

AMAC Infos

La gazette annuelle de l'AMAC

Dans ce numéro

P1 : Mot du président
P7 : L'IA au service de l'analyse d'images
P13 : L'IA comme outil de simulation
P23 : L'IA dans les SHM
P29 : Vie des labos
P35 : Vie de l'association
P38 : Agend'AMAC

Edito

Dans ce nouveau numéro d'AMAC Infos, les questionnements et travaux autour de la thématique de l'IA sont proposés avec pas moins de trois articles issus de la vie de nos laboratoires et entreprises françaises. Comme la vie de l'association bat également son plein, on retrouve ici d'abord les mots de notre président Christian Hochard qui nous propose une belle revue des sujets et de l'agenda de l'année 2025 ! On a hâte de vous retrouver toutes et tous aux prochaines JNC organisées avec soin par Federica et toute l'équipe.

Bonne lecture, et n'hésitez pas à nous faire vos retours sur le numéro ainsi que vos idées sur les sujets que vous voudriez voir abordés ici.

N°

41

Mot du président

Président de l'AMAC

par Christian HOCHARD (Aix-Marseille Université, France)

hochard@lma.cnrs-mrs.fr

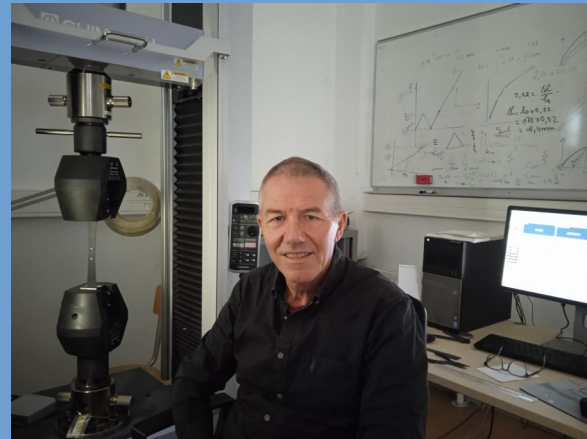
L'Association pour les MATériaux Composites a été créée en 1979, cela fait déjà plus de 45 ans. Le Conseil d'administration élu en 2022 m'a confié la présidence de l'AMAC, je le remercie de sa confiance. Ce Conseil est à l'origine d'une grande part des manifestations mises en place par l'AMAC et tous ses membres y jouent un rôle bien défini et important.

L'une des activités de l'AMAC est l'organisation des Journées Nationales sur les Composites (JNC) tous les deux ans depuis 1978. Chaque JNC est généralement présidée par un membre du CA de l'AMAC. Chacune de ces conférences regroupe environ 300 participants. Les 21^{ème} Journées Nationales sur les Composites se sont déroulées du 1^{er} au 3 juillet 2019 à Bordeaux. C'était Frédéric Dau qui avait la lourde tâche de les organiser et elles furent un succès, sur les aspects scientifiques avec la participation de nombreux industriels implantés dans la région, mais également sur les aspects financiers. Par

ailleurs, Frédéric est chargé de la trésorerie de l'association. Si l'AMAC est une association à but non-lucratif dont les actions sont menées par des membres bénévoles, les colloques, les journées scientifiques, les publications de documents et la gestion du site internet ont un coût qu'il convient d'équilibrer avec les recettes. Je fus trésorier durant de nombreuses années et la gestion de l'association était assurée par la société PromoSciences à Marseille, pilotée par Viviane Bernadac, qui a réalisé un travail remarquable. Suite au départ à la retraite de Viviane, c'est la société VitaminEvents à Bordeaux qui s'est chargée de cette tâche en accord avec Frédéric Dau. Lors de la dernière Assemblée Générale, Frédéric a présenté le Rapport Financier avec un bilan très positif. Les années JNC ont en général un bilan actif, les années sans JNC un bilan passif (moins de recettes, des dépenses récurrentes). La trésorerie est assez constante, elle permet d'assurer un éventuel échec d'une JNC car l'AMAC avance les frais. Les JNC22 devaient se dérouler à Besançon organisées par Frédéric Thiébaud mais "2021 année COVID" n'a pas permis des journées en présentiel. Malgré cette difficulté, plusieurs membres du CA, pilotés par

Federica Daghia, ont décidé d'organiser des JNC "virtuelles" réussies du point de vue scientifique, en particulier avec l'organisation de "tables rondes" très constructives, mais seul le présentiel permet d'aller au-delà des présentations pour échanger et approfondir les sujets de recherche. Les 23^{ème} JNC à Besançon en 2023, curieuse coïncidence de chiffres, ont été l'occasion de nous retrouver en présentiel. Frédéric Thiébault a organisé ces journées d'une main de maître et nous a confirmé le légendaire accueil bisontin.

Par ailleurs, Frédéric Thiebaud coordonne le prix scientifique Daniel Valentin. Les expertises sont réalisées par les membres du conseil de l'AMAC. Le Prix Daniel Valentin récompensait un chercheur de moins de 35 ans qui a effectué une recherche valorisant les matériaux composites en France ou dans un pays francophone. Le montant du prix décerné était de 1500€. Le prix Daniel Valentin 2023 a été décerné à Maël Péron du GEM à Nantes. Cependant, depuis 2019, le nombre de candidats baisse régulièrement. Le CA a donc proposé de modifier les règles du prix Daniel Valentin. Il sera désormais décerné à un chercheur de moins de 40 ans, tous les deux ans, et le montant sera de 2000€.. Le CA a proposé également de créer un prix de thèse, décerné tous les ans, avec un appel à candidatures en début d'année pour les personnes ayant soutenu l'année précédente.



C'est Christophe Bouvet qui est en charge de l'organisation pour l'attribution du prix. Le prix de thèse est d'un montant de 1000€. Le succès pour ce prix a été immédiat car dès 2023, il y a eu 10 excellents dossiers de candidature. Lors du CA du mois de mars 2024 et après une expertise des membres, le prix de thèse a été décerné à Jason Govilas du FEMTO à Besançon. Les dossiers pour le prix de thèse 2024 devront être envoyés avant mi-février 2025 et vous pouvez postuler maintenant.

Une autre modification importante concerne l'élection du CA. Le CA était renouvelé tous les deux ans avec des élections à bulletin secret, et donc une organisation assez lourde à mettre en place et fréquente. D'autre part, après discussion au sein du CA, il nous a semblé que rallonger la durée du mandat permettrait une implication plus importante des membres et de

mettre en place des actions qui demandent plus de temps. Il a donc été décidé de passer la durée du mandat du CA de 2 à 4 ans avec un vote possible sous forme électronique. Afin d'être en phase avec les années JNC, le CA actuel s'engage à démissionner collectivement au bout de 3 ans, donc en 2025 à la fin de l'AG aux prochaines JNC. Un appel à candidature sera lancé début janvier 2025 pour le renouvellement du CA qui sera voté avec Balotilo lors de cette AG aux JNC à Paris-Saclay. En effet, les prochaines JNC, intitulées JNC 2025 car nous serons en 2025, se dérouleront à Paris Saclay (co-organisées par LMPS/Onera/Safran) et Federica Daghia sera présidente (évacuons la frustration des JNC22 "virtuelles" :-)).

Récemment, VitaminEvents a décidé de ne pas prolonger son contrat pour la gestion de l'association. Il était urgent de trouver une autre société pour gérer les inscriptions des JNC 2025 et après consultation de plusieurs sociétés nous avons choisi la société PremC installée à Cachan. Le contrat avec VitaminEvents concernait la gestion éventuelle des JNC et JST ainsi que la gestion des adhésions. Le coût pour la gestion des adhésions était identique pour les années JNC (300 adhésions) et hors JNC (50 adhésions environ). D'autre part, la procédure pour les adhésions aux associations scientifiques dans nos instances (CNRS, universités, entreprises,...) s'est complexifiée.

Nous avons donc discuté lors des derniers CA et proposons (à voter lors de la prochaine AG aux JNC25) d'être automatiquement adhérent pour 2 ans pour une inscription aux JNC (ou autre manifestation de type JST, entretiens). La possibilité de s'inscrire en dehors de ces manifestations restera possible mais ne concernera que très peu de personnes. Cette modification va dans le sens de la simplicité et peut-être même de l'économie car il n'y aura plus le coût de la gestion des adhésions les années hors JNC. Par ailleurs, Federica est secrétaire de l'AMAC. En collaboration avec le président, elle convoque les membres aux réunions du conseil, définit les ordres du jour et en rédige les comptes rendus assistée par Frédéric Laurin secrétaire adjoint. Enfin, pour terminer sur l'organisation des journées, je vous annonce que les 25^{ème} JNC en 2027 se dérouleront à Lorient. Les organisateurs devront résoudre le problème de l'intitulé, le classique JNC25 qui est proche du JNC 2025 déjà utilisé, ou JNC27 dans la suite des dernières JNC, nous leur faisons confiance pour le résoudre sans l'aide de l'IA :-).

Les Journées scientifiques et techniques (JST) sont également des manifestations scientifiques organisées par l'AMAC au rythme moyen de deux par an. Il s'agit de colloques sur un thème précis concernant les matériaux composites et d'une durée d'un ou deux jours. Une JST AMAC est mise sur pied par une équipe universitaire ou

industrielle. En pratique l'organisation d'une JST AMAC doit respecter une charte qui donne la marche à suivre et indique l'aide que l'AMAC peut fournir. Après Frédéric Dau, c'est Monica Pucci qui s'occupe désormais de la mise en place des JST. De nombreuses JST de qualité se sont déroulées ces deux dernières années et ont rencontrées du succès en nombre de participants. Je les cite avec les dates et les organisateurs, un grand merci à eux : *Avancées en formulation des matrices polymères pour composites structuraux* (13-14/09/2023, P. Olivier/M. Destarac, Toulouse) ; *Approches multi-échelles et conception optimale de matériaux et structures composites* (04-05/02/2024, A. Catapano/P.-Y. Méchin, Vélizy-Villacoublay) ; *Rupture dans les matériaux composites* (04-05/04/2024, E. Baranger/C. Bouvet/N. Feld, Toulouse) ; *Fin de vie et recyclage des composites* (28-30/05/2024, M. Pucci/Q. Govignon, Albi). D'autres JST sont déjà programmées pour 2025 : *Caractérisation et le vieillissement des interfaces dans les assemblages collés* (X. Collin, Paris) ; *Composites pour stocker l'hydrogène* (F. Thiébaud/F. Dau/Ch. Bois) ; *Essais et calculs pour le support de la certification des structures aéronautiques composites* (S. Miot, Toulouse). A travers AMAC-Infos, publié une à deux fois par an, l'AMAC informe sur la vie de l'Association mais aussi sur l'activité composite en général. Après Philippe Olivier, vice-président dans le CA

actuel, et Nicolas Feld qui a quitté le CA, c'est désormais Pierre-Yves Méchin qui s'occupe de cette tâche qui demande un travail important. Je vous conseille de consulter les numéros précédents accessibles sur le site internet de l'AMAC qui sont une mine d'informations intéressantes. Vous aurez accès aux 27 derniers numéros depuis 2001. Le numéro 40 de janvier 2024 par exemple présente un dossier très complet avec plusieurs auteurs sur le thème des *réservoirs à hydrogènes*, un article sur la *vie d'un laboratoire*, le ICube à Strasbourg dans ce numéro, la *vie dans l'association* avec un article sur les JNC23 à Besançon et enfin l'*Agend'AMAC* qui annonce les manifestations et conférences en rapport avec les matériaux composites, par exemple l'ECCM21 qui s'est déroulée à Nantes en 2024. Je rappelle que les membres du CA de l'AMAC sont impliqués dans les autres associations (CSMA, MECAMAT, AFM...) et en particulier dans l'ESCM (*European Society for Composite Materials*) qui organise l'ECCM les années hors-JNC. C'est notre collègue Christophe Binetruy qui est actuellement président de l'ESCM. Plusieurs membres du CA font partie du Council et même de l'*Executive Comitee*, Frédéric Laurin et plus récemment Philippe Olivier qui est en charge désormais de la trésorerie de l'ESCM. Vous avez également accès sur le site internet (<https://amac-composites.org/>) à diverses informations sur l'association telles que les informations sur

les manifestations organisées par l'AMAC ou en rapport avec les composites mais aussi des ressources pour l'enseignement en rapport avec les matériaux composites par exemple. C'est désormais Nathalie Godin et Thomas Vandellos qui s'occupe du site. Vous avez également la possibilité de proposer sur le site des offres de stage, de thèse ou d'emploi mais aussi informer de soutenances de thèse ou autre. Rappelons que tout membre AMAC a accès à la liste de diffusion qui permet de communiquer une annonce à l'ensemble des adhérents en envoyant un e-mail à amac@liste.enpc.fr. C'est Jean-François Caron qui depuis de nombreuses années assure le fonctionnement et la modération de la liste de diffusion. Stéphanie Miot a rejoint le CA de l'AMAC en 2022 et a eu l'excellente idée de créer un compte LinkedIn AMAC qui compte déjà 385 abonnés. C'est encore un autre moyen de diffuser de l'information à la communauté sur les manifestations sur les matériaux composites. Une dernière de ces manifestations concerne «Les entretiens de l'AMAC». Ces entretiens ont pour objectifs de donner une *vision stratégique sur l'avenir des composites*. Pour la première édition au LMT à Cachan en 2013, les orateurs industriels et universitaires ont tenté de répondre à la difficile question : *les Composites ont-ils un avenir ?* Les seconds entretiens de l'AMAC à l'ENS de Paris Saclay en 2019 ont permis un échange sur *l'enseignement des*

composites. Ils ont proposé un bilan sur l'offre de formation et d'une analyse des besoins. Les troisièmes entretiens organisés par Christophe Baley à Lorient en 2022 ont porté sur *l'usage des composites dans le monde maritime*. Ces entretiens ont été l'occasion de rencontrer les acteurs industriels dans le nautisme de compétition. Je n'oublierai pas de citer nos représentants industriels au sein de l'AMAC, Michel Cataldi de chez ArianeGroup qui est également vice-président, Caroline Petiot de chez Airbus et, un nouveau membre, Thomas Vandellos de chez Safran. Leur présence dans l'association est très importante car leurs avis participent aux choix des thèmes scientifiques mis en avant dans l'association, dans les manifestations organisées par l'AMAC par exemple.

