

Historique des composites thermo-structuraux

par Jacques Lamon (LMT-Cachan)

Les matériaux composites occupent les chercheurs depuis plusieurs décennies, mais l'activité a fluctué en fonction de divers facteurs, notamment économiques. Les composites à matrice céramique renforcés par des fibres continues (CMC) sont parmi les derniers nés de la famille des matériaux composites.

Ils ont suscité un intérêt important en Europe dans les années 80, et plus tard aux Etats-Unis et au Japon qui avaient choisi d'autres voies pour augmenter la ténacité des matériaux céramiques. Leur apparition a obéi à deux logiques distinctes :

- soit, renforcer les matériaux céramiques, dont la fragilité inhérente et le manque de fiabilité limitent l'emploi en tant que matériaux de structure ;
- soit, obtenir des matériaux plus résistants à l'oxydation à haute température que les composites carbone/carbone, ce qui a conduit aux composites SiC/SiC renforcés par des fibres de carbure de silicium et élaborés par infiltration chimique en phase vapeur communément désignée par le sigle CVI : *Chemical Vapor Infiltration*.

C'est la seconde logique qui a prévalu en France pour les

composites à matrice SiC élaborés par voie CVI. Leur développement a débuté dans les années 80 quand la Société Européenne de Propulsion (SEP devenue Snecma Propulsion Solide puis Herakles-Safran), Amcorm, Refractory Composites, et d'autres commencèrent à développer des équipements et des procédés pour produire des pièces pour l'espace, la défense et d'autres domaines. Herakles est à la pointe de cette technologie et a démontré les performances de ces matériaux dans un grand nombre d'essais sur moteurs ou en vol. Voici quelques exemples :

- chambres de combustions et divergents pour moteurs de fusée à propergol liquide ;
- staturs et aubes dans les moteurs LOX/LH2 ;
- protection thermique d'engins spatiaux ;
- volets, nez de tuyère, accroche flamme, pour les moteurs d'avion. Un Mirage 2000 équipé de volets en composite SiC/SiC a fait une démonstration en vol au Salon du Bourget en 1989 ;
- récemment, des volets de la dernière génération de composite SiC/SiC à matrice auto-

cicatrisante ont été testés avec succès sur des moteurs F100 – PW de Pratt et Whitney. Les volets des moteurs M88 du Rafale, ainsi que de certains moteurs de Mirage et de F16, sont, à ce jour, fabriqués par Herakles-Safran.

Les CMC présentent un intérêt indéniable pour les applications thermo-structurales. Développés à l'origine pour le militaire et le spatial, ils sont introduits dans d'autres secteurs et sont envisagés dans les secteurs de l'industrie, l'énergie, le nucléaire, l'aéronautique civile, etc.

Le procédé CVI

Le procédé CVI est étudié depuis les années 60 ; c'est une extension de la CVD (*Chemical Vapor Deposition*). Il a d'abord été employé pour fabriquer les composites carbone/carbone. Ces derniers ont des propriétés intéressantes jusqu'à des températures très élevées, mais il est apparu en 1973 que leur emploi était limité en raison de leur vulnérabilité à partir de 450°C dans des atmosphères oxydantes. Remplacer la matrice de carbone par une matrice en carbure de silicium est apparu être la solution à ce problème. Christin et al. en 1977 puis Fitzer en 1978 ont montré que la technique CVI permettait d'élaborer la matrice SiC. Dans

un premier temps les substrats étaient en carbone. Les premiers composites à matrice SiC CVI renforcés par des fibres de carbure de silicium ont été fabriqués en 1980. Aujourd'hui les composites CVI SiC/SiC présentent des performances remarquables. D'autres modes d'élaboration à base de précurseurs liquide, solide ou gazeux ont vu le jour.

Durant les années suivantes, de nombreux progrès ont été réalisés, de nombreuses connaissances ont été générées qui ont donné lieu à une multitude de publications. Les travaux scientifiques qui ont conduit à cet aboutissement touchent tous les thèmes de la science des matériaux à savoir la chimie de l'élaboration, l'analyse structurale, la microstructure, les propriétés et le comportement mécanique, la modélisation... Compte tenu du niveau de développement atteint, les problèmes se déplacent des questions d'élaboration vers les questions de résistance aux hautes températures et environnements agressifs, la durée de vie des matériaux et des structures, la modélisation prédictive. Une manière de rendre compte des avancées permises par les travaux de recherche, est de présenter quelques caractéristiques remarquables des composites SiC/SiC.

Relations microstructure/propriétés

L'architecture fibreuse et les propriétés relatives des constituants des composites thermo-structuraux à renfort tissé induisent des processus d'endommagement et de rupture aux caractéristiques uniques : ceux-ci sont multi-échelles, hiérarchisés, séquentiels et aléatoires. D'une manière générale, l'endommagement s'amorce dans la matrice, qui partage les efforts appliqués avec les fibres. Au fur et à mesure de son évolution, les contraintes sont progressivement transférées sur les fils (on désigne par fil un ensemble de plusieurs centaines de fibres ; les fils sont tissés), qui sont dès lors amenés à assurer seuls la cohésion du matériau.

