

Influence des tolérances de fabrication sur le comportement mécanique d'une structure sandwich CMC/céramique

Effect of manufacturing tolerances on the mechanical behaviour of a CMC/ceramics sandwich structure

Stéphanie Miot¹, Emilie Perret², Julien Lesseur¹, Céline Apeceixborde²,
Aurélien Debelle³, Frédéric Bumbieler³

1 : IRT Saint Exupéry
B612 - 3 rue Tarfaya 31400 Toulouse
e-mail : stephanie.miot@irt-saintexupery.com, julien.lesseur@irt-saintexupery.com

2 : IRT Saint Exupéry
Esplanade des arts et métiers 33405 Talence
e-mail : emilie.perret@irt-saintexupery.com, celine.apceixborde@irt-saintexupery.com

3 : ANDRA
Dir. Scientifique et Technique, 1 rue Jean Monnet 92290 Châtenay-Malabry
e-mail : aurelien.debelle@andra.fr, Frederic.Bumbieler@andra.fr

Résumé

Un chemisage en composite à matrice céramique (CMC) et céramique monolithique est à l'étude pour une éventuelle utilisation dans des micro-tunnels de stockage de déchets radioactifs. Des preuves de concept et des éprouvettes représentatives ont été fabriquées et testées mécaniquement. En parallèle, un modèle numérique est développé avec l'objectif final de concevoir un chemisage optimal vis-à-vis des contraintes de fabrication et des sollicitations en service.

Abstract

A liner made of Ceramic Matrix Composite (CMC) and monolithic ceramic is currently being studied for a potential use in the micro-tunnels of a radioactive waste geological disposal facility. Proves of concepts and representative specimens have been manufactured and mechanically tested. In parallel, a numerical model is being developed with the objective of designing an optimum liner in regard to the manufacturing constraints and the in-service load.

Mots Clés : Composite à matrice céramique, défauts de fabrication, endommagement

Keywords: Ceramic matrix composite, manufacturing defects, damage

1. Introduction

Le projet français nommé Cigéo [1], conduit par l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), a pour objectif de concevoir et gérer une solution de stockage géologique profond pour les déchets radioactifs de moyenne activité à vie longue et de haute activité (HA). Les déchets HA devraient être placés dans des micro-tunnels horizontaux, creusés à 500 m de profondeur. Un chemisage sera alors inséré afin de faciliter la mise en place des colis de déchets et leur éventuelle récupération avant la fermeture du site, prévue *a minima* 100 ans plus tard. Afin d'accroître les marges de sécurité au-delà des exigences actuelles, un chemisage en céramique pourrait remplacer les chemisages en acier, réduisant ainsi la production d'hydrogène issu de la corrosion de l'acier en condition anoxique. Pour assurer la tenue mécanique nécessaire sans atteindre des coûts de production prohibitifs, une solution alliant céramique monolithique (relativement peu onéreuse mais fragile) et composite à matrice céramique (CMC, plus ductile que la céramique mais cher) est proposée [2].

Cette solution sandwich est constituée de peaux en CMC et d'une âme en céramique dense. Pour fabriquer les chemisages, des pièces tubulaires d'environ 2 à 3 m de long et 700 mm de diamètre, l'âme est divisée en secteurs. Des éprouvettes technologiques représentatives annulaires (ETRA) ont été conçues pour analyser le comportement mécanique de la structure sandwich. Un exemple d'ETRA à 3 secteurs est présenté en Figure 1. L'ETRA a été fabriquée en associant une âme en alumine à des peaux en CMC à fibres de carbone (PyroKarb®).

