Simulation : le défi des Nouveaux Matériaux

L'usage des nouveaux matériaux, en particulier des composites, est un enjeu considérable dans la fabrication de biens manufacturés. Les outils de conception virtuelle dont disposent les industriels sont de plus en plus sophistiqués mais encore incomplets.

Plus légers, plus résistants, plus verts, les biens manufacturés poursuivent leur mue grâce au développement des nouveaux matériaux. La demande du marché est forte. Ailes d'avions, pales d'éoliennes géantes, pare-chocs de véhicules, les matériaux composites mènent la course en tête, déclinés en panneaux sandwichs et *nida* (nids d'abeilles), mais il faut aussi compter avec les super alliages, les coques, l'assemblage par collage... Une autre piste prometteuse est celle de la fabrication additive qui donne des pièces architecturées très complexes, avec une peau extérieure et à l'intérieur un réseau structurel de poutres conçu afin d'optimiser la résistance avec le minimum de matière. La mise en œuvre de ces matériaux exige des procédés innovants de modélisation et de simulation à la hauteur des enjeux, disponibles dans les solutions des grands éditeurs, comme Abaqus (Dassault Systèmes), Ansys Workbench, SimXpert (MSC Software), HyperWorks (Altair Engineering), Teamcenter (Siemens PLM) ou VPS (Esi Group).

Néanmoins, les défis au quotidien sur le terrain demeurent nombreux. Au dernier séminaire Nafems sur « *La simulation des matériaux* » qui s'est déroulé le 19 novembre 2015 à Paris, les experts d'Airbus, Stelia Aerospace, Solvay, le CEA, EDF R&D, Renault, la Cemef, etc. ont partagé leur retour d'expérience. Les plus complexes à simuler demeurent les composites dont les performances dépendent d'une fabrication difficile à automatiser. « *Beaucoup reste à développer et à faire sur ces nouveaux matériaux,* constate ainsi Caroline Petiot, chef de projet chez Airbus Group Innovation. *Il est nécessaire de savoir intégrer les pièces composites dans un assemblage, d'évaluer leur tenue en température, de prévoir les conséquences d'un impact, d'un crash, ainsi que le vieillissement et la fatigue. Prenons le cas d'une pièce en nida soumise en fonctionnement à un impact. L'eau peut ensuite être piégée ce qui pose de grosses questions sur la durabilité de la pièce.* »

Une fabrication rétive à l'automatisation

Il faut s'assurer d'une modélisation correcte des nouveaux matériaux qui entrent dans la composition d'une nouvelle pièce en conception, ainsi que d'une loi de comportement exploitable dans le code de calculs de structures. La modélisation est particulièrement complexe dans le cas des composites pré-imprégnés dont la fabrication peut varier à chaque étape. Les polymères sont broyés en poudre qui est déposée sur le renfort sec, puis passé au four, donnant des fibres pré-imprégnées. La qualité de la préi-mprégnation n'est pas régulière dans la dépose de fils, des micro-fissures se forment, etc.

Au formage et à l'emboutissage peuvent ensuite apparaître des plis, des défauts avec des risques de cisaillements des renforts (*shear locking*) et des flambements. « *Il faut bien penser que le procédé de mise en œuvre, en particulier le chemin de refroidissement, change les propriétés de la pièce finale,* souligne Jérôme Bikard, Responsable Technique Programme Matériaux Composites chez Solvay. *Il est difficile de prendre en compte dès la conception la variabilité du procédé (épaisseur, rupture de mèches, porosité résidentielle…)* ».

Les composites s'avèrent complexes à fabriquer y compris sur des pièces simples. « *Il est impératif de tenir compte des procédés de fabrication qui influent sur les directions de la fibre réelle et sur les propriétés de la pièce finale. Certaines ruptures de pièces sont dues au fait que la fabrication n'a pas été correctement prise en compte. La conception doit se faire en boucle entre*

