

Méthode d'homogénéisation avancée appliquée à l'identification des propriétés thermophysiques des matériaux composites soumis au feu

Gillian LEPLAT^{1*}, Valentin BIASI¹

¹ONERA - The French Aerospace Lab, F-31055 Toulouse, FRANCE

*(auteur correspondant : Gillian.Leplat@onera.fr)

Résumé - Les avions de nouvelle génération font appel de plus en plus aux matériaux composites de type CFRP (carbon fiber reinforced polymer) dont les propriétés mécaniques sont telles qu'elles leur confèrent des avantages évidents de réduction de masse, par rapport à leurs prédécesseurs métalliques, tout en assurant leur fonction première de tenue structurelle. Ces matériaux doivent cependant satisfaire à des contraintes liées à la sécurité des passagers, imposées par les normes drastiques de certification, dans le cas d'un incident de type feu par exemple.

Alors que la réponse de ces matériaux à une flamme est étudiée principalement de façon expérimentale au moyen d'essais feu standards (ISO2685, FAR25.856), l'ONERA a développé un outil numérique (MoDeTheC) capable de simuler le comportement thermo-chimique de matériaux composites stratifiés soumis au feu en prenant en compte les transferts de chaleur et de masse en milieu poreux orthotrope, les transformations chimiques par pyrolyse et/ou oxydation, et le transport jusqu'à éjection des gaz de décomposition dans le matériau. L'objectif est de pouvoir à terme intégrer à moindre coût la problématique liée au risque feu dès la phase de conception des nouvelles structures aéronautiques afin d'assurer une meilleure gestion des marges de sécurité et répondre au besoin de l'avionneur.

Néanmoins, l'utilisation pertinente d'un tel code de calcul nécessite de renseigner de nombreux paramètres de calcul et en particulier les propriétés thermophysiques du matériau qui pilotent les transferts de chaleur dans le matériau et par voie de conséquence la dégradation. La précision du résultat du calcul dépend fortement de la précision avec laquelle ces propriétés sont données. La caractérisation, basée sur l'utilisation de moyens expérimentaux, de ces propriétés n'est pas chose aisée car la décomposition des matériaux composites soumis au feu requiert la connaissance de ces paramètres thermophysiques en fonction de la température, sur une gamme étendue, et tout au long de la dégradation. Le travail détaillé ici repose sur l'utilisation d'un moyen de caractérisation original, le montage BLADE, développé à l'ONERA et permettant d'identifier simultanément les propriétés thermophysiques (tenseur de conductivité et capacité calorifique) de matériaux composites orthotropes en intégrant la dépendance en température de chacun des paramètres et ceci pour les états vierge et dégradé des matériaux éprouvettes étudiés. À partir de ces propriétés globales obtenues à l'aide d'un processus d'optimisation basé sur un modèle de conduction de la chaleur en milieu homogène orthotrope, une homogénéisation inverse basée sur la méthode de Mori-Tanaka est mise en œuvre afin d'obtenir les propriétés thermophysiques des différents éléments (résine, fibre, char...) constituant le matériau composite en dégradation.

Un comportement particulier de ce type de matériaux a pu être mis en évidence grâce à cette approche, notamment pour l'évolution de la conductivité thermique dans le plan et hors plan analysée à l'échelle du pli et homogénéisé ensuite à l'échelle d'un stratifié 16 plis unidirectionnel et quasi-isotrope. Ces données très détaillées, utilisées dans le code MoDeTheC sur un cas de dégradation laser mené avec le montage BLADE également, ont permis de démontrer par la suite l'intérêt d'une telle approche pour simuler avec une grande fidélité, et ainsi comprendre, le comportement thermo-chimique de ces matériaux lorsqu'ils se dégradent.

1. Introduction

Cette étude s'intéresse au comportement thermique d'un matériau composite stratifié soumis au feu. L'approche repose sur l'identification des propriétés thermophysiques de chaque constituant du matériau à partir des propriétés globales obtenues expérimentalement sur les états vierge et dégradé du matériau, associée à une méthode d'homogénéisation avancée basée notamment sur une formulation de Mori-Tanaka pour la conductivité thermique. L'objectif est de fournir l'ensemble des paramètres permettant de décrire les transferts de chaleur se produisant au sein de ce type de matériaux complexes lorsqu'ils se dégradent.

