

Mai 2017 - n°34

Numéro spécial génie civil



Les prochaines *Journées Nationales des Composites* auront lieu à Champs-sur-Marne, sur le site de l'Ecole Nationale des Ponts-et-Chaussées. Des journées qui prendront donc une coloration originale et inédite, à travers des applications à l'architecture, au bâtiment, à la construction et au génie civil. Ce numéro d'AMAC Infos vous propose lui aussi quelques éléments de réflexion sur la place des composites dans ce grand, mais parfois méconnu, domaine industriel.

Les composites dans la construction

par **Laurent DESTOUCHES (Solutions Composites, gérant-fondateur)**
communication@solutionscomposites.fr



Le secteur de la construction est en première ligne pour relever deux défis majeurs.

- Loger décemment, confortablement même si possible, toujours plus d'habitants, à des coûts accessibles (en investissement comme en fonctionnement) et ce, sur toute la durée de vie.

- Limiter l'impact sur l'environnement de ces constructions. Le secteur du bâtiment représente le plus gros émetteur de gaz à effet de serre en France et dans les pays développés. Il est aussi le premier consommateur de ressources naturelles, de matières premières, comme d'énergie primaire.

Face à ces enjeux, les modes de construction traditionnels sont aujourd'hui arrivés à leurs limites. Je veux parler des solutions maçonnées en petits éléments, du béton banché, mais aussi des systèmes à ossature bois ou métal.

Ces techniques souvent archaïques conduisent aussi à des délais et des coûts de construction élevés (qui veut attendre encore un an pour

un logement dans une économie où tout va très vite aujourd'hui ?). Quand on parle de satisfaire aux nouvelles réglementations, thermiques en particulier, ces techniques ne sont plus en mesure de satisfaire, à coûts maîtrisés, les attentes des clients :

- absence de solutions satisfaisantes du traitement des ponts thermiques ;
- étanchéité à l'air délicate à assurer ;
- globalement une insuffisante maîtrise de la qualité sur chantier ;
- une logistique complexe et coûteuse.

En deux mots, des performances trop éloignées des objectifs qui ont été fixés et un optimum économique largement atteint, et donc des espérances de gains de productivité très limitées.

On constate aussi la difficulté de ce secteur à attirer nos jeunes devant des travaux et des conditions de travail pénibles. Quel secteur industriel utilise toujours les techniques et les matériaux qu'employaient déjà leurs grands-parents ?

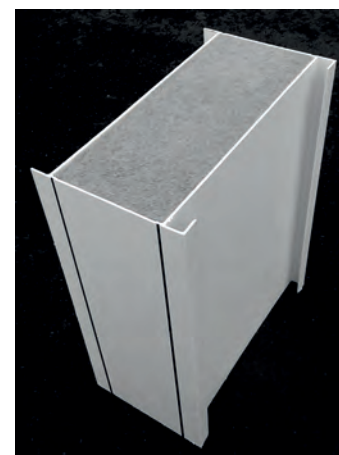
Notre idée est alors d'exploiter les potentialités des matériaux composites dans le secteur du bâtiment qui les a ignorées jusqu'alors, tels que l'ont fait avant nous l'aéronautique, l'automobile et bien d'autres secteurs industriels...

Nous nous sommes mis à réfléchir à comment construire différemment, en reprenant complètement « à la base » le cahier des charges, autour des thèmes centraux suivants :

- utiliser des technologies de transformation des composites réellement industrielles (la pultrusion) ;
- mettre au point des formulations particulièrement adaptées à ces contraintes ;
- favoriser l'intégration de fonctions dans nos conceptions ;
- exploiter l'énergie du soleil ;
- s'attacher à limiter la consommation de ressources primaires et réduire l'empreinte carbone...

...pour aboutir à WALL E+, procédé constructif qualifié d'innovation de rupture par les spécialistes qui ont découvert

le procédé l'année passée (lauréat 2015 du Mécénat Besnard de Quelen, JEC Award 2016, programme soutenu par l'ADEME dans le cadre des Investissements d'Avenir).



Coupe WALL E+® avec isolant

C'est d'abord un système constructif très simple bien que « high-tech », conçu à base de blocs-profilés creux – filants sur une ou plusieurs hauteurs d'étages. WALL E+ est en premier lieu un mur porteur pour les constructions individuelles, un mur « manteau » autoporteur pour les immeubles collectifs.

Mais WALL E+ assure surtout la fonction complète d'enveloppe du bâtiment. C'est donc également un procédé de façade innovante qui permet d'intégrer naturellement tout type de matériau de bardage et de nombreux équipements (balcon, pergola, mur végétalisé...).

L'exploitation rationnelle des qualités inhérentes aux matériaux composites et l'intégration de systèmes de récupération d'énergie de façon très naturelle dans la structure même du bloc/façade sont les principales clefs de cette innovation.

Nous avons mis au point une formulation associant matrices et renforts dûment sélectionnés et testés, pour proposer sur le marché des matériaux uniques, qui permettront la construction d'ouvrages robustes, insensibles à toute forme de corrosion, et aux performances fiables et durables. La formulation développée présente tout particulièrement de hautes performances mécaniques, ainsi qu'un comportement « au feu » remarquable pour des matériaux de synthèse.

Les profilés à renfort verre et matrice thermodurcissable, creux

de structure est un véritable progrès et un point fort de notre produit : la conception de ce bloc-façade repose en partie sur la très faible conductivité thermique du matériau rapporté à ses excellentes performances mécaniques. Ainsi, c'est une enveloppe toute en finesse avec des parois pourtant très résistantes qui a été conçue.

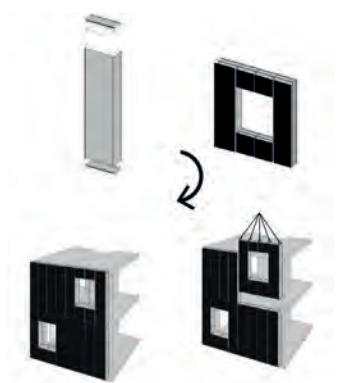
Ce mur rideau règle parfaitement le problème de l'imperméabilité (à l'air comme à l'eau) et toutes les autres fonctions techniques attendues quand on évoque l'étanchéité des ouvrages.

Côté intérieur, le système est particulièrement soigné. Installer les équipements de confort, connecter l'habitat et le faire évoluer dans le temps en fonction de l'usage et des besoins qui évoluent deviendront très simples.

Autre innovation majeure, celle de récupérer l'énergie du soleil en surface. Pourquoi se priver de cette énergie disponible gratuitement et en grande quantité ? Le procédé introduit en effet l'idée d'une fonction active sur le mur grâce à deux systèmes complémentaires. WALL E+ facilite l'intégration de capteurs photovoltaïques, mais

pulables sans effort. Les murs pourront être préfabriqués en usine, menuiseries incluses, puis assemblés par panneaux complets sur chantier. Gage de sécurité et de qualité. Le procédé est aussi très rapide à mettre en œuvre. WALL E+ représente une véritable opportunité pour améliorer conjointement l'efficacité énergétique, environnementale au sens large, et la performance économique globale des bâtiments, si l'on réfléchit à la notion de coût complet (investissement, exploitation, démantèlement en fin de vie).

