HAL
open science

Modélisation des assemblages de ballons pressurisés stratosphériques

Pierre Selva, Olivier Dalverny, Sebastien Mistou, Moussa Karama, Joël Alexis, Arnaud Deramecourt

To cite this version:

Pierre Selva, Olivier Dalverny, Sebastien Mistou, Moussa Karama, Joël Alexis, et al.. Modélisation des assemblages de ballons pressurisés stratosphériques. Mechanics & Industry, 2008, vol. 9, pp. 159-165. 10.1051/meca:2008021 . hal-00796649

HAL Id: hal-00796649

https://hal.science/hal-00796649

Submitted on 4 Mar 2013

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

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

Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)
OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: http://oatao.univ-toulouse.fr/
Eprints ID: 6488

To link to this article: DOI:10.1051/meca:2008021
URL : http://dx.doi.org/10.1051/meca:2008021

To cite this version:
Selva, Pierre and Dalverny, Olivier and Mistou, Sebastien and Karama, Moussa and Alexis, Joël and Deramecourt, Arnaud *Modélisation des assemblages de ballons pressurisés stratosphériques.* (2008) Mécanique & Industries, vol. 9 (n° 2). pp. 159-165. ISSN 1296-2139

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes.diff.inp-toulouse.fr

DOI: 10.1051/meca:2008021

Modélisation des assemblages de ballons pressurisés stratosphériques

Pierre Selva[1], Olivier Dalverny[1,a], Sébastien Mistou[1], Moussa Karama[1], Joël Alexis[1] et Arnaud Deramecourt[2]

[1] Laboratoire Génie de Production, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 47 avenue d'Azereix, BP 1629, 65016 Tarbes Cedex, France
[2] CNES Centre de Toulouse, 23 avenue Édouard Belin, 31055 Toulouse Cedex, France

Résumé – La modélisation et la fabrication des ballons pressurisés stratosphériques longue durée à usage scientifique sont un défi pour le CNES. Ils sont constitués de plusieurs fuseaux en tri-couches PET/PA/PET d'épaisseur 50 μm, assemblés entre eux par des rubans adhésifs en PET de 23 μm d'épaisseur. À ce jour, un problème majeur apparaît lors des missions de vol, se traduisant pour certains ballons par une destruction prématurée. Ce travail porte sur l'étude du comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques et plus particulièrement sur les assemblages des films polymères constituant le ballon. Dans un premier temps, une campagne d'essais de nanoindentation nous permet d'identifier les propriétés élastiques des matériaux après assemblage, et ce pour deux températures de vol du ballon. Dans un second temps, nous modélisons un assemblage nominal en approche 2D puis 3D. Plus particulièrement, un exemple d'application de la technique de submodeling est présenté à partir de la modélisation d'un défaut de la jonction. Enfin, à l'aide de la méthode des plans d'expériences et de simulations éléments-finis, nous étudions l'influence des paramètres de conception sur la tenue mécanique d'un assemblage type.

Mots clés : Films polymères / structures minces / nanoindentation / modélisation / éléments-finis / plans d'expériences / ballons stratosphériques

Abstract – Modelling of super-pressure balloon junction. Long duration super-pressure balloon design and manufacturing is a great challenge for the CNES in scientific ballooning. They are made of 50 μm thick polymer films (PET/PA/PET) which are joined with 23 μm thick adhesive PET bands. To date, during flight missions, a real problem appears: some balloons explode prematurely. This is why this study deals with the mechanical behaviour of the stratospheric pressurized balloons and particularly with the assembly of the constitutive materials. Firstly, a nanoindentation test campaign makes it possible to identify the elastic properties of the materials directly in the assembly at two different temperatures. Then, we simulate a nominal assembly in two approaches: 2D and 3D. More particularly, we present an example concerning a defect of the junction in 3D approach using the submodeling technique. Finally, we use the factorial design method at two levels and finite-element models to study the influence of the various conception parameters on the mechanical behaviour of the assembly.