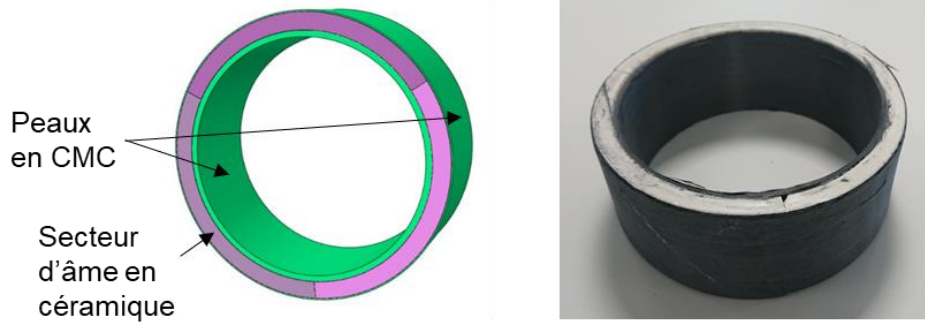


Fig. 1. Eprouvette Technologique Représentative Annulaire (ETRA) – A gauche, le modèle, à droite, l'ETRA fabriquée

En service, le chemisage sera soumis à une pression de contact appliquée par le milieu confinant, non uniformément répartie sur sa surface externe à court terme, puis qui tend à s'homogénéiser à plus long terme. Cette sollicitation, dépendante de la réponse du chemisage lui-même, est gouvernée par la réponse mécanique de la roche hôte au creusement du micro-tunnel ainsi qu'à la sollicitation thermique générée lors de la mise en place des colis de déchets [3]. Elle n'est donc pas connue à ce stade du projet pour des chemisages en céramique. Pour étudier la tenue mécanique de la solution sandwich, deux types d'essais sont envisageables :

- Un essai de confinement consistant à appliquer une pression uniformément distribuée sur toute la surface externe de la structure.
- Un essai de compression représentant un chargement anisotrope particulièrement sévère.

Les conditions en service consisteront en une combinaison des deux modes de chargements : confinement et compression. L'intérêt de l'essai de compression, du fait que la sollicitation est localisée, est double : (i) l'espace nécessaire à la mise en place d'instruments de mesures, tels que des caméras, est disponible (cf. Fig. 2) et (ii) le chargement est fortement sévéré, évitant ainsi de surestimer les performances de la structure.

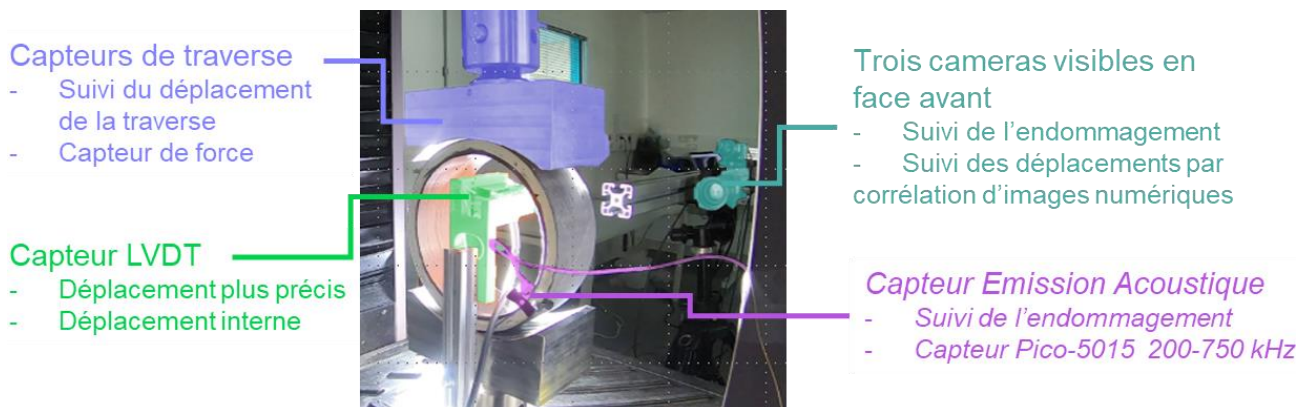


Fig. 2. Essai de compression instrumenté sur une ETRA

2. Analyse des éprouvettes technologiques représentatives annulaires (ETRA)

Une analyse préliminaire du comportement des ETRA sous chargement de compression a été réalisée à partir d'un modèle paramétrique. Les variations dimensionnelles, voulues ou non, ainsi que les défauts d'adhésion entre les peaux et l'âme et les défauts de position des secteurs d'âme ont été étudiées. L'analyse numérique a clairement montré l'incidence des défauts de fabrication sur les modes de rupture et leur localisation [4].