Non seulement les matériaux constitutifs sont recy-



**Concept WALL E+® -
assemblage des blocs**

clables mais, mieux encore, les ouvrages pourront aisément être démontés en fin de vie... Et, unique sur le marché, les blocs pourront être réutilisés sur de nouvelles constructions. Cette idée dépasse largement le concept de développement durable, qui vise essentiellement à utiliser toujours moins de matière, moins d'énergie et être en capacité de recycler les matériaux en fin de vie. *Nous leur donnons une seconde chance, une deuxième vie !*

Innovation de rupture donc, devant le haut niveau d'intégration de fonctions de ce « mur » qui devient un objet technique, intrinsèquement « composite », qui en plus d'assurer la stabilité du bâtiment doit isoler thermiquement, isoler acoustiquement, garantir l'étanchéité à l'humidité et à l'air, accueillir simplement les réseaux, permettre le captage des énergies renouvelables... et rester économique à mettre en œuvre. La qualité architecturale l'emportera sur le besoin d'équipements trop complexes, coûteux et fragiles.

WALL E+® : la solution pour construire demain des bâtiments sobres, durables, robustes, agréables à vivre, dont l'objectif essentiel reste centré autour de la performance et du confort pour l'usager.

Imagination, vulgarisation et lucidité technico-économique, seront les maîtres mots pour permettre à ce marché d'arriver à maturité. Les atouts des composites sont indéniables. Fort heureusement, certains industriels sont en passe de franchir le pas. Les applications futures des matériaux composites sont et seront étonnantes.

Pour finir, Solutions Composites, en quelques mots... Une PME spécialisée dans l'ingénierie et la construction avec les composites, engagée autour de l'idée de proposer à ses clients des solutions innovantes et de qualité. **Une équipe tournée vers l'avenir... celui du monde que l'on veut laisser à nos enfants.**

Plus d'informations :

www.solutionscomposites.fr



**Agrandissement d'une maison en WALL E+®
en cours de réalisation**

et rendus parfaitement étanches, seront remplis d'isolants de toute nature. Cette capacité de recevoir en son sein n'importe quel type d'isolant (vrac, matériaux issus du recyclage, etc.), fait de WALL E+ un procédé très intéressant sur le plan écologique. Il permet de valoriser l'économie circulaire, avec des isolants qui pourront être « sourcés » au pied des chantiers, source d'économie aussi.

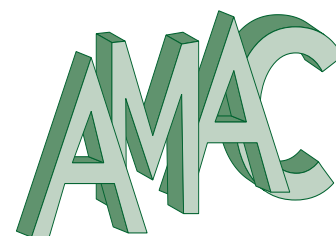
Le fait que les performances thermiques de l'isolant ne soient absolument pas dégradées par des ponts thermiques

aussi de façon « native » des capteurs pariéto-dynamiques de type « mur Trombe », développés par nos équipes. Ce système vise à accumuler le rayonnement solaire du jour et à le restituer pendant la nuit et/ou à exploiter la chaleur produite pour « l'injecter » dans le bâtiment sous forme d'air chaud. WALL E+ accueillera aussi très naturellement, et sans aucun risque de corrosion, des végétaux en surface, élégante façon de décarboner les villes.

Les blocs, très légers, sont mani-



Projet de bâtiment démonstrateur en WALL E+® - Réalisation été 2017



Prix Daniel Valentin : le lauréat 2016

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



Monsieur Arthur LEVY, âgé de 32 ans au moment de sa déclaration de candidature, est le lauréat du Prix Daniel Valentin 2016. Monsieur LEVY est Ingénieur de l'Ecole Centrale de Nantes et titulaire d'un Master en Mécanique Appliquée en 2006. En 2010, il soutient une thèse, intitulée

« Modélisation et simulation d'un écoulement sous vibration. Application au soudage par ultrasons de composites à matrice thermoplastique » au GeM de l'Ecole Centrale de Nantes, sous la direction d'Arnaud Poitou, Steven Le Corre et Didier Delaunay.

Arthur LEVY rejoint ensuite le Center for Composite Materials de l'Université du Delaware aux Etats-Unis pour un Post Doc de 18 mois. Il travaille sur la dépose automatisée de bandes de composite à matrice TP et étudie le couplage entre transferts thermiques et contact des bandes. Fin 2012, il enchaîne avec un autre post-doc de 2 ans à l'Université McGill à Montréal. Là ses activités de recherche portent sur la dépose de bandes de composites TP, puis le moulage

par compression de fragments aléatoires de bandes dans le cadre d'un projet transcanadien. Il étudie particulièrement les modes de déformation des fragments de bandes provoqués par la fermeture du couple poinçon / matrice dans le procédé. Enfin, ses travaux s'orientent sur les procédés hors autoclave (moulage VBO) avec des nouvelles générations de prepregs dits « hors autoclave ». Il modélise notamment l'évolution du champ de pression dans des stratifiés produits par VBO et définit les limites du procédé.

Depuis Octobre 2014, il est à l'Université de Nantes et membre du Laboratoire de Thermocinétique de Nantes où il travaille d'abord comme post-doc durant un an puis comme maître de conférences sur le thermoestampage.

Notons que Monsieur LEVY a participé à divers encadrements d'étudiants pour des activités de recherche et a une production scientifique qui témoigne de la qualité de l'ensemble de ses travaux.

Monsieur Arthur LEVY présentera ses activités lors des prochaines Journées Nationales des Composites, JNC20, fin juin 2017 à Champs-sur-Marne.

Bilan des Journées Scientifiques et Techniques (2013-2017)

par Frédéric DAU (I2M) frederic.dau@ensam.eu
et Philippe BOISSE (LaMCoS) philippe.boisse@insa-lyon.fr

En favorisant les rencontres entre industriels et académiques, les Journées Scientifiques et Techniques (JST) organisées par l'AMAC sont, depuis des années, l'occasion d'échanges et de discussions passionnées sur des questions et enjeux d'actualité attrayant aux matériaux et structures composites. Elles sont aussi l'occasion de faire émerger de nouveaux verrous scientifiques et techniques, et de fédérer de nouvelles collaborations.

Ces JST peuvent être un lieu de présentation de recherches en cours et pas toujours finalisées pour permettre des discussions avec des chercheurs proches du sujet.

Ces rencontres, organisées sur 1 ou 2 journées en général, regroupent en moyenne de 30 à 80 personnes, autour de présentations au format académique ou d'ateliers démonstratifs.

Les thèmes abordés, expérimentalement ou numériquement, sont très variés, allant de l'élaboration jusqu'à la réparation et le recyclage en passant par la caractérisation, (destructive ou non), la tenue en service, ... et adressent de nombreux secteurs d'activités : transport, énergie (stockage), éolien, spatial, ...

En accord avec les participants, l'organisateur d'une JST peut regrouper un ensemble d'articles présentés dans un numéro spécial et thématique de la Revue des Composites et Matériaux Avancés (Lavoisier).

Les prochaines JST planifiées auront pour thèmes Fatigue des structures composites et Contrôle non-destructif des matériaux composites. Voici un bilan de celles qui se sont tenues depuis fin 2013.

Assemblage des structures composites : technologies, comportement et tenue en service

Organisateur : C. Bois

Lieu : Bordeaux

Date : Nov. 2013

Thématiques traitées :

- l'analyse des phénomènes physiques pilotant le comportement des assemblages ;
- les dispositifs, essais et méthodes de caractérisation mécaniques ;
- les modèles de comportement matériaux et d'interfaces dédiés aux assemblages ;
- le calcul de structure pour les assemblages (de l'élément de structure à la superstructure) ;
- la tenue en service, la durabilité et la fiabilité des assemblages ;
- l'influence des variabilités matériaux et géométriques, des défauts de fabrication, et leurs conséquences sur l'industrialisation des solutions d'assemblage.