Key words: Polymers films / thin structures / nanoindentation test / finite-elements / simulations / factorial design / stratospheric balloons

1 Introduction

Le CNES conçoit et développe des ballons pressurisés stratosphériques destinés à des expériences scientifiques (Fig. 1a). Ces derniers sont constitués de plusieurs fuseaux en films polymères assemblés entre eux par des rubans adhésifs en PET de 23 μm d'épaisseur et 25 mm de large qui sont thermocollés (Fig. 1b). Le matériau constitutif des fuseaux est un film complexe tri-couches composé de polyester 15 μm, de polyamide 20 μm et de

[a] Auteur pour correspondance : olivier.dalverny@enit.fr

Nomenclanue

m, B	constantes
β	constante (1,034 pour une pointe Berkovich)
h	profondeur d'indentation (nm)
h_{f}	profondeur finale (nm)
P	charge appliquée lors de l'essai d'indentation (mN)
S	rigidité de contact
A	aire de contact de l'indenteur projeté à la surface de l'échantillon
E_{i}	module d'Young de l'indenteur (1141 GPa)
ν_{i}	coefficient de Poisson de l'indenteur (0,07)
E	module d'Young de l'échantillon (GPa)
ν	coefficient de Poisson de l'échantillon

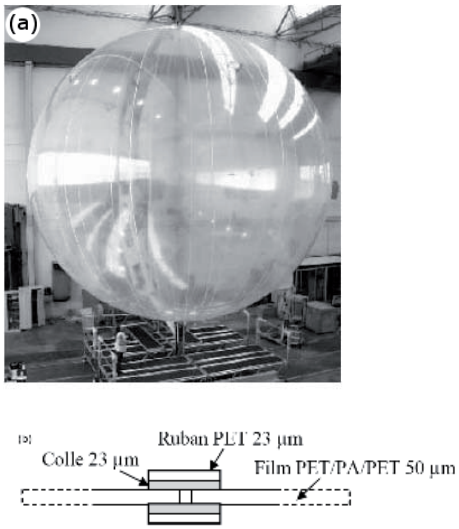

Fig. 1. Vue d'ensemble, (a) ballon pressurisé, (b) assemblage de fuseaux.

polyester 15 μm (PET/PA/PET), pour une épaisseur totale de 50 μm.

L'objectif de ce travail est de modéliser le comportement mécanique d'un assemblage de 2 fuseaux dans les conditions réelles de vol et d'étudier l'influence des paramètres de conception sur la tenue mécanique de la jonction. Il est ici important de préciser que les simulations ne sont pas effectuées sur un ballon complet. En effet, compte tenu des différents détails à prendre en compte et des différentes échelles mises en jeu, le modèle numérique 3D solide serait trop lourd. Il existe un montage expérimental « NIRVANA » qui permet de solliciter une jonction entre 2 fuseaux de la même façon que pour le ballon complet [1]. Les conditions environnementales et les chargements sont ainsi fidèlement retranscrits. Par conséquent, les différentes simulations s'appuieront sur la configuration de cet essai expérimental.

L'étude présentée se décompose en différents points. Dans un premier temps, une campagne d'essais de nanoindentation nous permet d'identifier les propriétés élastiques des différents composants sur les assemblages réalisés, à température ambiante ainsi qu'à basse température. Dans un second temps, nous modélisons en approche 2D puis 3D une configuration nominale d'assemblage. Enfin, à l'aide de la méthode des plans d'expériences et de simulations éléments-finis, nous étudions l'influence des paramètres de conception sur la tenue mécanique de la jonction.

2 Modélisation

2.1 Caractérisation des matériaux

Dans le but de disposer des propriétés élastiques de chaque couche de l'assemblage (PET, PA, colle), deux campagnes d'essais de nanoindentation à 20 °C et –40 °C sont effectuées. La nanoindentation est une technique permettant l'évaluation de la dureté et du module d'élasticité d'un matériau par l'enfoncement d'une pointe de la taille du nanomètre, selon un cycle chargement/déchargement. Nous utilisons cette technique, car elle nous permet de déterminer les propriétés mécaniques des matériaux directement au sein de l'assemblage. Ceci nous permet donc de nous affranchir d'éventuelles évolutions entre les propriétés des matériaux non assemblés puis assemblés, consécutives au processus de fabrication.