Afin d'approfondir l'analyse par modélisation, des ETRA ont été fabriquées par enroulement filaire en faisant varier les paramètres de conception (dimension, orientation du matériau CMC, etc...) et de fabrication (tension de la mèche, emport de matrice, etc...). Les ETRA ont ensuite été numérisées par micro-tomographie à rayons X à une résolution de 50 μm / voxel. L'objectif était d'identifier les variations géométriques et les défauts de fabrication pour les intégrer dans le modèle numérique. Ainsi, une méthode de segmentation des images et de reconstruction de la géométrie a été mise en place. La segmentation repose sur un algorithme d'apprentissage profond (*U-Net*) appliqué au volume brut. Par rapport à des méthodes de traitement d'images plus conventionnelles, le modèle ici développé permet de séparer directement les trois éléments que sont les peaux interne, externe et l'âme tout en conservant des détails fins (décollements peau / âme), sans étape intermédiaire. La méthode requiert de nombreuses annotations (étape manuelle) mais la représentativité est rapidement atteinte (70 patches de 1024x1024 soit 0.6% du volume annoté). La Figure 3 présente le volume brut et le volume labellisé avec une identification précise des 3 éléments. Un quatrième élément, l'air, est également labellisé afin de mettre en évidence les décollements et/ou jeux entre les éléments. La précision de la segmentation peut être améliorée en augmentant les données d'apprentissage, notamment pour la gestion des séparations entre les secteurs d'âme. Bien qu'il n'y ait pas de colle entre les secteurs, leur proximité rend parfois la délimitation très peu visible, en limite de résolution (effet de volume partiel).

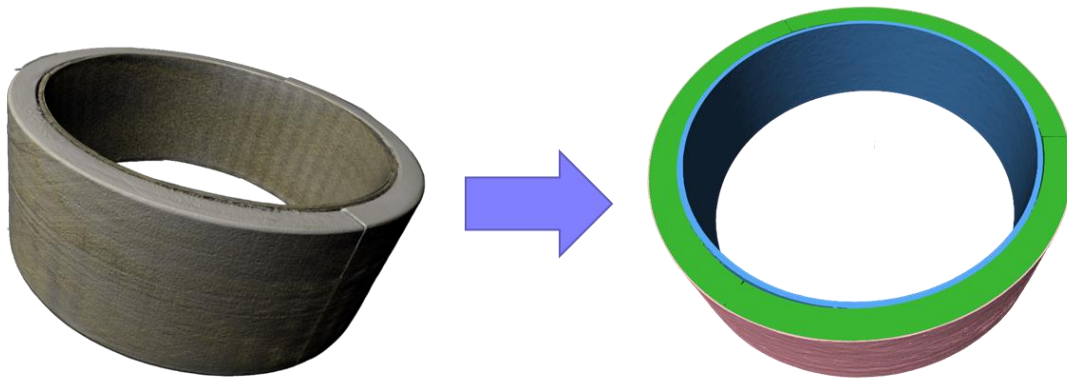


Fig. 3. Segmentation des images obtenues par micro-tomographie à rayons X. A gauche, le volume brut, à droite, les 3 éléments (peau interne, peau externe et âme) correctement identifiés par l'algorithme U-Net

