

Modélisation thermomécanique basée sur la mésostructure d'un stratifié carbone / thermoplastique soumis à une flamme

Meso-structure based thermomechanical modelling of a carbon fiber reinforced thermoplastic laminates exposed to a flame

Julie Vacandare¹, David Philippe², Benoit Vieille¹, Fabrice Barbe¹

1 : INSA Rouen Normandie, Groupe de Physique des Matériaux UMR CNRS 6634
Avenue de l'Université, 76800 St Etienne du Rouvray, France
e-mail : julie.vacandare@insa-rouen.fr, benoit.vieille@insa-rouen.fr, fabrice.barbe@insa-rouen.fr

2 : Ecole Navale
BCRM BREST, Rue du Poulmic, 29160 Lanvéoc, France
e-mail : david.philippe@ecole-navale.fr

Résumé

Lors de l'exposition de stratifiés à base de thermoplastique à une flamme kérosène, une modification significative de leur structure interne se produit progressivement. En effet, en raison des transitions de phase de la matrice polymère (fusion et surtout gazéification lors de la décomposition thermique ou pyrolyse), des porosités apparaissent et se développent. D'un point de vue thermique, ces porosités agissent comme des isolants thermiques, ralentissant ainsi l'extension du gradient thermique. D'un point de vue mécanique, elles réduisent considérablement les capacités de charge des stratifiés. Afin de modéliser avec précision la réponse thermomécanique des stratifiés soumis à une flamme kérosène, il est nécessaire de prendre en compte les porosités au moyen d'un modèle d'éléments finis spécifique. La représentativité du modèle a été évaluée à l'aide d'analyses expérimentales réalisées avec un brûleur et par tomographie à rayons X. Les analyses ont montré une représentativité prometteuse du modèle - compte tenu des hypothèses formulées - en termes de distribution des porosités, de gradient thermique et de forte diminution de la rigidité mécanique des stratifiés pendant la première minute d'exposition.

Abstract

During the exposure of thermoplastic-based laminates to a kerosene flame, a significant modification of its internal structure progressively occurs. Indeed, due to the phase transitions of the polymer matrix (melting and especially gasification during the thermal decomposition); porosities nucleate and grow within the material. From thermal point of view, these porosities act as thermal insulators, hence slowing down the thermal gradient extension. From mechanical standpoint, they drastically decrease the loading capabilities of the laminates. To accurately model the thermomechanical response of laminates subjected to a kerosene flame, it is necessary to account for the porosity formation by means of a specific Finite Element model. The representativity of the model was assessed using experimental analyses carried out with a small-scale kerosene burner and X-Ray tomography. Analyses showed promising representativity of the model - considering the assumptions made - in terms of porosity distribution, thermal gradient and large decrease of the mechanical stiffness of the laminates during the first minute of exposure.

Mots Clés : Composite thermoplastique, agression thermique, pyrolyse, flamme, porosités.

Keywords: Thermoplastic composite, thermal aggression, pyrolysis, flame, porosities.

1. Introduction

L'incendie d'un moteur d'avion soulève la question de la dégradation des pièces structurelles touchées par les flammes. Cela concerne en particulier les laminés en polymère renforcé de fibres de carbone qui sont destinés à supporter le moteur. Ce rôle est maintenu dans une situation d'incendie, au moins pendant un nombre fini de minutes, comme le prescrivent les réglementations internationales. Dans

ce scénario d'élévation rapide des températures jusqu'au point de décomposition de la matrice polymère, comment peut-on anticiper et prévoir la dégradation des propriétés mécaniques, sachant qu'il faut parfois quelques dizaines de secondes pour couper l'alimentation en carburant et arrêter l'incendie ? C'est la question abordée à la fois expérimentalement et numériquement pour les stratifiés à matrice thermoplastique renforcée par des fibres de carbone [1-2].

