

## **Modélisation du comportement de matériaux composites soumis à des chargements thermomécaniques**

### **1. Objet de la thèse**

Le travail de thèse proposé vise à étudier la dégradation et la décomposition de matériaux composites structuraux soumis simultanément à une agression thermique de type incendie et une charge mécanique. Le souhait est de modéliser les différents modes d'endommagement (dus à la mécanique, la thermique, la combustion) de composants soumis à des chargements thermomécaniques et proposer un outil de simulation couplé pour le calcul de structures.

### **2. Descriptif de la thèse**

L'utilisation de matériaux composites vise à réduire le poids des structures tout en maintenant des propriétés de rigidité et de résistance élevées. Cette utilisation répandue de matériaux inflammables augmente cependant les risques d'incendie. Par exemple, la sécurité des passagers d'aéronefs dont le fuselage est réalisé en matériaux composites requiert des efforts de recherche et développement pour comprendre les mécanismes de décomposition thermique et de combustion, modéliser leur influence sur les propriétés mécaniques et enfin, réduire les risques liés aux incendies sans remettre en cause les performances. Dans ce contexte, cette étude visera le développement d'outils permettant d'optimiser les propriétés des matériaux influant sur le temps à rupture.

Il est généralement observé qu'un flux de chaleur conduit à une transformation du matériau composite sain en charbon, entraînant une baisse de sa tenue mécanique [Ext1]. Des études menées récemment à l'Institut P' [P'1] montrent alors, pour une classe de matériaux à matrice thermodurcissable, que la diminution des propriétés mécaniques est proportionnelle à la densité d'énergie reçue lors de l'agression. On dispose actuellement de résultats expérimentaux à l'échelle d'éprouvettes de faible épaisseur fournissant des paramètres de modélisation (tels que les variations des propriétés mécaniques lors de la décomposition thermique [P'2]) mais dont la question de la transposition à l'échelle de la structure réelle se pose. La compréhension des couplages multi-physiques est un enjeu scientifique majeur : si des travaux de la littérature [Ext2] explorent la tenue mécanique résiduelle de composites préalablement soumis à un flux de chaleur, il existe peu

d'informations sur le comportement consécutif à l'application simultanée d'une contrainte et d'un flux. Les efforts de modélisation s'arrêtent en général à un couplage faible, dans lequel les effets thermiques ont seuls une influence sur les propriétés mécaniques [Ext3]. On propose de considérer un couplage fort entre les différentes physiques en introduisant un « taux d'endommagement », correspondant à l'évolution de la fraction de charbon consécutive à l'application d'une source de chaleur. Cette modélisation sera basée sur les travaux de [Ext4, Ext5], dans le cas multi-physique.

Il s'agira ainsi de décrire numériquement avec précision le processus de décomposition thermique dans l'épaisseur du matériau (modèle de pyrolyse), puis d'intégrer ce type de modèle au sein du code de calcul choisi pour décrire à échelle croissante le processus de décomposition thermique, de combustion et de propagation de flamme.

Un modèle de type « champ de phase » sera implémenté dans un code de calcul. Ce type de modèle nous permettra de mieux prendre en compte l'irréversibilité du phénomène étudié alors que de nombreux travaux de la littérature se contentent de relier les propriétés mécaniques à la température [Ext2]. La connaissance des mécanismes de dégradation couplés thermique / mécanique ouvre la voie à la modélisation de ces phénomènes afin de disposer d'un outil de dimensionnement des structures composites sous chargement sévère.