2. Approche expérimentale pour l'identification des propriétés globales

2.1. Présentation du matériau d'étude

La dégradation d'un matériau composite stratifié composé de résine époxy renforcée par des fibres de carbone est étudiée. Le matériau, T700/M21, est communément utilisé dans l'industrie aéronautique pour la fabrication de pièces structurales et son comportement sous forte contrainte thermique est analysé dans une configuration de 16 plis, d'épaisseur finale 4.16mm , selon un empilement quasi-isotrope T700M21ISO $[0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ]_{sym}$ ou unidirectionnel T700M21UD $[0^\circ]_{16}$.

La caractérisation expérimentale des propriétés est réalisée à l'échelle aussi bien de la matière (quelques mg) que du matériau (quelques g) considérant un pli ou l'ensemble du stratifié.

2.2. Description du montage BLADE

Le montage BLADE (Banc Laser de cAractérisation et DEgradation) de l'ONERA est utilisé pour cette étude et présenté en figure 1. Ce montage original repose sur un principe simple. Une éprouvette de $80 \times 80\text{mm}^2$ est placée sur un porte-échantillon à l'intérieur d'une cavité d'essais régulée en température et pression. Un laser continu infrarouge de longueur d'onde $\lambda = 1080\text{nm}$ et de puissance maximale 50W constitue la source de chaleur du système permettant de chauffer la face avant du matériau avec un faisceau gaussien collimaté à $\emptyset = 21.8\text{mm} @ 1/e^2$. Le temps d'exposition est contrôlé précisément à l'aide d'un obturateur électronique à faible temps de réponse et réfléchissant en position fermée le faisceau incident vers un puits de chaleur. Enfin, une caméra infrarouge mesure l'évolution du champ de température instationnaire en face arrière de l'éprouvette au travers d'un hublot en $ZnSe$.

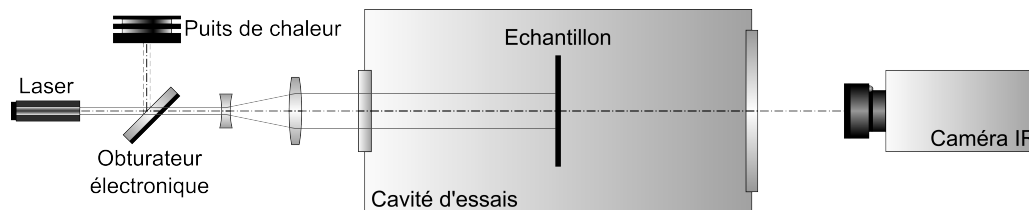


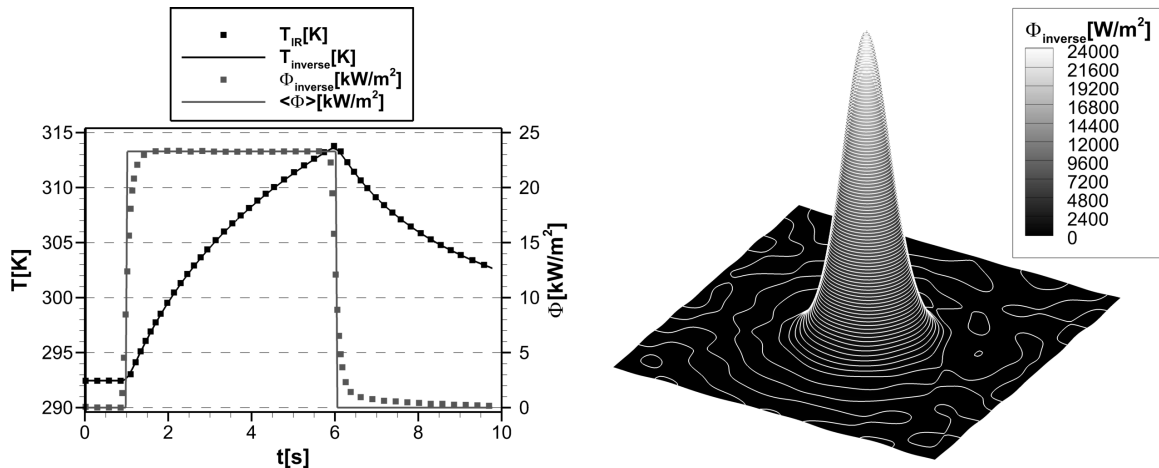
Figure 1 - Illustration du montage BLADE