© Renault - Anthony Bernier

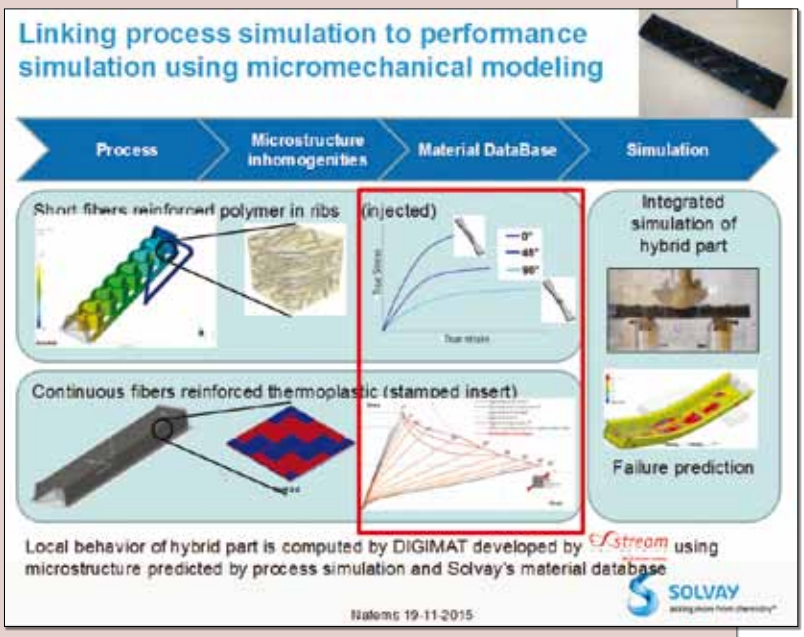
le design, le process et la simulation », assure Patrick de Luca, responsable solution composites chez ESI Group. Comme le composite est un matériau craquant, non ductile, l'assemblage demeure manuel et insuffisamment automatisé et optimisé. Enfin, le contrôle des pièces fabriquées est chronophage. *« Ces problèmes ne sont pas nouveaux mais sont insuffisamment résolus,* renchérit Paulin Fideu, responsable technologies chez Airbus Civil Aircraft. *Le passage du laboratoire à l'atelier de fabrication réserve des surprises. De plus un procédé mis au point sur une pièce n'est pas reproductible tel quel pour la même pièce en plus grandes dimensions... »*

Réduire le nombre d'essais

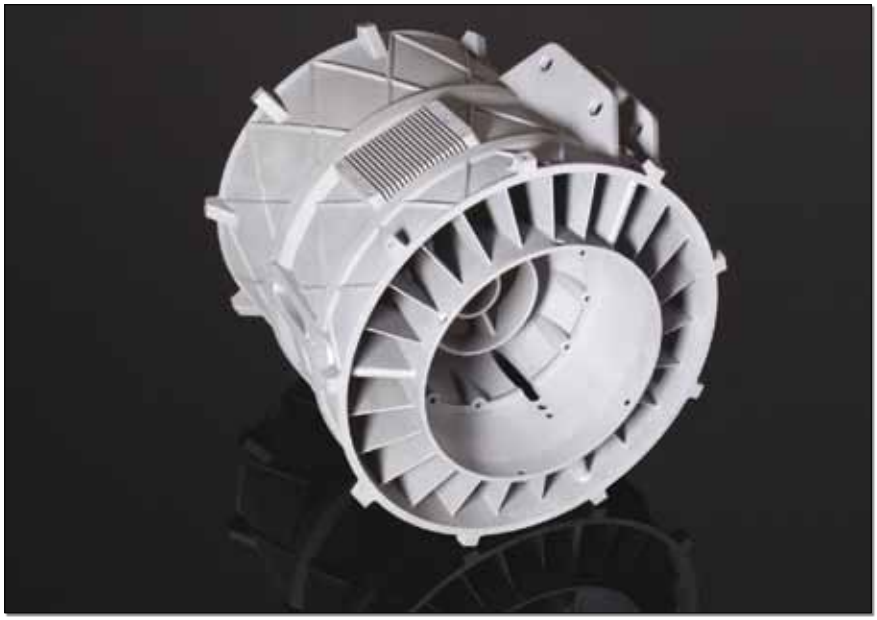
Chez les industriels, comme Airbus, les modèles utilisés pour la simulation sont *« systématiquement validés par des*