Cette étude propose une description des mécanismes physiques mis en jeu, de leur cinétique en présence de fortes hétérogénéités locales (associées à l'alternance de zones riches en matrice ou en torons de fibres) et de gradients thermiques élevés au sein de stratifiés soumis à une agression thermique localisée sur une surface [3-4]. Lorsque le flux de chaleur est suffisamment important, la température au sein des stratifiés C/PPS atteint la température de décomposition thermique (ou pyrolyse à $T_d=450^\circ\text{C}$ [5]), ce qui va se traduire par (i) la germination de porosités et (ii) leur croissance / coalescence, cela couplé à un délaminage important et une altération des capacités structurelles du composite.

Ce travail met l'accent sur la modélisation de la thermomécanique impliquée sur un large éventail de propriétés thermiques, chimiques et mécaniques [6]. Une attention particulière est accordée à la méthodologie permettant l'identification d'un modèle basé sur une méso-structure dans la gamme complète des températures allant de la température ambiante à celle de la décomposition de la matrice polymère. Ce modèle représente la dégradation de la structure interne du composite par germination, croissance et coalescence de porosités, tout en négligeant en première approximation l'influence du délaminage à l'interface toron / matrice. La dégradation de la rigidité du stratifié en fonction du temps d'exposition sera ensuite comparée à celle mesurée expérimentalement, à la fois post-mortem, après exposition à une flamme kérosène, et pendant un chargement combiné associant flamme kérosène et effort mécanique.

Pendant l'exposition à un flux de chaleur élevé (une flamme kérosène est caractérisée par un flux de chaleur de 116kW/m^2 et une température maximale de 1150°C selon les réglementations de la FAA [7]), toute tentative de compréhension du comportement des stratifiés à base de thermoplastique nécessite de s'attaquer aux gradients forts et localisés en termes d'état de la matrice (vierge, vitreux, fondu et gazeux) et de réponses thermomécaniques. En outre, la connaissance des premiers stades de l'exposition à la flamme est cruciale car la plupart des changements thermomécaniques et structurels se produisent. Il est donc nécessaire d'avoir une discrétisation temporelle et spatiale suffisamment fine. Expérimentalement, il faut effectuer un grand nombre d'analyses de durées différentes et disposer de moyens précis pour déterminer le taux de porosités et leur distribution spatiale (microscopie optique, tomographie à rayons X). Numériquement, le modèle d'éléments finis doit être représentatif des dimensions du stratifié. Tout en recourant à un temps raisonnable de calcul.

2. Méthodologie expérimentale and numérique

1.1 Protocole expérimental

Des stratifiés quasi-isotropes ($0/90^\circ, \pm 45^\circ, 0/90^\circ, \pm 45^\circ, 0/90^\circ, \pm 45^\circ, 0/90^\circ$) associant matrice PPS et fibres de carbone (Fig. 1) ont été exposés à une flamme kérosène (flux de chaleur de 116kW/m^2 et température de flamme de 1150°C) via un brûleur petite échelle [4]. Le banc est également équipé d'une cellule de force de 100kN qui permet d'imposer un chargement mécanique (Fig. 2). Un thermocouple collé sur la face arrière permet de suivre l'évolution de la température en fonction du temps d'exposition.

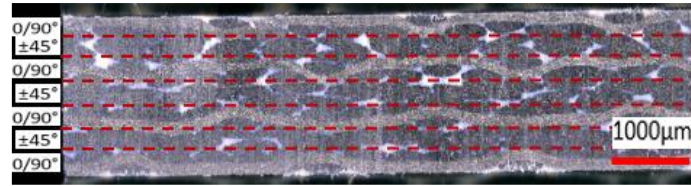


Fig. 1. Vue microscopique dans l'épaisseur d'un stratifié C/PPS avec une séquence d'empilement quasi-isotrope