La méthode utilisée pour déduire la valeur du module d'Young est celle de Oliver et Pharr qui tient compte du retour élastique lors de la phase de déchargement [2]. Notons que pour des polymères, la vitesse de déchargement doit être rapide de manière à pouvoir négliger les phénomènes visqueux. Oliver et Pharr modélisent la partie décharge de l'essai par l'équation suivante :

$$P = B(h - h_{\mathrm{f}})^m \tag{1}$$

Une fois les 2 constantes identifiées, la rigidité de contact est calculée à partir de la relation (2) :

$$S = \left(\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}h}\right)_{h_{\max}} = mB(h_{\max} - h_{\mathrm{f}})^{m-1} \tag{2}$$

Le module d'Young E est calculé à partir d'un module réduit E_r qui tient compte de l'élasticité de l'échantillon et de l'indenteur. E_r est déduit de l'équation (3) :

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}S}{2\beta\sqrt{A}} \tag{3}$$

Enfin, le module d'élasticité du matériau testé est déterminé par l'équation (4) :

$$\frac{1}{E_{\mathrm{r}}} = \frac{\left(1-\nu^2\right)}{E} + \frac{\left(1-\nu_{\mathrm{i}}^2\right)}{E_{\mathrm{i}}} \tag{4}$$

Les coefficients de Poisson des matériaux ont été pris à 0,23 pour le PET et le PA et 0,35 pour la colle [3].

Les essais sont effectués au moyen d'un nanoindenteur MTS NanoXP à partir de mesures dynamiques de la raideur de contact (Continuous Stiffness Measurement). Les

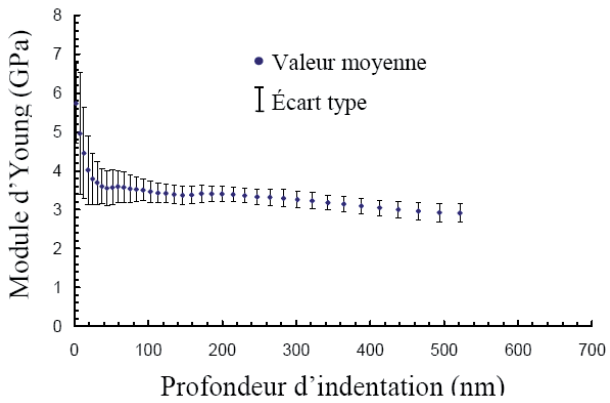

Fig. 2. Évolution du module d'Young du PA en fonction de la profondeur indentée.

Tableau 1. Récapitulatif des valeurs des modules d'élasticité.

Matériaux	Module d'Young (MPa)	
	20 °C	–40 °C
PET	4523 ± 195	5320 ± 202
PA	3409 ± 218	9828 ± 250
Colle	135 ± 26	4300 ± 408

résultats sont calculés à partir des différentes indentations jusqu'à une profondeur de 300 nm (Fig. 2). La pointe utilisée est de type Berkovich (pyramidale). Les valeurs des modules d'élasticité obtenues sont répertoriées dans le tableau 1. Les valeurs des modules du PA et du PET à –40 °C sont issues d'essais conventionnels effectués sur des bandes de PET et PA.

2.2 Modélisation 2D/3D

Toutes les simulations sont effectuées pour un comportement élastique des matériaux. En effet, on néglige le caractère visqueux des matériaux mis en jeu, car la rupture du ballon a lieu dès qu'il atteint son altitude de vol, c'est-à-dire au bout d'une heure environ. Cette hypothèse est d'autant plus vraie à –40 °C, puisque les matériaux se rapprochent d'un comportement fragile. À ce stade, 2 types d'analyse peuvent être effectuées : l'une 2D, l'autre 3D (Figs. 3a et b). Cependant, elles nécessitent l'utilisation de 2 modèles distincts : un modèle global qui est un quart de structure maillé en éléments 3D coques représentant l'échantillon testé sur NIRVANA et un modèle local 2D déformations planes ou 3D solide de la jonction.