Je ne saurais terminer ce mot sans une pensée émue pour Philippe Boisse qui a eu un grave problème de santé. Philippe était président de l'AMAC de 2014 à 2022 et était très actif dans la communauté des matériaux composites (également animateur du GdR Mise en œuvre des composites et propriétés induites) et surtout très apprécié. J'aurais également une pensée pour sa femme Sabine et ses enfants qui le soutiennent tous les jours. Espérons que la santé de Philippe s'améliore et le revoir bientôt.

Chers adhérent(e)s, j'espère que vous êtes satisfaits du travail réalisé par les membres du

CA ces deux dernières années et des évolutions dans le mode de fonctionnement de l'association, en particulier les adhésions automatiques, qui vont dans le sens de la simplicité et peut-être de l'économie. Pour ma part, je le suis et je tiens à remercier en particulier tous les organisateurs des JNC et JST, mais aussi tous les autres qui ont participé à ces événements, co-organisateurs et comités d'organisation, ils ont réalisé un travail considérable pour bien accueillir les participants. Merci aux membres du CA avec l'implication et la participation de tous (trésorerie, amac-info, le site internet, la visibilité sur LinkedIn, l'organisation du prix Valentin et du nouveaux prix de thèse...). Enfin, un grand MERCI à Federica, qui s'occupe du secrétariat et tant d'autres choses, en particulier de l'organisation des JNC 2025 à Paris-Saclay avec un super programme. Nous avons hâte d'y participer.

L'intelligence artificielle au service de l'analyse d'images

par G. Fourier¹,

¹ : Safran Tech, R&T Aircraft Engines

L'imagerie joue un rôle clé dans le domaine des composites, tant pour le contrôle non destructif (détection de défauts ou d'endommagement) que pour l'analyse fine de leur structure interne. Les techniques d'acquisition non destructives utilisées sont diverses, telles que la micrographie, le scan par ultrasons et la tomographie par rayons X. Cette dernière est la plus utilisée pour capturer la mésostructure complexe des composites avec renforts architecturés. Pour modéliser correctement des phénomènes locaux fortement dépendants de la géométrie du matériau, tels que l'endommagement, l'obtention de modèles fidèles au matériau réel est essentielle. Cependant, l'exploitation de ces images demeure un processus complexe et chronophage, limitant l'automatisation de la génération de jumeaux numériques.

Traditionnellement, des algorithmes de traitement d'image ont été utilisés pour extraire des informations topologiques et segmenter les constituants du matériau. Or, avec l'essor des

techniques de Deep Learning, de nouvelles perspectives s'ouvrent pour l'automatisation et l'amélioration de ces traitements, simplifiant ainsi l'obtention de jumeaux numériques pour la modélisation des matériaux composites.

Traditionnellement, les approches basées sur le traitement d'images utilisaient des algorithmes explicites issus de la morphologie mathématique, tels que le tenseur de structure [1] ou la matrice de co-occurrence des niveaux de gris (GLCM) [2], pour identifier des régions distinctes dans l'image par le biais des descripteurs construits sur mesure. Ces algorithmes exploitent des caractéristiques image très prévalentes dans les composites, comme la directionnalité des structures ou l'apparence d'une texture au sein d'elles-mêmes (ex. fibres à l'intérieur des torons). Cependant, leurs performances dépendent de nombreux paramètres souvent très sensibles à la qualité d'image (ex. taille de la fenêtre d'analyse, choix des filtres, seuils d'intensité). Pour cette raison, ces démarches exigent une résolution minimale pour fonctionner correctement, typiquement aux alentours de quelques dizaines de microns par voxel [3]. De même, ces méthodes font souvent

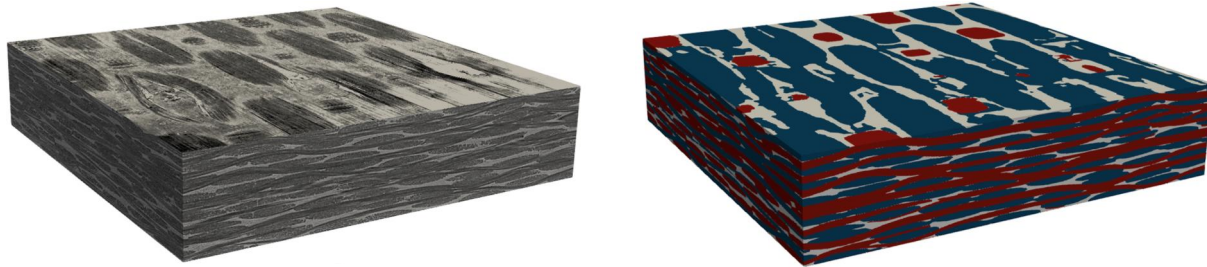


FIGURE 1 : ILLUSTRATION DE CONSTRUCTIONS D'UN JUMEAU NUMÉRIQUE D'UN COMPOSITE ARCHITECTURÉ À PARTIR D'UNE IMAGE TOMOGRAPHIQUE (GAUCHE) ET LA SEGMENTATION SÉMANTIQUE (DROITE) [3]

appel à des stratégies de Machine Learning « classique », tels que l'algorithme de k-moyennes [4] ou des modèles de mélange gaussien [5] pour automatiser l'isolement des régions dans l'image et générer des structures indépendantes. Dans tous les cas, le réglage des paramètres de ces approches nécessite des connaissances spécialisées de la part de l'utilisateur pour adapter les paramètres des algorithmes vers d'autres types d'images que celles pour lesquelles les méthodes ont été conçues.

Naturellement, les stratégies de segmentation basées sur l'apprentissage profond ont aussi été adoptées par la communauté des composites. Les premiers travaux se sont concentrés sur l'utilisation des réseaux de neurones convolutifs dédiés à la tâche de segmentation sémantique [6, 7, 8, 9, 10, 11], qui consiste à prédire une « classe » pour chaque pixel ou voxel de l'image. Cette approche revient à « transformer » l'image

entrante en une pluralité de cartes de probabilités d'appartenance à chacune des classes définies en amont (ex. torons de chaîne, torons de trame, résine matricielle). Un post-traitement reste donc nécessaire pour identifier et isoler les structures dans les images ; cette étape reflète celle des techniques basées sur le traitement d'images car la morphologie mathématique est souvent utilisée (ex. algorithme de partage des eaux). Ces travaux visant la segmentation sémantique utilisent d'avantage l'architecture U-Net, particulièrement adaptée à cette tâche et au problème d'analyse des matériaux composites en raison de sa capacité à capter des caractéristiques à différentes échelles, tout en préservant la continuité géométrique des interfaces entre les phases et de sa facilité d'adaptation à des images de différentes tailles.

Ensuite, d'autres méthodes de segmentation ont progressivement été utilisées, notamment la

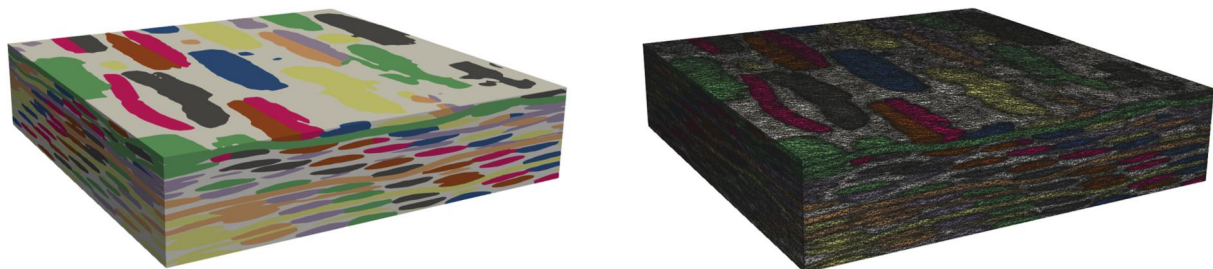


FIGURE 2 : ILLUSTRATION DE CONSTRUCTIONS D'UN JUMENT NUMÉRIQUE D'UN COMPOSITE ARCHITECTURÉ À PARTIR D'UNE IMAGE TOMOGRAPHIQUE : LABÉLISATION DES STRUCTURES INDÉPENDANTES (GAUCHE), ET MAILLAGE CONFORME (DROITE) [3]

segmentation par instance [12] et la segmentation panoptique [13], où des architectures comme le Mask R-CNN fournissent des identifiants uniques pour chaque structure identifiée dans l'image. En fait, la segmentation est précédée par une étape de détection d'objets où les modèles neuronaux proposent des régions d'intérêt potentiellement contenant les objets à segmenter. Après, chacune de ces régions est analysée par un classifieur qui détermine si la région est utile ou non. Enfin, un module de segmentation sémantique est appliqué pour chaque région d'intérêt identifiée, et le résultat s'exprime comme plusieurs boîtes englobantes ayant chacune un masque détournant la structure à son intérieur. Ces démarches de segmentation et de détection d'objets facilitent l'exploitation subséquente des résultats pour la construction des modèles numériques.

Aujourd'hui, la communauté de la vision par ordinateur et IA en général, utilise de plus en

plus des architectures avancées, notamment les Vision Transformers (ViT). Ces modèles sont devenus l'état de l'art, éclipsant souvent les réseaux de neurones convolutifs dans diverses applications, grâce à leur capacité à capter les relations à longue portée entre les éléments d'une même image en raison de leur module d'attention. En particulier l'architecture Swin Transformer a récemment été utilisée pour aussi réaliser des tâches de segmentation sémantique [14]. Cette technique se caractérise par sa capacité à traiter les images de manière hiérarchique, capturant les relations locales plus efficacement que le ViT de base. On peut alors imaginer qu'à l'avenir, ces types d'architectures seront davantage adoptées dans le domaine des composites.

Cependant, même avec les approches basées sur l'IA, l'étape de traitement d'image ne représente qu'une partie du processus de création du jumeau numérique, cf. figure 1. La plupart des techniques fournissent une

description géométrique du matériau « voxélisée » ou une description paramétrique du matériau [15], qui doit souvent être convertie en maillage éléments finis conforme aux zones d'interface, car la précision géométrique locale a un impact direct sur la qualité des résultats de simulation [16]. L'obtention d'un tel maillage est un sujet complexe nécessitant souvent des démarches ad hoc [11, 17] pour garantir une modélisation haute-fidélité.

Ces avancées offrent de nouvelles perspectives pour l'étude des composites en rendant accessibles à de nouveaux utilisateurs ces techniques d'analyse d'images avancées, moyennant la disponibilité de données d'entraînement suffisantes et de qualité. En effet, la qualité des données d'entraînement a un impact significatif sur les performances des modèles d'IA. Ainsi, la difficulté majeure de leur mise en place et adoption réside dans la construction de bases de données proprement annotées, une tâche laborieuse et coûteuse. Souvent, l'annotation est assistée par des logiciels proposant des outils de pré-annotation qui réduisent l'effort manuel. En complément, quelques efforts ont été portés sur la génération de bases de données de d'annotations synthétiques [6, 12, 14] pour alimenter des bases de données existantes mais insuffisantes. Ces travaux ont fait appel à des logiciels de modélisation textile « prédictifs » tels que TexGen pour générer des architectures textiles

nominales, lesquelles ont été converties en images et « habillées » pour ressembler à des images tomographiques, soit par des heuristiques, soit par un autre réseau de neurones.