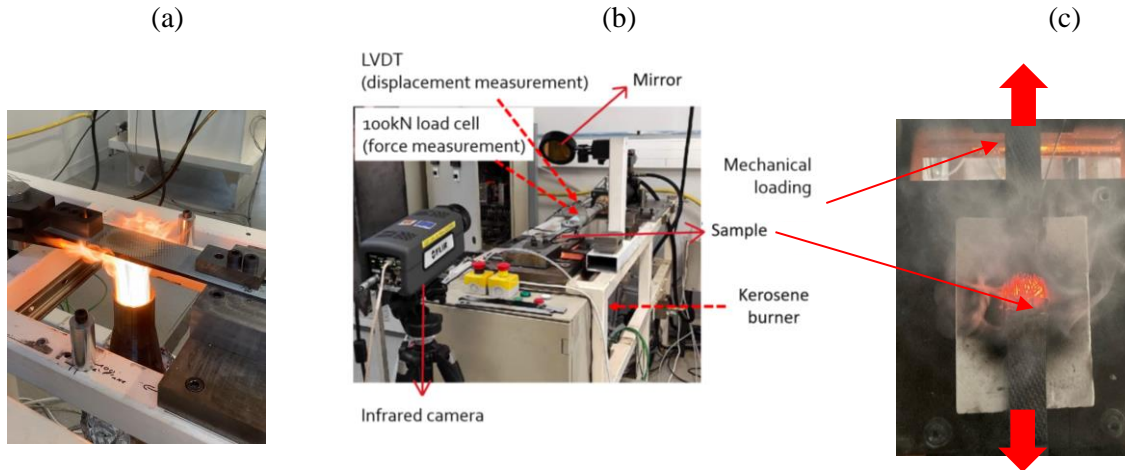


Fig. 2. Etude du comportement thermomécanique sous flamme kérosène de composites stratifiés C/PPS: (a) Bruleur kérosène – (b) Description du banc expérimental – (c) Essai de traction in situ

1.2 Modèle numérique

Le modèle Eléments Finis de formation des porosités développé dans [1-2] a été utilisé pour évaluer la représentativité de la formation de porosité par rapport au comportement thermomécanique des stratifiés. Un modèle mésoscopique (Fig. 3) a été utilisé pour évaluer la rigidité axiale (dans la direction \vec{x}) résiduelle due à la décomposition thermique. La taille du modèle a été limitée à 1/28 d'un volume élémentaire représentatif (VER) en raison du raffinement du maillage nécessaire pour reproduire correctement le gonflement des stratifiés. Le modèle géométrique et le maillage ont été construits à l'aide du logiciel TexGen.

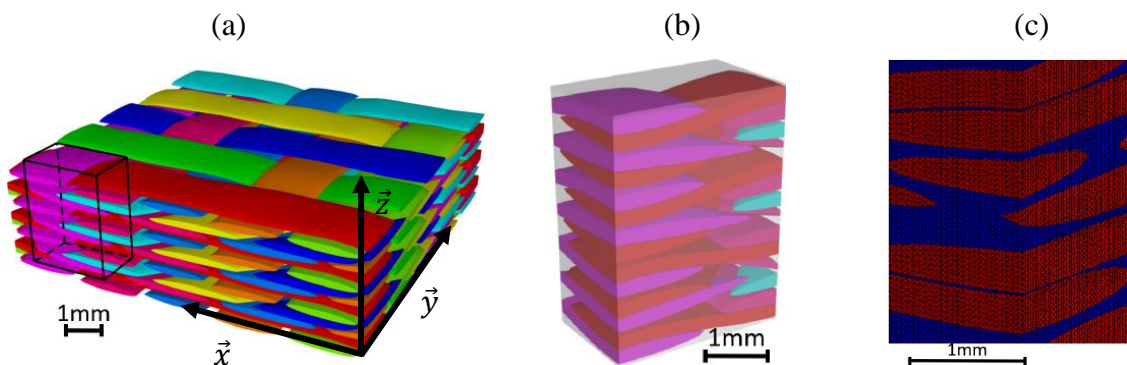


Fig. 3. Modèle mésoscopique 3D d'un stratifié 7 plis tissés de C/PPS avec une séquence d'empilement quasi-isotrope : (a) modèle géométrique – (b) Volume d'analyse – (c) vue sur le maillage

1.2.1 Modèle thermique

Les transferts thermiques suivants ont été pris en compte pour la modélisation de la réponse thermique à un flux de chaleur de 116kW/m² appliqué la face inférieure du stratifié :

- Conduction isotrope pour la matrice, orthotrope pour les torons
- Convection et rayonnement sur la surface exposée
- Seul un flux de chaleur radiatif est imposé sur la surface exposée
- Comportement adiabatique sur les côtés, car l'échelle du modèle n'est pas assez grande pour prendre en compte des conditions limites périodiques.

