AMAC Infos

La gazette annuelle de l'AMAC

Dans ce numéro

P1 : Simulation de l'émission acoustique ...
P5 : Suivi d'essais structuraux ...
P10 : Vie de l'association
P20 : Vie des laboratoires
P28 : Agend'AMAC



Edito

Dans ce nouveau numéro d'AMAC Infos, les techniques expérimentales sont à l'honneur. Dans deux courts articles originaux, Aurélien Doitrand et Joël Serra vous présentent leur point de vue sur l'application et la modélisation innovantes de techniques aujourd'hui devenues essentielles telles que l'émission acoustique et la corrélation d'images numériques.

> N° 39



Simulation de l'émission acoustique due à la fissuration transverse d'un stratifié époxy-carbone

par A. Doitrand¹, Z. Hamam¹, N. Godin¹, P. Reynaud¹, N. Carrère²

1 : Univ. Lyon, INSA-Lyon, UCBL, CNRS UMR5510, MATEIS, F-69621, France

2 : IRDL, CNRS UMR6027, 29200 Brest

L'émission acoustique (EA) est une méthode de caractérisation non-destructive qui permet de suivre, à l'aide de capteurs piézo-électriques, l'occurrence d'évènements menant à une propagation d'onde acoustique dans un matériau ou une structure, tels que la fissuration. Cette technique expérimentale est maintenant bien établie dans le domaine des matériaux composites pour le suivi de l'endommagement [1]. notamment via des approches de classification des signaux enregistrés en fonction caractéristiques de leurs temporelles et fréquentielles. Toutefois, il existe peu de travaux concernant la validation de ces approches de classification. Il n'est en réalité pas aisé d'établir un lien univoque entre les signaux acoustiques enregistrés par les capteurs et les mécanismes d'endommagement correspondant. En effet, les signaux acquis par les capteurs dépendent non seulement du mécanisme d'endommagement, source de l'EA, mais aussi du milieu de propagation, du type de capteur et des paramètres de la chaîne d'acquisition. [2, 3]. Certains résultats expérimentaux suggèrent par exemple que le contenu fréquentiel des signaux correspondant à un même mécanisme de fissuration transverse dans un composite stratifiés dépend de la position du pli fissuré dans le composite [4, 5].

La simulation numérique de l'EA semble être une voie prometteuse pour une meilleure compréhension du entre lien les endommagements sources et les signaux acquis par les capteurs [6,7]. Celle-ci permet de reproduire la propagation d'onde dans le matériau à partir de la source d'EA, de prendre en compte l'influence du capteur et des paramètres d'acquisition de la chaîne d'EA [8-10]. Une approche de simulation par éléments

1



Figure 1 : Modèle EF 3D du stratifié [90n/0n/90n]. Exemple de champs de vitesse en surface de l'éprouvette. Comparaison du barycentre fréquentiel des signaux obtenus avec un capteur micro80 numériquement et expérimentalement en fonction de la distance entre la fissuration transverse et le capteur.

finis (EF) de l'EA dans des composites stratifiés [0n/90n/0n] ou [90n/0n/90n] (n=1 ou 3) à fibres de carbone et matrice époxy sollicités en traction а été mise en place pour évaluer numériquement l'influence de l'épaisseur des plis et de la position d'une fissuration transverse sur les signaux acoustiques acquis. Un modèle EF 3D de la moitié ([90n/0n/90n]) ou d'un quart ([0n/90n/0n]) du composite stratifié est mis en place (Figure 1). Chaque pli est modélisé comme un matériau homogène isotrope transverse avec des paramètres de Rayleigh déterminés par une étape préliminaire de calibration de l'atténuation des signaux dans le

matériau. La fissuration transverse est simulée par un dédoublement des nœuds du maillage dans un pli orienté à 90 deg. de la direction de traction. Les signaux acoustiques sont obtenus numériquement à partir de la vitesse hors-plan des nœuds situés à la surface de l'éprouvette (Figure 1), ce qui permet le calcul des descripteurs temporels et fréquentiels des signaux. Un exemple de variation du barycentre fréquentiel en fonction de la distance entre la fissure transverse et le capteur (micro80, Mistras Group, Princeton, NJ, USA) est illustré en Figure 1.

Le modèle mis en place permet de mettre en



FIGURE 2 : SIGNAUX ACOUSTIQUE EN FONCTION DU TEMPS OBTENU AVEC UN CAPTEUR PONCTUEL À L'ÉPICENTRE DE LA FISSURATION TRANSVERSE POUR DEUX ÉPAISSEURS DE PLIS D'UN STRATIFIÉ A) [0N/90N/0N] OU B) [90N/0N/90N].

évidence l'influence de la séquence et de l'épaisseur des plis sur les signaux acoustiques obtenus, par exemple à l'épicentre de la fissuration transverse (Figure 2). Les signaux obtenus montrent des différences notables entre la fissuration des plis internes et externes, à la fois en termes d'amplitude et de contenu fréquentiel. L'épaisseur des plis a une influence marquée sur le signal issu de la fissuration d'un pli interne mais donne des signaux similaires dans le cas d'une fissuration d'un pli externe.

La variation du barycentre fréquentiel en fonction de la distance entre la fissure et le capteur (Figure 3) confirme un contenu plutôt orienté vers les basses fréquences pour la fissuration des plis externes et relativement peu influencé par l'épaisseur des plis. L'influence de l'épaisseur des plis dans le cas d'une fissuration interne est observée seulement si le capteur est situé suffisamment proche (moins de 50 mm) de la fissure.

