

# MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE DE L'ABLATION DE COMPOSITES CARBONE/CARBONE

G. L. VIGNOLES<sup>1</sup>, J. LACHAUD<sup>1</sup>, Y. ASPA<sup>1,2</sup>, M. QUINTARD<sup>2</sup>, J.-M. GOYHENECHÉ<sup>1,3</sup>, J.-F. EPHERRE<sup>1,3</sup>, C. DESCAMPS<sup>4</sup>, F. PLAZANET<sup>4</sup>, N. BERTRAND<sup>1</sup>, G. BOURGET<sup>1</sup>, F. REBILLAT<sup>1</sup>, B. VANCRAYENEST<sup>5</sup>, M. ALRIVIE<sup>1</sup>, P. WEISBECKER<sup>1</sup>, M. DAGES<sup>1</sup>, L. POTDEVIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LCTS – LABORATOIRE DES COMPOSITES THERMOSTRUCTURAUX, UMR 5801 UNIVERSITE BORDEAUX 1 – CNRS-CEA-SPS, <sup>2</sup>IMFT – INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES DE TOULOUSE – UMR 5502 INPT-UPS- CNRS TOULOUSE, <sup>3</sup>CEA-CESTA, <sup>4</sup>SPS – SNECMA PROPULSION SOLIDE, LE HAILLAN, <sup>5</sup>VKI – VON KARMAN INSTITUTE FOR FLUID DYNAMICS, RHODE-ST-GENESE, BELGIQUE

**L'**ablation de matériaux composites carbone/carbone est étudiée expérimentalement, analytiquement et numériquement du point de vue du matériau. Les résultats montrent que les rugosités obtenues sont fonction des contrastes de réactivité entre constituants et de la compétition diffusion/réaction hétérogène. Nous évaluons les morphologies et les vitesses effectives de recul dans toutes sortes de situations.



L'ablation des composites carbone-carbone (C/C), employés comme écrans thermiques d'objets spatiaux, entraîne une forte modification de l'état de surface de ces matériaux. Les interactions entre les C/C et leur environnement sont très dépendantes de cet état de surface, et réciproquement. Par exemple, le transfert de chaleur peut être fortement augmenté lorsqu'une surface devient rugueuse, ce qui accélère beaucoup sa vitesse de récession. Actuellement, cet aspect n'est pris en compte qu'à travers des corrélations expérimentales à l'échelle macroscopique.

Nous modélisons ici [1] l'interaction matériau / environnement, ainsi que ses conséquences sur l'état de surface, en considérant diverses échelles (du  $\mu\text{m}$  au  $\text{cm}$ ), et en prenant en compte les hétérogénéités du matériau ainsi que la compétition entre transferts interfacial et volumique (*masse et chaleur*). Les résultats sont corrélés avec des caractérisations morphologiques sur des échantillons testés essentiellement au jet de plasma d'arc.