<http://www.amac-composites.org/manifestations/journees-scientifiques-et-techniques/assemblages-des-structures-composites-technologie>

Les communications de cette JST ont donné lieu à un numéro spécial de la Revue des Composites et Matériaux Avancés (Lavoisier) : Vol 24/4 – 2014, Assemblages des structures composites : technologies, comportement et tenue en service, sous la direction de Christophe Bois, Nicolas Carrère et Julien Jumel.

Dynamique et acoustique des structures composites

Organisateur : S. Fontaine

Lieu : Nevers

Date : Avr. 2014

Thématiques traitées :

- les comportements mécaniques non linéaires et instabilités ;
- les comportements sous chargements mixtes ;
- la fatigue ;
- l'impact ;
- les vibrations ;
- l'absorption et le rayonnement acoustique.

<http://www.amac-composites.org/manifestations/journees-scientifiques-et-techniques/dynamique-et-acoustique-des-structures-composites>

Transition statique/dynamique dans les matériaux et structures composites

Organisateur : J. Rannou

Lieu : Châtillon

Date : Nov. 2014

Thématiques traitées :

- la modélisation des défauts induits par des petits chocs ;
- la tenue résiduelle de structures impactées ;
- la tenue statique et dynamique des assemblages ;
- la prise en compte des effets de vitesse dans les modèles matériaux ;
- les techniques expérimentales de caractérisation ou d'identification des effets de vitesse et des effets dynamiques ;
- les aspects temporels des phénomènes d'endommagement ;
- la prise en compte des problématiques évoquées dans une démarche de dimensionnement ;
- la résolution implicite ou explicite des phénomènes de transition statique/dynamique.

<http://www.amac-composites.org/content/jst-transition-statique-%E2%80%93-dynamique-dans-les-mat%C3%A9riaux-et-structures-composites>

Les communications de cette JST ont donné lieu à un numéro spécial de la Revue des Composites et Matériaux Avancés (Lavoisier) : Vol 25/2 – 2015, Transition statique / dynamique dans les matériaux et structures composites, sous la direction de Johann Rannou, François -Xavier Irisarri, Frédéric Laurin et Julien Berthe.

Défauts dans les composites : origine, mesure, criticité et impacts sur les performances

Organisateur : J. Lamon

Lieu : Cachan

Date : Mar. 2015

Thématiques traitées :

- techniques de détection des défauts ;
- Contrôles Non Destructifs ;
- Emission Acoustique ;
- analyse statistique de la rupture ;
- mécanique des défauts ;
- rupture ;
- variabilité des propriétés.

<http://www.ens-cachan.fr/version-francaise/recherche/seminaires-et-colloques/defauts-dans-les-composites-origine-mesure-criticite-et-impacts-sur-les-performances-286172.kjsp>

Variabilité dans les composites

Organisateurs : F. Dau et L. Guillaumat

Lieu : Paris

Date : Avr. 2015

Thématiques traitées :

- les méthodes d'analyses (plutôt non destructives) pour établir la morphologie variabiliste des matériaux composites ;
- les méthodes de construction de modèles probabilistes adaptés aux variabilités micro-structurales induites par le couplage procédé/matériaux ;
- les méthodes d'homogénéisation en contexte probabiliste ;
- les approches mécano-fiabilistes ;
- les moyens de validation de niveaux de probabilités.

<http://www.amac-composites.org/content/jst-%C2%AB-variabilite-dans-les-composites-sources-consequences-representation-statistique-approc>

Usinage des matériaux bois & composites

Organisateur : G. Poulachon

Lieu : Cluny

Date : Oct. 2015

Thématiques traitées :

- le développement d'outils de coupe dédiés aux matériaux bois, composite CFRP et empilage multi-matériaux ;
- les méthodologies pour l'optimisation des paramètres opératoires ;
- les approches numériques traduisant la physique de la coupe de ces matériaux ;
- la qualification des défauts engendrés pendant la coupe (délamination inter-ply, délaminage fibre, carbonisation, fissuration...) ;
- l'usinage conventionnel et non-conventionnel ;
- la réparation des matériaux composites.

<http://www.amac-composites.org/content/jst-usinage-des-mat%C3%A9riaux-bois-et-composites>

Compression, instabilités et ruine dans la direction des fibres de matériaux et structures composites

Organisateur : N. Feld

Lieu : Magny-les-Hameaux Date : Oct. 2016

Thématiques traitées :

- la caractérisation et l'analyse micromécanique de l'apparition de plissements aux petites échelles jusqu'à instabilité ou ruine ;
- la mise en œuvre et l'étude critique de moyens expérimentaux permettant de caractériser le comportement dans la direction des fibres ;
- la modélisation des instabilités aux différentes échelles menant à la rupture en compression voire à une fragmentation dynamique ;
- la modélisation des procédés de mise en œuvre faisant apparaître le développement de méso ou macro-plissements, y compris sur préforme sèche ;
- la simulation numérique des instabilités micro ou méso-structurales et leur interaction avec d'autres mécanismes de ruine ;
- la simulation numérique de modèles macroscopiques intégrant la rupture en compression ;
- la prise en compte des effets dynamiques, thermiques, de fluage, de fatigue et d'environnement ;
- les applications industrielles de tels développements.

<http://www.amac-composites.org/content/jst-compression-instabilit%C3%A9s-et-ruine>

Mise en œuvre des composites à matrice thermoplastique

Organisateurs : O. De Almeida et Ph. Olivier

Lieu : Toulouse

Date : Jan. 2017

Thématiques traitées :

- la caractérisation et la modélisation de la cinétique des phénomènes physico-chimiques ;
- la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques gouvernant la mise en œuvre de ces matériaux ;
- la modélisation des procédés de mise en œuvre ;
- les innovations matériaux et leur incidence sur la processabilité des composites
- les innovations procédés ;
- l'influence de la mise en œuvre sur les propriétés des composites à matrice thermoplastique.

<http://jst-comp-tp.mines-albi.fr/>

Les communications de cette JST donneront lieu à un numéro spécial de la Revue des Composites et Matériaux Avancés (Lavoisier) concernant la mise en œuvre des composites à matrice thermoplastique. Ce numéro est en cours de rédaction. ■

Compte-rendu du colloque DynEcoComp

par Fabienne TOUCHARD (Pprime) fabienne.touchard@ensma.fr

Le Workshop International DynEcoComp « *Dynamic behaviour of green composites* » s'est déroulé à l'ISAE-ENSMA (Poitiers, France), du 27 au 29 septembre 2016. Ce colloque était parrainé par l'Association des MATériaux Composites (AMAC), l'association de Mécanique des Matériaux (MécaMat), et le GDR ACO-CHOCOLAS (Matériaux sous hautes vitesses de déformation). Il était soutenu par le CNRS (PICS n° 6366) et la Région Nouvelle-Aquitaine. Il a rassemblé 45 participants, issus des milieux académiques et industriels, de différents pays (Italie, Pologne, Algérie, Maroc, France).

Le programme était composé de conférences invitées données par Groupe PSA, le CNES, AIRBUS Group Innovations, l'Université de Gdansk (Pologne), les Universités de Rome et de Camerino (Italie), et de 23 autres présentations (orales et par poster). Différents types de sollicitations dynamiques ont été présentées, couvrant une large gamme de vitesses d'essais : tour de chute, barres d'Hopkinson, choc laser, fatigue cyclique, vibrations. Le comportement des éco-composites à l'impact et en post-impact a été débattu. L'influence de nombreux paramètres a été démontrée, tels que la nature des fibres utilisées, le taux d'humidité, la température, etc. L'avenir prometteur des composites hybrides et des bio-polymères a également été souligné. Les méthodes de contrôle des endommagements ont ensuite été discutées, en particulier la méthode des ultra-sons, du TéraHertz et la vibrométrie laser. La problématique de la modélisation des chocs dans ces matériaux a aussi été abordée.