Solvay, des composites pour l'automobile

Le groupe chimique belge Solvay est à l'origine un spécialiste du thermo-plastique, qui a racheté mi 2015 l'américain Cytec, actif en thermodurcissable. Le groupe a développé ces dernières années une expertise en modélisation, afin d'étudier le remplacement dans le secteur automobile du métal par des matériaux thermoplastiques. La simulation sert à réduire la quantité de matière. L'équipe de Solvay travaille avec le logiciel Digimat (e-Xstream Engineering) pour prendre en compte la stratification du composite, avec un modèle paramétré, de réduire le nombre de tests (qui sont très nombreux), et d'accroître la résistance des pièces avec l'ajout de renforts. Par une approche couplée micro et macro, la simulation permet de reproduire les champs moyens (nécessaire aux calculs) à partir des champs locaux, et d'exploiter la géométrie des renforts et de la matrice. *« Le constat est un résultat des calculs assez fidèle à la réalité avec peu de paramètres, ce qui montre que la campagne de tests aurait pu être davantage réduite. Sur une pièce de camion, nous avons réalisé un comparatif entre le métallique et le composite avec poutres nervurées, qui donne un gain de 25 à 30 % en poids. Néanmoins, leur coût de mise en œuvre demeure trop élevée car actuellement il existe trop d'intermédiaires pour fabriquer les composites »*, résume Jérôme Bikard, Solvay.



mesures de tests sinon le modèle sera toujours mis en doute », assure Paulin Fideu. Les courbes expérimentales caractérisant le comportement d'un matériau en fonction de la température s'obtiennent avec de nombreuses éprouvettes du matériau qui sont testées en déformations, torsion, tension, flexion… En fonction de la forme de la pièce, l'injection est ensuite simulée en 3D avec une approche statistique. Des codes du commerce comme Pam-Form, Moldex ou Moldflow, permettent d'obtenir une cartographie du champ d'orientations des fibres lors de l'injection. La simulation des procédés sert aussi à récupérer une carte de la variation locale de porosité et du taux de fibres, avec les ondulations, le poinçonnage... *« Comme les matériaux sont inhomogènes, plutôt que de faire des milliers d'essais pour obtenir la carte des variations locales, on exploite la simulation pour réduire le nombre de ces essais »*, rajoute Patrick de Luca.

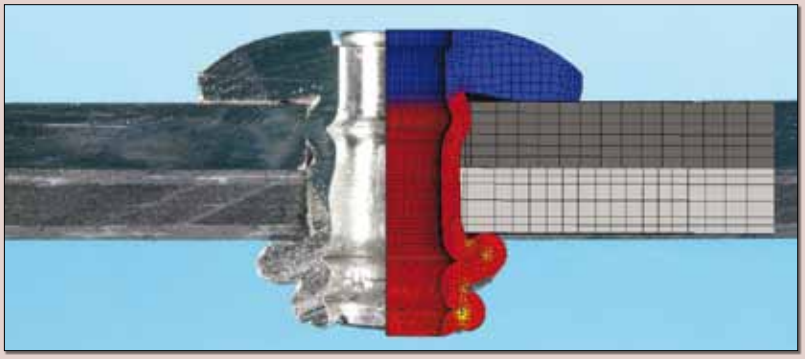


© Tomo Adour

Le contrôle de pièces composites ou de coques à structure interne s'effectue avec des techniques de tomographie 3D. Exemple d'une digitalisation par tomographie réalisée par Tomo Adour.

Simufact pour la simulation de tôles rivetées

L'éditeur Simufact (du groupe MSC) commercialise Simufact.forming pour simuler la mise en forme de différents matériaux (laminage, frappe à froid, emboutissage de tôles) et Simufact.welding, pour l'assemblage mécanique par soudage. Les matériaux traités sont homogènes, les métaux (acier, titane...), mais aussi les polymères et certains matériaux anisotropes. Ces logiciels sont accompagnés d'une base de données matériaux de plus de 600 références, ce qui permet de simuler l'intégralité du procédé (sauf fonderie ou coulée des lingots) à partir du flan ou du lopin, issu de fonderie. *« Nous simulons de manière très précise l'intégralité des déformations de tôles. S'il y a rivetage, nous simulons la fabrication des rivets ou vis et leur pose, donc la déformation des matériaux, avec les contraintes résiduelles. Cela permet de prendre en compte l'histoire du matériau pour évaluer la tenue en service de la future pièce »*, détaille Michel Pereme, responsable commercial chez Simufact. Typiquement, lors d'une pré-étude en simulation, cette solution permet la validation d'hypothèses en atelier virtuel, avant de réaliser des essais physiques en atelier. Assez complète, la BD matériaux peut être enrichie par le client ou via une interface comme JMatPro de Sente Software. L'utilisateur fournit les caractéristiques de son matériau, et le logiciel calcule les propriétés qui peuvent servir d'hypothèses pour le calcul de simulation. Un des axes d'optimisation de l'assemblage est de combiner l'adhésif avec les rivets afin de diminuer le nombre de rivets. Et les caractéristiques phoniques de la pièce sont améliorées.