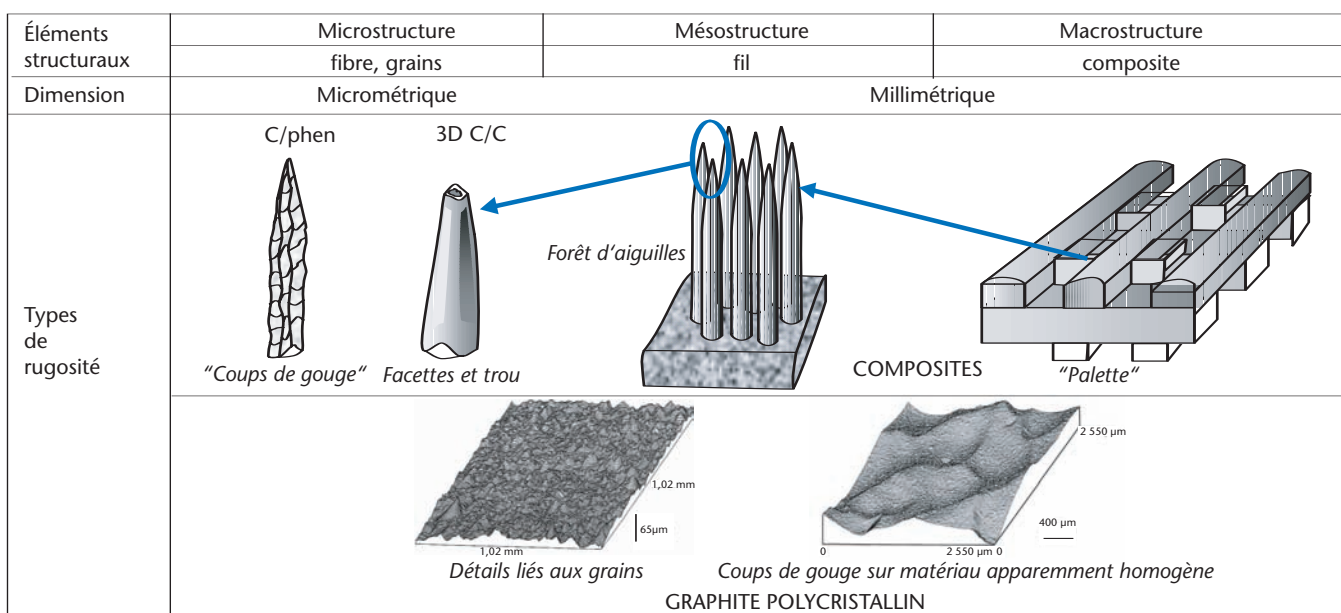


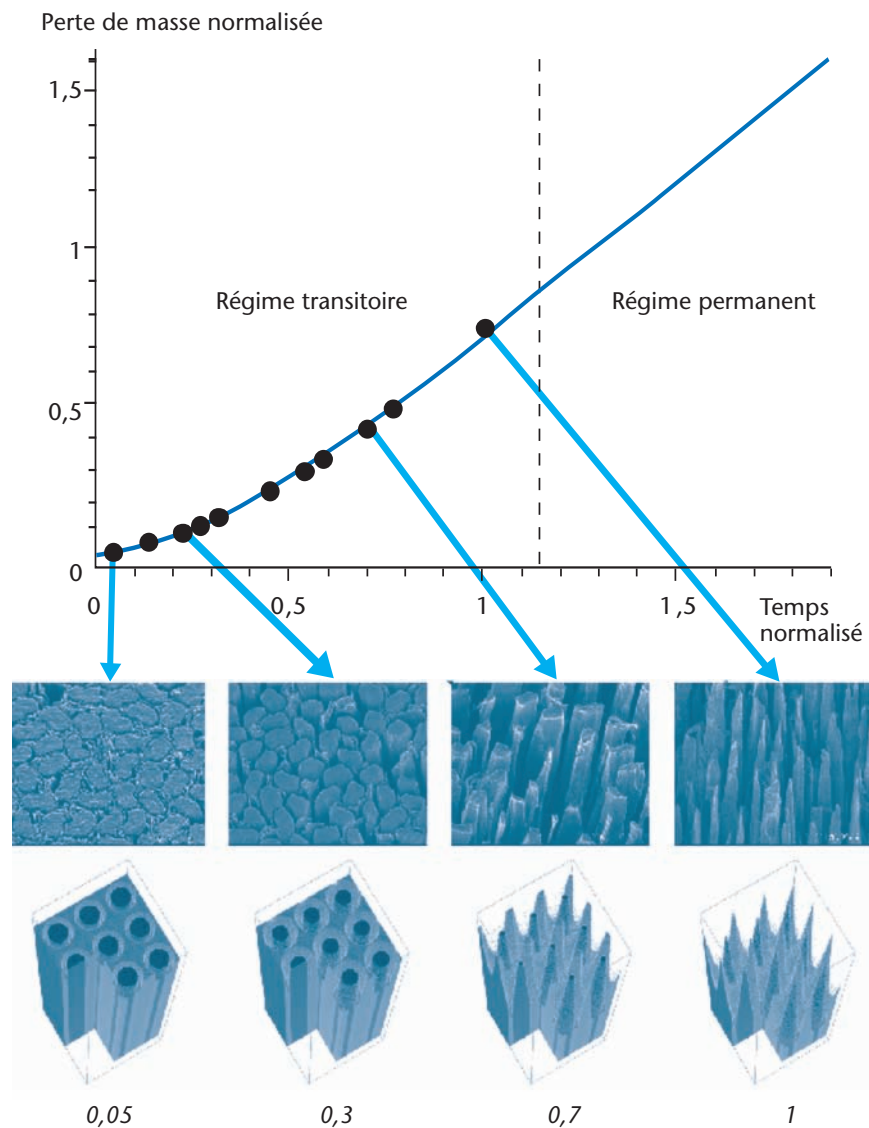
Figure 1 Tableau récapitulant les principaux motifs présents sur les surfaces ablatées de matériaux carbonés.