Colloque DynEcoComp, ISA-ENSMA, septembre 2016.

Enfin, différentes applications industrielles ont été présentées, avec des pièces déjà présentes dans l'automobile (conférence de Groupe PSA) et des opportunités dans le domaine de l'Espace (conférence du CNES).

Au final, des discussions nombreuses et fructueuses ont pu se développer entre les participants, avec même parfois des perspectives de nouvelles collaborations à mettre en place. Dans la continuité de cette première édition, il est envisagé d'organiser un « DynEcoComp 2 », dans deux ans, en Italie ou en Pologne... Le comité d'organisation de « DynEcoComp 1 » vous invite donc d'ores et déjà à participer à cette future édition.

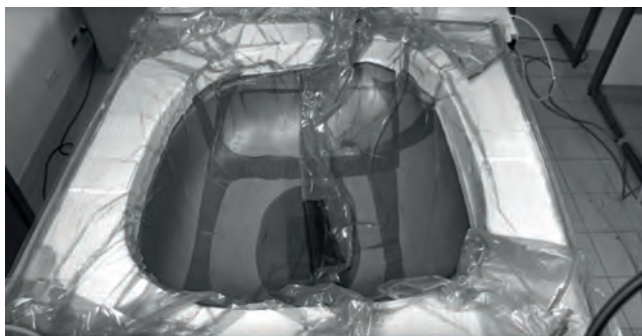
Le comité d'organisation, Fabienne Touchard, Laurence Chocinski, Michel Boustie, Karine Lombard, Gérald Saily

UNIT : des ressources en ligne pour l'enseignement des composites

par **Federica DAGHIA (LMT)** federica.daghia@ens-paris-saclay.fr
et **Emmanuel BARANGER (LMT)** emmanuel.baranger@ens-paris-saclay.fr

Malgré leur essor important durant les dernières décennies, les matériaux composites représentent un volume de production relativement faible par rapport aux matériaux métalliques. Les programmes des formations scientifiques et techniques françaises font donc la part belle à ces matériaux. Pour ce qui est des composites, quelques parcours spécifiques existent (DUT SGM, BTS composites, Licences professionnelles ...) ainsi que des interventions ponctuelles dans des formations plus généralistes. Les formateurs dans le domaine des composites doivent donc souvent aller chercher leurs ressources techniques dans des activités en partenariat avec les entreprises du domaine, en particulier en ce qui concerne la mise en œuvre et la conception. Ceci peut être un point dur, notamment pour un nouvel enseignant.

De ce constat est né le projet UNIT «Ressources pour l'enseignement des composites», porté par l'AMAC et l'École Normale Supérieure Paris-Saclay (ENS-Cachan) sous l'impulsion d'Yves Rémond. Le projet, mené entre 2015 et 2016, a eu pour objectif d'apporter les ressources nécessaires aux enseignants pour mettre en place des séquences pédagogiques adaptées et en adéquation avec l'état de l'art scientifique et industriel. Le résultat est le site web <http://enseignement.amac-composites.org>, en ligne depuis quelques mois. Celui-ci regroupe des contenus assez variés : des cahiers des charges industriels et cas d'études jusqu'aux exemples de réalisations (voir photo). La littérature sur les composites étant très vaste, l'objectif n'a pas été de refaire l'existant, mais plutôt de donner des compléments et des grilles de lecture, y compris les astuces et les erreurs à éviter.



Infusion d'un capot d'éolienne en composite verre/époxy réalisée à l'IUT d'Evry dans le cadre du projet UNIT

Le site est actuellement maintenu par l'AMAC, mais son contenu a vocation à évoluer avec des contributions et/ou corrections des utilisateurs. De nombreux types de ressources (présentations, PDF, vidéos, feuilles de calcul...) peuvent être facilement intégrés dans le site, qui inclut un moteur de recherche sur tous les types de contenu. Seule contrainte : les ressources mises à disposition dans le site, ainsi que le site lui-même, sont soumis à une licence libre *Cecill2* ou *Wikimedia Commons*. N'hésitez pas à aller regarder et à nous contacter !



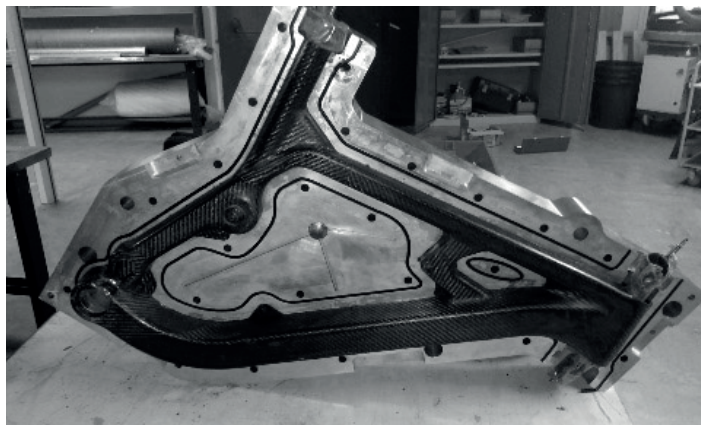
Plateforme Composite
Marseille

Plateforme Composite Marseille

par **Christian HOCHARD (LMA)** hochard@lma.cnrs-mrs.fr
pf-composite@lma.cnrs-mrs.fr

La Plateforme Composite Marseille est en mesure de fournir des services et des installations pour concevoir, dimensionner, fabriquer et tester des structures composites stratifiées avec des résines thermodurcissables et thermoplastiques à haute température et pression (450°C et 20 bars). Les activités qui y sont menées concernent trois objectifs principaux.

1. Appui aux projets collaboratifs innovants avec des partenaires industriels ou des laboratoires de recherche, sur la base des activités de recherche développées au sein de l'équipe Matériaux et Structures du LMA dans le domaine des composites stratifiés.
2. Soutien aux PME innovantes pour la réalisation de prototypes avec différents processus de fabrication, la conception et le dimensionnement de pièces composites, en partenariat avec le Team Henri Fabre (<http://www.projet-henri-fabre.com/>).

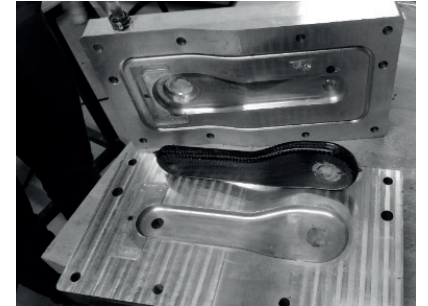
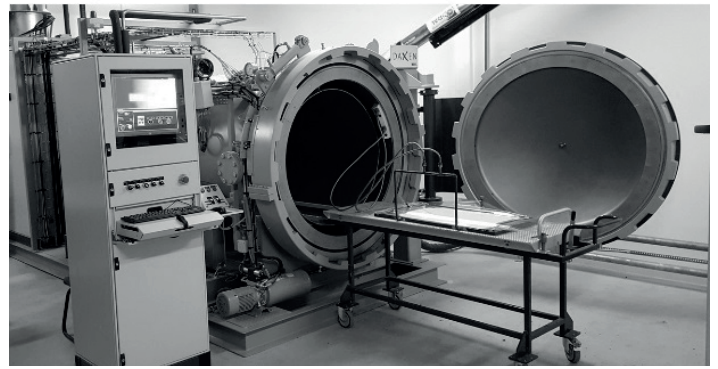


3. Appui à des formations pour des ingénieurs en mécanique et des techniciens des procédés dans le domaine des composites dispensés au travers d'un Master Génie Mécanique et d'une Licence Professionnelle au Département de Mécanique de l'Université d'Aix Marseille.

