTNESS MEASUREMENTS OF ZERO PRESSURE AND SUPER-PRESSURE BALLOON SUBSYSTEMS

J-M. Siguier⁽¹⁾, P. Vialettes⁽¹⁾, S. Granier⁽¹⁾, P. Guigue-Joguet, CNES⁽²⁾,

⁽¹⁾ ONERA/DESP, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse, France, Email : jean-michel.siguier@oncert.fr

⁽²⁾ CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse, France, Email : pascale.guigue@cnes.fr

ABSTRACT/RESUME

The NIRVANA facility, set in the Space Environment Department of ONERA-Toulouse, has been developed, by CNES funds, in order to study, in realistic conditions (temperature, absolute and differential pressures, pre-loading and loading time), the tightness and the mechanical behavior of zero-pressure and super-pressure balloon subsystems like film envelopes, assemblies or apex parts.

This facility, is a 1m³ vacuum chamber equipped with cooled screens and a set of measurement devices in order to study either helium tightness or mechanical behavior of balloons elements.

In both cases, the sample under test is 1.5m diameter and can be set under differential pressure, regulated temperature (from +20°C to -120°C) and pre-loading (up to 6 tons) applied on tendons or balloon envelopes.

For helium tightness measurements, we use a mass spectrometer to evaluate the helium quantity diffusing or effusing through the sample versus time and temperature.

For mechanical characterization, we use a 3D displacement measurements system made up with a stereoscopic CCD camera device adapted to the facility. Displacement measurements are transformed in strain values by the device software. The analyzed surface is about 500mm diameter and the achieved displacement accuracy is $\pm 5\mu\text{m}$ in each direction.

This paper describes the facility with both equipment and presents tightness results of a zero pressure balloon apex part for different flight phases : launching, ascending and ceiling conditions.

We also present mechanical behavior results of super-pressure balloons subsystems under stress. A super-pressure balloon element is set under differential pressure while we measure 3D displacements. From 3D displacement measurements, we deduce 3D strain values of the analyzed zone. Experimental strain results can be compared to numerical one's in order to validate finite element models of super-pressure balloons developed in the same way.

1. INTRODUCTION

The Space Environment Department (DESP) of ONERA in Toulouse is involved in material characterization since CNES started balloon activities. It has developed a set of specific facilities in order to measure mechanical, thermo-optical and tightness properties of balloon materials [1,2].

For both zero pressure and super-pressure balloon applications, we need to characterize larger and more complex balloon elements, that is balloon elements. So we have developed the NIRVANA facility with two aims :

- testing helium tightness of balloon subsystems, as apex part of zero-pressure balloons, which requires a volume about 1m³.
- characterizing the mechanical behavior of zero pressure balloons with an axisymmetrical loading. To be realistic with a 10m diameter balloon when we set a differential pressure of 15hPa, the sample diameter must be 1.5m.

The respect of this two requirements gives NIRVANA's size.

This paper describes the NIRVANA facility with the different features and presents two types of results : tightness measurement of a zero-pressure balloon apex part at launching, ascending and ceiling and the mechanical behavior of a super pressure balloon envelope sample under differential pressure steps.

2. NIRVANA FEATURES

The NIRVANA facility is a 1 m³ vacuum chamber made in two cylindrical parts where the sample is fixed by two opposite elastomeric seal rings between the upper and the lower part (Fig. 1).

We can regulate a differential pressure between the two sides of the sample. Cooled screens surrounding the internal volume of the chamber are thermo-regulated down to -120°C. The vacuum insulation double skin structure of the chamber allows conditions of low temperatures and high absolute pressure in the chamber without any condensation or ice.

The operational diameter of the sample is 1450 mm defined by the deflection, corresponding to a 10m diameter balloon, when the envelope is pressurized to 15hPa.

An external pre-loading device, constituted 150 lock-grip pliers on 3 jacks, simulates either the payload of an open zero pressure balloon or the skin stress of a super-pressure balloon. The maximum loading available is 6 tons distributed into the useful pliers.

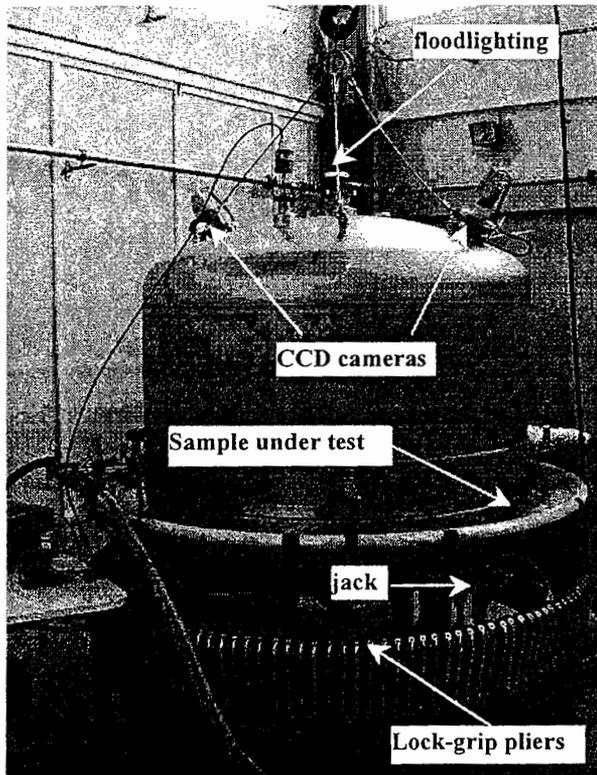


Fig 1. NIRVANA facility

For the tightness measurement configuration, the lower part of the chamber, representing the inner part of the balloon, is filled with helium and the upper part, representing the outer part, is filled with nitrogen. A mass spectrometer coupled with a mass flowmeter measures the evolution of helium concentration in the nitrogen volume. Tightness value of the sample under test is deduced from this measurement.

For the mechanical characterization configuration (Fig. 2), the top of the upper part is equipped either with a laserimeter in order to measure the deflection at the center of the sample, or a 3 D optical extensometer with 2 CCD cameras which measures 3D displacement by image processing. The image field is determined by the CCD camera lenses and, in our case, by the window diameters and the window/sample distance. Though the analyzed volume is a cylinder about 500mm of diameter and 250mm high. The device takes pictures of the sample for each trigger and determine displacement by a stereocorrelation method with an accuracy of $\pm 5\mu\text{m}$ [3]. The 3D strain is deduced from displacement values.

The general experimental procedure is as followed :

- setting the sample on the lower part of the chamber,
- setting the required temperature,
- applying a pre-loading if required,
- setting all the chamber under vacuum,
- applying the differential pressure and making measurements.

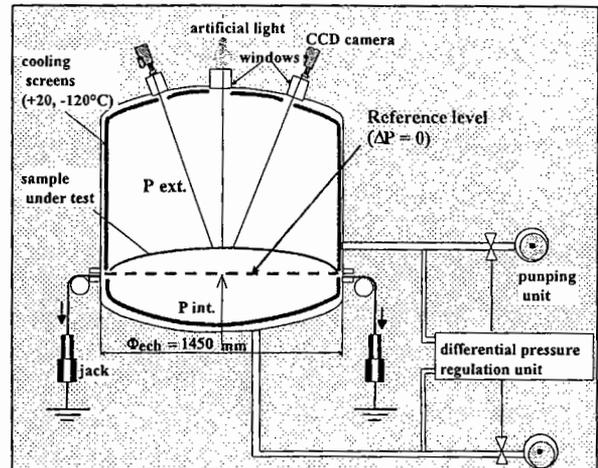


Fig 2. NIRVANA diagram with a sample submitted to a pressure stress.

3. TIGHTNESS MEASUREMENT OF A ZERO PRESSURE APEX PART

3.1 Sample description

We have measured the tightness of a zero-pressure balloon apex part. The subsystem tested includes (fig 3):

- ending part of the film envelope with 150 gores and tendons
- apex elements where all the tendons are fixed
- closing system onto which the valves (1 or 2) can be fixed.

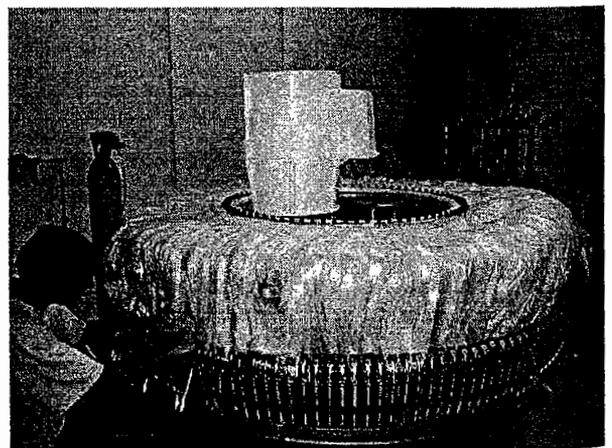


Fig 3. Setting of a zero-pressure balloon apex part in the NIRVANA facility

3.2 Testing conditions

The aim of the test was to validate the tightness of the fixing envelope system (apex and upper part of the envelope), so they was no valve in the test carried out.

The 150 tendons are fixed on the lock grip pliers (Fig. 3) and a 6t total load (40kg/tendon) is maintained during the tests. Measurement are made at three flight pressures and temperature conditions corresponding to inflating, ascending and ceiling phases.

3.3 results

Tightness results are shown on Fig. 4.

| Flight phases | Temperature (°C) | Differential pressure (hPa) | Tightness (g/24h/Pa) |
|---------------|------------------|-----------------------------|----------------------|
| inflating | +15 | 3 | 26 ± 10 |
| ascending | -31 | 0,8 | 18 ± 10 |
| ceiling | -69 | 0,8 | 15 ± 5 |

Fig. 4. Tightness results of a zero-pressure balloon apex

The relatively bad precision of the results is due to 2 factors : the tightness range is in the upper limit of the measurement device (mainly devoted to current envelope film) and there is a leakage between the sample and the chamber seal ring which tends to lower the helium concentration in the nitrogen volume.

Nevertheless, results shows that the apex leakage is negligible regarding the helium quantity of a zero-pressure balloon and so validates the apex system even at low temperature.

4. STRAIN MEASUREMENT OF A SUPER-PRESSURE BALLOON ENVELOPE ELEMENT

Evolution of super-pressure balloon behaviors are not so easy to predict with time flight and uniaxial and bursting characterization of balloon materials are not sufficient. We have to carry out numerical models validated by experimental characterization [4,5] considering axisymetrical loading and non linear behavior of materials.

4.1 Samples description and setting

We have tested two kind of samples representative of the STRATEOLE super-pressure balloon [6]. The first one is constituted of two gore elements assembled by a thermosetting tape in the center. The second one has two assemblies but close to the sample edge, representing current gore. The aim is to compare the

effect of the tape on the diameter balloon when it is pressurized.

The STRATEOLE gores are made of 50 µm laminated polyester and polyamide films sealed on both side by a 25mm wide polyester tape (Fig. 5a and 5b). The sample under test is fixed between the two seal rings of the NIRVANA facility.

Envelope samples are covered by small black and white paint spots in order to have a contrasted surface for displacement measurements. The paint is made with mineral pigments in an aqueous solution without effect on the material properties.

The edge of the sample is clamped with the 150 lock grip pliers for a pre-loading setting and the load is applied just before closing the chamber to minimize creeping effect.

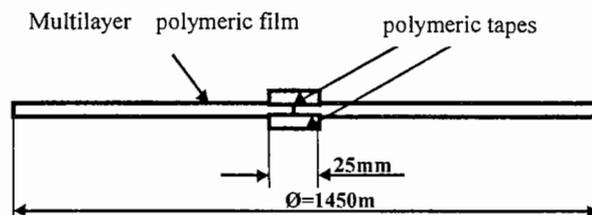


Fig. 5a. Central assembly sample description

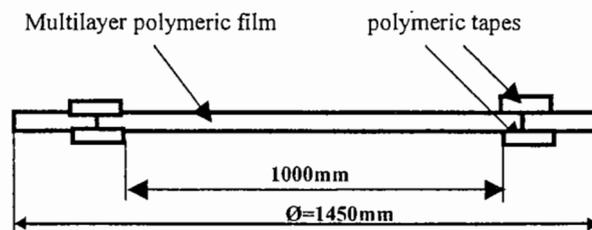


Fig. 5b. Lateral assembly sample description

4.2 Test conditions

Samples are tested with and without pre-loading. The pre-loading strength is 1.8t equivalent to the envelope stress of a 10m diameter balloon pressurized at 15hPa. The interest of the pre-loading is to create an axisymetrical stress in all the sample when the differential pressure is applied. In that case, the sample under differential pressure is in the equivalent stress state than an inflated balloon envelope. Without pre-loading, the axisymetrical stress is effective only at the sample center, at the maximum deflection. The stress is uniaxial close to the circumference and mixed in other parts.

The absolute pressure in the chamber is about 100 hPa. The effect of this low pressure chamber is to block the

sample in the seal rings after the pre-loading and maintains the pre-stress value. All results are at room temperature.

4.3 results

The 3D camera device takes pictures every pressure step. From these pictures, displacement and strain values are calculated for every points of the analyzed surface (around 500mm diameter). Fig. 6 to 9 show results for a central assembly pressurized at 15hPa with two settings : with and without pre-loading. The treatment of these results is part of a Ph.D. work where 3D strain results are compared to stress/strain models in order to validate them[4].

Fig.7 Y strain values of a central assembly sample without pre-loading at 15hPa

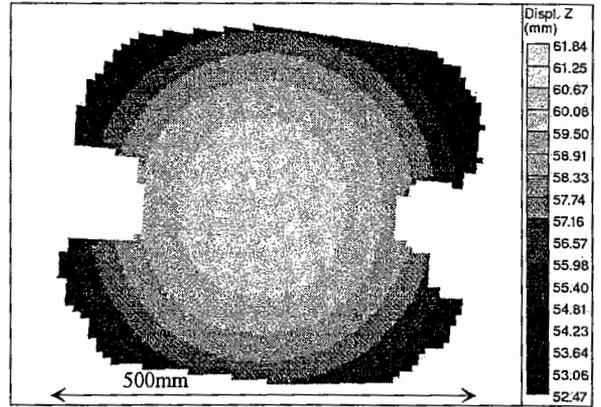


Fig.8 vertical displacement of an assembly with pre-loading at 15hPa

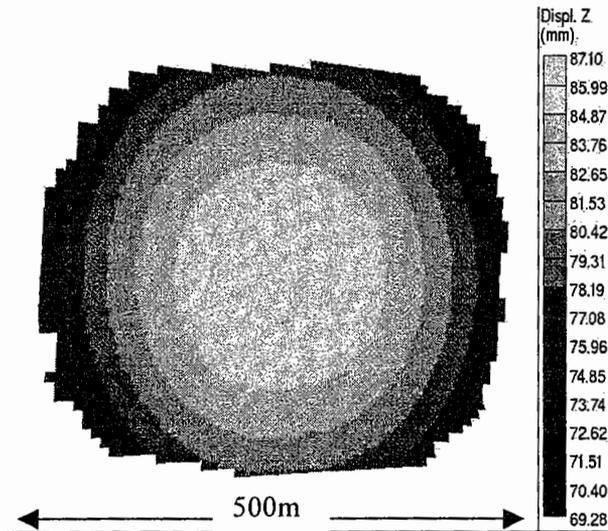
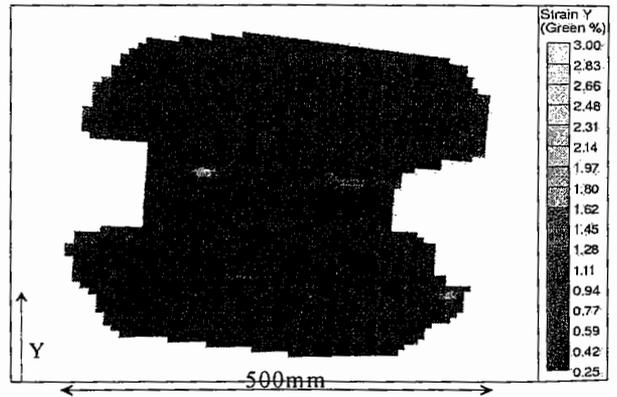
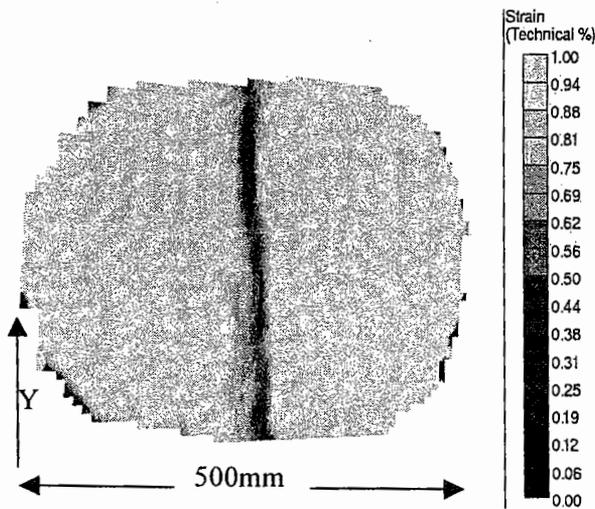


Fig.6 vertical displacement of a central assembly sample without pre-loading at 15hPa

Fig.9 Y strain values of an assembly with pre-loading at 15hPa



The effect of pre-loading is shown comparing Fig. 6 and 8 : for the same sample type, the maximum deflection is 30% less when the load is applied. Strain results with pre-loading are comparable to complete balloon pressurization tests, carried out for balloon validations, confirming the necessity of pre-loading the sample to be more realistic.