Les modélisations font appel à plusieurs hypothèses : homogénéisation du tri-couches PET/PA/PET, isotropie des couches, bandes de PET parfaitement centrées entre les fuseaux, colle présente sur toute la largeur du PET, symétrie de la structure, du chargement et des matériaux.

Pour le calcul du modèle global, nous faisons l'hypothèse de considérer le fuseau comme continu, ceci afin de simplifier le modèle. On sait que cette hypothèse engendre une erreur sur le champ des déplacements de

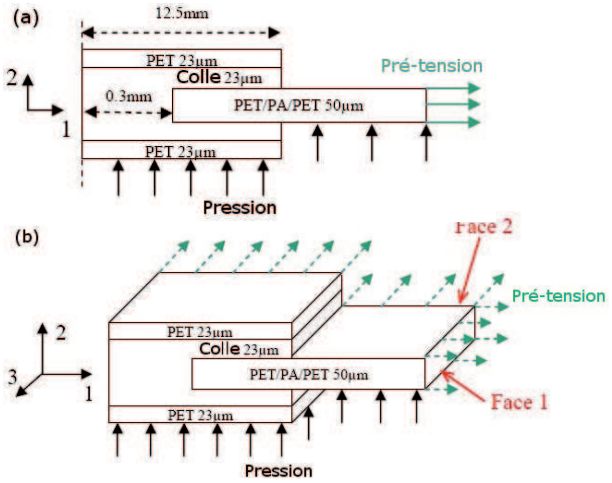

Fig. 3. Modèle local de l'assemblage, (a) 2D, (b) 3D.

l'ordre du pour cent. Les conditions aux limites sont de types tension sur la périphérie de l'assemblage, ce qui permet d'appliquer la contrainte présente dans la peau du ballon durant le vol et donc de simuler la présence du reste du ballon, et pression pris à 15 mbar. La validation de ce modèle numérique en comparaison avec les champs de déplacement relevés sur le dispositif expérimental NIRVANA par stéréocorrélation est réalisée dans les travaux de Vialettes [3].

La simulation du modèle global nous permet de déterminer les conditions aux limites du modèle local. Dans le cas d'un modèle local 2D déformations planes, ces conditions se résument aux valeurs du champ de déplacement relevées sur le modèle coque ainsi qu'à l'application de la pression. Quant au modèle local 3D solide, nous utilisons la technique de submodeling, c'est-à-dire que les 2 modèles global et local sont directement reliés par le biais de conditions aux limites de type déplacement (faces 1 et 2, Fig. 3b). Il est également nécessaire d'appliquer le chargement local de type pression.

En terme de résultats à 20 °C, la contrainte normale σ_{11} est supportée par les couches les plus rigides (PET, PET/PA/PET). On a donc un transfert progressif de la charge du PET/PA/PET vers les bandes de PET (Fig. 4). Dans le cas du modèle 2D, la contrainte σ_{11} atteint une valeur maximale proche de 84 MPa, tandis que le modèle 3D nous donne une valeur proche de 106 MPa. Cette augmentation de l'ordre de 20 % est due au fait que le modèle 3D est soumis à un état de traction quasi biaxial contrairement au modèle 2D. Si l'on s'intéresse à la contrainte σ_{33}, il est évident que sa valeur est nettement inférieure dans le cas 2D déformations planes et n'est pas réaliste puisqu'on suppose ε_{33} nulle. En effet, sa valeur est 6 fois plus importante dans le cas 3D et s'élève à environ 110 MPa. En ce qui concerne le cisaillement dans un plan perpendiculaire au plan du joint σ_{12}, on retrouve des valeurs quasi identiques quel que soit le modèle. Si l'on regarde l'évolution du cisaillement au niveau des interfaces de la colle, on s'aperçoit qu'il atteint une valeur maximale

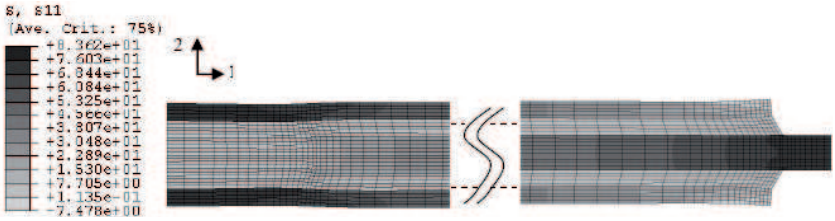

Fig. 4. Visualisation du champ des contraintes σ_{11}.