Il est intéressant de constater que l'absence de grands ensembles de données annotées ne semble pas constituer pas un frein majeur à l'adoption des techniques d'IA. En effet, les données d'entraînement sont le plus souvent issues de l'annotation manuelle d'une ou de plusieurs dizaines de tranches du volume à segmenter, ce qui est suffisant pour obtenir des performances de segmentation supérieures à celles obtenues avec des approches classiques sur le reste du volume [3, 15]. Par contre, cette absence rend difficile la comparaison entre méthodes, car la méthode d'évaluation peut varier drastiquement d'une méthode à l'autre, voire même la construction de modèles dits généralistes capables de traiter tout type de composite. En effet, pour le moment, il n'existe pas de modèle IA capable de généraliser sur une multitude de résolutions (tailles de voxels) tout en gardant ses performances de segmentation. Par contre, les résultats montrent que les modèles entraînés peuvent être facilement appliqués à d'autres bases de données similaires (cf. résolution) sans modification et sans paramétrage additionnel, ce qui représente un avantage important par rapport aux méthodes traditionnelles.

En comparaison avec des méthodes traditionnelles, les approches s'appuyant sur les réseaux de neurones présentent donc de nombreux avantages principalement en termes de performance et de capacité de généralisation. Cependant, elles ne remplacent que partiellement les approches classiques dans la phase de segmentation et parfois d'identification des structures pour la génération de modèles numériques haute-fidélité. De plus, les modèles d'IA restent des boîtes noires dont il est difficile de comprendre et prédire le comportement en cas d'application à de nouveaux cas. Cet aspect rend délicat leur adoption et mise en production dans le cadre d'application complètement automatisées dans des secteurs critiques comme l'aéronautique. Dans ces domaines, une vérification humaine reste essentielle afin de garantir la sécurité de ces applications, limitant ainsi le bénéfice de ce type d'approche.

En conclusion, les approches basées sur l'IA pour le traitement d'image des composites commencent à se démocratiser, offrant des avantages considérables en termes de performance et de capacité de généralisation par rapport aux méthodes traditionnelles. L'une des perspectives les plus prometteuses pour l'avenir est une intégration plus profonde de l'IA avec des modèles capables de traiter n'importe quel matériau ou résolution d'image, voire d'intégrer automatiquement les étapes de

maillage. Avec l'essor de l'IA générative, des architectures de réseaux de neurones plus avancées, pourraient émerger, apportant des solutions encore plus puissantes et flexibles. Toutefois, la nécessité de grandes quantités de données de qualité pour l'entraînement de ces modèles reste un défi majeur. De plus, dans des secteurs critiques comme l'aéronautique, une supervision humaine reste indispensable pour garantir la sécurité et la fiabilité des applications, limitant pour l'instant une adoption entièrement automatisée de ces technologies. Néanmoins, les avancées actuelles et futures offrent des perspectives prometteuses pour l'étude et l'exploitation des composites, rendant ces techniques d'analyse d'image avancées accessibles à un nombre croissant d'utilisateurs.

Références

- [1] Wintiba, Badadjida, et al. "Automated reconstruction and conformal discretization of 3D woven composite CT scans with local fiber volume fraction control." *Composite Structures* (2020).
- [2] Naouar, Naim. et al. « Meso-scale FE analyses of textile composite reinforcement deformation based on X-ray computed tomography » *Composite Structures* (2014).
- [3] Fourier, Guillaume " Modélisation numérique mésoscopique d'un composite tissé 2D avec défauts." These de l'Université technologique de Compiègne (2023)
- [4] Straumit, Ilya, Stepan V. Lomov, and Martine Wevers. "Quantification of the internal structure and automatic generation of voxel models of textile composites from X-ray computed tomography data." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (2015)
- [5] Liu, Yang, et al. "Prediction of linear and non-linear behavior of 3D woven composite using mesoscopic voxel

models reconstructed from X-ray micro-tomography." Composite structures (2017)

[6] Ali, Muhammad A., et al. "Deep learning based semantic segmentation of μ CT images for creating digital material twins of fibrous reinforcements." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (2020)

[7] Jia, Yunfa, et al. "Adopting traditional image algorithms and deep learning to build the finite model of a 2.5 D composite based on X-Ray computed tomography." Composite Structures (2021)

[8] Chen, Yihui, et al. "Generating 3D digital material twins for woven ceramic matrix composites from μ CT images." Journal of the American Ceramic Society (2022)

[9] Ali, Muhammad A., et al. "Efficient processing of μ CT images using deep learning tools for generating digital material twins of woven fabrics." Composites Science and Technology (2022)

[10] Song, Yingying, et al. "Material twins generation of woven polymer composites based on ResL-U-Net convolutional neural networks." Composite Structures (2023)

[11] Tian, Xuanxin, et al. "An efficient finite element mesh generation methodology based on μ CT images of multi-layer woven composites." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (2024)

[12] Mendoza, Arturo, Roger Trullo, and Yanneck Wielhorski. "Descriptive modeling of textiles using FE simulations and deep learning." Composites Science and Technology (2021).

[13] Allred, Aaron, et al. "Automated processing of X-ray computed tomography images via panoptic segmentation for modeling woven composite textiles." arXiv preprint (2022)

[14] Zheng, Kehong, et al. "An improved dataset augmentation approach for deep learning-based XCT images segmentation in layered composite fabric." Composite Structures (2023)

[15] Sinchuk, Yuriy, et al. "Automatic yarn path extraction of large 3D interlock woven fabrics with confidence estimation." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (2024)

[16] Doitrand, Aurelien, et al. "Mesoscale analysis of damage growth in woven composites" Composites Part A : Applied Science and Manufacturing (2016)

[17] Rassineux, Alain " Robust conformal adaptive meshing of complex textile composites unit cells" Composites Structure (2022)

L'intelligence artificielle au service des composites pour une simulation frugale, robuste et haute fidélité.

par M. El Fallaki Idrissi^{1,2}, B. Forrandiz², F. Meraghni¹, F. Chinesta², G. Chatzigeorgiou¹

1 : ILEM3 UMR CNRS 7239, 57078 Metz, France

2 : PIMM UMR CNRS 8088, Paris, France

Cet article examine le rôle de l'intelligence artificielle (IA) dans l'amélioration des outils d'analyse et de la prédiction du comportement des matériaux et la simulation des structures composites. À travers deux exemples d'application, nous montrons comment l'IA a réussi à révolutionner les outils et les approches de modélisation prédictive tout en maintenant un haut niveau de fidélité des calculs à travers les échelles du composite. Dans un premier temps, nous présentons l'IA comme une alternative

performante aux méthodes traditionnelles d'analyse par éléments finis (EF), en mettant en avant sa capacité à réduire considérablement les coûts de calcul tout en maintenant un haut niveau de précision et en respectant les principes thermodynamiques. Ensuite, nous explorons l'utilisation de l'IA dans l'analyse d'images, en exploitant les techniques d'apprentissage profond pour extraire des informations complexes à partir de données issues des techniques d'imagerie. Ceci permet une évaluation plus précise des propriétés des matériaux et de leur intégrité structurelle. Ces avancées illustrent le potentiel de l'IA à accroître l'efficacité et la précision dans la modélisation du comportement et l'analyse des réponses des matériaux et des structures composites, ouvrant la voie à des approches plus optimisées, frugales et innovantes dans ce domaine.

Introduction

Les matériaux composites sont devenus incontournables dans les applications structurales, en particulier dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile, et d'autres industries du transport [16]. Cette demande a connu une croissance significative avec l'émergence des tendances axées sur le développement durable, en particulier dans la production de véhicules électriques. Par ailleurs, pour rester compétitive dans un marché en constante évolution, l'industrie des composites doit adopter des solutions innovantes qui permettent une analyse rapide, robuste et fiable des performances structurales et des comportements des matériaux composites, favorisant ainsi l'optimisation de leurs propriétés pour répondre aux hauts niveaux exigences des applications modernes. Dans ce contexte, l'IA émerge comme un outil prometteur capable de contourner la plupart de ces défis [15]. L'IA est désormais largement utilisée à chaque étape du cycle de vie des matériaux composites, que ce soit pour la conception, l'analyse, la prédiction, la fabrication ou encore pour la surveillance de la santé structurelle (SHM). Ces modèles d'IA évoluent rapidement et s'intègrent de plus en plus dans l'industrie des composites, permettant un suivi continu de l'état d'un matériau composite tout au long de son cycle de vie. Ces avancées favorisent également le

développement de jumeaux numériques [5], offrant la possibilité d'opérer sur des représentations virtuelles et dynamiques de systèmes physiques réels. Ceci permet ainsi une modification à la volée des inputs et une optimisation robuste des performances des composites en vue d'une application donnée.

L'IA, en particulier les techniques d'apprentissage automatique et profond, constitue une alternative novatrice aux méthodes traditionnelles d'analyse par éléments finis. Ces approches permettent de prédire avec précision la réponse thermomécanique des structures composites sous diverses conditions de chargement, tout en réduisant considérablement les temps de calcul. Elles ouvrent ainsi la voie à des simulations en temps réel et à une optimisation plus efficace des composites en termes de microstructure en relation avec les procédés de fabrication. Parallèlement, les techniques d'analyse d'image pilotées par l'IA transforment les processus de contrôle qualité dans l'industrie. Elles permettent une surveillance en temps réel des structures composites, en extrayant rapidement et avec précision des informations complexes à partir de vastes ensembles de données. L'IA peut identifier des motifs, détecter des défauts et analyser les caractéristiques microstructurales des matériaux composites, offrant ainsi un outil puissant pour garantir la qualité et le suivi de l'intégrité structurelle. En intégrant ces

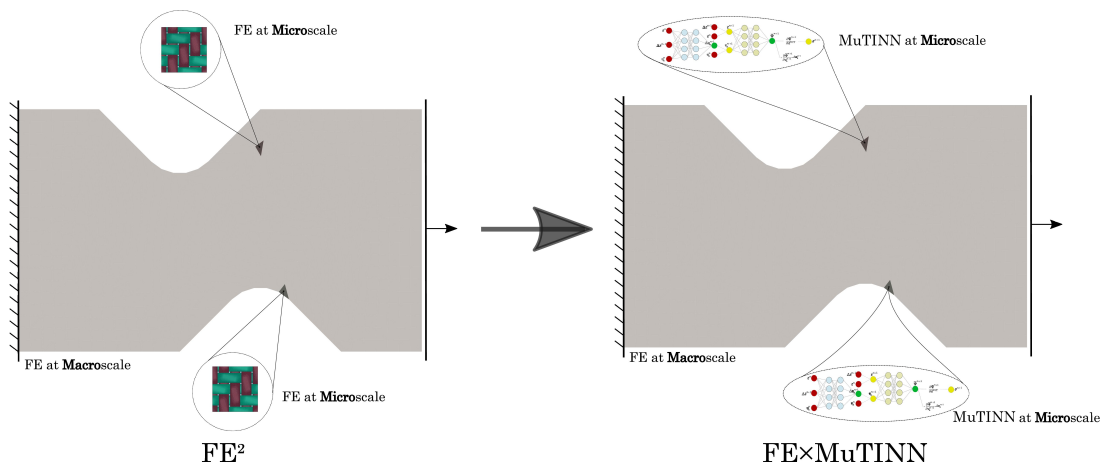


FIGURE 1 : EF² vs. EF-ANN. LA RÉPONSE MICROSCOPIQUE EST CALCULÉE PAR UN RÉSEAU DE NEURONES APPROPRIÉ. ELLE EST ENSUITE RENVOYÉE À L'ÉCHELLE MACROSCOPIQUE.

technologies avancées, l'industrie des composites peut améliorer de manière significative ses procédés de fabrication et sa réactivité face aux défis contemporains, tout en promouvant des pratiques plus durables et efficaces.

Dans cet article, nous présentons deux applications de l'IA pour les matériaux composites. Le premier exemple illustre comment l'IA peut accélérer les simulations multi-échelles en intégrant les effets de la microstructure tout en préservant une haute précision et en respectant les principes thermodynamiques. Le second exemple démontre l'utilisation de l'IA pour prédire les

champs de température dans les composites à partir des images de la microstructure des composites.