L'étape suivante consiste à créer un modèle par éléments finis (EF) à partir des images labellisées. Deux méthodes sont à l'étude, permettant soit de générer un maillage tétraédrique (cf. Fig. 4), soit un maillage parallélépipédique. Le maillage tétraédrique est obtenu directement à partir de la segmentation. Cependant, la taille et le type des éléments sont limitants. Le maillage est en effet réalisé avec des éléments tétraédriques et le nombre total d'éléments dépasse les 2 millions, ce qui rend les calculs très coûteux en ressources et en temps. La distinction entre les plis des peaux n'est pas possible, les propriétés mécaniques du CMC sont donc homogénéisées à l'échelle de chaque peau. Ce maillage peut être utilisé pour estimer les déviations par rapport à la géométrie nominale de l'ETRA et caractériser l'adhésion entre les peaux et l'âme comme le montre la Figure 4.

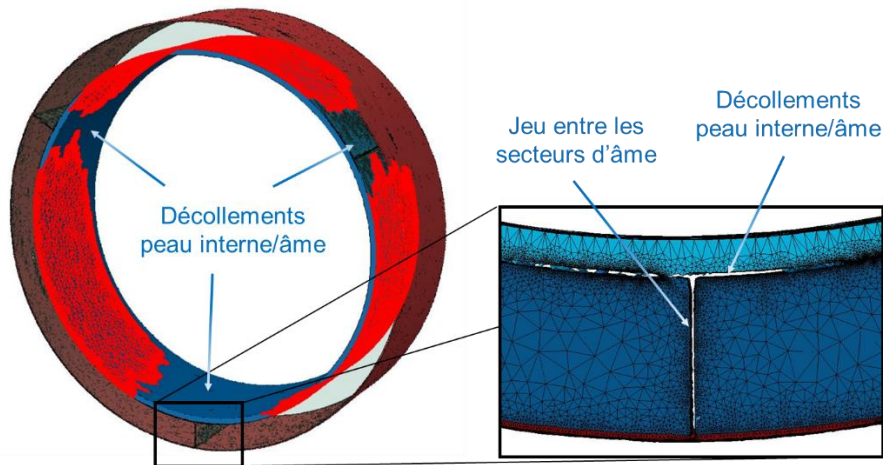


Fig. 4. Mise en évidence des défauts de fabrication grâce à la reconstruction d'un maillage à partir d'images de microtomographie X

La méthode de génération du maillage parallélépipédique est encore en développement. Une des difficultés principales est liée à la géométrie des peaux présentant des ondulations et variations d'épaisseurs locales. Une géométrie recrée à partir de l'image segmentée serait trop complexe pour générer un maillage régulier contenant uniquement des hexaèdres. L'idée est alors de générer le maillage directement à partir de l'image segmentée, sans créer de géométrie intermédiaire. A partir des voxels, donc, des cubes, un maillage parallélépipédique peut être généré. Un algorithme est développé pour grouper les voxels selon un facteur de déraffinement choisi afin de générer un élément tout en assurant un lissage des contours aux interfaces entre les peaux et l'âme. Le modèle ainsi obtenu permettra de définir les propriétés des CMC à l'échelle du pli, et pourra intégrer des lois de comportement non linéaires pour simuler l'initiation et la propagation d'endommagement, dans le CMC et à l'interface entre les peaux et l'âme. Ces lois d'endommagement sont à identifier pour les différents matériaux choisis pour fabriquer les ETRA, et à terme, les chemisages. Plusieurs matériaux sont en effet considérés et une étude comparative permettra de déterminer les matériaux résistants au chargement mécanique induit par l'environnement rocheux mais également, aux conditions chimiques dans le proche environnement du composant [5].