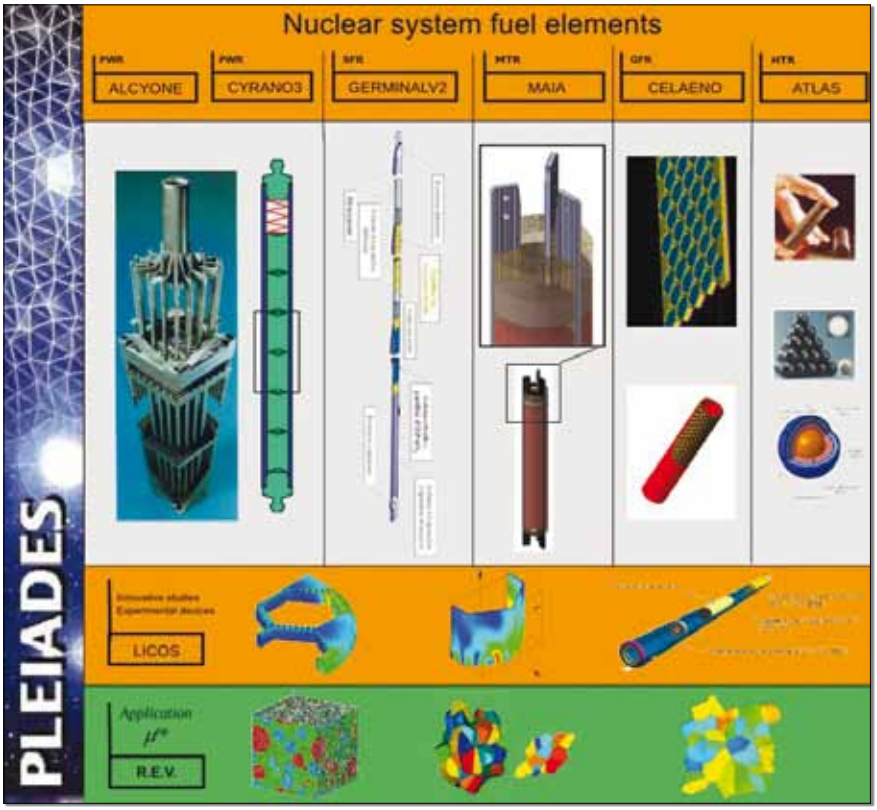
© Simufact

Être précis à chaque étape

Côté fabrication, l'évolution technique est permanente comme l'illustre l'essor récent d'un nouveau type de matériaux composites, les DFC (*discontinuous fibers composites*) qui sont des composites unidirectionnels, découpés en petits morceaux, répartis sur un support, puis compressés au formage (compression molding) et séchés. *« Ces matériaux combinent les avantages de l'unidirectionnel avec ceux de l'injecté,* explique Philippe Hebert chez e-Xstream Engineering. *Digimat permet de simuler leur physique complexe pour prédire leur raideur, grâce à sa double capacité à simuler les composites unidirectionnels et ceux à fibres courtes »*. La simulation du procédé de fabrication avec ses différentes étapes permet de mieux

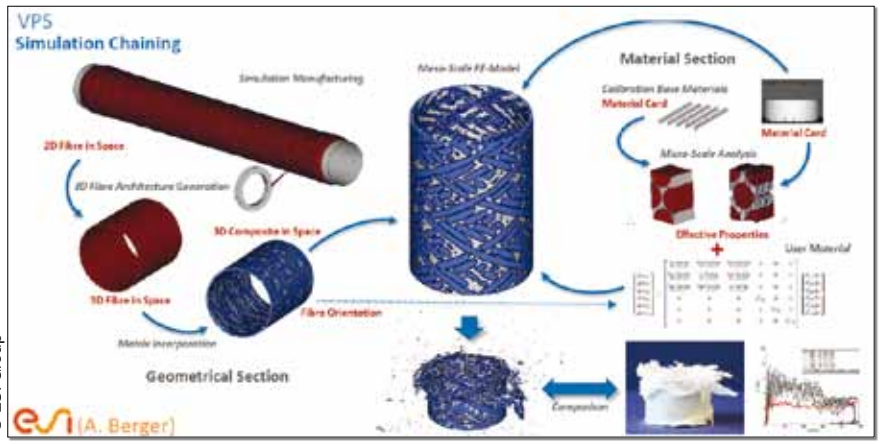
comprendre le comportement de la pièce finale. Chez Airbus, une modélisation spécifique est mise en œuvre pour chaque étape du process, pour le compactage avec le placement de fibres, la préforme, le formage et le chauffage des matériaux pré-compactés, pour l'infusion réalisée chez les fournisseurs, l'injection qui comme l'infusion relève d'une physique complexe en particulier pour la perméabilité, pour le séchage par UV (curing) réalisé en interne...