1.2.2 Modèle mécanique

2 Pour simuler la réponse du stratifié à un chargement combiné (flamme + chargement mécanique), une déformation axiale en traction simple est appliquée pendant le processus de chauffage. En vertu de l'hypothèse d'un couplage faible en mécanique et thermique, un calcul à un incrément de temps donné est réalisé en suivant les étapes suivantes : (i) résolution du problème thermique, (ii) calcul du nouvel état de porosité en fonction du champ de température (selon la loi cinétique présentée dans [2]), et (iii) résolution du problème mécanique dans les conditions calculées en (i) et (ii).

Les torons de fibres et la matrice ont été considérés respectivement comme des matériaux élastiques linéaires orthotropes et isotropes ; leurs propriétés sont présentées dans [1-2]. Les porosités ont été modélisées comme un matériau solide avec une rigidité quasi-nulle (0,001 MPa) et une conductivité thermique représentative de celle d'un gaz en cavité fermée de petite taille. Cela correspond à l'approche suivie dans [8-9]. L'évolution des propriétés en fonction de la température ont été tirées de [10].

3. Résultats et discussions

La Fig. 4 illustre le cas d'un flux de chaleur de 116 kW/m² imposé à la surface inférieure pendant 60s. Les distributions des porosités sur le contour du maillage, avec ou sans prise en compte du gonflement induit par la pression interne de pyrolyse dans les porosités y sont présentées. Le gradient de décomposition numérique et le gonflement sont en accord avec ceux observés expérimentalement dans les mêmes conditions d'agression thermique.

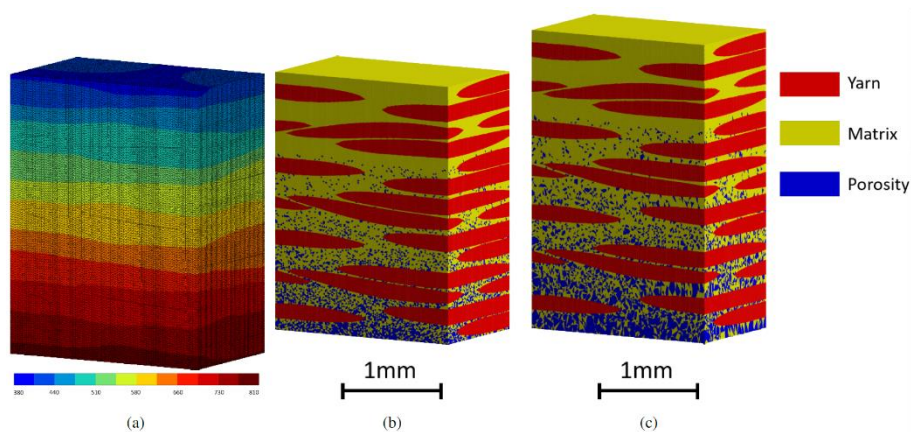


Fig. 4. Simulation de la décomposition thermique dans des conditions de température hétérogènes de stratifiés C/PPS QI soumis à un flux thermique de 116kw/m² pendant 60s : (a) champ de température (°C) – (b) sans gonflement – (c) avec gonflement

L'augmentation de la température dans les stratifiés QI entraîne une diminution de la rigidité axiale de chaque pli en fonction de sa distance à la face exposée à la flamme. La rigidité du pli N°1 (exposé à la flamme) diminue dans les 10 premières secondes alors que l'effet n'est observé sur le pli opposé qu'après 30 secondes (Fig. 5a). Dans l'ensemble, la rigidité des plis diminue quasi-linéairement jusqu'à atteindre une valeur minimale qui reste constante pendant le reste de l'exposition. Quantitativement, la rigidité axiale du stratifié diminue de 70%. La figure 5b montre la distribution

de la contrainte axiale dans les plis en fonction du temps d'exposition. Elle est divisée en deux catégories, les plis $0/90^\circ$ supportant la plus grande partie de la charge mécanique axiale par rapport aux plis $\pm 45^\circ$. Il apparaît que la contrainte axiale subit une décroissance importante dans le pli N°1 au cours des 10 premières secondes, qui est majoritairement compensée par la reprise de charge dans le pli N°3, lui aussi à $0/90^\circ$. Lorsque le pli N°3 se trouve lui aussi fortement dégradé (à ~ 15 s), la charge se reporte sur les autres plis à $0/90^\circ$. Puis, au fil de l'exposition, la différence d'état de contrainte d'un pli à l'autre diminue jusqu'à quasiment disparaître, la matrice étant alors dans un état de fusion ou de décomposition dans toute l'épaisseur du stratifié.