L'architecture fibreuse définit plusieurs échelles qui délimitent les étapes successives du processus de redistribution des contraintes. L'endommagement est aussi responsable du processus de troncature successive de la distribution des défauts microstructuraux présents dans la matrice et dans les fibres, laquelle se rétrécit progressivement et tend vers une population ultime qui détermine la rupture du composite. La résistance à la rupture des composites 2D SiC/SiC présente par conséquent une faible dispersion et est peu sensible aux effets d'échelle. Cette séquence peut être affectée par des défauts de reproductibilité (défauts d'interface).

Le contraste entre les propriétés respectives des constituants influence les processus d'endommagement, de redistribution des contraintes, et de troncature. Les propriétés de la fibre et de la matrice affectent, dès lors, la loi de comportement. Celle-ci est caractéristique d'un comportement non-linéaire élastique endommageable (composites à matrice SiC) ou d'un comportement linéaire (composites unidirectionnels à matrice C).

La ténacité

En présence d'une entaille, ces processus sont condensés dans un volume réduit, situé à l'extrémité de l'entaille. Ils dissipent une partie significative de l'énergie élastique emmagasinée, ce qui génère un effet de résistance à

la propagation de l'entaille. Il est important de souligner que dans un composite 2D SiC/SiC, la fissure macroscopique n'existe pas avant la phase ultime d'instabilité.

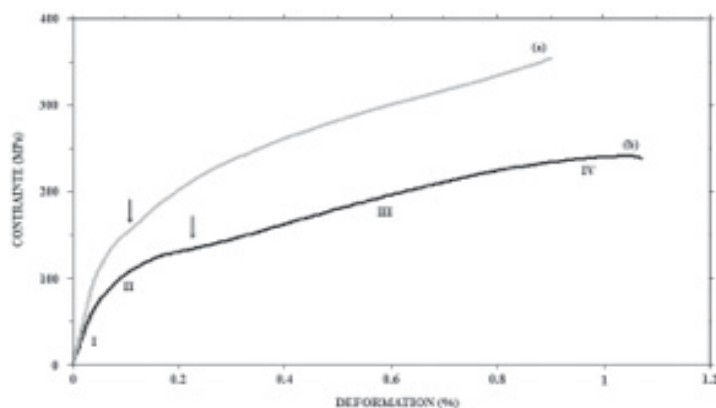
Les essais de traction sur des éprouvettes entaillées mettent en évidence une autre caractéristique unique, l'insensibilité à l'entaille, ou la ténacité infinie. En effet, pour certains composites 2D SiC/SiC, et pour les composites C/C et C/SiC, la contrainte de rupture est indépendante de la présence de l'entaille et de la longueur d'entaille. Cet effet résulte de la relaxation des contraintes à l'extrémité de l'entaille (notamment grâce à l'endommagement de la matrice et aux décohésions) laquelle réduit voire annihile les transferts d'efforts sur les fils qui seraient susceptibles de générer des concentrations de contraintes.

Interfaces / interphases

Les interfaces fibre/matrice ou fil/matrice (dans les composites à renfort tissé) jouent un rôle fondamental dans le comportement mécanique. La décohésion des fibres ou des fils est le mécanisme d'arrêt des fissures matricielles qui confère au composite son caractère endommageable. Cependant la longueur et la position de la décohésion peuvent être contrôlées par la fonctionnalisation des interfaces et l'introduction d'une interphase, ce qui permet de moduler la loi de comportement et les propriétés du composite.

Dans les composites 2D SiC/SiC, l'interphase consiste en une fine couche d'épaisseur inférieure à 100 nm, déposée sur les fibres par voie CVI. Cette couche est constituée de pyrocarbone (PyC), de nitrure de bore (BN), ou d'un empilement de PyC et de SiC ou de BN et de SiC. Le PyC permet mieux que le BN d'obtenir des interphases fortes.

Les interfaces doivent jouer un double rôle dans les composites. Leur résistance doit être d'une part suffisamment faible pour permettre la déviation des fissures amorcées dans la matrice, d'autre part, suffisamment élevée pour que la décohésion fibre/matrice n'annihile pas la contribution



Courbes typiques de comportement non linéaire en traction uniaxiale de composites 2D-SiC/SiC, possédant des interfaces fibre/matrice différentes : soit plutôt fortes (a) soit plutôt faibles (b)

de la matrice dans le partage des efforts. Le concept d'interface faible a guidé la majorité des travaux de la littérature, les auteurs privilégiant l'accroissement de la ténacité par des mécanismes de pontage des fissures et de résistance à l'extraction des fibres (ce qui nécessite des décohésions longues). En contrepartie, la résistance à la rupture est peu élevée parce que la majeure part des efforts est portée par les fibres. Les interfaces sont donc trop faibles dans un grand nombre de composites. Comme l'ont montré des travaux conduits au LCTS, l'ajout d'une interphase et la modification de la surface des fibres par des traitements appropriés permettent d'accroître la liaison fibre/interphase. Ce mode de renfort de la région à l'interface fibre/matrice, permet d'obtenir des décohésions courtes dans l'interphase, et donc des composites à haute résistance à la rupture et haute ténacité.

Propriétés à haute température

Les composites SiC/SiC CVI possèdent d'excellentes propriétés mécaniques à haute température. Cependant, leur tenue en fatigue à haute température peut être affectée par l'oxydation de l'interphase de pyrocarbone et des fibres. La nouvelle génération de composites possède une matrice multicouche auto-cicatrisante de type Si-B-C. Cette matrice contient des phases qui produisent un oxyde vitreux à haute température, lequel cicatrise les fissures et empêche l'oxygène d'atteindre les interphases de pyrocarbone et les fibres.