## Méthode

Une description pertinente des matériaux a d'abord été effectuée : échelles, détails de structure, morphologie, etc. La **figure 1** résume les divers types de morphologie rencontrés, dont certains sont liés aux hétérogénéités de structure. Ensuite, une simulation directe, analytique [2], [3] ou par diverses méthodes numériques [4], permet de montrer qu'une morphologie stationnaire est toujours atteinte ; les temps caractéristiques de l'état transitoire sont calculés. Les résultats peuvent être interprétés en termes d'interaction matériau / extérieur (*flux moyens échangés, état stationnaire atteint...*) et d'évolution de la rugosité. Nous pouvons ainsi effectuer des identifications de paramètres physico-chimiques directement à partir des morphologies stationnaires d'ablation. Réciproquement, ces paramètres étant supposés connus, il est possible de prévoir une rugosité stationnaire et une réactivité effective.

## Résultats

L'approche a été validée vis-à-vis d'expériences faites au LCTS [5] dans des conditions très bien maîtrisées : nous retrouvons à la fois les vitesses effectives de perte de masse et les morphologies de surface à différents instants (**figure 2**). De très nombreuses rugosités sont reproduites par la modélisation numérique (**figure 3**). Enfin, on peut maintenant évaluer la réactivité effective d'un composite à partir de ses constituants, dans divers régimes physico-chimiques et à différents moments de son évolution (*de la surface initialement plate jusqu'à sa morphologie stationnaire*). Le rôle protecteur des phases les plus résistantes est démontré uniquement dans certaines conditions ; pour d'autres, c'est la loi du "maillon faible" qui prévaut. Cette approche, sans équivalent dans la littérature, a été valorisée auprès des partenaires CEA et Snecma Propulsion Solide en tant qu'aide à la conception de protections thermiques hautes performances.



**Figure 2** Validation expérimentale de l'approche de modélisation de l'ablation pour une oxydation à 625°C : perte de masse et morphologie de surface.

Références

[1] G. L. VIGNOLES, J. LACHAUD, Y. ASPA, J.-M. GOYHENECHÉ, "Ablation of carbon-based materials: Multiscale roughness modelling", *Composites Science and Technology* (2008), DOI:10.1016/j.compscitech.2008.09.019.

[2] G. DUFFA, G. L. VIGNOLES, J.-M. GOYHENECHÉ, Y. ASPA, "Ablation of carbon-based materials : investigation of roughness set-up from heterogeneous reactions", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **48**, p. 3387-3401 (2005).

[3] J. LACHAUD, Y. ASPA, G. L. VIGNOLES, "Analytical modeling of the steady state ablation of a 3D C/C composite", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **51**, p. 2614–2627 (2008).

[4] J. LACHAUD, G. L. VIGNOLES, "A Brownian Motion simulation technique to simulate gasification and its application to ablation", *Computational Materials Science*, **44**, p. 1034-1041 (2009).

[5] J. LACHAUD, N. BERTRAND, G. L. VIGNOLES, G. BOURGET, F. REBILLAT, P. WEISBECKER, "A theoretical/experimental approach to the intrinsic oxidation reactivities of C/C composites and of their components", *Carbon*, **45**, p. 2768-2776 (2007).