3. Essais de compression sur ETRA

L'essai de compression (cf. Fig. 2) consiste à positionner l'ETRA entre deux surfaces de chargement courbes et à appliquer un chargement cyclique vertical de compression avec un pilotage en déplacement. Comme précisé précédemment, ce chargement de compression est plus sévère que le chargement qui sera appliqué aux chemisages dans un micro-tunnel puisqu'il impose un chargement sur deux régions très localisées de la pièce (en théorie, deux lignes), sur ses parties supérieure et inférieure. Le reste de l'ETRA est libre de se déformer, ce qui se traduit par des sollicitations locales de flexion. Les contraintes de traction induites sont critiques pour l'âme en céramique monolithique. Le confinement attendu dans les micro-tunnels induit un chargement, certes réparti sur toute la surface externe du chemisage, mais non uniforme. Par conséquent, la structure n'est pas uniquement soumise à des contraintes de compression. Il est possible que des régions soient sollicitées en traction. C'est pourquoi l'essai de compression sur ETRA est pertinent pour évaluer les limites mécaniques de la structure sandwich.

Plusieurs configurations d'essais sont considérées, en faisant varier la position des jonctions entre les secteurs en céramique par rapport à la direction du chargement. La Figure 5 illustre le cas d'une ETRA positionnée de façon à respecter une symétrie verticale. Les résultats des mesures de force, de déplacement, et l'analyse par corrélation d'images numériques (CIN) y sont présentés.

