

Eprouvette asymétrique pour caractérisation de matériaux composites à stratification axisymétrique

Asymmetric sample for characterization of composite materials with axisymmetric stratification

Rousset Guillaume*, Grangeaud Marjorie, Hannoun David

Ariane Group
Cluster Propulsion Solide
Site du Haillan, St Médard en Jalles 33166
*e-mail : guillaume.rousset @ariane.group

Résumé

ArianeGroup développe pour les secteurs civils et militaires un panel de technologies liées aux systèmes de lancement et applications spatiales. Parmi ces technologies, les matériaux composites à matrice céramique sont utilisés pour concevoir des pièces soumises à des environnements thermomécaniques extrêmes : les cols et les divergents de tuyère font partie de ces applications. Pour fabriquer ces pièces axisymétriques, on utilise notamment un procédé qui consiste à réaliser une préforme avec un renfort fibreux stratifié puis aiguilleté dans l'épaisseur, préforme qui est par la suite densifiée. La structure résultante du matériau constitutif de la pièce fait que les directions d'orthotropie sont sensiblement celles du repère de la pièce axisymétrique. Pour caractériser la direction circonférentielle du matériau sans systématiquement passer par un essai technologique coûteux, il est préférable en environnement industriel de procéder à des essais élémentaires sur éprouvettes. Selon le rayon de courbure de la pièce, i.e., de la stratification du matériau, l'utilisation d'éprouvette haltère classique peut être problématique. Les équipes d'ArianeGroup ont alors mis au point une géométrie d'éprouvette haltère asymétrique qui permet de limiter la problématique de courbure des strates.

Abstract

ArianeGroup develops for the civil and military sectors a panel of technologies related to the systems of launch and space applications. Among these technologies, ceramic matrix composite materials are used to design specific parts submitted to extreme thermomechanical environments : the nozzle's throat and exit cone are parts of these applications. To produce these axisymmetric kinds of shapes, ArianeGroup uses a process which consists in realizing a pre-shape with a stratified fibrous reinforcement who is tied in the thickness using a transfer of fibers with a needling process, this pre-shape being later densified. The resultant structure of the constituting material makes the local orthotropic directions very close of the axisymmetric macroscopic shape. To characterize the circular direction of the final shape without using expansive technological tests, it is preferable in industrial environment to proceed to elementary tests on mechanical sample. Because of curvature in the stratification of the material, the use of classic dog-bone sample is problematic. The teams of ArianeGroup then developed a specific asymmetric geometry of test sample which allows to limit the problems of curvature.

Mots Clés : composites à matrice céramique, caractérisation, éprouvette, asymétrique

Keywords : ceramic matrix composite, characterization, asymmetric sample

1. Introduction

ArianeGroup développe et utilise des matériaux composites à matrice céramique (CMC) dans plusieurs applications de propulsion spatiale où les pièces sont soumises à des environnements thermomécaniques extrêmes. Les tuyères de moteurs nécessitent l'emploi de ce type de matériaux notamment pour les parties col et divergent (fig. 1). Pour réaliser les dimensionnements s'agissant de matériaux orthotropes, les ingénieurs doivent avoir à disposition leurs propriétés thermomécaniques dans les différentes directions et sollicitations élémentaires. Les propriétés macroscopiques étant fortement influencées par l'organisation de la microstructure, la caractérisation doit tenir compte du procédé de fabrication qui conditionne l'arrangement local du renfort fibreux. S'agissant des cols ou des divergents, ces pièces axisymétriques sont généralement

réalisées à partir d'une préforme de renfort fibreux qui est densifiée par la suite. Cette préforme est obtenue en enroulant un tissu ou nappes sur un mandrin axisymétrique. Les directions d'orthotropie du CMC final épousent alors la conicité de la pièce.

Pour caractériser le matériau, l'usinage d'éprouvettes élémentaires est privilégié au regard du coût d'un essai technologique plus conséquent en milieu industriel ; se pose alors la question de la représentativité des propriétés issues des dites éprouvettes. **Pour la direction circonférentielle notamment**, le rayon de courbure des strates peut fausser les propriétés extraites d'un essai sur éprouvette haltère classique. Pour limiter ces écarts, les équipes ArianeGroup ont réfléchi à une forme particulière d'éprouvette, permettant de tirer des valeurs plus représentatives des propriétés circonférentielles en restant dans le cadre d'un essai élémentaire peu couteux.

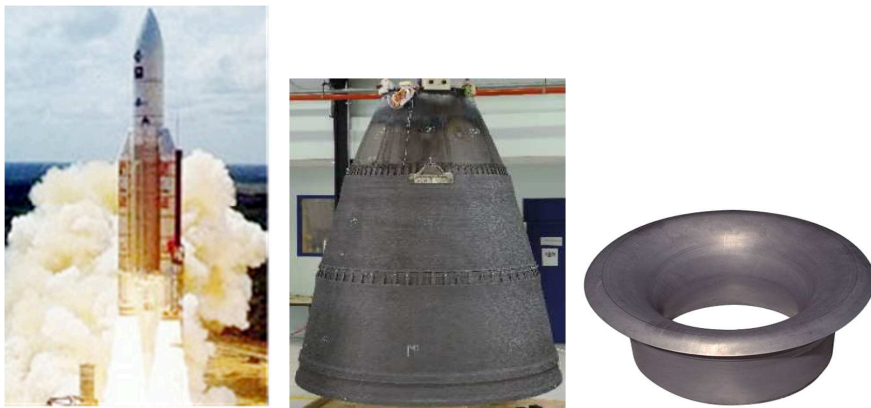


Fig. 1 : Lanceur Ariane5, divergent et col de tuyère en CMC ArianeGroup.

