



Modélisation multiaxiale et architecture triaxiale périodique : application à un matériau composite 3D C/C

Laurent Flaceliere, Christophe Tallaron

► To cite this version:

Laurent Flaceliere, Christophe Tallaron. Modélisation multiaxiale et architecture triaxiale périodique : application à un matériau composite 3D C/C. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. ⟨hal-03360161⟩

HAL Id: hal-03360161

<https://hal.science/hal-03360161v1>

Submitted on 30 Sep 2021

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

Modélisation Anisotropique Endommageable du Comportement Mécanique d'un composite 3D C/C

Laurent Flacelière¹, Christophe Tallaron²

¹LMPM (UMR 6617), ENSMA, 1 rue clément Ader, 86360 Futuroscope Cedex,
laurent.flaceliere@lmpm.ensma.fr

²CEA Le Ripault, BP 16, 37260 Monts, christophe.tallaron@cea.fr

Résumé :

Cette publication est dédiée à la modélisation du comportement mécanique d'un matériau composite triaxiale carbone/carbone sous fortes sollicitations mécaniques. Ce matériel se compose d'une architecture orthogonale de baguettes, elles-mêmes composées des fibres de carbone. En conséquence, selon l'état de sollicitation induit par le chargement mécanique, la ruine de ce matériau se produit soit par rupture des fibres, soit par déformation excessive de son architecture. A température ambiante, ces deux mécanismes mènent respectivement à un comportement élastique fragile, ou bien à un comportement anélastique endommageable, engendrant la dissipation d'énergie. Il est proposé une modélisation mécanique, dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles, afin de rendre compte de ces comportements.

Abstract :

This publication is dedicated to the modeling of the mechanical behavior of a composite material with triaxial carbone/carbone structure, submitted to a strong mechanical loading. This material is composed of an orthogonal architecture of rods, themselves composed of carbon fibres. Consequently, depending on the stress state induced by the mechanical loading, the ruin of this material occurs either by fiber failure or by excessive deformation of its architecture. At ambient temperature, these two mechanisms carry out respectively to a fragile elastic behavior or to an anelastic endommageable behavior, generating dissipation of energy. A mechanical modeling within the framework of the thermodynamics of the irreversible processes is proposed, in order to give an account of these behaviors.

Mots-clefs : modélisation ; composite ; endommagement

1 Introduction

Cette publication présente la première étape de modélisation permettant de prédire le comportement mécanique d'un matériau composite de type 3D C/C à température ambiante. Les choix de modélisation ont été effectués après une étude bibliographique, incluant en particulier les propositions d'Aubard et al. [1], de Burr et al. [2], et de Jortner [3].

Dans le cas spécifique du matériau traité ici, son architecture en réseau orthogonal de baguettes induit également un comportement mécanique fortement anisotrope de ce composite, dès l'application des premières sollicitations. Cependant, le comportement mécanique très particulier de ce composite ne peut pas complètement être pris en compte par les modélisations précitées, y compris à température ambiante. Enfin, le processus d'élaboration de ce composite, en particulier l'imprégnation de la matrice carbone, nécessite l'usage de cycles à hautes températures, laissant présager d'importantes contraintes résiduelles. Une transition d'échelle permettra d'envisager une prise en compte ultérieure de ces effets.

2 Description du matériau composite 3D C/C

Le composite étudié est formé de fibres de carbone ex-Polyacrylonitrile haut module (ex PAN HM) et d'une matrice de carbone ex-brai graphitée, suivant une architecture fibreuse tridirectionnelle. On constate sur la Figure 1 que les torons de fibres suivant Z sont régulièrement désolidarisés des octets et des torons voisins après fabrication. La décohérence des torons selon X et Y n'est pas régulière le long de leur périphérie, deux côtés du toron restant généralement accrochés aux fibres ou à la matrice adjacente. Le refroidissement après élaboration génère des contraintes thermiques résiduelles provoquant des fissures aux interfaces, par incompatibilités de déformation entre les constituants.

