

## Etude de la répartition des efforts dans les rotules aéronautiques : Modélisation numérique et validation expérimentale

François Peyruseigt<sup>1</sup>, Arnaud Germaneau<sup>2</sup>, Sébastien Mistou<sup>3</sup>,  
Pascal Doumalin<sup>2</sup> & Jean-Christophe Dupré<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Airbus France - TYEN - E5002  
316, route de Bayonne - 31060 Toulouse Cedex, France  
Francois.Peyruseigt@airbus.com

<sup>2</sup> Université de Poitiers, Laboratoire de Mécanique des solides, UMR 6610  
Téléport 2, Boulevard Pierre et Marie CURIE – 86960 Futuroscope Chasseneuil, France  
germaneau@lms.univ-poitiers.fr, doumalin@lms.univ-poitiers.fr, dupre@lms.univ-poitiers.fr

<sup>3</sup> ENI de Tarbes - Laboratoire Génie de Production  
47, avenue d'Azereix - BP1629 - 65016 Tarbes Cedex, France  
mistou@enit.fr

### Résumé :

*Pour étudier le comportement des éléments rotulés de mât-réacteur d'avions, AIRBUS cherche à construire un outil de simulation numérique par la méthode des éléments finis, permettant d'analyser l'influence de leur géométrie sur leur performance. Cet article présente le travail de comparaison entrepris pour valider la simulation numérique du comportement statique à l'aide d'une technique expérimentale d'investigation dans le volume : la photoélasticimétrie tridimensionnelle. Cette technique permet d'analyser la répartition 3D des contraintes dans des structures modèles fabriquées en résine époxy. Ces premières observations nous ont permis de faire évoluer le modèle numérique afin de le rendre plus réaliste.*

### Abstract :

*To study spherical ball bearing behavior of aircraft engine pylons, AIRBUS looks for building a tool of numerical simulation by finite element method, allowing us to analyse the influence of their geometry on performance. This article presents the validation of the numerical simulation of static behavior with the help of a bulk experimental investigation technique: three-dimensional scattered light photoelasticity. This technique enables to analyse the stress distribution in epoxy resin model structures. These first tests allow us to improve numerical model in order to make it more realistic.*

**Mots-clefs :** Rotule ; Modélisation numérique ; Photoélasticimétrie tridimensionnelle

### 1 Introduction

Jusqu'au programme A380, les motoristes de la flotte AIRBUS avaient la responsabilité de la conception et de la fabrication des attaches-moteurs des mâts-réacteurs des avions (FIG. 1 et 2). Ces organes, critiques pour un bon comportement mécanique de la liaison mât-moteur, sont constitués d'éléments rotulés permettant d'éliminer les degrés d'hyperstaticité de la jonction. Depuis l'A380, AIRBUS a repris la responsabilité de ces attaches et cherche à améliorer sa connaissance du comportement mécanique de ces éléments rotulés installés sur avion et notamment sur les mâts-réacteurs, afin de mieux prévoir leur durée de vie.

Cette recherche consiste à construire un outil de simulation numérique du comportement mécanique des rotules par la méthode des éléments finis, permettant d'étudier l'influence de leur géométrie sur leur performance. Pour valider cet outil, une étude préalable est menée sur un modèle démonstrateur à géométrie sphérique. Les résultats de la simulation numérique sont comparés à des mesures expérimentales. Compte tenu du caractère 3D du contact sphère/sphère, il est nécessaire d'utiliser une technique de mesure de champs mécaniques dans le volume. Nous avons utilisé la technique de photoélasticimétrie 3D par découpage optique (Dupré &

Lagarde (1997), Plouzenec *et al.* (1998)). Pour cela, une rotule modèle en matériau transparent a été fabriquée et sollicitée sur un banc de chargement spécialement conçu. A partir des résultats expérimentaux obtenus, nous avons fait évoluer la modélisation en la rendant plus réaliste, notamment nous avons introduit un jeu dans la liaison supposé nul initialement, et mieux pris en compte les conditions aux limites de chargement réelles.