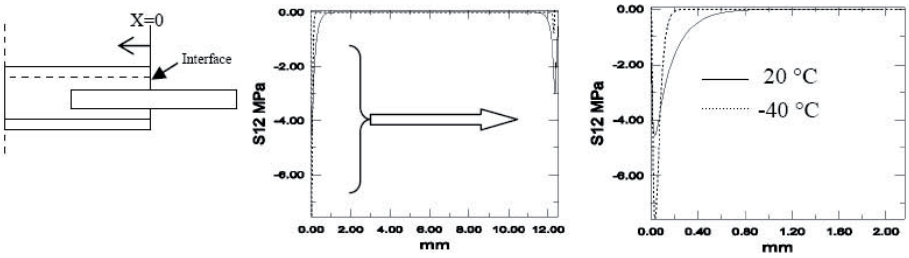

Fig. 5. Évolution du cisaillement à l'interface colle/PET à 20 °C et –40 °C.

puis tend à s'annuler à environ 1 mm des extrémités de l'assemblage (Fig. 5).

Finalement, on voit que les 2 modèles locaux 2D déformations planes et 3D solide ont des comportements identiques. On relève que le modèle 2D déformations planes donne des valeurs de σ_{12} et de σ_{11} à 10–20 % en dessous du modèle 3D. On peut conclure que notre hypothèse de travailler par la suite sur le modèle 2D est correcte, pour des temps de calcul nettement inférieurs.

2.3 Analyse du comportement mécanique de l'assemblage à 20 °C et –40 °C pour le modèle 2D

Comme l'on vient de le décrire, on assiste, à 20 °C, à un transfert de charge du fuseau vers les rubans de PET.

Au contraire, à –40 °C, étant donné que la rigidité de la colle est voisine de celle des autres matériaux, la charge est reprise par l'ensemble des couches. À l'entrée de l'assemblage, nous relevons une contrainte σ_{11} d'environ 76 MPa supportée par le fuseau. Cette valeur chute ensuite à environ 32 MPa à l'intérieur de la jonction, les couches de colle et PET supportant une contrainte proche de 22 MPa.

Si l'on s'intéresse au cisaillement σ_{12}, on relève à basse température que sa valeur maximale augmente pour s'annuler ensuite plus rapidement (Fig. 5).

2.4 Exemple de modélisation 3D d'un défaut d'assemblage

Au cours du processus de fabrication et d'assemblage des fuseaux, plusieurs types de défauts ont été constatés (inclusion, dissymétrie, pontet de colle...). C'est pourquoi il est nécessaire d'effectuer une étude de la structure en tenant compte de ces imperfections et de quantifier leur impact sur la tenue mécanique de l'assemblage. La technique de submodeling est ici bien adaptée pour prendre en compte localement le caractère 3D du défaut sans pour autant avoir un modèle trop lourd.

Nous présentons ici le calcul d'un défaut occasionné par l'accumulation de colle induisant la formation d'un pli sous le ruban de PET. Le modèle global est dans ce cas un demi-disque puisque seule subsiste une symétrie sur la structure. Le chargement est de type pression sur la face inférieure du système. Le modèle local est maillé avec 54 000 éléments 3D solides à interpolations quadratiques. Les différents éléments constitutifs de l'assemblage sont solidarisés par l'intermédiaire de couplages de degrés de liberté. Le reste du modèle est constitué d'éléments coques.

À partir de la simulation, nous pouvons observer que ce type de défaut engendre une augmentation de la contrainte au sens de Von Mises de l'ordre de 15 % par rapport à une structure saine (Fig. 6). En effet, sa valeur passe de 109 MPa à près de 127 MPa. Cette élévation est concentrée au niveau de la courbure du film supérieur de PET. Quant à la partie inférieure, elle semble être dans un état de contraintes identique à celle de la structure nominale.

