



## EDITORIAL

## PANORAMA des MATERIAUX DANS LE GENIE CIVIL

Par : Patrice HAMELIN<sup>1</sup> et Jean-François CARON<sup>2</sup>

1 : Laboratoire Mécanique et Matériaux, Université de Lyon 1

2 : LAMI, ENPC, Marne la Vallée



Unité Mixte  
ENPC-LCPC



### Jean-François CARON

ENPC -LAMI - 6 et 8, avenue  
Blaise Pascal, Cité Descartes,  
Champs-sur-Marne  
F-77455 MARNE-LA-  
VALLEE CEDEX 2  
[caron@lami.enpc.fr](mailto:caron@lami.enpc.fr)

### Ponts et composites...

Nous touchons là à l'une des activités les plus prestigieuses du génie-civil, celle des grands projets et des défis technologiques. Jugez en : le pont de Normandie à la date de son inauguration en 1994, constituait le record du monde des ponts à haubans avec une portée centrale de 856 m et une longueur totale de 2141 m. En 1998, le pont Japonais Akashi Kaikyo a une portée de 1991 m et une longueur totale 3910 m. L'Øresund bridge, lien entre le Danemark et la Suède, est inauguré le 1<sup>er</sup> juillet 2000

et mesure quelques 7,8 km (portée maximale de 490 m).

Que dire du futur ouvrage qui reliera d'un trait (portée 3300 m) l'Italie et la Sicile, du projet de 4000 m pour relier Honshu et Hokkaido. Les Etats-Unis reliés à l'Asie par un « peace bridge » en mer de Béring, et l'Europe unie à l'Afrique par un pont d'environ 30 km au dessus du détroit de Gibraltar? « Pas avant longtemps » assurent des spécialistes de la construction, « il y a trop de problèmes techniques ».

Le développement de nouvelles architectures, de nouveaux procédés de construction, d'assemblages, les simulations numériques, mais aussi l'amélioration des performances des bétons et des aciers, et l'intégration de nouveaux matériaux permettront sans doute un jour de lever ces problèmes technologiques.

Concernant les composites polymères, où en est-on ? Bien souvent le manque d'expérience et de recul, les prix élevés, découragent les donneurs d'ordre, qui attendent des preuves et des assurances plus fortes. C'est la fonction des ouvrages expérimentaux que l'on bâtit un peu partout dans le monde : proposer, tester, valider de

nouvelles solutions et de nouveaux matériaux.

#### Qui fait quoi ?

En matière d'innovation matériau réellement structurale, 3 pistes majeures :

- la réparation et le renforcement d'ouvrages existants à l'aide de matériaux composites. Sans aucun doute à l'heure actuelle la plus développée et la plus prometteuse économiquement (cf. éditorial de P. Hamelin).
- L'introduction des composites dans les systèmes de pré-tensionnement et d'haubannage. Il s'agit là de remplacer ou compléter les câbles aciers dans les systèmes tendus.
- Les réalisations tout-composite, incluant le tablier.

Il existe sans conteste, des pays leaders dans ces différents domaines. Si on peut effectivement dire que la réparation et le renforcement sont désormais maîtrisés dans le monde entier (Europe, Etats-Unis Japon), la Grande Bretagne et les Etats-Unis s'investissent dans le développement de nouvelles structures tout-composite.

Enfin on trouve au Japon, en Allemagne, en Suisse et en France des applications éprouvées dans le domaine de la précontrainte et du haubannage.

#### Les réalisations tout-composite : des débuts modestes mais prometteurs.

Ce qui est recherché ici, outre l'image innovante et l'expérimentation, c'est la légèreté des ouvrages pour la mise en place, la préfabrication et la rapidité d'installation (peu de gêne pour le trafic) ainsi que des coûts d'entretien faibles. Des établissements de recherche sont souvent associés dans ces projets (Virginia tech...)