Vous pouvez nous suivre sur le site Web

(<http://pf-composite.lma.cnrs-mrs.fr/>),

Twitter ou Facebook!



VIE DES LABORATOIRES



Institut Clément Ader (ICA, UMR CNRS 5312)

Groupe Matériaux et Structures Composites (MSC)

par Bruno CASTANIE bruno.castanie@insa-toulouse.fr

Matériaux et Procédés

Compréhension et modélisation de phénomènes thermocinétiques et thermomécaniques dans les procédés de mise en œuvre

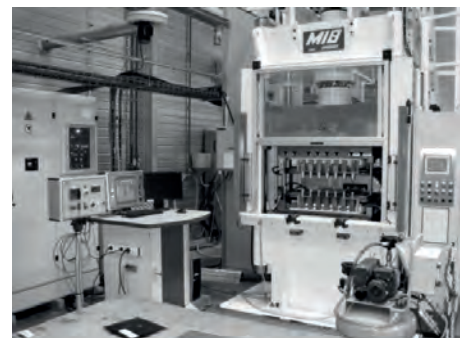
Les activités de recherche sur les Matériaux et les Procédés portent sur la caractérisation et la modélisation :

- des cinétiques de polymérisation des matrices organiques (thermodurcissables et thermoplastiques) et inorganiques ;
- des cinétiques de dégradation thermomécanique des matrices, des renforts et de l'interface fibre-matrice (ensimage), ainsi que leurs impacts sur les propriétés des matériaux ;
- la cristallisation des polymères thermoplastiques (morphologie et cinétique) et l'influence des renforts et charges sur la cristallisation.

Ces travaux de recherche ont pour but d'améliorer la compréhension des phénomènes physico-chimiques gouvernant la mise en œuvre des composites afin d'optimiser les conditions de polymérisation/cristallisation des matrices lors de la fabrication et de la mise en œuvre des pré-imprégnés et des composites. Ces travaux se focalisent essentiellement sur les matrices aéronautiques hautes performances, telles que les résines époxy de classe 180 ou les matrices thermostables PEEK et PPS.

Etude et modélisation des écoulements de résine dans les renforts fibreux

Les travaux menés sur le thème des écoulements de résine dans les renforts fibreux portent sur la modélisation de l'écoulement de résine dans les procédés de moulage des composites par voie liquide et la caractérisation des paramètres matériaux liés à la perméabilité et la compressibilité des renforts tissés. La variabilité des renforts et leur effet sur la perméabilité des renforts sont parmi les problématiques principales traitées d'un point de vue expérimental et numérique.



**Procédé « Roctool »
chauffage de moule par induction**

Les écoulements de résines sont étudiés dans diverses configurations comme les préformes tissées, tricotées ou mat, et matrices organiques/inorganiques therm durcissables et thermoplastiques. Ces travaux visent généralement à prédire le temps de remplissage des moules et/ou la cinétique du front de résine, et à les optimiser en fonction des cycles de polymérisation des résines.

Analyse multiphysique et fonctionnalisation des matériaux composites

Afin de proposer des modèles numériques fiables, des bancs de mesure ont été développés/adaptés pour permettre l'identification par analyse inverse de la conductivité thermique anisotrope des matériaux composites. Ces travaux, menés en collaboration avec le groupe MICS de l'ICA, sont basés sur des approches originales de mesures sans contact par thermographie infrarouge. L'autre volet relatif aux propriétés thermiques et électriques concerne la préparation et la caractérisation de matrices fonctionnalisées en vue d'améliorer les propriétés des composites. Ces travaux répondent aux besoins de l'industrie aéronautique quant aux problématiques de conductivité, et les matrices therm durcissables et thermoplastiques fonctionnalisées par des particules nanométriques sont donc l'essentiel des matrices étudiées. Sur le volet thermique, on peut noter aussi le développement d'un matériau composite hybride constitué d'une matrice polymère chargée de micro et nanoparticules et renforcée par des fibres longues de carbone PITCH avec comme objectif une conductivité thermique importante. Sur le volet électrique, un autre exemple concerne la conception d'un composite matrice thermoplastique PEEK / fibres de carbone longues / nanotubes de carbone sans employer d'agents compatibilisants. L'objectif était de produire un stratifié PEEK/fibres de carbone avec des propriétés électriques suivant son épaisseur, améliorées par l'incorporation de NTC.

Plus généralement, ces efforts s'inscrivent dans le cadre de la fonctionnalisation des matériaux à l'aide d'une phase à l'échelle nano, notamment via des forêts de nanotubes de carbone alignés et ce, pour une amélioration de la tenue à l'impact, ou de la conductivité thermique ou électrique dans l'épaisseur des composites. Les travaux en cours portent sur l'intégration de tapis de nanotubes (dont la croissance est effectuée, soit sur un substrat, soit directement sur des tissus carbone) soit par voie liquide, soit par voie pré-imprégnés. Les travaux de recherche consistent ensuite à caractériser les propriétés de mise en œuvre, la microstructure et les différentes échelles d'interface, ainsi que la caractérisation des propriétés mécaniques du composite sur un spectre large de sollicitation (statique et dynamique).

La modélisation des transferts thermiques et électriques dans les matrices fonctionnalisées nécessite le recours à de la modélisation à l'échelle microscopique. Ces travaux ont pour but d'améliorer la compréhension des effets taille, dispersion, orientation en vue

d'optimiser les morphologies des composites et afin d'alimenter les approches homogénéisées.

Dans les procédés utilisant des sources radiatives (émetteurs infrarouges), la prédiction des champs thermiques nécessite le développement de modèles numériques avancés prenant en compte les échanges de chaleur par rayonnement. Les travaux de recherche menés ont ainsi conduit au développement de modélisations des transferts radiatifs par des approches de lancer de rayons. Initialement développées pour les applications packaging, elles ont été progressivement améliorées et adaptées aux applications composites (cuisson des systèmes époxy et chauffage des préformes dans le procédé d'estampage).

Procédés et structures

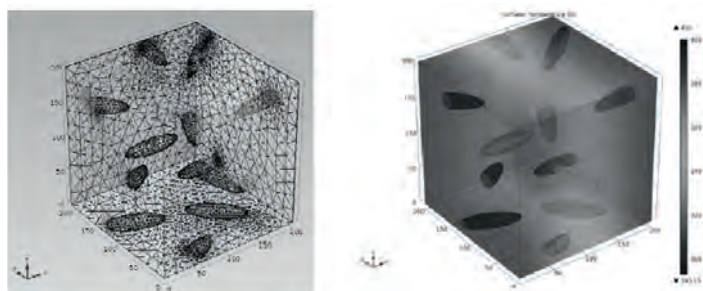
Compréhension et modélisation des diverses sources de variabilité des matériaux composites au sein de structures composites

Diverses sources de variabilité de matériaux composites au sein de structures composites sont en particulier analysées sous l'angle de la mesure des variations spatiales de grandeurs « topologiques » et de grandeurs matériaux, telles que variations spatiales d'épaisseurs de plis, d'orientations de torons ou variation spatiale des taux volumiques, pendant et après le procédé de fabrication. Une modélisation mathématique de ces variations spatiales est proposée à partir d'études statistiques des différents paramètres pilotant ces lois mathématiques. Trois exemples d'applicatifs associés à ces développements peuvent être cités :

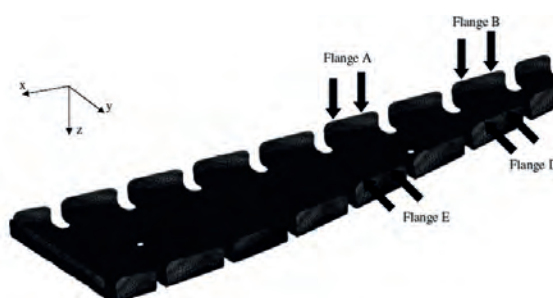
1. prédiction de déformations résiduelles de cuisson d'une plaque stratifiée générées par des variabilités « topologiques » ;
2. prédiction de la dispersion des raideurs d'une poutre composite en flexion 3 points ;
3. prédiction des variabilités de localisation de zones de défaillance d'une plaque stratifiée sous sollicitations représentatives (évaluateurs technologiques).