Conclusions

Les composites à matrice céramique et fibres continues présentent des propriétés uniques et les relations microstructure/propriétés offrent de nombreux degrés de liberté pour adapter le comportement mécanique aux conditions de service. On peut jouer avec les constituants, leur arrangement et leur liaison. La connaissance des processus associés d'endommagement et de rupture est indispensable pour prévoir le comportement mécanique et la durée de vie, et concevoir de nouveaux composites.

Bibliographie

F. Christin, R. Naslain, P. Hagenmuller, J.J. Choury, *Pièce poreuse carbonée densifiée in-situ par dépôt chimique en phase vapeur de matériaux réfractaires autres que le carbone et procédé de fabrication* – French patent, 77/26979, Sept. 1977.

E. Fitzer, Chemical Vapor Deposition of SiC and Si₃N₄, Proc. Int. Symp. On Factors in Densification and Sintering of Oxide Ceramics, Hakone, Japan, p. 40, 1978.

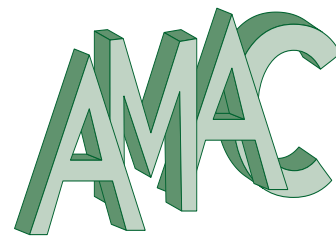
Ceramic Matrix Composites: materials, modeling and applications, Narottam P. Bansal and Jacques Lamon Editors, John Wiley and Sons, Inc., 2014.

Handbook of Ceramics and Glasses. Narottam P. Bansal Editor, Kluwer Academic Publishers, 2005. ■

Jacques Lamon (LMT-Cachan)
lamon@lmt.ens-cachan.fr

Le Conseil d'Administration 2016 - 2018

Le nouveau Conseil d'Administration a été élu début 2016 avec comme d'habitude une participation massive des adhérents de l'AMAC. Ses seize membres élus sont :



- **Jérôme BIKARD**, Solvay, secrétaire adjoint
- **Philippe BOISSE**, LaMCoS, INSA Lyon, président
- **Nicolas BOYARD**, LTN, Université de Nantes, coordinateur adjoint des JST
- **Jean-François CARON**, Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, responsable de la liste de diffusion
- **Michel CATALDI**, Safran Ceramics, vice-président et responsable adjoint des relations associatives
- **Jacques CINQUIN**, Airbus Group Innovations, vice-président et co-organisateur des Entretiens de l'AMAC
- **Federica DAGHIA**, LMT, ENS Cachan, secrétaire
- **Frédéric DAU**, I2M, ENSAM Bordeaux, coordinateur des JST
- **Nicolas FELD**, Safran Tech, éditeur d'AMAC Infos
- **Nathalie GODIN**, MATEIS, INSA Lyon, responsable du site Internet
- **Laurent GUILLAUMAT**, LAMPA, ENSAM Angers, responsable des relations associatives
- **Cédric HUCHETTE**, Onera Châtillon, responsable adjoint du site Internet et co-organisateur des Entretiens de l'AMAC
- **Philippe OLIVIER**, ICA, Université de Toulouse, trésorier adjoint
- **Frédéric THIEBAUD**, FEMTO-ST, Université de Besançon, responsable du prix Daniel Valentin
- **Fabienne TOUCHARD**, Institut P², ENSMA, responsable de l'annuaire

Démarrage de l'IRT Saint-Exupéry



Les matériaux composites thermostucturaux (CMC) ont vocation à travailler en conditions extrêmes : à hautes températures, sous contraintes mécaniques et thermiques, en milieu oxydant. Safran a pour objectif de faire monter en maturité les technologies nécessaires à la production en grande série des pièces en CMC pour l'aéronautique satisfaisant également les objectifs ACARE 2020 et FLIGHTPATH 2050 relatifs à la diminution des émissions des gaz à effet de serre, des nuisances sonores, de la masse et de la consommation globale des avions. A ce jour, les technologies nécessaires à la réalisation en série des pièces CMC ne sont pas toutes disponibles et/ou matures. Pour cela, Safran s'appuie sur une filière de recherche et sur un tissu industriel de PME localisés sur le territoire de l'IRT afin de réaliser la rupture dans son schéma technico-économique sans laquelle il ne serait pas possible de pénétrer le marché aéronautique. Le site aquitain de l'Institut de Recherche Technologique Saint-Exupéry, installé sur le campus ENSAM de Bordeaux, est très impliqué dans la montée en maturité des procédés d'élaboration de CMC Oxydes Voie Liquide et SiC Melt Infiltration, objets de projets en cours. Il a déjà démontré son efficacité de maison commune IRT avec des personnels issus de PME, Grands Groupes et Académiques aquitains. L'IRT se dote de moyens uniques, comme par exemple un four MI multi-instrumenté qui permettra d'explorer, de comprendre et ainsi maîtriser les phénomènes qui apparaissent lors de la montée capillaire de l'alliage de silicium qui migre à 1400°C dans une préforme afin d'en coloniser les pores. ■

Frédéric Dau (I2M) f.dau@i2m.u-bordeaux1.fr

Bilan des JNC 19

Les Journées Nationales sur les Composites (JNC) sont un congrès scientifique bisannuel organisé depuis 1978 par l'Association pour les Matériaux Composites (AMAC). Elles constituent un lieu de rencontre et d'échanges pour les chercheurs et industriels dans le domaine des matériaux composites.

