

Juillet 2004 - n°19

## ÉDITORIAL

### Les matériaux composites dans le domaine ferroviaire.

Par Thomas CHAUVIN  
Ingénieur à l'Agence d'Essai Ferroviaire (SNCF)  
21 av. du Président Allende - 94407 Vitry Sur Seine



#### Présentation de l'AEF :

L'Agence d'Essai Ferroviaire est intégrée au domaine matériel de la SNCF. Elle assure des missions de laboratoire d'entreprise et réalise des prestations pour des industriels via le GIE EURAIL-TEST.

Les composites et les polymères font partis des champs d'activité de l'AEF. En effet l'équipe composite intervient tant au niveau de l'essai que de l'expertise à différentes étapes de la vie du produit (mise au point, homologation, maintenance, traitement des défaillances)

#### Les applications les plus fréquentes des composites dans le ferroviaire :

Les applications dans le ferroviaire sont diversifiées. Les composites s'adaptent selon les caractéristiques aux différentes fonctionnalités du train (mécanique, électrique, confort). Ils sont considérés comme des pièces de structures, pour lesquelles des performances particulières sont requises ou comme des pièces semi-travaillantes qui sont plutôt des produits de grande diffusion.

Besoin et exigences des composites en matière de performance et de sécurité dans le ferroviaire :

Les pièces de structure, soumises à des sollicitations mécaniques et

environnementales sont pour la plupart réalisées en matériaux composites hautes performances. La sécurité de fonctionnement est un point fondamental recherché dans l'utilisation de ces pièces composites. La tenue dans le temps (vieillesse) est aussi une exigence forte de la part de l'exploitant ferroviaire, dans la mesure où les matériels roulants ont une durée de vie minimale de 30 ans.

Les pièces principales en composite équipant actuellement le matériel roulant ferroviaire sont

#### - les carénages avant

(voir photo 2 et 3).

Ils sont assimilés dans le cas des TGV par exemple à des pare-chocs. Constitués de plusieurs parties, il doivent résister aux heurts d'obstacles pouvant se trouver sur la voie (pierres, animaux). Leur fonction est d'assurer pour partie l'absorption d'énergie en cas de choc.

Pour ce faire, les carénages sont constitués d'une armature métal-



Photo 2 : Carénages de TGV réseau et Eurostar



Photo 3 : Carénages démontés de TGV Duplex

lique revêtue d'une peau composite fibre de verre / polyester.

Ces pièces constituent le visuel principal de l'identité du train, c'est pourquoi les formes peuvent être complexes. Si les avantages des matériaux composites font la différence par rapport à des solutions métalliques pour cette application (gain de poids, géométrie complexe, intégration de plusieurs pièces ou fonction, facilité de réparation), les problèmes liés à l'assemblage de ceux-ci sur un châssis en acier peuvent entraîner des défaillances en service (voir photo 4).



Photo 4 : Défaillance d'un élément de fixation

En effet, dans le cas de structures multi-matériaux, la fixation des éléments est souvent un point clé du bon fonctionnement de l'organe. La dynamique ferroviaire, les ondes de pression ou les phénomènes vibratoires sont des sollicitations auxquelles le carénage doit résister en service.

Sur d'autres matériels roulants (cas des automoteurs XTER 72500 et 73500 et de certains matériels régionaux type TER 2N NG (voir photo 5)),

les carénages sont constitués de sandwich (mousse PU rigide et peaux en fibres de verre / polyester). Dans le cas de l'XTER 72500, le matériau participe acti-



Photo 5 : face avant du TER 2N NG

vement à l'absorption d'énergie en cas de choc en partie haute (au niveau de la baie vitrée), protégeant ainsi le mécanicien.

D'autres pièces extérieures (panneau de toiture ou au niveau du bas de caisse) sont aussi en composite fibre de verre / polyester, principalement sur les TGV. Le choix de ce matériau (par rapport à un composite carbone par exemple) est imposé par les coûts matières principalement.

#### - Les cages de roulement

(voir photo 6)

Les cages de roulement (pièces permettant de maintenir les galets ou les billes du roulement) réalisées par injection (PA ou PEEK renforcé avec des fibres de verre courtes principalement) sont couramment employées dans les moteurs de traction ou les réducteurs.

Pour ce qui est de leur utilisation dans des roulements de boîtes d'essieux, la position des servi-

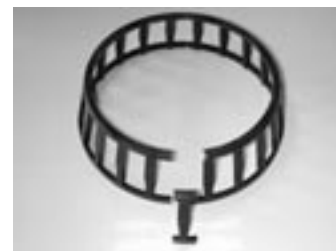


Photo 6 : cage de roulement en polyamide renforcé

ces techniques de la Direction du Matériel est différente de celle d'autres entreprises ferroviaires européennes. Si ces dernières ont accepté l'utilisation de polyamide renforcé de fibres de verre courtes dans la composition des cages de roulement de boîtes d'essieux depuis le début des années 1990, la SNCF a préféré développer des moyens d'analyses spécifiques de ces cages, avant d'autoriser leur utilisation en service, dans la mesure où il s'agit de pièces sécuritaires. Toute défaillance à ce niveau est susceptible de se traduire par un déraillement.