Compréhension et modélisation des défauts de formes générés lors de l'élaboration de structures composites

Lors de l'élaboration de structures composites stratifiées, de nombreux phénomènes physico-chimiques et thermomécaniques sont à l'œuvre et produisent des déformations non souhaitées des pièces réalisées. Des modélisations thermochimiques du processus de polymérisation ont été effectuées permettant entre autre de prédire les « overshots » lors de la polymérisation d'une résine therm durcissable d'un composite épais. Sur un autre plan, un modèle semi-empirique thermomécanique de calcul du spring-back a été développé et appliqué récemment à une pièce de grande dimension de type RIB A350. Dans le cadre du CORAC, ces deux études sont utilisées pour la prédiction du spring-back de raidisseurs collés.



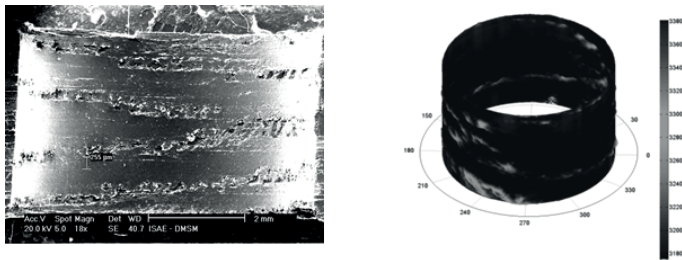
Modélisation de la conductivité thermique dans un matériau composite dopé



Calcul du spring-back sur un RIB A350

Analyse des liens paramètres de fabrication ou usinage/tenu mécanique

Dans le cadre de l'usinage des matériaux composites, le problème majeur qui se pose aujourd'hui est le choix de critères de qualification des surfaces usinées. Avec les critères industriels imposés aujourd'hui (par exemple: la rugosité moyenne R_a , R_p , etc.), on ne peut affirmer s'ils sont généraux ou attachés à une famille de matériaux composites, un type de procédé d'usinage et/ou une famille d'essais mécaniques. Dans ce cadre, nous nous intéressons à l'influence de la micro structure (telle que la présence de nodules thermoplastiques entre les plis) et des conditions d'élaboration et de cuisson des matériaux composites sur la qualité d'usinage, et en particulier les défauts de surface et l'étendue du délaminage en sortie du trou lors de l'usinage (perçage et fraisage). De plus, l'influence des procédés d'enlèvement de matière (perçage ou détourage) sur les défauts générés et sur la tenue mécanique en statique ou en fatigue des structures usinées est étudiée. Des nouveaux indicateurs de qualité d'usinage telle que la surface portante par exemple sont proposés et les liens avec les tenues mécaniques établis.

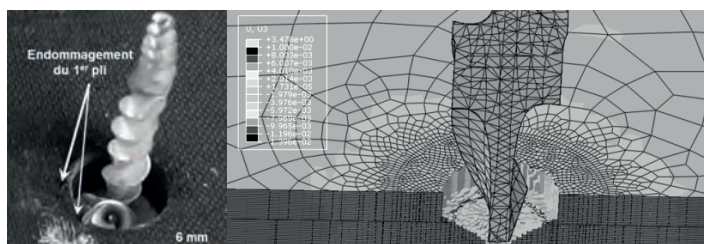


Analyse de la qualité d'un perçage

Analyse de l'usinage des structures composites

Le caractère anisotrope et hautement abrasif des renforts associés à l'hétérogénéité des structures composites rendent leur usinabilité délicate. De plus, pour des raisons économiques, le perçage one-shot des matériaux hybrides (composite/aluminium, composite/titane...) est une opération d'usinage très complexe qui conduit à l'apparition de dommages de natures différentes. De ce fait, les études menées au sein de l'ICA dans le cadre de l'usinage de matériaux composites et de multi-matériaux, portent en grande partie sur :

- la compréhension des mécanismes de création de surface en fonction des procédés d'enlèvement de matière (coupe orthogonale, perçage par «foret, trépan et orbital» et jet d'eau abrasif haute pression) ;
- la mesure in situ de la température du perçage par une instrumentation à cœur des outils de coupe par des fibres optiques à réseaux de Bragg ;
- la fonctionnalité des surfaces usinées afin d'améliorer la durée de vie des structures boulonnées ;
- la modélisation analytique et numérique des conditions d'apparition du délaminage en sortie du trou (foret et trépan) avec prise en compte de phénomènes thermomécaniques.
- la modélisation multi-échelles à l'aide des stratégies de modélisations développées dans l'équipe et en collaboration avec le groupe MS2M des mécanismes d'enlèvement de matière et des défauts induits.



Analyse de la formation du copeau (à gauche) lors d'un perçage multi-matériau CFRP/Ti (simulation à droite)

Structures et Stratégies de modélisation

Procédé d'injection fibres courtes

Il s'agit du développement et de la validation de solutions « sur étagère » de matériaux polymères injectés avec leurs propriétés induites par le procédé d'injection. Une loi de comportement avec endommagement est proposée en prenant en compte les paramètres microstructuraux liés au procédé et qui soit « implémentable » dans un code de calcul éléments finis industriel. Ses applications sont dédiées au dimensionnement des pièces composites injectées avec des matrices thermoplastiques PEEK renforcées de fibres courtes de carbone comme par exemple le calcul d'une charnière de porte d'hélicoptère.

Depuis 20 ans, des travaux sont menés dans le domaine de l'injection thermoplastique pour différents types de résine comme l'Ultem®, le polyamide et le polypropylène. Depuis 8 ans, l'ICA travaille sur l'injection de la résine PEEK chargée de fibres de carbone dans le cadre de projets industriels et/ou de thèses. Des pièces issues de ces projets sont d'ores et déjà en service.

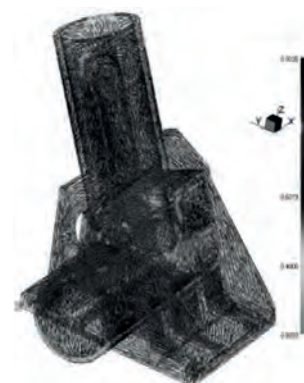
En prolongement de ces études, des travaux sont en cours concernant le recyclage des fibres de carbone pour les remettre en œuvre sous diverses formes (mats, granulés fibres courtes) au sein de matrices thermoplastiques. Ils participent à la mise en place de la filière industrielle du recyclage de la Région Occitanie.

Stratégies de modélisations

Depuis une vingtaine d'années, les enseignants chercheurs de l'ICA se sont fait une spécialité du développement de stratégies de modélisations des endommagements et scénarios de ruptures des structures composites. Trois principales stratégies ont été développées.

