



**HAL**  
open science

## **Etude multi-échelle du matériau SiC-SiC / MI et application sur pièces aéronautiques**

Sébastien Denneulin, Guillaume Couégnat, Vincent Mazars, Jean Benezech,  
Olivier Caty, T. De Revel, Gérard Vignoles

### ► **To cite this version:**

Sébastien Denneulin, Guillaume Couégnat, Vincent Mazars, Jean Benezech, Olivier Caty, et al.. Etude multi-échelle du matériau SiC-SiC / MI et application sur pièces aéronautiques. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. <hal-02421459>

**HAL Id: hal-02421459**

**<https://hal.science/hal-02421459v1>**

Submitted on 20 Dec 2019

**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.



HAL Authorization

## **Etude multi-échelle du matériau SiC-SiC / MI et application sur pièces aéronautiques**

### ***Multi-scale study of SiC-SiC / MI material and application to aeronautical components***

**S. Denneulin<sup>1</sup>, G. Couégnat<sup>2</sup>, V. Mazars<sup>1,2</sup>, J. Bénézech<sup>1,2</sup>, O. Caty<sup>2</sup>, T. Revel<sup>1</sup>, G.L. Vignoles<sup>2</sup>**

1: Safran Ceramics, a technology platform of Safran Tech,  
105 avenue Marcel Dassault 33700 Mérignac, France  
e-mail : sebastien.denneulin@safrangroup.com

2 : Laboratoire des Composites Thermostructuraux,  
CNRS/Univ. Bordeaux/Safran/CEA,  
3 allée de la Boétie, 33600 Pessac, France

### **Résumé**

L'introduction des technologies composites dans les zones chaudes des moteurs d'avion est devenue une réalité sur le moteur LEAP. Dans ce contexte de céramisation des moteurs, le groupe SAFRAN développe des technologies en composite à matrice céramique (CMC), reposant sur la densification par voie liquide ou gazeuse de préformes textiles obtenues par tissage 3D. Afin de comprendre le comportement mécanique de ces matériaux et de ces pièces, il est nécessaire d'établir les liens existants entre leur architecture aux différentes échelles et leur comportement thermomécanique global et local. Les études multi-échelles permettent d'une part de définir des critères multiaxiaux d'endommagement, mais aussi d'optimiser l'architecture du matériau et des pièces. La pertinence des approches multi-échelles (modélisations et essais expérimentaux) pour les matériaux CMC a été démontrée sur le comportement élastique via plusieurs travaux à l'échelle du Volume Élémentaire Représentatif VER [1,2]. Les objectifs ici sont d'une part de rendre ces outils plus robustes pour qu'ils soient utilisables pour les concepteurs matériau mais aussi en bureau d'étude sur des pièces [3] et, d'autre part, d'étendre le domaine de validité aux comportements non-linéaires (endommagements, fluage, ...) [4].

### **Abstract**

The use of ceramic matrix composite technologies in the hot areas of aircraft engines has become a reality on the LEAP engine. In this context, SAFRAN Group develops technologies in Ceramic Matrix Composite (CMC), based on liquid and/or CVI densification of textile preforms obtained by 3D weaving. To understand the mechanical behavior of these materials and parts, it is necessary to understand the links between their architecture at different scales and their global and local thermomechanical behavior. Multi-scale studies allow us to define multiaxial damage criteria and optimize the architecture of the material and parts. The relevance of multi-scale approaches (modeling and testing) for the CMC materials has been demonstrated on the elastic behavior via several works on the scale of the VER [1, 2]. The objectives here are, on the one hand, to make these tools more robust so that they can be used by parts designer [3], and on the other hand to extend the area of validity to non-linear behaviors (damage, creep ...) [4].

**Mots clés :** SiC /SiC, multi-échelle, modélisation, essai

**Keywords :** SiC /SiC, multi-scale, modeling, test

## 1. Introduction

L'introduction des technologies composites dans les zones chaudes des moteurs d'avion est devenue une réalité sur le moteur LEAP. Dans ce contexte de céramisation des moteurs, le groupe SAFRAN développe des technologies en composite à matrice céramique (CMC), reposant sur la densification par voie liquide ou gazeuse de préformes textiles obtenues par tissage 3D.

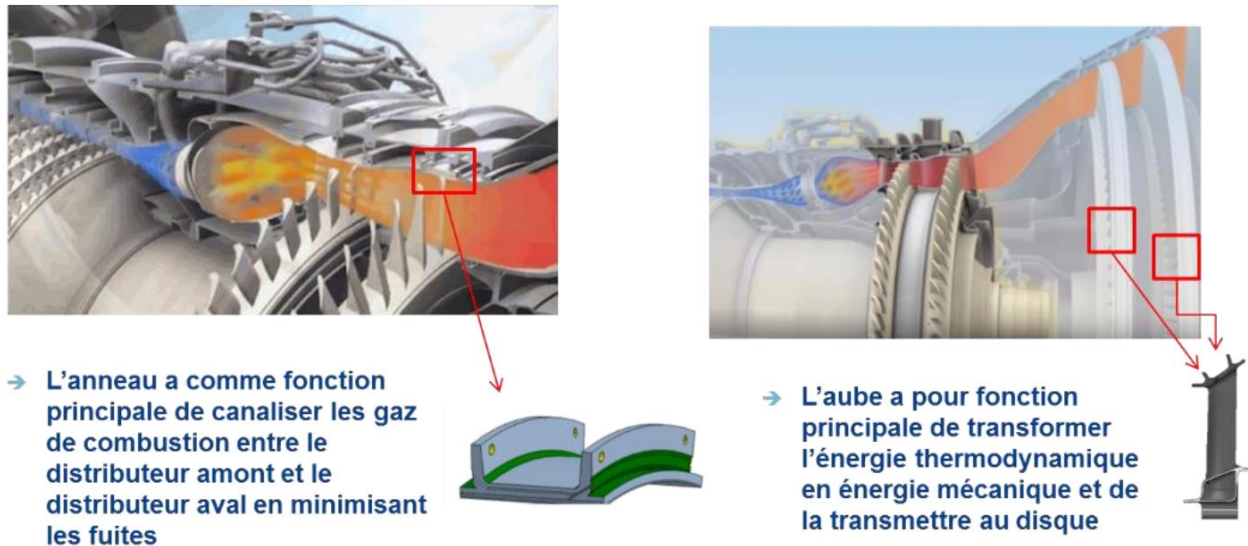


Fig. 1 - Exemple d'application de pièces en composite à matrice céramique

Afin de comprendre le comportement mécanique de ces matériaux et de ces pièces (Fig. 1), il est nécessaire d'établir les liens existants entre leurs architectures aux différentes échelles et leurs comportements thermomécaniques. Ces études multi-échelles permettent d'une part de définir des critères multiaxiaux d'endommagement permettant de dimensionner et justifier des pièces, mais aussi d'optimiser l'architecture du matériau et des pièces.

Pour cela, il est nécessaire de développer de nouvelles méthodes basées sur la description du matériau (tomographie, études morphologiques statistiques, ...), la modélisation (linéaire et non linéaire) et la validation des essais (*ex situ* et *in situ*). Safran développe en interne et avec ses partenaires académiques des outils numériques et expérimentaux permettant de répondre à ces enjeux. Ces démarches sont identifiées comme clés par de nombreux acteurs institutionnels, académiques et industriels comme en témoigne, par exemple, la feuille de route 2040 établie par la NASA [5] ou la revue écrite par Teledyne Scientific sur les approches virtuelles développées dans le cadre de CMC [6].