La simulation numérique de l'EA due à la fissuration transverse dans des stratifiés a permis d'évaluer la dépendance des signaux obtenus à la séquence et à l'épaisseur des plis [11]. Ces résultats mettent en évidence la difficulté d'obtenir un lien univoque entre un mécanisme d'endommagement tel que la fissuration transverse et les signaux obtenus. Ces derniers dépendent fortement de la position



FIGURE 3 : DARYCENTRE FREQUENTIEL EN FORCTION DE LA DISTANCE ENTRE LA FISSURATION TRANSVERSE ET LE CAPTEUR PONCTUEL OBTENU POUR LES DEUX EMPILEMENTS ET LES DEUX ÉPAISSEURS DE PLIS ÉTUDIÉS.

du pli dans le stratifié. L'épaisseur des plis externes n'a que peu d'influence sur les signaux acquis. L'épaisseur des plis internes conduit à une différence sur les signaux seulement si le capteur est situé proche de la fissure. Ces résultats suggèrent donc de considérer la fissuration transverse des plis internes ou externes comme deux mécanismes d'endommagement distincts dans les approches expérimentales de classification des signaux acoustigues dans les composites stratifiés.

Références

[1] Alia, A.; Fantozzi, G.; Godin, N.; Osmani, H.; Reynaud, P. Mechanical behaviour of jute fibre-reinforced polyester composite: Characterization of damage mechanisms using acoustic emission and microstructural observations. J. Compos. Mater. 2019, 53, 3377–3394. https://doi.org/10.1177/0021998318822128

[2] Godin, N.; Reynaud, P.; Fantozzi, G. Challenges and limitations in the identification of acoustic emission signature of damage mechanisms in composites materials. Appl. Sci. 2018, 8, 1267. https://doi.org/10.3390/app8081267

[3] Carpinteri, A.; Lacidogna, G.; Accornero, F.; Mpalaskas, A.C.; Matikas, T.E.; Aggelis, D.G. Influence of damage in the acoustic emission parameters. Cem. Concr. Compos. 2013, 44, 9–16. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.08.001

[4] Baker, C.; Morscher, G.N.; Pujar, V.V.; Lemanski, J.R. Transverse cracking in carbon fiber reinforced polymer composites: Modal acoustic emission and peak frequency analysis. Compos. Sci. Technol. 2015, 116, 26–32. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.05.005

[5] Oz, F.E.; Ersoy, N.; Lomov, S.V. Do high frequency acoustic emission events always represent fibre failure in CFRP laminates? Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 2017, 103, 230–235.

https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.10.013

[6] Sause, M.G.R.; Richler, S. Finite Element Modelling of Cracks as Acoustic Emission Sources. J. Nondestruct. Eval. 2015, 34, 4. https://doi.org/10.1007/s10921-015-0278-8

[7] Le Gall, T.; Monnier, T.; Fusco, C.; Godin, N.; Hebaz, S.-E. Towards quantitative acoustic emission by Finite Element Modelling: Contribution of Modal Analysis and Identification of Pertinent Descriptors. Appl. Sci. 2018, 8, 2557. https://doi.org/10.3390/app8122557

[8] Sause, M.G.; Hamstad, M.A. Numerical modeling of existing acoustic emission sensor absolute calibration approaches. Sens. Actuators A Phys. 2018, 269, 294–307. https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.11.057

[9] Boulay, N.; Lhémery, A.; Zhang, F. Simulation of the spatial frequency-dependent sensitivities of Acoustic Emission sensors. In Proceedings of the Physical Acoustics Conference, AFPAC 2017, Croydon, UK, 17–19 January 2018; Volume 1017

[10] Hamam, Z.; Godin, N.; Fusco, C.; Doitrand, A.; Monnier, T. Acoustic emission signal due to fiber break and fiber matrix debonding in model composite: A computational study. Appl. Sci. 2021, 11, 8406. https://doi.org/10.3390/app11188406

[11] Hamam, Z.; Godin, N.; Reynaud, P.; Fusco, C.; Carrère, N.; Doitrand, A. Transverse cracking induced acoustic emission in carbon fiber-epoxy matrix composite laminates. Materials 2022, 15, 394. https://doi.org/10.3390/ma15010394

Suivi d'essais structuraux à l'aide de la stéréocorrélation d'images numériques

J. -E. Dufour, G. Colantonio, C. Bouvet, J. -N. Périé, J. -C. Passieux, J. Serra

Université de Toulouse, Institut Clément Ader, ISAE-SUPAERO – UPS – IMT Mines Albi – INSA, Toulouse, FRANCE Contact: joel.serra@isae-supaero.fr

Bien que les simulations utilisées pour décrire l'endommagement et la rupture des matériaux stratifiés deviennent de plus en plus prédictives, les essais structuraux, notamment sous sollicitations multiaxiales, sont toujours nécessaires pour valider la conception des pièces dans de nombreuses applications industrielles. Il devient alors critique d'accéder aux conditions limites réelles pour permettre une comparaison objective entre les résultats de l'essai et des calculs, en particulier parce que les tests structuraux sont complexes et mènent souvent à du flambage. L'estimation des flux de forces et de moments traversant l'éprouvette est donc cruciale pour améliorer le design.

Une méthode pour extraire ces conditions limites consiste à mesurer les champs de déplacement par des méthodes optiques (en particulier par stéréo-corrélation d'images numériques) et d'en dériver des conditions limites de Dirichlet à appliquer sur un modèle élément-finis. Dans le



FIGURE 1 : PROCÉDURE D'EXTRACTION DES CONDITIONS LIMITES CLASSIQUE (GAUCHE) ET PROPOSÉE (DROITE). EN ROUGE, LES NŒUDS SUR LESQUELS LES TRANSLATIONS DANS LE PLAN ET HORS PLAN SONT IMPOSÉS. EN ORANGE, LES NŒUDS SUR LESQUELS UNIQUEMENT LES TRANSLATIONS HORS PLAN SONT IMPOSÉS.