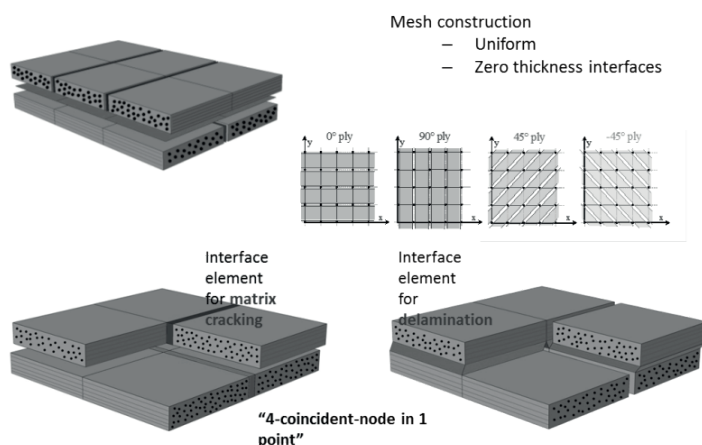
La première est la DDM (pour Diffuse Damage Model). Elle combine des lois d'endommagements de type mécanique des milieux continus avec des zones cohésives. De par la nature générale des lois implémentables, elle peut être appliquée à de nombreux matériaux et problématiques classiques comme l'impact par exemple. Récemment elle est utilisée dans le cadre du dimensionnement des jonctions dans les CFRP ou dans les SiC-SiC. Elle s'avère aussi intéressante dans les problématiques de matage.

La seconde est la DPM (pour Discrete Ply Model). Elle repose sur un maillage qui suit les orientations des UD, sur des zones cohésives, sur une rupture fragile en fissuration matricielle pilotée par les éléments volumiques adjacents et sur une rupture de fibre prenant en compte les taux de restitutions d'énergie. Elle présente l'avantage de ne reposer que sur 13 caractéristiques matériaux classiques. Elle a été appliquée avec succès aux problématiques d'impact sur stratifié ou de crash (impacts basse vitesse/basse énergie, impact sur champ ou sur zone de reprise de pli, calcul de l'indentation résiduelle) ou encore d'arrachement de fixation. Développée initialement pour les problématiques hors plan, le



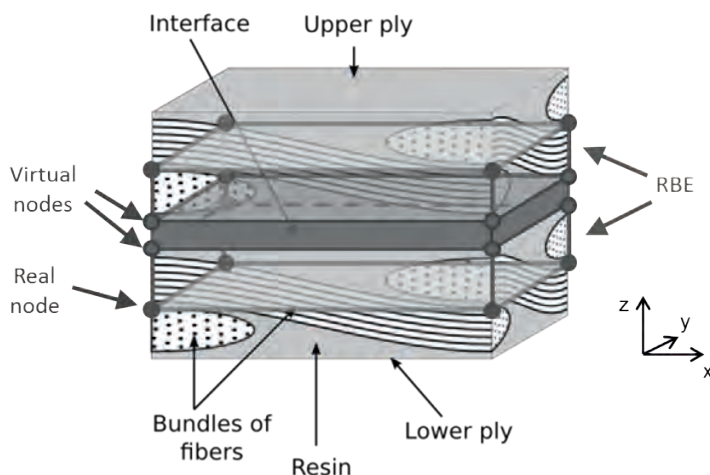
Simulation de l'injection de fibres courtes dans une pièce complexe (ferrure aéronautique)

caractère discret de la modélisation s'avère pertinent pour modéliser le splitting et permet ainsi de traiter des problématiques telles que la rupture trouée, les effets d'échelles ou les grandes coupures sous sollicitations complexes.



Modélisation « DPM »

La troisième consiste en des modélisations semi-continues utilisées dans les problématiques d'impacts frontaux ou rasants sur pales d'hélicoptères. Des barres sont utilisées pour modéliser les fibres et des volumes (pour le longeron en UD massif verre/époxy) ou des plaques (pour les revêtements en tissus) pour modéliser la résine. Des éléments spécifiques sont développés pour retrouver les caractéristiques statiques d'une part et pour modéliser les endommagements observés à l'échelle des torons. Des éléments cohésifs spécifiques ont récemment été développés ainsi que des approches permettant de retrouver la rigidité de flexion d'un pli de tissu en prenant en compte la géométrie réelle du tissage. Ces modèles ont atteint un grand niveau de confiance et sont validés à des fins de certification aujourd'hui.



Modélisation semi continue

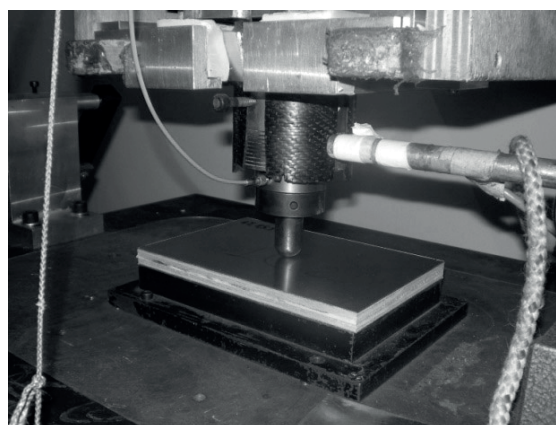
D'une manière générale ces stratégies de modélisations ainsi que d'autres plus spécifiques ont été développées et utilisées pour répondre à de nombreuses problématiques applicatives qui

couvrent tout le champ des structures composites :

- impact et tenue résiduelle après impact, tolérance aux dommages, grandes coupures, blindages ;
- crash : modélisation, mécanismes d'absorption d'énergie ;
- fatigue ;
- structures sandwichs : analyse non linéaire, impact, inserts, modélisations des âmes mousse ou nid d'abeille ;
- assemblages, Z-pinning, stitching ;
- détails structuraux : dépliages, décollement de raidisseur, post-flambement ;
- réparations : développement de modèles simplifiés permettant un gain d'un ordre de grandeur en temps de calcul adaptés à la problématique particulière de réparation collée de grande dimension par une géométrie d'interface en marches d'escaliers ;
- optimisation des structures composites.

Eco-Structures base bois

Une thématique émergente dans le groupe est l'étude de nouvelles structures à base bois. Elle s'appuie sur l'expérience dans ce domaine des EC de Tarbes avec entre autre récemment des études sur la fonctionnalisation des surfaces à des fins de collage ou esthétiques. Des sandwichs avec des âmes en contreplaqué bouleau/peuplier/okoumé et des peaux en aluminium, fibre de verre, lin ou carbone ont été étudiés expérimentalement et numériquement sous les aspects fabrication, tenue statique, impact et compression après impact. Ces structures ont démontré des caractéristiques spécifiques et économiques très intéressantes et les études vont maintenant se concentrer sur les problématiques d'assemblage et de crash.



Impact sur structures bois/carbone

Méthodes expérimentales

Sollicitations multiaxiales

L'institut dispose d'un bâti d'essai modulaire multiaxial en support d'une approche d'étude des structures composites par Evaluateurs Technologiques Multi-Instrumentés. Il s'agit d'un quadri-pode permettant d'appliquer à l'évaluateur un torseur d'efforts (6 composantes de chargement) sur une éprouvette dont les dimensions sont typiquement de l'ordre de 600 mm par 450 mm pour

une épaisseur pouvant atteindre 15 mm. Cet outil est utilisé par exemple pour l'évaluation expérimentale de la tenue sous sollicitation statique complexe d'une réparation step-lap elliptique de 16 marches. Une ANR ASTRID intitulée BLAST est en cours pour étendre le concept d'évaluateur technologique aux situations de vulnérabilité au souffle de fuselages composites et pour l'analyse de la tenue de surprotection de planchers de blindés légers avec la prise en compte des conditions de fabrication.