La pertinence des approches multi-échelles via la modélisation et les essais (Fig 2) pour les matériaux CMC a été démontrée sur le comportement élastique via plusieurs travaux à l'échelle du VER [1,2]. Les objectifs ici sont d'une part de rendre ces outils plus robustes pour qu'ils soient utilisables pour les concepteurs matériau mais aussi en bureau d'étude sur des pièces [3] et, d'autre part, d'étendre le domaine de validité aux comportements non-linéaires (endommagements, fluage, ...) [4].

## 2. Présentation des matériaux de l'étude

Les matériaux étudiés dans cet article sont des composites à matrice céramique (CMC) à base de carbure de silicium. Le renfort est un tissé 3D à base de fils Hi-Nicalon Type-S recouverts d'une interphase de pyrocarbone ou de nitrure de bore. La matrice est constituée de carbure de silicium déposé par CVI et/ou d'une matrice de Si/SiC obtenue par infiltration en voie liquide (Fig 2).

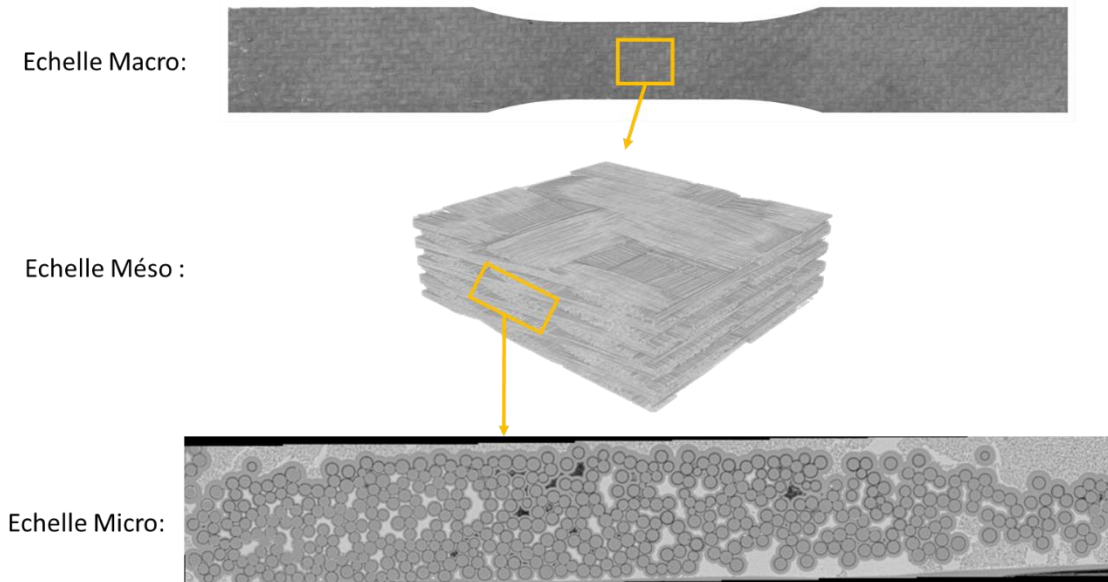


Fig. 2 - Présentation du matériau étudié aux différentes échelles: (a) éprouvette macroscopique, (b) tomographie de la préforme consolidée, (c) microstructure au stade final

Le matériau de l'étude présente un comportement élastique endommageable obtenu par une subtile association de filaments et de matrice (tous deux fragiles) séparés par une interphase d'épaisseur nanométrique jouant le rôle de fusible mécanique. Cette association de constituants élémentaires fragiles présente une bonne tolérance aux dommages et une ténacité nettement supérieure à un matériau fragile. Cela est rendu possible par la capacité du matériau à se multi-fissurer sous sollicitations thermomécaniques, qui en contrepartie conduit à la dégradation progressive de ses propriétés effectives.

Bien que le domaine de stabilité thermique des propriétés du CMC SiC/SiC soit plus vaste que celui des alliages métalliques, la diminution des propriétés élastiques et l'apparition de mécanismes de fluage sont observés pour des températures élevées respectivement de l'ordre de 1000 °C et 1300 °C.

## 3. Description de l'approche multi-échelle

Safran Ceramics a mis en place une approche multi-échelle afin (i) d'accélérer les cycles de conception des matériaux et des pièces et (ii) d'aider à la justification des pièces, et dans certains cas contribuer à leur certification (Fig 3). Cette approche multi-échelles traite de la simulation des procédés, de la description statistique des caractéristiques matériaux et des pièces, de la modélisation du comportement et de la validation par des essais, tout en assurant au maximum la continuité numérique. Une collaboration étroite entre les différents partenaires impliqués dans les projets de recherche du groupe Safran permet d'intégrer rapidement les développements académiques.

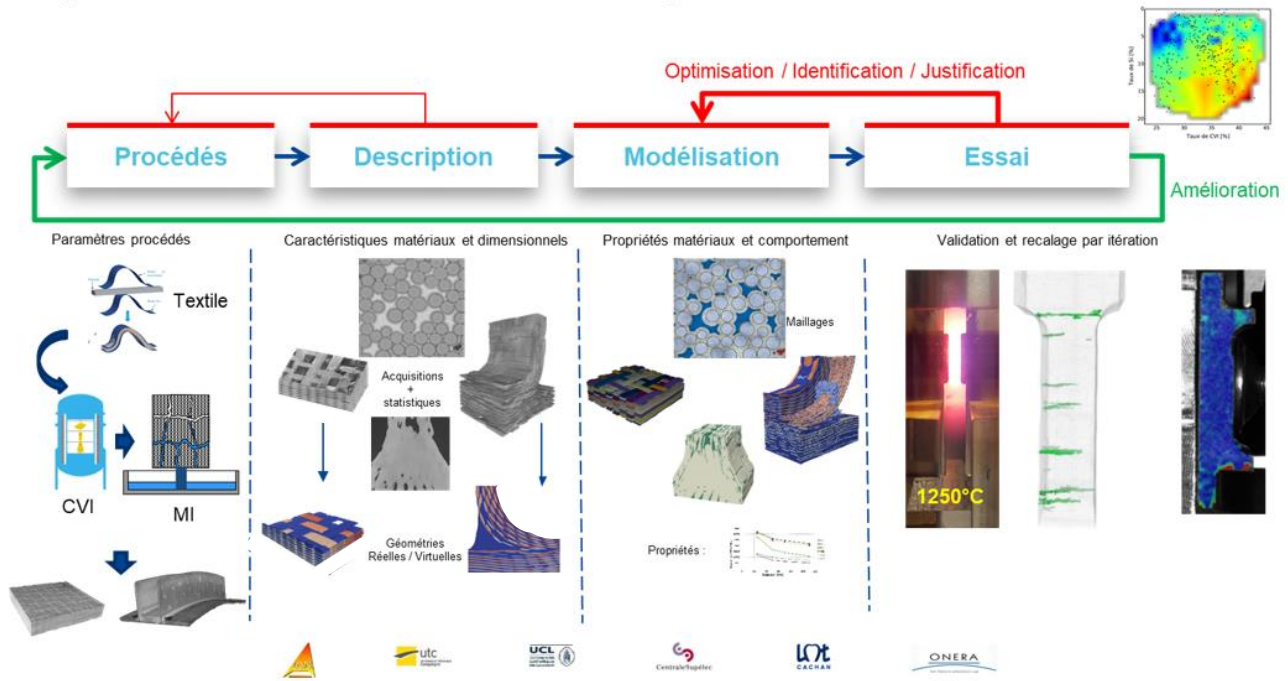


Fig. 3 – Approche multi-échelle et essais in situ

Bien que toutes ces thématiques soient imbriquées, le découpage proposé ici permet de structurer l’activité en différentes thématiques bien identifiées : procédés, description du matériau, modélisation et essais. Les trois dernières thématiques sont abordées dans cet article.