2. Contraintes expérimentales

Les pièces en CMC (divergent, col,...) doivent être dimensionnées pour un fonctionnement dans une plage de température large : généralement, de l'ambiante à plus de 2000°C. Pour cette raison, les caractérisations sont effectuées à l'aide de moyens dédiés (fig. 2) qui contraignent la configuration des essais notamment sur la taille/géométrie d'éprouvette.

En effet, pour les très hautes températures de caractérisation, les dispositifs de fours et les instrumentations associées (système de chauffe, étanchéité, thermocouples, extensométrie,...) limitent l'adaptabilité du moyen en termes de géométrie ou volume d'échantillon par rapport à ce que permet une caractérisation à l'ambiante.

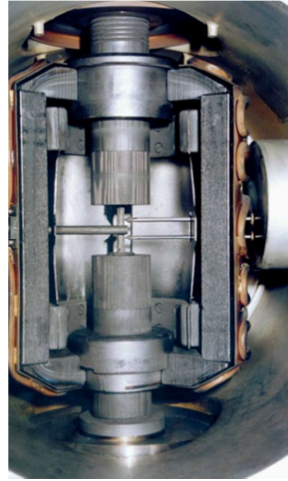


Fig. 2 : Exemple de configuration d'essai de traction à chaud sur éprouvette CMC.

En plus des considérations mécaniques sur la représentativité du volume de matériau testé, la taille (notamment minimale) et la géométrie des éprouvettes sont donc contraintes, ce qui entraîne des difficultés pour caractériser certaines pièces à partir de prélèvements in-situ.

3. Difficultés de caractérisation de la direction circonférentielle des pièces

Le procédé de fabrication des pièces axisymétriques en CMC produit une anisotropie matériau avec des directions privilégiées (orthotropie) qui correspondent peu ou prou au repère cylindro-conique de la pièce macroscopique. Une préforme en renfort fibreux est en effet réalisée sur un mandrin avec un enroulement de strates qui sont par la suite liées entre elles en transférant des fibres dans l'épaisseur par aiguilletage (fig. 3).

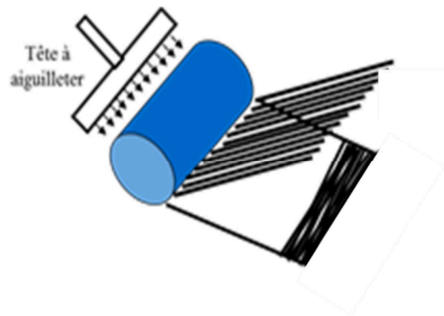


Fig. 3 : Schéma de principe du procédé de réalisation d'une préforme de divergent.

En fonction du rayon de courbure de la pièce, le prélèvement d'éprouvettes in-situ dans la direction circonférentielle peut devenir problématique pour la caractérisation. Il faut alors trouver un compromis entre longueur minimale d'éprouvette (déterminée par les contraintes expérimentales cf.§2) et par le rayon de courbure des strates du renfort qui perturbe les caractérisations élémentaires classiquement obtenues sur éprouvette haltère traditionnelle (recommandées par exemple par les normes *ISO15733* ou *ISO14574* traitant des essais de traction à température ambiante ou haute température ([1-4])). La figure 4 illustre cette problématique : la courbure des strates perturbe, et la caractérisation de la raideur, et celle de la rupture puisque la sollicitation ne suit pas strictement l'orientation matériau.



Fig. 4 : Zone utile d'une éprouvette haltère avec courbure des strates de renfort.

Les mécanismes pressentis, confirmés par l'expérimental et les approches calcul, montrent qu'on a effectivement à faire à des phénomènes de flexion induits qui génèrent des sollicitations hors-plan de type cisaillement-traction inter-strate.

4. Une géométrie alternative d'éprouvette élémentaire

Pour limiter au maximum l'éloignement à une sollicitation uniaxiale du matériau dans la direction souhaitée tout en respectant les contraintes de longueur d'éprouvette, les équipes ArianeGroup ont mis au point **une éprouvette haltère asymétrique**. Le principe est de limiter ou compenser par cette asymétrie les phénomènes de flexion induits par la courbure des strates. La figure 5 présente la dite géométrie et une image des calculs réalisés pour dimensionner l'éprouvette.