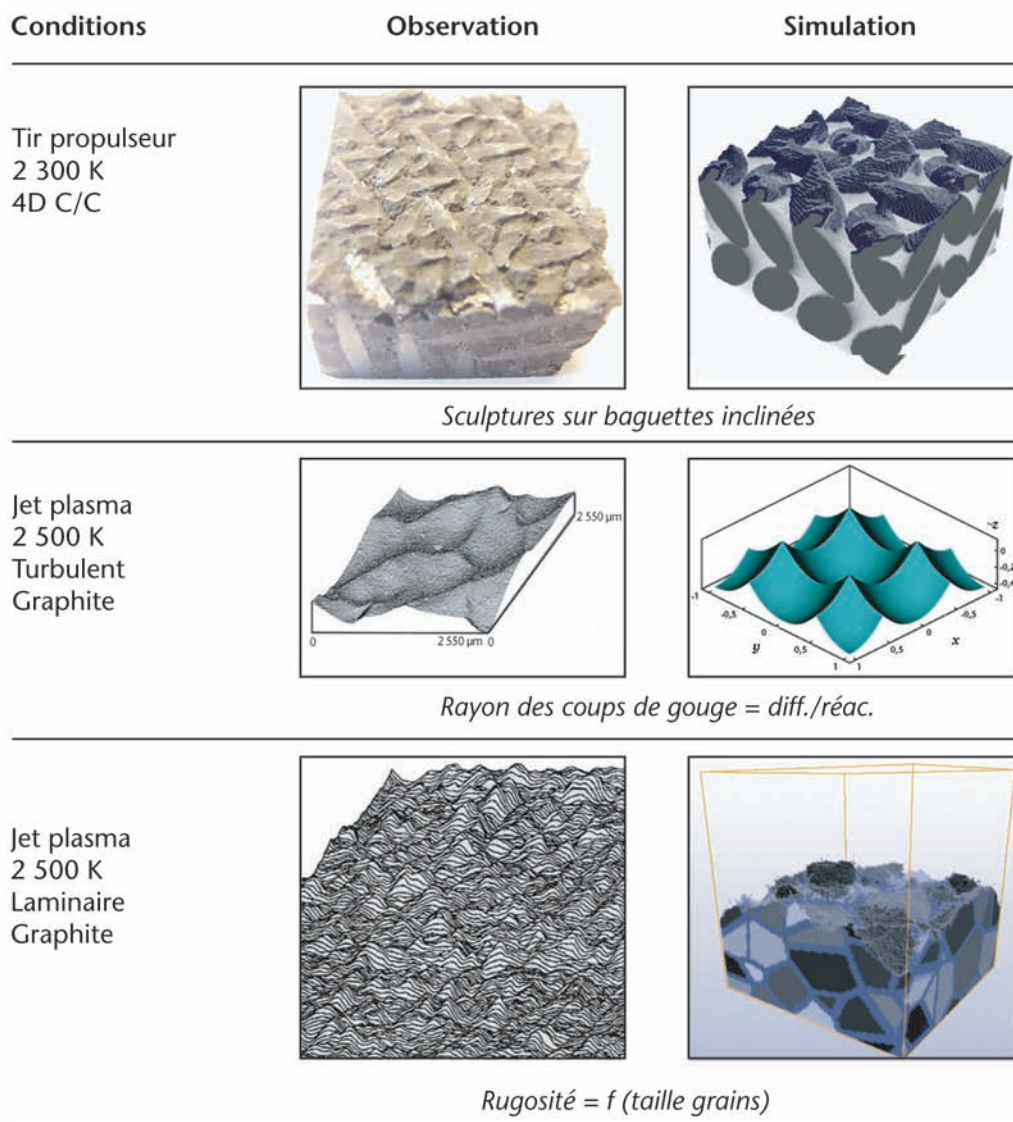


Figure 3  
Reproduction par modélisation numérique de diverses morphologies de matériaux ablatés dans différentes conditions.