### a. Description

Lorsque l’on travaille sur un matériau complexe et structuré à plusieurs échelles, où les caractéristiques à l’échelle microscopique ont des effets sur l’échelle macroscopique, il est nécessaire de décrire le matériau à ces différentes échelles. Une description est par définition une approximation de la réalité et doit prendre en compte des hypothèses simplificatrices [6, 7]. De plus, afin d’évaluer la sensibilité des modèles lors de la remontée des échelles, il est nécessaire d’avoir une description statistique [7, 8, 9].

La constitution de ces bases de données nécessite la mise en œuvre de nombreux moyens de contrôle, comme la microscopie optique ou électronique, la micro-tomographie X et le contrôle dimensionnel par stéréovision.

### b. Modélisation

La modélisation nécessite le développement et l’utilisation de lois de comportement avancées prenant en compte l’anisotropie, la thermoélasticité, l’endommagement et le fluage. Les simulations associées s’appuient sur la génération de maillages constituant une approximation de la géométrie, sur les propriétés (et lois de comportement) des constituants et sur l’application de conditions aux limites pertinentes. Nous traiterons dans cet article de la question du maillage et de celle de l’endommagement.

#### i. Génération du maillage

A partir de la description géométrique du matériau ou de la pièce, une étape importante consiste à obtenir un maillage approximant au mieux la géométrie tout en limitant les discontinuités. Cet axe de

recherche est très actif dans le milieu des composites à matrice organique où il est possible de trouver une littérature bien fournie.

Les méthodes de type voxel [10,12,13,14], qui consistent à découper le composite en une grille régulière avec des éléments hexaédriques, permettent de gérer les interpénétrations et d'obtenir des propriétés homogénéisées satisfaisantes. Cependant, elles génèrent des concentrations de contraintes qui pénalisent fortement l'utilisation de lois non-linéaires (endommagement, fluage, ...) [15,16]. Des post-traitements avec des méthodes de régularisation permettent d'améliorer les résultats obtenus (par exemple ceux portant sur l'initiation de l'endommagement), mais ils peuvent néanmoins dans certains cas amplifier des sur-contraintes non physiques [16]. Initialement développées dans le domaine médical [17,18,19], plusieurs stratégies existent pour lisser les voxels du maillage. On ne trouve que peu d'applications sur les composites tissés [20] de cette voie pourtant prometteuse.

Les méthodes de maillage conforme permettent de limiter fortement les discontinuités géométriques mais se trouvent confrontées, pour des architectures complexes, à des problèmes d'interpénétration. Plusieurs techniques utilisées consistent à utiliser une couche de matrice autour des fils ou à corriger localement la forme des sections de fils en contact [21,22]. Ceci se fait au détriment des taux de renforts et de la robustesse.

Des méthodes intermédiaires basées sur des images 3D segmentées (issues de tomographie ou de modèle géométrique) permettent de générer un maillage tétraédrique. Il s'agit de la méthode de Marching Cube [23] qui permet d'abord d'obtenir un maillage 3D surfacique. Ce maillage est ensuite transformé en maillage volumique par une méthode d'avancée de front [24]. Une autre méthode, basée sur le raffinement de Delaunay, permet d'obtenir un maillage 3D par raffinement successif tout en respectant les frontières entre deux domaines [25].

## ii. Endommagement

Concernant la modélisation de l'endommagement, de nombreuses méthodes sont disponibles, allant de la mécanique de la rupture [26,27] à la mécanique de l'endommagement [28,29] en passant par des méthodes avancées comme l'Augmented Finite Element Method (A-FEM) [30,31,32]. L'objet n'est pas de présenter une liste exhaustive des méthodes disponibles, mais des choix de modélisation effectués pour nos problématiques sur les matériaux CMC.

Basés sur des résultats d'essais *in situ* [33,34], les mécanismes d'endommagement dans le composite SiC/SiC tissé 3D ont été identifiés. Il s'agit principalement de fissuration dans les fils transverses au chargement. Des essais de traction réalisés sous MEB [35] montrent ces fissures intra-fils sont générées à la suite de décohésions au niveau de l'interphase et de la fissuration de la matrice intra-fils. L'endommagement à l'échelle mésoscopique apparaît dans les fils transverses, mais également dans la matrice inter-fils. Il est donc nécessaire de disposer de modèles permettant de simuler l'endommagement aux échelles microscopique et mésoscopique. Les simulations réalisées sur pièces nécessitent quant à elles des modèles à l'échelle macroscopique.

Une stratégie de modélisation micro-méso est proposée par V. Mazars [36] pour simuler les mécanismes d'endommagement. Elle se base, à l'échelle microscopique, sur l'utilisation de modèles de zones cohésives (MZC) aux interfaces et de lois d'endommagement continues au sein des éléments volumiques (Fig-4).

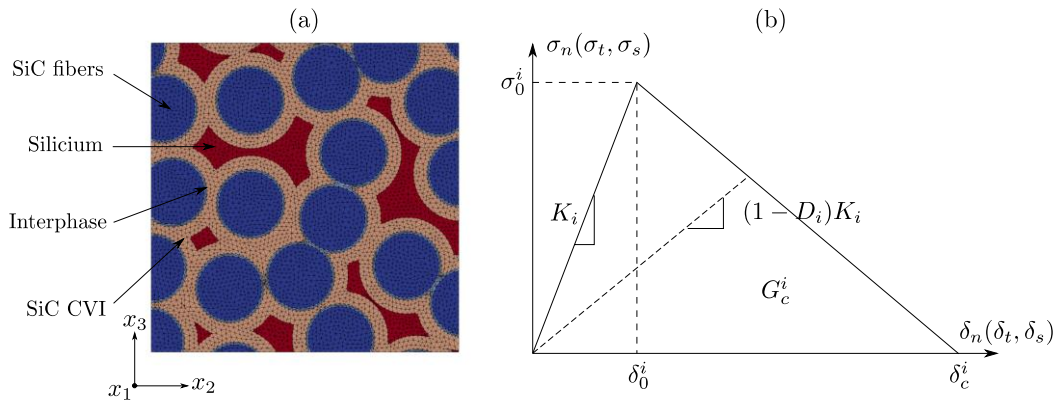


Fig. 4 - (a) Volume élémentaire représentatif et (b) loi de comportement bi-linéaire utilisée pour les MZC et pour les éléments volumiques [36].