Il s'agit essentiellement de réalisations d'ouvrages de taille modeste, passerelles



Passerelle d'Aberfeldy  
(photo Maunsell)

piétons ou franchissements routiers mineurs. Aberfeldy Footbridge (1994) est localisé sur un golf en Ecosse, et constitue actuellement ce qui est le plus abouti en terme de réalisation tout-composite : 15 tonnes, capacité de 90 tonnes, 120 m de long, 2m de large, la portée maximum est de 64 m. Il est constitué d'un tablier et de piles entièrement en fibre de verre-résine isophthalique (assemblage de pultrudés) et de câbles aramide. On peut voir aussi sur un canal situé à Bonds Mill en Angleterre, un pont basculant de 6.5 tonnes, pour passage de véhicules. Maunsell Structural Plastics, bureau d'étude très en pointe dans le domaine a conçu ces deux ouvrages britanniques. Aux Etats-Unis on expérimente de petits ponts routiers. Au Kansas (1996), un pont d'environ 7m de long sur 8 de large permettrait le passage d'une charge de 750 tonnes. La société KSCI Inc. l'a réalisé en sandwich fibre de verre-résine et nid d'abeille. Même type de structures dans l'Ohio (Smith Road Bridge, 97) et en Virginie. A noter aussi, des franchissements routiers réalisés à l'aide de poutres pultrudées assemblées



**Pultrudé, verre carbone**  
h=900mm (STRONGWELL)  
(Parson's bridge, Tom's Creek Bridge...). Ce procédé de

fabrication en continu de profilés de grandes dimensions, paraît prometteur. Enfin, cette brève relevée dans le moniteur de mars 2001: « un pont routier de 175m de long dont les haubans seront ancrés à un seul pylône excentrique en composites devrait être construit en 2001 à San-Diego. », témoigne de la volonté affichée de passer à la vitesse supérieure...

### **Précontrainte et haubanage composite : un formidable enjeu pour les composites**

Les avantages des composites sur l'acier dans ces techniques sont manifestes. Des rigidités et résistances spécifiques très élevées permettent de réduire considérablement le poids propre des ouvrages. De plus les composites restent moins sensibles que les aciers aux problèmes de corrosion (même si le verre peut avoir à souffrir du voisinage alcalin des bétons), et sont moins sujets au fluage. Cependant il reste plusieurs freins à leur utilisation : le prix, le manque de recul et de retour d'expérience sur des organes structurels aussi sensibles, rendent méfiants les donneurs d'ordre. Cette frilosité devrait cependant diminuer car les premières réalisations Européennes datent du début des années 80 et prouvent dorénavant déjà la pérennité de ces solutions. Cependant, réaliser des ancrages aussi performants mécaniquement que le sont les câbles eux-mêmes, reste un problème ouvert et un enjeu pour les fabricants. Les composites (surtout ceux à base de fibres de carbone) supportent mal les

étreintes et concentrations de contraintes, et les collages nécessitent des travaux profonds d'optimisation, et de sérieuses adaptations psychologiques ! Le Japon s'est doté d'institutions de recherche et développement sur ces aspects (Advanced Composite Cable Club a déjà géré 88 projets dans ce sens). En Europe, l'Allemagne a mené les premiers essais de précontrainte verre avec ancrages coulés à Düsseldorf en 80, puis 86. La spirale amorcée, les fabricants de jontes mobilisés, on

Cousin...) et instituts de recherche (en France : LCPC, INSA Lyon, IFP, ENPC. Ainsi, fruit d'une recherche subventionnée via l'IFP, la société Freyssinet vient de recevoir un prix de l'innovation pour des ancrages carbone, testés en fatigue à l'ENPC. Dans ce cadre, à Laroin (64), la réalisation d'une passerelle piéton haubanée de 110 m de portée enjambant le Gave de Pau, est en cours. Elle nécessitera environ 15 km de jonc de carbone de diamètre 6 mm.