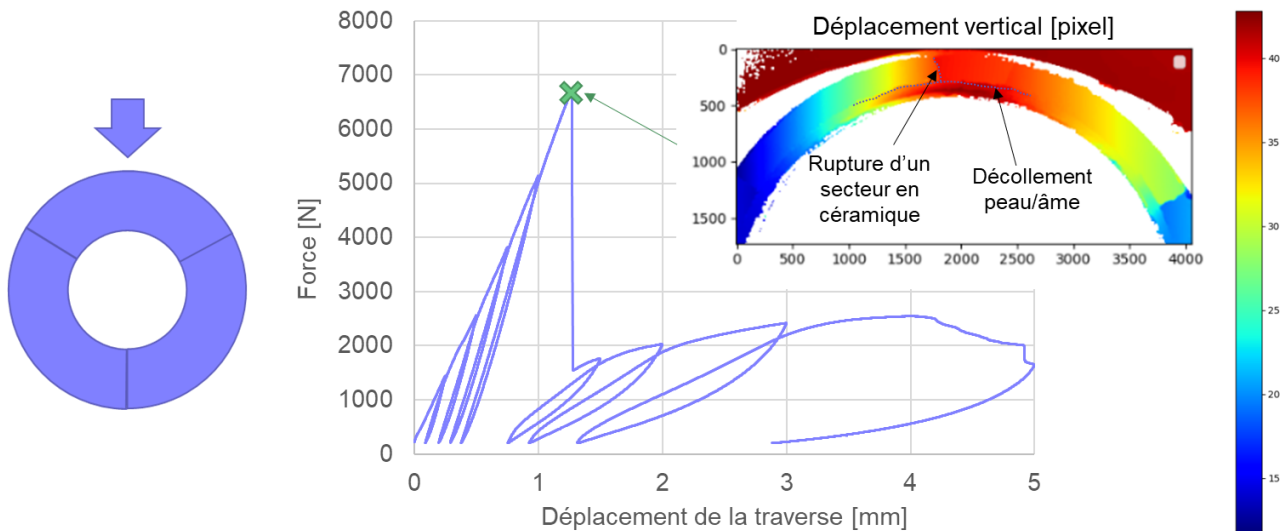


Fig. 5. Réponse mécanique d'une ETRA soumise à un chargement de compression

Initialement, la réponse de l'ETRA est assez proche d'une réponse linéaire élastique. On note toutefois de faibles déformations résiduelles après chaque déchargement. Un événement conduit à une chute brutale de l'effort lorsque le déplacement appliqué atteint 1,27 mm puis le comportement change et s'apparente alors à un comportement ductile. Les déformations résiduelles augmentent et les boucles d'hystérésis deviennent plus importantes. La CIN a permis d'identifier cet événement. On observe en effet une discontinuité dans le champ de déplacements correspondant à une fissure dans le secteur supérieur. On note également un décollement entre la peau interne et l'âme au niveau de cette fissure. Cet endommagement significatif est à l'origine du changement de comportement de la structure. Des glissements sont alors possibles, permettant des déplacements plus importants et apportant une certaine ductilité à la structure. Malgré cet endommagement, l'intégrité de la structure n'est pas compromise, l'éprouvette reprenant en effet la charge progressivement. Aucun autre événement significatif n'est apparu au cours de cet essai. Une ovalisation de 5 mm sur un diamètre d'ETRA de 160 mm a été atteinte, soit une sollicitation bien plus critique que celle estimée pour le chemisage dans des conditions en service (ovalisation de ~10 mm sur un diamètre de chemisage de ~700 mm).

4. Conclusion

Les travaux ici présentés concernent le développement d'un chemisage qui pourrait être utilisé dans des tunnels de stockage de déchets radioactifs. Pour cette application, une architecture spécifique a été mise au point, combinant une céramique monolithique jouant le rôle de l'âme d'une chemise et un composite CMC à l'intrados et à l'extrados de cette âme apportant un renfort mécanique. Afin de caractériser et prédire le comportement mécanique de ce sandwich, une méthode d'analyse a été développée et appliquée. Des éprouvettes représentatives ont ainsi été conçues et un essai autorisant une instrumentation riche a été mis en place afin d'évaluer le comportement de la structure dans un

cas de chargement sévéré par rapport aux conditions en service. Les premières observations ont confirmé la pertinence de l'essai de compression pour identifier les performances mécaniques de la structure sous sollicitation locale de flexion. L'instrumentation associant CIN et émission acoustique a permis d'identifier les modes d'endommagement et de rupture des différents matériaux. Une méthode pour générer des modèles EF à partir d'images de micro-tomographie X est en cours de développement afin d'apporter des éléments de compréhension supplémentaires, l'objectif étant en effet d'évaluer l'influence des défauts de fabrication sur les performances mécaniques de la structure dans son ensemble. La complexité inhérente à l'élaboration des ETRA implique des variations dimensionnelles de ces éprouvettes et une qualité d'adhésion peau/âme incertaine. Des tolérances devront donc être définies pour encadrer la production des chemisages.

Les prochaines étapes incluent :

- la caractérisation du matériau CMC obtenu par enroulement filamentaire ; des essais de flexion sur éprouvettes courbes sont en développement,
- une intégration dans le modèle du nouveau maillage, des propriétés du CMC et de lois de comportement pour décrire l'endommagement du CMC et de l'interface peau/âme.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet CAMISole (Composite A Matrice Inorganique pour le Stockage géologique) porté par l'IRT Saint Exupéry. Les auteurs remercient les membres du projet : l'Andra et le LCTS (Laboratoire des Composites ThermoStructuraux).

Références

- [1] Andra, The Cigéo project. <https://international.andra.fr/solutions-long-lived-waste/cigeo>.
- [2] E. Perret, S. Miot, M. Box, R. D'Elia. Pièce cylindrique à structure sandwich, procédé de fabrication d'une telle pièce et son utilisation pour le stockage de déchets radioactifs. France, N° de brevet: FR3115533A1. 2023. (hal-04329451)
- [3] Bumbieler F, Plua C, Vu MN, Armand G, Assessment of a full-scale in-situ heater experiment based on the French high-level waste disposal cell concept conducted in the Callovo-Oxfordian claystone. *Tunnelling and Underground Space Technology* 153 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106004>
- [4] S. Miot, E. Perret, M. Box, A. Debelle. A new sandwich solution combining CMC and ceramics for the liner of radioactive waste disposal cells. 21st European Conference on Composite Materials (ECCM21), July 2024, Nantes, France.
- [5] G. German, E. Perret, F. Rebillat et al. Aging mechanisms of ceramic matrix composites. 21st European Conference on Composite Materials (ECCM21), July 2024, Nantes, France.