Les 19èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC 19 ou JNC 2015) se sont déroulées pour la deuxième fois à Lyon. En effet, les JNC 7 ont eu lieu à Lyon du 06 au 08 novembre 1990. C'était la première fois que les JNC se déroulaient en dehors de la capitale. Pour ces journées, 90 résumés avaient été déposés. Cette même année, le prix Daniel Valentin a été décerné pour la première fois.

Les JNC sont ouvertes à tous les types de matériaux composites incluant les composites structuraux, les composites fonctionnels, les bio-composites, les composites intelligents, les nano-composites et les structures hybrides. De nombreuses thématiques transversales aux matériaux composites sont abordées, depuis la mise en œuvre et les relations élaboration-microstructures-propriétés, jusqu'aux propriétés mécaniques des structures voire des assemblages.

Le travail d'expertise des soumissions, réalisé par les membres du comité scientifique, a permis de sélectionner 182 résumés pour des présentations orales ou par affiches. Nous tenons à remercier les membres du comité scientifique pour leur travail. Le congrès a regroupé 282 participants.

Les communications ont été réparties de la façon suivante :

- Applications industrielles (10 papiers)
- Assemblages et collage (8 papiers)
- Contrôle et caractérisation non destructive (7 papiers)
- Dynamique, impact, crash (13 papiers)
- Eco et biocomposites (16 papiers)
- Endommagement, rupture (20 papiers)
- Fibres et renforts textiles (7 papiers)
- Interface, mouillage, adhésion (4 papiers)
- Matrices thermoplastiques, matrices thermodurcissables (4 papiers)
- Méthodes numériques, simulation et optimisation (21 papiers)
- Mise en œuvre des composites (16 papiers)
- Méthodes et approches expérimentales (16 papiers)
- Modélisation multi-échelles (13 papiers)
- Modélisation des procédés (6 papiers)
- Vieillessement, durabilité (13 papiers)

Les conférences plénières suivantes ont été données :

- E. Bouillon (Safran – Herakles). Les récents développements dans le domaine des Composites à Matrice Céramiques, pour les applications de turbines aéronautiques.
- O. Allix (LMT-Cachan). Extension des modèles d'endommagement et de rupture des composites stratifiés pour la dynamique rapide : quelques propositions.
- G. Orange (RICL/Axel'one, Solvay). Composites base thermoplastique pour applications structurelles dans des marchés de masse.
- N. Hamila (LaMCoS), prix Daniel Valentin 2013. Modélisation et simulation de la mise en forme des matériaux composites à fibres continues.

Nous tenons à souligner l'investissement de l'ensemble des membres du comité d'organisation pour la mise en place de ces journées et à leur exprimer nos plus vifs remerciements.

De plus, au nom de tout le comité d'organisation, nous remercions vivement l'ensemble des organismes, institutions et sociétés qui ont soutenu cette manifestation. ■

Philippe Boisse et Nathalie Godin (LaMCoS), présidents des JNC 2015

philippe.boisse@insa-lyon.fr et nathalie.godin@insa-lyon.fr

Prix Daniel Valentin 2015 : deux lauréats



Madame Federica DAGHIA, est diplômée de l'Université de Bologne en Italie avec l'obtention d'un « *Laurea VO* » en 2004 puis d'un Doctorat en Mécanique des Structures soutenu en 2008, intitulé « *Active fibre-reinforced composites with embedded shape memory alloys* », et dirigé par les Professeurs Erasmo Viola et Francesco Ubertini au DISTART. Notons que durant cette période, elle a été accueillie pendant 8 mois en tant que visiting scholar sur le thème des composites hybrides avec AMF au CIMSS à Virginia Tech, USA.

A l'issue de sa thèse, elle intègre le Laboratoire de Mécanique et Technologie de Cachan par le biais d'un Post Doc puis en qualité de Maître de Conférences où elle est recrutée en septembre 2009.

Les travaux de recherche de Madame Federica DAGHIA portent sur l'endommagement et la rupture des matériaux composites. Notons qu'elle a participé au *Third World Wide Failure Exercise* dont l'objectif final était de comparer différents modèles de prédiction de la rupture des composites stratifiés à matrice organique. Elle s'intéresse également à l'extension des approches de modélisation à l'échelle mésoscopique aux composites tissés 2D et à la thermo-oxydation.

En parallèle de ses activités d'enseignement dispensées à l'ENS Cachan, Madame Federica DAGHIA a participé à divers encadrements d'étudiants pour des activités de recherche (Doctorants, Masters) et est également impliquée dans de nombreux projets de recherche collaboratifs nationaux et internationaux avec des partenaires industriels et académiques. Sa production scientifique témoigne de la qualité de l'ensemble de ses travaux.



Monsieur Vincent PLACET, en 2003, est diplômé Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois d'Epinal (ENSTIB) et également titulaire d'un DEA en Sciences du Bois de l'Université Henri Poincaré de Nancy. Ensuite, dans le même établissement, il enchaîne la préparation d'un Doctorat en Sciences du Bois, sous la direction du Professeur Patrick Perré au Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois (LERMAB), soutenu en 2006.