L'Agence d'Essai Ferroviaire a donc mis au point toute une série de tests mécaniques et physico-chimiques et assure un suivi en service de rame d'essai.

L'objectif est de se constituer un retour d'expérience suffisant sur ce type de cage et de mieux cerner le potentiel de ces pièces, surtout dans le cas d'application grande vitesse.



Photo 7 : frette de moteur de traction

#### - Les frettes

(voir photo 7)

assurent le maintien des bobinages d'un induit de moteur électrique de traction contre les effets de la force centrifuge. Ces pièces sont réalisées par enroulement d'un ruban unidirectionnel de fibre de verre préimprégné de résine.

Compte tenu des nouvelles contraintes liées à la mise en place de la ligne TGV Méditerranée

(échauffement plus important du à l'augmentation de la vitesse commerciale des rames TGV de première génération de 270 à 300 km/h), des études ont été menées pour optimiser ce matériau en conséquence (nouvelle séquence d'empilement), afin de répondre à ces nouvelles sollicitations.

#### - Dans le domaine de l'aménagement intérieur

(voir photo 8),

les composites sont bien représentés dans les nouveaux matériels ferroviaires.

Les composites sont dans ce cas soumis à un environnement parfois agressif. La durabilité et le gain de poids associés sont les deux principales exigences pour ces pièces.



Photo 8 : aménagement intérieur du matériel ZTER

Les applications ferroviaires les plus marquantes au niveau de l'aménagement intérieur sont les cadres de baie en polyester, les modules WC en polyester / verre, les coques de sièges en polycarbonate ou polycarbonate / ABS et les tablettes de salle.

Le pupitre de la cabine de conduite du mécanicien, de forme généralement complexe est aussi en composite.

(voir photo 9)

L'ensemble de ces pièces semi-travaillantes doit avant tout résister aux dégradations susceptibles d'être occasionnées par les voyageurs et doit pouvoir être nettoyé ou remplacé facilement.

Pour ces applications particulières, nous contrôlons la résistance à la rayure, l'écaillage, le vieillissement au contact des produits de nettoyage utilisés lors de la maintenance, ainsi que le vieillissement thermique (effet de baie vitrée) et UV.



Photo 9 : cabine de conduite de l'XTER 72500

- Au niveau des infrastructures ferroviaires, les composites peuvent être utilisés pour le renforcement d'ouvrage d'art, par l'intermédiaire de pré-imprégné carbone époxy.

Avenir et évolutions des composites dans le domaine ferroviaire

Malgré des avantages indéniables (résistance mécanique, légèreté, absence de corrosion...), les matériaux composites restent peu utilisés jusqu'alors dans le domaine ferroviaire.

Il est vrai que culturellement et historiquement le transport ferroviaire est un grand consommateur de matériaux métalliques.

Cependant, la limite de charge par essieu d'un TGV roulant à 300 km/h est fixée à 17.5 tonnes, pour des raisons de fatigue des éléments de voie.

Or dans le cas du TGV Duplex (dernière génération de TGV), l'emploi d'un chaudron aluminium pour les voitures a tout juste permis de rester à ce niveau de charge à l'essieu, pour compenser la plus grande capacité de transport de ce matériel.

Dans le futur, qu'il s'agisse d'accroître les performances des

trains ou la capacité voyageurs, il sera indispensable de gagner en masse à vide.

Les TGV de demain devront faire appel à des matériaux composites (à base de fibres de verre ou de carbone), qui restent les meilleurs choix dans la lutte contre le poids.

Si la conception d'un train « tout composite » semble être une utopie, les concepts multi-matériaux qui visent à employer aussi bien des composites que des matériaux métalliques ou de l'aluminium, en utilisant les qualités propres de chacun d'eux sont beaucoup plus réalistes.

l'équation de poids étant largement en faveur des composites, ce n'est malheureusement pas toujours le cas de celle plus économique.

A un prix moyen près de 9 fois supérieur à l'acier (à poids égal), le composite carbone devra être employé en cherchant à intégrer un maximum de fonction dans une seule pièce.

De même, toujours pour compenser l'écart de coût matière, l'utilisation des composites devra permettre un gain de coût de processus de fabrication, ou bien générer des économies lors de la maintenance du matériel (facilité de démontage, pas de visite et de révision augmentés)

Enfin, le transport ferroviaire a ses contraintes propres sur le plan de la durée de vie attendue du matériel ou de l'environnement de fonctionnement (produits spécifiques à la maintenance ferroviaire). Les composites devront faire la preuve d'un bon comportement dans le temps, et d'une durabilité dans l'environnement ferroviaire.