### 3. Programme de la thèse

A partir des résultats d'essais thermomécaniques couplés existants à l'Institut P' [P'1, P'2], un modèle apte à simuler les interactions fortes entre les transferts de chaleur et la dégradation thermique d'une part, et le comportement mécanique de structures composites sous chargement quelconque d'autre part, sera développé. Des travaux ont déjà été entrepris dans l'unité de recherche afin de coupler des modèles d'endommagement mécanique (de type Hashin) et des modèles de décomposition due à la pyrolyse, mais la gestion de multiples non-linéarités et la nécessité d'utiliser des artefacts numériques afin d'assurer la convergence dans ce contexte multi-physique fortement couplé incite à explorer de nouvelles voies. Nous allons dans un premier temps développer un modèle thermomécanique « simple », *i.e.* à configuration fixe (sans évolution) d'endommagement, afin d'identifier l'abatement des propriétés. Le modèle sera développé dans un code créé en interne de sorte à ne pas être limité par des contraintes dans le choix des modes de résolution souvent imposés dans les codes commerciaux. Ensuite, une évolution de ce premier modèle sera effectuée pour prendre en compte la cinétique de dégradation « chimique » due à l'augmentation de la température. L'étude des temps caractéristiques

de la cinétique et de la mécanique permettra de coupler les deux aspects dans un modèle unique. Dans un premier temps, le modèle cinétique implémenté sera simple (peu de réactions) pour faciliter le couplage.

De sorte à mieux prendre compte la dégradation du matériau, l'ajout d'endommagement continu et de champs de phase sera un atout fort de cette étude. La méthode des champs de phase permettra de gérer efficacement les surfaces et interfaces par des champs scalaires (ici, la transition entre le composite transformé en charbon et le composite encore sain). Pour cette modélisation, deux grandeurs seront nécessaires : une distance caractéristique de l'endommagement en utilisant les outils d'analyse d'image et de covariance 3D développés en interne [P'3] et des fonctions de pondération permettant d'obtenir l'évolution des propriétés mécaniques et thermiques. Nous exploiterons des données expérimentales reliant le flux de chaleur à l'épaisseur de charbon disponibles à l'Institut P' ainsi que des simulations à partir d'images tomographiques à champ complet utilisant un solveur FFT afin de valider ces fonctions de pondération.

Le but est de pouvoir fournir un outil prédictif à même de simuler le comportement thermomécanique de structures quelconques soumises simultanément à un chargement mécanique et à un flux de chaleur, où dégradation thermique, endommagement mécanique et transferts de chaleur sont couplés, tout en limitant les temps de calcul. Le développement d'un élément fini incluant le champ de phase comme degré de liberté supplémentaire sera la dernière partie du travail de thèse. Il pourra se baser sur les développements faits lors d'une récente thèse [P'4] pour le développement d'un élément fini adapté à cette étude et sur l'expérience de l'unité de recherche dans le calcul de structures soumises au feu [P'5].

Sur le volet numérique, le doctorant bénéficiera de compétences en mécanique de chercheurs de l'équipe Endommagement et Durabilité et en décomposition thermique et combustion, de chercheurs de l'équipe Combustion Hétérogène :

- Appui de deux enseignants-chercheurs et un ingénieur de recherche de l'équipe, spécialistes en méthodes numériques et en simulation par éléments finis.
- Appui de trois enseignants-chercheurs en modélisation numérique de la décomposition thermique et de la combustion.

Afin de réaliser les actions évoquées précédemment, le programme de la thèse comportera les principaux volets suivants :

Phase	Période	Descriptif
1	M1-M6	Phase bibliographique sur les matériaux composites : endommagement, décomposition thermique, combustion, couplages multi-physiques, techniques de modélisation (endommagement continu, champs de phase...)
2	M4-M12	Développement du modèle cinétique de pyrolyse (décomposition thermique) et validation à échelle croissante. Détermination des propriétés thermophysiques nécessaires au modèle numérique Développement d'un cadre de modélisation de l'endommagement par champ de phase couplant thermique, combustion et mécanique
3	M12-M18	Identification des grandeurs caractéristiques
4	M18-M24	Développement d'un élément fini enrichi Description couplée des processus de combustion
5	M24-M30	Simulation de cas tests sur échantillons et structures, validation de l'approche thermique (décomposition, combustion) et mécanique couplée
6	M30-M36	Rédaction du mémoire de thèse et valorisation par des publications