Fig.10 shows the evolution of the maximum deflection versus differential pressure for the two types of sample, with and without pre-loading.

Maximum deflection for a central assembly sample and current gore are very closed. The deflection is directly linked to the balloon diameter. The size of the pressurized balloon depends mainly on the film envelope properties.

Comparison to rough numerical models gives good agreement considering elastic and creeping behavior of the material [4]. Obviously, the creeping effect is more important with pre-loading.

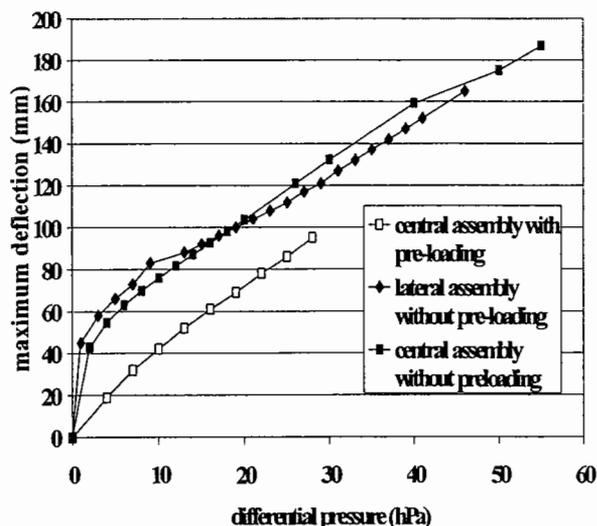


Fig.10 Maximum deflection versus differential pressure for different samples and settings

From the deflection/differential pressure curves, we can calculate stress/strain curves with a spherical deformation approximation (Fig.11). The Poisson coefficient used in the calculation is 0.23. Values from tensile tests of the balloon envelope film are compared to these results and show a good fit with the sample test without pre-loading (no creeping effect).

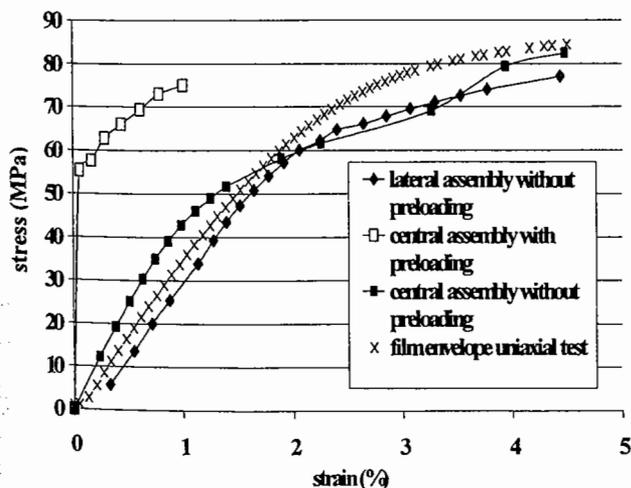


Fig.11 stress/strain values calculated with spherical deformation approximation.

5. CONCLUSIONS

The NIRVANA facility developed for balloon subsystems characterization is dedicated to two kind of characterization : helium tightness of balloon subsystems and mechanical behavior of pressurized envelopes. This facility reproduces realistic in flight conditions that is : temperature, absolute and differential pressure and mechanical stress on the envelope.

We have tested the helium tightness of a zero pressure balloon apex in several flight conditions : launching, ascending and ceiling, asserting a leakage level lower than the requirement.

The second application is the mechanical behavior of a super-pressure balloon envelope with gores and assemblies. Strain results are used to validate numerical models for predicting the long-term super-pressure balloon stress and strain state.

BIBLIOGRAPHY

1. Guigue-Joguet P., et al. , *8th IS MSE – 5th IC PMSE*, Arcachon, France, 2000.
2. Guigue, P. and J-M. Siguier, *Proceedings of 15th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Prog.*, pp. 547-552, Biarritz France, may 2001.
3. Karama M. et al , *2^{ème} colloque francophone : Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie*, Trégastel, France, 19-23 november 2001.
4. J-M. Siguier et al, Numerical and experimental simulation of the mechanical behavior of super-pressure balloon subsystems, *34th COSPAR*, Houston, Texas, USA, 10-19 october 2002.
5. Lemaitre, J., and J-L Chaboche, *Mécanique des matériaux solides*, Dunod, France, 1985
6. Cocquerez, P. et al, *Proceedings of 15th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Prog.*, pp. 597-601, Biarritz France, may 2001.

Modélisation numérique et expérimentale du comportement de sous-ensembles de ballons pressurisés stratosphériques

PIERRE VIALETES^{1,a}, JEAN-MICHEL SIGUIER¹, OLIVIER DALVERNY², SÉBASTIEN MISTOU², MOUSSA KARAMA² ET FRANK PETITJEAN³

¹ ONERA Centre de Toulouse BP 40252, avenue Édouard Belin, 31055 Toulouse Cedex 4, France

² Laboratoire Génie de Production, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, BP 1629, 65016 Tarbes Cedex, France

³ Institut Catholique des Arts et Métiers, Avenue de Grande Bretagne, 31000 Toulouse, France

Reçu le 25 février 2005, accepté le 21 mars 2005

Résumé – Ce travail concerne la simulation numérique et expérimentale du comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques. Ce programme de recherche entrepris par le CNES et l'ONERA est basé sur (i) la modélisation du matériau polymère constitutif des ballons par des lois de comportement de type viscoélastique; (ii) la simulation expérimentale de sous-ensembles de ballons lors de phases de vol; (iii) la validation des lois viscoélastiques par comparaison essais/calculs du comportement de sous-ensembles de ballons. Le dispositif expérimental utilisé, nommé NIRVANA, reproduit les conditions de vol d'un ballon, i.e. la température, la pression et la contrainte dans l'enveloppe. Dans le cadre des caractérisations en grandes déformations des polymères, l'instrumentation généralement mise en œuvre permet seulement d'accéder à des caractéristiques globales et macroscopiques. Le suivi de tels essais par la méthode de stéréocorrélation d'images, méthode basée sur les principes de la photogrammétrie, permet d'accéder de manière fine aux champs de déplacements et de déformations sur la totalité de la surface mesurée. Cette richesse d'information expérimentale s'avère particulièrement utile pour la validation non seulement globale mais aussi locale des lois de comportement utilisées.

Mots clés : Mesure sans contact / stéréocorrélation / polymères / ballons stratosphériques / viscoélasticité / identification

Abstract – Numerical and experimental modeling of the behavior of pressurized stratospheric balloons subsets. This work relates to numerical simulation and experimental mechanical behavior of the stratospheric pressurized balloons. This research program carried out by the CNES and ONERA is based on (i) the modeling of polymeric material constitutive of the balloons behavior laws of viscoelastic type; (ii) the experimental simulation of balloons subsets in flight phases; (iii) validation of the viscoelastic laws by comparison tests/calculations of the balloons subsets behavior. The facility named NIRVANA reproduces the flying conditions of a balloon, i.e. the temperature, the pressure and the constraint in the balloon envelope. In the context of identification of polymer large deformation behaviour, general measurement only brings to global and macroscopic characteristics. The follow-up of these tests by stereo correlation of images, method based on photogrammetry principles, gives access to displacements and strain fields with accuracy on the totally measured area. This wealth of experimental information is particularly useful for the global and local verification of the behavior laws.

Key words: Non-contact measurement / stereo-correlation / polymer / stratospheric balloons / viscoelasticity / identification

^a Auteur correspondant : vialette@oncert.fr

Nomenclature

| | |
|---------------------|---|
| x, y | coordonnées de l'image |
| x_0, y_0 | coordonnées du point principal |
| d_x, d_y | distorsions des objectifs |
| c | constante représentative des caméras |
| R | matrice de rotation |
| X_0, Y_0, Z_0 | coordonnées du centre de projection |
| X, Y, Z | coordonnées du point objet |
| σ | précontrainte |
| ΔP | différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du ballon |
| R | rayon du ballon |
| e | épaisseur de l'enveloppe |
| t_0 et t_∞ | temps de début et d'équilibre en fluage |
| ξ_i | écoulement visqueux |
| τ_i | temps de relaxation |
| μ_i | coefficient de pondération (gaussienne) |
| n_0, n_c | spectre gaussien |
| $i \in [n_1, n_2]$ | caractéristiques du spectre de la gaussienne |
| $\bar{\sigma}$ | contrainte équivalente |
| $\bar{\epsilon}$ | déformation équivalente |
| T | température |
| A, q, c, m | coefficients |
| t | temps |
| L | tenseur d'ordre 4 d'anisotropie élastique |
| ϵ | déformation totale |
| ϵ^a | déformation anélastique |
| $g(\sigma)$ | fonction non linéarisante |
| β | paramètre |
| L_R | tenseur d'ordre 4 d'anisotropie visqueux |
| γ_R | coefficient lié à la viscosité |
| ν_R | coefficient de Poisson du tenseur relaxé |
| γ_c | coefficient représentant la viscosité en cisaillement |
| ν | coefficient de Poisson |
| $S_R = L_R^{-1}$ | tenseur de souplesse |

1 Introduction

Les ballons pressurisés (Fig. 1a) sont développés par le CNES pour effectuer des expériences de longue durée dans la stratosphère. Ils sont dimensionnés en considérant que les matériaux ont un comportement linéaire jusqu'à leur seuil d'élasticité [1–3]. Durant la phase de développement, deux problèmes principaux ont été mis en évidence et doivent être résolus.

Le premier de ces problèmes est l'éclatement prématuré 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 10 m, 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 et modifie donc tous les paramètres du vol.

Les ballons pressurisés de 10 m de diamètre sont composés de fuseaux assemblés par un ruban de Polyester

(PET) et de colle thermo-réactivable (Fig. 1b). Les fuseaux se rejoignent au niveau des pôles et sont repris par une calotte en film PET de différentes épaisseurs. Le matériau constitutif des fuseaux est un film complexé tri-couches composé de Polyester 15 μm , de Polyamide 20 μm et de Polyester 15 μm (PET/PA/PET), pour une épaisseur totale de 50 μm . 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).

On identifie les lois de comportement du matériau à partir d'essais uniaxiaux en traction, fluage et relaxation. Ces essais se font sur une machine de traction équipée d'une caméra CCD (Charge Coupled Device) permettant la mesure du champ de déplacement et le calcul des déformations dans le plan de sollicitation de l'éprouvette [4–7]. Cette méthode non intrusive est adaptée à l'identification du comportement mécanique de matériaux souples et transparents. La mesure du champ de déplacement nécessite le dépôt sur l'éprouvette d'un

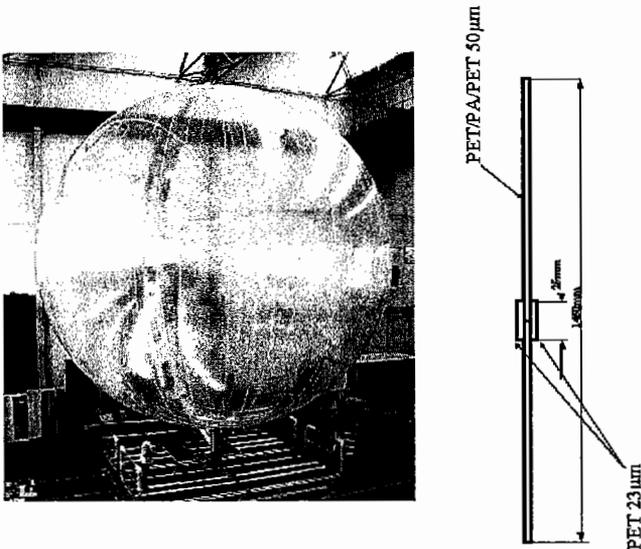


Fig. 1. Ballon pressurisé 10 m (a) et assemblage de fuseaux (b).

mouchetis. Le polymère utilisé étant sensible aux solvants des peintures, une étude a été menée afin de valider l'utilisation de tels dépôts [8–10]. L'aspect viscoélastique de ce polymère le rend sensible aux variations de vitesses de sollicitations. Une méthode a été mise au point afin de pouvoir prendre un nombre d'images significatif, notamment dans la zone élastique, à des vitesses de sollicitations de l'ordre de $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Ces essais ont été réalisés de la température ambiante jusqu'à $-60 \text{ }^\circ\text{C}$. Une procédure expérimentale spécifique est nécessaire pour les mesures à froid. Cette procédure est appliquée pour mesurer le coefficient de dilatation du matériau [8].

La validation des lois identifiées [11–13] se fait à partir d'essais représentatifs des phases de vol sur le dispositif expérimental NIRVANA. Ce moyen d'essai permet de mesurer via un système de stéréo-corrélation d'images les déplacements et de déduire les déformations d'un sous-ensemble de ballon soumis à des conditions de température et de pression représentatives des phases de vol. Des essais ont été menés à température ambiante et jusqu'à $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ sur des calottes et des assemblages sous des sollicitations de traction à vitesse de mise en pression constante ainsi qu'à pression constante durant plusieurs jours [14, 15]. Le matériau étudié étant un réflecteur spéculaire semi-transparent, les échantillons sont préparés afin de pouvoir mesurer les déplacements.

2 Identification du comportement du matériau

2.1 Matériaux étudiés

Les ballons pressurisés stratosphériques de 10 m de diamètre sont constitués de fuseaux en film multicouche de $50 \mu\text{m}$ d'épaisseur, assemblés par collage de bandes de

PET de $23 \mu\text{m}$ d'épaisseur (Fig. 1b). Le film complexe est un polymère tri-couches obtenu à partir de 2 films de PET de $15 \mu\text{m}$ d'épaisseur entre lesquels s'intercale un film de polyamide (PA) de $20 \mu\text{m}$ d'épaisseur (PET/PA/PET). Les principales propriétés de ce complexe sont sa légèreté, sa bonne résistance mécanique alliée à une bonne souplesse jusqu'à de très basses températures, son étanchéité aux gaz aérostatisques et sa résistance aux UV et à l'ozone [2, 15, 16]. Hormis le gain en souplesse, l'intérêt du complexage de 3 films est d'éviter les fuites dues aux éventuels micro-trous pouvant apparaître sur chaque film [10]. Enfin, il offre une bonne résistance bi-axiale avec un coefficient d'isotropie supérieur à 0,9, malgré le procédé de mise en forme des 3 films, par bi-étirage.

2.2 Identification des caractéristiques thermoélastiques

La principale difficulté de l'identification des caractéristiques mécaniques de matériaux souples et transparents comme le complexe PET/PA/PET est la connaissance du coefficient de Poisson. Les méthodes trop intrusives telles que les jauges de déformation influent sur le comportement global du polymère. Pour déterminer les déformations dans le plan de sollicitation de l'éprouvette lors d'un essai de traction uniaxial, on peut mettre en œuvre des procédés d'extensométrie sans contact tels que la corrélation d'images.

2.2.1 Mesures sans contact par stéréo-corrélation d'images

Les deux caméras CCD permettent d'acquérir des images numériques avec une définition de 1280 par 1024 pixels. Ces images sont ensuite traitées avec un logiciel spécifique de reconnaissance d'images. Grâce à ce dispositif il est possible de mesurer les déplacements et les déformations à la surface d'un objet avec une résolution de $1000 \text{ à } 2000 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ en déformations. Ce dispositif est donc adapté à des comportements de grandes déformations [1–4].

Le logiciel est basé sur le principe de photogrammétrie qui est une des méthodes de mesure optique qui permet de mesurer les coordonnées 3D de points sur la surface d'un objet. À partir de ces coordonnées, il est possible de calculer le vecteur de déplacement, les déformations locales et les différences de formes si l'objet se déforme [4–6].

Si la position de 2 caméras et de 2 points images homologues $p_1(x_1, y_1)$ et $p_2(x_2, y_2)$ sont connus, le point objet correspondant $P(X, Y, Z)$ peut être calculé (Fig. 2). Cette procédure de calcul est connue sous le nom d'intersection spatiale.

Pour cela, un modèle géométrique doit être défini, qui décrit la transformation permettant de passer des points image au point physique. On peut alors utiliser le modèle de projection par perspective qui est très souvent utilisé

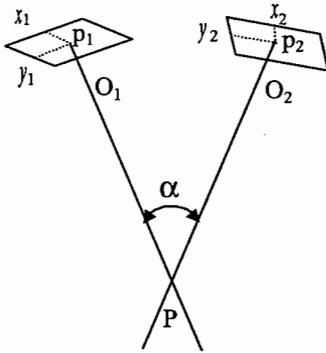


Fig. 2. Méthode de l'intersection spatiale.

en photogrammétrie. Son modèle mathématique repose sur la transformation colinéaire [4, 5, 12]

$$\begin{Bmatrix} x - x_0 - d_x \\ y - y_0 - d_y \\ c \end{Bmatrix} = R \begin{Bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

x , y sont les coordonnées de l'image, x_0 , y_0 les coordonnées du point principal, d_x , d_y les distorsions des objectifs, c une constante représentative des caméras, R la matrice de rotation, X_0 , Y_0 , Z_0 les coordonnées du centre de projection, X , Y , Z les coordonnées du point objet.

Les paramètres de la matrice de rotation (décrite par les angles d'Euler ω , ϕ , k) et les paramètres du centre de projection (X_0 , Y_0 , Z_0) sont connus comme « orientation extérieure », les paramètres x_0 , y_0 , d_x , d_y et c sont connus comme « orientation intérieure » des caméras. Ils doivent être calculés lors d'une phase de calibration.