Pour cette application, le dispositif permet d'une part un parfait contrôle des conditions d'essais en abaissant la pression dans la cavité suffisamment pour s'affranchir des échanges de chaleur par convection qui sont difficilement quantifiables expérimentalement. D'autre part, l'utilisation d'un laser adapté en guise de source de chaleur permet de maîtriser l'amplitude et la distribution du flux thermique appliqué sur le matériau. Le profil gaussien généré par le laser crée une excitation thermique non uniforme à la surface du matériau permettant de mettre en évidence l'anisotropie des transferts de chaleur dans le matériau et ainsi d'obtenir une base de

données d'entrée pour l'utilisation du code de calcul MoDeTheC de l'ONERA.

2.3. Méthode inverse et modèle direct non linéaire de conduction de la chaleur

En pratique, ce flux est caractérisé par une méthode inverse non linéaire de conduction de la chaleur. La méthode, détaillée dans [1], repose sur la mise en œuvre du montage BLADE pour la mesure de la réponse en température en face arrière d'un matériau homogène isotrope en titane pur utilisé comme échantillon de référence. L'acquisition, représentée par les symboles noirs sur la figure 2(a), est faite depuis l'état au repos de l'échantillon et se poursuit pendant la phase de chauffe du matériau soumis au flux laser à basse puissance (inférieure à 5W) pendant 5s puis la phase de refroidissement.



(a) Évolution de la température face arrière et du flux face avant extraits au centre

(b) Distribution du flux de chaleur instantané

Figure 2 - Identification du flux de chaleur par méthode inverse non linéaire de conduction de la chaleur

Ces mesures alimentent ensuite la méthode inverse pour déterminer la distribution de flux de chaleur au cours du temps (symboles gris sur la figure 2(a) et figure 2(b)) générant une réponse thermique calculée en face arrière (trait plein noir sur la figure 2(a)) similaire à celle mesurée expérimentalement. Les valeurs calculées reposent sur l'utilisation d'un modèle de conduction de la chaleur non linéaire en milieu homogène anisotrope intégré au code de méthode inverse. Le calcul reprend l'ensemble des conditions initiales et aux limites imposées lors des essais ainsi que les propriétés thermophysiques supposées connues de l'échantillon de référence. Les retards de montée et descente de la température obtenus par la méthode inverse sont uniquement des artefacts numériques introduits par l'utilisation de pas de temps futurs. Il est convenu d'utiliser par la suite, la distribution de flux de chaleur moyennée durant la phase stationnaire dont la valeur maximale est tracée sur la courbe en trait plein gris de la figure 2(a).

2.4. Détermination des propriétés thermophysiques globales du matériau homogène

Le protocole d'essais est reconduit pour la caractérisation des matériaux composites. Les conditions expérimentales initiales et aux limites étant connues ou désormais identifiées en ce qui concerne la distribution de flux de chaleur en face avant, le problème inverse concerne l'estimation de la capacité calorifique d'une part et du tenseur de conductivité thermique d'autre part, ce dernier se limitant à ses trois coefficients diagonaux du fait de l'orthotropie de la diffusion de la chaleur dans ce type de matériau composite stratifié. La résolution de ce problème se base sur la connaissance des champs de température transitoires mesurés par thermographie infrarouge $T_{i,j}^{[t]}$; (i, j) faisant référence aux pas d'espace dans le plan de l'échantillon et t à la variable temporelle correspondant à la période d'acquisition.