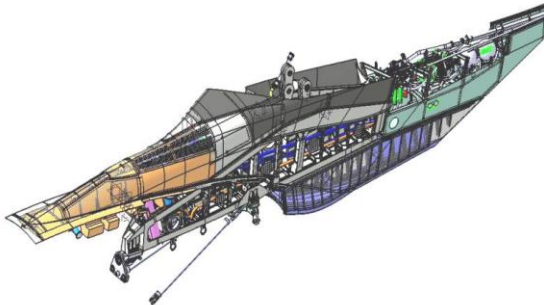


FIG. 1 – Mât-réacteur A380

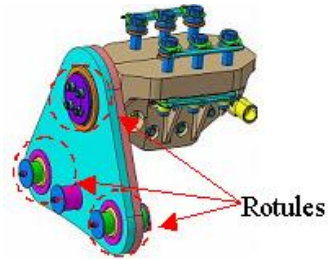


FIG. 2 – Attache-moteur avant du mât

Dans cet article, on décrit dans un premier temps le principe de la technique expérimentale de photoélasticimétrie 3D par découpage optique, puis son application au cas des rotules. Ensuite le modèle numérique est exposé, ainsi que la procédure de comparaison. Enfin nous présentons les premiers résultats obtenus.

## 2 Photoélasticimétrie 3D par découpage optique

La photoélasticimétrie 3D par découpage optique consiste à isoler un feuillet dans l'échantillon entre deux faisceaux plans laser (Dupré & Lagarde (1997), Plouzenec *et al.* (1998), (Germaneau *et al.* (2007b))). Un balayage du volume feuillet par feuillet permet une analyse globale de la pièce. Le montage optique est constitué d'une source laser, d'un dispositif de séparation du faisceau, d'une lentille convergente et d'une lentille cylindrique (FIG. 3). Une caméra CCD placée perpendiculairement à la direction des deux plans laser enregistre les champs de granularité correspondant à la diffusion de la lumière dans le modèle. On exprime alors le facteur de corrélation  $\gamma$  de ces deux champs, qui est similaire à l'expression de l'intensité lumineuse obtenue dans un polariscope rectiligne (Dupré & Lagarde (1997)) :

$$\gamma^2 = 1 - \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (1)$$

où  $\alpha$ , le paramètre isocline, correspond à la direction de l'une des contraintes principales secondaires par rapport au polariseur :

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} \right) \quad (2)$$

où  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{xy}$  sont les valeurs des contraintes secondaires dans le plan  $x$ - $y$  du feuillet observé. Le paramètre isochrome  $\varphi$  représente la biréfringence du feuillet isolé qui est fonction de la différence des contraintes principales secondaires ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) selon les équations de Maxwell ou de la différence des déformations principales secondaires ( $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ ) selon les lois de Neumann :

$$\varphi = \frac{2\pi e}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{2\pi e}{\lambda} K(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (3)$$

où  $e$  est l'épaisseur du feuillet et  $\lambda$  la longueur d'onde de la lumière utilisée.  $C$  et  $K$  sont les constantes photoélastiques du matériau étudié déterminées expérimentalement sur un essai mécanique de traction (Germaneau *et al.* (2007a)).

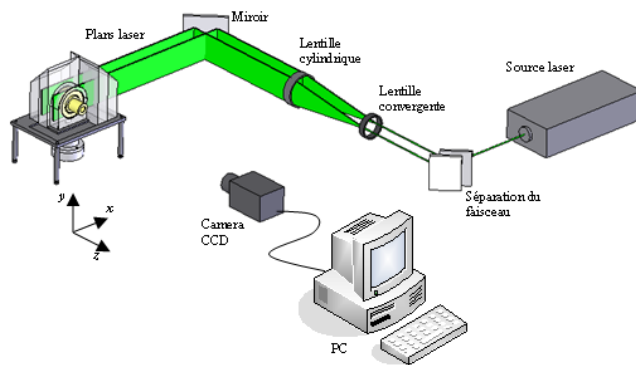


FIG. 3 – Dispositif expérimental.