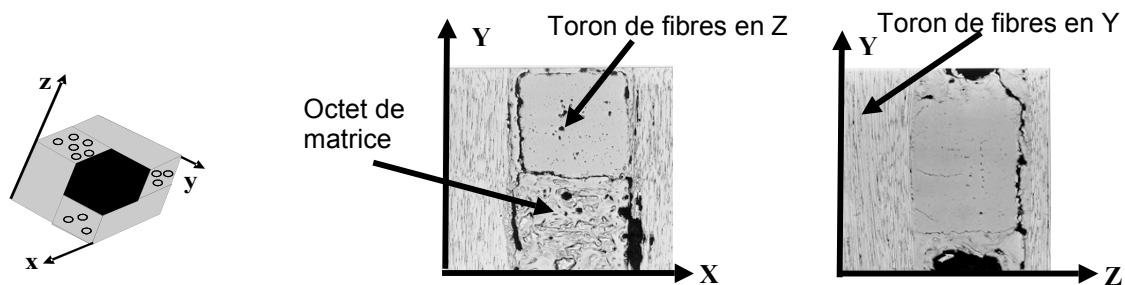


Figure 1 : Architecture et vues MEB du composite 3D C/C étudié.

3 Définition des échelles d'étude et localisation des déformations

L'objectif de ce travail est la modélisation du comportement mécanique d'un composite à l'aide de lois à l'échelle mésoscopique. Ce terme « mésoscopique » indique ici l'échelle de la matrice et des baguettes, constituées d'un certain nombre de fibre de carbone. [4].

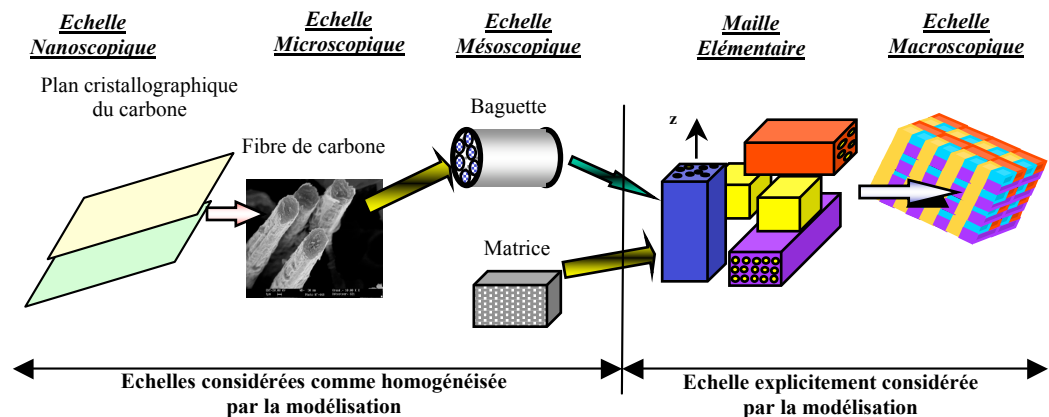


Figure 2 : Echelles de représentation du composite 3D C/C pour la modélisation.

La description à l'échelle mésoscopique représente un état « homogénéisé » du comportement à l'échelle microscopique de ce composite. Un exemple de cela est la prise en compte global du comportement des baguettes en carbone, les processus mécaniques ayant lieu à l'intérieur de ces baguettes étant uniquement considéré par leurs effets mécaniques sur le comportement mésoscopique de ces baguettes.

4 Comportement mécanique du composite 3D C/C

Suivant chaque direction des baguettes de carbone, le composite est macroscopiquement élastique en traction. En compression, l'aspect non-linéaire de la courbe de contrainte/déformation est dû à un mécanisme de micro-flambement au sein des baguettes (dû à la délamination des fibres constituant la baguette), sans effet inélastique notable.

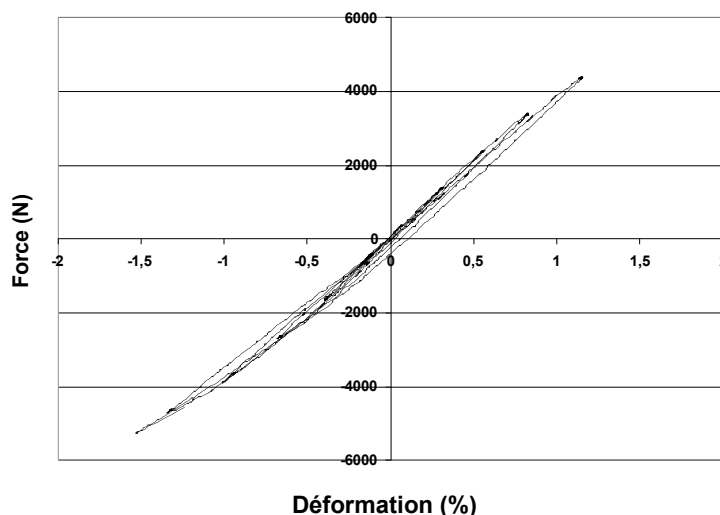


Figure 3 : Courbe expérimentale pour des cycles d'amplitude croissante en traction-compression suivant l'un des axes du 3D C/C.

