

Identification inverse d'un comportement asymétrique

V. Magnier¹, J-F. Witz², M. Langlois³, S. Selezneff⁴, Y. Desplanques⁵, P. Dufrenoy⁶

¹ LML, Université Lille 1, France, vincent.magnier@polytech-lille.fr

² CNRS-LML, Université Lille 1, jean-francois.witz@ec-lille.fr

³ LML, Université Lille 1, France,

⁴ SNECMA, France,

⁵ LML, Ecole Centrale Lille1, France, yannick.desplanques@ec-lille.fr

⁶ LML, Université Lille 1, France, philippe.dufrenoy@polytech-lille.fr

Résumé — Différents comportements en traction/compression sont maintenant une caractéristique classique des modèles avec endommagement. Dans cette communication, nous proposons une méthodologie générale pour identifier ces propriétés mécaniques sur un pseudo-essai brésilien. Ce test est effectué sous microtomographe permettant d'obtenir le champ de déplacement par DIC. Une identification inverse est effectuée pour caractériser ces propriétés mécaniques. La décomposition de Kelvin est exploitée dans le modèle pour tenir compte du comportement asymétrique

Mots clefs — FEMU, DIC, comportement asymétrique, essai in-situ sous microtomographe.

1. Introduction

Les contraintes environnementales pour l'industrie aéronautique tendent à devenir de plus en plus sévères et ont conduit les constructeurs de turboréacteurs à trouver des moyens de réduire la consommation de carburant (objectif: -20% en 2020). Une possibilité est la réduction du jeu radial entre les aubes et le carter pour permettre d'avoir un gain de compression du turboréacteur.

Pour atteindre cet objectif, la réalisation de joints d'étanchéité, dits joints abrasables, est une solution couramment mise en œuvre depuis plus de 25 années à présent. On définit l'abrasabilité comme étant la capacité d'un matériau (le joint abrasable) à s'user préférentiellement lorsqu'il est mis en contact avec un autre matériau.

L'interaction aube/carter réagit comme un système complet avec les paramètres propres à l'aube, ceux propres aux matériaux abrasables et les paramètres de l'interaction. Cette communication a pour but d'améliorer les méthodologies de prédiction du comportement de ce système en incluant un maximum de ces paramètres. Les comportements des aubes sont aujourd'hui bien maîtrisés et bien modélisés, cette communication se focalise donc plus sur le matériau abrasable lui-même.

2. Protocole expérimentale

Le matériau abrasable considéré ici à un comportement asymétrique en traction et en compression [1]. L'objectif est d'identifier ces deux propriétés avec un seul test expérimental. Pour se faire, nous utiliserons l'essai brésilien qui est davantage connu comme test de résistance à la traction indirecte. Ce type d'expérience conduit à une charge multiaxiale de l'échantillon. En effet, l'échantillon est soumis à une charge bi-axiale travaillant en compression (dans le sens de chargement principal) et en traction (dans le sens de chargement transversal). Néanmoins, le défaut du test brésilien est les conditions aux

limites (zones de contact). En effet, une localisation sévère est créée conduisant à un fort endommagement du matériau dans ces zones. Ainsi, ici une adaptation de forme du test traditionnel brésilien est réalisée pour s'affranchir de ces problèmes de localisation. Après une analyse numérique, il apparaît que la forme hexagonale (au lieu d'une forme octogonale, circulaire avec deux plats, etc.) est un bon candidat.

Préalablement le matériau abrasable a été projeté sur une plaque par la société SNECMA. Ensuite, une extraction par un système de commande numérique est effectuée pour obtenir précisément la forme hexagonale comme l'illustre la figure 1. Le diamètre choisi du cercle circonscrit est fixé à 16 mm et la hauteur est égale à 4 mm.