**Les ponts à haubans : un formidable enjeu pour les composites.**  
Ici (pont de Normandie), pas trace de fibres de carbone, mais pourquoi pas rêver ! (Photo BOUYGUES)

programme en Europe (Suisse, Allemagne, France...) dans les années 90 la réalisation d'autres précontraintes composites, et de petits ouvrages à haubans. Les travaux de recherche sur des ancrages plus sûrs (design, tests de fatigue et de vieillissement) se poursuivent, associant généralement fabricants (en France : Freyssinet, GTM, Solétanche, Bouyghes Offshore, Bachy,



**Tests de fatigue sur ancrages jontes carbone**  
(Freyssinet-ENPC)

### **Pour en savoir plus...**

*Journal of Composites for Construction, revue de l'American Society of Civil Engineers (ASCE) (ISSN 1090-0268).*  
Chabert A. : *Les applications des matériaux composites au sein des ouvrages d'art, Engineering structures, N.685, p.17-28, 1993*  
*Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structure, proceedings, ASCE, 456pp., 1991.*  
*Les matériaux composites en architecture, construction et Génie-civil, proceedings Arquimacom 98, Bordeaux, oct.98...*

- JST "RELATION CHIMIE/PROPRIETES DES MATERIAUX COMPOSITES" (AMAC / SFC)
- ICCM13 : BILAN



## JST : Relation Chimie / Propriétés des Matériaux Composites

Sous l'égide de l'AMAC et sous le parrainage de la SFC  
Université de Franche-Comté – Besançon – 28-29 mai 2001

C'est grâce à la chimie des polymères, des fibres et des interfaces que les matériaux composites ont initialement connu un développement rapide et spectaculaire de leurs applications. La validation de composites types (production en masse, compétitivité des coûts) est alors nécessairement passée par l'étude et la modélisation de leurs propriétés mécaniques, et à l'évidence un « fossé inter spécialités » est apparu entre les mécaniciens et les chimistes.

Depuis quelques années, deux facteurs de recherche et de développement contribuent progressivement à combler ce fossé :

- Le premier est l'étude de durabilité des matériaux composites (voire de certains de leurs éléments constitutifs) dans un champ de contraintes utilitaires ou artificielles (pour tenter de mettre en évidence, à travers les réponses, leur rôle et les couplages). Les JST de Moret sur Loing (30-29 mai 1996) et d'Arcueil (12 mai 1998) avaient, entre autre, fait ressortir la nécessité de la prise en compte des transformations physico-chimiques pour caractériser et évaluer la durabilité de certains matériaux composites.

- Le second est l'étude et l'élaboration de nouveaux composites et en particulier

celles des matrices, des fibres, des charges et des structures

(nanocomposites, sandwich à âme NIDA, composites céramiques, ...).

La chimie préparatoire et l'analyse physico-chimique des phases, des interphases et des interfaces prennent une part de plus en plus importante, la conception et les propriétés macroscopiques de durabilité des matériaux composites dépendant fréquemment de leurs propriétés nanoscopiques (évolution des propriétés physico-chimiques de matériaux solides polyphasés conduisant à l'abaissement des propriétés mécaniques, au changement d'aspect, ...).

Les JST de Besançon (28-29 mai 2001) ont eu pour objet d'actualiser la compréhension des transformations chimiques et de leur relation avec les propriétés des composites. Dix-huit communications de 20 min et deux conférences invitées de 50 min ont été réparties en 9 mini-sessions, suivies chacune d'un débat de 20 à 30 min sur les thèmes suivants : Durabilité de composites

polyamide/fibres de verre ; Fibres et interphases de nitrure de bore ; Interfaces et interphases – Formulation de résines ; Thermovieillissement de composites à matrices

organiques ; Photo Oxydation de matrices époxy ; Physico-

chimie/Propriétés

mécaniques de composites

inorganiques ; Revêtements

multicouches séquencés

(PyC/TiC)<sub>n</sub> pour la

réalisation d'interphases

dans les matériaux

composites céramiques ;

Alliages composites ;

Interactions

polypyrrole/époxy : effets

sur des propriétés

physiques ; Divers : ajouts

organiques dans les bétons ;

corrosion sous contraintes

de fibres de verre E dans un

composite UD 0° sollicité

en milieu humide.