En simulant plusieurs cas de chargement sur un ensemble de cellules micro virtuelles, une loi de comportement endommageable à l'échelle mésoscopique est identifiée. Cette loi est ensuite utilisée pour les fils à l'échelle supérieure.

Une autre stratégie consiste à utiliser une méthode G-FEM multi-échelle [37,4]. Cette méthode d'éléments finis généralisés se situe à mi-chemin entre les méthodes de décomposition de domaine, qui effectuent un calcul précis par sous-structures, et les méthodes d'homogénéisation, qui permettent d'obtenir un matériau homogène dont le comportement global est le même que la structure réelle en raisonnant par des quantités moyennes.

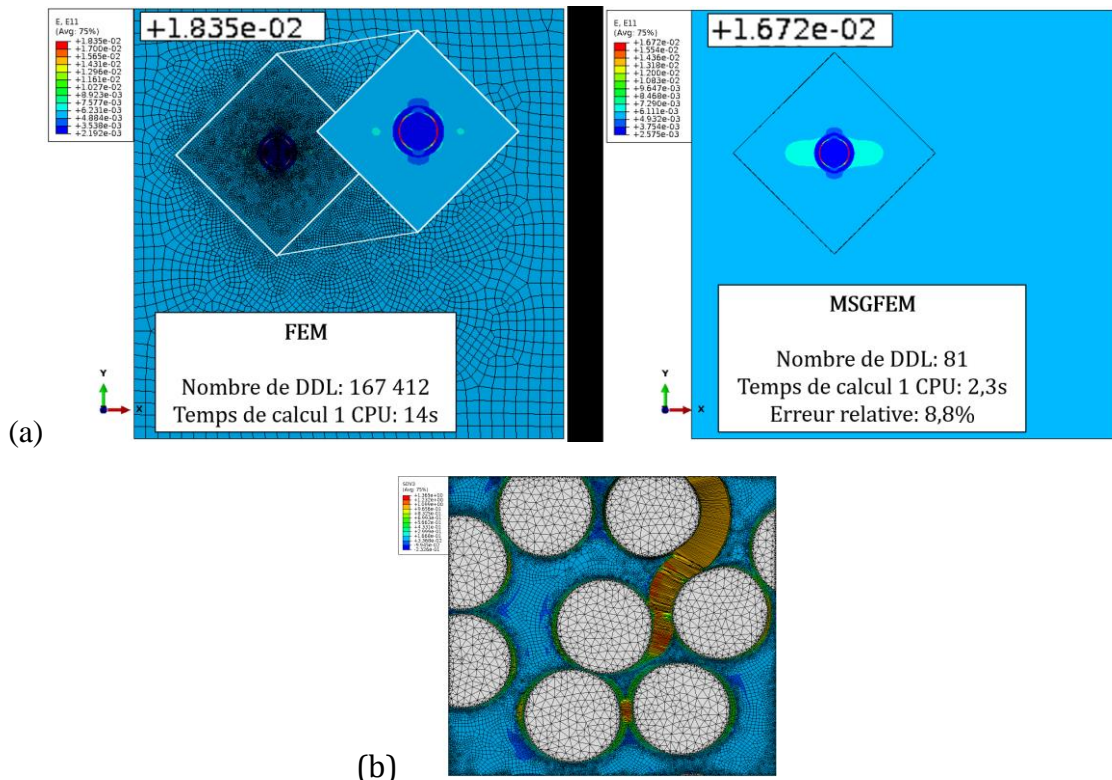


Fig. 5 - (a) Champ de déformation  $E_{11}$  obtenu pour un essai de traction horizontale sur une plaque homogène dans laquelle se trouve une fibre avec son interphase et le SiC CVI. (b) Profil de fissures obtenues par une méthode phasefield. [4]

Cette méthode semble particulièrement intéressante pour traiter l'aspect stochastique de l'échelle microscopique, voire de l'échelle mésoscopique.

L'endommagement à l'échelle mésoscopique est traité dans un premier temps, par l'utilisation de lois continues d'endommagement pour le toron et la matrice. Afin de réduire la dépendance au maillage, les lois sont régularisées par la longueur caractéristique des éléments de maillage [2]. L'introduction de zones cohésives ou de fissures préexistantes est également une stratégie possible [38] pour traiter l'endommagement à l'échelle mésoscopique.

Une méthode de calcul multi-échelles pour traiter des cas d'échelles non-séparées, à mi-chemin entre les approches d'homogénéisation multi-échelles et de décomposition de domaines, est proposée par Le [39]. Cette méthode, en cours de développement, n'est pas encore appliquée sur des CMC. En revanche, un cadre de modélisation méso-macro, où le comportement des macro-éléments est déduit de la connaissance de la direction et des fractions volumiques locales de constituants grâce à la segmentation de l'échelle méso, a été mis en place sur pièce CMC. Les lois de comportement des macro-éléments sont obtenues par homogénéisation d'un stratifié équivalent. Cela réduit considérablement la taille du modèle tout en conservant une description de l'anisotropie et des hétérogénéités locales [41].

### c. Essais *in situ*

Les essais *in situ* sont particulièrement intéressants dans le cas des CMC car :

- le matériau présente une variabilité intrinsèque qui nécessite, dans le cas d'essais traditionnels, de travailler sur plusieurs éprouvettes pour chaque niveau de déformation. Réaliser plusieurs niveaux de charge sur la même éprouvette permet donc de s'affranchir de la réalisation de nombreux essais et de la variabilité d'une éprouvette à l'autre (Fig 6 (i)).
- le matériau présente très peu de déformation résiduelle, ce qui signifie que les fissures une fois refermées sont difficilement observables. Sous chargements mécaniques, ces fissures s'ouvrent d'un facteur 10 à 100 (Fig 6 (ii)).

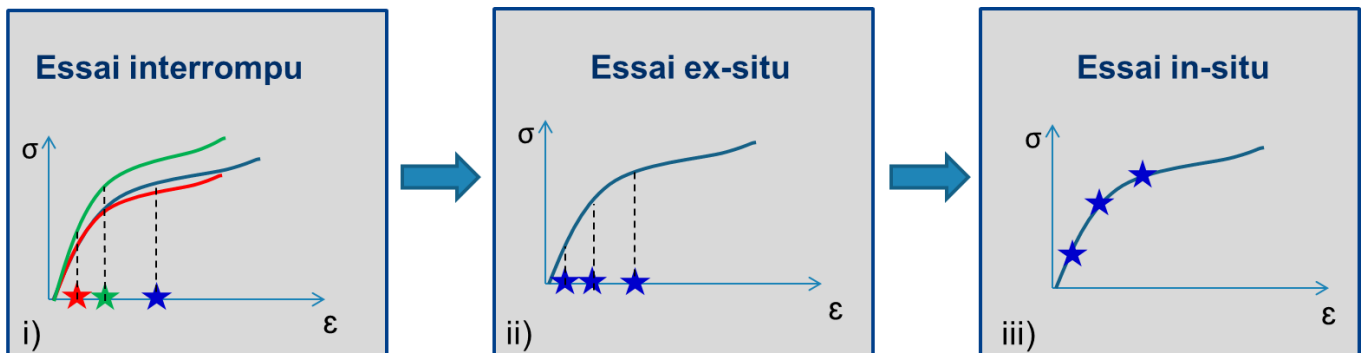


Fig. 6 - Les différentes voies pour l'étude du scénario d'endommagement. i) l'essai interrompu est destructif et soumis à la variabilité matériau, ii) l'essai ex-situ s'affranchi de la variabilité mais les fissures se referment au moment du démontage, iii) l'essai in situ s'affranchi aussi de la variabilité et permet d'analyser l'état déformé du matériau.