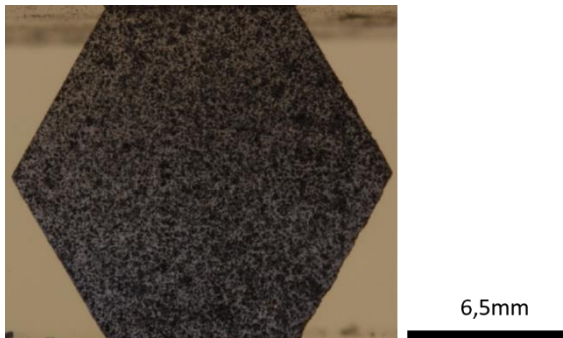


Figure 1: Forme de l'échantillon

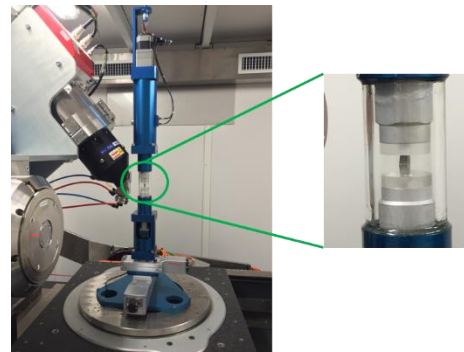


Figure 2: Microtomographe ISIS4D

Une microtomographie à rayons X a été réalisée au laboratoire LML via la plateforme ISIS4D [2]. L'échantillon a été placé sur un plateau tournant au sein du microtomographe entre la source de rayons X et une caméra CCD dont la résolution est de 4000 par 2624 pixels.

Un dispositif de chargement in situ (figure 2) a été utilisé pour charger l'échantillon. Ses principales parties sont un moteur pas à pas en bas, une cellule de force en haut et un tube de compression entre les deux. Le tube en plexiglas est utilisé pour transmettre la charge entre les parties inférieure et supérieure de la plate-forme. La taille du voxel est fixée à $4\mu\text{m}$. Cette taille de voxel a été choisie comme un bon compromis entre la résolution et la taille de l'échantillon car une résolution plus élevée nécessiterait des spécimens plus petits, donc peut-être moins représentatifs.

3. Résultats expérimentaux

Un cycle de charge sur l'échantillon est appliqué avec une pré-charge de 25 N et une charge maximum fixée à 500N. En effet, la pré-charge de 25 N est appliquée pour stabiliser l'échantillon au cours de la rotation qui permet d'obtenir l'acquisition 3D. Trois étapes d'acquisition sont réalisées. La première est effectuée avant le test de compression à la pré-charge, la seconde est réalisée au moment où est appliquée la charge maximum (500N) et finalement, la dernière est réalisée à la fin du cycle avec la pré-charge de 25N. Ce protocole permet de dissocier les mécanismes de déformation. En effet, entre la seconde et la troisième acquisition, le déplacement réversible dû à l'élasticité est nécessairement obtenu et entre la première et la troisième acquisition, on en déduit la déformation résiduelle.

Une analyse microstructurale du matériau est illustrée en figure 3, celle-ci est issue de la première acquisition via une segmentation en niveau de gris permettant d'identifier chaque composant.

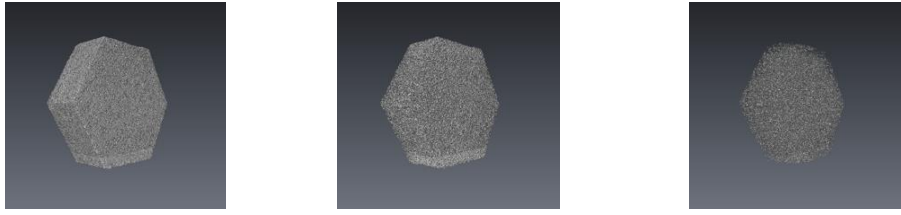


Figure 3: Distribution des composants (1^{er} composant, 2^{ème} composant et porosité)

La distribution de chaque composante montre une répartition spatiale homogène. Sur cet échantillon, un essai de compression est effectué. Les résultats en déplacement de la corrélation d'images pris entre les instants 1 et 2 sont illustrés sur la figure 4.

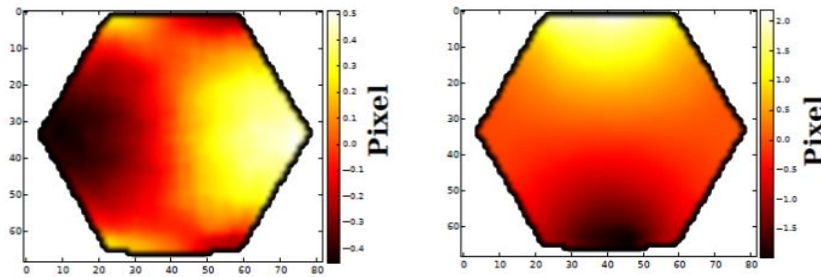


Figure 4: Champs de déplacement obtenu entre les instants 3 et 2 selon l'axe transverse et normal

Au vue des champs de déplacement, nous constatons que l'échantillon subit un état de chargement multiaxial où l'on retrouve la compression dans l'axe normal et de la traction suivant l'axe transverse. Il est à noter que la corrélation d'image entre les instants 1 et 3 montrent un champ de déplacement quasi-nul, montrant que nous sommes bien en présence d'un comportement élastique.