Ce mode d'organisation a

conduit à des discussions

très ouvertes et

approfondies entre les

participants : industriels,

thésards, universitaires et

chercheurs.

Ces JST ont permis de faire

le point sur les avancées de

l'analyse physico-chimique

des matériaux composites et

de leur évolution. Si la liste

des matériaux et des

problématiques exposées et

discutées n'est pas

exhaustive (pas de nano-

composites), une ouverture

a été faite en direction

d'autres composites comme

les bétons.

Il faut noter la participation

de mécaniciens qui font

l'effort d'aller à la

rencontre de la chimie de

ces matériaux : aux

chimistes, dans leur quête

de la connaissance de la

matière à l'échelle nanométrique, de poursuivre l'effort en vue d'établir la relation avec les observables microscopiques et macroscopiques de la mécanique.

Il ressort de cette réunion à Besançon que des bilans de ce type devraient être réalisés périodiquement, et pourquoi pas en alternance au niveau national et européen ?

L'évaluation de la durabilité des matériaux dans un champ d'utilisation donné reste un enjeu primordial. La recherche doit poursuivre ses efforts dans la mise au point de méthodes de vieillissement artificiel suffisamment sophistiquées en termes de paramétrage des contraintes et de capture des réponses. Cela est indispensable pour déterminer les facteurs d'accélération et leurs synergies, et pour établir des corrélations prédictives correctes de comportement des matériaux composites en cours d'utilisation spécifique. Il serait souhaitable qu'une prochaine JST soit organisée sur ce thème au niveau de la chimie en recherchant, en particulier, la relation avec la mécanique.

**Claude Dubois, membre AMAC et SFC**

ICCM 13 était la 13<sup>e</sup> d'une série de Conférences biennales consacrées aux Matériaux Composites. La 14<sup>e</sup> aura lieu à San Diego, la 15<sup>e</sup> à Durban (Afrique du Sud).

C'était une conférence relativement importante par le nombre des participants (600 environ) et par le nombre de communications (630 annoncées dans le programme). La France était représentée par plus d'une vingtaine de participants et une quarantaine de communications. Elle arrivait au 5<sup>e</sup> rang derrière le pays organisateur suivi du Japon, des Etats-Unis et de la Grande Bretagne et devant la Corée, les Pays-Bas, l'Australie, l'Allemagne, le Canada, etc.

Les thèmes couvraient un large spectre allant d'aspects fondamentaux relatifs aux propriétés mécaniques et physiques jusqu'aux technologies émergentes telles que les nanocomposites, et des composites à matrice céramique et carbone jusqu'aux GLARE.

Le pays organisateur donnait le ton de la conférence par le choix des conférences invitées, et les communications de ses chercheurs. La Chine est un pays en voie de développement, ambitieux, qui cherche à acquérir des connaissances et des technologies (procédés de fabrication). Les communications reflétaient l'effort de recherche et développement en cours.

L'aéronautique chinoise s'intéresse aux matériaux composites. Depuis le début des années 70, elle a lancé

des travaux de recherche et développement sur les composites à hautes performances tels que les composites à matrice résine et fibres de carbone, et les composites carbone/carbone. Les composites carbone/résine entrent dans la fabrication de structures et de sous structures diverses (telles que les dérives, les ailes, fuselage, composants d'hélicoptères, etc ...). Ils semblent employés principalement dans les avions de combat F-8 II, et dans les hélicoptères Z-9 dont ils représentent 25% du poids total de la structure. Un effort de recherche important semble consacré aux procédés d'élaboration des matériaux carbone/carbone. Un logiciel de calcul de structures en matériau composite COMPASS a été développé et a été testé avec succès sur plus d'une dizaine de cas d'école.