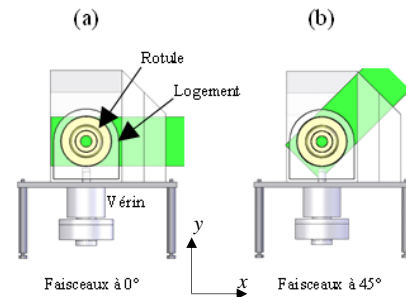


FIG. 4 – Orientations des faisceaux laser

Les franges photoélastiques ne sont pas visibles car l'intensité de la lumière diffusée correspond à un champ de granularité. En pratique, la méthode consiste à enregistrer trois images : l'une avec le premier faisceau seul, la seconde avec le deuxième faisceau et la troisième avec les deux faisceaux. Une analyse statistique combinée de ces trois champs de granularité permet d'obtenir  $\gamma^2$  et de visualiser les franges isochromes et isoclines.

### 3 Essais expérimentaux

La maquette étudiée est une rotule composée de quatre éléments : une cage, deux demi-billes et un axe (FIG. 5). Ces pièces ont été réalisées en résine époxy et contiennent des particules nécessaires à la diffusion de la lumière (Germaneau *et al.* (2007a)). Une charge radiale est appliquée sur cette rotule par l'intermédiaire d'un logement en PMMA lié à un vérin hydraulique pouvant appliquer un effort de 2000 daN (FIG. 5). L'axe est inséré par ses deux extrémités dans deux parois en PMMA qui, avec deux autres parois, forment un récipient dans lequel un liquide d'indice immerge la rotule afin d'éliminer les phénomènes de réflexion et réfraction. Pour cette étude, le découpage optique est réalisé avec un feuillet d'épaisseur 4 mm en partant du bord de l'éprouvette et en allant vers le plan médian. Deux séries d'images sont prises sous deux incidences des faisceaux (FIG. 4) afin d'éliminer les franges isoclines et d'obtenir en tous points les franges isochromes.

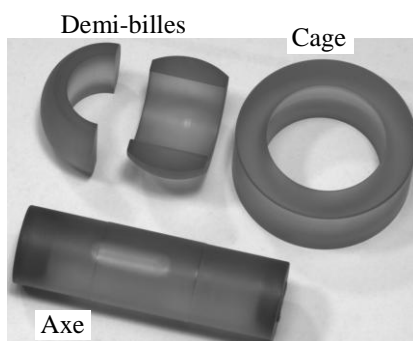


FIG. 5 – Eléments de la rotule.

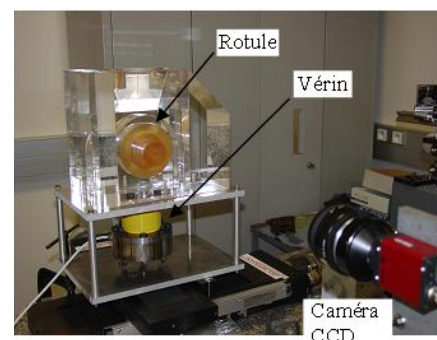


FIG. 6 – Montage de photoélasticimétrie 3D

## 4 Modélisation numérique

### 4.1 Simulation

Le modèle numérique réalisé sous ABAQUS est basé sur la configuration du montage expérimental. Les propriétés mécaniques du matériau de la rotule et de l'axe ont été identifiées par la méthode de suivi de marqueurs (Bretagne *et al.* (2005)) sur des éprouvettes de traction

élaborées lors de la même coulée que les rotules. Le module d'Young  $E_{\text{epoxy}}$  est de 2720 MPa et le coefficient de Poisson  $\nu_{\text{epoxy}}$  est de 0,39. Les propriétés mécaniques du logement en PMMA supposé déformable sont  $E_{\text{PMMA}} = 2800$  MPa et  $\nu_{\text{PMMA}} = 0,38$ . Le contact frottant entre les pièces est régi par une loi classique de Coulomb avec un coefficient de frottement égal à 0,3. Les éléments utilisés sont des éléments hexaédriques à 8 nœuds à intégration réduite (C3D8R dans ABAQUS) bien adaptés pour résoudre les problèmes de contact. Un effort radial est appliqué sur la rotule par l'intermédiaire de la base du logement. Les parois où sont insérés les axes sont considérées comme des surfaces rigides.