La calibration est l'étape fondamentale qui précède l'acquisition d'images. Elle sert à déterminer tous les paramètres géométriques nécessaires au calcul de la transformation colinéaire : la distance et l'angle entre les caméras, la distance foyer/objectif. Elle permet de quantifier les aberrations optiques afin qu'elles puissent être prises en compte dans les calculs. On utilise une plaque de calibration de dimensions équivalentes à la surface de mesure, que l'on place à une distance de mesure fixe. Au cours de ce processus, plusieurs images de la plaque sont prises dans différentes positions. La plaque de calibration est constellée de points blancs dont l'éloignement est connu. La résolution obtenue au cours de la calibration est inférieure au pixel, ce qui correspond à une erreur de quelques micromètres en déplacements.

Le logiciel de traitement d'images est capable de reconnaître les points d'une image par analyse des niveaux de gris. Cela est rendu possible grâce à l'application sur l'objet à mesurer de peintures blanche et noire qui forment des niveaux de gris variables sur la surface de l'objet. À chaque pixel des capteurs CCD correspond une valeur de niveau de gris codée sur 8 ou 12 bits. Une suite de plusieurs pixels pris sur une même ligne forme une séquence de niveaux de gris appelée distribution de niveaux de gris. Le principe fondamental réside dans le fait que les distributions ne varient pas au cours de la

déformation de l'objet. Il suffit donc de suivre ces distributions de niveau de gris dans leur mouvement pour avoir les déplacements de l'objet. En pratique, cela est rendu possible grâce à des jauges optiques qui sont des bases de mesure regroupant $n \times n$ pixels.

Le centre de chaque jauge optique est repéré à partir de la distribution des niveaux de gris des pixels, situés sur deux droites orthogonales passant par le centre de la jauge. Quatre centres de jauges optiques constituent les sommets d'une maille. L'ensemble de toutes les mailles forme un maillage de la surface de l'objet. Lorsque le centre des jauges bouge au cours d'une déformation, les mailles se déforment, tournent et se translacent. Les pixels de la maille de l'image de référence sont alors transformés dans l'image de destination. Afin de compenser automatiquement d'éventuelles variations de luminosité au cours des mesures, une transformation linéaire de la luminosité est utilisée simultanément au processus de comparaison des images.

Pour comparer deux images, il est nécessaire de rechercher des distributions horizontales et verticales de niveaux de gris qui soient identiques. Il faut donner un point de départ dans les quatre images que l'on compare (images de référence et images après déformation des caméras de gauche et de droite). Ces quatre points sont des points homologues car ils correspondent au même point physique vu par les deux caméras, avant et après déformation.

2.2.2 Essais mécaniques

Ces essais ont été réalisés sur une machine de traction équipée d'un capteur d'effort de 1000 N. La vitesse de sollicitation choisie pour ces essais ($100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) permet de s'affranchir d'une grande partie des effets de fluage sur l'éprouvette.

La mesure par corrélation d'images nécessite un dépôt de peinture sur l'échantillon à tester. Les polymères étant sensibles aux solvants, une étude a été menée afin de choisir un dépôt adéquat. La peinture utilisée est en fait un primaire blanc. Ce produit, dans son utilisation d'origine s'applique en sous-couche afin de faire adhérer au mieux la première couche de peinture.

Une première série d'essais est effectuée sur un nombre d'éprouvettes suffisant pour obtenir une bonne reproductibilité. Une deuxième série d'essais est effectuée sur le même nombre d'éprouvettes peintes avec au minimum 30 min de séchage.

Ces essais se font sur le complexe PET/PA/PET en traction monotone à $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ jusqu'à rupture. Les mesures comparatives effectuées sur le module d'Young tangent, la déformation et la charge à rupture ont montré que le primaire appliqué à ce matériau n'altère donc pas de façon sensible ses caractéristiques mécaniques principales [8].

Le matériau étant sensible à la vitesse de sollicitation [1], une vitesse de traction relativement élevée ($100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) permet de s'affranchir d'une grande partie des phénomènes de fluage. À cette vitesse, les caméras utilisées ne permettent de capturer qu'une seule image

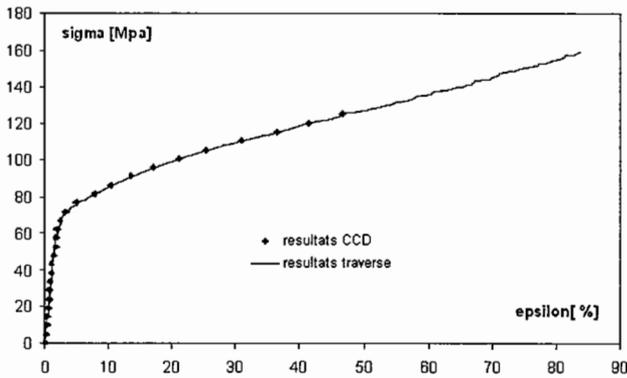


Fig. 3. Courbe conventionnelle du complexe PET/PA/PET.

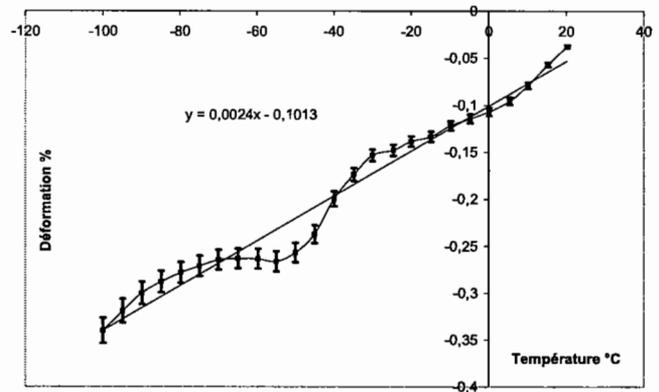


Fig. 4. Déformation mesurée par CCD en fonction de la température.

par seconde et l'acquisition d'une image se fait par un signal extérieur issu de la machine de traction. Ce signal analogique est proportionnel à la charge. Nous avons donc choisi de prendre une image tous les 20 N afin d'obtenir environ 3 images dans la zone élastique, cette limite ayant été identifiée à 60 N. Cette procédure permet de tracer la courbe conventionnelle de traction (Fig. 3).

Dans le cas où le résultat de l'essai attendu ne nécessite pas le recouplement avec la charge, comme, par exemple, la mesure du coefficient de Poisson ou seule la déformation est nécessaire, la capture d'image par un signal extérieur n'est pas nécessaire. Ainsi, pour mesurer le coefficient de Poisson (Fig. 5), nous utilisons une méthode de capture en fonction du temps qui permet de prendre jusqu'à 4 images par secondes. La différence de cadence de prise d'image avec la méthode précédente est due au fait que l'on ne perd pas de temps en lecture d'entrée analogique. La capture temporelle se fait avec l'horloge interne de l'ordinateur.

L'essai consiste donc à prendre une rafale d'images à partir d'un signal de départ donné par la machine de traction. Ce signal a été réglé afin que l'acquisition débute dès que la charge dans l'éprouvette dépasse 1,5 N. Ensuite, le système de mesure prend une image toutes les 0,25 s. Le dépouillement des calculs permet, connaissant la limite élastique en déformation, de discriminer les images correspondant à la zone élastique et à la zone plastique.

2.2.3 Mesure du coefficient de dilatation

Le domaine de vol des ballons nécessite une bonne connaissance du comportement des matériaux jusqu'à $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'objectif de l'essai (réalisé sur la machine de traction citée ci-dessus avec une enceinte thermique refroidie à l'azote et équipée d'un hublot) est de mesurer la déformation d'une éprouvette (PET/PA/PET) soumise à une variation de température. Seule la déformation due à la température doit être prise en compte. On effectue donc un essai de fluage à très faible charge (environ 0,5 N) sur l'éprouvette à tester. Cette charge entraîne des déformations très faibles devant celles dues à la dilatation

thermique. L'essai est réalisé de la température ambiante à $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La capture des images se fait tous les $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le calcul du coefficient de dilatation est obtenu par la moyenne des déformations de 4 points pris au centre de l'éprouvette. Les résultats choisis pour le calcul sont pris lors de la phase de montée en température (entre $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $23\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ce choix permet de s'affranchir des phénomènes d'inertie thermique dans l'enceinte. La figure 4 montre la déformation en fonction de la température lors de la phase de montée en température. La courbe obtenue permet la mesure du coefficient de dilatation moyen $\alpha = 24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

2.3 Identification des caractéristiques viscoélastiques

2.3.1 Modèle de Maxwell

Cette phase de l'étude a pour but de déterminer le comportement mécanique du PET/PA/PET. L'objectif de cette partie est de déterminer les coefficients de la loi de comportement à partir d'essais de fluage et de relaxation [17, 18]. Le polymère utilisé étant fortement non-linéaire en contrainte, nous avons choisi de le décrire par une loi de comportement de type Maxwell non-linéaire en temps et en contrainte [14, 19, 20]. La loi ainsi identifiée permet de décrire, avec des jeux de coefficients différents, les essais de fluage et de relaxation. Cette phase de l'étude a pour but de déterminer le comportement mécanique du PET/PA/PET.

Généralement le modèle « viscoélastique » non-linéaire de Maxwell (pour un polymère visco-élastique) s'écrit comme suit :

$$\dot{\epsilon}^c = A\bar{\sigma}^m (\bar{\epsilon}^c)^n T^p (qt^{q-1}) \quad (2)$$

Dans le cas d'un comportement isotherme l'équation (2) devient :

$$\dot{\epsilon} = A\bar{\sigma} (qt^{q-1}) \quad (3)$$

L'identification des paramètres de la loi est obtenue à partir d'essais de traction uni-axiale.

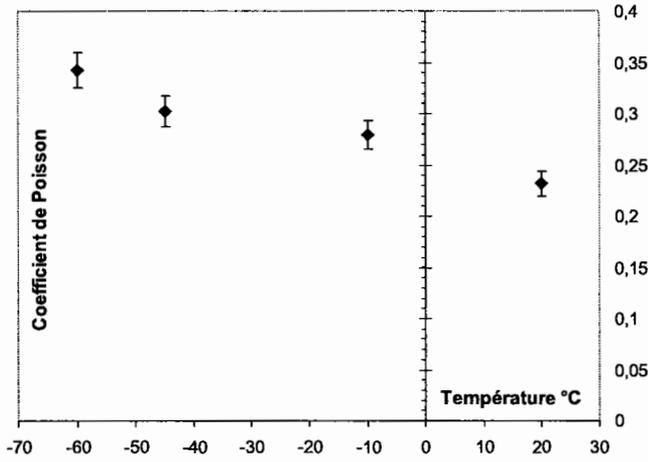


Fig. 5. Évolution du coefficient de Poisson en fonction de la température.

Des tests développés sur le dispositif NIRVANA instrumenté par un système de stéréo-corrélation d'images a permis la mesure du champ de déformations tridimensionnelles. L'utilisation du modèle de Maxwell non-linéaire a permis une bonne représentation du fluage et de la relaxation pour des temps courts. Ce modèle, identifié en fluage donne de bons résultats en fluage mais semble limité dans la description de la relaxation (Fig. 7).

2.3.2 Modèle spectral non-linéaire (MSNL)

2.3.2.1 Lois constitutives

Pour décrire le comportement viscoélastique non-linéaire, nous avons choisi le modèle viscoélastique spectral non-linéaire pour décrire à la fois le fluage et la relaxation [17]. L'écriture tensorielle de ce modèle permet de traiter le caractère multiaxial des sollicitations. La description des phénomènes visqueux en un spectre de temps de relaxation présente l'attrait de se rapprocher sensiblement de la réalité. Enfin, la formulation de ce modèle permet un découplage des paramètres, facilitant le travail d'identification.

Ce modèle se présente donc sous la forme d'un système d'équations différentielles du 1^{er} ordre ayant un nombre de coefficients limité :

$$\sigma = L : (\varepsilon - \varepsilon^a) \tag{4}$$

$$\dot{\varepsilon}^a = g(\sigma) \cdot \sum_i \dot{\xi}_i \tag{5}$$

avec

$$g(\sigma) = 1 + \beta \left(\sqrt{\sigma : L_R^{-1} : \sigma} \right)^p$$

$$\dot{\xi}_i = \frac{1}{\tau_i} (\mu_i \cdot g(\sigma) \cdot L_R^{-1} : \sigma - \xi_i)$$

$$\mu_i = \frac{1}{n_0 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \exp \left(- \left[\frac{i - n_c}{n_0} \right]^2 \right) \text{ et } \tau_i = e^{n_i}$$

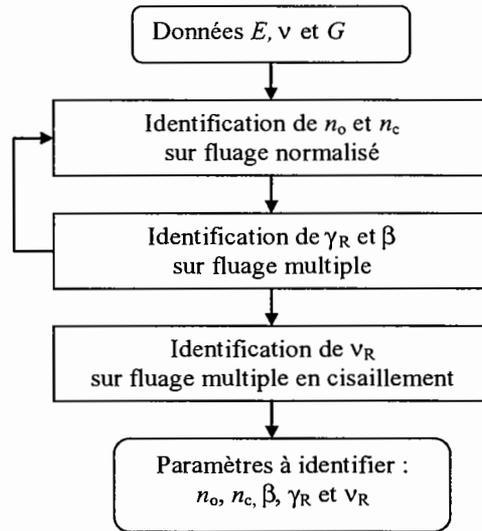


Fig. 6. Principe d'identification du modèle viscoélastique spectral non-linéaire.

La distribution gaussienne est normalisée de sorte que : $\sum_{i=-\infty}^{+\infty} \mu_i = 1$

$$L_R^{-1} = S_R = \begin{bmatrix} \gamma_R \cdot S_{11} & -\gamma_R \cdot S_{11} & 0 \\ -\gamma_R \cdot S_{11} & \gamma_R \cdot S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_c \cdot S_{66} \end{bmatrix}$$

avec $\gamma_c = \gamma_R \frac{1 + \nu_R}{1 + \nu}$

2.3.2.2 Procédure d'identification

Le modèle de comportement viscoélastique retenu possède au total 8 coefficients à identifier : 2 caractéristiques élastiques (E et ν), 2 coefficients liés à la viscosité (γ_R et ν_R), 2 à la non-linéarité en contrainte (β et p) et 2 à la répartition spectrale des temps de relaxation (n_0 et n_c).

Les caractéristiques élastiques sont directement mesurables sur des courbes ($\sigma - \varepsilon$) de traction monotone (Sect. 2.2.2). La procédure d'identification peut être schématisée selon le principe décrit dans la figure 6.

2.3.2.3 Résultat

Nous pouvons constater sur les figures 8 à 10 :

- la prise en compte de la non-linéarité en contrainte,
- un nombre de temps de relaxation élevé pour un nombre de coefficients à identifier réduit,
- un nombre d'essais réduits.

Les résultats sont bien corrélés. Par contre la méthode nécessite une implémentation complexe.

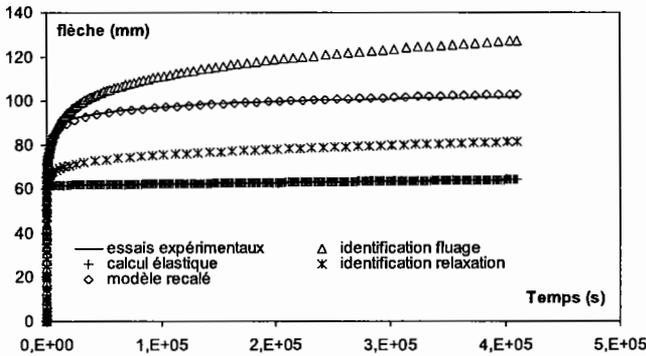


Fig. 7. Comportement en fluage et relaxation d'échantillon avec ruban central à pression constante (15 hPa).

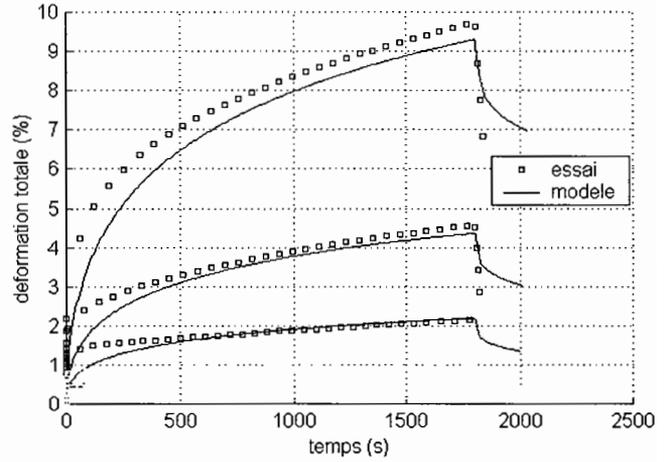


Fig. 9. Déformation en fonction du temps pour différentes charges.

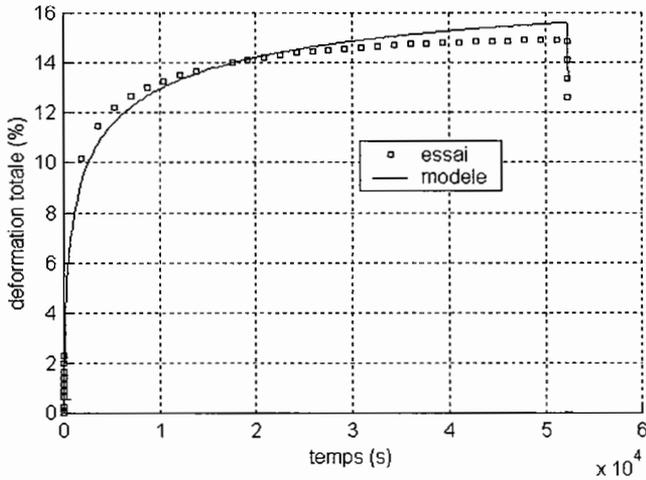


Fig. 8. Déformation en fonction du temps à contrainte constante (80 MPa).