Avec la démocratisation des tomographes de laboratoire, les essais *in situ* font l'objet de nombreuses recherches [42]. Initialement portés par le domaine des matériaux métalliques, ils sont utilisés pour de nombreux autres matériaux comme les CMO et les CMC [2,33,9,43,44]. L'essai de traction, par exemple, permet de procéder à l'acquisition tout en maintenant la charge. Cela permet donc

d’observer le matériau à différents niveaux de contraintes afin de décrire la manière dont évolue l’endommagement en relation avec la structure du matériau (Fig 7).

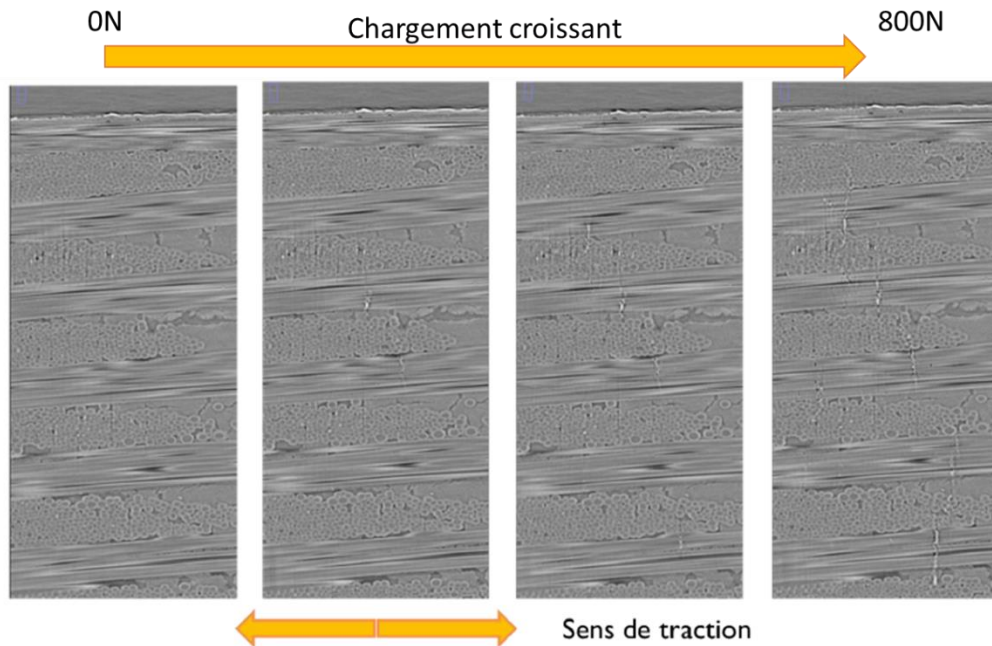


Fig. 7 - Exemple d’image haute résolution obtenue à l’ESRF avec une résolution de  $0,9\mu\text{m}$  et une température de  $1100^\circ\text{C}$ .

Il est possible, à l’aide d’un traitement approprié des images, d’obtenir des informations sur les cinétiques d’endommagement. Des analyses s’appuyant sur la détection automatique des variations de niveaux de gris permettent d’obtenir des informations volumiques sur l’évolution de la densité de fissures matricielles ou des ruptures de fibres, qui constituent des données intéressantes à implémenter dans les modèles numériques. Les méthodes de corrélation d’image sont largement exploitées en 2D mais peuvent également être étendues en trois dimensions [45], en remplaçant l’analyse de la variation des pixels par celle des voxels. La corrélation d’image 3D peut ainsi faire suite à des acquisitions obtenues par microtomographie sur des états stabilisés mais également en cours de chargement [46]. Safran développe une nouvelle machine d’essais afin de réaliser des essais *in situ* sur des pièces ou des morceaux de pièces. Ces techniques nécessitent le développement de nouvelles stratégies de reconstruction liée à la conception particulière de la machine qui induit des angles manquants [47].

#### 4. Exemple d’application sur VER

Le premier exemple d’application est réalisé sur un VER d’un CMC SiC/SiC 3D. A partir d’une analyse statistique sur les fils du matériau de l’étude, plusieurs microstructures respectant la distribution statistique sont générées. Elles vont servir à déterminer le critère d’endommagement des fils, sa loi d’évolution et son effet sur les propriétés effectives du fils.

La démarche pour identifier le critère d’endommagement des torons à l’échelle mésoscopique est décrite dans la thèse de Mazars [2]. A partir de calculs réalisés sur des cellules micro, les enveloppes de contraintes à rupture dans le plan normal aux fibres sont tracées pour identifier un critère de rupture à l’échelle supérieure (Fig 8).

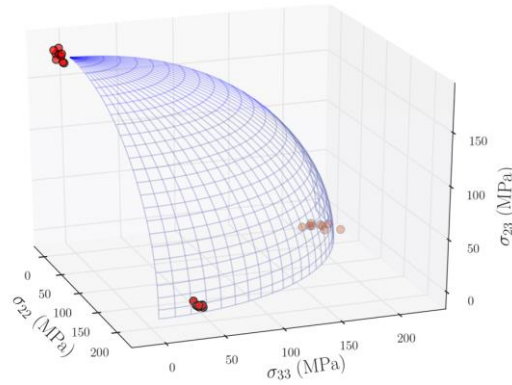


Fig. 8 - Surface de réponse décrivant l'enveloppe du critère d'initiation quadratique en contrainte.

Des simulations de six cas de chargements mécaniques permettent d'identifier l'évolution des propriétés élastiques effectives du fils (Fig 9).

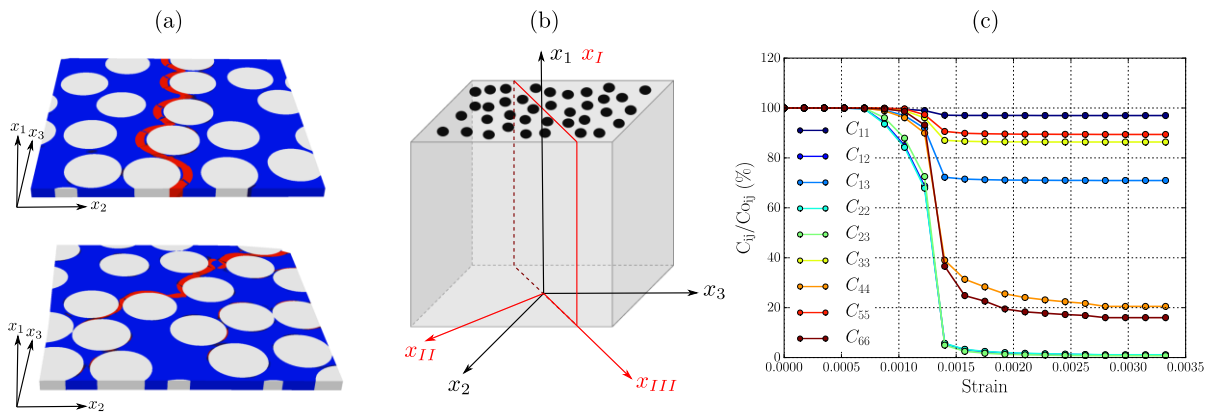


Fig. 9 - Principales fissures pour des chargements de traction et de cisaillement, (b) schéma d'un élément d'échelle mésoscopique où le repère initial est superposé au repère de déformation principale et (c) évolution des termes du tenseur de rigidité pour des niveaux de déformation croissants. [36]

Une hypothèse simplificatrice consiste à ne dégrader que les termes faisant intervenir la direction de sollicitation. Les termes impactés sont alors similaires à ceux issus de l'analyse micromécanique proposée par Murakami [48] dans le cas d'une fissure plane. Par ailleurs, l'hypothèse est faite que le taux de restitution d'énergie  $G_c$  reste constant quelle que soit la direction de chargement.