La simulation numérique aide à comprendre et à anticiper l'impact d'un changement de machines de production. Elle permet aussi à Airbus d'être plus précis auprès de ses fournisseurs lors de la spécification de développements produit. Elle aussi exploitée pour faire du dimensionnement rapide (*quick sizing*) afin d'établir rapidement les grandes lignes d'une conception. *« En simulation, le groupe Airbus travaille avec tous les éditeurs car chaque équipe est libre d'utiliser le logiciel de leur choix, mais nous demeurons malgré tout un peu désarmés en simulation devant la complexité et la lourdeur des calculs »*, confie Caroline Petiot.



© CEA

Issu du développement de la plate-forme de simulation Pleiades du CEA et EDF R&D multi-matériaux et multi-physique, le code Mfront open source facilite l'écriture de nouvelles connaissances matériau.



© ESI Group

Application aux composites de la solution globale d'Ingénierie Virtuelle du Produit, Virtual Performance Solution (VPS) du Groupe ESI.

Une vision multi-échelle

Chez l'avionneur, les difficultés apparues pour simuler le comportement à l'échelle macroscopique des grandes pièces leur ont demandé de remonter aux fondamentaux, à l'échelle mésoscopique afin de construire des modèles pertinents. Par exemple, pour les pré-imprégnés avec particules, se pose des problèmes de friction avec un saut d'un facteur 10 dans l'échelle. Un autre sujet est la distorsion des pièces sous l'effet de la chaleur. Il faut arriver à fabriquer des pièces dont les propriétés physiques ne se modifient pas avec l'augmentation de température. Un autre défi est de pouvoir gérer l'assemblage, de simuler la déformation pour prévoir la position des rivets, par exemple pour la jonction fuselage et aile.

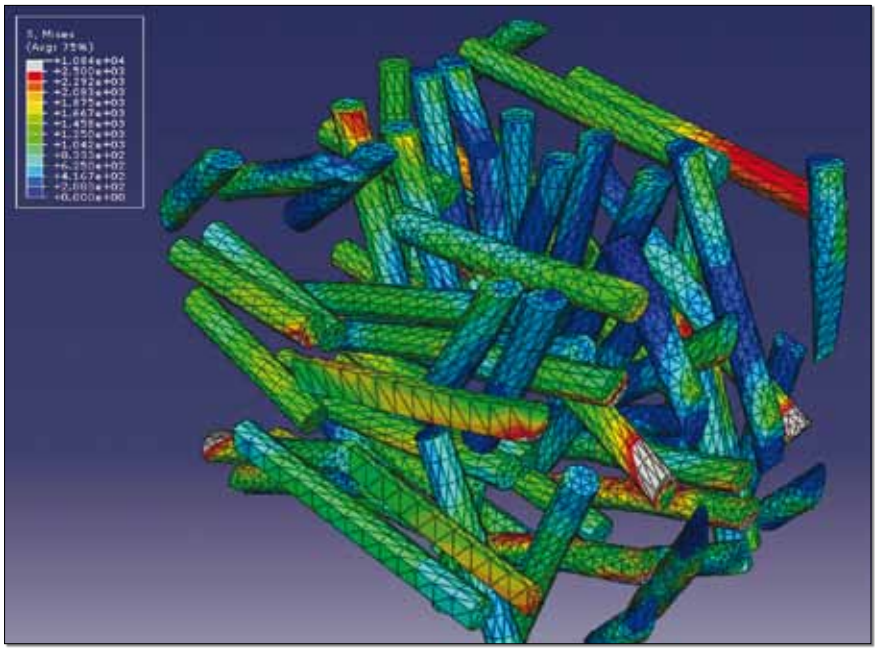
Une des clefs pour la simulation, est de réduire les comportements à des paramètres utilisables dans un logiciel de simulation système comme Simulink. Le modèle global et multi-échelles ainsi obtenu est exploitable avec des temps de calculs courts, ce qui aide à automatiser la production et à détecter des dérives de fabrication. *« Pour pouvoir optimiser, il faut être capable de faire du multi-échelle et du multi-physique, afin d'obtenir un résultat cohérent entre les différentes échelles »*, insiste Paulin Fideu.