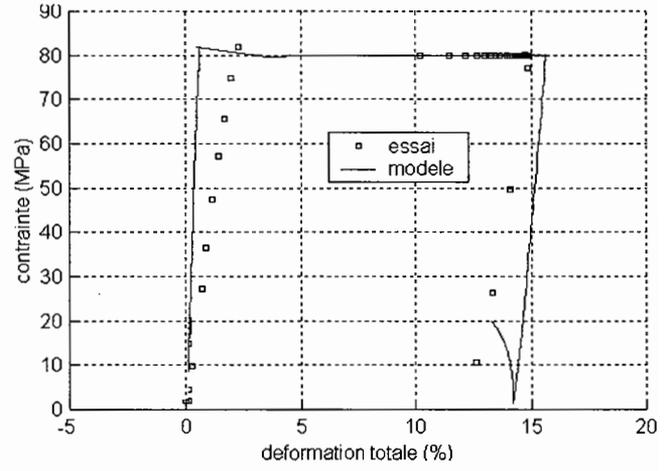


Fig. 10. Contrainte en fonction de la déformation.

3 Simulations numériques

La loi de Maxwell identifiée en fluage est implémentée dans le code éléments finis MSC MARC [][Marc 2003]. Le modèle est un quart de structure maillée en éléments de coque représentant l'échantillon testé sur NIRVANA. Les conditions de pression et de précontrainte en fonction du temps de l'essai de fluage sur NIRVANA sont implémentées directement comme conditions aux limites du calcul. Le couplage du logiciel éléments finis 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 logiciel d'optimisation 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 (Figs. 8 à 10) et (Figs. 16 et 17).

4 Simulations expérimentales

Ces essais ont pour but de valider les lois de comportement du PET/PA/PET dans des conditions de température et de contrainte représentatives de phases de vol. Ils sont réalisés sur le dispositif expérimental NIRVANA, développé par le CNES et l'ONERA, permettant d'étudier le comportement mécanique de sous-ensembles de ballons.

4.1 Dispositif expérimental NIRVANA

4.1.1 Présentation

Il est constitué d'une enceinte à vide réalisée en deux parties séparables dont la géométrie est schématiquement celle de deux demi-cylindres de même diamètre chacun fermé à son extrémité (Fig. 11). L'échantillon étudié est positionné entre les deux demi-cylindres et isole les deux parties de la cuve, il est donc possible d'introduire deux

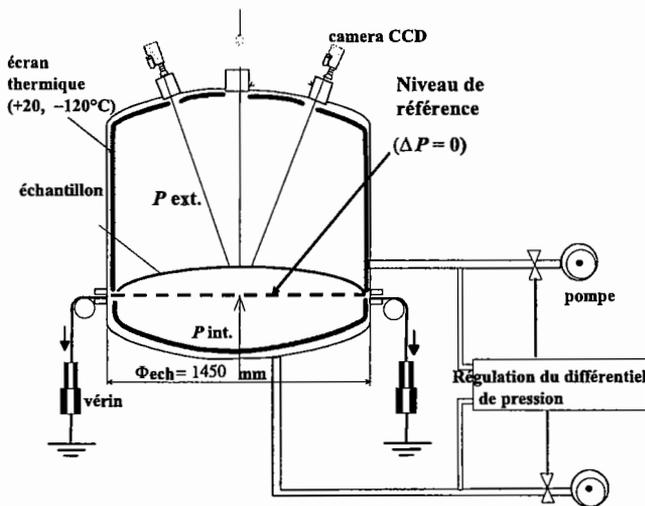


Fig. 11. Dispositif expérimental NIRVANA (vue en coupe).

atmosphères différentes et d'effectuer un différentiel de pression entre les deux volumes créés [9].

Un dispositif constitué de trois vérins pneumatiques asservis et de 150 pinces permet d'accrocher l'échantillon à tester et de lui appliquer une contrainte radiale extérieure.

Une double paroi isolée sous vide scellée sur la périphérie de l'enceinte garantit une isolation thermique par rapport à l'atmosphère extérieure de l'enceinte. Un dispositif interne de circulation d'azote froid dans des écrans thermiques régule la température entre +20 et -120 °C.

Plusieurs types d'expériences sont réalisables sur le dispositif NIRVANA :

- Étude de la perméabilité à l'hélium de films ou de sous-ensembles de ballons.
- Test d'éclatométrie et de suivi de la déflexion de l'échantillon en fonction du différentiel de pression.
- Essais en traction équibiaxiale avec ou sans tension initiale.
- Essais en fluage équibiaxial avec ou sans tension initiale.

4.1.2 Représentativité du ballon

Un des rôles du dispositif est de valider, après fabrication, la tenue mécanique de sous-ensembles de ballons dans des conditions proches de la réalité. L'essai effectué doit donc être représentatif d'une phase de vol, en appliquant les conditions de température et de pression. Le système de pré-tension avec vérins permet d'appliquer au film testé la contrainte présente dans la peau du ballon durant le vol [13]. Cette contrainte radiale appliquée en périphérie de l'échantillon simule la présence du reste du ballon (Fig. 12).

On simule ainsi une calotte de ballon dont la précontrainte est donnée par la relation :

$$\sigma = \frac{\Delta P \cdot R}{2e} \times 2\pi \times 1450 \times e \quad (6)$$

Avec : σ , la précontrainte à appliquer dans le dispositif NIRVANA, ΔP , la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du ballon, R , le rayon du ballon, e , l'épaisseur de l'enveloppe (considérée équivalente pour le ballon complet et l'échantillon à mesurer), 1450 mm correspond au diamètre de l'échantillon (Fig. 12).

4.1.3 Éclairage de l'échantillon

Le problème de l'éclairage vient de la nature réfléchissante et spéculaire du PET/PA/PET. Lorsque l'éclairage est dirigé vers l'échantillon, chaque caméra acquiert un reflet spéculaire dans une zone précise.

Ce reflet spéculaire entraîne une surexposition lumineuse dans les zones concernées qui ne permet pas au système de calculer les déplacements et les déformations dans les zones surexposées. La surface totale de l'échantillon mesurée est ainsi réduite de près de 40 %.

La solution adoptée pour palier ces problèmes consiste à rendre l'échantillon diffusant. Pour cela, on applique une sous-couche de peinture grise de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur sur l'échantillon rendant sa surface opaque et diffusante. La non homogénéité de cette couche permet en outre de créer un premier dégradé de niveaux de gris, reconnu par le logiciel de traitement d'images.

4.1.4 Résultats

Il s'agit de mesurer les déplacements et déformations d'un échantillon, assemblage représentatif d'un fuseau (Fig. 13), soumis à une mise en pression linéaire de 0 à 50 hPa.

La figure 14 montre la flèche au centre de l'échantillon en fonction de la différence de pression pour un échantillon avec assemblage central et pré-tension. La figure 15 présente l'évolution de la flèche au centre de l'échantillon en fonction du temps pour ce même échantillon. La figure 16 donne le déplacement vertical ainsi que la déformation normale à l'assemblage de l'ensemble de l'échantillon à un temps donné. On observe bien l'effet de l'assemblage central, d'épaisseur supérieure, qui entraîne une déformation moins importante.

On observe aussi l'influence de l'assemblage sur le déplacement vertical. En effet, l'assemblage plus épais a tendance à créer un champ de déplacement ovale (iso-déplacements Fig. 17) plutôt que circulaire.

- Structure à ruban central (T° ambiante, pré-tension = 37 kg.cm⁻¹, $P_{\text{diff}} = 15$ hPa).
- Calotte (T° ambiante, pré-tension = 37 kg.cm⁻¹, $P_{\text{diff}} = 15$ hPa).

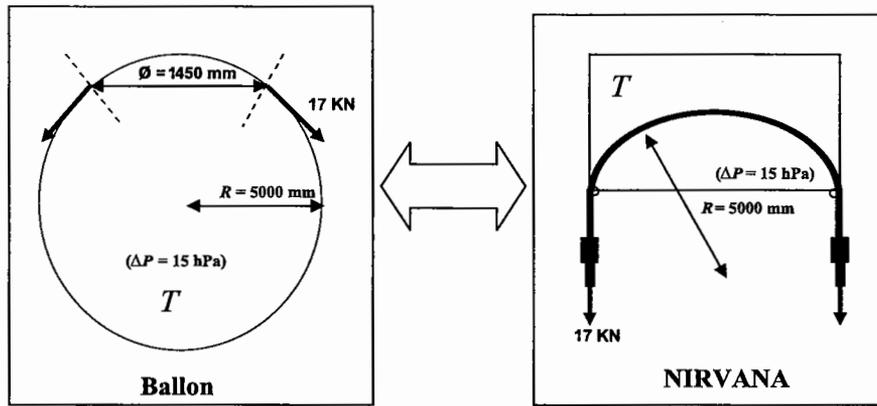


Fig. 12. Représentativité d'un ballon dans le dispositif NIRVANA.

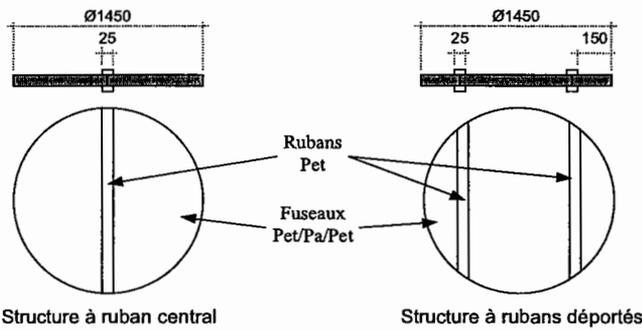


Fig. 13. Exemple des deux types de structures testées sur NIRVANA.

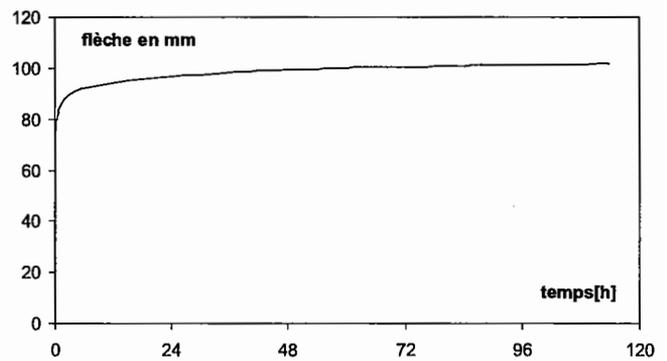


Fig. 15. Évolution de la flèche en fonction du temps.

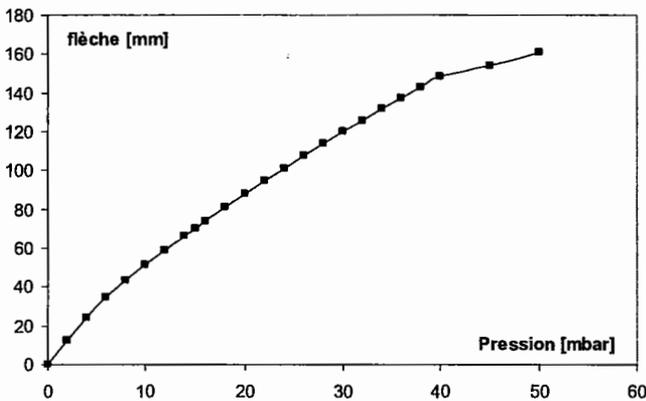


Fig. 14. Évolution de la flèche en fonction de la pression.

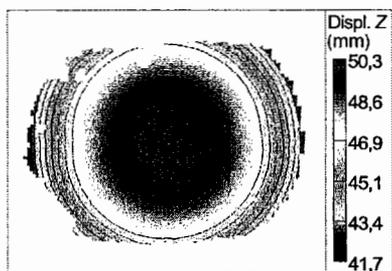
5 Conclusion

Nous avons étudié le comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques. L'identification des lois de comportement de films polymères constitutifs des ballons se fait à partir d'essais uniaxiaux en traction monotone, traction de fluage et de relaxation. Ces essais sont réalisés sur une machine de traction équipée d'une caméra CCD. Le dispositif expérimental permet de

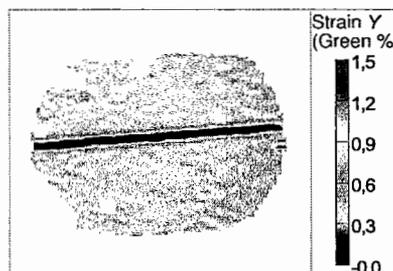
mesurer les déplacements et d'obtenir les déformations dans le plan de sollicitation de l'éprouvette. On a ainsi accès au module d'Young, au coefficient de Poisson à température ambiante et jusqu'à $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, ainsi qu'au coefficient de dilatation du film complexe de PET/PA/PET. Des procédures d'essais adaptées à l'identification de matériaux souples et transparents ont été ainsi mises en place.

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

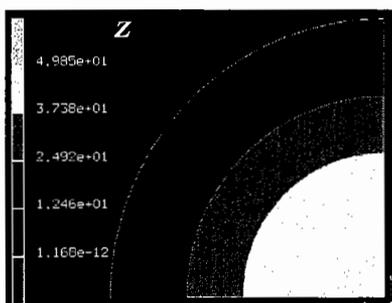
Une simulation par éléments finis des essais réalisés sur le dispositif expérimental permet, par comparaison des champs de déplacements, de valider les lois de comportement.



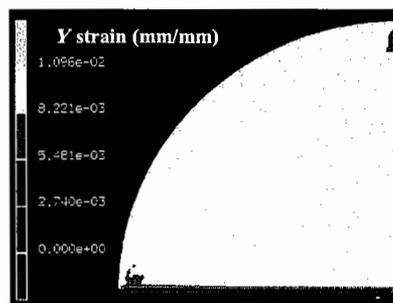
(a) Déplacement vertical mesuré



(b) Déformation mesurée suivant Y

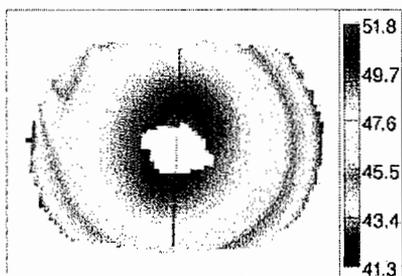


(c) Déplacement vertical numérique

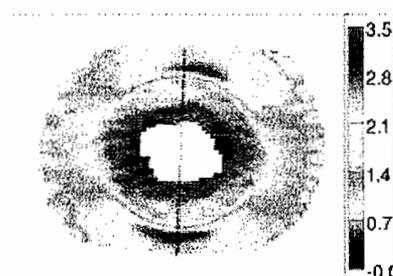


(d) Déformation numérique suivant Y

Fig. 16. Déplacements et déformations pour une structure avec ruban central.



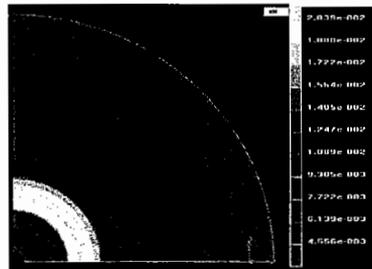
(a) Déplacement vertical mesuré



(b) Déformation mesurée suivant X



(c) Déformation mesurée suivant Y



(d) Déformation numérique suivant X

Fig. 17. Déplacements et déformations pour une calotte.