La procédure consiste alors, après initialisation des propriétés, à déterminer numériquement à l'aide du modèle de conduction de la chaleur en milieu homogène et orthotrope le vecteur $\mathcal{P} = [C_P^{(0)}, C_P^{(1)}, k_x^{(0)}, k_x^{(1)}, k_y^{(0)}, k_y^{(1)}, k_z^{(0)}, k_z^{(1)}]^T$ définissant les coefficients polynomiaux des propriétés thermophysiques du matériau. Ces 8 paramètres définissent les lois d'évolution des propriétés supposant un comportement linéaire en fonction de la température. La sensibilité par rapport à la variable température est assurée à la fois par l'élévation de température au sein du matériau composite généralement isolant durant l'essai mais également par la fourniture de données expérimentales issues d'essais réalisés à différentes températures initiales ($T = [0 - 100^\circ C]$) grâce à la régulation de la température de la cavité d'essais.

La méthode d'optimisation itérative de Levenberg-Marquardt est utilisée ensuite pour minimiser l'écart entre la mesure et le champ de température transitoire calculé $T_{i,j}^{[t]}$; écart défini au sens des moindres carrés par la fonctionnelle objectif suivante :

$$\mathcal{F} = \sum_i^{n_x} \sum_j^{n_y} \sum_t^{n_t} \left[T_{i,j}^{[t]} - T_{i,j}^{[t]}(\mathcal{P}) \right]^2$$

($n_x; n_y; n_t$) étant le nombre de pas d'espace selon x et y , et de pas de temps.

Les résultats issus de l'approche expérimentale sont représentés par des symboles noirs pleins sur les figures 4, 5 et 6. Ils ont été obtenus à partir d'essais réalisés à une température initiale de $20^\circ C$ et $80^\circ C$ avec le montage BLADE pour des échantillons de T700M21UD à l'état vierge et pré-dégradé au four suivant un protocole défini par le modèle cinétique de dégradation.

3. Méthodologie d'homogénéisation avancée

La connaissance des propriétés thermophysiques globales pour des états "figés" du matériau composite est une information importante pour la caractérisation des transferts de chaleur dans le matériau. Cependant, l'utilisation de ces données dans un code de calcul se limite aux cas où aucune réaction chimique n'intervient. Il est donc nécessaire d'étendre les propriétés globales du matériau à tout état de dégradation afin d'être représentatif du comportement thermique du matériau durant les transformations qu'il subit. L'approche adoptée à l'ONERA se base sur une méthode d'homogénéisation inverse permettant d'identifier les propriétés de chacun des constituants du matériau à partir des propriétés globales mesurées expérimentalement et des fractions volumiques et massiques obtenues numériquement avec le code MoDeTheC.

Le matériau considéré est composé à l'état vierge d'une résine époxy renforcée par des fibres de carbone. Une analyse thermogravimétrique [2] a montré que, sous l'effet de la température, la résine se dégrade par pyrolyse pour former des gaz et un résidu solide carbonisé nommé le *char* qui se dégradera à son tour par oxydation pour des températures plus élevées et ne laisser que les fibres. La description complète du matériau peut donc se faire en considérant 5 constituants : fibre, résine, *char*, gaz de pyrolyse et d'oxydation.

3.1. Loi des mélanges pour la capacité calorifique

La caractérisation par méthode inverse détaillée dans la section 2.a permis d'obtenir des lois d'évolution linéaire de la capacité calorifique globale pour le matériau composite en configuration unidirectionnelle (représentative également de l'échelle du pli) à l'état vierge et dégradé (voir figures 4, 5 et 6). L'étude de Pradère et al. [3] a montré que pour différents types de fibres de carbone, les caractérisations expérimentales de capacité calorifique étaient très proches des valeurs du graphite pur. Ces valeurs sont donc supposées connues dans cette étude. Il est ensuite possible d'obtenir respectivement le C_P de la résine à partir du C_P global à l'état vierge et le C_P du *char* à partir du C_P pré-dégradé (en supposant négligeable la fraction massique des gaz),

en utilisant la loi des mélanges classique, pondérée par les fractions massiques Y_i , suivante : $C_P = \sum_i Y_i C_{P_i}$. Les lois d'évolution correspondantes sont tracées sur la figure 4.

3.2. Homogénéisation de Mori-Tanaka pour la conductivité thermique

L'identification de la conductivité thermique de chaque constituant est plus complexe car ce n'est pas une grandeur massique (comme la capacité calorifique) ni même purement volumique. L'utilisation, communément abusive, d'une loi des mélanges basée simplement sur les fractions volumiques n'est pas représentative de ce type de matériau et nécessite un traitement particulier.

