

ÉTUDE D'UN MATÉRIAU COMPOSITE EN CARBONE SOU MIS À UN ENVIRONNEMENT DE RENTRÉE ATMOSPHÉRIQUE

Les composites 3D carbone/carbonate ont une excellente tenue thermostructurale qui leur permet d'être utilisés comme protection thermique dans l'environnement le plus sévère des rentrées atmosphériques, où ils sont soumis au phénomène d'ablation. Les essais en vol étant rares et très coûteux, des essais au sol relativement représentatifs, avec des torches à plasma, sont un bon compromis pour comprendre le comportement du matériau, et notamment l'évolution de son état de surface. Celui-ci pilote en effet l'évolution drastique des flux de chaleur en favorisant le passage d'un écoulement laminaire à la turbulence. L'étude menée a permis de tester un composite 3D carbone/carbonate au Plasmatron de l'Institut von Karman et d'analyser finement sa microstructure de surface afin de comprendre son interaction avec l'écoulement.

La sélection des matériaux de protection thermique et la définition de leur épaisseur sont des paramètres clés pour la conception des corps de rentrée atmosphérique. En conséquence, des efforts d'optimisation sont toujours nécessaires, notamment pour les matériaux les plus performants que sont les composites 3D carbone/carbonate, dont le comportement complexe n'est pas encore totalement modélisé. L'ablation de ce type de composite conduit notamment à l'apparition d'une rugosité de surface, contribuant à la transition laminaire-turbulent, elle-même induisant une multiplication des flux de

chaleur de plus d'un facteur trois **1**. La compréhension de l'interaction fine entre le matériau et son environnement proche nécessite ainsi des avancées; elle s'appuie pour cela sur des essais au sol.

Dans cette étude, des éprouvettes de matériau 3D carbone/carbonate ont été soumises à l'écoulement, représentatif d'une rentrée atmosphérique, produit par une torche à plasma du moyen Plasmatron de l'Institut von Karman **2**. Le matériau est composé de torons de fibres de carbone, tissés suivant les trois directions de l'espace, et d'une matrice graphitée comblant les interstices. Le plasma est produit par chauffage

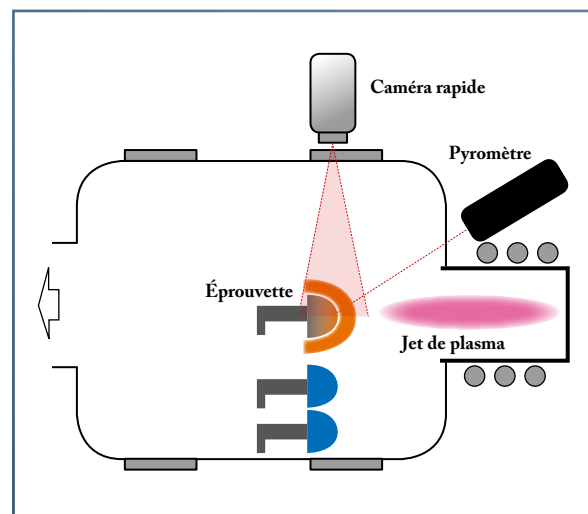


Figure 1

➤ Schéma de principe des essais soumettant une éprouvette de carbone à l'écoulement de la torche à plasma du moyen Plasmatron (Institut von Karman) **2**.

L'expérience se déroule à l'intérieur d'un caisson dépressurisé. Le plasma est produit grâce à l'échauffement par induction électromagnétique d'un jet d'air, qui, une fois porté à très haute température (12 000 K), impacte l'éprouvette. Celle-ci va fortement s'échauffer et s'ablater. L'évolution de forme et la température de paroi sont respectivement mesurées par une caméra rapide (plusieurs centaines d'images par seconde) et un pyromètre. Deux autres éprouvettes, de forme identique à l'éprouvette de matériau ablatif mais constituées de cuivre, servent à mesurer la pression et le flux de chaleur.

magnéto-inductif (puissance de 1,2 MW), induisant, autour des éprouvettes de quelques centimètres de diamètre, un environnement de 0,7 à 3 MW/m² pour des pressions variant entre 1,5 et 20 kPa (figure 1). La température atteinte par le carbone varie entre 2 100 et 2 800 K, mesurée par pyromètre, l'écoulement étant lui-même sondé par des sondes Pitot et des fluxmètres. Le gaz utilisé est de l'air, suscitant les réactions d'oxydation du carbone. Les conditions expérimentales produisent une ablation faible du matériau (moins d'un millimètre en plusieurs minutes), suffisante cependant pour faire apparaître un état de surface représentatif.

Parallèlement aux essais, des simulations numériques ont été menées, à l'échelle de l'écoulement où la température atteint les 12 000 K et à l'échelle microscopique des structures de la surface 4.

Après les essais, une caractérisation morphologique a été effectuée à l'aide d'un microscope électronique à balayage et par microscopie optique confocale et 3D, permettant de reconstruire la rugosité de surface à l'échelle mésoscopique (dixième de millimètre) et microscopique (micron). Il apparaît des crevasses élargies sur 100 µm environ, situées entre les torons de fibres et la matrice (figure 2). L'explication réside dans l'ablation différentielle des bords de la crevasse, reproduite par la simulation numérique, due à la consommation accrue de carbone par l'oxygène transporté de manière convective par l'écoulement. La réactivité est ainsi dépendante de l'orientation des fibres.