## VIE DE L'ASSOCIATION



### Bilan de la JST AMAC «Dialogue Essai/Calcul dans les Structures Hétérogènes».

Blois, les 25 et 26 Mars 2004

Ces journées scientifiques et techniques de l'AMAC ont été co-organisées par l'ONERA et le Laboratoire de Mécanique et Rhéologie de l'Université F. RABELAIS de Tours. Elles ont reçu le soutien de la mairie de

Blois et ont été accueillies par l'Ecole d'Ingénieurs du Val de Loire

La complexité propre aux structures composites (hétérogénéités, anisotropie du com-

portement, comportement non linéaire, multiples mécanismes de ruine...) nécessite d'une part le développement de modèles sophistiqués, et d'autre part la mise en œuvre d'un ensemble d'essais d'identification appro-

prié. Dans le cadre classique, ces essais sont prédéfinis pour obtenir certaines caractéristiques de base, mais permettent rarement d'atteindre des propriétés spécifiques (en comportement hors-plan, sous des sollicitations

multiaxiales complexes ...). L'objectif de ces journées était de montrer l'apport d'un réel dialogue modèle/expérience. Ainsi, le calcul peut permettre de définir des configurations d'essais originales. L'expérience peut, quant à elle, fournir des données supplémentaires à la modélisation, grâce à un enrichissement des données par une instrumentation adaptée.

Ces journées ont permis d'apport

ter des éléments de réponse aux questions suivantes :

· Quels moyens d'essais et de mesure l'« expérimentateur » peut développer pour fournir les informations les plus pertinentes au « modélisateur » (mise en évidence des phénomènes à modéliser, identification, validation ...)? En quoi l'expérience peut guider le choix d'une modélisation ?

· Comment les « modélisateurs » prennent-ils en compte

les artefacts expérimentaux (notamment la dispersion). Comment les calculs peuvent-ils agir sur la définition des essais (détermination des essais, des mesures, des observations les plus pertinentes pour la modélisation)? Comment utiliser au mieux les informations expérimentales ?

Ces journées ont réuni une cinquantaine de participants de divers horizons. Deux thèmes majeurs ont pu être dégagés: (i)

l'apport du calcul de structure pour l'expérience et (ii) l'intérêt des méthodes de mesure de champs. Un compte rendu de ces journées sous forme d'article devrait être publié prochainement dans la Revue des Composites et Matériaux Avancés.

Nicolas CARRERE,  
Membre du CA de l'AMAC  
et Co-organisateur de la JST

## Bilan d'ECCM 11 : 11th European Conference on Composite Materials. Rhodes, 31 mai-4 juin 2004

ECCM 11 (11th European Conference on Composite Materials) s'est tenue récemment à Rhodes (Grèce) du 31 mai au 3 juin 2004. Rhodes est l'île la plus septentrionale de la Grèce. On aperçoit les côtes de la Turquie. L'organisation était parfaite, la conférence était d'un bon niveau, tout concourait à une manifestation réussie.

ECCM 11 est la 11ème d'une série qui a été amorcée au début des années 80. L'ESCM (European Society for Composite Materials) a remplacé l'EACM (European Association of Composite Materials) en 1998 lors d'ECCM 8 à Naples. Après quelques années de maturation, l'organisation d'ECCM est devenue la principale mission de l'ESCM.

La qualité de ces conférences s'est fortement améliorée dès l'édition de Bruges (ECCM 10) qui était de très bonne facture. ECCM 11 a confirmé cette évolution. ECCM 11 a connu un grand succès : 420 participants et 360 communications contre 260 à ECCM 10 et 200 à ECCM 9. La communauté française était la deuxième la plus importante (44 communications) derrière le Royaume Uni (54) et devant l'Italie (34). Comme d'habitude, le pays organisateur était bien représenté (une trentaine de participants). 36 nations étaient présentes, dont les Etats-Unis (10 participants) et le Japon (20).

Le titre de la conférence était « from nano-scale interactions to engineering structures ». Elle était divisée en 7 sessions parallèles qui ont traité de nombreux thèmes :

- composites intelligents (smart composites)
- fracture
- nanocomposites
- procédés automatiques de fabrication
- modélisation : c'est dans cette session qu'étaient regroupées les publications sur les textiles
- composites à matrice céramique
- transport
- environnement et énergies renouvelables
- contrôle non destructif (contrôle de l'endommagement)
- fatigue
- construction
- interfaces
- fibres
- propriétés mécaniques
- endommagement
- nanofunpoly : nanostructured and functional composites
- composites naturels
- endommagement

Les nanocomposites sont devenus un thème de recherche important. Les organisateurs leur avaient accordé une place significative, ce qui donne sa marque à la Conférence. Le président, Costas Galiotis (Université de Patras) a donné le ton lors de la conférence introductive, grâce à quelques planches bien choisies qui posaient les perspectives. Ensuite, 2 conférences plénières sur 4 et une conférence invitée leur étaient consacrées. Il y en avait beaucoup d'autres communications intéressantes dans les différentes sessions. On les trouvera dans les Actes qui ont été distribués le premier jour.

Les nanocomposites à matrice organique renforcés par des

nanoparticules ou des nanotubes représentaient la quasi totalité des nanocomposites étudiés. Ces nanocomposites présentent un ensemble de propriétés physiques intéressantes pour diverses fonctions (photoluminescence, magnétiques, optomécaniques, résistance à l'usure, frottement), ce qui mobilise les chercheurs. En revanche, les propriétés mécaniques demeurent faibles, comme on pouvait logiquement le prévoir. Elles se dégradent même lorsque la densité de nanotubes augmente. Les chercheurs qui explorent cette voie n'obtiennent pas de bons matériaux. Ainsi, par exemple, la ténacité d'une matrice époxyde renforcée par des nanotubes de carbone (0,1%) augmente de 0,65 MPa Öm à 0,77 MPa Öm. Ou bien, la résistance en flexion et la ténacité de nanocomposites à matrice TIC renforcée par des nanotubes de carbone (fabriqués par la technique SPS) décroissent lorsque la densité de nanotubes atteint 2%. Une légère amélioration des propriétés est cependant observée avec 0,5% de nanotubes. Emmanuel Glannelis (Cornell University) a montré que les déformations augmentent grâce à des interactions entre les nanotubes et les chaînes de molécules dans le polymère.