Monsieur Vincent PLACET est ensuite recruté à l'Université de Franche-Comté, au Département de Mécanique Appliquée de l'Institut FEMTO-ST en qualité d'Ingénieur de Recherche. Outre ses diverses missions collectives comme la responsabilité du pôle expérimental pour la caractérisation mécanique des matériaux et des structures, il développe une nouvelle activité de recherche au Laboratoire sur l'étude (caractérisation expérimentale et modélisation) du comportement thermo-hygro-mécanique des matériaux composites biosourcés (bois et fibres végétales).

Il s'intéresse également à la résistance et à l'endommagement sous chargements cycliques, à la tenue en fatigue et au suivi de santé des structures et matériaux composites à matrice organique.

Sur ces thématiques, Monsieur Vincent PLACET a encadré de nombreux étudiants (Post Docs, Doctorants, Masters) aboutissant à une production scientifique soutenue de qualité lui permettant ainsi d'obtenir en 2013 une Habilitation à Diriger des Recherches intitulée « Contribution à la caractérisation de matériaux composites : des fibres élémentaires de chanvre aux modes de défaillance des structures ».

Monsieur Vincent PLACET s'est largement impliqué dans de nombreux contrats industriels, projets de recherche académiques et collaborations internationales. Récemment en 2014, Monsieur Placet est devenu responsable du thème de recherche Tenue aux Dommages et Durabilité des Composites et Composites biosourcés (T2DC) du DMA/FEMTO-ST. Liés à ses activités de recherche, Monsieur Vincent Placet dispense également des enseignements en Ecole d'Ingénieur et en Master.

Madame Federica DAGHIA et Monsieur Vincent PLACET présenteront leurs travaux de recherche lors des prochaines Journées Nationales des Composites (JNC 20) à Marne-la-Vallée en 2017. ■

Frédéric Thiebaud (FEMTO-ST)
frederic.thiebaud@univ-fcomte.fr

VIE DES LABORATOIRES



Laboratoire des Composites Thermostructuraux (LCTS)

par Gérard Vignoles

Le Laboratoire des Composites Thermostructuraux (LCTS) est une Unité Mixte de Recherche qui a pour tutelles le CNRS, l'Université de Bordeaux (UBx), Herakles du groupe Safran et le CEA. Il a été créé en janvier 1988 par le professeur Roger Naslain qui l'a dirigé jusqu'en 2001. Ses successeurs à la direction du laboratoire ont été le professeur Alain Guette jusqu'en 2007, Francis Teyssandier, Directeur de Recherche au CNRS, et depuis 2016 le professeur Gérard Vignoles. Le laboratoire est la plus ancienne Unité Mixte de Recherche du CNRS en cotutelle avec un partenaire industriel en activité. Il est localisé au sein du campus universitaire de Pessac - Talence - Gradignan, sur un domaine CNRS regroupant, outre le LCTS, le Centre de Recherche Paul Pascal (CRPP) et l'Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (ICMCB). Sa surface est de 2740 m² grâce à deux extensions construites avec l'aide de la Région Aquitaine, qui soutient également le laboratoire pour l'achat de gros équipements.

Constitué par une équipe unique, son effectif est composé de personnels permanents (environ 30 personnes) : chercheurs, enseignants chercheurs, ingénieurs du CNRS, Herakles et CEA, techniciens ; il peut atteindre 80 personnes en fonction du nombre d'étudiants doctorants, post-doctorants et stagiaires présents.

Les recherches du laboratoire portent sur les matériaux composites céramiques pour applications en conditions extrêmes : à hautes températures, sous contraintes mécaniques et thermiques, en milieu oxydant, voire sous irradiation.

Dans ce domaine, les missions du LCTS sont de générer de la connaissance, de développer de l'expertise, et de former de jeunes chercheurs, futurs spécialistes de ce domaine.

Les composites thermostructuraux rencontrent des applications à très forte valeur ajoutée dans divers domaines : la propulsion spatiale, la protection thermique pour la rentrée atmosphérique d'objets spatiaux, la propulsion aéronautique militaire et civile, le freinage aéronautique, les composants de turbines et réacteurs industriels, les échangeurs de chaleur à très haute température et de composants de réacteurs nucléaires. Le développement de ces matériaux dans ces secteurs de l'industrie et la prospective sur de nouveaux secteurs sont sources à la fois de nouveaux problèmes scientifiques de toute nature et d'un soutien toujours renouvelé de la part des partenaires non-académiques.

Les composites à matrice céramique (CMC) et les composites Carbone/Carbone (C/C) sont des matériaux composites extrêmement particuliers, puisqu'ils comprennent des constituants réfractaires à caractère fragile, mais dont l'association mène à un assemblage tolérant aux dommages et doté d'une ténacité bien supérieure à celle des constituants séparés, d'où en particulier une très bonne résistance aux chocs thermiques.

En sus de ces matériaux, le LCTS s'intéresse aux réfractaires poreux, dont les propriétés de transfert – notamment de chaleur – sont particulièrement intéressantes, ainsi que leur capacité d'absorption d'énergie mécanique, ce qui les amène à des emplois comme matériaux de protection et/ou d'échange de chaleur.

Le laboratoire s'attache, par de la recherche de base, à générer des connaissances « amont » sur ces matériaux, comme la compréhension et la modélisation des phénomènes physiques et chimiques de toute nature présents dans ces matériaux lors de leur fabrication et/ou de leur utilisation. Pour effectuer ce travail, le LCTS fonctionne sur un mode interdisciplinaire, en joignant des compétences hétérogènes (chimie, physique, chimie physique, mécanique, thermique, procédés, modélisation numérique, analyse/synthèse d'images, ...) ; l'équipe unique qui constitue le laboratoire mutualise complètement ses ressources.