En cisssion suivant les axes matériau, par exemple en torsion, le comportement mécanique de ce composite est élastique puis inélastique endommageable. Cette conclusion est obtenue après des essais comprenant peu de cycles de chargement [5], et illustre la dissipation d'énergie de ce matériau pour des conditions de charge en cisaillement.

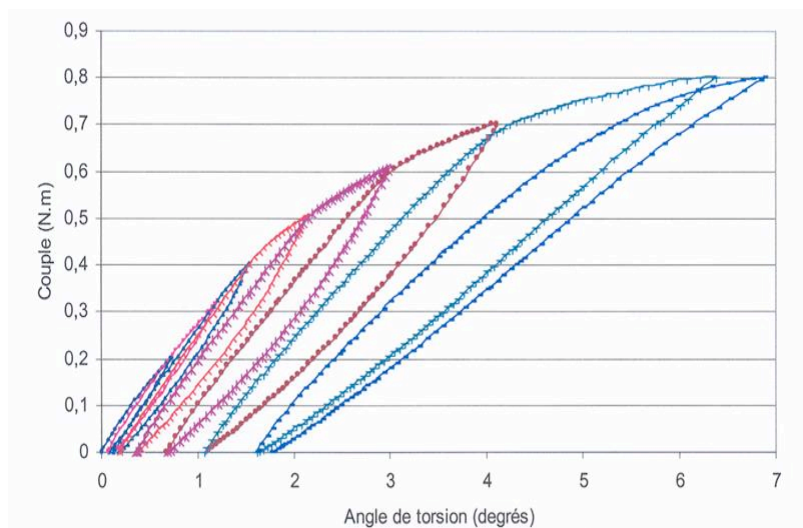


Figure 4 : La courbe expérimentale pour des cycles d'amplitude croissante en torsion parallèlement à un des axes du 3D C/C [6].

5 Éléments de modélisation mésoscopique

L'axiome de l'état local d'accompagnement (LAS) permet d'établir un modèle basé sur un nombre fini de variables internes d'état, pour les processus dissipatifs [7]; il s'agit dans notre cas des déformations petites, indépendantes du temps, et isothermes. On suppose l'existence d'un potentiel énergie libre, et d'une dissipation, impliquant l'existence d'un multiplicateur. Il a été fait le choix de dissipations découplées pour décrire les évolutions des inélasticités et des endommagements. L'inégalité de Clausius-Duheim qualifie alors la totalité des mécanismes dissipatifs.

L'admissibilité du champ de déformation associé à ce V.E. induit la réciprocity des déplacements pour chaque facette opposée deux à deux, réduisant la représentation du V.E. à trois facettes physiques, de normales $i=1, 2, 3$. Pour chaque facette, il est employé deux mesures scalaires des déformations (déformation normale et de cisaillement). Suivant ce concept, l'inélasticité et les variables de dommages du V.E. sont de type scalaire. La table A récapitule les variables d'état et des forces associées, à l'échelle mésoscopique, explicitement utilisées dans cette proposition.

Variables d'état	Description	Forces associées	Description
$\varepsilon_{i(i=1,2,3)}$	Déformations élastiques	$\sigma_{i(i=1,2,3)}$	Contraintes axiales
$\gamma_{i(i=1,2,3)}$	Distorsions élastiques	$\tau_{i(i=1,2,3)}$	Contraintes de cisaillement
$\gamma_{i(i=1,2,3)}^{in}$	Distorsions inélastiques	$x_{i(i=1,2,3)}^{in}$	Distorsions « résiduelles »
$p_{i(i=1,2,3)}$	Déformations inélastiques accumulées	$r_{i(i=1,2,3)}$	Forces associées aux inélasticités isotropes
$d_{i(i=1,2,3)}$	Variables d'endommagement	$F_{di(i=1,2,3)}$	Forces motrices d'endommagement

Table A : Variables d'état et forces associées utilisées dans la modélisation

L'énergie libre spécifique fournie à l'échelle mésoscopique, considérée comme « homogénéisée », est donnée par l'équation (1).