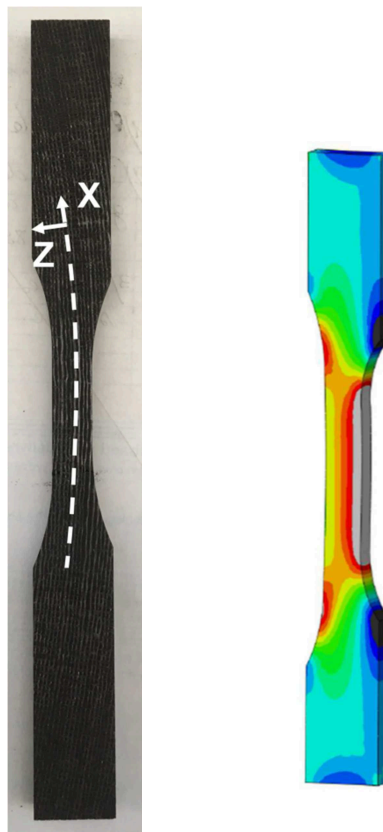


Fig.5 : Mise au point de l'éprouvette haltère asymétrique.

4.1 Apport de la simulation

Pour aider à définir la géométrie optimale de l'éprouvette asymétrique en fonction du rayon de courbure des strates, la simulation est utilisée. En introduisant un rayon de courbure dans l'orthotropie matériau, la géométrie est réglée de façon à limiter au maximum les effets indésirables des sollicitations hors-plan induites. Ont été examinés principalement les phénomènes suivants basés sur des rapports de contraintes :

- Maximiser la probabilité de rupture dans la direction des strates (sens X fig. 5) plutôt que pour du cisaillement inter-strates ;
- Favoriser une concentration de contrainte et donc une probable rupture en zone extensométrée plutôt qu'à proximité des congés ;
- Limiter les gradients de contraintes dans la zone utile.

4.2 Validation expérimentale

Les résultats obtenus sur la nouvelle géométrie axisymétriques ont été validés par des campagnes qui ont montré le bon comportement des éprouvettes :

- Ruptures en zone extensométrée au centre de la zone utile (fig. 6) ;
- Dispersion limitée des raideurs et/ou contraintes à rupture ;
- Validation des grandeurs extraites par rapport à l'essai de référence (fig. 7) à température ambiante :
 - o Raideur (module) comparable
 - o Contrainte à rupture légèrement inférieure sur l'éprouvette par rapport à celle de référence obtenue sur anneau pressurisé (fig.7).

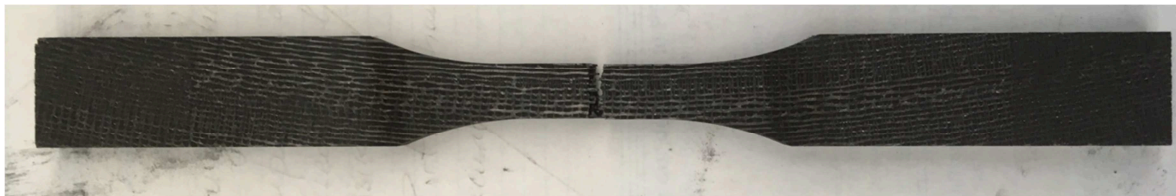


Fig. 6 : Eprouvette asymétrique avec rupture en zone utile.

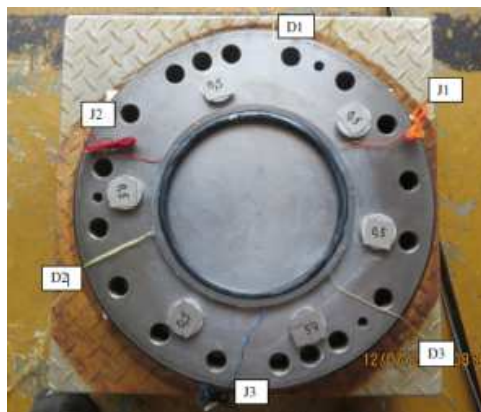


Fig.7 : Essai technologique d'anneau CMC pressurisé utilisé comme référence pour déterminer les propriétés mécaniques circonférentielles.

5. Conclusion et discussion

Cette étude présente une astuce permettant de caractériser mécaniquement, à partir d'éprouvettes haltères modifiées, un CMC présentant une stratification avec un rayon de courbure. La géométrie asymétrique proposée permet effectivement de procéder à des caractérisations élémentaires plus aisées, alternative essentielle en contexte industriel par rapport à des essais technologiques plus coûteux.

Bien évidemment cette alternative présente un certain nombre de limitations, notamment lorsque le rayon de la pièce à caractériser diminue. En l'espèce, la modification proposée permet d'augmenter (au sens de limite basse de rayon de courbure) la plage de caractérisation autorisée en gardant des dimensions d'éprouvettes élémentaires compatibles des moyens existants ; pour des pièces à petit rayon, des modifications plus importantes doivent être envisagées.

Références

- [1] ISO15733 : Mechanical properties of ceramic composites at ambient temperature in air atmospheric pressure - Determination of tensile properties
- [2] ISO14544 : Mechanical properties of ceramic composites at high temperature - Determination of compression properties.
- [3] ISO14574 : Mechanical properties of ceramic composites at high temperature - Determination of tensile properties
- [4] ISO20504 : Test method for compressive behaviour of continuous fibre-reinforced composites at room temperature