Quelques auteurs ont présenté le concept de nanofibres. Celles-ci devraient conduire à des supermanocomposites (Y.A. Dzenis). Des nanofibres de carbone de diamètre 150 nm ont été fabriquées par voie vapeur et alignées dans une matrice PEEK. Le nanocomposite cor-

respondant a vu ses propriétés mécaniques croître avec la quantité de nanotubes jusqu'à ce que celle-ci représente 15% du poids total. Ces composites présentaient une résistance à l'usure élevée. La résistance à l'usure peut aussi être augmentée grâce à l'incorporation de cendres dans une matrice époxy (P. Barpanda, Cambridge). Les particules présentes dans la cendre (110 GPa, dureté 3-4 GPa), sont appropriées pour la production de composites à matrice époxyde devant résister à des sollicitations de contact (load bearings).

Le terme nano donne naissance à de nombreux néologismes intéressants tels que nanofunpoly ou nanofun pour désigner l'exercice qui consiste à jouer avec la nanostructure des composites pour obtenir les propriétés fonctionnelles souhaitées. Un réseau d'excellence (Nanofunpoly) s'est constitué. La session consacrée à ce sujet rassemblait une dizaine de communications.

Les autres conférences plénières concernaient l'aéronautique (Airbus) et les composites biologiques. Le conférencier d'Airbus (Roland Thevenin,) s'est cantonné dans le point de vue commercial. Il a défendu l'idée que la satisfaction du client doit être le premier critère et que l'innovation doit donc être introduite progressivement suivant une démarche pas à pas. C'est celle qui a été suivie depuis 1993 pour les composites. La part des matériaux composites dans la structure des avions d'Airbus mesurée en termes de masse s'élevait à

12% dans l'A 340 (1993), puis 14% dans l'A 340-600 (2002), puis environ 20% dans l'A 380 (2006) et environ 30% dans l'A 400 M (2009).

ECCM 11 a aussi été l'occasion d'un certain nombre de manifestations parallèles.

Tout d'abord les réunions de la Société Européenne des Composites ESCM (European Society of Composite Materials). Le conseil a été renouvelé par vote au cours de l'Assemblée Générale (élection de 10 nouveaux membres). Il a été question de la prochaine édition d'ECCM (ECCM 12) qui se tiendra en 2006 à Biarritz et

qui est organisée conjointement par la France et le Portugal. Les Chairmen sont J. Lamon et A. Torres Marquez.

Un Workshop sur les méthodes d'essais sur fibres, organisé dans le cadre du Programme Européen VaFTeM (Validation of Fiber Teting Methods). Les présentations étaient données par les participants au programme (une dizaine de laboratoires européens). L'audience a atteint une quarantaine de personnes bien que la publicité ait été réduite à sa plus simple expression dans le programme d'ECCM 11.

Les réunions du Comité Européen de Normalisation qui produit des normes d'essais pour les matériaux composites. Les réunions du 2 et 3 juin étaient consacrées au Comité Technique (TC 184) qui établit des normes d'essais pour les matériaux composites à matrice céramique ou carbone. Les normes discutées ont été proposées à la suite des travaux du programme VaFTeM. Elles concernent les essais de traction à haute température sur monofilaments, les essais de traction à haute température sur fils, les essais de pull out, les essais de traction sur minicomposites, les essais

de push out, les essais de fluage de monofilaments, ...

En résumé, ECCM 11 était assurément une conférence intéressante. Le programme était riche. Rendez-vous à la prochaine édition (ECCM 12) qui aura lieu à la même époque en 2006 à Biarritz.

Jacques Lamon  
Président de l'AMAC

## Quelques nouvelles de l'ESCM (European Society of Composite Materials)

ECCM 11 a été l'occasion de plusieurs réunions de l'ESCM pour organiser la vie de la société.

Le Conseil a été partiellement renouvelé par l'élection de 10 membres. Le vote a eu lieu lors de l'Assemblée Générale. Les français y étaient peu nombreux. Aucun des nouveaux membres élus n'est par conséquent français. Le conseil n'en comporte que deux.