En augmentant le grossissement, l'aspect même des fibres apparaît (figure 3). Il en ressort qu'au niveau microscopique, l'ablation sur les éprouvettes révèle une structure

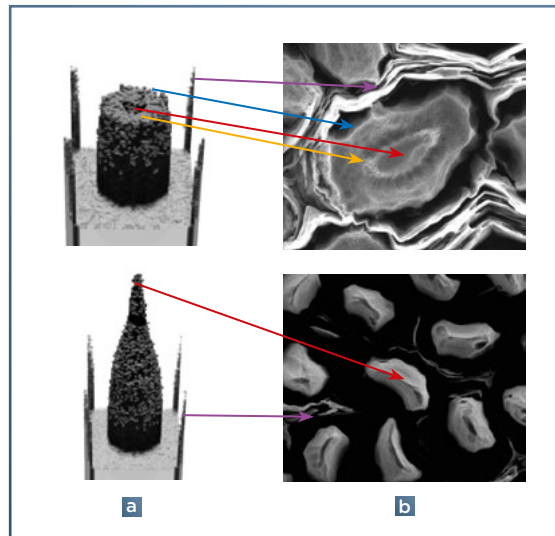


Figure 3

➔ Comparaison entre (a) la simulation numérique permettant d'interpréter l'aspect topologique des fibres et (b) l'observation au microscope électronique de la morphologie à l'échelle des fibres du matériau 3D carbone/carbone après ablation sous air. Lors de la phase transitoire (en haut) où la morphologie de surface n'a pas atteint son état d'équilibre, seul le matériau entourant la fibre a été particulièrement ablaté, dénudant le bord de fibre (flèche bleue); la fibre elle-même (flèche jaune) comporte un cœur plus résistant (flèche rouge). À l'état stationnaire d'équilibre (en bas), seul le cœur de fibre résiste, amenant un faciès en pointe; le feuillet interfibres est lui-même plus ablaté (flèche mauve).

complexe de la fibre comprenant un cœur résistant, une zone intermédiaire plus faible et une fine peau résistante. L'apport de la simulation numérique réside dans l'explication de la différence de comportement entre éprouvettes par la différence de durée des tests. En effet, la configuration initiale de paroi lisse après usinage se modifie progressivement sous l'action de l'ablation pour atteindre un état d'équilibre stationnaire après une ablation de quelques fractions de millimètre. Cette configuration d'équilibre n'a été atteinte que pour les essais suffisamment longs. À l'échelle des fibres, le transport de l'oxygène qui induit l'ablation se fait uniquement par diffusion dans l'écoulement.

Les résultats de la simulation numérique à l'échelle microscopique de la fibre sont présentés sur la figure 3. L'accord obtenu entre la simulation de l'état de surface et l'expérience est très satisfaisant.

En conclusion, les résultats de cette étude 3 aussi bien expérimentale que de simulation numérique ont permis de préciser l'origine de la rugosité apparente du matériau due, d'une part, aux différences de réactivité des constituants en phase d'oxydation sous air, d'autre part à l'influence plus ou moins importante suivant l'échelle considérée du transfert convectif dû à l'écoulement.

RÉFÉRENCES

- 1 G. DUFFA**, *Ablative Thermal Protection Systems Modeling*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Education Series (2013).
- 2 B. BOTTIN et al.**, "Predicted and measured capability of the VKI 1.2 MW Plasmatron regarding re-entry simulation", *Proceedings of the 3rd European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles*, November 24-26, 1998, Noordwijk, The Netherlands, Vol. SP-426 of ESA Conf. Procs., ESA Publications, R. H. Harris editor, p. 553-560 (1998).
- 3 C. LEVET et al.**, "Microstructure and gas-surface interaction studies of a 3D carbon/carbon composite in atmospheric entry plasma", *Carbon*, **114**, p. 84-97 (2017).
- 4 C. LEVET**, *Ablation de matériaux carbonés sous très haut flux : étude multi-physique et couplage avec l'écoulement*, Thèse de l'université de Bordeaux soutenue le 5 avril 2017.

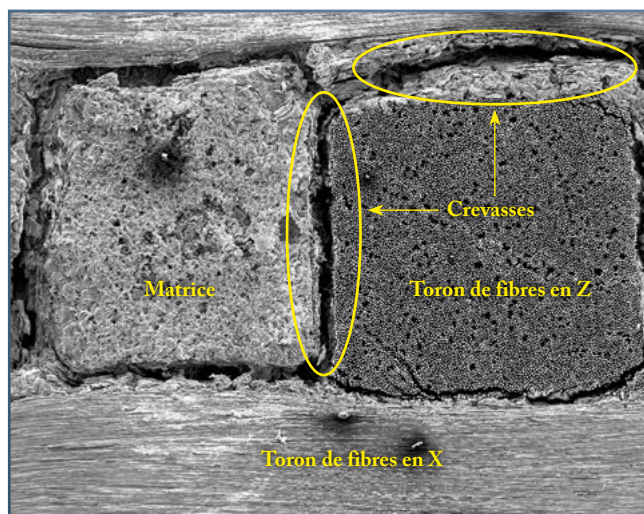


Figure 2

➔ Morphologie de surface du matériau 3D carbone/carbone après ablation sous air. Cette morphologie comprend des torons en direction X en bas, un toron de fibres en Z à droite. La structure carrée complémentaire est constituée par la matrice graphitée comblant les interstices. Les crevasses, inexistantes à l'état initial, sont dues à l'ablation différentielle, conséquence d'une réactivité différente des orientations de fibres.