Les progrès de la simulation accompagnent le développement des nouveaux matériaux. Le multi-échelle aide à concevoir des pièces complexes à la morphologie hétérogène, pour développer des structures légères et multi-fonctionnelles. La multi-physique aide à développer par exemple des composites avec inclusion de fils de cuivre. ▮

Digimat simplifie la modélisation

La plateforme logicielle d'e-Xstream Engineering permet de modéliser tous les types de matériaux un peu complexes : composites à fibres continue, ou fibres courtes ou élastomères, métaux durs, céramiques...

Digimat (DIGItal MATerial) fait le lien entre les ingénieurs en charge de la simulation du procédé (moulage, drapage...) et les ingénieurs structures qui étudient les performances de la pièce. Cette approche est particulièrement pertinente pour les composites dont le comportement est assez complexe, avec des propriétés d'anisotropie, de non linéarité et dont les performances dépendent de la fabrication. Le flux de matière injecté dans la pièce entraîne une distribution et une orientation particulière des fibres, dont la simulation permet de prévoir le comportement. *« Ainsi, la chaîne logicielle part de la simulation locale du procédé exploitée dans Digimat, à destination du code éléments finis de type Marc ou Nastran, pour la simulation structure »*, détaille Philippe Hebert, responsable produits Digimat chez e-Xstream Engineering (groupe MSC Software).



À l'origine éclaté en modules métiers, le logiciel Digimat a été récemment repackagé afin d'étendre son usage aux ingénieurs production. Deux nouvelles solutions sont commercialisées : Digimat RP (*Reinforced Plastics*) pour construire un maillage d'éléments finis en association avec des logiciels d'injection comme Moldflow ou Moldex, et Digimat-VA (*Virtual Allowables*) pour déterminer les matériaux admissibles pour les composites à fibres courtes.

Accélérer la campagne d'essais

Digimat-VA permet de générer des centaines ou des milliers de simulations de coupons, en premier lieu pour le secteur aéronautique mais aussi pour l'automobile qui intègre de plus en plus des composites à fibres courtes, pour le châssis ou pour d'autres pièces moins structurelles. Digimat-VA nécessite deux éléments : le résultat d'un calcul éléments finis non linéaires comme celui d'un coupon troué en traction, et une modélisation réalisée dans Digimat. *« Une journée suffit pour mener une campagne d'essais virtuels en définissant et en comparant des* « admissibles virtuels »*. La modélisation réalisée est multi-échelle, allant de la micro-structure avec les fibres jusqu'au niveau macro »*, complète Philippe Hebert.

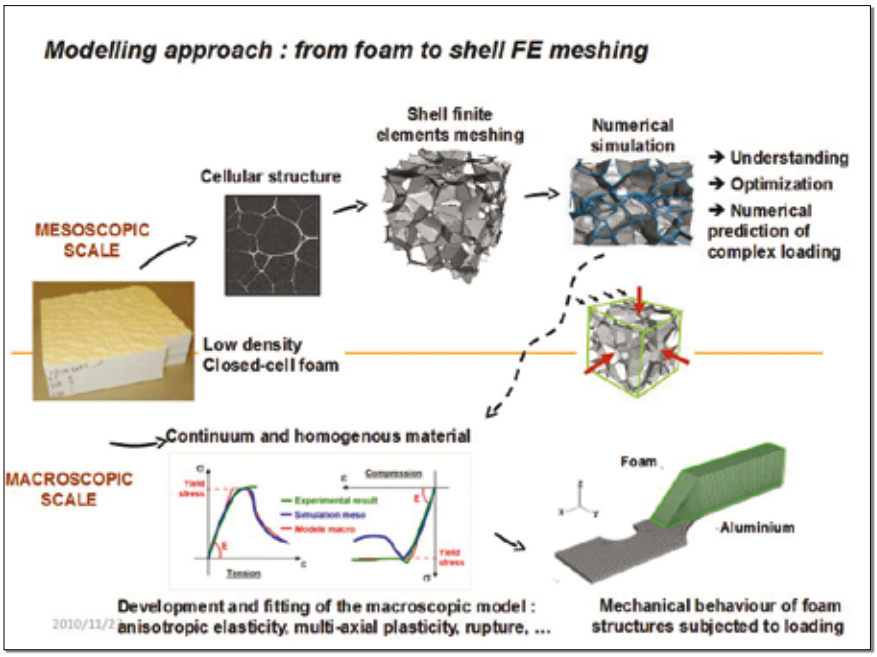
La variabilité du procédé de fabrication est estimée à deux niveaux. Au niveau spatial, la variation locale en fonction de la microstructure vient de la modélisation de l'injection effectuée dans Pam-Form, Moldex ou Moldflow. Au niveau temporel, plusieurs simulations sont réalisées avec Digimat-VA donnant différents résultats avec une distribution statistique. Cette approche par essais virtuels permet d'accélérer le passage à la fabrication, mais aussi d'obtenir une meilleure compréhension du phénomène physique. Digimat-RP intègre depuis octobre 2015 une estimation de l'orientation de fibres. Ce développement réalisé en partenariat avec Moldex3D (Plastic Injection Molding Simulation) permet à l'ingénieur structure de tester rapidement un panel de procédés différents, en étant autonome de l'ingénieur procédé. ▮