Le conseil comprend 26 membres. Le Comité exécutif pour la période allant de juin 2004 à juin 2006 est composé comme suit :

Président : Costas Galiotis (Grèce)  
Vice President (Chairman ECCM 12) - President elect : Jacques Lamon (France)  
Vice President (Cochairman ECCM 12) - Antonio Torres Marques (Portugal)  
Présent sortant : Albert Cardon (Belgique)  
Secrétaire Général et Trésorier :

Alain Vautrin (France)

Autres membres du Conseil exécutif :

Frederico Paris (Espagne)  
Ignazio Crivelli Visconti (Italie)  
Karl Schulte (Allemagne)  
Tom Peijs (Pays Bas)

Le fonctionnement de l'ESCM est régi par une constitution qui a été approuvée par l'Assemblée Générale lors d'ECCM 8 à Naples en juin 1998. Elle a été modifiée ensuite. Les modifications ont été approuvées lors de l'Assemblée Générale qui s'est tenue lors d'ECCM 11 à Rhodes, le 2 juin 2004.

ESCM comprend :  
des membres individuels ordinaires  
des membres étudiants  
des membres honoraires

Tous les membres votent lors de

l'Assemblée Générale, et tous les membres ordinaires et les membres honoraires peuvent se porter candidats pour siéger au Conseil.

ESCM organise tous les deux ans ECCM, et aussi des conférences techniques.

ESCM peut accorder son label à des conférences sur les composites si l'organisateur en fait la demande au président d'ESCM et accorde des frais d'inscription réduits aux membres d'ESCM. Les conférences organisées par ESCM devront se tenir en Europe. L'Europe est la région bornée par l'Océan Atlantique à l'Ouest, le pôle au Nord, l'Oural à l'Est et la mer Noire et la mer Méditerranée au Sud.

Les participants aux Conférences biennales d'ECCM sont membres d'ESCM jusqu'à la fin de l'année suivant cet ECCM.

Le montant de la cotisation est fixé par le Conseil et la procédure d'adhésion entre deux conférences est décidée par le Comité Exécutif. La cotisation s'élève à 30 pour les membres individuels ordinaires et à 15 pour les étudiants.

Aujourd'hui où l'Europe s'organise et se construit, la communauté française des Composites doit se sentir concernée par le développement d'une Société Européenne des Composites. A terme l'ESCM pourrait devenir un vecteur de coopération avec des laboratoires ou des universités européens dans le cadre soit d'échanges bilatéraux soit de programmes européens.

Jacques Lamon  
Président de l'AMAC

## Prix Daniel Valentin 2003 : deux lauréats

Gilles Lubineau a 26 ans et est actuellement maître de conférences au Laboratoire de Mécanique et Technologie de Cachan. Elève de l'ENS Cachan, premier à l'agrégation de Mécanique en 1999, il obtient son doctorat en 2002, au LMT Cachan, sous la direction du Pr. P. Ladevèze, avec la mention « Très honorable avec les félicitations du jury ». Son travail de thèse « Sur un mésomodèle d'endommagement des composites stratifiés : relations micro-méso, possibilités et limites » aborde de façon théorique les liens qui existent entre les approches « méso », qui permettent d'effectuer des calculs de structures composites endommagées en introduisant des paramètres d'endommagement à l'échelle des plis élémentaires et de l'interface, et les approches « micro », qui utilisent des quantités plus physiques, telles que la densité de fissuration et les taux de restitution d'énergie critiques. Les perspectives ouvertes par ce travail sont nombreuses et prometteuses, en particulier dans les problèmes multiphysiques complexes qui peuvent être décrits à différentes échelles et intégrés à un modèle viable pour le calcul de structures. C'est avec cet objectif que M. G. Lubineau met en place des stratégies multi-échelles, en temps et en espace, qui permettent de rendre accessible des calculs de structures intégrant plusieurs niveaux de modélisation, grâce une résolution parallèle du problème. Le parcours scientifique de M. Gilles Lubineau est remarquable, ses travaux de recherche sont particulièrement novateurs et la production scientifique associée de très bon niveau.

Marie Christine LAFARIE-FRENOT  
Secrétaire de l'AMAC

Francis Rebillat (Maître de Conférences à l'Université de Bordeaux I) est l'un des deux lauréats du Prix Daniel Valentin 2003. L'objectif des travaux F. Rebillat est de prédire et d'améliorer la durée de vie des composites à matrice céramique, c'est pourquoi ses activités sont à l'interface entre la physico-chimie et la mécanique dans les CMCs. Ses travaux suivent une démarche originale multiéchelle et multiphysique. Cette démarche, très intéressante, permet, grâce aux diverses disciplines maîtrisées par Mr Rebillat (chimie, mécanique, ...), un retour original vers l'élaboration. Francis Rebillat a effectué un itinéraire remarquable dans le domaine des composites dans lequel il a mené des travaux très nombreux et innovants ce qui lui vaut aujourd'hui cette récompense.