Références

- [1] J.J. Aklonis, Introduction to Polymer Viscoelasticity, Wiley, 1995
- [2] P. Cocquerez, P. Guigue, R. Guilbon, T. Phulpin, M. Durand, J.P. Lefèvre, M. Eymard, M. Lafourcade, Test flight of CNES stratospheric super-pressure balloons in experimental arctic campaigns 2000–2001, Objectives and results, Proceedings of 15th ESA Symp., on European Rocket and Balloon Prog., Biarritz, France, May 2001, pp. 597–601
- [3] P. Guigue, J.M. Siguier, Engineering of stratospheric balloon materials: selection procedure, experimental characterization and aging techniques, Proceedings of 15th ESA Symp., on European Rocket and Balloon Prog., 2001, pp. 547–552
- [4] M. Karama, S. Mistou, B. Lorrain, Mesures de déformations en 3D basées sur les techniques de photogrammétrie et d'analyse des distributions de niveaux de gris, Revue Instrumentation et Systèmes 207 (2001) 32–35
- [5] D. Garcia, Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréocorrélation d'images, Thèse de l'École des mines d'Albi, 2001
- [6] M.A. Sutton, S.R. McNeill, J.D. Helm, Y.J. Chao, Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision, Photomechanics, Topics Applied Physics 77 (2000) 323–372
- [7] S. Mistou, M. Karama, O. Dalverny, J.M. Siguier, P. Guigue, Mesure 3D sans contact des déplacements et déformations sur des films plastiques transparents par stéréocorrélation, Mécanique & Industries 4 (2003) 637–643
- [8] P. Vialettes, J.M. Siguier, P. Guigue, S. Mistou, O. Dalverny, M. Karama, F. Petitjean, Étude par stéréocorrélation des champs de déplacement et de déformation de sous-ensembles de ballons stratosphériques pressurisés, Revue Instrumentation, Mesure, Métrologie, I2M, 2005-05 (à paraître)
- [9] J.M. Siguier, P. Vialettes, S. Granier, P. Guigue, The use of Nirvana facility for balloon characterization: Strain and tightness measurements of zero pressure and super-pressure balloon subsystems, Proceedings of 16th ESA Symp., on European Rocket and Balloon Prog., Sankt Gallen, Switzerland, June 2003, pp. 207–213
- [10] J.-M. Siguier, P. Guigue, M. Karama, S. Mistou, O. Dalverny, S. Granier, Numerical and experimental simulation of the mechanical behavior of super-pressure balloon subsystems, 34th COSPAR, Houston, USA, 10–19 October, 2002
- [11] M. Grédiac, The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 35(7-8) (2004) 751–761
- [12] J.-J. Orteu, V. Garric, M. Devy, 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, Munich, Allemagne, June, 1997
- [13] P. Vialettes, J.M. Siguier, P. Guigue, S. Mistou, O. Dalverny, M. Karama, F. Petitjean, Identification du comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques, Revue des composites et matériaux avancés, septembre 2004, à paraître
- [14] P. Vialettes, J.M. Siguier, P. Guigue, O. Dalverny, S. Mistou, F. Petitjean, M. Karama, Modélisation du comportement non-linéaire de films minces constitutifs des ballons pressurisés stratosphériques, 16^e Congrès Français de Mécanique Nice, 1–5 septembre, 2003
- [15] A. Schieffer, Modélisation multiéchelle du comportement mécanique des composites à matrice organique et effets du vieillissement thermique, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, 2003
- [16] Ch. Remy-Petipas, Analyse et prévision du comportement à long terme des composites fibres de carbone/matrice organique, Thèse de doctorat, N^o d'ordre 801, Université de Franche-Comté, 2000
- [17] J.F. Maire, O. Lesné, C. Petipas, une nouvelle approche de la modélisation du comportement visqueux des composites organiques, 10^e journées nationales sur les composites, JNC, 1996
- [18] J.F. Maire, Études théorique et expérimentale du comportement de matériaux composites en contraintes planes, Thèse de doctorat, N^o d'ordre 282, Université de Franche-Comté, 1992
- [19] A.S. Nowick, B.S. Berry, Anelastic Relaxation in crystalline Solids Academic Press, 1972
- [20] J. Lemaitre, J.L. Chaboche, Mécanique des matériaux solides, Dunod, France, 1985
- [21] M. Karama, S. Mistou, P. Peres, G. Gohorianu, Mesure de déformations sans contact sur des composites carbone/carbone à architecture 3D, Troisième colloque francophone sur les méthodes et techniques optiques pour l'industrie, Saint Aubin de Médoc, 18–22 novembre, 2002

Etude par stéréo-corrélation des champs de déplacement et de déformation de sous-ensembles de ballons stratosphériques pressurisés

Pierre Vialettes**** — Jean Michel Siguier* — Pascale Guigue**
— Sébastien Mistou*** — Olivier Dalverny*** — Moussa Karama*** — Frank Petitjean****

*ONERA BP 4025 2, avenue Edouard Belin 31055 Toulouse Cedex 4
email : vialette@onecert.fr, sigulier@onecert.fr

**CNES 18, Avenue Edouard Belin 31401 Toulouse Cedex 9
email : pascale.guigue@cnes.fr

***ENIT 47, Avenue d'Azereix BP 1629 65016 Tarbes Cedex
email : mistou@enit.fr, dalverny@enit.fr, moussa@enit.fr

****ICAM 75, Avenue de Grande Bretagne 31300 Toulouse
email : frank.petitjean@icam.fr

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 est effectuée sur un polymère constitué de 3 couches complexées : PET 15 μm , PA 20 μm , PET 15 μm . Une campagne d'essais uniaxiaux a permis 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 stéréocorrélation, les champs de déplacement et de déformation de ces structures.

ABSTRACT: Long duration super-pressure balloons design and manufacturing is a great challenge for CNES in scientific ballooning. The good knowledge of the mechanical behavior of envelopes is necessary for this design. The study deals with polymer of 50 μm thickness made of 3 complexed films: PET 15 μm , PA 20 μm , PET 15 μm . A test campaign allows to identify viscoelastic law parameters. Substructure balloons are tested to measure, via a stereocorrelation system, displacement and strain of the structure in complex sollicitations

MOTS-CLÉS : viscoélasticité, polymères, corrélation d'images, ballons stratosphériques, stereo-corrélation, identification.

KEYWORDS: viscoelasticity, polymers, image correlation, stratospheric balloons, stereo-corrélation, identification.

1. Introduction

Les ballons pressurisés (Figure 1) sont développés par le CNES pour effectuer des expériences de longue durée dans la stratosphère. Ils sont dimensionnés en considérant que les matériaux ont un comportement linéaires jusqu'à leur seuil d'élasticité (Guigue *et al* 2001). Durant la phase de développement, deux problèmes principaux ont été mis en évidence et doivent être résolus.

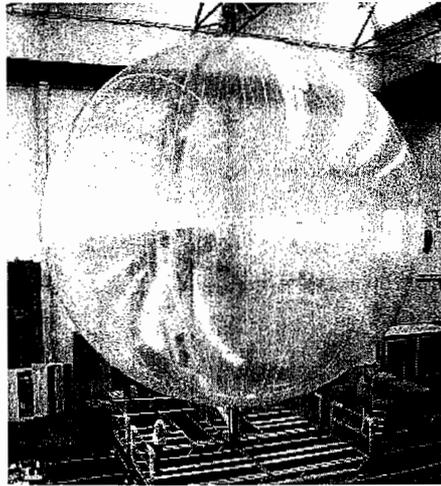


Figure 1. *Ballon pressurisé 10m*

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 10 m, 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 fuseaux assemblés par un ruban de PET et une colle thermo-réactivable. Les fuseaux se rejoignent au niveau des pôles et sont repris par une calotte en film PET de différentes épaisseurs. Le matériau constitutif des ballons étudiés est un film complexé tri-couches composé de Polyester 15 μ m, de Polyamide 20 μ m et de Polyester 15 μ m (PET/PA/PET), pour une épaisseur totale de 50 μ m. L'objectif de cette étude est de modéliser le comportement non linéaire de ces ballons pressurisés en prenant en compte l'influence du temps (fluage, relaxation). Seule la partie expérimentale de l'étude est présentée ici.

On identifie les lois de comportement du matériau à partir d'essais uniaxiaux en traction, fluage et relaxation. Ces essais se font sur une machine de traction équipée d'une camera CCD (Charge Coupled Device) permettant la mesure du champ de déplacement et le calcul des déformations dans le plan de sollicitation de l'éprouvette. Cette méthode non intrusive est adaptée à l'identification de matériaux souples et transparents. La mesure du champ de déplacement nécessite le dépôt sur l'éprouvette d'un mouchetis. Le polymère utilisé étant sensible aux solvants des peintures, une étude a été menée afin de valider le dépôt utilisé. L'aspect viscoélastique de ce polymère le rend sensible aux vitesses de sollicitations. Une méthode a été mise au point afin de pouvoir prendre un nombre d'images significatif, notamment dans la zone élastique, à des vitesses de sollicitations de l'ordre de 100 mm/min. Ces essais ont été réalisés de la température ambiante jusqu'à -60°C . Une procédure expérimentale spécifique est nécessaire pour les mesures à froid. Cette procédure est appliquée pour mesurer le coefficient de dilatation du matériau.

La validation des lois identifiées (Grédiac 2004) se fait à partir d'essais représentatifs des phases de vol sur le dispositif expérimental NIRVANA. Ce moyen d'essai permet de mesurer via un système de stéréo-corrélation d'images les déplacements et de déduire les déformations d'un sous ensemble de ballon soumis à des conditions de température et de pression représentatives des phases de vol. Des essais ont été menés à température ambiante et jusqu'à -60°C sur des calottes et des assemblages sous des sollicitations en traction à vitesse de mise en pression constante ainsi qu'à pression constante durant plusieurs jours. Le matériau étudié étant réfléchissant spéculaire, les échantillons sont préparés afin d'éviter les zones de surexposition lumineuse.

2. Matériaux étudiés

Les ballons pressurisés stratosphériques de 10m de diamètre sont constitués de fuseau en PET/PA/PET de $50\mu\text{m}$ d'épaisseur assemblés par collage de bandes de PET de $23\mu\text{m}$ d'épaisseur. Le film complexe PET/PA/PET est un polymère tri-couches obtenu à partir de 2 films de poly(éthylène téréphtalate) de $15\mu\text{m}$ d'épaisseur entre lesquels s'intercale un film de polyamide de $20\mu\text{m}$ d'épaisseur. Les principales propriétés de ce film sont sa légèreté, sa bonne résistance mécanique allée à de la souplesse jusqu'à de très basses températures, son étanchéité aux gaz aérostatiques et sa résistance aux UV et à l'ozone (Cocquerez et al. 2001). Hormis le gain en souplesse, l'intérêt du complexage de 3 films est d'éviter les fuites dues aux éventuels micro-trous pouvant apparaître sur chaque film (Siguier et al. 2002). Enfin, il offre une bonne résistance bi-axiale avec un coefficient d'anisotropie compris entre 0,9 et 1, malgré le procédé de mise en forme des 3 films, orientés par bi-étirage.

3. Essais uniaxiaux

La principale difficulté de l'identification des caractéristiques mécaniques de matériaux souples et transparents comme le complexe PET/PA/PET est la connaissance du coefficient de Poisson. Les méthodes trop intrusives telles que les jauges de déformation influent sur le comportement global du polymère. Pour déterminer les déformations dans le plan de sollicitation de l'éprouvette lors d'un essai de traction uniaxial, on peut mettre en œuvre des procédés d'extensométrie sans contact tels que la corrélation d'images.

3.1. Méthode de corrélation d'images

Cette technique est basée sur la reconnaissance des niveaux de gris. On applique sur l'objet à mesurer des peintures blanche et noire qui forment des niveaux de gris variables sur la surface de l'objet. A chaque pixel des capteurs CCD correspond une valeur de niveau de gris codée sur 8 bits. Une suite de plusieurs pixels pris sur une même ligne forme une séquence de niveaux de gris appelée distribution de niveaux de gris. Le principe fondamental réside dans le fait que les distributions ne varient pas au cours de la déformation de l'objet. Il suffit donc de suivre ces distributions de niveau de gris dans leur mouvement pour avoir les déplacements de l'objet. En pratique, cela est rendu possible grâce à des domaines de corrélation qui sont des zones regroupant $n \times n$ pixels.

Etant données deux images correspondant à deux états de déformation d'un objet, pour déterminer le correspondant d'un pixel de la première image dans la seconde, on mesure la ressemblance entre deux pixels en calculant un score de corrélation (critère de ressemblance) (Orteu 2002) déterminé sur leur voisinage (figure 2). Habituellement, les points traités par corrélation sont répartis suivant une grille virtuelle qui facilite le calcul des déformations à partir des déplacements mesurés.

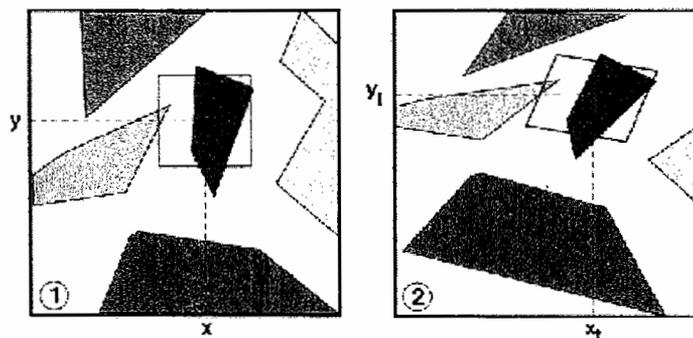


Figure 2. Facette à l'état non déformé et déformé

Sur la Figure 2, un « point de départ » est défini par l'utilisateur sur l'image de gauche correspondant à l'état initial (image de référence). Ce point doit également être défini par l'utilisateur sur l'autre image correspondant à l'état déformé. La relation existant entre les niveaux de gris de ces deux points est régie par l'équation [1] :

$$g_1(x, y) = g_2(x_t, y_t) \quad [1]$$

Les pixels de cette facette dans l'image de référence sont transformés dans l'image de destination suivant les relations [2] et [3] :

$$x_t = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \quad [2]$$

$$y_t = a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy \quad [3]$$

Les constantes a_1 et a_5 décrivent la translation du centre de la facette, tandis que les autres décrivent les rotations et déformations de la facette. Afin de compenser automatiquement d'éventuelles variations de luminosité au cours des mesures, une transformation linéaire est utilisée simultanément à ce processus de comparaison d'images. Les paramètres géométriques et de la transformation sont calculés de manière à minimiser la somme des déviations quadratiques des niveaux de gris équivalents des deux images. Le calcul des déformations résulte de l'analyse des configurations initiales et finales des facettes formant un maillage de la surface de l'éprouvette. La résolution théorique en déformation 2D est de 500 $\mu\text{m/m}$

La corrélation d'images présente de nombreux avantages :

- la facilité de préparation de la surface de l'objet (projection de peinture en quelques secondes), lorsque cela est nécessaire;
- la densité de l'information obtenue. En théorie, chacun des pixels de la matrice CCD peut être apparié par corrélation ce qui fournit un champ de déplacements dense. Le choix du pas de la grille virtuelle utilisée pour calculer les déformations à partir des déplacements s'effectue au moment du post-traitement des données et peut donc être adapté aux gradients de déformations rencontrés. C'est là un des gros avantages de la méthode de corrélation par rapport à d'autres méthodes sans contact (grilles, par exemple) qui imposent le choix d'un pas de calcul au moment de son dépôt sur l'objet avant déformation.

Lors de notre étude, plusieurs pas de grille ont été utilisés selon le type d'échantillon testé (géométrie, présence d'assemblages donc de discontinuités) et de l'application (validation des lois de comportement, implémentation du champ mesuré comme conditions limites du calcul)

3.2. Essais de traction monotone

Ces essais ont été réalisés sur une machine de traction INSTRON équipée d'un capteur d'effort de 1000 N. La vitesse de sollicitation choisie pour ces essais (100 mm/min) permet de s'affranchir d'une grande partie des effets de fluage sur l'éprouvette.

3.2.1. Etude de l'influence du dépôt sur le complexe PET/PA/PET

La mesure par corrélation d'images nécessite un dépôt de peinture sur l'échantillon à tester. Les polymères étant sensibles aux solvants, une étude a été menée afin de choisir un dépôt adéquat.

La peinture utilisée est en fait un primaire blanc. Ce produit, dans son utilisation d'origine s'applique en sous couche afin de faire adhérer au mieux la première couche de peinture.

Une première série d'essais est effectuée sur un nombre d'éprouvettes suffisant pour obtenir une bonne reproductibilité. Une deuxième série d'essais est effectuée sur le même nombre d'éprouvettes peintes avec au minimum 30 minutes de séchage.

Ces essais se font sur du complexe PET/PA/PET en traction monotone à 100mm/min jusqu'à rupture. Les valeurs observées sont le module d'Young tangent, la déformation et la charge à rupture. Le calcul des déformations se fait à partir du déplacement de la traverse. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous (Tableau 1) :

| | PET/PA/PET sans peinture | PET/PA/PET avec peinture | Erreur |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------|
| Module d'élasticité [MPa] | 3900 ±200 | 4000 ±200 | 2% |
| Déformation à rupture [%] | 90% ±10% | 83% ±10% | 8% |
| Charge à rupture [N] | 240 ±20 | 230 ±20 | 4% |

Tableau 1. Influence de la peinture sur le complexe PET/PA/PET

Les erreurs sur les valeurs mesurées se situent dans la plage d'erreur de reproductibilité des essais. Le primaire appliqué à ce matériau n'altère donc pas de façon sensible ses caractéristiques mécaniques principales.

3.2.2. Méthode de mesure par corrélation d'images à des vitesses de sollicitation de élevées

Le matériau étant sensible à la vitesse de sollicitation (Akloniss 1995), une vitesse de traction relativement élevée (100 mm/min) permet de s'affranchir d'une grande partie des phénomènes de fluage. A cette vitesse, la durée du comportement élastique du matériau lors de l'essai est de l'ordre de 3 secondes. Les caméras utilisées ne permettent de capturer qu'une image par seconde. L'acquisition d'une image se fait par un signal extérieur issu de la machine de traction. Ce signal analogique est proportionnel à la charge. Nous avons donc choisi de prendre une image tous les 20 N afin d'obtenir environ 3 images dans la zone élastique, cette limite ayant été identifiée à 60 N. La durée d'acquisition a été choisie à 0.1s. L'éclairage a été adapté à cette faible durée d'acquisition. Cette procédure permet de tracer la courbe conventionnelle de traction (figure 4).

Dans le cas où le résultat de l'essai attendu ne nécessite pas le recouplement avec la charge, comme, par exemple, la mesure du coefficient de Poisson ou seule la déformation est nécessaire, la capture d'image par un signal extérieur n'est pas nécessaire. Ainsi, pour mesurer le coefficient de Poisson, nous utilisons une méthode de capture en fonction du temps qui permet de prendre jusqu'à 4 images par secondes. La différence de cadence de prise d'image avec la méthode précédente est due au fait que l'on ne perd pas de temps en lecture d'entrée analogique. La capture temporelle se fait avec l'horloge interne de l'ordinateur. L'essai consiste donc à prendre une rafale d'images à partir d'un signal de départ donné par la machine de traction. Ce signal a été réglé afin que l'acquisition débute dès que la charge dans l'éprouvette dépasse 1,5 N. Ensuite, le système de mesure prend une image toutes les 0,25 secondes. Le dépouillement des calculs permet, connaissant la limite élastique en déformation, de discriminer les images correspondant à la zone élastique et à la zone plastique.

3.2.3. Procédure expérimentale des essais en température

Le domaine de vol des ballons nécessite une bonne connaissance du comportement des matériaux jusqu'à -60°C . Des essais en traction monotone sont réalisés à -10°C , -45°C et -60°C sur du complexe PET/PA/PET. Les essais sont réalisés sur la machine de traction citée ci-dessus avec une enceinte thermique refroidie à l'azote équipée d'un hublot. La procédure de prise d'images est la même que celle décrite au paragraphe 3.2.2.