IA comme alternative aux calculs multi-échelles par EF² des composites :

Au cours des dernières années, un large éventail de techniques multi-échelles, incluant des méthodes analytiques, semi-analytiques et numériques, a été développé pour étudier les diverses formes d'hétérogénéité des composites [8,2,4]. Ces approches permettent d'acquérir une compréhension approfondie des mécanismes de déformation et phénomènes dissipatifs se

manifestant à différentes échelles, allant de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Cette connaissance est essentielle pour caractériser le comportement global des composites. Cependant, malgré les avancées continues en matière de puissance de calcul, leur application à des structures industrielles, en particulier dans le cadre des analyses de type EF² [9,22], demeure un défi majeur en raison des coûts de calcul considérables qu'elles engendrent. Pour surmonter ces obstacles, de nombreuses recherches se sont orientées vers le développement de techniques et de méthodes basées sur la réduction de modèle (MOR) et l'Intelligence Artificielle (IA) [7,18,12],[23,14]. Ces approches offrent des solutions innovantes pour traiter la complexité des matériaux composites, permettant une meilleure compréhension des phénomènes multi-échelles tout en rendant les simulations plus rapides et robustes pour des applications industrielles à grande échelle. En intégrant ces méthodologies, il devient possible de mettre en place un cadre multi-échelle sans recourir à l'approche complète EF². Dans ce cadre, des analyses par éléments finis sont menées, uniquement, à l'échelle macroscopique, tandis qu'un réseau de neurones artificiels est utilisé à chaque point de Gauss pour remplacer les calculs EF à l'échelle microscopique, comme illustré par la Figure 1.

Néanmoins, traiter des matériaux présentant des

comportements dépendants de l'histoire de chargement ou du temps représente un défi et un verrou scientifique. Dans ces cas, la prédiction de la contrainte dépend non seulement des états actuels de contrainte et de déformation, mais aussi de l'ensemble de l'histoire du chargement thermomécanique subi au point de Gauss. Pour répondre à ce défi, d'importants efforts sont actuellement consacrés au développement d'outils d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond, basés sur les données. Parmi ces méthodes, on trouve des réseaux neuronaux récurrents (RNN) et leurs variantes [12,23],[11]. Ces cadres algorithmiques agissent comme des mécanismes qui convertissent des séquences d'entrée en séquences de sortie souhaitées, dans notre contexte, correspondant aux tenseurs de déformation et de contrainte. Bien que de nombreuses études aient démontré l'efficacité des modèles basés sur les RNN pour prédire des comportements dépendant de l'histoire du chargement en utilisant uniquement des séquences de contrainte-déformation sans nécessiter de connaissance des variables d'état interne (ISVs), leur adoption généralisée dans la modélisation multi-échelles rencontre plusieurs verrous. Ceux-ci proviennent principalement de la quantité significative de données requise pour former efficacement leur architecture complexe. Ces approches sont limitées dans leur capacité à faire des prédictions robustes au-delà de

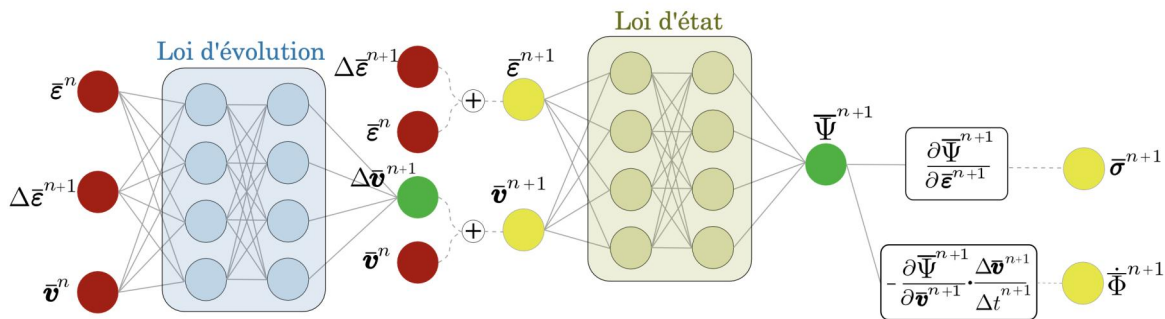


FIGURE 2 : SCHÉMA DU MODÈLE MuTINN AVEC DEUX RÉSEAUX DE NEURONES INTERCONNECTÉS TRADUISANT LES LOIS D'ÉVOLUTION ET LES LOIS D'ÉTAT THERMODYNAMIQUES.

l'ensemble de données ayant servi à leur entraînement. De plus, elles ne permettent pas de maintenir le fort contenu physique des modèles par transition d'échelles, rendant difficile les analyses associées et leurs exploitations. Ces limites constituent un problème récurrent des réseaux de neurones artificiels (ANN), souvent perçus comme des boîtes noires, ce qui entraîne une incertitude quant à leur fonctionnement interne et, par conséquent, à leur fiabilité en calcul de structures avancé. C'est pourquoi des efforts considérables ont été déployés pour développer des réseaux de neurones intégrant des considérations thermodynamiques afin de maintenir la richesse du contenu physique des modèles de comportement [17,1,6,13], plutôt que de simplement manipuler les données. L'objectif est de réduire les risques de résultats incohérents en imposant des contraintes basées

sur des lois physiques et thermodynamiques, garantissant ainsi une meilleure cohérence avec la réalité physique des phénomènes observés.

Multiscale Thermodynamics-Informed Neural Network (MuTINN)

Dans cette section, nous présentons une méthode basée sur les réseaux de neurones artificiels, développée dans [13], appelée "Multiscale Thermodynamics-Informed Neural Network" (MuTINN) (Figure 2). Cette étude propose une approche innovante exploitant les réseaux de neurones pour créer un modèle macroscopique de substitution, remplaçant ainsi les calculs par éléments finis à l'échelle microscopique dans le cadre de simulations multi-échelles.

La méthode repose sur l'utilisation de deux

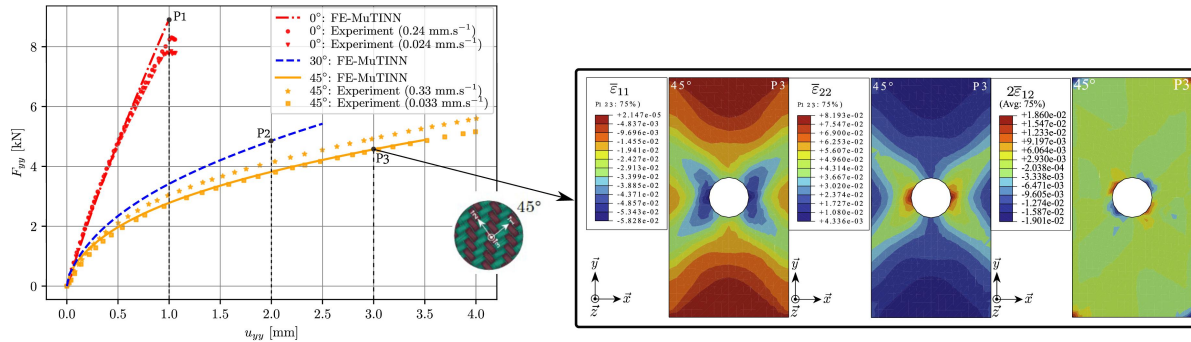


FIGURE 3 : COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION MULTI-ÉCHELLE EFXMuTNN ET LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX POUR UNE PLAQUE COMPOSITE TROUÉE RENFORCÉE PAR UN TISSAGE SERGÉ 2/2 À MATRICE POLYAMIDE : COURBE FORCE-DÉPLACEMENT (À GAUCHE) ET CHAMP DE DÉFORMATION ESTIMÉ PAR EFXMuTNN POUR UN DÉPLACEMENT APPLIQUÉ (POINT P3) AVEC UNE ORIENTATION DES RENFORTS À 45° (À DROITE).

réseaux neuronaux successifs pour formuler les lois constitutives macroscopiques, tout en intégrant les principes fondamentaux de la thermodynamique. Le premier réseau neuronal est chargé de capturer la loi d'évolution du matériau, tandis que le second définit les lois d'état thermodynamique. De plus, pour modéliser les comportements inélastiques dépendant de l'histoire, cette méthode introduit des quantités spécifiques d'intérêt en tant que variables d'état internes à l'échelle macroscopique. Ces quantités sont obtenues par une moyenne des variables d'état internes définies à l'échelle microscopique, c'est-à-dire au niveau de la cellule unitaire. Cela permet d'éviter le recours à des réseaux neuronaux de type mémoire, tels que les RNN ou à convolution CNN, en assurant le suivi indépendant de ces

quantités d'intérêt tout au long du trajet de chargement de la structure composite. Par conséquent, MuTINN garantit l'admissibilité thermodynamique et le fort contenu physique des réponses macroscopiques des composites.

Cette approche a été intégrée à un code EF, aboutissant au développement d'une nouvelle méthode multi-échelles nommée EFXMuTINN, spécifiquement conçue pour les calculs de structures composites tissées de type sergé équilibrés (2/2) ou déséquilibrés (2/3). La frugalité et la robustesse des calculs via MuTINN ont été démontrées à travers des simulations de structures composites tissées, en tenant compte de l'endommagement anisotrope des torons et du comportement élastoplastique de la matrice thermoplastique. Les résultats numériques, comparés aux données expérimentales et aux



FIGURE 4 : ÉTAPES DE LA MÉTHODE D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE PROPOSÉE. DE GAUCHE À DROITE : GÉNÉRATION DES DONNÉES BRUTES DE LA MICROSTRUCTURE, SIMULATION DES CHAMPS D'INTÉRÊT, PRÉ-TRAITEMENT DES DONNÉES ET ENTRAÎNEMENT DU MODÈLE D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE.

simulations numériques, mettent en évidence la précision prédictive de l'approche MuTINN, démontrent les capacités prédictives de l'approche MuTINN et révèlent une grande cohérence dans une large gamme de conditions de chargement complexes et non proportionnelles (Figure 3).

Des travaux futurs visent à étendre ce modèle pour l'appliquer à des comportements plus complexes, tels que le comportement avec couplage thermo-mécanique fort et un comportement viscoplastique de la matrice [3,19]. Ces avancées permettront d'améliorer davantage la précision des prédictions et d'élargir l'application de cette méthode à des systèmes composites de plus en plus sophistiqués notamment ceux ayant des renfort tissé 3D.

IA au service de l'analyse et traitement d'images :

Une autre application de l'IA dans l'analyse des

matériaux composites réside dans son utilisation comme modèle de substitution pour prédire les solutions de champ, telles que la distribution de température après un processus de chauffage, directement à partir d'une image de la microstructure. Cette approche permet de contourner les méthodes expérimentales traditionnelles, souvent longues et coûteuses, ainsi que les techniques numériques comme l'analyse par éléments finis. Celles-ci requièrent des ressources informatiques importantes lorsqu'une nouvelle microstructure doit être étudiée.

En s'appuyant sur un ensemble de données constitué d'images de microstructures et de leurs champs de solutions correspondants, un modèle d'apprentissage automatique peut être entraîné à cartographier efficacement les caractéristiques microstructurales vers le champ de sortie souhaité (Figure 4). Cette méthode offre une alternative plus rapide et moins coûteuse en termes de calcul pour générer des solutions de

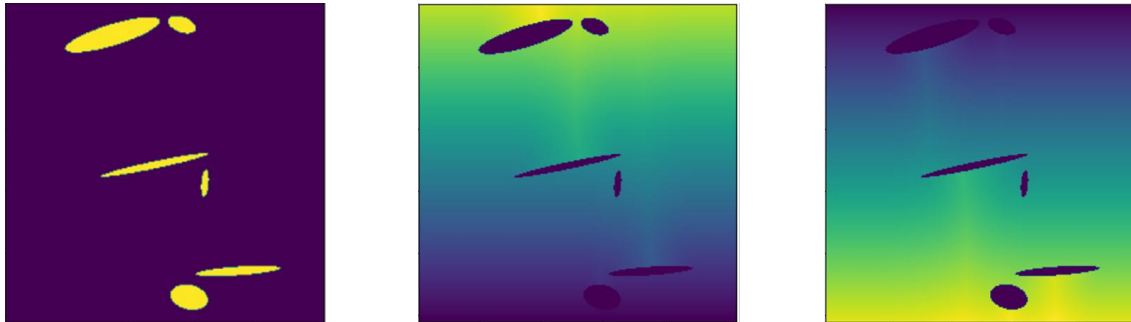


FIGURE 5 : EXEMPLE DE MICROSTRUCTURE D'UN MATÉRIAU COMPOSITE (À GAUCHE). TRANSFORMÉE EN TEMPS DE PARCOURS DES LIMITES INFÉRIEURE ET SUPÉRIEURE (AU CENTRE ET À DROITE).

champ, ouvrant de nouvelles voies à l'analyse en temps réel et à l'optimisation des matériaux composites.