4. Identification inverse

En mécanique des solides, le problème direct consiste à déterminer les champs de déplacements u , les déformations ϵ et les contraintes σ au sein d'une géométrie donnée (occupant le domaine Ω de normale sortante \mathbf{n}), pour un jeu de paramètres constitutifs θ donnés, à partir de conditions aux limites (T, u) connues.

La résolution du problème direct suppose la connaissance du jeu de paramètres θ . Dans le cas du problème inverse, celui de l'identification de θ , des données surabondantes sont nécessaires en plus des conditions aux limites du problème direct. Les mesures de champs cinématiques peuvent fournir ces données.

[3] recensent l'ensemble des formulations permettant la résolution de ce problème inverse, à partir de mesures de champs cinématiques. Ces méthodes, décrites plus explicitement dans les sections suivantes, peuvent être regroupées en trois catégories :

1. Les méthodes s'appuyant sur le respect des équations d'équilibre: c'est le cas de la méthode de l'écart à l'équilibre, des champs virtuels et de l'écart à la réciprocité.
2. La méthode s'appuyant sur le respect de la relation de comportement. Il s'agit de l'écart en relation de comportement.
3. Les méthodes tirant profit de la formulation du problème sous la forme des éléments finis afin de minimiser l'écart entre les quantités simulées et les champs expérimentaux correspondants. Ces méthodes sont regroupées sous l'appellation F.E.M.U. (Finite Element Model Updating).

Le principe du recalage par éléments finis est d'identifier des paramètres constitutifs en minimisant l'écart entre les résultats d'un calcul éléments finis et les champs expérimentaux. Cet écart est généralement exprimé sous la forme d'une fonctionnelle, notée ici $J(\theta)$.

$$J(\theta) = \varepsilon(\theta) - \varepsilon_{expé}$$

Où $\varepsilon(\theta)$ (resp. $\varepsilon_{expé}$) est le champ de déformation issu du calcul FEM (resp. expérimentaux déduits de la DIC).

Les différentes étapes du processus d'optimisation sont illustrées sur la figure 5.

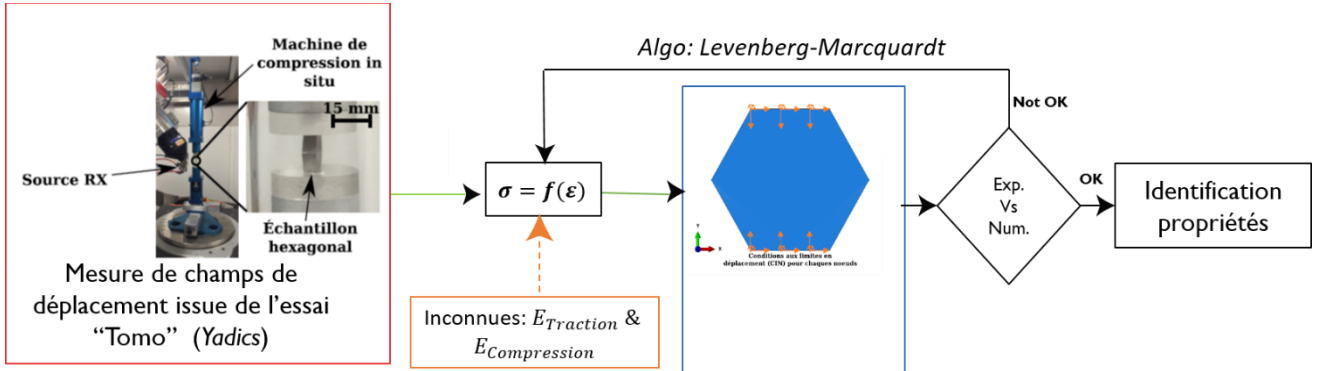


Figure 5: Etapes principales de la FEMU

4.1. Comportement asymétrique : décomposition de Kelvin

Compte tenu de la différence de réponse en traction et en compression du matériau, une loi constitutive asymétrique doit être implémentée. Ici, suivant la méthodologie proposée par Desmorat [4], l'idée est de mettre en évidence les termes quadratiques du potentiel de Gibbs:

$$\rho\phi^* = \frac{1}{2} \bar{\sigma} : \bar{S} : \bar{\sigma} = \frac{1}{2} (\bar{A} : \sigma) (\bar{A} : \sigma)$$