3.2.1. Formulation multi-constituants généralisée

Le modèle de Mori-Tanaka [4] est initialement développé pour homogénéiser les propriétés mécaniques élastiques d'un matériau constitué d'une phase continue ("o") et d'inclusions ellipsoïdales ("p"). La reformulation de Benveniste [5] est étendue pour l'application à la conductivité thermique du matériau. Ainsi, le flux de chaleur moyen $\langle \vec{\Phi} \rangle$ est relié au gradient de température moyen $\langle \vec{\nabla} T \rangle$ par le tenseur de conductivité thermique apparente \underline{k}^* du matériau exprimé à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif :

$$\langle \vec{\Phi} \rangle = -\underline{k}^* \cdot \langle \vec{\nabla} T \rangle \quad \text{où} \quad \underline{k}^* = \left(\sum_p \varphi_p k_p \underline{A}_p \right) \left(\sum_p \varphi_p \underline{A}_p \right)^{-1} \quad \text{et} \quad \underline{A}_p = \left(\underline{I} - \underline{S}_p \frac{k_o - k_p}{k_o} \right)^{-1}$$

avec φ_p les fractions volumiques, \underline{A}_p l'application linéaire faisant intervenir \underline{S}_p le pseudo-tenseur diagonal d'Eshelby dépendant uniquement de la géométrie des inclusions ellipsoïdales et $k_{o,p}$ les conductivités thermiques isotropes des différentes phases.

Cependant, une hypothèse majeure de l'approche de Mori-Tanaka est de considérer la présence d'un milieu englobant continu. Cette hypothèse est vérifiée pour l'état vierge du matériau avec la présence de la résine englobant les fibres de carbone mais cette résine disparaît au profit du char et du gaz suite à la réaction de pyrolyse. Afin de vérifier cette condition indispensable, la démarche adoptée consiste à opérer une double homogénéisation de Mori-Tanaka appliquée dans un premier temps aux seuls constituants "résine, char et gaz" qui forment le milieu englobant continu et dans un second à ce milieu ainsi défini et englobant les fibres de carbone.

Dans la suite de l'étude, les fibres de carbone sont considérées comme des inclusions de type cylindres alignés avec la direction \vec{x} , l'axe \vec{z} représentant la direction de l'épaisseur.

3.3. Modélisation du milieu englobant

La représentation du milieu englobant est un point clé pour développer un modèle représentatif du comportement des composites lorsqu'ils se dégradent. Pour ce faire, il faut se placer au niveau d'un volume élémentaire représentatif du matériau. Ce VER est symbolisé sur la figure 3 comme un ensemble de fibres (ronds noirs) supposées réparties uniformément et autour desquelles est situé le milieu englobant (contour gris). La dégradation des fibres n'étant pas considérée dans cette étude, seul le milieu englobant évolue via les transformations chimiques.

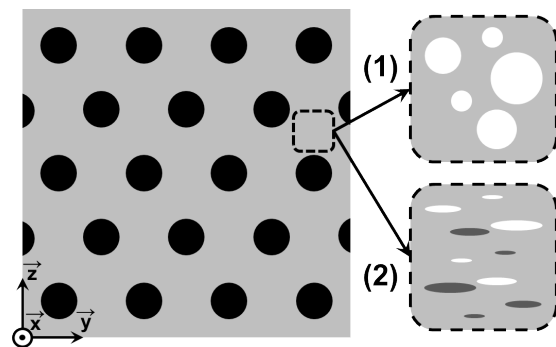


Figure 3 - Volume élémentaire représentatif avec modèles de milieu englobant

La première approche consiste à modéliser ce milieu englobant comme une phase continue constituée d'un mélange de résine et de *char* dans laquelle des inclusions sphériques représentent les pores gazeux qui se forment (zoom (1) sur la figure 3). L'homogénéisation de Mori-Tanaka est appliquée à ce milieu englobant dit isotrope puis ensuite à ce milieu associé aux fibres de carbone. L'expression des coefficients du tenseur d'Eshelby est donnée dans le tableau 1.