Une application spécifique pourrait être la résolution d'équations générales de diffusion, comme dans un problème thermique. Ici, la transformée en temps de parcours est utilisée pour améliorer la précision, comme cela a été démontré dans des recherches antérieures [20]. Cette approche estime le temps de parcours minimum entre chaque point et la limite inférieure ou supérieure en fonction de la carte de vitesse correspondante (Figure 5).

Les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) [10,21], en particulier les architectures U-Net (Figure 6), sont bien adaptés à l'analyse d'images, excellant à capturer les modèles macroscopiques et microscopiques dans les données. Grâce à leur structure hiérarchique, les informations circulent par sauts de connexion de

chaque étape de l'encodeur au décodeur, ce qui permet au réseau de faire la différence entre les caractéristiques macroscopiques significatives et les détails plus fins.

Dans ce cadre, un réseau convolutionnel U-Net est entraîné en utilisant les images transformées comme entrées pour prédire le champ résultant comme sortie. Une bonne précision est obtenue entre les champs prédits et les champs souhaités.

Perspectives

Cet article aborde deux thématiques majeures de l'application de l'intelligence artificielle dans le domaine des composites. Premièrement, il explique comment l'IA a permis de surmonter le coût élevé des calculs multi-échelles des composites, en offrant des solutions plus rapides et efficaces pour modéliser le comportement complexe de ces matériaux. Ces modèles basés

sur l'IA sont capables de prendre en compte les effets de la microstructure tout en préservant les principes physiques fondamentaux, tels que l'admissibilité thermodynamique, assurant ainsi des prédictions à la fois précises et physiquement cohérentes. Deuxièmement, l'article explore la manière dont les outils d'IA sont utilisés pour l'analyse et le traitement d'images, permettant ainsi la détection automatisée et l'identification des défauts, ainsi qu'un examen approfondi des caractéristiques microstructurales des matériaux composites. Cette capacité d'analyse d'image accélère considérablement le contrôle qualité, améliore la fiabilité des matériaux produits et permet un suivi en temps réel des processus de fabrication. Ces

progrès soulèvent de nouvelles questions sur la capacité de l'IA à relever des défis encore plus complexes, notamment en matière de Generative Design. Ce domaine pourrait révolutionner la conception des composites en générant des solutions innovantes qui englobent toutes les étapes, depuis le design jusqu'à la fabrication, ouvrant ainsi la voie à des matériaux plus performants et personnalisés pour des applications industrielles variées.

Références

[1] Faisal As'ad and Charbel Farhat. A mechanics-informed deep learning framework for data-driven nonlinear viscoelasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 417:116463, 2023

[2] Pedro Ponte Castaneda and Pierre Suquet. Nonlinear composites. *Advances in applied mechanics*, 34:171–302,

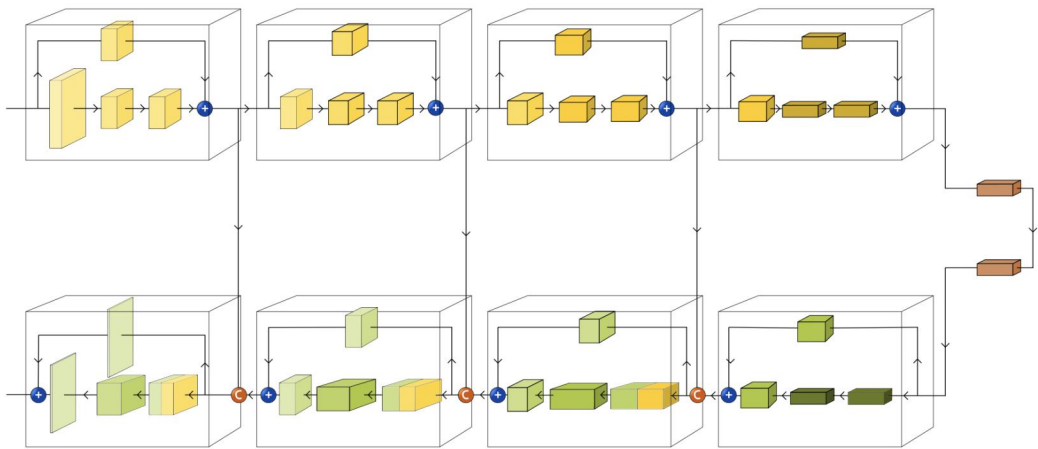


FIGURE 6 : EXEMPLE DE RÉSEAU CONVOLUTIONNEL U-NET AVEC BLOCS RÉSIDUELS. LES INFORMATIONS CIRCULENT ENTRE LES ÉTAPES DU CODEUR ET DU DÉCODEUR VIA LES CONNEXIONS DE SAUT.

1997

[3] George Chatzigeorgiou, Nicolas Charalambakis, Yves Chemisky, and Fodil Meraghni. Periodic homogenization for fully coupled thermomechanical modeling of dissipative generalized standard materials. *International Journal of Plasticity*, 81:18–39, 2016.

[4] George Chatzigeorgiou, Fodil Meraghni, and Nicolas Charalambakis. Multiscale modeling approaches for composites. Elsevier, 2022.

[5] Francisco Chinesta, Elias Cueto, Emmanuelle Abisset-Chavanne, Jean Louis Duval, and Fouad El Khaldi. Virtual, digital and hybrid twins: a new paradigm in data-based engineering and engineered data. *Archives of computational methods in engineering*, 27:105–134, 2020.

[6] Elias Cueto and Francisco Chinesta. Thermodynamics of learning physical phenomena. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(8):4653–4666, 2023.

[7] Mohammed El Fallaki Idrissi, Francis Praud, Victor Champaney, Francisco Chinesta, and Fodil Meraghni. Multiparametric modeling of composite materials based on non-intrusive pgd informed by multiscale analyses: Application for real-time stiffness prediction of woven composites. *Composite Structures*, 302:116228, 2022.

[8] John Douglas Eshelby. The continuum theory of lattice defects. In *Solid state physics*, volume 3, pages 79–144. Elsevier, 1956.

[9] Frédéric Feyel and Jean-Louis Chaboche. Fe2 multiscale approach for modelling the elastoviscoplastic behaviour of long fibre sic/ti composite materials. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 183(3-4):309–330, 2000.

[10] Stephan Gärttner, Faruk O Alpak, Andreas Meier, Nadja Ray, and Florian Frank. Estimating permeability of 3d micro-ct images by physics-informed cnns based on dns. *Computational Geosciences*, 27(2):245–262, 2023.

[11] Ehsan Ghane, Martin Fagerström, and Mohsen Mirkhalaf. Recurrent neural networks and transfer learning for elasto-plasticity in woven composites. *arXiv preprint arXiv:2311.13434*, 2023.

[12] F Ghavamian and A Simone. Accelerating multiscale finite element simulations of history-dependent materials using a recurrent neural network. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 357:112594, 2019.

[13] M El Fallaki Idrissi, Francis Praud, Fodil Meraghni, Francisco Chinesta, and George Chatzigeorgiou. Multiscale thermodynamics-informed neural networks (mutinn) towards fast and frugal inelastic computation of woven composite

structures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 186:105604, 2024.

[14] Jindong Jiang, Jiajun Wu, Qiang Chen, George Chatzigeorgiou, and Fodil Meraghni. Physically informed deep homogenization neural network for unidirectional multiphase/multi-inclusion thermoconductive composites. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 409:115972, 2023.

[15] Xin Liu, Su Tian, Fei Tao, and Wenbin Yu. A review of artificial neural networks in the constitutive modeling of composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 224:109152, 2021.

[16] Pankar K Mallick. *Materials, manufacturing, and design*. Mechanical Engineering (Marcel Dekker, Inc.), 83:74–81, 2007.

[17] Filippo Masi, Ioannis Stefanou, Paolo Vannucci, and Victor Maffi-Berthier. Thermodynamics-based artificial neural networks for constitutive modeling. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 147:104277, 2021.

[18] Sondes Metoui, Etienne Pruliere, Amine Ammar, Frédéric Dau, and Ivan Iordanoff. A multiscale separated representation to compute the mechanical behavior of composites with periodic microstructure. *Mathematics and Computers in Simulation*, 144:162–181, 2018.

[19] Francis Praud, George Chatzigeorgiou, and Fodil Meraghni. Fully integrated multi-scale modelling of damage and time dependency in thermoplastic-based woven composites. *International Journal of Damage Mechanics*, 30(2):163–195, 2021.

[20] Javier E Santos, Duo Xu, Honggeun Jo, Christopher J Landry, Masa Prodanovic, and Michael J Pyrcz. Poreflow-net: A 3d convolutional neural network to predict fluid flow through porous media. *Advances in Water Resources*, 138:103539, 2020.

[21] Pengfei Tang, Dongxiao Zhang, and Heng Li. Predicting permeability from 3d rock images based on cnn with physical information. *Journal of Hydrology*, 606:127473, 2022.

[22] E Tikarrouchine, Adil Benaarbia, George Chatzigeorgiou, and Fodil Meraghni. Non-linear fe2 multiscale simulation of damage, micro and macroscopic strains in polyamide 66-woven composite structures: Analysis and experimental validation. *Composite Structures*, 255:112926, 2021.

[23] Ling Wu, Nanda Gopala Kilingar, Ludovic Noels, et al. A recurrent neural network-accelerated multi-scale model for elasto-plastic heterogeneous materials subjected to random cyclic and non-proportional loading paths. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 369:113234, 2020.

L'intelligence artificielle pour le suivi de l'intégrité structurelle d'un matériau

par Antonio Peña Corredor¹ et Andrés Lombana²

1 : IRT Saint Exupéry, Toulouse

2 : IRT Saint Exupéry, Bordeaux

A travers trois exemples d'application sur des matériaux composites à matrice céramique, l'IRT Saint Exupéry illustre l'utilisation de modèles de Machine Learning pour le suivi de l'endommagement du matériau en service, le contrôle du procédé d'élaboration et la détection automatique des défauts de fabrication.

Apprentissage automatique des modes d'endommagement

L'émission acoustique (EA) est un phénomène physique qui se produit lorsqu'un matériau subit des contraintes mécaniques, provoquant la libération d'ondes sonores. Dans le contexte de l'étude des composites à matrice céramique oxydes, l'émission acoustique est utilisée pour analyser la cinétique d'endommagement de ces

matériaux sous contraintes mécaniques. En effet, les hétérogénéités présentes dans la microstructure de ces matériaux, telles que les fissures préexistantes et les porosités, peuvent favoriser l'apparition et la propagation de mécanismes d'endommagement conduisant à la ruine du matériau [1,2].

Grâce au suivi de l'émission acoustique lors des essais mécaniques, il est possible de relier les comportements mécaniques obtenus à l'échelle macroscopique avec les observations obtenues à l'échelle microscopique [3]. Les signaux d'émission acoustique sont ainsi utilisés pour détecter les sources de dégradation du matériau et pour établir des scénarios d'endommagement pour chaque nuance de composite oxyde.

Les signaux acoustiques générés sont une superposition complexe de plusieurs phénomènes physiques, rendant leur interprétation directe difficile. Afin d'extraire des informations pertinentes de ces signaux, nous avons mis en place une méthode d'analyse en deux étapes. Tout d'abord, les données brutes

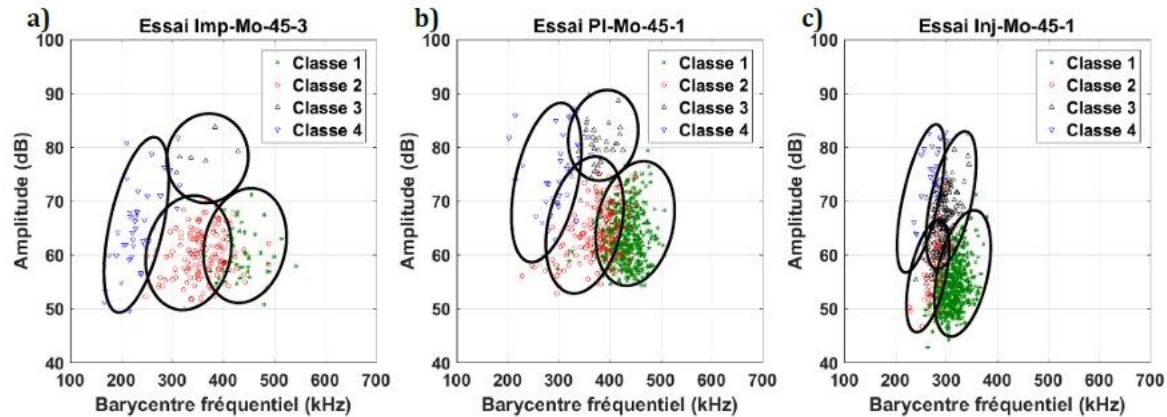


FIGURE 1 : RÉPARTITION DES CLASSES DANS LE PLAN AMPLITUDE-BARYCENTRE FRÉQUENTIEL LORS DE PARTITION À 4 CLASSES POUR 3 ESSAIS DE TRACTION À $\pm 45^\circ$ PAR RAPPORT À L'AXE DES FIBRES ; POUR TROIS ESSAIS DIFFÉRENTS.

sont soumises à un processus de filtrage. Ensuite, des "descripteurs" sont calculés à partir des signaux filtrés, correspondant à des quantités définies qui caractérisent les propriétés temporelles et spectrales des signaux acoustiques. Ces descripteurs sont ensuite utilisés comme entrées dans un algorithme de partitionnement des données (clustering), permettant d'identifier des distributions de modes de rupture spécifiques aux différents mécanismes d'endommagement qui se produisent au sein du matériau. En effet, les profils de rupture obtenus à partir de ces distributions fournissent une représentation probabiliste des différents scénarios d'endommagement possibles (cf. Figure 1).