La proportion de matériaux composites (CFRP) a considérablement augmenté dans l'Airbus A380 par rapport à ses prédécesseurs (Jérôme Pora, Airbus, France). Airbus a été le premier constructeur à faire une place importante aux matériaux composites dans les avions de transport commerciaux. Pour l'A 380, il a tiré profit de l'expérience acquise avec les modèles précédents. L'emploi des composites conduit à une réduction des coûts, grâce aux gains de masse qu'ils induisent. Mais il est important que les techniques de fabrication soient automatisées de façon qu'elles contribuent elles aussi à la réduction des coûts. Des procédés de fabrication automatiques pour le placement des fibres, le drapage, le

moulage, etc... sont envisagés. En outre, les composants de l'A 380 sont d'une taille suffisamment grande pour que l'on puisse concevoir des pièces dont les dimensions importantes permettent de diminuer les coûts d'assemblage et d'augmenter le volume de matériau produit.

Depuis leur observation par Ijima en 1991, les nanotubes de carbone ont été le sujet d'un grand nombre de travaux de recherche. On peut s'appuyer aujourd'hui sur une base de connaissances suffisamment solide pour explorer leurs applications potentielles. T.W. Chou s'est livré à cet exercice. Les propriétés mécaniques des nanotubes sont exceptionnelles (module d'élasticité  $E = 1$  TPa, résistance à la rupture comprise entre 2 et 10 GPa) et laissent rêveur. Cependant, leur emploi en tant que renfort dans les composites relève de la fantaisie et de la science fiction (Chou dixit). Il serait plus réaliste d'essayer de tirer profit de leurs propriétés thermiques et électriques exceptionnelles : elles sont stables jusqu'à 2800°C dans le vide, 750°C dans l'air, la conductivité thermique est deux fois plus élevée que celle du diamant, la conductivité électrique est 100 fois supérieure à celle du cuivre.

M.J. Hinton (DERA) a rapporté les résultats d'un exercice intéressant et fort utile qu'il coordonnait à l'échelle mondiale avec des collègues de DERA (A.S. Kaddour) et UMIST (P.D. Soden). Cet exercice (WWFE : World-Wide Failure Exercise) consistait à mesurer la capacité d'un certain nombre de modèles de

rupture à prévoir le comportement des matériaux composites à matrice polymère et renforcés par des fibres. Tous les détails concernant cet exercice pourront être trouvés dans un prochain numéro de Composites Science and Technology. Cette étude va fournir une description des principales théories, comparer leurs prévisions respectives, et les confronter à des résultats expérimentaux. 14 modèles ont été testés. Les résultats expérimentaux étaient produits dans plusieurs laboratoires : UMIST (Grande Bretagne), DERA (Grande Bretagne), DLR (Allemagne), Université d'Utah (Etats-Unis). La conclusion principale de cette étude est que 50% des modèles ont atteint un degré de maturité satisfaisant, tandis que pour les autres l'écart entre les prévisions et les résultats expérimentaux pouvait atteindre un facteur 8.

Enfin, les matériaux composites suscitent un certain intérêt pour le forage et la production en eaux très profondes (jusqu'à 3000 mètres) [O.O. Ochoa, Texas]. Cet intérêt remonte aux débuts des années 80. Dans les années 90 des programmes fédéraux ont rassemblé plusieurs équipes aux Etats-Unis. De nombreux essais de validation et une meilleure base de données sur le vieillissement d'origine physique ou chimique sont encore nécessaires, aujourd'hui que l'intérêt se porte vers les opérations à très grandes profondeurs.