Inclusions	Demi-axes	S_{p11}	S_{p22}	S_{p33}
Sphères	$a_1 = a_2 = a_3$	1/3	1/3	1/3
Cylindres	$a_1 = \infty$ et $a_2 = a_3$	0	1/2	1/2
Penny-shaped	$a_1 \ll a_2 = a_3$	$1 - \frac{\pi a_1}{2 a_2}$	$\frac{\pi a_1}{4 a_2}$	$\frac{\pi a_1}{4 a_2}$

Tableau 1 - Expression des coefficients du pseudo-tenseur d'Eshelby

Les valeurs des conductivités des différents constituants obtenues par optimisation par la méthode moindres carrés suivant un algorithme de Levenberg-Marquardt (similaire à celui utilisé par la méthode inverse) sont tracées sur la figure 5 avec la dénomination "iso" concernant le *char*. Ces courbes mettent en évidence deux catégories de constituants avec d'un côté les gaz de pyrolyse (dont la conductivité thermique du mélange est supposée connue) et la résine qui sont très peu conducteurs de la chaleur et de l'autre, les fibres et le *char* qui le sont quant à eux beaucoup plus car ce sont des composés très carbonés. Les valeurs optimales ainsi reconstituées pour les propriétés globales du matériau sont tracées sur la figure 6. La composante dans le plan est très bien capturée par la méthode en comparaison avec les valeurs obtenues avec le montage BLADE et la méthode inverse aussi bien pour les états vierge et dégradé du matériau. Pour la composante hors plan, si l'accord pour l'état vierge est très satisfaisant, la conductivité dans l'épaisseur est quant à elle surestimée par la méthode et augmente fortement par rapport à l'état vierge. Ce comportement est cohérent avec l'approche retenue qui ne peut pas pour l'état dégradé traduire une augmentation de la conductivité dans le plan sans augmenter également la conductivité dans l'épaisseur avec une description isotrope du milieu englobant.

Pour pallier cette limitation, il est nécessaire d'introduire une direction privilégiée de conduction de la chaleur dans le modèle du milieu englobant proposé. D'un point de vue comportemental, la dégradation des composites à matrice organique se manifeste par l'augmentation de la porosité conjointement à la transformation de la résine en *char*, cette porosité se traduisant par l'apparition de micro-fissures matricielle visibles sur des observations en coupe. Ainsi, il

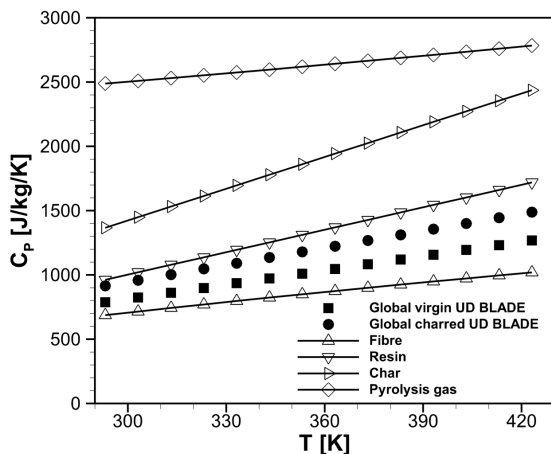


Figure 4 - Homogénéisation de la capacité calorifique par une loi des mélanges massique