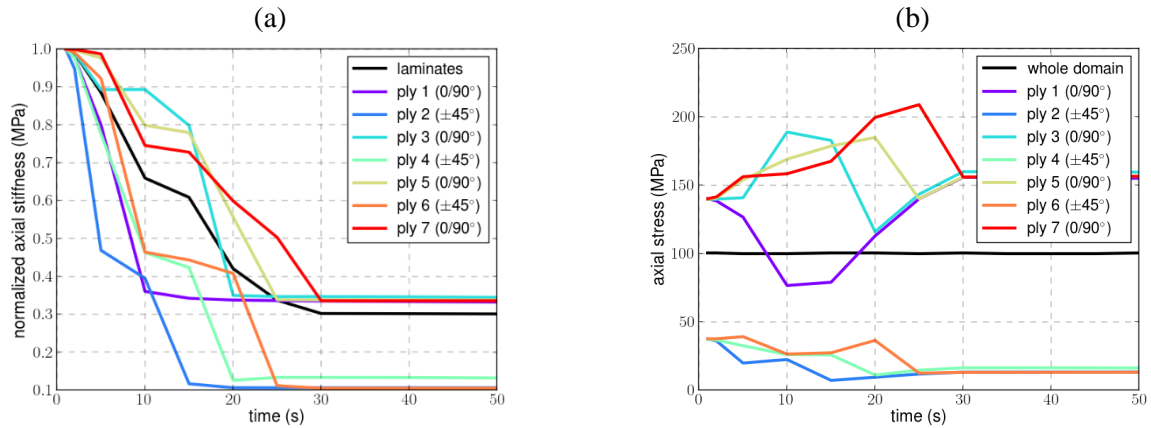


Fig. 5. Simulation de la réponse thermomécanique d'un stratifié C/PPS QI soumis à un flux thermique de 116kw/m^2 combiné à une charge mécanique axiale de 100MPa : (a) Evolution de la rigidité axiale normalisée (a) et de la contrainte axiale (b) des plis au cours des 50 premières secondes

Le modèle permet de déterminer la distribution du taux de porosités dans l'épaisseur de stratifiés QI C/PPS (Fig. 6) qui peut être comparée à celle obtenue par tomographie à rayons X pour un temps d'exposition de 60s. La modélisation reproduit le profil spécifique du taux de porosités : une décroissance globale en s'éloignant de la face exposée avec cependant des variations très importantes à l'intérieur des plis. La sous-estimation du taux de porosité par la modélisation est due au fait que la modélisation ne représente pas le mécanisme de délaminage à l'interface matrice / torons de fibres ou à l'interface entre plis (initié par le gradient de dilatation thermique). Ceci souligne l'importance de tenir compte des mécanismes de délaminage dans la modélisation.

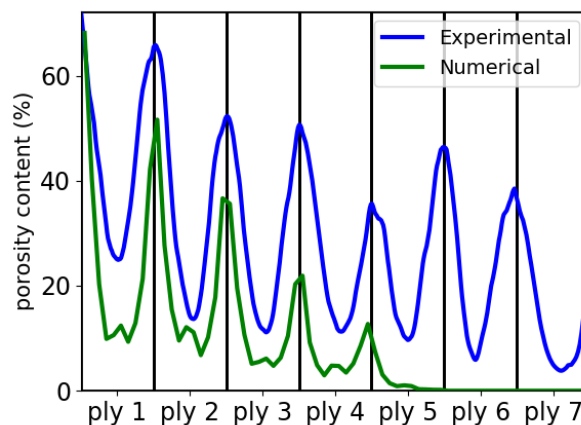


Fig. 7. Comparaison de la distribution du taux de porosités dans chaque pli des stratifiés C/PPS QI obtenue par tomographie à rayons X et par modélisation numérique après une exposition à la flamme kérosène pendant 60 secondes.