Cette notation peut être réécrite en exploitant la décomposition de Kelvin du tenseur de rigidité \bar{S} qui introduit six valeurs propres λ_i et six modes propres $\bar{S}_i \otimes \bar{S}_i$:

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^6 \lambda_i \bar{S}_i \otimes \bar{S}_i$$

Le tenseur \bar{A} est défini donc comme :

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^6 \sqrt{\lambda_i} \bar{S}_i \otimes \bar{S}_i$$

Deux tenseurs \bar{S}^+ et \bar{S}^- peuvent être introduits dans le potentiel de Gibbs :

$$\rho\phi^* = \frac{1}{2} \langle \bar{A}^+ : \bar{\sigma} \rangle_+ : \langle \bar{A}^+ : \bar{\sigma} \rangle_+ + \frac{1}{2} \langle \bar{A}^- : \bar{\sigma} \rangle_- : \langle \bar{A}^- : \bar{\sigma} \rangle_-$$

Où $\langle \rangle_+$ (resp. $\langle \rangle_-$) représente la partie positive (resp. négative)

Finalement, la déformation élastique peut s'écrire

$$\varepsilon^e = \bar{A}^+ : \langle \bar{A}^+ : \bar{\sigma} \rangle_+ + \bar{A}^- : \langle \bar{A}^- : \bar{\sigma} \rangle_-$$

Cette loi de comportement a été développée dans une UMAT.

4.2. Résultats

La FEM reproduit l'expérimentation réalisée dans la microtomographe, l'échantillon a la même dimension que dans la réalité (côté = 8 mm et épaisseur = 4 mm). Les conditions aux limites imposées sont celles obtenues expérimentalement appliquées sur les bords.

Le maillage est composé d'éléments tétraédriques avec une interpolation quadratique dont la taille caractéristique avoisine 1 mm (figure 6). Afin d'éviter l'incohérence des champs de déplacement à proximité des plateaux de compression, ces zones sont exclues du maillage.

Pendant le processus d'optimisation, le paramètre à identifier est celui du ratio δ entre le module de compression (E_-) et le module de traction (E_+).

Les conditions aux limites sont de type Dirichlet. Par conséquent, les modules de Young sont obtenus avec un recalibrage par rapport à la force de réaction et l'effort appliqué expérimentalement.

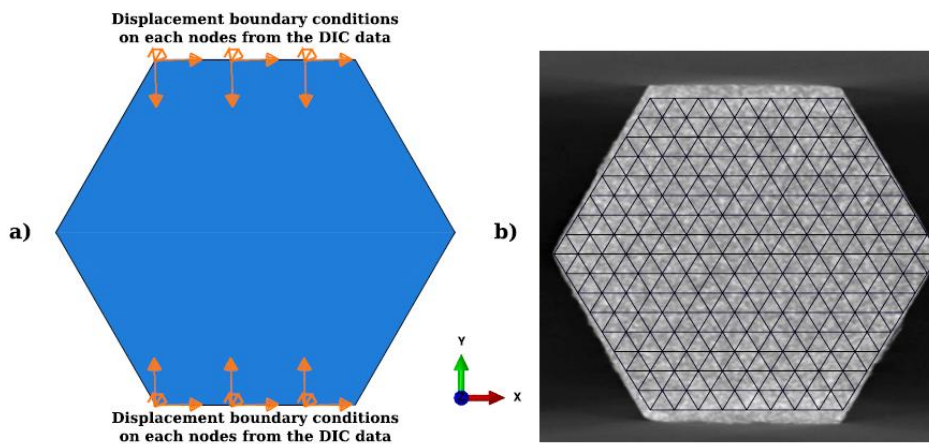


Figure 6: Conditions aux limites et maillage

Après 30 itérations, le ratio δ converge vers la valeur 0.757. Les résidus suivant les 3 axes sont présentés en figure 7 et montrent une bonne identification du comportement du matériau.

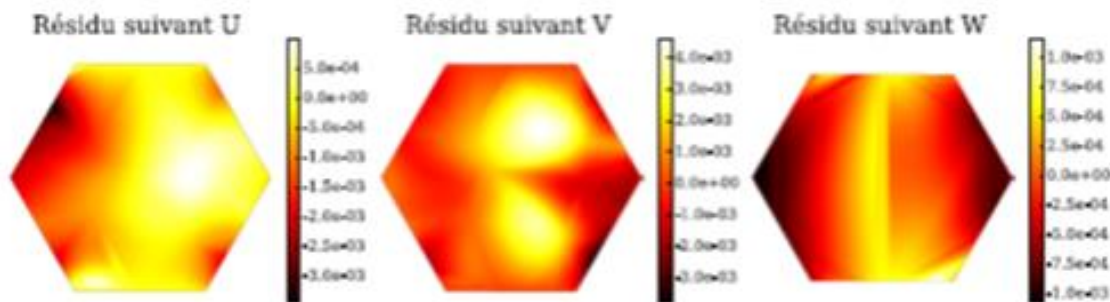


Figure 7: Résidus selon les 3 axes entre le calcul FEM et les résultats de la DIC