Nicolas CARRERE  
Membre du CA de l'AMAC

## VIE DES LABORATOIRES



### Les matériaux composites au Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences par Guy Bouquet, PU - J. Bréard, McF & A. Saouab, McF à l'Université du Havre

Les recherches sur les matériaux composites ont été introduites en 1993 au Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Université du Havre. Compte tenu des activités de ce laboratoire plutôt tournées vers des problèmes d'écoulements de fluides et d'interaction fluide-structure, les matériaux composites apparaissent comme un thème innovant. Pour rester dans le cadre des activités de ce laboratoire, l'aspect qui a été donné aux études sur ces matériaux ont concerné l'imprégnation d'un milieu solide poreux (renfort) par un fluide (résine), phénomène sur lequel repose l'obtention d'un composite. L'équipe « Matériaux Composites » qui a pris naissance autour de ce thème s'intéresse actuellement aux divers procédés de mise en forme des matériaux composites où une phase liquide intervient et plus précisément les procédés LCM : Liquid Composite Molding. Sur ce sujet, 4 thèmes sont actuellement développés :

#### Identification des lois de comportement pour la modélisation des procédés LCM

Les premières études se sont focalisées sur le tenseur de perméabilité des milieux fibreux (thèse J. Bréard, 1997) en collaboration avec Renault Technocentre. Afin de déterminer les perméabilités directionnelles d'un renfort anisotrope, divers dispositifs expérimentaux ont été mis en œuvre. Ces études sur les milieux poreux saturé/insaturé a permis de décrire le comportement des écoulements dans une structure poreuse double échelle.

Le comportement des écoulements transitoires dans une préforme saturée a également été analysé. Une seconde partie de cette analyse s'est orientée vers les caractéristiques viscoélastiques de tels milieux (thèse S. Cadinot, 2002) en collaboration avec Renault Technocentre. Nous avons étudié la rhéologie de ces milieux fibreux comparés avec des résultats expérimentaux de compaction et de relaxation. Des effets double échelle au niveau frictionnel sont présents et ont des caractéristiques très similaires à ceux rencontrés sur les études de dynamique des écoulements. Nous avons introduit les problèmes de déformation de la préforme, afin de donner les éléments nécessaires à l'interprétation des mécanismes de dynamique d'écoulement dans un milieu poreux déformable. Enfin, des résultats expérimentaux ont clairement montré l'existence d'un ratio entre les écoulements saturé et insaturé et la nécessité

de les relier au degré de saturation. Ces travaux ont consisté à mettre point un nouveau capteur (thèse L. Labat, 2001) en collaboration avec Hurel Hispano, et corrélés ces analyses avec une nouvelle équation de transport pour le degré de saturation (Figure 1).

#### Analyse quantitative d'images de structures fibreuses

La structure complexe du réseau de pores est décrite par une géométrie qui définit la forme (morphologie) et par une connexité (topologie) qui établit les liaisons possibles entre pores. Pour cela, nous choisissons la description des fonctions de distribution de taille de pores (Figure 2), donnant la distance entre cellule solide dans un matériau biphasé (thèse L. Bizet, 2004). Ces fonctions conduisent à une granulométrie linéaire. Un dispositif expérimental de coupes sériées couplé à un logiciel d'analyse d'images et des outils de simulation numérique ont été intégrés

à ce travail. Nous effectuons une collaboration avec l'ONERA dans le cadre de l'identification du tenseur de perméabilité par modélisation Eléments Finis sur une CER obtenue à partir des images réelles de renfort.

#### Modélisation ThermoHydroMécanique et simulation numérique des procédés LCM

Nous avons participé au développement du logiciel LCM-FLOT, en collaboration avec le CRASP à Montréal, logiciel qui est maintenant commercialisé par la société ESI-Group et dénommé PAMRTM™. Nous sommes intervenus directement sur le volet des lois physiques, et tout particulièrement dans le cadre des modélisations de couplages Thermo-Hydro-Mécanique en milieu poreux, pour des applications du type RTM-VARILRI (Figure 3). De nouvelles collaborations sont également en cours dans le cadre de la modélisation des procédés d'infusion tels que le RFI. D'autres collabo-

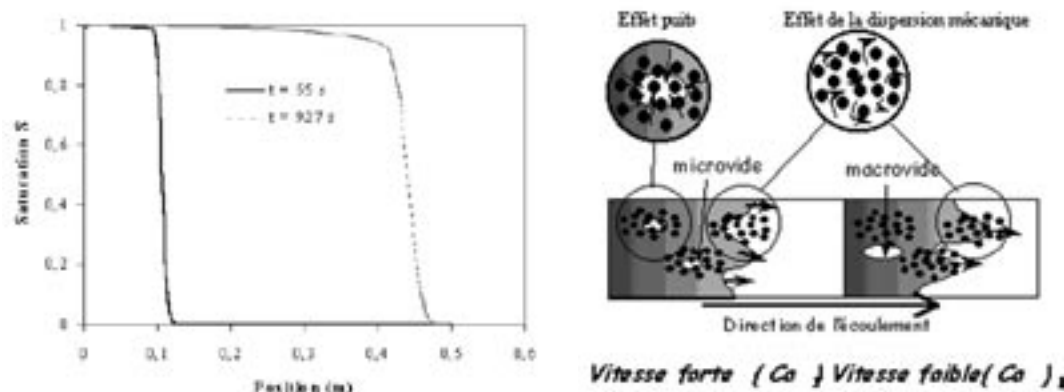
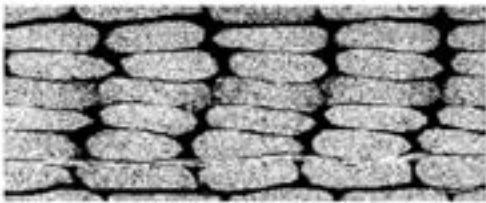