Pour mener les études comparatives, la technique de « sous-modélisation » (FIG. 7) proposée par le logiciel de calcul a été employée. Elle permet, à partir d'un modèle global, d'isoler une zone d'étude pour réaliser un modèle local. Les déplacements du modèle global seront appliqués aux frontières de ce modèle local. Cette méthode permet d'isoler et de mailler plus finement les feuillet médians et les feuillet de bord de cage pour chaque élément de la rotule.

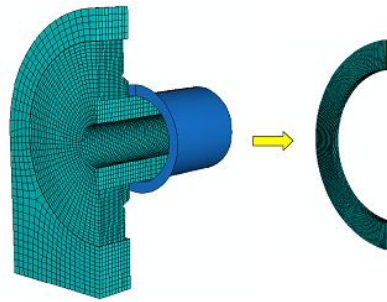


FIG. 7 – Modèle global et isolation d'un feuillet de cage par la technique de « sous-modélisation »

#### 4.2 Observation des franges photoélastiques à partir de données numériques

La photoélasticimétrie 3D ne fournit pas les valeurs de contraintes mais des franges qui correspondent aux différences des contraintes principales dans le feuillet observé. La décomposition de chaque valeur de contrainte est complexe. Il est plus simple d'obtenir les franges à partir des valeurs de contraintes provenant de la simulation. A partir de ces valeurs en chaque point du maillage, nous calculons les paramètres isochrome  $\varphi$  et isocline  $\alpha$  donnés à l'aide des équations (2) et (3). Pour déterminer les franges numériques, nous devons schématiser le feuillet photoélastique isolé. Les contraintes ne peuvent pas être supposées constantes suivant l'épaisseur du feuillet comme en photoélasticimétrie 2D. La solution retenue consiste à effectuer une discrétisation en une série de sous-feuillet minces (Zenina *et al.* (1998)). Les contraintes sont supposées constantes suivant l'épaisseur de chaque sous-feuillet où chacun est caractérisé par  $\alpha_i$  et  $\varphi_i$  ( $i = 1$  à  $n$  sous-feuillet) (Zenina *et al.* (1998)). Le processus consiste à calculer numériquement, à partir d'une direction de polarisation donnée, les composantes de la lumière après le passage dans le premier sous-feuillet. A la sortie de celui-ci, le calcul est repris à partir des nouvelles composantes pour les sous-feuillet suivants jusqu'au  $n^{\text{ième}}$ . On note  $(X_0, Y_0)$  et  $(X_n, Y_n)$  respectivement les composantes de la lumière à l'entrée du premier sous-feuillet et celles à la sortie du dernier sous-feuillet :

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix}_{(x_0, y_0)} \xrightarrow{R_{\alpha_1}} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix}_{(x_1, y_1)} \xrightarrow{S_{\varphi_1}} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix}_{(x_0, y_0)} \xrightarrow{R_{\alpha_2}} \dots \xrightarrow{S_{\varphi_{n-1}}} \begin{pmatrix} X_{n-1} \\ Y_{n-1} \end{pmatrix}_{(x_{n-1}, y_{n-1})} \xrightarrow{R_{\alpha_n}} \begin{pmatrix} X_{n-1} \\ Y_{n-1} \end{pmatrix}_{(x_n, y_n)} \xrightarrow{S_{\varphi_n}} \begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \end{pmatrix}_{(x_n, y_n)}$$

Le passage entre deux sous-feuillet successifs se fait par les matrices de rotation et de déphasage  $R_{\alpha_i}$  et  $S_{\varphi_i}$  :

$$R_{\alpha_i} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \\ -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix} \text{ et } S_{\varphi_i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_i - j \sin \varphi_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

Après le dernier sous-feuillet et après la traversée de l'analyseur, l'intensité lumineuse s'écrit :

$$I = I_0 \left[ (\operatorname{Re}(X_n) \cos \beta + \operatorname{Re}(Y_n) \sin \beta)^2 + (\operatorname{Im}(X_n) \cos \beta + \operatorname{Im}(Y_n) \sin \beta)^2 \right] \quad (4)$$

## 5 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Pour cet essai expérimental, la jonction entre les deux demi-billes est orientée verticalement. Les figures 8 et 9 montrent les franges obtenues par découpage optique pour une charge de 500 daN sur le bord (Fig. 8-a) et dans le plan médian (Fig. 8-c) puis pour une charge de 1000 daN (Fig. 7-a et c).