FIGURE 2 : VALEUR MOYENNE DU FLUX DE MOMENT ESTIMÉ POUR DES NIVEAUX DE BRUITS GÉNÉRÉS ARTIFICIELLEMENT (GAUCHE); ZOOM AUTOUR DE LA VALEUR THÉORIQUE (DROITE).

cas d'un modèle 3D, on extrait classiquement le déplacement de plusieurs (au moins deux mais plus en pratique) sets de nœuds pour décrire correctement la flexion (Figure 1- gauche). Pour s'adapter à un modèle élément-finis volumique, les conditions limites devraient (dans l'idéal) être imposées directement sur les rangées de nœuds extérieurs (à la fois inférieurs et supérieurs) pour représenter correctement les rotations (Figure 1droite). Notre montage expérimental ne permet de mesurer que la surface supérieure et ne permet pas de voir la surface inférieure. Une régularisation supplémentaire du problème est donc nécessaire pour obtenir ces conditions limites. Une nouvelle méthodologie qui extrait les conditions limites minimales sous la forme de déplacements mécaniquement champs de admissibles a été développée. Cette approche se base sur l'utilisation de la Stéréo Corrélation d'images éléments-finis et est régularisé en utilisant le comportement mécanique grâce aux équations de comportements. Les avantages de cette approche sont multiples. La zone de mesure est naturellement plus grande que dans une approche utilisant simplement la surface supérieure puisqu'un seul cadre de nœuds est utilisé comme conditions limites. De plus, la détermination des flux à partir de mesures surfaciques repose sur des dérivations multiples



FIGURE 3 :SCHÉMA ET PHOTOGRAPHIE DU BANC VERTEX.

de champs de déplacements mesurés, elle est donc très sensible au bruit de mesure. En utilisant la régularisation mécanique comme un filtre, l'impact du bruit est sensiblement diminué. Enfin, une robustesse accrue aux déformations non-linéaires géométriques est observée.

En écrivant l'équilibre mécanique sur le maillage de notre objet mesuré, il est possible d'exprimer le déplacement des nœuds libres des surfaces inférieures et supérieures comme une fonction (dont les paramètres dépendent de la rigidité) des nœuds de bord. Cette condensation statique de l'information permet alors de réduire notre problème de mesure par corrélation d'image à un problème de bord uniquement. Pour valider cette méthode, des séries d'images artificielles d'une plaque soumis à de la flexion polluées par du bruit ont été générées puis post-traitées en utilisant nos 2 approches disponibles. Comme attendu, l'approche régularisée est beaucoup plus robuste à l'ajout de bruit que l'approche classique, qui repose sur des dérivations successives comme le montre la Figure 2.

Au-delà de l'utilisation d'images artificielles, le suivi d'un essai combiné de traction-cisaillement a également été réalisé sur un stratifié composite (carbone/époxy) entaillé à l'aide du banc d'essai multiaxial VERTEX (Figure 3). Il est important de noter que la majorité de cet essai se déroule en post-flambage puisque la plaque testée est fine et que le flambement et l'apparition d'une cloque arrive très tôt durant l'essai. La mesure régularisée doit alors être modifiée prendre pour compte en les

2 3 4 0° Crain gauges rosettes positions

FIGURE 4 : (GAUCHE, CENTRE) POSITIONS DES JAUGES DE DÉFORMATIONS SUR LE SPÉCIMEN. (DROITE) POSITIONS DES JAUGES VIRTUELLES SUR LE MODÈLE NUMÉRIQUE.

changements de rigidité de la plaque dues à la non-linéarité géométrique. Il est alors nécessaire de recalculer l'opérateur de régularisation à chaque image à cause de ces effets. Cette approche est semblable à une approche explicite ou on met à jour l'opérateur de rigidité tangent pour tenir compte des non-linéarités.

Dans l'optique de valider les résultats de déplacements et déformations obtenus sur la face non-visible, des jauges de déformations ont été collées sur la face arrière d'une des éprouvettes (Figure 4).

En utilisant la mesure régularisée, on peut remonter aux déplacements en tout point de la plaque et ainsi comparer les déformations obtenues avec les résultats des jauges comme le montre la Figure 5. Les résultats sont très satisfaisants.

Notch (100mm)

Dans cette étude, nous avons illustré la robustesse de l'approche régularisée par la mécanique par rapport aux multiples dérivations à partir du déplacement surfacique pour la mesure des flux d'efforts. Nous avons également mis en évidence la nécessité de recalculer l'opérateur de régularisation à partir de la rigidité pour tenir compte de l'apparition de la non-linéarité géométrique. De plus, la mesure de déformations en face non-visible a été confirmée par la comparaison avec des jauges. L'extraction des conditions limites permettra maintenant de réaliser une comparaison entre les simulations numériques couplées à des modèles d'endommagement et les données issues des essais.

Ce travail a été réalisé au sein du projet VIRTUOSE (VIRTUal testing of aerOnautical StructurEs) finance par la Fondation Jean-Jacques et Felicia Lopez-Loreta pour l'Excellence Académique. Pour davantage de details sur le projet, n'hésitez pas à visiter notre site internet :

https://websites.isae-supaero.fr/virtuose/





Vie de l'association

Prix Daniel Valentin : le lauréat 2021

par Frédéric THIEBAUD (FEMTO-ST)

Monsieur Joël SERRA, âgé de 31 ans au moment de sa déclaration de candidature. est le lauréat du Prix Daniel Valentin 2021. Il est diplômé Ingénieur de l'ISAE-SUPAERO à Toulouse et d'un master Aerospace Vehicle Design, option Aircraft Design de l'Université de Cranfield en 2013. En 2016, il soutient sa Thèse

de Doctorat en mécanique des structures composites à l'ISAE-SUPAERO de Toulouse. Cette dernière intitulée « Etude numérique et expérimentale de la propagation de coupures matériaux stratifiés carbone/époxy soumis à des chargements complexes » a été réalisée sous la direction de Christophe Bouvet et Bruno Castanié. Ces constituent une contribution au

développement d'une méthodologie numérique de dimensionnement de structures composites vis-à-vis de la rupture. Le travail s'appuie sur la modélisation développée en interne à l'Institut Clément Ader de Toulouse : le Discrete Ply Method (DPM). La fissuration transverse, le délaminage et la rupture de fibres sont pris en compte et permettent ainsi de représenter l'influence de défauts (trous, entailles). Le travail s'appuie également sur un dispositif mécanique permettant le chargement multiaxial de plagues composites. Les travaux s'inscrivent dans le cadre du projet ANR VERTEX (Validation

> Expérimentale et modélisation des structuRes ComposiTEs sous sollicitations compleXes).

