

Sujet de thèse :

## **Caractérisation de la cinétique de formation des porosités au sein de matériaux composites aéronautiques soumis à une agression thermique homogène ou hétérogène**

---

### **Contexte**

La transition énergétique nécessaire à un modèle social durable redéfinit l'utilisation de l'énergie et des outils qui l'accompagnent. Dans le domaine du transport aéronautique, les matériaux composites – en particulier des matériaux innovants à matrice thermoplastique – sont largement utilisés pour alléger les structures et la tolérance au dommage. Pour garantir l'intégrité des structures, les matériaux doivent être testés en situation accidentelle, en particulier soumis à une flamme. Ces conditions critiques en service mettent en jeu des phénomènes multiphysiques très difficiles à représenter : le matériau, intrinsèquement anisotrope et dont la mésostructure est complexe (renfort constitué de torons de fibres de carbone tissés associé à une matrice), est soumis à une agression thermique (haute température ou flamme), qui modifie sa structure et ses propriétés thermo-physico-chimico-mécaniques. Cette agression influence fortement les capacités structurelles (rigidité et résistance mécanique), mais les conditions de chargement mécanique influencent également les transferts thermiques au sein des composites stratifiés, et donc la distribution de température/décomposition thermique.

### **Problématique scientifique**

L'étude de la dégradation du matériau sous agression thermo-mécanique est une thématique transdisciplinaire initiée depuis une dizaine d'années dans l'équipe de recherche *Mécanique des Matériaux* du Groupe de Physique des Matériaux, en collaboration avec le laboratoire CORIA, spécialisé en thermique, combustion et mécanique des fluides [1-3]. Les travaux réalisés ont permis de mettre en évidence l'importance des porosités dans le processus de tenue au feu. Les porosités sont générées au sein de la matrice par sa décomposition (pyrolyse) et par les décohésions dues aux contraintes internes, notamment liées au contraste de dilatation entre fibres de carbone et matrice au sein de composites stratifiés soumis à de forts gradients thermiques. Ces porosités, qui peuvent être interconnectées, vont contribuer à modifier la distribution des contraintes mécaniques et des flux de chaleur au sein du matériau. Il est donc essentiel de caractériser la densité, la distribution spatiale et la morphologie des porosités.

Cette problématique s'appuie sur des moyens originaux et uniques, en particulier un banc de tenue mécanique au feu, permettant d'imposer un chargement mécanique à des éprouvettes soumises à une agression thermique par une flamme kérosène. Pour compléter ces analyses, l'équipe dispose également d'un tomographe RX équipé d'une cellule de force, permettant notamment d'étudier l'initiation, la propagation et la coalescence des fissures induites par les porosités qui agissent comme des concentrateurs de contraintes lors d'un chargement mécanique (Figure 1).

### **Objectifs**

Les porosités constituant un facteur d'ordre 1 dans la dégradation des propriétés mécaniques, l'objectif principal de cette thèse est de comprendre les phénomènes de formation, croissance et coalescence des porosités au sein d'un matériau composite fibreux et leurs influences dans le couplage thermo-mécanique. Cette démarche vise ainsi plus spécifiquement à :

- Analyser les phénomènes de formation des porosités au sein de la matrice à différentes échelles,
- Relier l'état d'endommagement induit par agression thermique (homogène ou hétérogène) et les propriétés thermo-physiques au sein de la mésostructure,
- Analyser le rôle des porosités dans l'endommagement induit thermiquement, à travers les mécanismes de redistribution des contraintes et des transferts thermiques.