Le LCTS est un acteur majeur du campus bordelais et développe de nombreuses collaborations avec les laboratoires de recherche du campus bordelais ce qui se traduit par de nombreuses thèses codirigées (entre 20 et 25% des thèses du laboratoire), sa présence dans le LabEx AMADEus et ses liens forts avec l'UMS PlaCaMat (Plateforme de Caractérisation des Matériaux).

Le laboratoire accueille chaque année en moyenne 6 à 8 nouveaux doctorants, 2 post-doctorants, ainsi qu'une vingtaine de stagiaires.

Le LCTS a une forte culture de la qualité, de l'hygiène et de la sécurité, ainsi que de la valorisation et du transfert de résultats – principalement vers ses partenaires institutionnels – sous diverses formes.

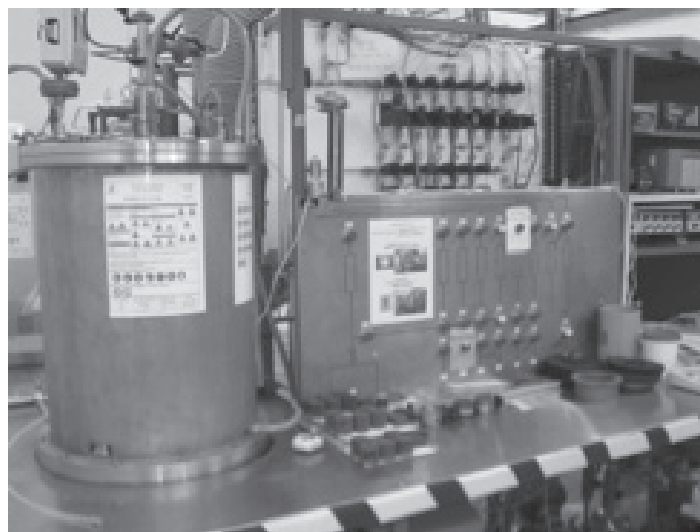
Nous allons maintenant parcourir rapidement les quatre domaines principaux de compétences couverts par l'équipe.

1 - Elaboration de matériaux; recherche sur les procédés

Les activités en physico-chimie de l'élaboration s'orientent d'une part vers la recherche de nouvelles voies de synthèse des matériaux composites céramiques et carbones et d'autre part vers la compréhension des phénomènes et des mécanismes mis en jeu dans ces procédés. Les recherches concernent l'ensemble des constituants élémentaires des composites (fibres, interphases, matrices) considérés soit individuellement (monofilament, couches minces), soit en association, à diverses échelles.

Le dépôt chimique à partir d'une phase gazeuse (CVD, Chemical Vapor Deposition) et l'infiltration (CVI, Chemical Vapor Infiltration) sont des procédés de choix pour l'élaboration des interphases et des matrices, car ils assurent un excellent contrôle de la composi-

tion, de la structure et de l'homogénéité des matériaux déposés. Ces procédés font toutefois intervenir des processus complexes et leur maîtrise nécessite le recours à des outils de modélisation physico-chimique et à des caractérisations expérimentales in situ ou ex situ. Ainsi peut-on proposer des mécanismes chimiques de dépôt et leurs lois cinétiques associées, dans une large gamme de conditions opératoires. Cette approche a été en particulier appliquée à l'élaboration de pyrocarbone (PyC), de nitrure de bore, de matrices céramiques à base de SiC et de matrices auto-cicatrisantes afin d'améliorer les propriétés mécaniques et la durée de vie des composites, ou encore à la densification de mousses de carbone poreuses par du PyC ou du SiC, dans le but d'adapter leurs propriétés mécaniques et thermiques et leur perméabilité. Plusieurs variantes, dont la physico-chimie et le poten-



Réacteur CVD avec tableau de gaz.

tiel d'application sont en cours d'investigation, sont : la CVD réactive (R-CVD), l'infiltration de Fluides Super-critiques, et le procédé de densification dit « par caléfaction ».

2 - Caractérisation structurale, morphologique et physico-chimique à toutes échelles

Les moyens de caractérisation à disposition des personnels de recherche du LCTS et plus généralement du campus bordelais, couvrent du centimètre à l'Angström. Les informations obtenues sont de type structural (diffraction X, microscopie électronique en transmission, spectrométrie Raman), morphologique (microscopie optique, microscopie électronique à balayage) ou chimique (analyse X dans MEB). Le LCTS dispose également de moyens avancés pour la préparation.

Grâce à ces moyens, des travaux de recherche sont développés dans le domaine de la structure des carbones (projet PyroMaN) et des céramiques ainsi que dans celui de leur évolution in situ en température et sous atmosphère contrôlée.

Enfin, cette panoplie est complétée par des moyens de caractérisation physico-chimique portant sur le mouillage (par exemple métal/céramique), l'adsorption, la porosimétrie, l'imbibition et la perméabilité (milieux poreux).

3 - Tests : comportement des matériaux et constituants en conditions sévères

Le comportement non linéaire des composites à matrice céramique (CMC) est directement influencé par les modes d'endommagement de la matrice sous l'influence de



MEB environnemental Quanta 400 FEG.

divers facteurs tels que : la microstructure du matériau, les interactions fibre/matrice, les contraintes résiduelles et le champ des contraintes imposées. On peut faire évoluer les propriétés en modifiant soit l'architecture fibreuse, soit les interfaces et interphases, soit la nature des constituants.