Il poursuit de novembre 2017 jusqu'à mi 2019 un post doctorat au sein du Bristol Composites Institute (ACCIS) dans le cadre du projet CTi (Carbon Titanium) Fan en collaboration Rolls-Royce. Ce projet concernait le développement d'un nouveau type de réacteur d'avion, plus performant, notamment en ce

qui concerne la tolérance aux dommages d'impact. La technologie plébiscitée était celle des Z-Pins, des tiges composites insérées orthogonalement au plan des stratifiés composites, dans le but de retarder l'apparition du délaminage.

Depuis mai 2019, il intègre le groupe Matériaux et Structures Composites de l'Institut Clément Ader en tant qu'Ingénieur-Chercheur. Il est lauréat du prix Lopez-Loreta pour le projet VIRTUOSE (VIRTUal Testing of AerOnautical StructurEs), qu'il pilote en coordonnant une dizaine de personnes pour une durée de 5 ans. L'objectif est de remplacer de nombreux essais de la pyramide des essais (échelle du détail structural) par des simulations numériques couplées à un essai « enveloppe ».

Notons que Monsieur Joël SERRA a également quelques activités pédagogiques dans sa spécialité au niveau Master et a participé à de nombreux encadrements d'étudiants pour des activités de recherche (Post Docs, Doctorants et Ingénieurs).

Monsieur Joël SERRA présentera ses activités lors des Journées Nationales des Composites, JNC23 à Besançon du 3 au 5 juillet 2023.

Prix Daniel Valentin : le lauréat 2022 par Frédéric THIEBAUD (FEMTO-ST)

frederic.thiebaud@univ-fcomte.fr

Le lauréat du Prix Daniel Valentin 2022 est Monsieur Aurélien DOITRAND, Maître de Conférences à l'INSA de Lyon Laboratoire MATEIS, et âgé de 31 ans au moment de sa candidature. Il est diplômé Ingénieur Civil de l'Ecole des Mines de Saint Etienne et d'un Master Recherche Ingénierie des Matériaux et Procédés en 2013.

En septembre 2016, il défend sa Thèse de Doctorat à l'ONERA Chatillon intitulée « Endommagement à l'échelle mésoscopique et



son influence sur la tenue mécanique des matériaux composites tissés » sous la direction de Nicolas Carrère. A la suite de cette thèse et d'un contrat de 4 mois en tant qu'ingénieur de recherche à l'ONERA au cours duquel il s'est intéressé à la caractérisation de l'endommagement de composites par thermographie infrarouge, il est ensuite embauché un an comme Ingénieur de Recherche à Safran Aircraft Engines. Ses activités de recherche se focalisent alors sur le comportement mécanique et l'endommagement de matériaux composites tissés 3D utilisés pour les carters et les aubes de soufflantes des derniers moteurs LEAP. En avril 2018, il réalise un post-doctorat au laboratoire SIMAP, encadré par Rafael Estevez. Ce post-doctorat lui permet d'élargir ses thématiques de recherche au-delà du domaine des matériaux composites tissés. Notamment il aborde la simulation de la rupture au travers de modèles de zones cohésives incluant des formulations dépendant du temps, qu'il implémente en 2D et en 3D dans le logiciel de calcul par éléments finis Abagus.

En septembre 2019 il est recruté Enseignant Chercheur au Laboratoire MATEIS (INSA LYON) au sein de l'équipe Céramiques et Composites. Il dispense la majorité de ses enseignements en mécanique des matériaux au département SGM – Science et Génie des Matériaux de l'INSA de Lyon. Ses travaux de recherche portent majoritairement sur la rupture fragile des matériaux CMO, CMC, C, CRéfractaire et d'assemblages collés/interfaces.

Monsieur Aurélien DOITRAND participe également à de nombreux projets académiques, industriels et encadrements d'étudiants pour de activités de recherche (Post Docs, Doctorants, Masters, PFE Ingénieurs). Il a expertisé un très grand nombre d'articles scientifiques et a une production de publications dans des revues à comité de lecture qui témoigne de l'intérêt de ses travaux par la communauté.

Monsieur Aurélien DOITRAND présentera ses activités lors des Journées Nationales des Composites, JNC23 à Besançon du 3 au 5 juillet 2023.

Journées Scientifiques et Techniques récentes et à venir par Frédéric DAU (I2M)

frederic.dau@u-bordeaux.fr

Les Journées Scientifiques et Techniques (JST) organisées par l'AMAC restent des moments privilégiés d'échanges et de discussions passionnées entre académiques et industriels sur les challenges d'actualité concernant les matériaux et structures composites. Elles sont aussi l'occasion de faire émerger et lever de nouveaux verrous scientifiques et techniques et de fédérer et structurer de nouvelles collaborations et partenariats.

Organisées sur 1 ou 2 journées, les JST regroupent en moyenne une cinquantaine de personnes autour de présentations au format académique ou d'ateliers démonstratifs, sur des sujets allant des procédés d'élaboration jusqu'à la réparation et le recyclage en passant par la caractérisation (destructive ou non), la tenue en service, ... en couvrant de nombreux secteurs d'activités : transport, énergie (stockage), éolien, spatial, ...

De prochaines JST sont en préparation, en présentiel autant que possible, sur :

• les avancées en formulation des matrices polymère pour composites structuraux, organisées avec P. Olivier de l'ICA et M. Destarac, de l'IMRCP, en partenariat avec le Groupe Français des Polymères (voir AgendAMAC);

• les approches multi-échelles et conception optimale de matériaux et structures composites, organisées avec Marco Montemurro & Anita Catapano de l'I2M, à Bordeaux ;

• la mécanique de la rupture des composites, organisées avec Emmanuel Baranger du LMPS & Christophe Bouvet de l'ICA.

• les composites et l'énergie, avec un focus sur l'hydrogène, organisées par Frédéric Thiébaud du FEMTO-ST et Frédéric Dau de l'I2M ;

Les thèmes d'intérêt ne manquent pas. N'hésitez pas à vous manifester si vous souhaitez vous aussi organiser une JST !