Les calculs d'endommagement réalisés à l'échelle micro, en utilisant des zones cohésives aux interfaces fibres/matrice ainsi que des lois continues d'endommagement régularisées par la taille des éléments de maillage pour les éléments volumiques, ont permis de reproduire le comportement quasi-fragile attendu des cellules micro. Sur la base d'essais virtuels à l'échelle micro, une loi d'endommagement des fils a été proposée et des premiers calculs non-linéaires à l'échelle mésoscopique sur des cellules tissées 3D ont ainsi pu être réalisés, simulant de manière satisfaisante la création de premières fissures localisées (Fig. 10).

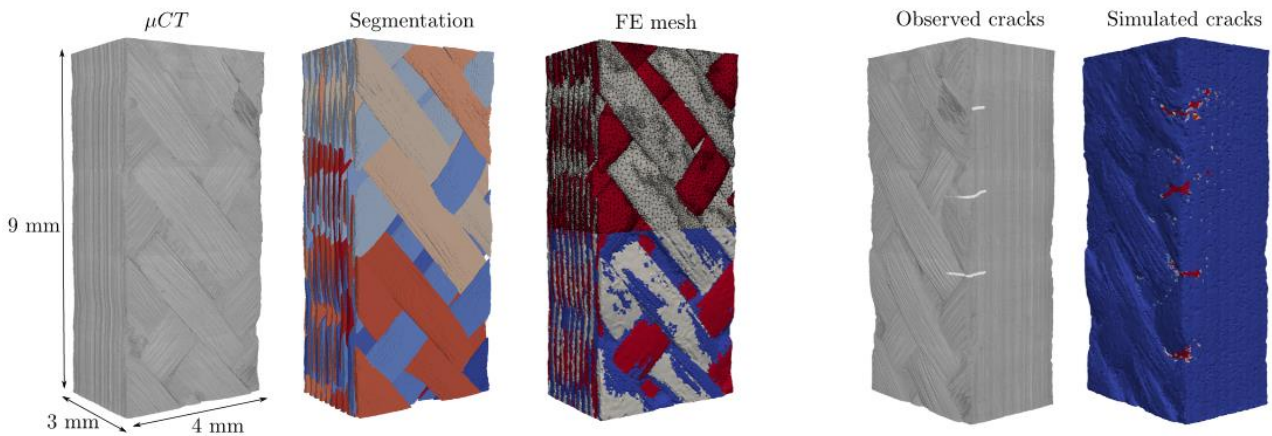


Fig. 10 – De gauche à droite : Construction de méso-modèles élément finis basés sur des images à partir d'images  $\mu$ CT. Comparaison de la localisation des premières fissures entre expériences et simulations [36].

## 5. Exemple d'application sur géométrie complexe

Safran Ceramics a pour mission de développer de nouveaux matériaux (et donc a besoin de modèles à l'échelle du VER), mais également de concevoir et fabriquer des pièces. Il est alors important de disposer de modèles, de simulations numériques et d'essais capables d'étudier et de justifier le comportement de pièces en particulier dans les zones singulières. Une méthode de segmentation originale [6] a été développée pour construire des modèles numériques réalistes en utilisant la tomographie X et une connaissance du modèle géométrique. Ces modèles numériques, extrêmement fidèles au matériau réel et illustrés (Fig. 11 a et b), sont compatibles avec des simulations par éléments finis à l'échelle mésoscopique. Bien qu'elles permettent d'incorporer une grande quantité de détails, les simulations directes à échelle mésoscopique nécessitent également des ressources de calcul importantes. C'est pourquoi il apparaît intéressant de développer des méthodes numériques permettant de transférer les informations pertinentes issues de l'échelle mésoscopique vers l'échelle supérieure, afin d'obtenir des modèles macroscopiques enrichis, tout en conservant des coûts de calculs raisonnables. Cette description approximative à l'échelle macro peut suffire dans certain cas à évaluer les propriétés élastiques, voire à simuler les premiers endommagements.

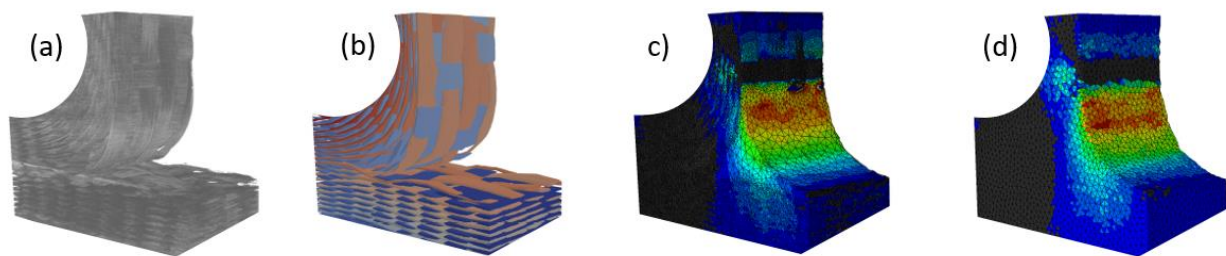


Fig. 11 – (a) Tomographie X d'un raidisseur, (b) modèle géométrique issu de la tomographie, (c) champ de contraintes calculées à échelle mésoscopique et (d) champ de contraintes calculées sur le modèle macro enrichi.

Un cadre de modélisation méso-macro, où le comportement des macro-éléments est déduit de la connaissance de la direction et des fractions volumiques locales des constituants, est proposé [41]. Le comportement effectif des macro-éléments est obtenu en traitant l'élément de volume comme un stratifié équivalent. Cela réduit considérablement la taille du modèle, tout en conservant une

description approximative de l'anisotropie et des hétérogénéités locales. Les simulations d'élasticité et d'endommagement sont effectuées à la fois sur des modèles à moyenne et à grande échelle. Leur comparaison en termes de rigidité globale et de champs de contraintes locaux (Fig. 11c et d) est satisfaisante et permet de comprendre et d'anticiper le scénario d'endommagement d'un raidisseur CMC sous sollicitation de flexion/cisaillement. Des essais multi-instrumentés avec corrélation d'images et microscopie sont également réalisés pour effectuer des comparaisons essai/calcul et ainsi valider les modèles numériques. Une machine de traction *in situ*, permettant de réaliser des essais à hautes températures sous tomographe, a été développée pour imposer un chargement multiaxial sur des éprouvettes de géométrie complexe [49] (Fig 12).