$$\omega(\varepsilon_i, \gamma_i, \varepsilon_i^{in}, p_i, d_i) = \omega^e(\varepsilon_i, \gamma_i, d_i) + \omega^{in}(x_i^{in}, p_i, d_i) \quad (1)$$

$$\omega^e(\varepsilon_i, \gamma_i, d_i) = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{1}{2} E_i \langle \varepsilon_i \cdot \varepsilon_i \rangle^+ + \frac{1}{2} E_i \left(1 + \beta_i \langle \varepsilon_i \rangle^- \right) \langle \varepsilon_i \cdot \varepsilon_i \rangle^- + \frac{1}{2} G_i (\gamma_i)^2 \exp(-s_i \cdot d_i) \right] \quad (2)$$

$$\omega^{in}(\gamma_i^{in}, p_i, d_i) = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{1}{2} c(\gamma_i^{in} \cdot \gamma_i^{in}) + (r_i^0 + r_i^\infty) \cdot p_i + \frac{r_i^\infty}{g_i} \exp(-g_i \cdot p_i) \right] \quad (3)$$

Il est à noter que la prise en compte du comportement dans les axes de ce matériau est réalisée pour le moment de façon sommaire, via les variables β_i . Ce type de formulation est loin d'être satisfaisante au niveau théorique, mais permet au moins dans ce premier processus de modélisation de rendre efficacement compte du comportement en compression des baguettes. Tout en étant faiblement dissipatif à l'échelle macroscopique, il est toutefois certain que ce type de mécanisme, par la décohérence de matière qu'il entraîne, est lui aussi dissipatif, entraînant donc des effets irréversibles.

L'équation (4) donne la dissipation liée à cette modélisation. Afin de respecter le second principe de la thermodynamique des processus irréversibles, cette dissipation ne peut prendre que des valeurs nulles ou positives. On retrouve ici tout l'intérêt de l'usage du cadre de

modélisation employé, permettant le respect d'une certaine physique, en accord avec les phénomènes observés expérimentalement sur ce matériau.

$$\text{Dissipation : } \Phi = \sum_{i=1}^3 \left[(\tau_i - x_i^{in}) \cdot \dot{\gamma}_i^{in} - r_i \cdot \dot{p}_i + F_{d_i} \dot{d}_i \right] \geq 0 \quad (4)$$

6 Confrontation d'une prédiction aux résultats expérimentaux

Parmi les données expérimentales disponibles pour le matériau testé, il n'a été utilisé pour l'identification que des résultats liés à des sollicitations simples (traction, compression et torsion). Dès lors, les essais de cisssion pure sans gradient (test de Iosipescu) et les essais de compression sur fibre orientée à 45° de l'axe sont les seules à l'heure actuelle à disposition, et non utilisés pour la phase d'identification.

Ces résultats expérimentaux sont rapportés sur la Figure 5, donnant la contrainte locale de cisaillement en fonction de la déformation de cisaillement. Une simulation numérique, incluant le cycle de décharge/recharge effectué lors de l'essai de compression à 45°, a été effectuée.

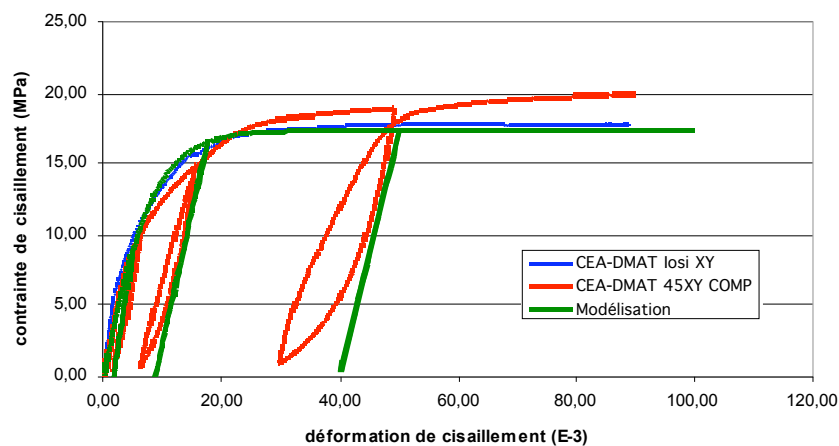


Figure 5 : Confrontation entre courbes expérimentales et simulation pour des sollicitations de cisaillement pur ou combiné du 3D C/C.