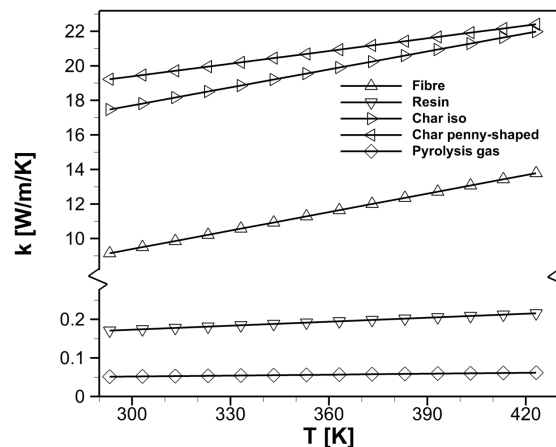
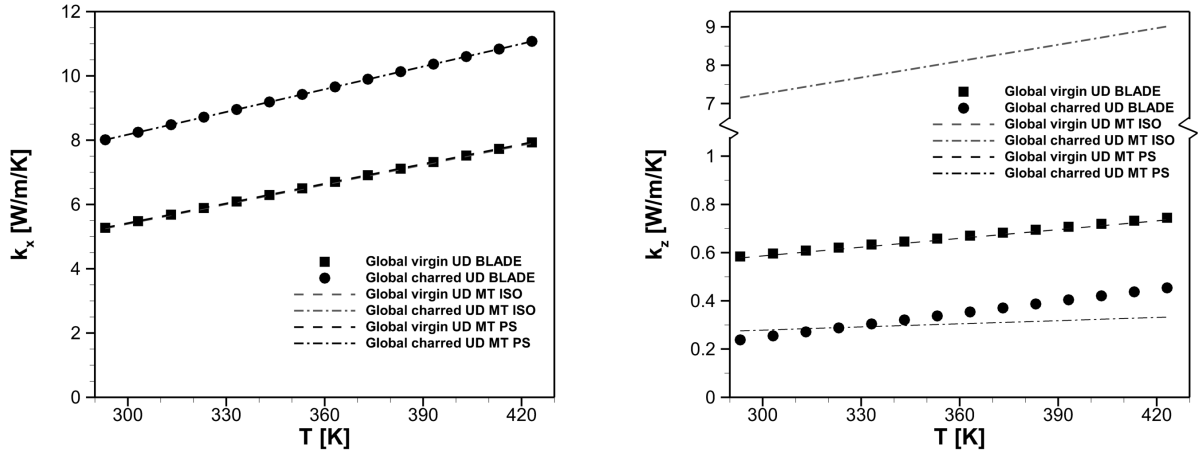


Figure 5 - Homogénéisation de la conductivité thermique des différents constituants



(a) Composante longitudinale

(b) Composante transverse

Figure 6 - Homogénéisation des composantes longitudinale et transverse de la conductivité thermique globale du pli à partir des valeurs de chaque constituant suivant l'approche de Mori-Tanaka avec milieu englobant isotrope (courbes grises) ou penny-shaped (courbes noires)

est proposé de conserver la description de la résine comme une phase continue (contour en gris clair sur le zoom (2) de la figure 3) dans laquelle apparaissent des inclusions ellipsoïdales, dites penny-shaped (en forme de pièce de monnaie), pour les constituants gaz (en blanc sur la figure 3) et *char* (en gris foncé sur cette même figure). Ces inclusions allongées dans les directions \vec{x} et \vec{y} permettent de traduire un comportement du gaz de type barrière thermique dans l'épaisseur (résistance thermique en série pour la conductivité transverse) sans impacter négativement la conductivité longitudinale (résistance thermique en parallèle). L'application de la méthode se concentre sur le constituant *char* ; les autres constituants n'étant pas modifiés. Les paramètres supplémentaires intégrés à l'algorithme d'optimisation sont les rapports d'aspect $a_1/a_2 = 7.5 \times 10^{-3}$ des inclusions intervenant dans l'expression du pseudo-tenseur d'Eshelby mentionnés dans le tableau 1. Cette approche ne modifie que très peu les valeurs de conductivité du constituant *char* (noté *penny-shaped* sur la figure 5). En ce qui concerne les valeurs globales reconstruites l'échelle du pli (nommées *PS* sur la figure 6), la conductivité dans le plan reste également inchangée quel que soit l'état, tout comme la conductivité hors plan pour l'état vierge. Cependant, l'amélioration est notablement visible sur la conductivité hors plan de l'état dégradé où la diminution de la conductivité mesurée expérimentalement est reproduite avec un ordre de grandeur satisfaisant.

3.4. Passage à l'échelle du stratifié

L'échelle abordée jusqu'à présent concerne un pli du matériau composite stratifié où toutes les fibres sont alignées dans la même direction. Il est donc nécessaire d'homogénéiser les propriétés obtenues à l'échelle du stratifié afin d'accéder aux propriétés globales du matériau. L'échelle du pli est équivalente d'un point de vue thermique à celle du stratifié unidirectionnel quel que soit le nombre de plis. C'est cette analogie qui a été utilisée pour définir le volume élémentaire représentatif et caractériser le matériau avec le montage BLADE. Il est également possible de déterminer facilement les propriétés du stratifié quasi-isotrope si le matériau est formé d'un empilement d'un multiple de 4 plis du type $[0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ]$ ce qui est le cas du T700M2IISO étudié. Les expressions sont détaillées dans les formules suivantes :