Bilan des Entretiens de l'AMAC sur le thème de la mer et composites

Lorient, 13-14/09/2022 par Christophe Baley (IRDL)

christophe.baley@univ-ubs.t

Cette manifestation fait suite à une conversation avec Philippe Boisse en décembre 2021 (rencontre du GDR MIC à Caen). Son objectif était de faire un point sur l'usage des composites dans le monde maritime. Nous avons donc construit un programme large, puis nous avons cherché des intervenants pertinents et disponibles.

Cette manifestation s'est déroulée à Lorient sur deux demi-journées les 13 et 14 septembre 2022. Elle a été organisée par l'Université de Bretagne Sud et Audelor (Agence de développement économique du pays de Lorient).

Les dates de ce colloque correspondaient au début du défi Azimut, une course de voiliers monocoques de 60 pieds (18m) de la classe IMOCA. Cette édition a vu la participation de 24 voiliers. Pour mémoire il s'agit des monocoques qui participent au Vendée Globe (Course en solitaire autour du monde). Des photos et vidéos

sont visibles sur le site de la course (https://www.defi-azimut.net/fr). Des visites commentées à proximité des voiliers et de deux entreprises fabriquant des foils par AFP (Avel Robotic) ou des mâts (Lorimat) ont également été proposées.

115 personnes ont participé le mardi 13/09 après-midi (nombre de places limité dans l'amphi de la Cité de la voile) et 126 personnes le mercredi matin 14/09 (amphi de l'Université de Bretagne sud). Les participants étaient issus du monde académique, de l'industrie, de la course au large et en présence de quelques étudiants.

Thèmes abordés

11 conférences ont été présentées lors de ce colloque. Pour avoir une vision aussi large que possible, les orateurs appartenaient au monde académique, à l'industrie ou au monde de la course au large. La liste des interventions et des orateurs, que nous remercions vivement, est présenté ci-après

 Introduction générale sur les matériaux composites utilisés en mer / Christophe Baley (UBS - IRDL)

• La déconstruction des navires de plaisance / Guillaume ARNAULD des

LIONS (APER - FIN))

• Les structures navales à hautes performances / Nicolas Carrere (Ensta Bretagne) et Vincent Keryvin (UBS - IRDL)

• Les composites à l'épreuve du large : bilan de 2 Vendée Globe / Stéphane Le Diraison (Time for Ocean)

 Influences des règles de classe sur le choix des matériaux pour demain / Imogen Dinham-Price (IMOCA)

• Les voiles des bateaux de courses /Matthieu Souben (All Purpose)

• Les chargements subis par un navire : de l'hypothèse à la mesure /Adrien Launay (Gseadesign)



• Les structures immergées en mer sur le long terme / Peter Davies (Ifremer) et Erwan Nicolas (Sabella)

• Matériaux composites et construction navale militaire / Dominique Lucas (Naval Group)

• Dégradation et biodégradation des polymères et biocomposites en milieu marin / Mikaël KEDZIERSKI (UBS – IRDL) et Lata Soccalingame (UBS - IRDL)

• Biomimétisme pour matériaux composites adaptatifs et milieu marin. Antoine le Duigou (UBS / IRDL)

Quelques faits marquants et enjeux pour demain

Les matériaux composites sont utilisés dans le monde maritime pour diverses applications telles que la construction de coques de navires (civils ou militaires), de superstructures, de cheminées de paquebot, de pales d'hydrolienne ou d'éolienne, d'hélices propulsives, d'enceintes subissant des pressions importantes à grandes profondeurs ou des voiles. Pour ce dernier usage, les voiles sont le plus souvent des structures textiles, mais aujourd'hui sur les bateaux de cours de course il s'agit de membranes composites assimilables à des empilements minces (TPT : Thin Ply Technology). En construction navale, les structures peuvent avoir de très grandes dimensions, par exemple le plus grand mât de voilier renforcé par des fibres de carbone a une longueur de 90m. Il s'agit le plus souvent de prototypes ou de petites séries avec des contraintes fortes sur le coût des constituants, la conception des outillages et le choix du procédé de mise en forme. La durée de vie des navires peut être très importante comme par exemple celle des dragueurs de mines (HMS Wilson, 46.3 m de longueur ; 450 tonnes de déplacement, coque monolithique verre/polyester). Pour ce type d'application, les années 1960. les essais de vieillissement à l'échelle 1 en 1968 et la réalisation en 1973. La durée de vie initiale était de 30 ans, mais ils sont toujours en service, soit une durée de navigation de 45 ans.

Le maintien dans leur usage impose de tenir compte de nombreux paramètres tels que des chargements complexes (un navire évolue à l'interface eau/air et peut subir des fortes pressions locales (slamming) ou des chocs avec des OFNI), le vieillissement en milieu marin à différentes températures, l'exposition aux UV, le développement d'organismes vivants adhérant sur les parties immergées (fouling) et les effets du couplage entre une fatigue mécanique et les effets de l'hydrolyse. Par ailleurs, les foils et les hélices peuvent subir des phénomènes de ventilation ou de cavitation.

Certaines structures sont immergées en profondeur pour de nombreuses années et dans des zones très difficilement accessibles, par exemple les profileurs ou les pales hydroliennes. Les flotteurs profileurs autonomes du réseau mondial Argo mesurent en temps réel la température et la salinité de l'océan à l'échelle de la planète. Les flotteurs sont déployés en mer et dérivent au gré des courants. Ils sont programmés, sur un cycle de 10 jours, pour plonger à 2 000 m – voire 6 000 m pour la

nouvelle génération de flotteurs Deep – puis remonter. Lors de cette remontée, ils collectent les données physicochimiques en continu. Une fois en surface, ils

transmettent les données par satellite. Une première hydrolienne française a été immergées entre l'île de Ouessant et de celle de Molène, c'est-à-dire positionnée dans une zone de fort courant sous-marins (effet de la marée) avec, en théorie, des opérations de maintenance tous les 7 ans. On note qu'il existe peu de connaissances scientifiques sur les conséquences du vieillissement d'une pale d'hydrolienne dans ces conditions extrêmes.