3.2.4. Résultats

Les déformations sont calculées sur une section située au centre de l'éprouvette (figure 3). La déformation au centre de l'éprouvette est obtenue en faisant la moyenne réduite à 95% de l'ensemble des déformations sur la section. Cette moyenne permet de s'affranchir des erreurs numériques au bord de l'éprouvette.

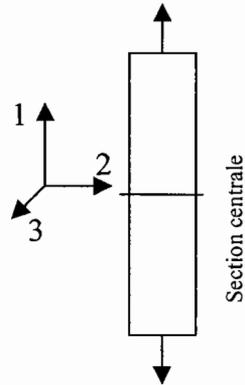


Figure 3. *Eprouvette de traction*

La figure 4 représente la courbe conventionnelle du complexe PET/PA/PET à température ambiante. La différence entre les résultats issus de la mesure de déplacement traverse et la mesure locale par corrélation d'image est faible. Ce résultat est dû au fait que les éprouvettes testées sont de forme rectangulaire et que la longueur initiale entre mors est importante (150 mm), ce qui réduit les effets de bord.

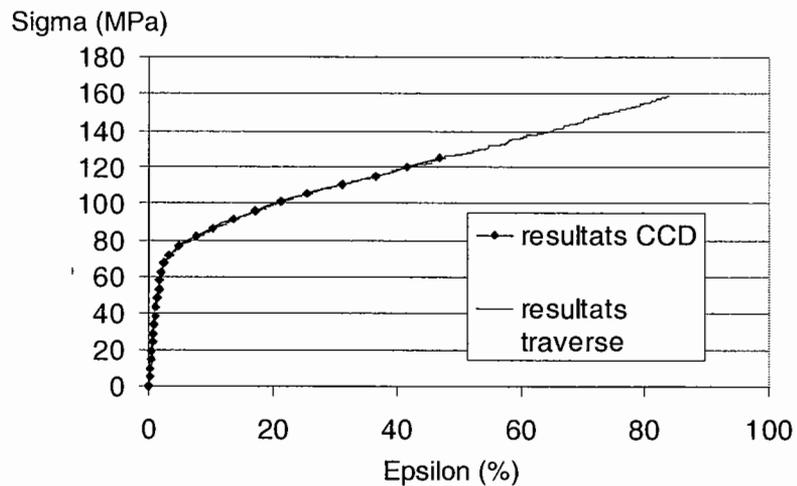


Figure 4. *Courbe conventionnelle du complexe PET/PA/PET*

La figure 5 montre le rapport entre la déformation dans le sens de sollicitation de l'éprouvette la déformation dans le sens transverse.

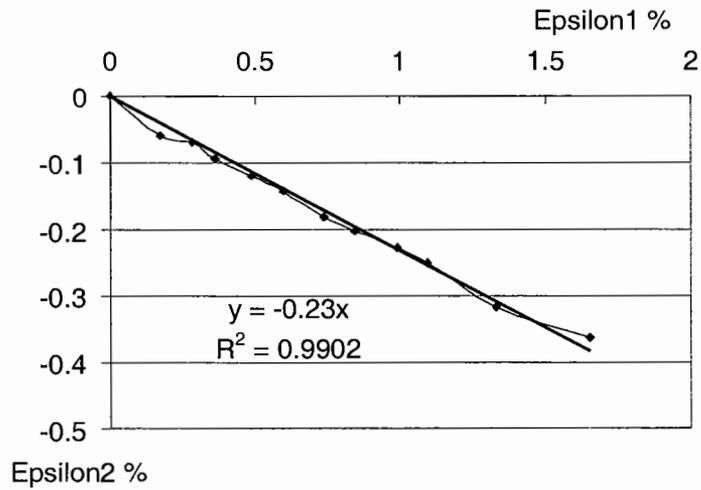


Figure 5. *Mesure du coefficient de Poisson du complexe PET/PA/PET*

La courbe est quasi-linéaire (Lemaitre 2001) et sa pente nous donne directement un coefficient de Poisson de 0,23.

La figure 6 décrit l'évolution du coefficient de Poisson en fonction de la température.

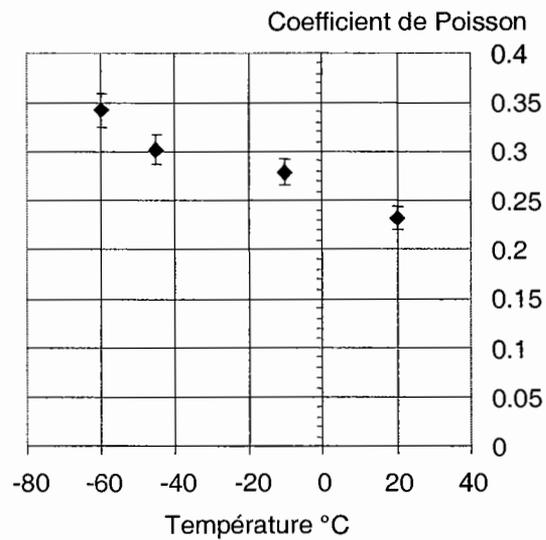


Figure 6. *Evolution du coefficient de Poisson en température*

3.3. Mesure du coefficient de dilatation

Cet essai permet de mesurer le coefficient de dilatation du complexe PET/PA/PET par corrélation d'images.

3.3.1. Procédure d'essai

L'objectif de l'essai est de mesurer la déformation d'une éprouvette soumise à une variation de température. Seule la déformation due à la température doit être prise en compte lors du calcul du coefficient. On effectue donc un essai de fluage à très faible charge (environ 0,5N) sur l'éprouvette à tester. Cette charge entraîne des déformations très faibles (10^{-4} mm/mm) devant celles dues à la dilatation thermique (10^{-3} mm/mm). L'essai est réalisé de la température ambiante à -90°C .

La capture des images se fait tous les 10°C . Le calcul du coefficient de dilatation est obtenu par la moyenne des déformations de 4 points pris au centre de l'éprouvette. Les résultats choisis pour le calcul sont pris lors de la phase de montée en température (entre -90°C et 23°C). Ce choix permet de s'affranchir des phénomènes d'inertie thermique dans l'enceinte.

3.3.2. Résultats

La figure 7 montre la déformation dans le sens de sollicitation de l'éprouvette en fonction de la température lors de la phase de montée en température (entre -90°C et l'ambiante). La courbe obtenue est sensiblement linéaire et sa pente correspond au coefficient de dilatation mesuré à $24 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

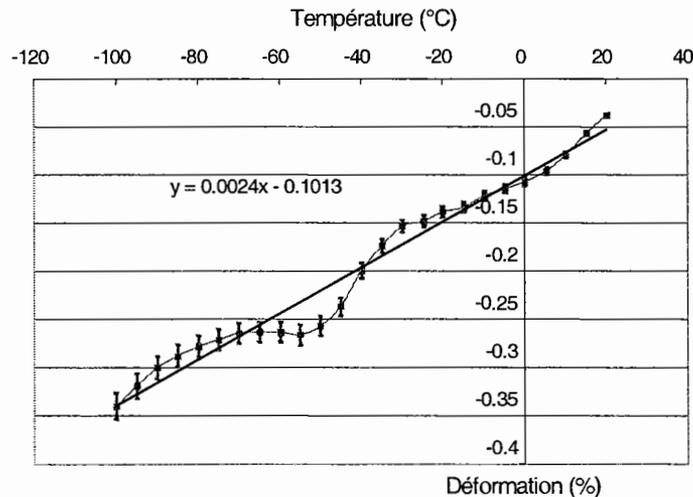


Figure 7. Evolution de la déformation thermique en fonction de la température

4. Essais equi-biaxiaux

Ces essais ont pour but de valider les lois de comportement du PET/PA/PET dans des conditions de température et de contrainte représentatives de phases de vol. Ils sont réalisés dans le dispositif expérimental NIRVANA, développé par le CNES et l'ONERA, permettant d'étudier le comportement mécanique de sous ensembles de ballons.

4.1. Dispositif expérimental NIRVANA

4.1.1. Présentation

Il est constitué d'une enceinte à vide réalisée en deux parties séparables dont la géométrie est schématiquement celle de deux demi-cylindres de même diamètre chacun fermé à son extrémité (figure 8). L'échantillon étudié est positionné entre les deux demi-cylindres et isole les deux parties de la cuve, il est donc possible d'introduire deux atmosphères différentes et d'effectuer un différentiel de pression entre les deux volumes créés (Siguier et al 2003).

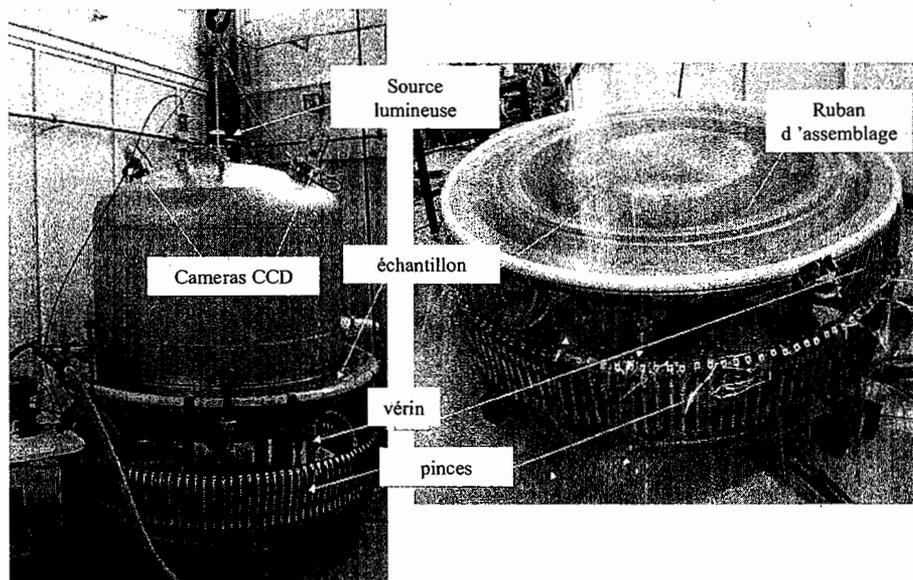


Figure 8. Dispositif expérimental NIRVANA (vue d'ensemble)

Un dispositif constitué de trois vérins pneumatiques asservis et de 150 pinces (figure 9) permet d'accrocher l'échantillon à tester et de lui appliquer une contrainte (cf. 4.1.2).

Une double paroi isolée sous vide et scellée sur la périphérie de l'enceinte garantit une isolation thermique par rapport à l'atmosphère extérieure de l'enceinte. Un dispositif de circulation d'azote froid dans des écrans thermiques régule la température entre +20 et -120°C.

Plusieurs types d'expériences sont réalisables sur le dispositif NIRVANA :

- Etude de la perméabilité à l'hélium de films ou de sous-ensembles de ballons ;
- Test d'éclatométrie et de suivi de la déflexion de l'échantillon en fonction du différentiel de pression ;
- Essais en traction axisymétrique avec ou sans tension initiale ;
- Essais en fluage axisymétrique avec ou sans tension initiale.

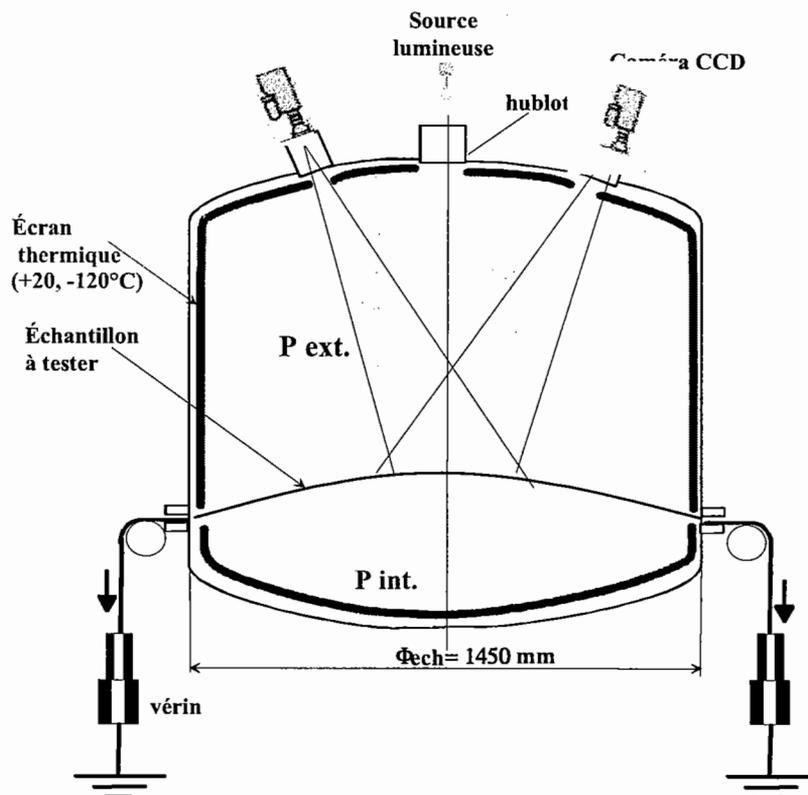


Figure 9. Dispositif expérimental NIRVANA (vue en coupe)

4.1.2. Représentativité d'un ballon

Un des rôles du dispositif est de valider, après fabrication, la tenue mécanique de sous ensembles de ballons dans des conditions proches de la réalité. L'essai effectué doit donc être représentatif d'une phase de vol. Les conditions de température et de pression sont maîtrisées. Le système de pré-tension avec vérins permet d'appliquer au film testé la contrainte présente dans la peau du ballon durant le vol (violettes et al 2004). Cette contrainte appliquée en périphérie de l'échantillon simule la présence du reste du ballon (figure 10).

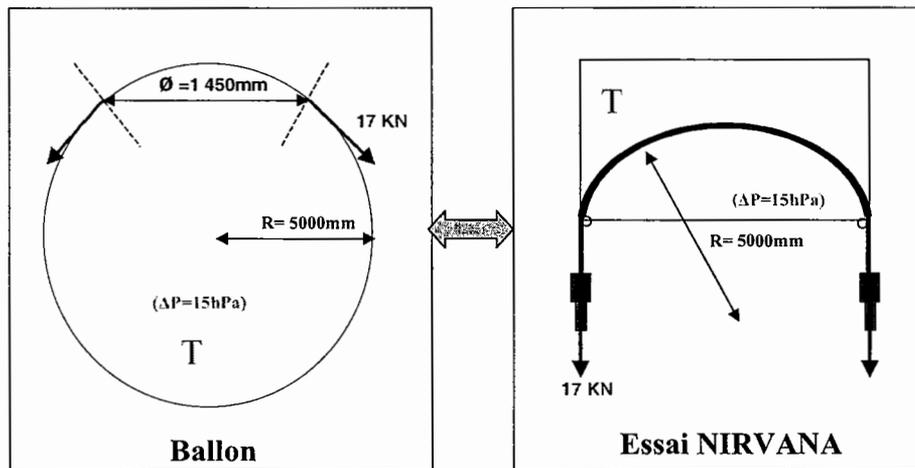


Figure 10. Représentativité d'un ballon dans le dispositif NIRVANA

On simule ainsi une calotte de ballon dont le diamètre est piloté par la précontrainte donnée par les relations :

$$Ch = \sigma \times 2\pi \times 1450 \times e \quad [4]$$

où
$$\sigma = \frac{\Delta P \times R}{2e}$$

avec Ch la précontrainte à appliquer dans le dispositif NIRVANA, ΔP la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du ballon, R Le rayon du ballon, et e l'épaisseur de l'enveloppe (considérée équivalente pour le ballon complet et l'échantillon à mesurer). La valeur de 1450 mm correspond au diamètre de l'échantillon (Figure 10).

4.1.3. Eclairage de l'échantillon

Le problème de l'éclairage vient de la nature réfléchissante spéculaire du PET/PA/PET. Lorsque l'éclairage est dirigé vers l'échantillon, chaque caméra acquiert un reflet spéculaire dans une zone précise.

Ce reflet spéculaire entraîne une surexposition lumineuse dans les zones concernées qui ne permet pas au système de calculer les déplacements et les déformations dans les zones surexposées. La surface totale de l'échantillon mesurée est réduite de près de 40%.

La solution adoptée pour palier ces problèmes de reflet spéculaire consiste à rendre l'échantillon diffusant. Pour cela, on applique une sous-couche de peinture grise de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur sur l'échantillon rendant sa surface opaque et diffusante. La non homogénéité de cette couche permet en outre de créer un premier dégradé de niveaux de gris, reconnu par le logiciel de traitement d'images.

4.2. Mesure par stéréo-corrélation

Les deux caméras CCD permettent d'acquérir des images numériques en niveau de gris 8 bits avec une définition de 1280 par 1024 pixels. En 2D, la résolution du système est de 500 $\mu\text{m/m}$, En 3D, la résolution est de 1000 $\mu\text{m/m}$. La résolution spatiale pour le champ mesuré (\varnothing 600mm) est de 7 mm.