L'étude du comportement des composites est donc naturellement multi-échelle et multi-physique. Les échelles d'étude de ces matériaux sont successivement le monofilament, le microcomposite, le fil, le mini-composite et enfin le composite à renfort tissé multidirectionnel.

L'étude expérimentale du comportement mécanique permet de déterminer les modes de déformation et les mécanismes d'endommagement et de rupture. Une part importante des études mécaniques est consacrée aux influences de l'environnement sur le comportement en fatigue et la durée de vie. En complément, des études sur l'évolution chimique des matériaux sans contrainte extérieure sont également réalisées. En effet, le comportement va varier en fonction des conditions appliquées (pression, température, composition de l'atmosphère agressive). On va jusqu'à effectuer des tests accélérés dans des conditions durcies, pour améliorer la compréhension des mécanismes.

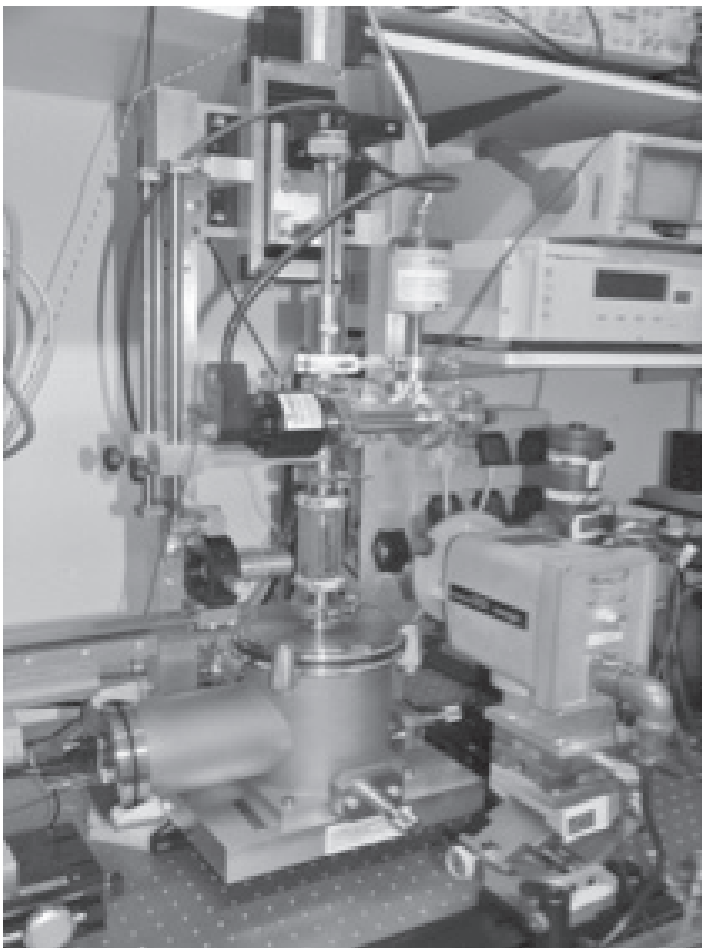
Les modèles d'endommagement progressif, d'auto-cicatrisation et de rupture combinent dans ce cas lois micromécaniques et lois cinétiques d'oxydation, obtenues par analyse des résultats de tests variés.

4 - Modélisation et simulation : l'atelier du matériau numérique / virtuel

La nécessité de restituer la compréhension des phénomènes mécaniques, thermiques et physico-chimiques à toutes échelles a amené le LCTS à développer de nombreux outils de modélisation et simulation numérique, destinés à reproduire (i) la structure et l'organisation des matériaux, (ii) les étapes de fabrication, et (iii) le comportement du matériau en conditions d'utilisation.

L'atelier du matériau virtuel est le concept permettant de regrouper et de lier l'ensemble de ces actions, avec pour finalités : l'amélioration des procédés et des matériaux obtenus, la détermination rapide de l'influence de textures ou de microstructures sur les propriétés du matériau, l'influence de défauts microscopiques sur le comportement à l'échelle macroscopique, la prévision de la ruine du matériau, voire la certification de pièces ...

La fiabilité de cette démarche repose sur la capacité du modèle numérique support à représenter la structure, le comportement ou les phénomènes que l'on cherche à étudier. Ainsi, le LCTS a développé des approches « basées images » permettant d'appréhender avec le plus de réalisme possible l'organisation des matériaux réels, avec en particulier leurs défauts et imperfections, dont on peut ainsi mesurer l'impact sur les propriétés. Les méthodes numériques variées vont de la dynamique moléculaire



Banc de caractérisation mécanique et thermique sur monofilaments ou microcomposites.