L'algorithme de partitionnement a permis

d'identifier quatre classes distinctes de mesures en fonction de leurs propriétés temporelles et fréquentielles. Des analyses microstructurales approfondies, réalisées à l'aide de techniques variées (microscope, MEB in-situ et synchrotron), ont révélé des différences significatives dans les modes de rupture associés à chaque classe (cf. Figure 2). Plus précisément, deux classes correspondent à des délaminages, une autre à des fissurations matricielles et la dernière à des décohésions entre fibres et matrice.

La méthode développée dans ce travail est un exemple de l'efficacité du Machine Learning pour analyser les signaux acoustiques générés par les composites à matrice céramique. En effet, sans aucune information a priori sur la

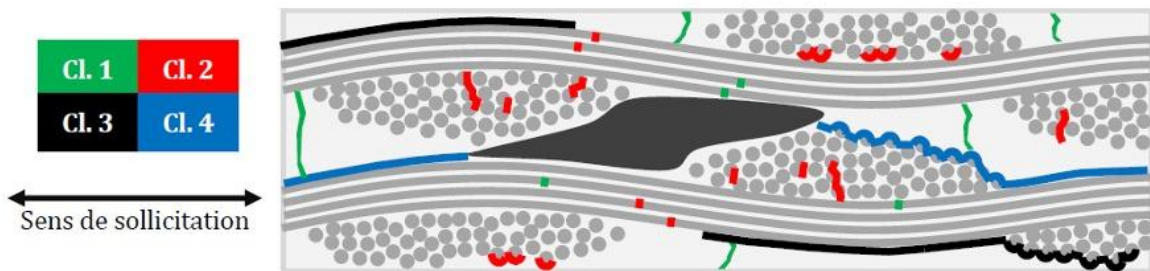


FIGURE 2 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES MÉCANISMES D'ENDOMMAGEMENT AVEC LES CLASSES ASSOCIÉES ; CLASSE 1 – VERT : FISSURATIONS MATRICIELLES ET RUPTURES DE FIBRES, CLASSE 2 – ROUGE : DÉCOHÉSIONS INTER-FILS ET INTRA-FILS ET RUPTURES DE FIBRES, CLASSE 3 – NOIR : DÉLAMINAGES SUR PLIS PEU ENDOMMAGÉS, CLASSE 4 – BLEU : DÉLAMINAGES SUR PLIS ENDOMMAGÉS OU PEU INFILTRÉS

microstructure du matériau, l'algorithme de partitionnement est capable d'identifier des classes distinctes de mesures en fonction de leurs propriétés temporelles et fréquentielles, correspondant à des modes de rupture spécifiques. En résumé, ce cas d'application démontre comment l'apprentissage automatique peut relier des comportements macroscopiques avec les observations microscopiques sans aucune intervention humaine, permettant ainsi d'accéder à des informations complexes qui seraient autrement difficiles à obtenir.

Contrôle d'un procédé de Siliciuration par analyse vidéo et apprentissage automatique

Les composites à matrice céramique (CMC) présentent d'excellentes propriétés mécaniques à des températures allant jusqu'à 1400°C, les

rendant idéaux pour des applications dans les parties chaudes de composants aéronautiques et spatiaux [4].

Ces matériaux bénéficient de la structure légère d'un matériau tissé avec une matrice céramique. Afin d'améliorer encore leurs propriétés mécaniques, les porosités peuvent être remplies par Siliciuration. Un tel procédé consiste à fondre du silicium dans un four sous vide à plus de 1400°C, la pièce composite étant ensuite plongée pour que le silicium liquide remplisse les porosités par capillarité (cf. Figure 3).

Au sein de l'IRT Saint Exupéry, nous avons développé un montage pour suivre in-situ le procédé d'infiltration à l'aide d'une caméra. Les données issues du four et de la caméra sont analysées à l'aide d'algorithmes de traitement de données. Dans le cas de la caméra, les changements de contraste sont identifiés et

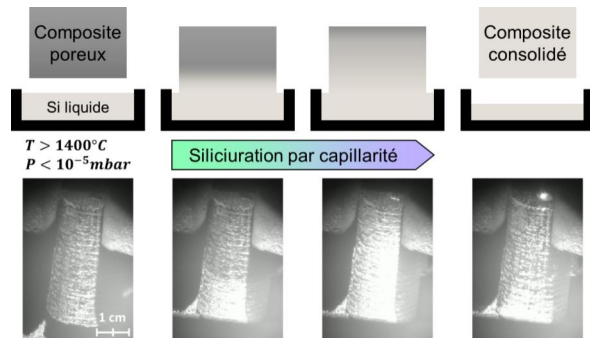


FIGURE 3 : PROCÉDÉ DE SILICIURATION PAR INFILTRATION.

transformés en un signal cumulé. Ce dernier est ensuite dérivé pour extraire une série de variables ou descripteurs. D'autres descripteurs sont également extraits à partir des signaux du four (cf. Figure 4).

Ensuite, des algorithmes de classification par apprentissage automatique (machine learning) sont utilisés sur ces descripteurs afin d'identifier correctement les événements d'intérêt, tels que le début et la fin de Siliciuration, et de les séparer des artefacts (instabilité des images, phénomènes parasites). Ces algorithmes rapides (decision tree, SVC) permettent d'informer en temps réel et avec des performances élevées (accuracy = 0.96) sur le déroulement du procédé. De plus, il est possible de les entraîner avec relativement peu de données (30 expériences donnant 230 échantillons) [5].

Les perspectives futures de ces travaux incluent

le développement d'interfaces d'information et d'aide à la décision, ainsi que la recherche d'autres descripteurs en lien avec les analyses de santé matière qui pourraient initier des actions correctives dans l'optique d'un contrôle automatisé du procédé.

Détection automatique de défauts en tomographie

Dans les matériaux composites, des défauts structuraux tels que les macroporosités, délaminages ou défauts de matriçage sont courants et peuvent résulter de divers facteurs tels que les conditions de fabrication, les propriétés des matériaux constitutifs ou les contraintes mécaniques subies [6]. Leur présence peut entraîner une baisse significative des performances mécaniques, compromettant ainsi leur fiabilité et leur durée de vie [7]. Par conséquent, la détection et la caractérisation précises de ces défauts sont essentielles pour garantir la qualité et la sécurité des pièces.

À cet égard, les caractérisations non destructives (CND) offrent un avantage considérable en permettant d'inspecter l'état intérieur des pièces sans altérer leur intégrité structurelle [8]. La tomographie, en particulier, est une technique CND qui permet de reconstruire des images tridimensionnelles de la structure interne des matériaux, offrant ainsi une représentation détaillée de l'état des défauts

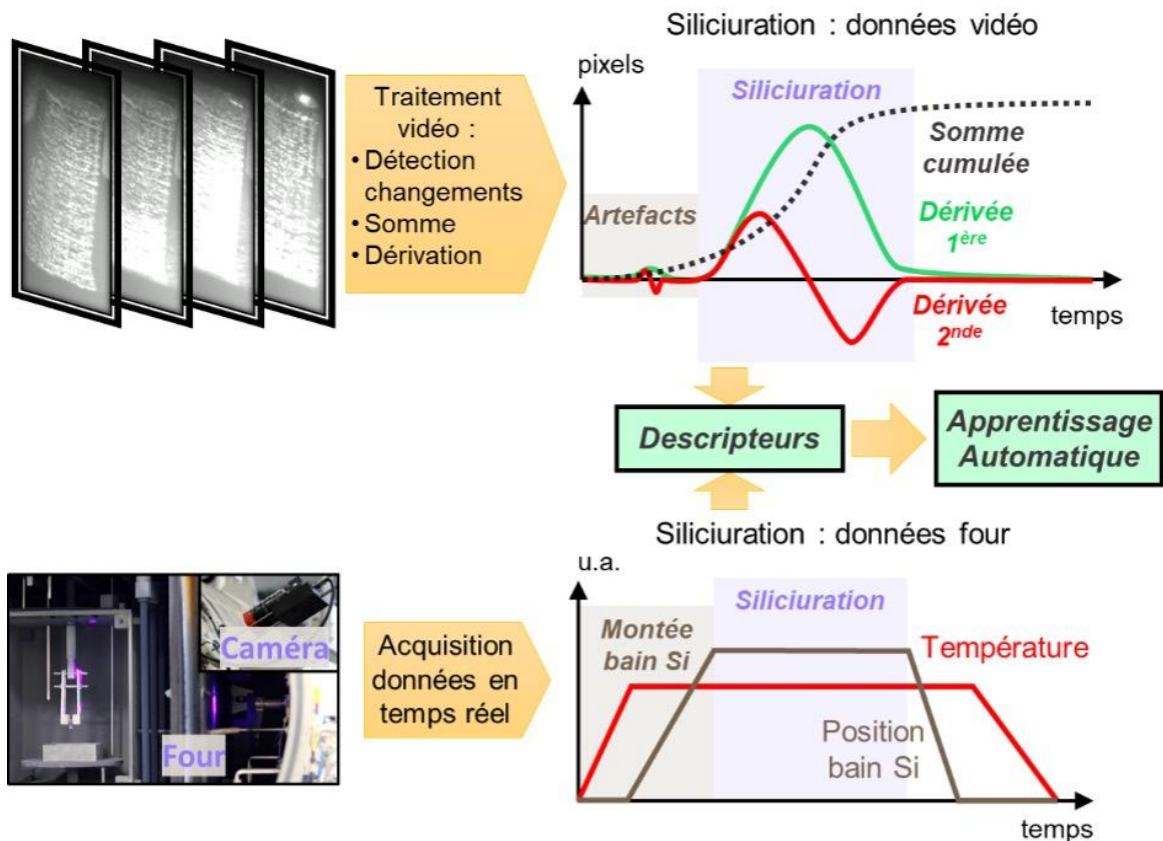


FIGURE 4 : ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES DU PROCÉDÉ POUR APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE.

présents. Cependant, l'analyse manuelle des images tomographiques peut être fastidieuse et sujette à des erreurs d'interprétation. L'utilisation de méthodes de détection automatique de défauts en tomographie s'avère donc nécessaire pour accélérer le processus d'inspection et

améliorer la fiabilité des résultats.

Nous avons développé un processus innovant de traitement automatique d'images de tomographie, comme la Figure 5 montre. Ce processus débute par une étape de segmentation des images, où les voxels acquis

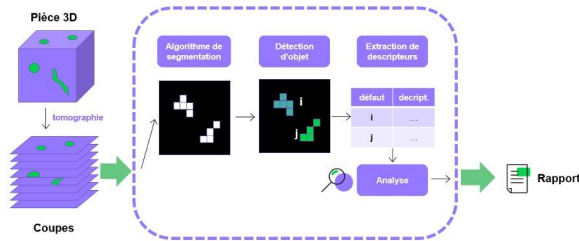


FIGURE 5 : PROCESSUS D'ANALYSE AUTOMATIQUE D'IMAGES TOMOGRAPHIQUES : DE L'ACQUISITION DE L'IMAGE À L'OBTENTION D'UN RAPPORT.

sont binarisés en tant que défaut ou non-défaut à l'aide d'un réseau de neurones de type « unet3D », largement utilisé dans le domaine de l'imagerie médicale [9]. Cette étape permet de différencier efficacement les régions présentant des anomalies par rapport aux zones saines.

Ensuite, nous utilisons un algorithme de détection d'objets pour relier les voxels appartenant au même défaut. Les défauts détectés sont alors étudiés en fonction de caractéristiques morphologiques et d'intensité spécifiques, appelées « descripteurs ». Ces descripteurs permettent de classifier les défauts en catégories préétablies à l'aide d'un réseau de neurones. Enfin, une analyse approfondie des défauts détectés est réalisée, permettant de générer un rapport détaillé qui sera ensuite exploité par un expert du domaine.