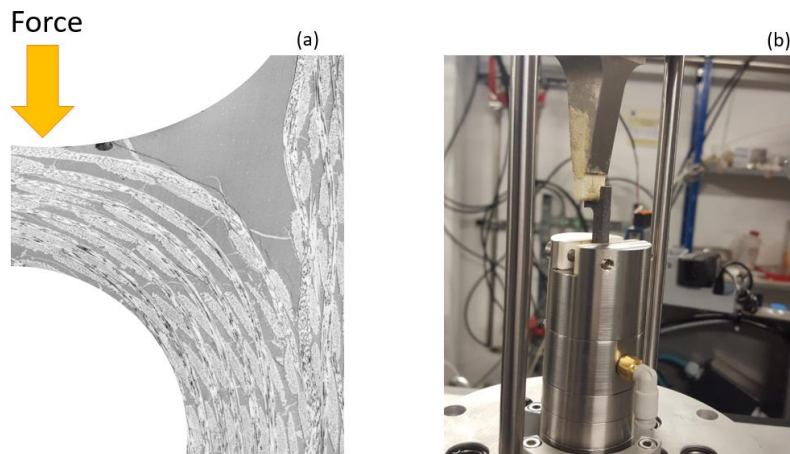


Fig. 12 – (a) Fissuration d'un raidisseur observée sous chargement de flexion/cisaillement par microscopie optique. (b) Machine d'essais *in situ* à haute température sous montée à SOLEIL.

Le développement conjoint de modèles matériau avancés et de méthodes d'essais *in situ* nous permet de progresser rapidement sur l'étude du matériau et des pièces en vue de leur conception, amélioration et justification.

## 6. Conclusions et perspectives

Les démarches multi-échelles associant essais et modélisation présentent des avantages incontestables pour améliorer la compréhension du comportement thermomécanique du matériau. Safran développe en interne et avec ses partenaires académiques des outils numériques et expérimentaux permettant de répondre aux enjeux de conception, d'amélioration et de justification des matériaux et des pièces industrielles. Ces démarches font appel à de nombreux domaines, qu'il convient de défricher afin de sélectionner les méthodes les plus pertinentes pour l'application visée. Cet article présente une sélection non-exhaustive de récents développements permettant aux ingénieurs d'orienter les travaux de conception du matériau et des pièces industrielles, mais également d'aider à la justification de leur utilisation en service.

## Remerciements

Ces travaux s'inscrivent en partie dans le cadre du PRC MécaComp, projet de recherche financé par la DGAC, impliquant le Groupe SAFRAN, l'ONERA et le CNRS. Les auteurs souhaitent remercier l'ensemble des collègues du groupe SAFRAN qui ont contribué à l'étude, mais aussi l'ensemble des acteurs académiques qui supportent le groupe SAFRAN dans le développement des technologies CMC.

## Références

- [1] B. Legin, Z. Aboura, F. Bouillon, S. Denneulin, (2017). Damage Analysis in 3D Woven SiC/SiC Ceramic Matrix Composite. 261-271. 10.1002/9781119407270.ch26.
- [2] V. Mazars, « Etude des endommagements sur CMC par une approche de modélisation micro-méso alimentée par des essais in-situ », Thèse, Université de Bordeaux, France.
- [3] J. Benezech « Modélisation du comportement thermomécanique à l'échelle mésoscopique de zones singulières de pièces aéronautiques en CMC », Ph.D. thesis, Université de Bordeaux, France, en cours.
- [4] T.D. Jayet « Modélisation multi-échelle des phénomènes de dégradation à haute température dans les composites à matrice céramique », Ph.D. Thesis, LMT, ENS Paris Saclay, France, en cours
- [5] Liu X, Furrer D, Kosters J, Holmes J (2018) Vision 2040: a roadmap for integrated, multiscale modeling and simulation of materials and systems. Tech rep NASA. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20180002010>. Accessed 28 June 2018
- [6] J. Bénézech, G. Couégnat « Variational segmentation of textile composite preform from X-ray computed tomography », Soumis à Composite Structures.
- [7] C. Chapoullié, J.-P. Da Costa, M. Cataldi, G. L. Vignoles, C. Germain « Orientation-guided two-scale approach for the segmentation and quantitative description of woven bundles of fibers from three-dimensional tomographic images », Journal of Electronic Imaging Vol. 24 n° 6, pp. 061113, 2015, ISSN 1017-9909.
- [8] B. N. Cox, et al, Stochastic Virtual Tests for High-Temperature Ceramic Matrix Composites. Annual Review of Materials Research. Vol. 44, pp 479-529, 2014
- [9] C. Chateau. « Analyse expérimentale et modélisation micromécaniques du comportement élastique et de l'endommagement de composites SiC/SiC unidirectionnels ». Thèse de doct. Ecole Polytechnique X, 2011.
- [10] Hyung Joo Kim and Colby C Swan. Voxel-based meshing and unit-cell analysis of textile composites. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 56(7) : 977-1006, 2003.
- [11] J. Schneider, G. Hello, Z. Aboura, M. Benzeggagh, and D. Marsal. A meso-fe voxel model of an interlock woven composite. In Proceeding of the international conference in composite materials 17th (ICCM17), Edinburgh, Scotland, 2009.
- [12] Z Aboura, G Hello, H Kebir, MA Tiar, and ML Benzeggagh. Finite element modeling of mechanical behavior of 3D composite materials. In Proceedings of ECCM-15 conference. Venice, 2012.
- [13] Morgan Charron. Modélisation basée images du comportement thermomécanique de composite C/C. PhD thesis, Université de Bordeaux, 2017.
- [14] N Naouar, Emmanuelle Vidal-Sallé, J Schneider, E Maire, and Philippe Boisse. Meso-scale fe analyses of textile composite reinforcement deformation based on x-ray computed tomography. Composite structures, 116 :165-176, 2014.
- [15] A Doitrand, C Fagiano, F-X Irisarri, and M Hirsekorn. Comparison between voxel and consistent meso-scale models of woven composites. Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, 73 :143-154, 2015.
- [16] Guodong Fang, Bassam El Said, Dmitry Ivanov, and Stephen R Hallett. Smoothing artificial stress concentrations in voxel-based models of textile composites. Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, 80 :270-284, 2016.
- [17] Steven K Boyd and Ralph Muller. Smooth surface meshing for automated Finite element model generation from 3d image data. Journal of Biomechanics, 39(7) :1287-1295, 2006.