C'est dans le domaine du nautisme qu'il y a eu le plus de production en série. Après des

premiers prototypes dès 1937, la construction en série des coques de bateau en matériaux monolithiques réellement commencé en 1947 puis en 1949 pour les structures sandwiches. Pour illustrer l'évolution de la production industrielle, au salon nautique annuel anglais, les bateaux en GRP (Glass Reinforced Plastic) représentaient 4% seulement en 1955, mais 80% en 1972. En France des voiliers de séries comme le Goliff (6.5 m et 1.3 tonne de déplacement) sont fabriqués dès 1962 et produits à exemplaires (entre 1962 et 1967). Il est aussi

``les bateaux en GRP représentaient 4% en 1955 mais 80% en 1972'' possible de citer l'Arpège (9.25m et 3.3 tonnes de déplacement) produit à 1500 exemplaires entre 1967 et 1976 et

le Sangria (7.60 m et 1.7 tonne de déplacement) produit à 2156 exemplaires entre 1969 et 1982. Ce succès s'explique principalement par un prix compétitif par rapport au bois, les travaux et coûts de maintenance modestes, la facilité de réparation et la capacité de mouler des formes complexes. Certains de ces voiliers naviguent encore.

Mais cette production en série impose aujourd'hui de gérer ces navires en fin de vie. L'Aper (Association pour une Plaisance responsable (https://www.recyclermonbateau.fr/)) a été créée par la Fédération des industries nautiques pour répondre mettre en place une filière de déconstruction (et non de recyclage par absence de solution acceptable). En 2020, les déchets composites traités issus de la déconstruction des Bateaux de Plaisance Hors d'Usage (BPHU) ont été orientés vers une filière de valorisation énergétique pour 63 % et un stockage pour 37 %. Il n'y a pas eu de réutilisation ni de recyclage de composites issus de la filière nautique. Cette ventilation est stable entre 2019 et 2020. En 2020, l'âge moyen des bateaux déconstruits (masse moyenne de 1300 kg) était de 40 ans. Il était de 43 ans en 2019.

Par ailleurs, en complément de la gestion de fin de vie, la législation impose aujourd'hui aux chantiers navals de réduire et de gérer leurs déchets de production (mise en décharge interdite à terme), déchets qui représentent en moyenne 14% de la masse de composites transformée (principalement des fibres de verre brutes, de la résine polyester réticulée et des composites associés). Cette contrainte conduit aujourd'hui a des évolutions dans le choix des constituants et des procédés de mise en œuvre.

Pendant de nombreuses années, les industriels ont recherché des solutions matériaux et process spécifiques à la construction navale pour maîtriser les coûts et produire de grandes pièces dans les conditions d'un chantier naval. Il y avait donc, généralement, pour les matériaux composites, des divergences stratégiques importantes par rapport à la construction aéronautique. Mais dans le domaine de la course à la voile, la recherche de performances à tout prix a inversé cette tendance. On constate aujourd'hui les gains obtenus tels que la réduction des masses, l'augmentation de la



structures. Ils ont été obtenus principalement (architecture hydrodynamisme, composites, des procédés de mise en œuvre et de la santé matière. L'usage fréquent de foils permet aujourd'hui une réduction importante de la résistance à l'avancement des navires. Ces appendices sont en constante évolution pour minimiser leur traînée et réduire le risque de délaminage. Par ailleurs, certains éléments de structures sont équipés de capteurs pour connaître les chargements subis en cours de navigation. Si la classe l'autorise (les catégories de voiliers de course imposent des règles de utilisés pré-imprégnés carbone/époxy drapé à la main ou par AFP (placement de fibres robotisé), cuit en température (120 °C max imposée par la jauge) autoclave (mât, bôme, foil....). Le procédé de temps à autre. La nature des fibres de renfort est aussi limitée par les règles de jauges. Pour donner une ordre d'idée, le prix d'un kilo de coque est de l'ordre de 1000 euros. L'usage d'analyses de cycle de vie, en permettant de quantifier les l'environnement, fait apparaître les dérives de cette recherche de performances à tout prix et questionne aujourd'hui ce secteur.

Puisque nous utilisons des matrices organiques, la question de la pollution des océans (par les polymères et les composites) a été aussi abordée. En termes de vulgarisation, la présence de microplastiques dans les océans est souvent traitée par les médias, elle illustre une forme d'imprégnation chimique du monde. On peut les définir comme des éléments de petites dimensions (inférieures à 5 mm) créés par un mécanisme de fragmentation. Leur présence en mer est un danger, en effet les 5 principaux risques sont :

 le piégeage des organismes par les « plastiques »

- l'ingestion de microplastiques par le vivant
- les impacts d'additifs toxiques
- l'adsorption et la désorption de polluants
- le transport d'organismes invasifs

Une réponse est peut-être dans l'usage de biopolymères et de biocomposites. Ceci impose de connaître en milieu marin les étapes de la biodégradation, soit la fragmentation (abiotique >> biotique), la dégradation (abiotique et biotique) puis la bio-assimilation (biotique). On note l'importance des écosystèmes marins sur ces étapes, écosystèmes qui évoluent, entre autres, suivant les zones géographiques, les saisons, la température, les courants et les profondeurs. L'usage de fibres végétales comme renfort est une réponse logique. Cette thématique montre que l'état de nos connaissances sur la biodégradation en milieu marin est modeste, voire quasi-inexistant si l'on s'intéresse aux grandes profondeurs. Il s'agit d'un nouveau champ de recherche multidisciplinaire.

Ces entretiens ont permis d'aborder d'une manière générale l'usage des matériaux composites en milieu marin. Ce texte n'est qu'un petit résumé des présentations et des échanges. Pour les capitaliser et affiner les réflexions, nous rédigeons actuellement un article qui sera proposé dans une revue internationale. Pour de très nombreuses structures utilisées en mer, les matériaux composites restent la solution, même en l'absence de certaines données environnement sévère sur le long terme. Les démarches d'éco-conception restent à introduire dans tous les secteurs avec l'usage d'analyses de cycle de vie pour quantifier les impacts potentiels sur l'environnement. Parmi les enjeux pour demain, il est indispensable de disposer de solutions acceptables pour gérer les déchets de production et de maintenance, puis des navires en fin de vie. Ce n'est pas propre à ce secteur, mais il existe des spécificités telles que l'usage d'une gamme de matériaux dans une coque, le vieillissement en milieu marin et la longue durée d'usage de certains navires.