Figure 1 : modélisation numérique du transport de la saturation



Z = 2.20 mm



Z = 8.29 mm

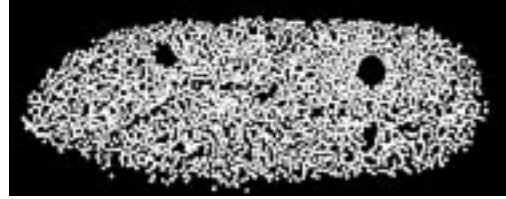
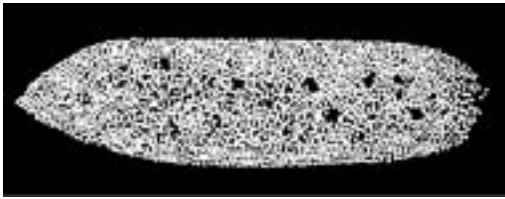


Figure 2 : observation de la structure fibreuse aux différentes échelles par coupes sériées

rations concernent les analyses dans le cadre de l'intégration PAMRTM™ avec CATIA V5.

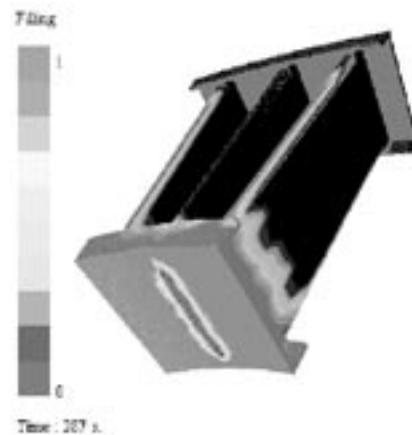
### Optimisation multicritère procédés / propriétés

Dans cette étude (A. Saouab), nous optimisons la séquence d'empilement d'une plaque composite sous les critères suivant : temps d'injection, volume de résine perdu, modules de rigidité, déformations maximales et flambement. L'injection sur le renfort fibreux est réalisée par des procédés du type LCM. Une formulation multicritère du problème de conception est utilisée, c'est à dire que l'on cherche à minimiser tous les critères précédemment cités à la fois. Il n'existe plus alors une unique solution au problème d'optimisation mais un ensemble de compromis. Ce travail est un premier pas vers la conception de structures composites en considérant l'ensemble des aspects de la vie du produit. Ces travaux

sont réalisés en collaboration avec R. LeRiche de EM Saint Etienne.

Enfin, depuis 2 ans, un nouveau programme (J. Bréard, G. Bouquet) vient d'être engagé sur l'étude des **matériaux composites renforcés par des fibres de lin** (programme Ademe/ Agrice, en collaboration avec C. Morvan du TGV Rouen, et C. Baley-Y. Grohens du L2PIC

Lorient). Ce travail consiste à exploiter la paroi végétale d'une fibre de lin en tant que structure composite afin de proposer des améliorations et/ou des créations de matériaux composites, et également de nouvelles approches biocomposites. Par rapport à des matériaux renforcés par des fibres de lin tels qu'on peut en rencontrer à l'heure actuelle, l'originalité de notre démarche consiste à mettre au point un



Mold	RTM	CRTM	RTM Light	Infusion	Process
	rigid		semi-rigid	flexible	Infusion
Flow Control	L	RTM	RTM	RTM	VARI
	L + T	RTM	RTM	RTM	SCRIP LRI FASTRAC
	T	RTM	RTM	RTM	RPI
Mold Control	Fixed gap	Imposed displacement or stress			

Figure 3 : simulation numérique des procédés LC

## AGENDAMAC



Vous trouverez les éléments descriptifs de ces conférences directement sur leurs sites propres ou encore sur le site Internet de l'AMAC

### Conférences organisées ou parrainées par l'AMAC

JST «Mise en forme des matériaux composites»

Le Havre, 2-3 Décembre 2004

AMAC et SFT (Société Française de Thermique) : 1ère journée : 'Thermique & Procédé'

AMAC : 2ème journée : 'Renfort & Procédé'.

Contact : Carole LEGUEN, secrétariat du LMPG, Université du Havre, Quai Frissard BP 540  
75058 Le Havre CEDEX. - e-mail : carole.leguen@univ-lahavre.fr  
{guy.bouquet, joel.breard, abdelghani.saouab}@univ-lehavre.fr

## ⇒ 14° Edition des Journées Nationales des Composites ⇐

**Contact :**

V. Duquenne ; Tel : 03 44 23 45 36

C. Bayard ; Tel : 03 44 23 45 27 ; Fax : 03 44 23 44 15

e-mail : jnc14@utc.fr ; Site : www.utc.fr/jnc14/

*Rappel (conférences déjà annoncées dans AMAC INFOS n°18)***Autres conférences****ICCE11****Head-Beach, South Carolina, USA, 8-14 Août 2004**