4.3. Influence du maillage

Nous proposons ici de regarder l'influence du maillage. La méthodologie est la même qu'indiqué auparavant. Deux autres maillages sont testées avec des tailles caractéristiques de 0.5mm et 0.25mm avec respectivement ~40000 éléments et 220000 éléments. Les maillages sont illustrés en figure 8.

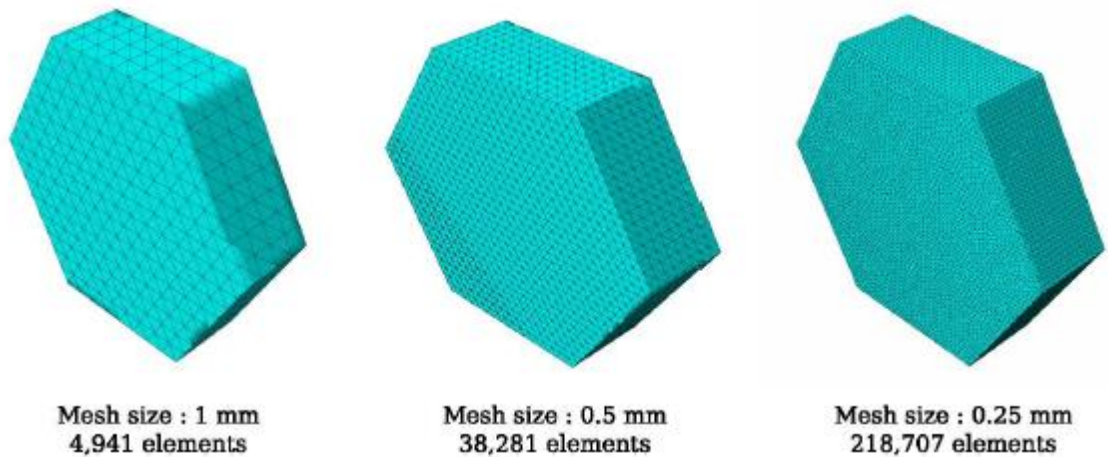


Figure 8: Différents maillages utilisés

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant.

Taille élément (mm)	Ratio δ	CP time (s)	Nombre d'itération
1	0.757	853	30
0.5	0.761	6348	27
0.25	0.755	160000	42

Il est clair que la taille du maillage n'a pas d'influence sur les résultats.

5. Conclusions

Dans cette communication, nous nous sommes attachés à proposer une méthodologie permettant d'identifier un matériau ayant un comportement asymétrique (différence entre la traction et compression). Cette méthodologie se base sur un dialogue numérique/expérimentale. Côté expérimentale, un pseudo essai-brésilien est effectué dans une enceinte microtomographe afin d'avoir les champs primaires à l'aide de la DIC. Ces derniers servent de référence pour un calcul FEM dont l'objectif est d'identifier les modules en traction et compression par la méthode FEMU. Les résultats,

quel que soit le maillage, convergent et donnent des résultats corrects au vue des résidus obtenus. Il serait intéressant d'étendre cette méthodologie à des comportements non-linéaires (Plasticité etc.).

Références

- [1] S. Baiz, « Etude expérimentale du contact aube-abradable : contribution à la caractérisation mécanique des matériaux abradables et de leur interaction dynamique sur banc rotatif avec une aube », Thèse, Ecole Centrale Lille, 2011.
- [2] Plateforme microtomographe ISIS4D, <http://isis4d.univ-lille1.fr>
- [3] S. Avril, M. Bonnet, A.-S. Bretelle, M. Grediac, F. Hild, P. Jenny, F. Latourte, D. Lemosse, S. Pagano, E. Pagnaccoet, “Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements”, *Experimental Mechanics*, vol. 48, no. 4, pages 381–402, 2008
- [4] R. Desmorat and G. Duvaut, “Compliance optimization with nonlinear elastic materials application to constitutive laws dissymmetric in tension-compression,” *European Journal of Mechanics A/Solids*, vol. 22, pp. 179–192, 2003.