Remarque : Douze privilégiés ont été en mer le mercredi après-midi pour voir naviguer ces voiliers de course utilisant des foils. Nous regrettons de ne pas avoir pu emmener plus de personnes en mer, mais c'est compliqué pour le faire en toute sécurité, avoir accès au plan d'eau et malheureusement coûteux.



Vie des laboratoires IRT Saint Exupéry

par Stéphanie Miot stephanie.miot@irt-saintexupery.com

Matériaux et procédés composites

Depuis bientôt 10 ans, l'IRT Saint Exupéry s'engage pour l'avenir des filières aéronautique et spatiale en se structurant autour de 12 centres de compétences et 4 axes technologiques. Le centre de compétences en matériaux et procédés composites a pour objectif de développer des technologies innovantes, robustes, de haute performance et certifiables à travers :

• Une expertise sur le choix des matières premières et leur transformation permettant d'atteindre et de maîtriser de nouveaux niveaux de performances et d'intégrer de nouvelles fonctionnalités.

• Une approche couplant la conception, la matière première et les procédés pour produire des matériaux customisés et compétitifs

· Le développement en parallèle des solutions

expérimentales et numériques permettant d'enrichir la compréhension du lien entre le procédé, la microstructure du matériau et ses propriétés.

• Par exemple, les projets COMPINNOV TP, METEOR, COMPINNOV TP2, en partenariat avec l'IMRCP, le CIRIMAT, le CRISMAT et l'ICA, ont permis :

• La formulation de bains pour l'imprégnation de matrice organique, combinée avec un développement de l'ensimage et de la fonctionnalisation de la résine PAEK.

• La modélisation de l'impact des fibres et des paramètres de consolidation sur le taux de cristallinité d'un composites carbone/PAEK.

Les activités du centre de compétences se concentrent le développement de sur composites hautes performances et multifonctionnels à base de résine organique ou de matrice céramique. S'appuyant sur une approche hybride entre la science des données et les matériaux/procédés, et associant des outils de modélisation multi-physique. d'optimisation multi-disciplinaire et d'intelligence artificielle au monde des matériaux et procédés.



FIGURE 1 : RECONSTRUCTION DE MODÈLES PAR ÉLÉMENTS FINIS À PARTIR D'IMAGES DE TOMOGRAPHIE OU DE GÉOMÉTRIES IDÉALISÉES POUR ANALYSER LES EFFETS DES DÉFAUTS LIÉS AU PROCÉDÉ AFP (AUTOMATED FIBRE PLACEMENT)

le centre de compétences tire bénéfice des synergies offertes par l'ensemble des disciplines de l'IRT Saint Exupéry.

Plateformes technologiques

L'IRT Saint Exupéry est doté de plateformes technologiques permettant de fournir aux entreprises les équipements et l'expertise pour :

· L'élaboration de composites à matrice

organique (thermodurcissable ou thermoplastique) et de composites à matrice céramique.

• La validation et la montée en échelle de preuves de concept à partir de ces matériaux.

• La fonctionnalisation de ces matériaux et leurs revêtements.

• La caractérisation et l'analyse de ces matériaux incluant notamment des essais mécaniques non-standards et en environnement, des essais d'impact, l'analyse



FIGURE 2 : LIGNE D'IMPRÉGNATION DE PRÉ-IMPRÉGNÉS À MATRICE THERMOPLASTIQUE SEMI-INDUSTRIELLE - ETALEMENT DES FIBRES

de la tolérance aux dommages ou de la rupture, des analyses physico-chimiques ou en microscopie de leur structure et propriétés.

Les plateformes, l'une dédiée aux composites à matrice organique, l'autre aux composites à matrice céramique, préparent l'industrialisation des matériaux et procédés en couvrant toutes les étapes de la formulation à la consolidation. Les équipements suivant permettent la fabrication à façon de pré-imprégnés :

· Une ligne d'imprégnation de pré-imprégnés semi-industrielle pouvant s'adapter à différents fibreux de renforts et résines types thermoplastiques différents procédés et d'imprégnation (voie sèche ou aqueuse). Ce moyen permet la production de pré-imprégnés, dont la largeur peut atteindre 300 mm, en quantité suffisante pour une mise en œuvre de la matière dans des procédés industriels.



FIGURE 3 : LIGNE D'IMPRÉGNATION DE PRÉ-IMPRÉGNÉS À MATRICE THERMOPLASTIQUE SEMI-INDUSTRIELLE - IMPRÉGNATION ET FONCTIONNALISATION

• Une ligne pilote permettant l'imprégnation de pré-imprégnés à matrice thermodurcissable ou l'ensimage de fibre. Elle peut être adaptée à différents types de fibres, résines, et est équipée de plusieurs procédés d'imprégnation (voie aqueuse ou fondue).

• Une ligne pilote d'imprégnation de composite céramique oxyde produisant des pré-imprégnés dont la largeur peut varier entre 6 et 50 mm. Cette ligne est modulable et peut être équipée de différents modules de mise en œuvre, par voie liquide ou sèche.

Les pré-imprégnés ainsi fabriqués sont drapés et consolidés en étuve ou en autoclave. La consolidation hors autoclave est particulièrement intéressante pour réduire les coûts de production et/ou autoriser la production de larges structures. Des études sont menées sur la relation entre l'architecture des pré-imprégnés et leur comportement en étuve afin d'optimiser



FIGURE 4 : LIGNE D'IMPRÉGNATION DE PRÉ-IMPRÉGNÉS À MATRICE THERMOPLASTIQUE SEMI-INDUSTRIELLE - COMPACTION / ANALYSE DE LA CRISTALLISATION

l'évacuation des porosités pendant les étapes de consolidation.