En résumé, notre processus innovant de traitement automatique d'images de tomographie permet d'accélérer l'inspection des matériaux

composites et d'améliorer la fiabilité des résultats. Il offre une solution efficace pour détecter et caractériser les défauts structuraux, contribuant ainsi à améliorer la qualité et la sécurité de ces matériaux.

Références

- [1] Godin, N., Reynaud, P., Fantozzi, G. (2022). AE in Ceramics and Ceramic Matrix Composites. In: Grosse, C.U. et al. (eds) Acoustic Emission Testing. Springer
- [2] Tulshibagwale N., Brodnik N., Muir C. et al., Acoustic Emission in Ceramic Matrix Composites. ASME. Appl. Mech., Rev. July 2024; 76(4)
- [3] Brunner AJ. Structural Health and Condition Monitoring with Acoustic Emission and Guided Ultrasonic Waves: What about Long-Term Durability of Sensors, Sensor Coupling and Measurement Chain? Applied Sciences. 2021; 11(24)
- [4] Krenkel, Walter, ed. Ceramic matrix composites: fiber reinforced ceramics and their applications. John Wiley & Sons, 2008
- [5] A. Lombana et al, Melt-infiltration monitoring by visual methods at high-temperatures, HT-CMC 11, Jeju, 2023
- [6] Heslehurst, R.B. (2014). Defects and Damage in Composite Materials and Structures (1st ed.). CRC Press
- [7] Shigang A., Daining F., Rujie H., Effect of manufacturing defects on mechanical properties and failure features of 3D orthogonal woven C/C composites, Comp. Part B: Eng., 2015; 71:113
- [8] Withers, P.J., Bouman, C., Carmignato, S. et al. X-ray computed tomography. Nat Rev Methods Primers 1, 18 (2021)
- [9] Cai, Y., Long, Y., Han, Z. et al. Swin Unet3D: a three-dimensional medical image segmentation network combining vision transformer and convolution. BMC Med Inform Decis Mak 23, 33 (2023)

Vie des Labo - LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, UMR 9026

par Federica DAGHIA

LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, UMR 9026

federica.daghia@ens-paris-saclay.fr

Le Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay (LMPS) est né le 1er janvier 2022 de la fusion de deux laboratoires de mécanique du périmètre de l'Université Paris-Saclay : le Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT) et le Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux (MSSMat). Situé de part et d'autre de l'avenue des Sciences à Gif-sur-Yvette, sur le Plateau de Saclay, il a comme tutelles CentraleSupélec, l'ENS Paris-Saclay et le CNRS (UMR 9026). Il bénéficie ainsi du riche écosystème de l'Université Paris-Saclay, avec ses facultés, écoles et centres de recherche (Onera, CEA, ...).

Comprenant environ 220 personnels, dont la moitié de doctorants et post-doctorants, cette nouvelle unité de recherche, dédiée à l'expérimentation, à la modélisation et à la simulation en mécanique des solides, vise à contribuer à relever les défis dans les domaines stratégiques du

développement durable, de la gestion du risque, du transport, de la santé ainsi que de l'IA et de la science des données. Le LMPS est structuré en quatre équipes de recherche.

Équipe COMMET : Comportement des Matériaux, Modélisation, Expérimentation et Théorie

L'équipe COMMET vise à développer des outils pour observer et quantifier les mécanismes de déformation, d'endommagement et de rupture des matériaux et des structures. Ces outils comprennent des modèles mathématiques fiables de comportement mécanique, adaptés aux besoins industriels et capables de prédire la performance des matériaux dans diverses conditions. L'équipe utilise des techniques expérimentales avancées allant de la microscopie électronique à l'échelle de la microstructure à des méthodes d'imagerie de structures plus larges. Les expériences couvrent une large gamme de chargements et de conditions, de la fatigue à sollicitations multiphysiques. L'approche intègre également des mesures de champs, une modéli-

sation multiéchelle, des couplages multiphysiques et la prise en compte des transformations métallurgiques, de l'anisotropie et de l'endommagement des matériaux. L'équipe accorde une importance particulière à l'application pratique de ces modèles aux besoins de ses partenaires industriels, assurant ainsi une utilisation efficace des résultats de la recherche.

Équipe MILA : Milieux Architecturés

L'équipe MILA se concentre sur l'étude des matériaux et structures dont les propriétés résultent de leur organisation interne. Les recherches portent sur divers niveaux d'organisation, notamment la biofabrication et la régénération des os et des dents, l'inclusion de nano-renforts dans les matériaux composites, les assemblages de filaments et les composites pour les secteurs du transport et de l'énergie. L'objectif est de comprendre les comportements macroscopiques résultant des interactions entre les composants à différentes échelles. Les enjeux sociétaux incluent la santé, le stockage d'énergie, l'amélioration des propriétés spécifiques et la réduction des marges de dimensionnement. Pour élaborer et étudier ces matériaux architecturés, l'équipe développe des méthodes d'élaboration, de caractérisation expérimentale, de modélisation et de simulation numérique. La complexité des milieux architecturés nécessite souvent des approches novatrices pour comprendre les

mécanismes et caractériser les effets sur les propriétés.

Équipe OMEIR : Ouvrages, Matériaux, Environnement : Interactions Et Risques

L'équipe OMEIR s'intéresse au domaine de la construction au sens large (bâtiment, ouvrages, travaux publics, génie civil...). Les défis abordés par l'équipe dans ce contexte concernent la réduction de l'empreinte écologique des ouvrages, l'évaluation et la réduction de la vulnérabilité des constructions face aux aléas, et la transition vers des jumeaux numériques pour une modélisation avancée. Ces défis impliquent des échelles temporelles et spatiales variées, des comportements matériels à différentes échelles et des interactions complexes avec l'environnement. La transition climatique future accentuera les risques naturels, nécessitant une évaluation fine des risques et une refonte des méthodes de sûreté. Les jumeaux numériques et les expérimentations avancées sont identifiés comme des solutions potentielles pour mieux anticiper et maîtriser les risques. L'équipe cherche à contribuer à la transition énergétique, écologique et numérique en réunissant des expertises variées allant des matériaux de construction à la modélisation physique, les approches expérimentales et les simulations numériques avancées.

Équipe STAN : Science et Techniques Avancées en mécanique Numérique

L'équipe STAN se spécialise dans la modélisation et la simulation en sciences de l'ingénierie mécanique, en intégrant des disciplines classiques et émergentes telles que les sciences des matériaux et l'IA. Les démarches mises en œuvre visent à répondre aux grands défis sociétaux en développant des stratégies de calcul adaptées aux besoins industriels, en s'appuyant sur l'analyse physique et en développant des stratégies innovantes. Les objectifs incluent l'avancement des sciences mécaniques à travers la recherche fondamentale et appliquée, toutes deux essentielles pour comprendre les systèmes complexes et relever les défis dans des domaines variés comme la santé, l'énergie, la transition écologique. Ils visent également à contribuer à la conception industrielle en répondant à des exigences croissantes en termes de sécurité, durabilité et coût, en développant des méthodes d'aide à la décision pour optimiser les structures et systèmes complexes. Les compétences de l'équipe combinent l'analyse physique, la modélisation mathématique et les techniques avancées de simulation numérique, permettant d'aborder un large éventail de sujets en sciences mécaniques.

Les activités du LMPS en lien avec les milieux fibreux et les matériaux composites sont portées principalement par l'équipe MILA, mais se développent aussi dans les autres équipes du laboratoire. Elles sont en lien fort avec les besoins industriels, notamment grâce à de partenariats de longue date. On peut citer notamment le Laboratoire Commun Complnnov, avec le CETIM et le GeM de Nantes, qui s'intéresse aux composites à matrice thermoplastique fabriqués avec des nouveaux procédés à grandes cadences ; le Laboratoire Commun SteerLab, avec Michelin, dont les actions se poursuivent autour de la caractérisation, modélisation et simulation des pneus, composites à matrice élastomère et renforts fibreux ; les nombreux travaux communs avec Safran, l'Onera et le CEA autour de la caractérisation, modélisation et simulation de différents matériaux et structures complexes. Quelques exemples d'axes de recherche récents sont illustrés par la suite, sans prétention d'être exhaustifs.

Les milieux fibreux posent des nombreux défis, tant du point de vue de la modélisation/simulation que de l'expérimentation (Fig. 1). Le logiciel dédié Multifil est développé depuis plusieurs années au LMPS. Avec ses éléments de poutre performants et sa résolution implicite de problèmes fortement non-linéaires, il permet de simuler différents procédés de mise en forme des milieux fibreux. Ses applications vont des ren-

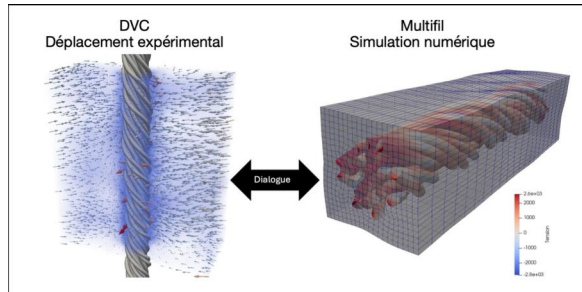


FIGURE 1 : CÂBLE GOMMÉ DANS UN PNEU – MESURE DU CHAMP DE DÉPLACEMENT PAR DVC, SIMULATION NUMÉRIQUE PAR MULTIFIL [5]

forts textiles utilisés dans les pneus Michelin et dans les aubes fan Safran jusqu'à la structure complexe des supraconducteurs. D'autres approches de modélisation, simplifiées, sont mises en œuvre pour la simulation en service de câbles en cas de faible glissement entre les fibres. Du point de vue expérimental, des solutions originales sont développées pour la sollicitation de ces objets élancés, et des mesures

riches sont obtenues au LMPS grâce aux moyens d'observations disponibles et aux développements originaux autour de la corrélation d'images volumiques (Fig. 1)

L'activité de recherche sur les matériaux et structures composites constitue un volet historique des activités du LMPS. Les activités récentes s'articulent principalement autour des composites à matrice thermoplastique, avec des problématiques engendrées par le développement au CETIM de nouveaux procédés à grandes cadences, ainsi que sur la prise en compte de microstructures de plus en plus complexes, comme les tissés 3D ou les bobinages des réservoirs, où la séparation d'échelles est de moins en moins évidente. Là aussi, les travaux menés allient approches de modélisation et simulation dédiés (Fig. 2) et développements expérimentaux de pointe (Fig. 3). Les modèles

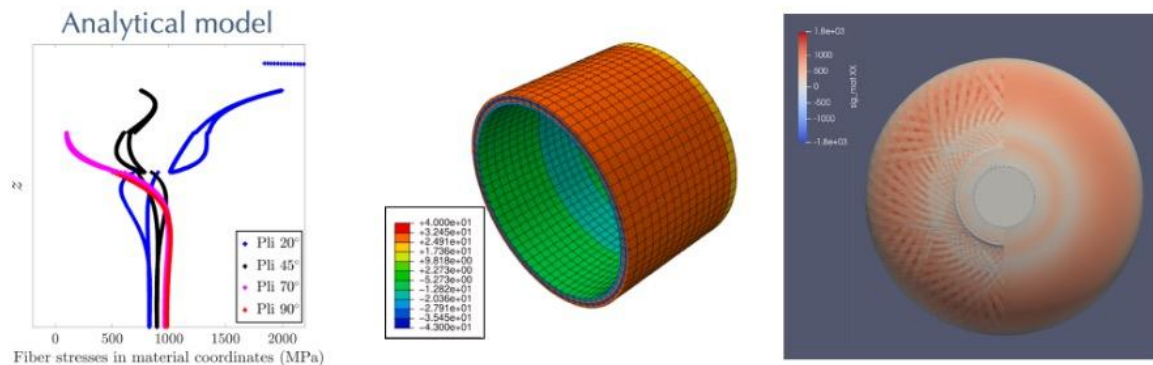


FIGURE 2 : SIMULATIONS À DIFFÉRENTS NIVEAUX DE COMPLEXITÉ POUR UN RÉSERVOIR EN COMPOSITE BOBINÉ [1] [2] [4]