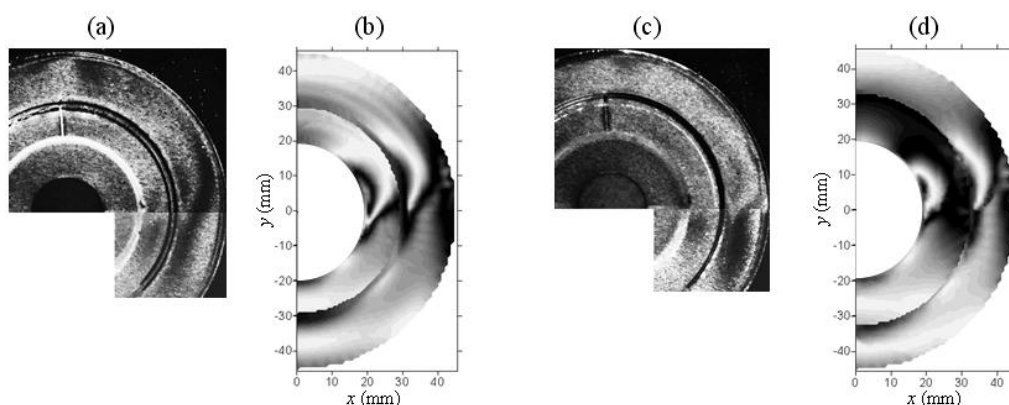


FIG. 8 – Franges photoélastiques pour une charge de 500 daN, (a) expérimentales et (b) numériques sur le bord, (c) expérimentales et (d) numériques dans le plan médian

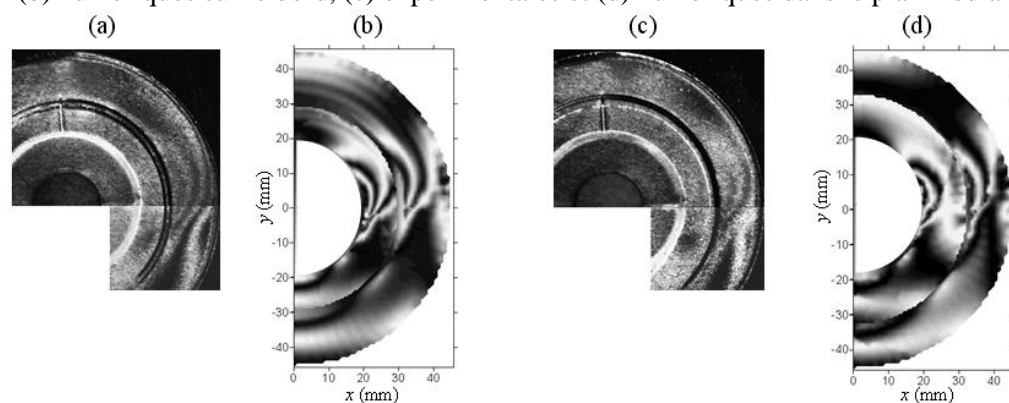


FIG. 9 – Franges photoélastiques pour une charge de 1000 daN, (a) expérimentales et (b) numériques sur le bord, (c) expérimentales et (d) numériques dans le plan médian