Les plateformes matériaux comptent également un robot de soudage par induction, permettant le soudage direct, continu et dynamique de matériaux stratifiés, et une extrudeuse bi-vis corotative, utilisée pour fonctionnaliser les résines avec des points de fusion allant jusqu'à 400°C. Les propriétés des composites, des constituants au stratifié, sont analysées grâce à des équipements spécifiques :

• une machine d'essais de traction et de déchaussement de fibre développée par TexTechno, permettant d'évaluer les propriétés des fibres et de l'interface fibre/matrice,



FIGURE 5 : BANC THERMOMÉCANIQUE ET MACHINE DE TRACTION

 deux machines d'essais mécaniques (100 kN), une étant équipée d'un four pouvant atteindre 1000°C,

• un banc thermomécanique permettant de coupler gradient thermique (T° max : 1700°C) et chargement de traction (20 kN, 5Hz),

• trois canons pour essais d'impact pouvant

projeter des projectiles de 10g à 1,8kg à une vitesse de 50 à 800 m/s (plateforme partagée entre l'IRT SE, l'ICA et Airbus),

• un microtomographe (diam 150 mm x 500 mm, résolution 2 micromètres).

Visite des plateformes à 360° :

https://www.irt-saintexupery.com/fr/technological-platforms/

Les projets Matériaux et Procédés Composites

Les premiers projets, qui ont fondé les bases du centre de compétences en matériaux et procédés composites, se sont terminés en 2018. Les projets nommés CMC OxVL (Oxyde Voie Liquide), Compinnov TD, Compinnov TP et Sofusin ont permis une montée en maturité de concepts développés par les laboratoires partenaires tels que le CIRIMAT, I2M et ICA. Les activités se tournent aujourd'hui vers l'analyse de cycle de vie des produits, la conception à partir de matière première naturelle ou de seconde source, la maintenabilité des structures à travers l'utilisation de composite à matrice vitrimère ou la réduction des essais physiques en les associant à des essais virtuels. Voici quelques exemples de projets en cours avec leur description :

COMPINNOV HT : Remplacement de pièces métalliques par des composites haute

température pour des applications aéronautiques.

COMPINNOV TP2 : Compréhension entre l'architecture des pré-imprégnés carbone/thermoplastique, la capacité du procédé à être intégré dans un contexte industriel (thermo-estampage, pull-forming, Automated Fibre Placement) et l'impact sur les propriétés mécaniques.

CAMISOLE : Remplacement de l'acier bas carbone utilisé pour le chemisage des alvéoles HA (haute activité) par un matériau composite à matrice céramique (CMC) – Partenariat avec le LCTS sur la compréhension du comportement mécanique et du vieillissement des CMC.

ACDC : Evaluation de concepts pour la réduction du bruit et des vibrations dans le domaine aéronautique et plus particulièrement, dans les zones nacelle et cabine. Association de nouveaux matériaux composites (entre autres bio-sourcés) et de méta-matériaux développés par impression 3D, et teste des architectures multi-matériaux innovantes – Partenariat avec le LAUM, ONERA, ICA et ISAE-SUPAERO.



FIGURE 6 : OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION POUR L'UTILISATION DE LA SIMULATION EN COMPLÉMENT DES ESSAIS PHYSIQUES

TRUST : Génération des admissibles pour le dimensionnement des structures composites par essais virtuels. Développement d'outils pour la montée en maturité des modèles de comportements des composites stratifiés, la quantification et propagation des incertitudes, la prise en compte des défauts liés au procédé de fabrication (AFP). – Partenariat avec ONERA, ICA et les universités de Porto et Girona.

Les enjeux actuels concernent la mise en place des activités de R&D visant à répondre aux problématiques de cycle de vie du produit tout en continuant à améliorer les performances des matériaux composites. Il s'agit notamment d'étudier de nouvelles méthodes de conception/fabrication, d'améliorer la durée de vie des matériaux/structures et d'adresser les possibilités de revalorisation (ou recyclage) en fin de vie. Pour cela, l'IRT Saint Exupéry, l'IRT Jules Vernes et l'IRT M2P ont créé l'Alliance Matériaux pour mettre en commun leur savoirfaire et moyens afin de répondre aux enjeux majeurs de l'industrie des 10 prochaines années.

Agend'AMAC

Conférences organisées ou parrainées par l'AMAC

Ecole thématique Mise en oeuvre des composites thermoplastiques : couplages thermophysiques et propriétés induites. Contact : site de l'AFM

JNC 23 23ièmes Journées Nationales des Composites Contact : https://jnc23.sciencesconf.org/

JST AMAC / GFP PCAS-1

Polymères et Composites pour l'Aéronautique et le Spatial : Nouveaux challenges chimie et mise en oeuvre. Contact : https://pc2023.sciencesconf.org/

Autres conférences

CompTest 2023

11th International Conference on Composite Testing and Model Identification

Contact : https://comptest2023.udg.edu/

ICCM2023

Belfast, Royaume Uni, 30 juillet - 4 août 2023

International Conference on Composite Materials Contact : https://iccm23.org/

ECCOMAS Composites 2023

9th ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites

Contact : https://composites2023.cimne.com/

28

Domaine de Port aux Rocs, 11-16 juin 2023

Besançon, France, 3-5 juillet 2023

Toulouse, France, 12-14 septembre 2023

Girona, Espagne 31 mai - 2 juin 2023

Trapani, Italie, 12-14 septembre 2023

ÉDITION SPÉCIALE TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES INNOVANTES

Contacts

Adhésions

Formulaire téléchargeable sur le site de l'AMAC : www.amac-composites.org Président de l'AMAC : Christian HOCHARD – hochard@lma.cnrs-mrs.fr Secrétaire de l'AMAC : Federica DAGHIA – federica.daghia@ens-paris-saclay.fr Trésorier de l'AMAC : Frédéric DAU – frederic.dau@ensam.eu

Liste de diffusion aux adhérents de l'AMAC

Pour les annonces de soutenances de thèses, propositions de sujets, conférences... Envoyez un courrier électronique (sans pièce jointe) à : amac@enpc.fr

Rédaction AMAC Infos

Envoyez vos annonces à publier dans AMAC Infos à l'éditeur : Nicolas FELD – nicolas.feld@safrangroup.com Safran Tech, rue des Jeunes Bois – Châteaufort, 78114 Magny-les-Hameaux