3 Étude de sensibilité sur les paramètres de conception

3.1 Plan d'expériences

Nous utilisons la méthode des plans d'expériences pour étudier l'influence des paramètres de conception sur la tenue mécanique de l'assemblage [4]. En effet, cette technique permet de mettre en évidence non seulement les paramètres de conception prépondérants, mais aussi les différentes interactions existantes entre ces derniers.

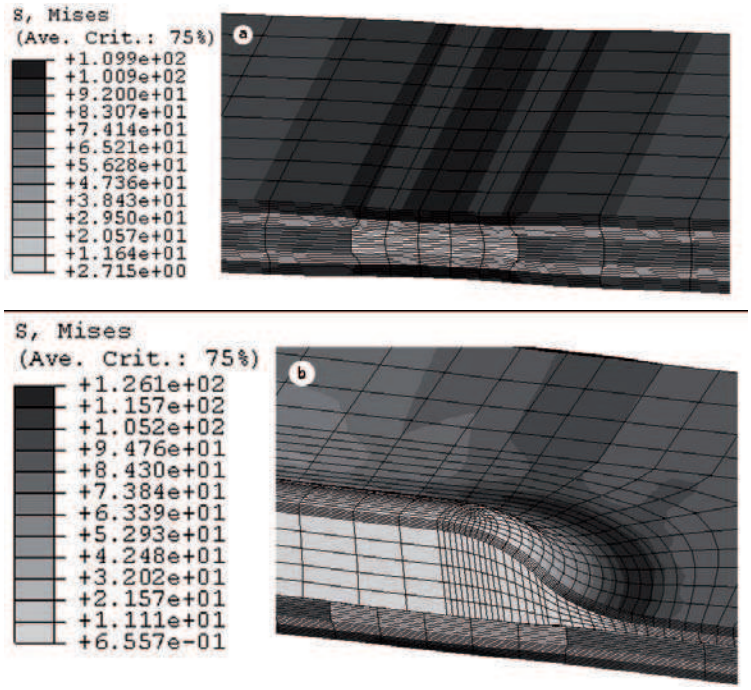

Fig. 6. Champ des contraintes de Von Mises à la jonction des fuseaux, (a) structure nominale, (b) structure avec défaut.

Un autre avantage de cette technique, est la possibilité de construire plusieurs plans d'expériences à partir des mêmes simulations éléments-finis pour étudier des réponses différentes.

Son principe consiste à faire varier au cours de chaque expérience les niveaux de tous les facteurs à la fois, de manière programmée, en fixant pour ce qui nous concerne 2 niveaux par facteur. On retient l'algorithme de Yates pour fixer les niveaux des facteurs pour chaque essai. Un plan pour lequel chacun des k facteurs ne possède que 2 niveaux est appelé plan $2k$. On appelle facteur X_i la variable qui agit sur le système étudié et réponse y_i la grandeur que l'on mesure au cours des essais.

3.2 Variables de conception et réponses observées

On choisit d'étudier les paramètres suivants :

- facteur X_1 : largeur PET
- facteur X_2 : module colle
- facteur X_3 : module PET
- facteur X_4 : épaisseur de colle.

Nous appellerons X_iX_j l'interaction entre les facteurs X_i et X_j. La réponse observée Y est la valeur maximale du cisaillement au niveau de l'interface colle/PET issue des simulations numériques. Nous construisons un plan d'expériences factoriel complet pour étudier les effets des différents facteurs et interactions. Il est donc nécessaire d'effectuer 24 modèles. Nous négligeons les interactions d'ordre 3 et 4 de manière à libérer certains degrés de liberté du plan et de pouvoir analyser les effets par la méthode de la variance.

Les valeurs des paramètres retenues sont répertoriées dans le tableau 2.

Tableau 2. Valeurs des facteurs retenues.