La Figure 5 montre que les résultats issus de la modélisation sont en très bon accord avec ceux issus de l'essai de Iosipescu. En particulier, l'effet de saturation du niveau local des contraintes est très correctement prédit, aussi bien en termes de progressivité que de niveau. Cela est la conséquence de l'usage des outils de l'inélasticité et de l'endommagement, aptes à rendre compte de l'évolution des propriétés du matériau. Pour l'essai de compression à 45° dans le plan XY, la corrélation avec la même prédiction est moins bonne. Cela est en grande partie dû à la difficulté d'estimer correctement les niveaux de contrainte locale de cisaillement au sein du matériau composite étudié. Que ce soit par les effets de bords liés à la faible taille des éprouvettes testées par rapport aux dimensions du V.E., ou bien due la complexité des transferts d'effort au sein de ce matériau, les effets ne manquent pour altérer la qualité de l'interprétation expérimentale de cet essai basé finalement sur une sollicitation « multiaxiale » du point de vue des fibres.

7 Conclusion

Cet article propose les premières étapes de la modélisation du comportement mécanique à température ambiante d'un composite 3D C/C. Les points les plus saillants de cette proposition sont les suivants. D'abord, l'utilisation d'une échelle mésoscopique, qui sans être nouvelle, permet de traiter du comportement du seul V.E., dans l'environnement de la structure (échantillon ou pièce réelle). Cela permet en particulier de tenir compte de l'orientation locale de l'architecture matérielle par rapport à l'architecture globale de la pièce, mais aussi des effets des contraintes résiduelles dues à l'élaboration du matériau, tout comme les déformations imposées par la structure. De plus, il est employé une description, en terme de déformation, des inélasticités localisées à l'échelle du V.E., mais aussi des effets des endommagements. La totalité de ces mécanismes concerne uniquement les déformations en cisaillement. Cette formulation considère, pour chaque axe du matériau, un comportement élastique linéaire en traction et élastique non-linéaire en compression, sans dissipation d'énergie (comportement réversible).

La validité de cette proposition devra être vérifiée pour des sollicitations autres que suivant les axes du matériau. Cette première suggestion de modélisation intègre un caractère multiaxial fort, avec la description explicite de mécanismes pour chaque type de déformations imposées à la structure. En conséquence, pour des chargements complexes, tels que ceux rencontrés sur une structure industrielle, ce modèle constitue une voie pour prédire la rigidité, l'évolution du comportement mécanique, ainsi que la ruine éventuelle.

Toutefois, un gros effort de modélisation reste à effectuer, le travail proposé ici n'étant qu'une première étape. Outre un respect du cadre thermodynamique utilisé, il sera essentiel que cette modélisation évolue vers une proposition induisant la non-coaxialité entre contraintes et déformations caractérisant tout comportement anisotrope en réponse aux sollicitations hors-axes [8]. Cela passe par l'usage de quantités tensorielles, et d'invariant, afin de rendre compte du comportement mécanique de ce matériau.

Enfin, l'intégration dans un code éléments finis permettra d'espérer une solution globale de conception et de dimensionnement des structures réalisées avec ce type de matériau. Cette approche sera ultérieurement étendue au domaine en température.

Références :

1. AUBARD, X., CLUZEL, C., GUITARD, L., et LADEVEZE, P., Damage modelling of a 4D Carbon/Carbon composite for high temperature application. *Ceramics International*, 2000. 26: p. pp. 631-637.
2. BURR, A., HILD F., et F.A. LECKIE, Continuum description of damage in ceramic-matrix composites. *European journal of mechanics, A/solids*, 1997. 16(1).
3. JORTNER, J. Effects of shear lag on thermal expansion of 3D carbon-carbon composites. in *Sixth rocket nozzle technology meeting of the JANNAF RNTS*. 1984. Huntsville.
4. TALLARON, C. et BARRE, S., Prediction of the elastic tensor of 3D composites by analytical model. in *JCCM12*. 1999. Paris.
5. ROUBY, D., TALLARON, C. et FLACELIERE, L. Comportement en torsion d'un composite carbone-carbone 3D. *Matériaux 2006*. 2006. Dijon
6. ROUBY, D., et al. Comportement en torsion d'un composite C/C 3D. in *Journée annuelle du GFEC IV*. 2005. Montbard.
7. BATAILLE, J., et KESTIN, J., L'interprétation physique de la thermodynamique rationnelle. *Journal de Mécanique*, 1975. 14(2): p. 365-384.
8. BOEHLER, J.P., Anisotropic behavior laws in continuum mechanics [in French], *J.Méca.*, 17, 153-190, 1978.