**Jacques Lamont**  
**(Laboratoire des Composites Thermostructuraux)**







**26-28 mars 2002**

**FRC 2002 (NEWCASTLE)**

La neuvième conférence internationale sur composites renforcés par fibres est programmée du 16 au 28 mars 2002 au 'Centre for Composite Materials Engineering' de l'université de Newcastle upon Tyne. Tous les thèmes relatifs aux composites fibreux y seront abordés avec une attention particulière aux problématiques suivantes :

- développement de nouveaux matériaux
- Science et technologie de la fabrication
- Domaines d'application critiques
- Propriétés critiques

**Contact :** Louise Blackburn (e-mail : [louise.blackburn@btinternet.com](mailto:louise.blackburn@btinternet.com))

**21-25 octobre 2002**

**MATERIAUX 2002 (TOURS)**

Vingt des plus importantes sociétés savantes et associations (dont l'AMAC) s'associent pour organiser un colloque commun baptisé 'Matériaux 2002'. 18 thèmes sont prévus au programme de ce colloque. Nous retiendrons notamment, les deux colloques auxquels l'AMAC participe comme société organisatrice :

- "Modélisation et comportement des matériaux hétérogènes et aléatoires" (AMAC, GFC, GFEC, MECAMAT et SF2M)
- "Interfaces dans les composites et autres multimatériaux" (AMAC, MECAMAT, SF $\mu$ )

**Contact :** Société de Chimie Industrielle, secrétariat congrès / matériaux 2002, 28 rue St Dominique, 75007 Paris (e-mail : [materiaux@materiaux2002.net](mailto:materiaux@materiaux2002.net))

**3-7 juin 2002**

**ECCM 10 (BRUGES)**

La 10<sup>ème</sup> conférence européenne sur les matériaux composites se tiendra du 3 au 7/06/02 au Old St Jan Conference Centre de Bruges. Elle est organisée par l'ESCM (european society for composite materials) et a pour titre "Composites for the future". Les aspects de modélisation, de fiabilité, de fabrication de tous les types de composites y seront abordés.

Une attention particulière sera portée sur les thèmes tels que les composites à fibres naturelles, les nano-composites, les matériaux intelligents et la durabilité des composites.

**Secrétariat :** Secrétariat ECCM10, Myriam Bourlau - MEMC-TW-VUB Pleinlaan 2, 1050 Bruxelles, Belgique (e-mail : [mbourlau@vub.ac.be](mailto:mbourlau@vub.ac.be))

**13-15 mars 2002**

**ORGAGEC'02 (POITIERS)**

Colloque européen organisé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées sur le thème : "Les matériaux organiques : Un futur pour le génie civil ? Des questions pour l'environnement ?" Ce colloque a pour objectifs de faire le point sur le choix des matériaux dans le Génie Civil et le Bâtiment et d'analyser l'importance du développement des matériaux organiques pour

le Génie Civil. Les conséquences de l'utilisation croissante des matériaux organiques en termes d'environnement font aussi partie des objectifs.

**Contact :** Pr. Y. Mouton, LCPC, 58 Bd. Lefebvre, 75732 Paris CEDEX 15; e-mail : [mouton@lcpc.fr](mailto:mouton@lcpc.fr)  
Site web : [www.lcpc.fr/LCPC/Service/congres/orgagec02/](http://www.lcpc.fr/LCPC/Service/congres/orgagec02/)

**5 octobre 2002**

**JST AMAC (PARIS)**

Journée Scientifique et Technique «Fabrication des structures en composites à matrice organique»

Cette journée est organisée par le LMPS (ESEM - ENSAM) et l'équipe PRO<sup>2</sup>COM du LGMT a pour objectifs de faire le point sur l'état actuel....

**Secrétariat :**

- SECRETARIAT
- LISTE DE DIFFUSION
- ADRESSE SITE WEB



---

**Secrétariat de l'AMAC : coordonnées**

Secrétariat de l'AMAC  
ENSAM – LM3 / AMAC  
151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris  
Tel : 01 44 24 63 41 ; Fax : 01 44 24 62 90

---

**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)

---

**WEB – AMAC**

Retrouvez l'AMAC et son actualité sur son site Internet : <http://www.lamef.bordeaux.ensam.fr/Amac>  
Ou nouvelle adresse :  
<http://www.amac-composites.asso.fr>