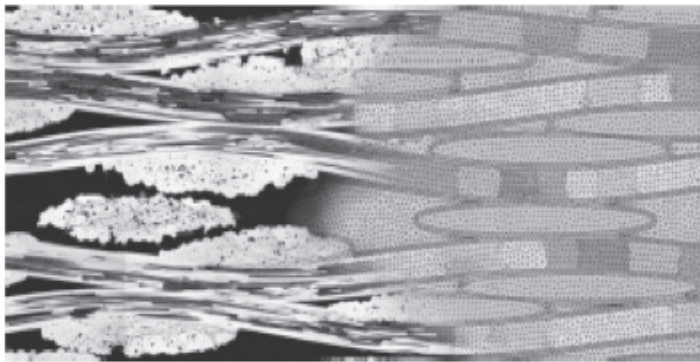
jusqu'aux éléments finis, en passant par des méthodes de Monte-Carlo.

qui connaît un grand essor à travers le monde. Une part importante de l'activité de MSA est liée à cette problématique qui mêle expérimentations et développement de modélisations originales (collages pour renforts et ancrages, endommagement et multicouches).

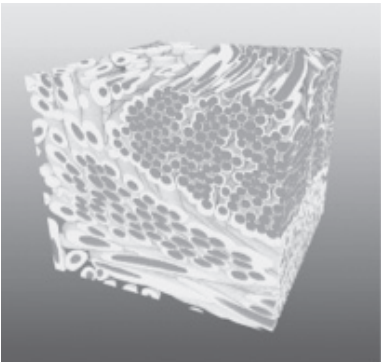
Les applications sont diverses, par exemple la problématique de tenue des barrières de sécurité sur les ouvrages,

ainsi que leur tenue en fatigue, la mise au point d'ancrages (brevet), de systèmes de renforcement efficaces pour les coques métalliques de plates-formes offshore ou plus classiquement pour les ouvrages d'art, systèmes carbone pour la précontrainte du Béton Fibré Ultra Performant. ■

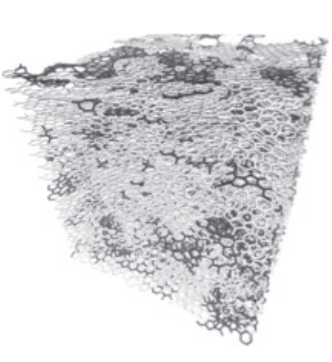
Gérard Vignoles (LCTS)
vinhola@lcts.u-bordeaux.fr



Tissage virtuel et maillage Eléments Finis.



Modélisation de CVI par méthode de Monte-Carlo.



Reconstruction Atomistique guidée image de pyrocarbone.

Conférences organisées ou parrainées par l'AMAC

- Mesure de champs à l'échelle micro** Paris, 22 juin 2016
 Journée thématique du GdR « Mesures de champs et identification » commun aux associations AFM, AMAC, AUGC et Mécamat
<http://www.femto-st.fr/fr/Agenda/agenda-2016/Mesures-de-Champs-a-l-echelle-micro/>
- Dynamic behaviour of green composites** Poitiers, 27-29 septembre 2016
 Workshop international soutenu par l'AMAC
dynecocomp@lists.ensma.fr et <http://dynecocomp-2016.ensma.fr>
- JST Compression, instabilités et ruine** Saclay, 28 octobre 2016
 Journée Scientifique et Technique AMAC
 Compression, instabilités et ruine dans la direction des fibres des matériaux et structures composites
nicolas.feld@safrangroup.fr et site Internet de l'AMAC
- JST Mise en œuvre des composites thermoplastiques** Toulouse, 26 et 27 janvier 2017
 Journée Scientifique et Technique AMAC
 Procédés, essais et simulations de mise en œuvre des composites à matrice thermoplastique
philippe.olivier@iut-tlse3.fr et site Internet de l'AMAC
- JNC 20** Champs-sur-Marne, 28-30 juin 2017
 20^e Journées Nationales sur les Composites
<https://jnc20.sciencesconf.org/> et site Internet de l'AMAC

Autres conférences

- ECCM 17** Munich, Allemagne, 26-30 juin 2016
 17th European Conference on Composite Materials info@eccm17.org et <http://www.eccm17.org/>
- HTCMC 9** Toronto, Canada, 26 juin-1^{er} juillet 2016
 9th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites
 (in conjunction with GFMAT 2016) <http://ceramics.org>
- ICCE-24** Haikou, Chine, 17-23 juillet 2016
 24th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering
dhui@uno.edu et <http://www.icce-nano.org/>
- EMI 2016** Metz, 25-27 octobre 2016
 2016 Engineering Mechanics Institute International Conference of the ASCE
lem3-2016emi-ic-contact@univ-lorraine.fr et <http://www.lem3.fr/2016EMI-IC>

CONTACTS

Adhésions

- Formulaire téléchargeable sur le site de l'AMAC : www.amac-composites.org
- Président de l'AMAC : Philippe BOISSE, LaMCoS, INSA Lyon – philippe.boisse@insa-lyon.fr
- Secrétaire de l'AMAC : Federica DAGHIA, LMT, ENS Cachan – daghia@lmt.ens-cachan.fr
- Trésorier de l'AMAC : Christian HOCHARD – hochard@lma.cnrs-mrs.fr

Liste de diffusion aux adhérents de l'AMAC

Pour les annonces de soutenances de thèses, propositions de sujets, conférences...
 envoyez un courrier électronique (sans fichier attaché) à : amac@enpc.fr

AMACINFOS
 Rédaction - Information

Transmettez vos annonces à publier dans AMAC Infos à l'éditeur :
 Nicolas FELD, Safran Tech / M&S / CSM - nicolas.feld@safrangroup.fr
 Safran Paris Saclay, rue des Jeunes Bois - Châteaufort, 78114 Magny-les-Hameaux