On observe une évolution des franges dans l'épaisseur entre le bord et le plan médian de l'éprouvette associée au contact sphère/sphère. Le nombre de franges augmente avec la charge ce qui provoque des différences de contraintes plus importantes. Les franges sont difficilement observables au niveau de la bille à cause d'une altération du faisceau au passage entre la bague extérieur et la bille. D'un point de vue numérique, nous avons fait évoluer le modèle en fonction des observations expérimentales. Initialement, le logement en PMMA était supposé indéformable. En considérant ce modèle, les franges simulées et expérimentales ne coïncidaient pas du tout et on observait des concentrations locales de contraintes très élevées au voisinage de la jonction des deux demi-billes. Nous avons donc réajusté les conditions aux limites pour qu'elles correspondent au mieux à la réalité : le logement est supposé déformable et nous avons

imposé un jeu de 0,1 mm entre celui-ci et la bague extérieure. Pour éviter les aberrations numériques locales, le nouveau modèle est constitué d'une bille en une seule partie. Les résultats obtenus avec ces nouvelles conditions sont présentés sur les figures 8-b et d et 9-b et d. Globalement, nous obtenons le même motif de franges dans les deux cas mais nous observons des décalages entre ces deux situations (par exemple d'une demi-frange, soit 1,54 MPa, pour une charge de 1000 daN) et aussi entre celle du plan médian et celle du bord. Numériquement, on observe un nombre de franges moins important et une évolution plus lente avec l'intensité du chargement qu'expérimentalement. En effet, le modèle numérique a tendance à reproduire une répartition des contraintes plus uniforme au contact sphère/sphère, évoluant proportionnellement avec le chargement et donc entraînant une faible évolution de la différence des contraintes principales. La situation expérimentale associant des défauts de forme au contact fait apparaître des concentrations de contraintes évoluant plus rapidement avec le chargement.

## 6 Conclusion

Nous montrons ici une validation d'une simulation par éléments finis du comportement mécanique d'une rotule aéronautique. A partir des données simulées, nous avons calculé les franges photoélastiques que nous avons ensuite comparées à celles obtenues par photoélasticimétrie 3D. Cette technique permet d'analyser la répartition 3D des contraintes dans des structures modèles fabriquées en résine époxy. Ces premières observations nous ont permis de faire évoluer le modèle numérique afin de le rendre plus réaliste. Une autre approche est envisagée à partir de la comparaison des déplacements à l'intérieur de la rotule obtenus à l'aide de la technique expérimentale de corrélation volumique par tomographie optique (Germaneau *et al.* (2007b) et (2007c)).

## References

- Bretagne, N., Valle, V. & Dupré, J.C. 2005 Développement of marks tracking technique for strain field and volume variation measurement, *NDT&E Int.* **38**, 290-298.
- Dupré, J.C. & Lagarde, A. 1997 Photoelastic analysis of a three-dimensional specimen by optical slicing and digital image processing. *Exp. Mech.* **37(4)**, 393-397.
- Germaneau, A., Doumalin, P. & Dupré, J.C. 2007a 3D Photoelasticity and Digital Volume Correlation applied to 3D mechanical stuides. In Proc. ICEM 13, Alexandroupolis, Grèce.
- Germaneau, A., Doumalin, P. & Dupré, J.C. 2007b Corrélation Volumique par Tomographie Optique et Photoélasticimétrie 3D pour l'étude des effets mécaniques tridimensionnels. In Proc. CFM 2007, Grenoble, France.
- Germaneau, A., Doumalin, P. & Dupré J.C. 2007c Full 3D measurement of strain field by scattered light for analysis of structures. *Exp. Mech.* (A paraître).
- Plouzenec, N., Dupré, J.C. & Lagarde, A. 1998 Visualisation of photoelastic fringes within three dimensional specimens using an optical slicing method. In IUTAM Symposium on Advanced Optical Methods and Applications in Solid Mechanics, A. Lagarde (Ed.) Poitiers (France), pp. 41-48, Kluwer Academic Publishers.
- Zenina, A., Dupré, J.C. & Lagarde, A. 1998 Optical approaches of a photoelastic medium for theoretical and experimental study of the stresses in a three-dimensional specimen. In IUTAM Symposium on Advanced Optical Methods and Applications in Solid Mechanics, A. Lagarde (Ed.) Poitiers (France), pp. 49-56, Kluwer Academic Publishers.
- Zenina, A., Dupré, J.C. & Lagarde, A. 1999 Separation of isochromatic and isoclinic patterns of a slice optically isolated in a 3-D photoelastic medium. *Eur. J. of Mech. A/Solids* **18**, 633-640