Le (la) candidat(e) recherché(e) doit avoir de bonnes compétences en mécanique du solide et simulation numérique, avec un goût prononcé pour les aspects théoriques, et une bonne aptitude à la communication orale et écrite en anglais. La thèse débutera à la rentrée 2021. La thèse se déroulera dans l'équipe « Endommagement et Durabilité » de l'Institut P' (UPR CNRS 3346), dans les locaux de l'ISAE-ENSMA à Poitiers. Le doctorant sera encadré par Azdine NAIT-ALI (Maître de Conférences ENSMA), Benjamin BATIOT (Maître de Conférences Université de Poitiers) et Damien HALM (Professeur ENSMA).

Le sujet sera co-financé par le Labex Interactifs (financement acquis) et par un co-financier institutionnel (demandes en cours d'instruction). Le dossier sera définitivement accepté à l'issue de l'analyse des candidatures par le co-financier et l'Ecole Doctorale.

La rémunération est d'environ 1900€ bruts mensuels.

Merci de faire parvenir votre candidature (CV détaillé, lettre de motivation) ou vos demandes de renseignement à : [azdine.nait-ali@ensma.fr](mailto:azdine.nait-ali@ensma.fr)

#### 4. Références

##### *Références de l'équipe d'accueil*

- [P'1] T. H. Y. Quach, A. Benelfellah, B. Batiot, D. Halm, T. Rogaume, J. Luche, D. Bertheau, Determination of the tensile residual properties of a wound carbon/epoxy composite first exposed to fire, **Journal of Composite Materials**, 51(1), p.17-29, 2017
- [P'2] A. Benelfellah, D. Halm, D. Bertheau, P. Boulet, Z. Acem, D. Brissinger, T. Rogaume, Effect of a coupled thermomechanical loading on the residual mechanical strength and on the surface temperature of wound carbon/epoxy composite , **Journal of Composite Materials**, 51(22), p.3137-3147, 2017
- [P'3] A. Nait-ali, O. Kane-Dialo, S. Castagnet, Catching the time evolution of microstructure morphology from dynamic covariograms. **Comptes Rendus de Mécanique**, 343(4), p301-306, 2015.
- [P'4] S Ben, Elhaj Salah, Modélisation non-locale et stochastique de matériaux à fort gradient de propriétés par développement asymptotique. Thèse de Doctorat, ISAE-ENSMA, 2019.
- [P'5] D. Halm, F. Fouillen, E. Lainé, M. Gueguen, D. Bertheau, T. Van Eekelen, Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: Fire tests and burst simulation, **International Journal of Hydrogen Energy**, 42(31), p.20056-20070, 2017

##### *Références hors équipe d'accueil*

- [Ext1] A.P. Mouritz, Z. Mathys, Post-fire mechanical properties of marine polymer composites, **Composites structures**, 47, p.643-665, 1999.
- [Ext2] S. Feih, Z. Mathys, A.G. Gibson, A.P. Mouritz. Modelling the compression strength of polymer laminates in fire, **Composites: Part A**, 38, p.2354-2365, 2007.
- [Ext3] J. Hu, J. Chen, S. Sundararaman, K. Chandrashekhara, W. Chernicoff, Analysis of composite hydrogen storage cylinders subjected to localized flame impingements, **International Journal of Hydrogen Energy**, 33, p. 2738– 2746, 2008.
- [Ext4] H. Amor, J.J Marigo, C. Maurini, Regularized formulation of the variational brittle fracture with unilateral contact, **Numerical experiments**, 57, p. 1209-1229, 2009
- [Ext5] T.T. Nguyen, J. Yvonnet, Q-Z Zhu, M. Bornert, C. Chateau, A phase field method to simulate crack nucleation and propagation in strongly heterogeneous materials from direct imaging of their microstructure, **International Journal of Solids and Structures**, 139, p. 18-39, 2015