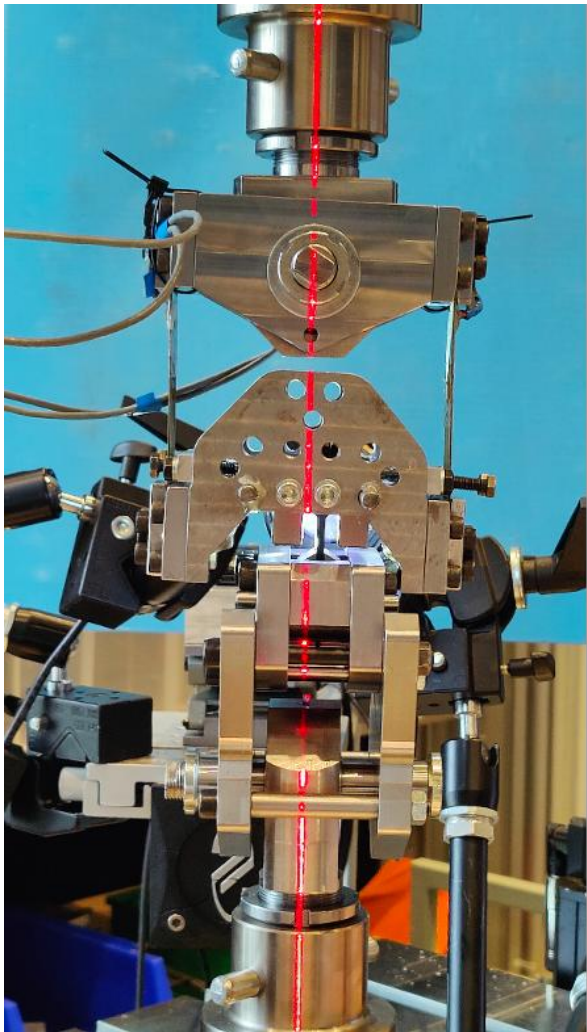


FIGURE 3 : MONTAGE ISOSTATIQUE POUR ESSAI D'ARRACHEMENT DE JOINTS EN T – EXEMPLE DE CHARGEMENT AVEC DÉALIGNEMENT MAÎTRISÉ [6]

développés permettent de décrire les objets d'études avec des niveaux croissants de complexité, en redéfinissant les échelles « matériau » et « structure » en fonction de la richesse des détails et du type de comportement visés (élasticité, visco-élasticité, endommagement, rupture...). L'utilisation de l'IA pour l'apprentissage du niveau de complexité pertinent est également en cours d'exploration. Les développements expérimentaux, quant à eux, portent sur des montages permettant une maîtrise fine des conditions aux limites imposées à ces objets très anisotropes, ainsi que sur des utilisations originales des mesures de champs pour l'identification d'anomalies de tissage ou de contraintes résiduelles (Fig 2 & 3).

D'autres objets aux architectures complexes sont étudiés au LMPS. Pour les tissus biolo-

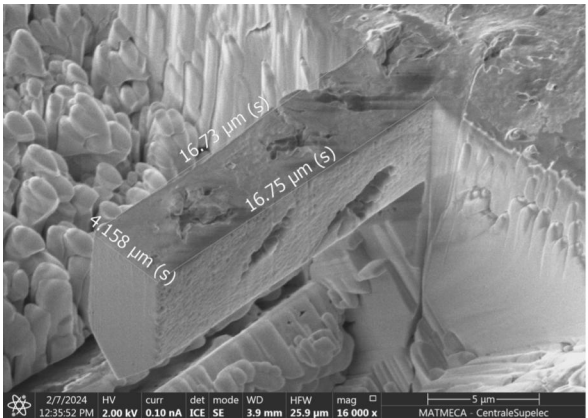


FIGURE 4 : MICROPOUTRE DE DENTINE USINÉE AU FIB POUR ESSAIS DE MICROTÉNACITÉ [7]

giques, principalement durs (os, dent – voir Fig. 4), les défis abordés portent sur la caractérisation expérimentale de la microstructure aux différentes échelles, sur la compréhension du lien avec les propriétés mécaniques, qui peuvent varier en fonction du patient. Pour les nanocomposites (Fig. 5), il s'agit de l'élaboration de renforts à base de CNT permettant de fournir aux composites des nouvelles propriétés fonctionnelles comme la conductivité électrique et la capacité de capter et stocker de l'énergie. Pour les matériaux lattice issus de l'impression 3D, les objectifs vont de la génération de microstructures pertinentes à leur caractérisation expérimentale originale via des sollicitations multiaxiales ou des essais in situ (Fig. 4 & 5).

Références

[1] Daghia F, Baranger E, Tran D-T, Pichon P, "A hierarchy of models for the design of composite pressure vessels", *Composite Structures* 235:111809. 2020.

[2] Di Gennaro L, Daghia F, Olive M, Jacquemin F, Espinassou D, "A new mechanism-based temperature-dependent viscoelastic model for unidirectional polymer matrix composites based on Cartan decomposition", *European Journal of Mechanics A/Solids* 90:104364. 2021.

[3] He D, Fan B, Zhao H, Yang M, Bai J, "Design of Electrically Conductive Structural Composites by Modulating Aligned CVD-Grown Carbon Nanotube Length on Glass Fibers", *Applied Materials & Interfaces* 9:2948-2958. 2017.

[4] Landron G, Rassineau A, Fagiano C, Baranger E, Bovet C, Hirsekorn M, Espinassou D. "Geometrical validation of a laying trajectory based tape-scale mesh generation tool for hydrogen pressure vessel modeling", 21st European Conference on Composite Materials (ECCM21), Nantes, France. 2024.

[5] Poussard V, Gandiolle C, Durville D, "Couplage de maillages incompatibles 1D-3D pour la simulation de câbles gommés." 16ème Colloque National en Calcul de Structures. 2024.

[6] Song X, "Caractérisation des jonctions composites thermoplastiques surmoulées et méthode de dimensionnement des structures hybrides", Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay. 2024.

[7] Touraivane S, Roubier N, Reiss T, Vennat E, Acevedo C, "Effect of microstructural alterations on the elastic properties of dentin with dentinogenesis imperfecta", *European Society of Biomechanics Congress*, Edinburgh, Scotland. 2024.

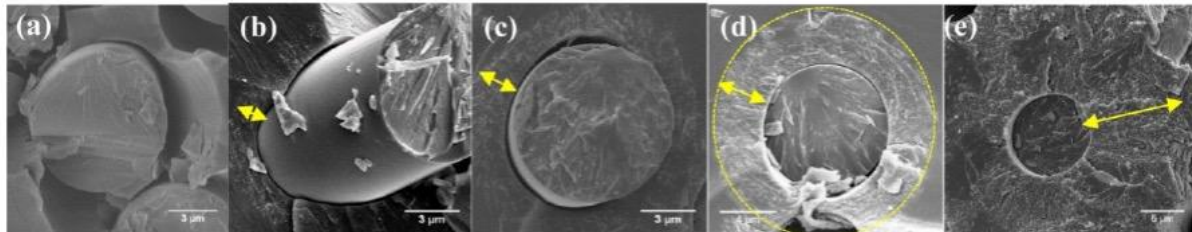


FIGURE 5 : IMAGES MEB DE COMPOSITES VERRE/ÉPOXY AVEC DÉPÔT DE NANOTUBES DE CARBONE SUR LES SURFACES DES FIBRES [3]

Vie de l'association

JNC 2025

par Federica DAGHIA

*LMPS (Université
Paris-Saclay,
CentraleSupélec, ENS
Paris-Saclay)*

*federica.daghia@ens-paris-
saclay.fr*

Les Journées Nationales sur les Composites, événement phare de l'AMAC organisé tous les deux ans, constituent un lieu de rencontre et de débat privilégié pour les enseignants, chercheurs et industriels concernés par les composites. La prochaine édition, co-organisée par LMPS/Onera/Safran, aura lieu du 30 juin au 2 juillet 2025 au Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay (LMPS). Le laboratoire vous accueillera dans son nouveau campus à Gif-sur-Yvette, sur le plateau de Saclay. Vous pourrez ainsi découvrir les locaux de l'ENS Paris-Saclay, ainsi que de CentraleSupélec, situés des deux côtés de



l'avenue des Sciences.

Les contributions peuvent être déposées jusqu'au 8 décembre 2024 sur le site web de la conférence : <https://jnc2025.sciencesconf.org/>

À noter que, lors de l'inscription aux JNC, vous serez automatiquement adhérents à l'AMAC pour l'année 2025. Venez nombreux pour profiter de riches échanges scientifiques, ainsi que de quelques moments conviviaux.

Prix Daniel Valentin

Lauréat 2023

par Frédéric THIEBAUD (chargé de l'organisation du prix D. Valentin)

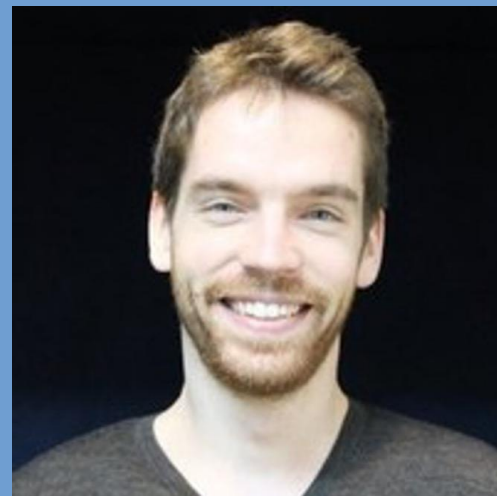
Département de Mécanique Appliquée / Institut FEMTO-ST
24 rue de l'Épitaphe - 25000 Besançon

Le lauréat du Prix Daniel Valentin 2023 est Monsieur Mael PERON, Maître de Conférences à l'IUT de Saint Nazaire et au laboratoire GeM, et âgé de 33 ans au moment de sa candidature. Il est diplômé Ingénieur des Arts et Métiers ParisTech, CER d'Angers, et d'un Master Recherche KIMP (Knowledge Integration in Mechanical Production – Advanced Production Systems) en 2012.

En 2016, il soutient sa Thèse de Doctorat en Energétique et génie des procédés, thermique de l'Université de Nantes, intitulée « Mesure et modélisation des phénomènes de retrait anisotropes dans les matériaux composites durant leur mise en forme » sous la direction de Steven Le Corre, codirigé par Vincent Sobotka et coendré par Nicolas Boyard. A la suite de cette thèse, il poursuit en post doctorat à l'IRT Jules Verne et à l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), dans le cadre de la chaire de recherche COMPETH en

partenariat avec l'entreprise Solvay, au cours duquel il s'est intéressé à la mesure et à la prédiction des contraintes et déformations résiduelles lors de la fabrication de pièces en matrice PA66 basse viscosité renforcée de fibres continues de verre.

En septembre 2017 il est recruté Enseignant Chercheur à l'Université de Nantes, plus précisément à l'IUT de Saint Nazaire au département Mesures Physiques ainsi qu'au sein de l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM).



Son domaine d'étude privilégié est la caractérisation et la modélisation du comportement multi-physique des composites, en particulier en phase d'élaboration, dans l'objectif d'en prédire les contraintes résiduelles et les distorsions. Il a notamment contribué à la conception et la mise en œuvre de moyens d'essais originaux permettant de ségréger des mécanismes complexes en cours de réaction. Sa thèse, puis ses nombreuses collaborations industrielles et académiques, lui ont permis d'appliquer ses compétences à de nombreuses variétés de composites, que ce soit en termes de microstructure, de renfort ou de matrice. On notera qu'outre les classiques couplages thermo-chémo-mécaniques, Mael PERON s'est également intéressé au vieillissement et à la reprise d'humidité de ces matériaux, et à leur caractère multi-échelle.

Monsieur Mael PERON participe également à de nombreux encadrements d'étudiants pour de activités de recherche 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 Mael PERON présentera ses activités lors des Journées Nationales des Composites, JNC2025 à Gif-sur-Yvette, Paris (LMPS) du 30 juin au 02 juillet 2025.

Agend'AMAC

Conférences organisées ou parrainées par l'AMAC

JST AMAC

Toulouse, France, 1^{er} Avril 2025

Les essais et calculs pour le support de la certification aéronautique

Contact : S. Miot, C. Bouvet - <https://certif-aero.sciencesconf.org>

Autres conférences

ESCM

Lyon, France, 7 - 11 Juillet 2025

12^{ème} European Solid Mechanics Conference

Contact : <https://esmc2025.sciencesconf.org/resource/page/id/27>

ICCM24

Baltimore, Etat-Unis, 4 - 8 aout 2025

24th International Conference on Composite Materials

Contact : <https://iccm24.org/>

CFM

Metz, France, 25 - 29 aout 2025

26^{ème} Congrès Français de Mécanique

Contact : <https://cfm2025.sciencesconf.org>

FPCM16

Abu Dhabi, Emirats Arabes Unis, 25 - 29 aout 2025

16th International conference on flow processes in composites materials

Contact : <https://www.fpcm-2025.com/>

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 :

Pierre-Yves MECHIN – pierreyves.mechin@3ds.com

Dassault Systèmes, 10 rue Marcel Dassault – 78140 Vélizy-Villacoublay