Le logiciel est basé sur le principe de photogrammétrie (Orteu et al 1997) qui consiste à reconstituer une image en trois dimensions à partir de deux images en deux dimensions. On utilise pour cela la méthode d'intersection spatiale (Garcia 2001). Il est possible de déterminer les coordonnées d'un point à partir de l'intersection de deux droites (physiquement ces droites peuvent être vues comme la trajectoire de la lumière du point vers les images sur les capteurs CCD) si l'on connaît la distance entre les deux objectifs des caméras et l'angle entre les deux caméras (Figure 11). De plus, le système est basé sur l'analyse des niveaux de gris pour le calcul des déplacements (cf. 3.1)

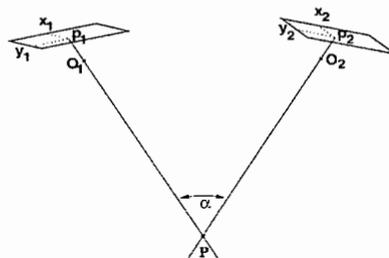


Figure 11. Méthode d'intersection spatiale

Le calibrage est l'étape fondamentale qui précède l'acquisition d'images (Mistou et al 2003). Elle sert à déterminer tous les paramètres géométriques nécessaires au calcul de la transformation colinéaire: la distance et l'angle entre les caméras, la distance foyer/objectif (Sutton 2000). Elle permet de quantifier les aberrations optiques afin qu'elles puissent être prises en compte dans les calculs. On utilise une croix de calibrage de dimensions équivalentes à la surface de mesure, que l'on place à une distance de mesure fixe. Au cours de ce processus, plusieurs images de la croix sont prises dans différentes positions. La croix de calibrage est constellée de marqueurs blancs dont l'éloignement et la dimension sont connus.

Le centre de chaque domaine de corrélation est repéré à partir de la distribution des niveaux de gris des pixels, situés sur deux droites orthogonales passant par le centre du domaine. Quatre centres de domaine de corrélation constituent les sommets d'une maille. L'ensemble de toutes les mailles reconstitue la surface de l'objet. Lorsque le centre des domaines bouge au cours d'une déformation, les mailles se déforment, tournent et se tradent (Figure 12). Les pixels de la maille de l'image de référence sont alors transformés dans l'image de destination. Afin de compenser automatiquement d'éventuelles variations de luminosité au cours des mesures, une transformation linéaire est utilisée simultanément au processus de comparaison des images. La méthode de calcul « Multi Facet » consiste à utiliser neuf jauges (Figure 13) pour calculer une maille. Elle permet d'éliminer les discontinuités qui peuvent apparaître avec la méthode à quatre jauges dite « Single Facet ». Pour comparer deux images, le logiciel Aramis recherche des distributions horizontales et verticales de niveaux de gris qui ont des caractéristiques identiques.

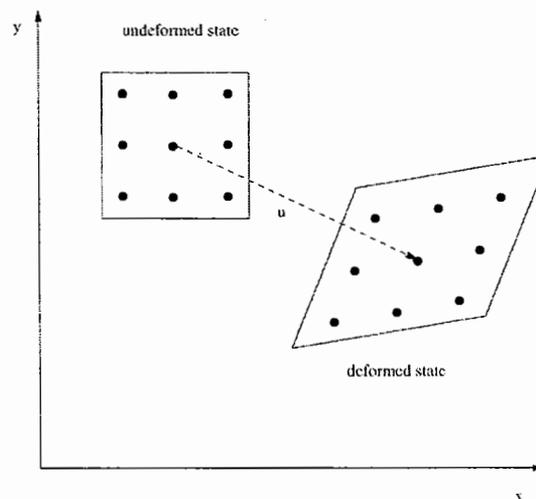


Figure 12. Déformation d'une maille

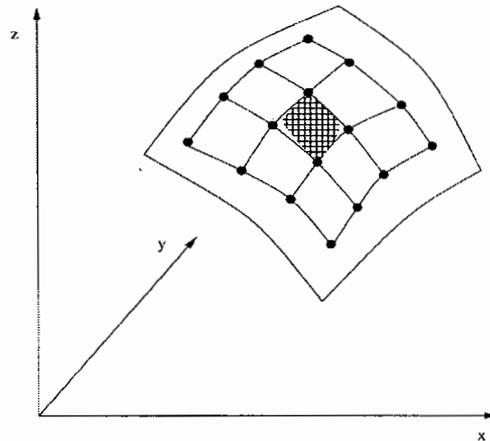


Figure 13. Calcul « multifacet »

Il faut donner un point de départ dans les quatre images que l'on compare (images de référence et images après déformation obtenues par les caméras de gauche et de droite). Ces quatre points sont des points homologues car ils correspondent au même point physique vu par les deux caméras, avant et après déformation.

4.3. Résultats

Il s'agit de mesurer les déplacements et déformations d'un échantillon (assemblage représentatif d'un fuseau) soumis à une mise en pression linéaire de 0 à 50 hPa.

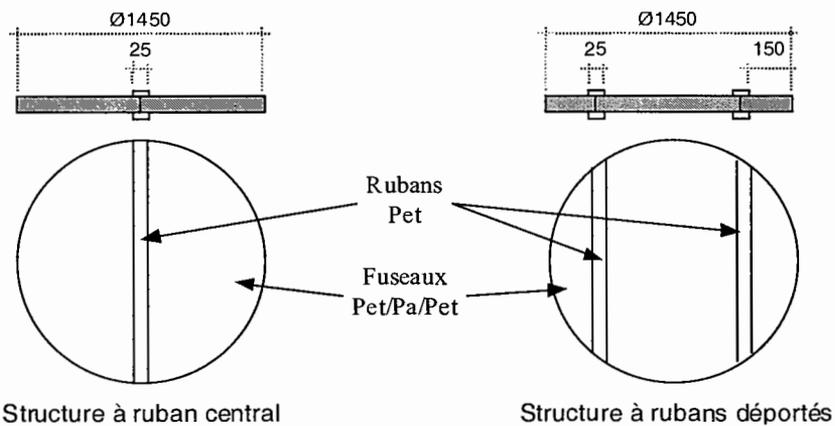


Figure 14. Description des échantillons testés

La Figure 15 montre la flèche au centre de l'échantillon en fonction de la différence de pression pour un échantillon avec assemblage central et pré-tension.

L'expérience consiste maintenant à mesurer l'évolution des déplacements et des déformations d'un échantillon prétendu soumis à une différence de pression constante de 15 mbar pendant un temps donné (dans notre cas, 3 jours). Il ne s'agit pas exactement de fluage (maintient constant de la contrainte). En effet, seule la différence de pression est maintenue, il faudrait donc recalculer la différence de pression en fonction du rayon de courbure de l'échantillon afin d'avoir la contrainte constante. Cependant, cet essai est nécessaire pour la simulation afin de prédire le comportement d'un échantillon sur de longues durées.

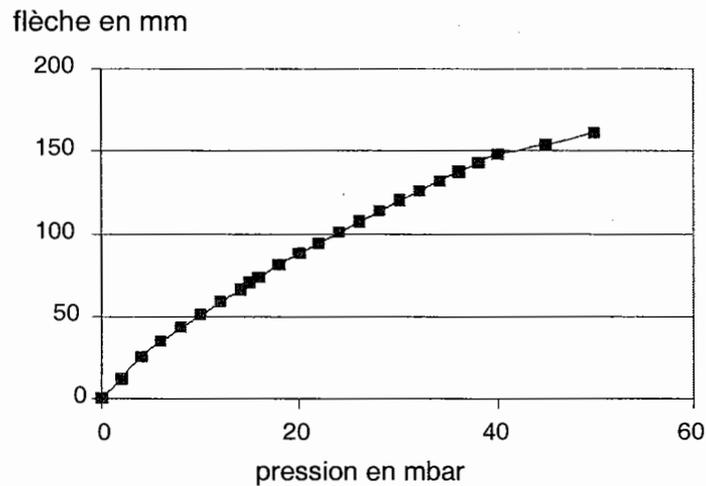


Figure 15. Flèche en fonction de la différence de pression

La figure 16 montre la flèche au centre de l'échantillon en fonction du temps pour un échantillon avec assemblage central et pré-tension. Les figures 17 et 18 donnent le déplacement vertical ainsi que la déformation normale à l'assemblage de l'ensemble de l'échantillon à un temps donné. On observe bien la présence de l'assemblage central, d'épaisseur supérieure qui entraîne donc une déformation moins importante.

On observe aussi l'influence de l'assemblage sur le déplacement vertical. En effet, l'assemblage plus épais a tendance à créer un champ de déplacement ovale (iso-déplacements figure 17) plutôt que circulaire.

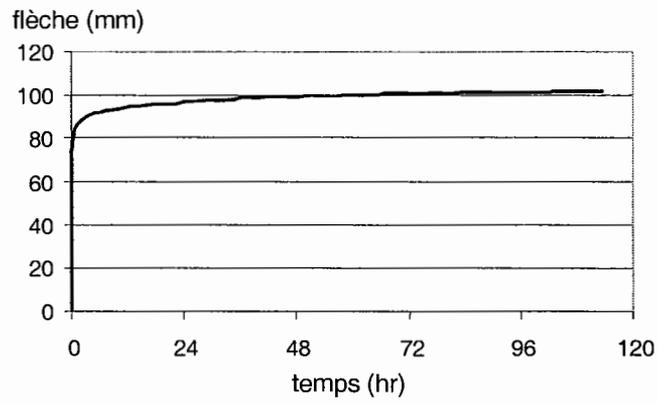


Figure 16. Flèche en fonction du temps

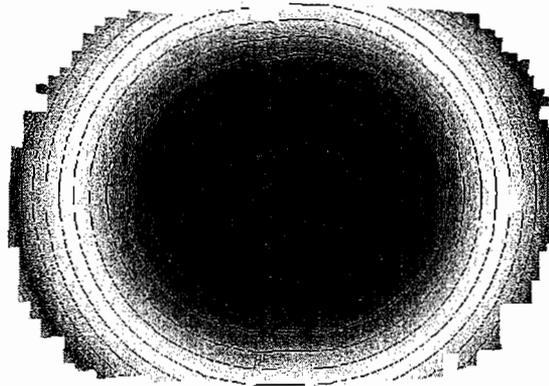


Figure 17. Déplacement vertical de l'échantillon

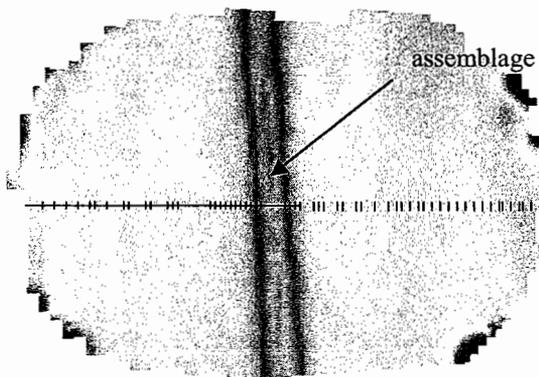


Figure 18. Déformation normale à l'assemblage de l'échantillon

Les figures 19 et 20 présentent le comportement d'une calotte de ballon pressurisé à un niveau de pression donné (15 hPa). La figure 19 montre le déplacement vertical de la calotte soumise à un différentiel de pression. Le trou central correspond à un bouchon en aluminium de quelques centimètres d'épaisseur monté sur la calotte. L'épaisseur du bouchon étant importante, le système de mesure n'est pas capable de mesurer les déplacements en présence de fortes discontinuités. La figure 20 montre les déformations dans le plan de l'échantillon. On observe différentes zones présentant différentes déformations. Les zones en bleu correspondent à de faibles déformations. Ce sont les zones de fortes épaisseurs. On remarque sur la périphérie de la zone mesurée le départ des rubans d'assemblage, plus épais que les fuseaux.

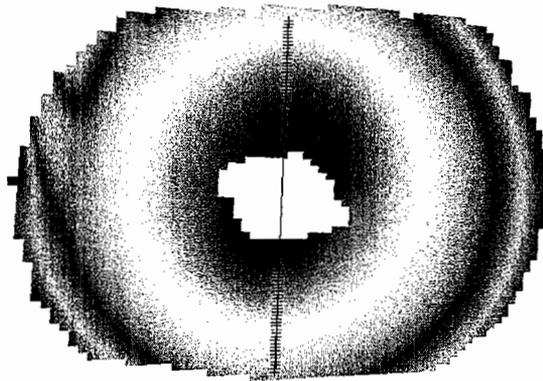


Figure 19. *Déplacement vertical de l'échantillon*

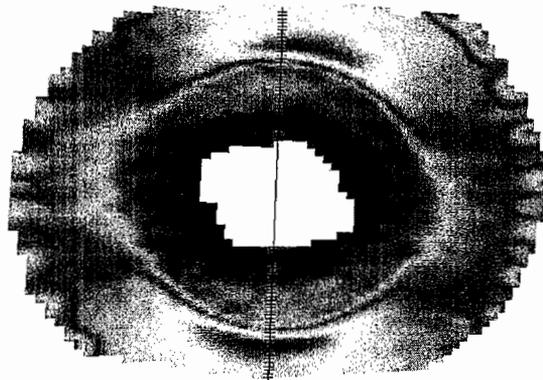


Figure 20. *Déformation dans le plan de l'échantillon*

L'ensemble de ces mesures nous a, en outre, permis d'enrichir la base de données expérimentales nous permettant de valider les lois de comportement. Les critères de comparaison validant étant, en premier lieu les déplacements mesurés.

Une autre application de ces mesures est l'implémentation des déplacements 3D en périphérie de l'échantillon comme conditions aux limites du calcul. Cette procédure permet de s'affranchir des problèmes de modélisation complexe des conditions aux limites expérimentales représentatives de Nirvana.

5. Conclusion, perspectives

Cette étude traite de la modélisation du comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques validée par la corrélation entre simulations numériques et mesures expérimentales. Seule la partie expérimentale a été présentée.

L'identification des lois de comportement se fait à partir d'essais uniaxiaux en traction monotone, traction de fluage et de relaxation. Ces essais sont réalisés sur une machine de traction équipée d'une caméra CCD. Ce dispositif permet de mesurer les déplacements et d'obtenir les déformations dans le plan de sollicitation de l'éprouvette. On a ainsi accès au module d'Young, au coefficient de Poisson à température ambiante et jusqu'à -60°C , ainsi qu'au coefficient de dilatation du film complexe de PET/PA/PET. Des procédures d'essais adaptées à l'identification de matériaux souples et transparents ont été ainsi mises en place.

La partie expérimentale destinée à valider les lois de comportement est réalisée avec le dispositif expérimental 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 permettent de constituer une base de données expérimentale utilisée pour la connaissance du comportement des ballons ainsi que pour la validation des lois de comportement.

6. Bibliographie

- Aklonis J.J., Introduction to Polymer Viscoelasticity, Wiley, 1995
- Cocquerez, P. et al, Test flight of CNES stratospheric super-pressure balloons in experimental arctic campaigns 2000-2001. Objectives and results, *Proceedings of 15th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Prog.*, pp. 597-601, Biarritz France, may 2001.
- Garcia D., « Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images », Thèse de l'Ecole des Mines d'Albi, 2001
- Grédiac M., « The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations » *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 35, Issues 7-8, July 2004, Pages 751-761

- 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.
- Lemaitre, J., and Chaboche J-L, *Mécanique des matériaux solides*, Dunod, F, 2001 (In French)
- Mistou et al. « Mesure 3D sans contact des déplacements et déformations sur des films plastiques transparents par stéréo-corrélation », *Mécanique et Industrie 4(6)*, pp. 637-643 , 2003
- Nowick A.S. and Berry B.S., *Anelastic relaxation in crystalline solids*, Academic Press, 1972
- 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)
- Orteu J-J., « Mesure 3D de formes et de déformations par stéréovision », *Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique - Travail des matériaux*, N°BM 7015, Avril 2002
- Siguier J.M. et al « The use of Nirvana facility for balloon characterization : Strain and tightness measurements of zero pressure and super-pressure balloon subsystems », *Proceedings of 16th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Prog.*, pp. 207-213, Sankt Gallen, Switzerland, june 2003.
- 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.
- Sutton M. A., McNeill S. R., Helm J. D., Chao Y. J., « Advances in tow-dimensional and three-dimensional computer vision ». *Photomechanics, topics applied physics*, 77 :323-372, 2000
- Vialettes P., Siguier J. M., Guigue P., Mistou S., Dalverny O., Karama M., Petitjean F., « Identification du comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques », *Revue des composites et matériaux avancés*, to in press September 2004



Experimental and numerical simulation of super-pressure balloon apex section: Mechanical behavior in realistic flight conditions

P. Vialettes^{a,b,*}, J.-M. Siguier^a, P. Guigue^b, M. Karama^c, S. Mistou^c, O. Dalverny^c,
S. Granier^a, F. Petitjean^d

^a Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques, BP4025, 2 Av Edouard Belin, 31055 Toulouse, France

^b Centre National d'Etudes Spatiales, 31401 Toulouse, Cedex 9, France

^c Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes-BP1629–65016 Tarbes, Cedex, France

^d Institut Catholique des Arts et Métiers–75 Av de G.B.–31000 Toulouse, France

Received 30 September 2004; received in revised form 6 April 2005; accepted 24 April 2005

Abstract

In order to predict the flight parameters and to improve the life time of long duration super-pressure balloon, a research program on modelization and experimental simulation of the balloon envelope mechanical behavior is carried out.

The balloon is a 10 m diameter type made with multilayer polymeric films and tapes. A facility was developed to measure, via a stereo-correlation system, the 3D displacement and the in plane solicitation strain of a 1.5 m diameter balloon envelope part in realistic flight conditions, i.e. pressure, temperature and loading at the sample boundaries. A time dependant non-linear Maxwell model of the polymeric material behavior was identified from uniaxial creep and relaxation tests and implemented in a Finite Elements code, simulating the sample tested in the facility. The Poisson ratio of the transparent and supple balloon film has been measured with an image correlation system.

Experimental results are obtained both at room and in cold conditions (−60 °C) for various values of differential pressure.