## Comptes Rendus des JNC 21 – Bordeaux INP – 1-3 juillet 2019

- [18] JunWang and Zeyun Yu. A novel method for surface mesh smoothing: applications in biomedical modeling. In Proceedings of the 18th international meshing roundtable, pages 195-210. Springer, 2009.
- [19] Peter Arbenz and Cyril Flaig. On smoothing surfaces in voxel based Finite element analysis of trabecular bone. In International Conference on Large-Scale Scientific Computing, pages 69-77. Springer, 2007.
- [20] E Potter, ST Pinho, P Robinson, L Iannucci, and AJ McMillan. Mesh generation and geometrical modelling of 3d woven composites with variable tow cross-sections. *Computational Materials Science*, 51(1) :103-111, 2012.
- [21] Fredrik Stig and Stefan Hallstrom. A modelling framework for composites containing 3d reinforcement. *Composite Structures*, 94(9) : 2895-2901, 2012.
- [22] Renaud G Rinaldi, Matthew Blacklock, Hrishikesh Bale, Matthew R Begley, and Brian N Cox. Generating virtual textile composite specimens using statistical data from micro-computed tomography: 3d tow representations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 60(8): 1561-1581, 2012.
- [23] William E Lorensen and Harvey E Cline. Marching cubes : A high resolution 3d surface construction algorithm. In ACM siggraph computer graphics, volume 21, pages 163{169. ACM, 1987.
- [24] Pierre Alliez, Clément Jamin, Laurent Rineau, Stéphane Tayeb, Jane Tournois, and Mariette Yvinec. 3D mesh generation. In CGAL User and Reference Manual. CGAL Editorial Board, 4.11.1 edition, 2018.
- [25] Pierre Alliez, David Cohen-Steiner, Mariette Yvinec, and Mathieu Desbrun. Variational tetrahedral meshing. In ACM SIGGRAPH 2005 Courses, page 10. ACM, 2005.
- [26] A. Doitrand, C. Fagiano, N. Carrere, V. Chiaruttini and M. Hirsekorn. Damage onset modeling in woven composites based on a coupled stress and energy. *Engineering Fracture Mechanics*, 169:189–200, 2017.
- [27] G. Couégnat. Approche multiéchelle du comportement mécanique des composites à matrice céramique. PhD thesis. Université Sciences et Technologies Bordeaux, 2008.
- [28] A.R. Melro, P.P. Camanho, FM. Andrade Pires and S.T. Pinho. Numerical simulation of the non-linear deformation of 5-harness satin weaves. *Computational Materials Science*, 61:116–126, 2012.
- [29] S.V. Lomov, D.S. Ivanov, I. Verpoest, M. Zako, T. Kurashiki, H. Nakai, S. Hiroswawa. Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms. *Composites Science and Technology*, 67:1870–1891, 2007.
- [30] Q. Yang and M. Naderi. A new augmented finite element method (A-FEM) for progressive failure analysis of advanced composite materials. *Numerical Modelling of Failure in Advanced Composite Materials*, 265–308, 2015
- [31] B.N. Cox, H.A. Bale, M. Begley, M. Blacklock, B. Do, T. Fast, M. Naderi, M. Novak, V.R. Rajan, R.G. Rinaldi, R.O. Ritchie, M.N. Rossol, J.H. Shaw, O. Sudre, Q. Yang, F.W. Zok and D. Marshall. Stochastic virtual tests for high-temperature ceramic matrix composites. *Annual Review of Materials Research*, 44:479–529, 2014.
- [32] S. Esssongue. Méthode des éléments finis augmentés pour la rupture quasi-fragile : application aux composites tissés à matrice céramique. PhD thesis, Université de Bordeaux, 2017.
- [33] V. Mazars, O. Caty, G. Couégnat, A. Bourtef, S. Roux, S. Denneulin, J. Pailhès, G. L. Vignoles« Damage investigation and modeling of 3D woven ceramic matrix composites from X-ray tomography in situ tensile tests », *Acta Mater.* Vol. 140, pp. 361–371, 2017.
- [34] H. A. Bale, M. Blacklock, M. R. Begley, D. B. Marshall, B. N. Cox, and R. O. Ritchie. Characterizing three-dimensional textile ceramic composites using synchrotron X-ray micro-computed-tomography. *J. Am. Ceram. Soc.*, 95 : 392–402,2012.
- [35] K.M. Sevener, J.M. Tracy, Z. Chen and J.D. Kiser. Crack opening behavior in ceramic matrix composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 1–14, 2017.

## Comptes Rendus des JNC 21 – Bordeaux INP – 1-3 juillet 2019

- [36] Vincent Mazars, Guillaume Couégnat, Olivier Caty, Sébastien Denneulin, Gérard Vignoles. Multi-scale damage modeling of 3D ceramic matrix composites from in-situ X-ray tensile tests. ECCM18, Jun 2018, Athens, Greece. pp.24 - 28. hal-01952036
- [37] Tranquart, B. Vers un matériau virtuel pour l'optimisation qualitative d'une nouvelle famille de CMCs. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan. 2012.
- [38] V. Chiaruttini, V. Riolo, F. Feyel, Advanced remeshing techniques for complex 3D crack propagation. 13th International Conference on Fracture June 16–21, 2013, Beijing, China
- [39] M. V. Le, J. Yvonnet, N. Feld, F. Detrez, Une méthode Quasi-FE2 pour la résolution de structures composites sans séparation d'échelles. CSMA 201914ème Colloque National en Calcul des Structures13-17 Mai 2019, Presqu'île de Giens (Var)
- [40] M. Wangermez, O. Allix, P.-A. Guidault, O. Ciobanu, C. Rey, Couplage de modèles incompatibles pour des techniques de zoom structural sur matériaux hétérogène, CSMA 201914ème Colloque National en Calcul des Structures13-17 Mai 2019, Presqu'île de Giens (Var)
- [41] Jean Bénézech, Guillaume Couégnat, Meso and macroscale modeling of complex 3d woven ceramic matrix composite parts. 7th ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites: COMPOSITES 2019
- [42] É. Maire, P. J. Withers. Quantitative X-ray tomography. International Materials Reviews, ASM International, 2014, 59 (1), pp.1-43. {10.1179/1743280413y.0000000023}. {hal-01538208}
- [43] H.A. Bale, A. Haboub, A.A. Macdowell, J.R. Nasiatka, D.Y. Parkinson, B.N. Cox, D.B. Marshall, R.O. Ritchie, "Real-time quantitative imaging of failure events in materials under load at temperatures above 1,600°C", Nature Materials, 12, 40-46, 2013.
- [44] O. Caty, P. Ibarroule, M. Herbreteau, F. Rebillat, E. Maire, G.L. Vignoles, "Application of X-ray computed microtomography to the study of damage and oxidation kinetics of thermostructural composites", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 324, 113-117, 2014.
- [45] A. Buljac, C. Jailin, A. Mendoza, (...), F. Hild S. Roux, Digital Volume Correlation: Review of Progress and Challenges Experimental Mechanics 58(5), pp. 661-708 (2018)
- [46] C. Jailin, S. Roux. Dynamic Tomographic Reconstruction of Deforming Volumes. *Materials*, MDPI, 2018, 11 (8), pp.1395. {10.3390/ma11081395}. {hal-01977971}
- [47] L. Turpin, S. Roux, O. Caty, S. Denneulin. A phase field approach to tomographic reconstruction with missing Angles. *Fundamenta Informaticae XXI, 2001, 1001–1010*
- [48] S. Murakami. « Mechanical modeling of material damage ». In : ASME, Transactions, Journal of Applied Mechanics 55 (1988), p. 280–286.
- [49] L. Turpin, Etude des endommagements sur CMC par une approche expérimentale in-situ sous sollicitations multiaxiales. Thèse, Université de Bordeaux, France.