4. Conclusions

Dans des conditions d'incendie, le comportement thermomécanique des pièces structurelles composites à base de thermoplastique est considérablement modifié en raison de l'augmentation de la température dans les plis des stratifiés. Ce comportement résulte principalement de la dégradation thermique progressive de la matrice polymère conduisant à sa fusion et à sa pyrolyse. Ce travail a pour but d'étudier la représentativité d'un modèle numérique par éléments finis simulant la formation de porosités par germination et croissance et leurs conséquences sur le comportement thermomécanique des stratifiés QI C/PPS soumis à un flux de chaleur unilatéral (116kW/m^2) et à un effort de traction reproduisant les conditions de critiques en service.

Les résultats expérimentaux montrent une diminution spectaculaire (environ 74 %) de la rigidité axiale au cours de la première minute d'exposition avant la saturation. La même évolution est simulée par le modèle. La prédiction du comportement mécanique pendant les premières dizaines de secondes semble prometteuse, bien que les limites actuelles (les dommages ne sont pas pris en compte) ne permettent pas une simulation précise après 30s. Pendant cette perte rapide, la distribution des contraintes axiales et la reprise de charge entre les plis résultant du gradient de température sont prises en compte par le modèle proposé, ce qui permet d'obtenir des résultats satisfaisants.

Bien que basé sur des hypothèses fortes (couplage thermo-mécanique faible, mécanismes de formation des porosités, et comportement élastique des matériaux), ce modèle est prometteur pour rendre compte du couplage thermo-mécanique dans des composites stratifiés soumis à une agression thermique sévère (de type flamme).

Références

- [1] Y. Carpier, B. Vieille, F. Barbe, and A. Coppalle. Meso-structure-based thermomechanical modelling of thermoplastic-based laminates subjected to combined mechanical loading and severe thermal gradients. *Composites Part A* 2022; 162:107165.
- [2] D. Philippe, B. Vieille, F. Barbe. Modelling the gradual through thickness porosity formation and swelling during the thermal aggression of thermoplastic-based laminates. *Composites Part B* 2023; 266: 111026.
- [3] Y. Carpier, A. Alia, B. Vieille, F. Barbe, Experiments based analysis of thermal decomposition kinetics model. case of carbon fibers polyphenylene sulfide composites, *Polymer Degradation and Stability* 2021; 186: 109525.
- [4] B. Vieille, D. Philippe, N. Duprey, F. Barbe, M. Gelin, About the influence of high temperature or fire testing conditions on the tensile behavior of carbon reinforced poly phenylene sulfide laminates, *Journal of Composite Materials* 2024; 58 (2): 235–250.
- [5] C.-C. M. Ma, H.-C. Hsia, W.-L. Liu, J.-T. Hu, Studies on thermogravimetric properties of polyphenylene sulfide and polyetherether ketone resins and composites. *J. of Thermoplastic Comp. Mat.* 1988; 1(1): 39–49.
- [6] S. Duquesne, S. Bourbigot, Char Formation and Characterization. In: Wilkie, C. and Morgan, A. (eds), *Fire Retardancy of Polymeric Materials*, 2nd edn, pp. 239-260, CRC Press, Boca Raton, FL.
- [7] Federal Aviation Administration, Faa regulations 2023, https://www.faa.gov/regulations_policies/faa_regulations.
- [8] H. Cheung, L. A. Bromley, C. R. Wilke. Thermal conductivity of gas mixtures, *AIChE Journal* 196; 8(2): 221–228.
- [9] A. Mirabolghasemi, A. Akbarzadeh, D. Rodrigue, D. Therriault, Thermal conductivity of architected cellular metamaterials. *Acta Materialia* 2019; 174: 61–80.
- [10] The Engineering ToolBox, Air - thermal conductivity vs. temperature and pressure, https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-viscosity-conductivity-heat-capacity-d_1509.html (2009).