11th International Conference on Composites/Nano Engineering

**Contact :** Pr. David Hui, University of New Orleans ; e-mail : dhui@uno.edu

Site : www.uno.edu/~enr/composite

**15th AICMDC****Säröhus (Goteborg), Suède, 27-28 Septembre 2004**

15th Annual International Conference on Manufacturing and Design of Composites

**Contact :** Lena Sandström ; e-mail : lena.sandstrom@sicomp.se

Site : www.ifpsicomp.se

**Nanocomposites 2004****San Francisco, USA, 1-3 September 2004**5<sup>th</sup> International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites**Contact :** Amos Golovoy ; e-mail: ecm@executive-conference.com

Site : www.executive-conference.com/conferences/nano04.html

**Wood-Plastic Composites****Baltimore, USA, 11-12 Octobre 2004****Contact :** Lou Rossi, Principia Partners ; Tel +1 484 459 2238,

e-mail : lou.rossi@PrincipiaConsulting.com ; Site : www.PrincipiaConsulting.com

**G-O-C-F****Hamburg, Allemagne, 18-20 octobre 2004**

The Global Outlook for Carbon Fiber

**Contact :** Scott Stephenson ; Tel : +1 207 781 9608 ; Fax : +1 207 781 2150

e-mail : scotts@intertechusa.com ; Site : www.intertechusa.com

**Autom. Composite Processing****Düsseldorf, Allemagne, 20-21 October 2004**

Automated Composite Processing

**Contact :** e-mail: info@pultruders.com ; Site : www.briskevents.nl**2nd Int. Conf. on FRP in Civil Eng.****Adelaïde, Australie, 8-10 Décembre 2004**

2nd International Conference on Fibre-Reinforced Polymer Composites in Civil Engineering

**Contact :** Rudolf Seracino, University of Adelaïde ; Tel : +618 8303 5451 ;

Fax : +618 8303 4359 ; e-mail : cice2004@civeng.adelaide.edu.au;

Site : www.adelaide.edu.au/cice2004

**ICCST/5****Sharjah, Emirats Arabes Unis, 1-3 Février 2005**

5th International Conference on Composite Science &amp; Technology

**Contact :** H. El Kadi, e-mail : hkadi@ausharjah.edu

N. Qaddoumi, e-mail : nqaddoumi@ausharjah.edu

Site : www.ausharjah.edu/media/iccst5/

3rd International Workshop on Green Composites

**Contact :** Pr. Hitoshi Takagi, Dept. Of mech. Engineering, The university of Tokushima  
Tel : +81 88 656 7359 ; Fax : +81 88 656 9082 ; e-mail : iwgc3@compo.jsms.jp  
Site : <http://compo.jsms.jp/iwgc3/>

**COBRAE Conf. 2005****Dübendorf, Suisse, 31 Mars-1 Avril 2005**

Composite Bridge Alliance Europe : international conference on bridge engineering with polymer composites

**Contact :** Mr. Jaap Ketel ; Tel: +31 33 4343 500 ; Fax: +31 33 4343 501  
e-mail: [info@cobrae.org](mailto:info@cobrae.org) ; Site : [www.cobrae.org](http://www.cobrae.org)

**ICCM-15****Durban, Afrique du Sud, 27 Juin-1 Juillet 2005**

15th International Conference on Composite Materials

**Contact :** Chairman = Viktcor Verijenko ; e-mail : [iccm15@ukzn.ac.za](mailto:iccm15@ukzn.ac.za)  
Site : [www.iccm15.com](http://www.iccm15.com)

**L'AMAC n'a plus de secrétariat à****— l'ENSAM - LM3 / AMAC —**

151, boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris  
Tel : 01 44 24 63 41 ; Fax : 01 44 24 62 90  
e-mail : [secretariat.amac@paris.ensam.fr](mailto:secretariat.amac@paris.ensam.fr)

**Veillez dorénavant vous adresser aux membres suivants du CA :**

Président : Jacques LAMON  
LCTS, 3 Allée La Boétie, Domaine Universitaire, 33600 Pessac  
Tel : 05 56 84 47 03 - Fax : 05 56 84 12 25  
mél : [lamon@lcts.u-bordeaux.fr](mailto:lamon@lcts.u-bordeaux.fr)

Secrétaire : Marie-Christine LAFARIE-FRENOT  
ENSMA - LMPM UMR CNRS 6617, 1, av. Clément Ader, B.P. 40109,  
86961 Chasseneuil Futuroscope CEDEX  
Tel : 05 49 49 82 29 - Fax : 05 49 49 82 38  
mél : [lafarie@lmpm.ensma.fr](mailto:lafarie@lmpm.ensma.fr)

**Pour les adhésions :**

(le formulaire d'adhésion peut être téléchargé depuis le site WEB de l'AMAC)

Trésorier : Yves REMOND  
IMFS UMR CNRS 7507, 2, rue Boussingault, 67000 Strasbourg  
Tel : 03 90 24 29 18 - Fax : 03 88 61 43 00  
mél : [remond@imfs.u-strasbg.fr](mailto:remond@imfs.u-strasbg.fr)

**Liste de diffusion aux adhérents de l'AMAC**

Pour les annonces de soutenance de thèse, proposition de sujets de thèse...  
envoyez un courrier électronique (sans fichier attaché) à : [amac@enpc.fr](mailto:amac@enpc.fr)

**SITE WEB - AMAC**

<http://www.amac-composites.asso.fr>  
(formulaire d'adhésion téléchargeable)