Le Bureau d'études EC2 Modélisation

Spécialiste de la simulation numérique structures, principalement en aéronautique, automobile et construction navale), le Bureau d'études lyonnais caractérise les matériaux composites pour ses clients.

Les besoins en modélisation numérique des clients d'EC2 Modélisation sont représentatifs des nouveaux matériaux développés dans l'industrie comme les composites, les mousses ou les sandwichs. Si les outils du commerce savent modéliser les matériaux qui relèvent de la mécanique des milieux continus de type acier, élastomères, EC2 Modélisation travaille de plus en plus au développement de modèles de comportement de nouveaux matériaux moins standards. « *Développer des modèles veut dire soit trouver les bons paramètres, et ils sont nombreux pour caractériser les composites, soit dans le cas où les matériaux ne sont pas standards, trouver de nouveaux modèles de comportement adaptés* », résume Christophe Baillis, gérant d'EC2 Modélisation.

Ces paramètres ou lois de comportement sont ensuite intégrés par leurs clients dans leur logiciel d'analyse, Abaqus, Altair Radioss, Ansys, LS-Dyna... La prestation fournie par EC2 inclue de nombreux essais de déformations sur des éprouvettes, en compression, cisaillement, traction, torsion, etc. Cette campagne d'essais préalable est indispensable pour mettre au point les modèles, mais s'avère très lourde à mener dans le cas des matériaux composites, étant donné qu'il faut faire varier la matrice, les fibres, le dosage... « *Le problème majeur posé par les composites vient de l'infinité de possibilités obtenues lorsqu'on fait varier les paramètres de la fabrication,* ajoute Christophe Baillis. *Nous menons actuellement un important travail de recherche pour modéliser un composite en partant de sa microstructure interne, au niveau mésoscopique avec les fibres et matrices, puis en remontant jusqu'au niveau macro.* »



En fonction des secteurs d'activités

EC2 Modélisation est sollicité sur les composites essentiellement pour l'automobile et l'aéronautique. Dans l'automobile, les pièces destinées à la carrosserie ou au pare-chocs, doivent résister au choc. Les essais vont jusqu'au crash et la modélisation jusqu'à la rupture. En aéronautique, l'enjeu est de prévoir la fatigue des pièces pour les changer avant qu'elles ne cassent. La modélisation, beaucoup plus complexe du fait d'une fabrication très variable en fonction de la matrice et du dosage des fibres, nécessite de la recherche fondamentale. Les essais de fatigue se font sur plusieurs millions de cycles, permettant de tracer des courbes empiriques en fonction de la sollicitation. « *La connaissance du comportement des pièces demeure insuffisante. Aussi, on surdimensionne, on évite d'utiliser les composites pour les pièces vitales, et les avions sont contrôlés de manière très précise afin de détecter les fissures, pour ne pas menacer la sécurité* », confie Christophe Baillis. Outre les composites, le BE travaille sur d'autres matériaux novateurs comme les mousses métalliques (alu par exemple), les mousses en PU, PVC et les matériaux sandwichs (composites sur la peau et mousse à l'intérieur) qui sont aussi très légers. ▮