Vertical displacement and in plane 2D strain of apex part deduced from the numerical modeling are compared to experimental results.

© 2005 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Super-pressure balloon; Modelization; Viscoelasticity; Stereo-correlation; Polymer; Mechanical behavior; Ultra-long duration balloon; Uldb

1. Introduction

The mechanical behavior knowledge of the balloon envelope is essential regarding the level and the lifetime of the flight (Cocquerez et al., 2001). The spherical super-pressure balloons have been designed from basic

mechanical properties of its various components at relevant temperatures, assuming that materials have a linear behavior up to a specific offset yield point.

To improve super-pressure balloon performances, we started a mechanical study of materials and balloon subsystems dealing with two parallel works: modeling and experimental simulations with a correlation between both results in order to validate our models and to follow up in complexity. This paper mainly presents the evolution of laws studies and its application to apex section.

* Corresponding author. Tel.: +33 562 252 748; fax: +33 562 252 569.

E-mail addresses: pierre.vialettes@onera.fr (P. Vialettes), jean-michel.siguier@oncert.fr (J.-M. Siguier).

The approach is to determine the strain and stress status of a complete super-pressure balloon, whatever its shape and taking into account the flight duration and the environment parameters as pressure and temperature (Fig. 1).

Several steps are necessary. We have begun with elementary structures and move forward in the geometrical complexity. We also begin with basic mechanical behavior laws (Siguier et al., 2004), experimental or analytic, then take into account the time and temperature dependence. For every step, numerical simulations are checked with experimental tests.

We have started from unidirectional mechanical properties coming from tensile machine measurements. Experimental data are injected in the finite element code with the appropriate meshing. The first step (Siguier et al., 2004) corresponded to a part of the balloon envelope (gore + bonding tape), the second (this work) is with an apex section. Both of these models are compared to experimental ones. If the correlation between the model and the experimental results meet the requirements, we are able to simulate a whole balloon.

2. Experimental device

The NIRVANA facility was built for tightness and bursting characterization of rather large balloon subsystems and adapted to the study of accurate mechanical strain in stratospheric conditions (pressure and temperature) (Fig. 2).

It is a 1 m^3 vacuum chamber made in two cylindrical parts where the sample under test is positioned by two opposite elastomeric seal rings between the upper and the lower part (Guigue and Siguier, 2001).

In this way, we can regulate a differential pressure between the two sides of the sample. Cooled screens surrounding the internal volume of the chamber allow temperature tests down to $-120 \text{ }^\circ\text{C}$. The vacuum insulation double skin structure of the chamber allows conditions of low temperatures and high absolute pressure in the chamber without condensation and ice.

The operational diameter of the sample is 1.45 m.

An external pre-loading device consisting of 3 jacks and 150 lock-grip pliers can simulate either the payload of an open zero pressure balloon or the skin stress of a super-pressure balloon. The maximum loading available is 6 tons distributed in the pliers.

A pre-loading is applied to the sample to simulate the boundary stress in an pressurized balloon. The pre-loading is adapted to temperature and overpressure conditions in order to be representative of a in-flight balloon (Fig. 3).

At the top of the upper part we set a 3D optical system with two ccd cameras acquiring digital images with a 1280 by 1024 pixel definition. These images are then computed by a software to measure displacement and strain of the surface sample with a resolution of 1000–2000 $\mu\text{m/m}$ in strain. This device is therefore adapted to high strain behavior.

This software is based on the principle of photogrammetry which reconstitutes a 3D image from two 2D images. With the spatial intersection method, it is possible to determine the coordinates of one point from the intersection of two lines if the distance between the two camera objectives and the angle between the two cameras is known (Orteu et al., 1997). The software analyses the grey levels to calculate displacements.

Calibration is the fundamental step which precedes frame grabbing. It is used to determine all the geometric parameters necessary for the calculation of the co-linear

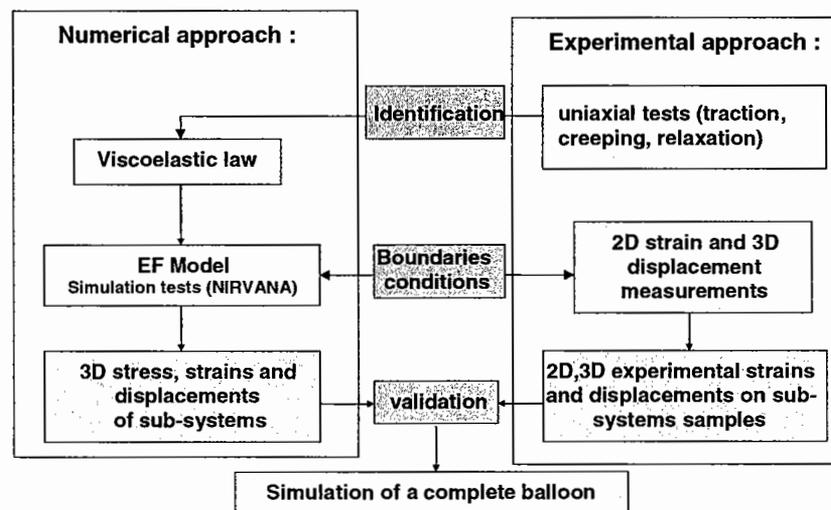


Fig. 1. Global approach of the study.

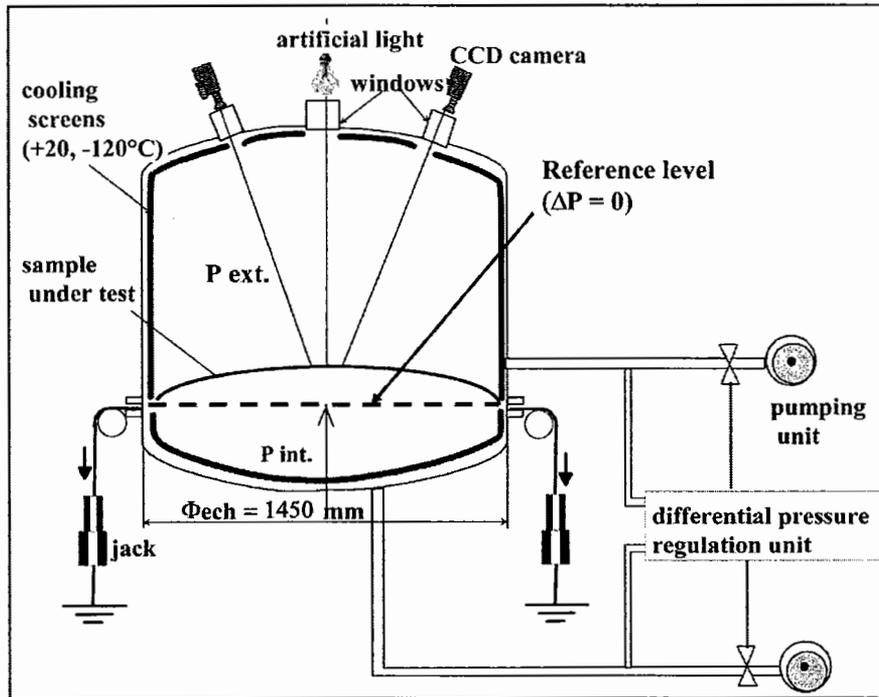


Fig. 2. The NIRVANA facility.

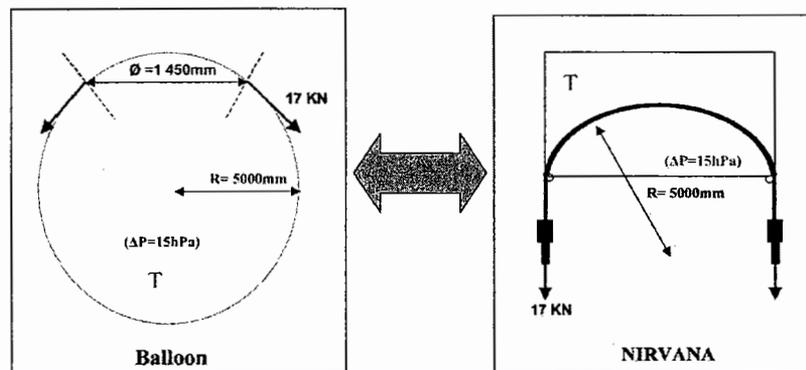


Fig. 3. NIRVANA: representativity of an pressurized balloon.

transformation, i.e. the distance and the angle between the cameras. It enables the optical aberrations to be calculated so that they can be taken into account in computation. The accuracy obtained after the calibration process is better than a pixel, corresponding to a displacement error of some micrometers.

The general experimental procedure is as follows:

- setting the sample on the lower part of the chamber,
- applying a pre-loading,
- setting all the chamber under vacuum,
- setting the required temperature,
- applying steps of differential pressure with measurements at each step.

3. Non-linear (stress and time) Maxwell law

This section shows the viscoelastic behavior simulation of considered polymer (Aklonis, 1995). The model to be discussed is the Maxwell model (Lemaitre and Chaboche, 2001), which consists of a spring and dashpot in series as shown here (Fig. 2).

Usually, the model is written as Eq. (1):

$$\dot{\epsilon} = A \bar{\sigma}^m (\bar{\epsilon}^c)^n T^p (qt^{q-1}). \quad (1)$$

In constant temperature case, the behavior law is written as Eq. (2):

$$\dot{\epsilon} = A \bar{\sigma}^m (qt^{q-1}). \quad (2)$$

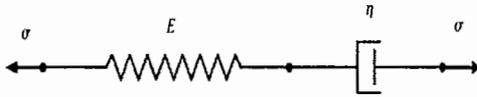


Fig. 4. Maxwell model.

The use of the Maxwell non-linear behavior law enables a better representation of creep and relaxation at different solicitation level (Nowick and Berry, 1972). The procedure for law parameter identification is carried out from uniaxial tensile tests. An inverse method is used comparing creep and relaxation tests with the same test simulations. A Levenberg Marquardt optimiser is used to calculate parameters to fit experimental experimental and numerical curves. The parameters are then implemented in FE code to simulate NIRVANA tests. The aim of this simulation is to validate the law in more complex solicitations. The comparison of the numerical and experimental results shows agreement over short time spans.

The interest of this model is that it enables easy implementation in F.E. codes and considers stress and time non-linearity.

The disadvantages lies in the fact that it does not consider unloading (creep recovery) (see Fig. 4).

4. Sample studied

This study is focused on the mechanical behavior of an apex section consisting of multilayer toroid polyester film with differential radial thickness representative of a CNES super-pressure balloon (Fig. 5). The sample includes a gore element assembled by a tape.

5. Results

5.1. Experimental results

The experimental results concern the apex part of a 10 m diameter balloon at room temperature with pre-loading and a 15 hPa differential pressure:

The vertical displacement of the sample (Fig. 6) shows the spherical behavior of the apex due to its axial symmetry. The “hole” in the centre corresponds to an

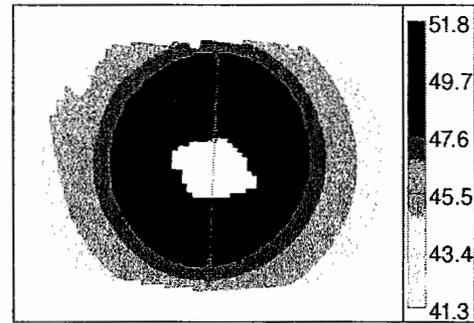


Fig. 6. Vertical displacement (mm).

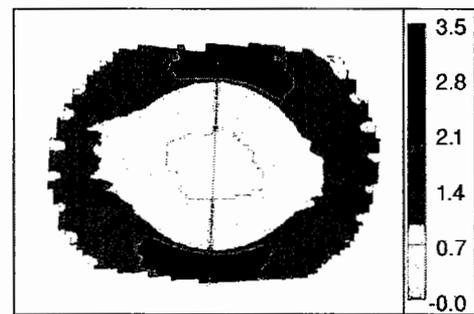


Fig. 7. In plane strain (%).

aluminium cap introducing a discontinuity not solved by the stereo-correlation system. The “in plane strain” (Fig. 7) shows different areas with different thickness corresponding to different deformations. On the circumference of the analysed zone, we can see small deformations corresponding to the starting point of the tape which has a greater thickness than the apex section.

5.2. Numerical results

Fig. 8 shows the displacement of the centre of the sample submitted to a constant pressure of 15 hPa during 5 days at room temperature (comparable to a creep test) (Vialettes et al., 2004).

The experiment and the simulation with the Maxwell model are in good agreement. The comparison between Maxwell and elastic models shows well the influence of time effects, as creep, on material. In cold conditions, this difference is not so perceptible.

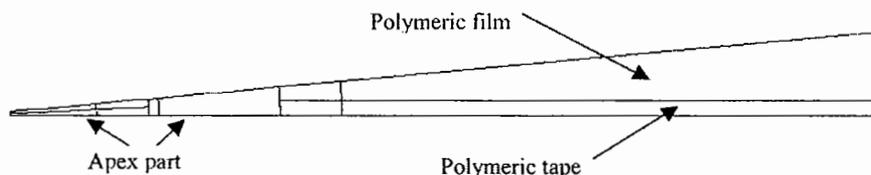


Fig. 5. Sample description.

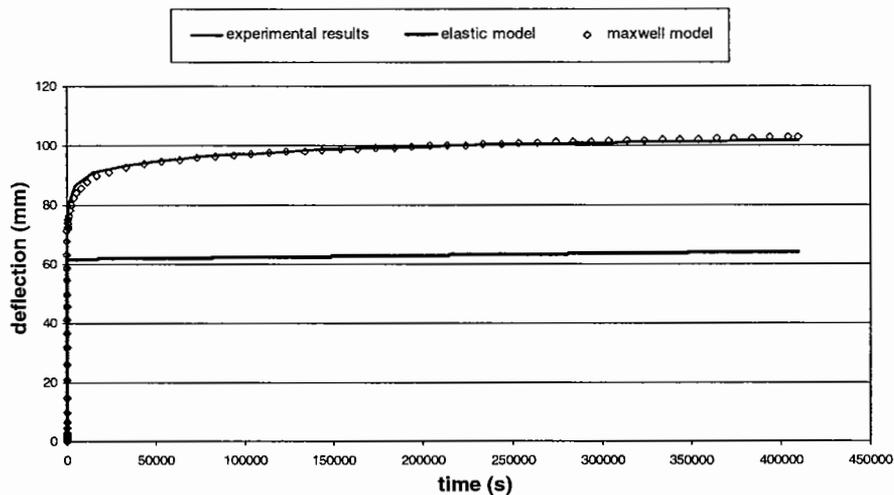


Fig. 8. Numerical and experimental deflection comparison.

6. Conclusions

This study concerned coupled experimental/numerical mechanical work on superpressure balloon apex section.

The experimental work is achieved by the NIR-VANA facility implemented with a stereo-correlation measuring device.

Numerical work is carried out with a finite element code taking into account the non-linear aspect of the materials.

The modelization gives results in good accordance with the experiments and will enable us to follow this work with cold conditions, and flight simulation of a complete balloon, especially the day night transition behavior.

References

- Aklonis, J.J. *Introduction to Polymer Viscoelasticity*. Wiley, New York, 1995.
- Cocquerez, P. et al. Test flight of CNES stratospheric super-pressure balloons in experimental arctic campaigns 2000–2001. Objectives and results, in: *Proceedings of the 15th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Prog.*, Biarritz France, May, pp. 597–601, 2001.
- Guigue, P., Siguier, J.-M. Engineering of stratospheric balloon materials: selection procedure, experimental characterization and aging techniques, in: *Proceedings of the 15th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Prog.*, Biarritz France, May, pp. 547–552, 2001.
- Lemaitre, J., Chaboche, J.-L. *Mécanique des matériaux solides*. Dunod, F, 2001 (in French).
- Nowick, A.S., Berry, B.S. *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*. Academic Press, New York, 1972.
- Orteu, J.-J., Garric, V., Devy, M. Camera calibration for 3D reconstruction: application to the measure of 3D deformations on sheet metal parts, in: *European Symposium on Lasers, Optics and vision in manufacturing*, Juin, Munich (Allemagne), 1997.
- Siguier, J.-M. et al. Numerical and experimental simulation of the mechanical behaviour of super-pressure balloon subsystems. *Advances in Space Research* 33, 1711–1716, 2004.
- Vialettes, P., Siguier, J.M., Guigue, P., Mistou, S., Dalverny, O., Karama, M., Petitjean, F. Identification du comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques, *Revue des composites et matériaux avancés*, September, 2004, in press.

RESUME :

La modélisation et la fabrication des ballons pressurisés stratosphériques longue durée à usage scientifique sont 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 μ m, PA 20 μ m, PET 15 μ m. Une campagne d'essais uniaxiaux nous permet d'identifier les paramètres des modèles de comportement 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 stéréocorrélation, 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.

MOTS-CLÉS : viscoélasticité, viscoplasticité, polymères, corrélation d'images numériques, ballons stratosphériques.

ABSTRACT :

Long duration super-pressure balloons design and manufacturing is a great challenge for CNES in scientific ballooning. The good knowledge of the mechanical behavior of envelopes is necessary for this design. The study deals with polymer of 50 μ m thickness made of 3 complexed films: PET 15 μ m, PA 20 μ m, PET 15 μ m. A test campaign allows to identify behavior law parameters. Substructure balloons are tested to measure, via a stereocorrelation system, displacement and strain of the structure in complex solicitation. A simulation campaign of these tests on a finite element software permits to correlate these results and to validate the behaviour laws implemented in the software.

KEYWORDS: viscoelasticity, viscoplasticity, polymers, numerical image correlation, stratospheric balloons.