Dans le cadre de l'ANR VERTEX dont l'ICA est coordinateur, un banc d'essai permettant de reproduire les sollicitations (tractions, compression, cisaillement et pression interne) et les conditions aux limites des structures composites aéronautiques a été développé ; Les sollicitations sont plusieurs milliers de N/mm pour une pression de 1.6 bars avec une zone d'intérêt de 400x400 mm². Une méthodologie de mesure spécifique a été développée en collaboration avec le groupe MICS de l'ICA. Une grappe de 6 caméras permettant des mesures champ proche et champ lointain est utilisée couplée à une méthode dite FE-DIC. La régularisation du champ de mesure optique par éléments finis permet un dialogue essais/calcul amélioré par l'exportation directe de déplacements nodaux (translations et/ou rotations) vers les modèles éléments finis.



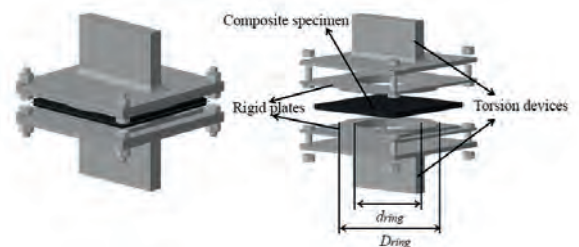
Banc d'essai « VERTEX »

Méthodes de mesures et essais spécifiques

Dans le cadre des Projets Initiatives d'excellence IDEX UNITI « Actions Thématiques Stratégiques » (ATS), le projet WAALS pour « Wide Analysis of interActions between poLymer chain links and Structural loads » porte sur l'interrogation à cœur d'un adhésif placé entre deux substrats en matériau composite, matrice époxy et fibres longues de carbone. WAALS est piloté par l'ICA. Il s'agit de détecter la présence de zones altérées au sein d'un adhésif exempt de défauts détectables par les techniques CND et dont les interfaces sont fonctionnalisées grâce à des plasmas basse pression. Une première famille de marqueurs est choisie pour être vue par RX au sein de l'adhésif. Une seconde famille est utilisée pour introduire des échauffements locaux par induction magnétique à des fins de sollicitation localisée. Un modèle numérique de référence permet une comparaison avec les mesures liées aux déplacements des particules vues par RX associés aux zones altérées dans l'adhésif. Il est établi qu'il est possible de détecter le périmètre d'une zone d'affaiblissement mécanique et son abattement par rapport à une valeur de référence.

D'autres travaux portent sur la continuité de l'information tout au long du cycle de vie des structures composites et ceci à différentes échelles. L'instrumentation des structures et, quand cela est possible, de leurs outillages et moyens de production est réalisée pour connaître l'influence des différents paramètres procédés et matériaux et les variabilités associées. L'instrumentation à cœur par fibre optique à réseaux de Bragg a permis l'étude des contraintes résiduelles de cuisson en zone courante ou singulière de pièces composites et l'étude des interactions pièce-outillage au travers de plusieurs travaux de thèse pour différents procédés de fabrication (autoclave, enroulement filamentaire ...) et d'usinage (perçage).

Une méthode d'analyse par thermographie infrarouge a été développée et permet la mesure entre autre des taux de restitution d'énergie en compression des plis carbone. Cette méthode a été brevetée et fait l'objet d'une action de dissémination via TTT (Toulouse Tech Transfert).



Edge Ring Crack Torsion test (ERCT)

De nombreux essais ont été développés au cours des différents travaux de recherche récents. On notera le développement de méthode de propagation de délaminage en mode I et II sous fatigue gigacycliques. Ils sont basés sur la résonance structurale de l'éprouvette et permettent des fréquences jusqu'à 400 Hz. Une méthode originale de mesure en mode III (Edge Ring Crack Torsion test (ERCT)) est proposée et a été étendue à l'étude des modes mixtes I+II+III.

Dans le cas des réparations en escalier des structures composites primaires carbone/époxy par collage structural, les conditions d'utilisation de la technique par Thermographie InfraRouge (TIR) ont été évaluées. Cette situation n'est pas habituelle compte tenu du caractère tenu de la différence du comportement thermique entre les parties constitutives de la zone d'assemblage (partie parent et patch en carbone-époxy, adhésif époxy) et constitue le frein majeur pour capter la réponse thermique du joint collé. Dans un cadre collaboratif avec le LGP de l'ENI de Tarbes, une procédure expérimentale originale a été mise au point, permettant une modélisation numérique, physiquement cohérente du problème thermique, et démontrant une bonne concordance entre les champs de température mesurés et calculés. Ces travaux proposent et ouvrent des pistes visant à modifier les propriétés thermiques intrinsèques du joint à l'aide d'additifs dont la signature infrarouge permet d'identifier plus nettement la zone de collage en escalier et ses défauts géométriques.

ICA : philippe.olivier@iut-tlse3.fr

Groupe MSC : bruno.castanie@insa-toulouse.fr

Site web ICA : <http://www.institut-clement-ader.org/>

Conférences organisées ou parrainées par l'AMAC

- **JNC 20** Champs-sur-Marne, 28-30 juin 2017
20^e Journées Nationales sur les Composites
Contact : <https://jnc20.sciencesconf.org/> et site Internet de l'AMAC

Autres conférences

- **CompTest 2017** Louvain, Belgique, 5-7 avril 2017
Contact : <http://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/comptest2017>
- **JMDC 2017** Besançon, France, 2 juin 2017
Journée AFM-AMAC-AUGC-MécaMat « Mesure de champs en dynamique des structures »
Contact : <http://events.femto-st.fr/JMDC2017/fr>
- **MechComp 2017** Bologne, Italie, 4-7 juillet 2017
3rd International Conference on Mechanics of Composites
Contact : <https://events.unibo.it/mechcomp3>
- **ICCE 25** Rome, Italie, 16-22 juillet 2017
25th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering
Contact : <http://www.icce-nano.org/>
- **ICCM21** Xi'an, Chine, 20-25 août 2017
21st International Conference on Composite Materials
Contact : <http://www.iccm21.org/>
- **ICCS 20** Paris, France, 4-7 septembre 2017
20th International Conference on Composite Structures
Contact : <https://events.unibo.it/iccs20>
- **Composites 2017** Eindhoven, Pays-Bas, 20-22 septembre 2017
6th ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites
Contact : <https://www.tue.nl/en/university/departments/mechanical-engineering/research/research-groups/mechanics-of-materials/research/6th-eccomas-thematic-conference-on-the-mechanical-response-of-composites/>
- **EcoMatériaux 2017** Alès, France, 18-20 octobre 2017
Séminaire du GT EcoMatériaux AMAC-MécaMat « Comportement en service des éco-matériaux »
Contact : stephane.corn@mines-ales.fr
- **SAMPE 17** Stuttgart, Allemagne, 14-16 novembre 2017
SAMPE Europe 2017 Conference
Contact : <http://www.sampe-europe.org/news/2016/call-for-papers-conference-17-stuttgart>
- **Matériaux 2018** Strasbourg, 19-23 novembre 2018
Contact : <http://www.ffmatériaux.org/>

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

Rédaction AMAC Infos

Envoyez vos annonces à publier dans AMAC Infos à l'éditeur :

Nicolas FELD, Safran Tech/M&S – nicolas.feld@safrangroup.com
Etablissement Safran Paris Saclay, rue des Jeunes Bois - Châteaufort, 78114
Magny-les-Hameaux