Facteurs	Niveau bas		Niveau haut	
	20 °C	–40 °C	20 °C	–40 °C
Largeur PET (mm)	6	-	50	-
Module colle (MPa)	60	2125	240	8600
Module PET (MPa)	1000	2655	10 000	10 620
Épaisseur colle (μm)	10	10	100	100

3.3 Analyse des résultats à 20 °C

L'analyse du graphe des effets déduit du plan d'expériences montre clairement que le facteur le plus significatif sur la valeur maximale du cisaillement à l'interface colle/PET est l'épaisseur du film de colle (Fig. 7). Lorsque cette épaisseur augmente, la valeur de la réponse diminue et la longueur cisaillée augmente (Fig. 8). Au contraire, on voit que la largeur de PET n'a aucune influence sur cette réponse. En effet, comme on a pu le constater à la section 2.3, la colle n'est cisaillée que sur une longueur d'environ 1 mm. Seul le facteur module d'Young de la colle a une influence positive sur la réponse lorsqu'il passe à son niveau haut. Finalement, le test de Student indique que l'on peut négliger le facteur largeur de PET ainsi que les interactions existantes avec ce facteur.

3.4 Analyse des résultats à –40 °C

À basse température, nous remplaçons le facteur largeur du PET par son épaisseur. Nous constatons sur le

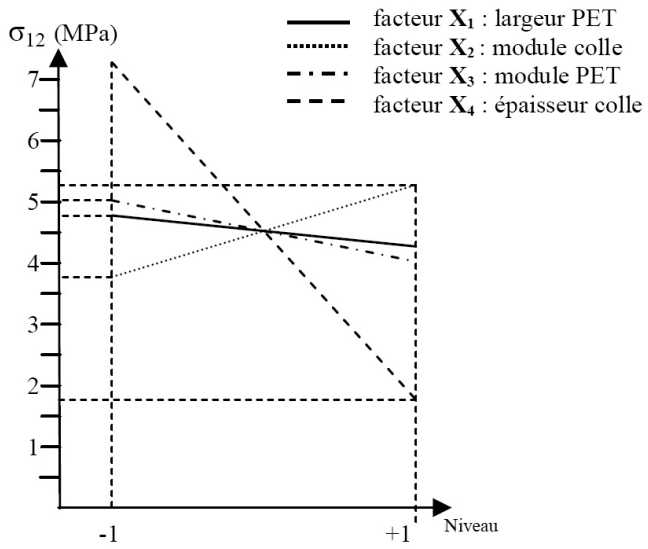

Fig. 7. Graphe des effets pour le plan d'expériences à 20 °C.

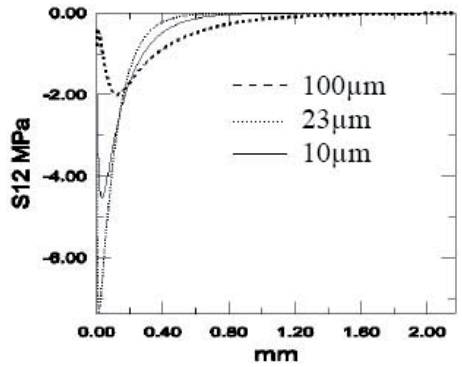

Fig. 8. Évolution du cisaillement à l'interface colle/PET pour différentes épaisseurs de colle à 20 °C.

graphe des effets que le facteur prépondérant est toujours l'épaisseur de colle, tandis que le moins significatif est ici le module d'Young de la colle (Fig. 9). Nous remarquons de plus que les facteurs module d'Young de la colle et du PET ont une influence contraire sur la réponse par rapport à celle déterminée à 20 °C.

4 Conclusion et discussion

La première partie de nos travaux a été consacrée à l'identification des propriétés des matériaux constitutifs par nanoindentation. L'avantage de cette technique réside dans le fait qu'elle nous permet d'évaluer les propriétés directement à l'intérieur de l'assemblage. Ainsi, nous avons déterminé les caractéristiques élastiques à température ambiante ainsi qu'à –40 °C.