$$\underline{k}_{UD}^* = \begin{bmatrix} k_x^{pli} & 0 & 0 \\ 0 & k_y^{pli} & 0 \\ 0 & 0 & k_z^{pli} \end{bmatrix} \quad \underline{k}_{ISO}^* = \begin{bmatrix} \frac{k_x^{pli} + k_y^{pli}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_x^{pli} + k_y^{pli}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & k_z^{pli} \end{bmatrix}$$

4. Conclusion

Cette étude résume l'effort de caractérisation expérimentale et de modélisation porté sur les propriétés thermophysiques du T700M21. La mise en œuvre d'une approche détaillée multi-constituants s'avère nécessaire d'un point de vue de la modélisation pour simuler les transferts de chaleur et de masse intégrant les transformations thermochimiques du matériau lorsqu'il est soumis à un flux de chaleur élevé. Ce travail a permis de déterminer les propriétés des différents constituants du matériau à partir des propriétés globales du matériau homogénéisé suivant une approche avancée de Mori-Tanaka appliquée sur le milieu englobant qui subit les transformations puis sur ce milieu incluant les fibres de carbone.

Les résultats montrent qu'une telle méthode d'homogénéisation permet de restituer le comportement thermique du matériau lorsqu'il se dégrade avec une hausse des transferts dans la direction longitudinale associée à une baisse suivant l'épaisseur. Les propriétés obtenues avec cette approche ont été utilisées pour simuler avec le code MoDeTheC la dégradation d'éprouvettes soumises à un important flux de chaleur généré par un laser. Le très bon contrôle des conditions expérimentales et de la sollicitation thermique à la surface du matériau a permis de reproduire par le calcul le comportement thermique orthotrope de ce type de matériaux avec un excellent accord [6].

Néanmoins, l'application de la méthode repose sur des mesures réalisées pour des températures inférieures à $T = 150^{\circ}C$ pour identifier les propriétés globales. Les lois ainsi obtenues sont généralement extrapolées hors de cette gamme et l'amélioration du moyen existant (BLADE) s'avère indispensable pour étendre la plage de température de confiance des mesures. D'autre part, la caractérisation des propriétés globales de l'état dégradé est délicate et concentre la majeure partie des incertitudes de la méthode actuelle. Ainsi, la différence de pente sur les évolutions de la conductivité globale hors plan avec le *char* en forme d'inclusions penny-shaped par rapport aux mesures peut s'expliquer par une représentativité perfectible de la méthode actuelle mais également par une incertitude importante des données d'entrée obtenues avec le montage BLADE. En effet, il est important de prendre en compte la déformation de l'éprouvette dégradée et d'obtenir au préalable des grandeurs telles que la porosité, la masse volumique... avec une grande précision afin de réduire le spectre des inconnues et chercher à identifier le minimum de paramètres pertinents.

Références

- [1] P. REULET & G. LEPLAT : Méthode inverse pour la détermination expérimentale des conductivités thermiques et de la capacité calorifique de matériaux orthotropes en fonction de la température. *In Congrès de la Société Française de Thermique*, Perpignan, France, 2011.
- [2] V. BIASI, G. LEPLAT, F. FEYEL & P. BEAUCHÊNE : Heat and mass transfers within decomposing carbon fibers/epoxy resin composite materials. *In 11th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, Atlanta, US, 2014.
- [3] C. PRADÈRE, J.C. BATSALE, J.M. GOYHÉNÈCHE, R. PAILLER & S. DILHAIRE : Thermal properties of carbon fibers at very high temperature. *Carbon*, 47(3):737–743, 2009.
- [4] T. MORI & K. TANAKA : Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, 21(5):571–574, 1973.
- [5] Y. BENVENISTE : A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials. *Mechanics of materials*, 6(2):147–157, 1987.
- [6] G. LEPLAT & V. BIASI : Étude expérimentale et numérique de la dégradation laser des matériaux composites aéronautiques stratifiés. *In Congrès de la Société Française de Thermique*, La Rochelle, FR, 2015.