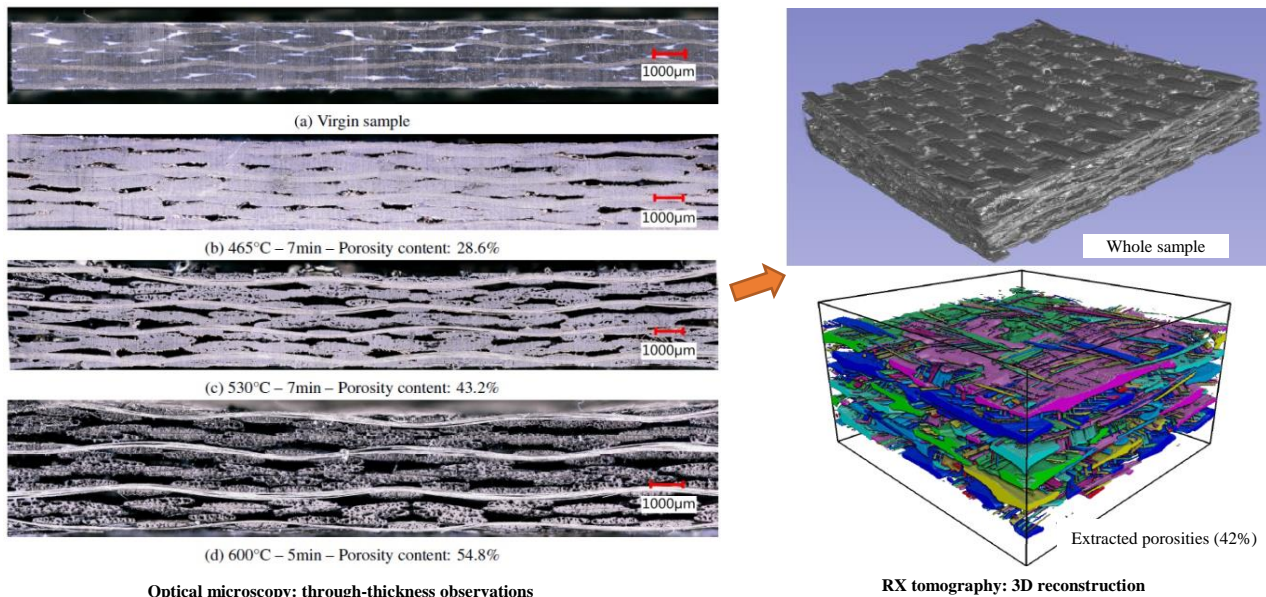


Figure 1 : Caractérisations d'échantillons C/PPS après agression isotherme (four haute  $T^{\circ}\text{C}$ ) : Coupes 2D pour différentes conditions (gauche) ; Reconstruction 3D après agression thermique à 530°C pendant 7 min, géométrie complète et porosités (droite) [5-6]

## Méthodologie

Dans le cadre de cette thèse, le(la) doctorant(e) bénéficiera de nombreux moyens d'analyse : diffusivomètre, caméra IR, tomographe RX, banc de tenue mécanique au feu. Ces équipements seront mis en œuvre pour atteindre les objectifs énoncés précédemment, mais il(elle) pourra également développer d'autres méthodes de caractérisation innovantes. Les travaux se dérouleront autour de plusieurs axes de recherche :

- Mesures par diffusivométrie, sur toute la gamme de températures rencontrées lors d'une exposition au feu, afin de formuler des lois entre la diffusivité thermique et les porosités,
- Réalisation d'essais mécaniques *in situ* tomographe RX sur des échantillons composites aéronautiques ayant subi une agression en conditions isothermes (four) ou anisothermes (flamme),
- Réalisation d'essais mécaniques suite à une agression thermique ou lors d'essais combinés en conditions isothermes et anisothermes,
- Analyses numériques par Eléments Finis traduisant le couplage entre la formation des porosités et localisation/redistribution des contraintes dans les différents plis des stratifiés.

## Encadrement

Benoit Vieille, Enseignant-chercheur INSA Rouen/GPM : [benoit.vieille@insa-rouen.fr](mailto:benoit.vieille@insa-rouen.fr)

Tanguy Davin, Enseignant-chercheur INSA Rouen/GPM : [tanguy.davin@insa-rouen.fr](mailto:tanguy.davin@insa-rouen.fr)

**Démarrage souhaité** : Octobre 2024

**Mots-clés** : matériaux composites, comportement thermo-mécanique, analyse multi-échelles, porosités, tomographie RX

## Références

- [1] B. Vieille *et al.*, « Kerosene flame behaviour of C/PEKK composite laminates: Influence of exposure time and laminates lay-up on residual mechanical properties », *Compos. Part B Eng.*, vol. 222, p. 109046, oct. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109046.
- [2] B. Vieille *et al.*, « Influence of kerosene flame on fire-behaviour and mechanical properties of hybrid Carbon Glass fibers reinforced PEEK composite laminates », *Compos. Struct.*, vol. 279, p. 114786, janv. 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114786.
- [3] Y. Carpier, B. Vieille, M. A. Maaroufi, A. Coppalle, et F. Barbe, « Mechanical behavior of carbon fibers polyphenylene sulfide composites exposed to radiant heat flux and constant compressive force », *Compos. Struct.*, sept. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.05.086.
- [4] D. Philippe, B. Vieille, et F. Barbe, « Modelling the gradual through thickness porosity formation and swelling during the thermal aggression of thermoplastic based laminates », *Compos. Part B Eng.*, vol. 266, p. 111026, nov. 2023, doi: 10.1016/j.compositesb.2023.111026.
- [5] D. Philippe, « About the thermomechanical behavior of thermoplastic composites under critical temperature conditions: a multiscale numerical analysis and experimental characterisation », These, Normandie, 2023. Disponible sur: <https://theses.fr/s260554>