Dans un second temps, nous avons modélisé, à partir de la configuration expérimentale NIRVANA, une zone locale de l'assemblage de 2 fuseaux. Deux types d'études ont été abordés : l'une de type 2D déformations planes, l'autre

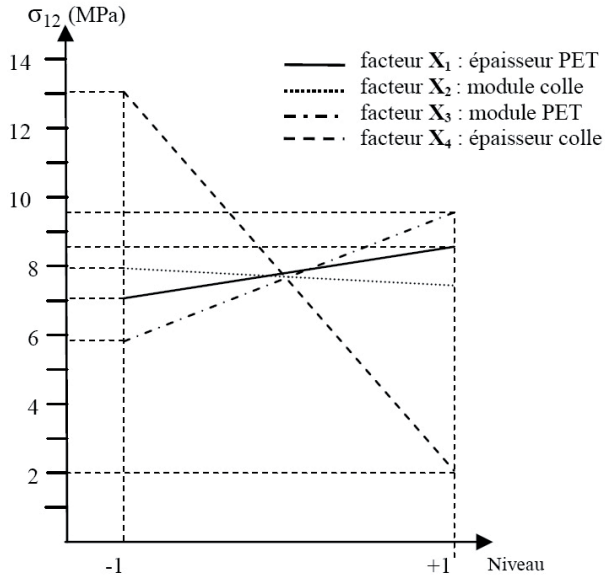

Fig. 9. Graphe des effets pour le plan d'expériences à –40 °C.

de type 3D solide. Les deux modèles ont des comportements similaires, les résultats en terme de contraintes sont de l'ordre de 20 % inférieurs pour le cas 2D, mais pour des temps de calcul nettement réduits. À 20 °C, le transfert de charge s'effectue du fuseau vers les rubans de PET, tandis qu'à basse température, la colle ayant un module voisin des autres couches, la charge est reprise par l'ensemble de l'assemblage. La technique de submodeling a également été utilisée pour modéliser un type de défaut de l'assemblage des fuseaux. Nous présentons ici un exemple où une accumulation de colle s'est produite sous le ruban de PET. À partir des simulations éléments-finis, nous constatons que ce type de défaut engendre une augmentation du champ de contrainte de 15 %, notamment au niveau de la bande de PET. Cette étude permet de donner un ordre de grandeur des augmentations de contraintes que subit le ballon suite à des imperfections de fabrication. Ces valeurs doivent être prises en compte pour les futurs dimensionnements de la structure.

Dans un troisième temps, l'étude de l'influence des paramètres de conception sur la tenue mécanique de l'assemblage a été effectuée à partir de la modélisation 2D de la jonction. Plusieurs plans d'expériences ont été réalisés à partir des simulations numériques à 20 °C ainsi qu'à –40 °C. La réponse étudiée est la valeur maximale du cisaillement au niveau de l'interface colle/PET. Nous pouvons affirmer que le facteur prépondérant sur cette réponse est l'épaisseur de colle. Plus cette épaisseur augmente, plus la contrainte de cisaillement diminue. Nous montrons également que les facteurs ont des effets différents sur cette réponse à 20 °C et –40 °C. Il est important de noter que les résultats annoncés par un plan d'expériences dépendent de la sortie observée qui dans ce cas est le niveau de cisaillement dans le plan (1, 2). Cette réponse n'est peut-être pas l'unique critère pertinent. Un second plan d'expériences a été construit

en considérant comme réponse la valeur maximale de la contrainte normale σ_{11} dans le ruban de PET. Comme on pouvait s'y attendre, on montre que dans ce cas les facteurs prépondérants sont l'épaisseur ainsi que la rigidité du PET.

Références

[1] 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 section: Mechanical behaviour in realistic flight conditions, J. Adv. Space Res. 37 (2006) 2082–2086

[2] W.C. Oliver, G.M. Pharr, Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinement to methodology, J. Mater. Res. 19 (2004) 3–20

[3] P. Vialettes, Simulation numérique et expérimentale du comportement mécanique des ballons pressurisés stratosphériques, Thèse de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 445, 2005

[4] G. Box, W.G. Hunter, J.S. Hunter, Statistics for Experimenters, an introduction to Design, Data analysis and Model Building, Wiley Intersciences, 1978