

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-impregnés 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-impregnées. La qualité de la pré-impregnation 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 résiduelle...) ».

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... »

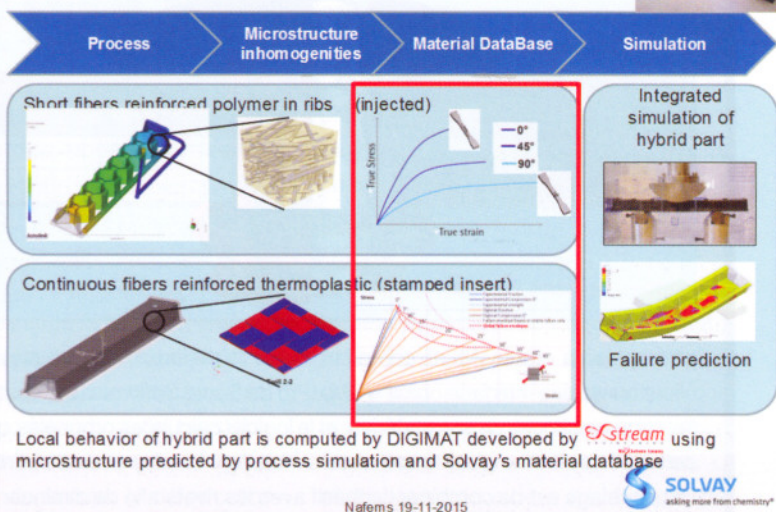
Réduire le nombre d'essais

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

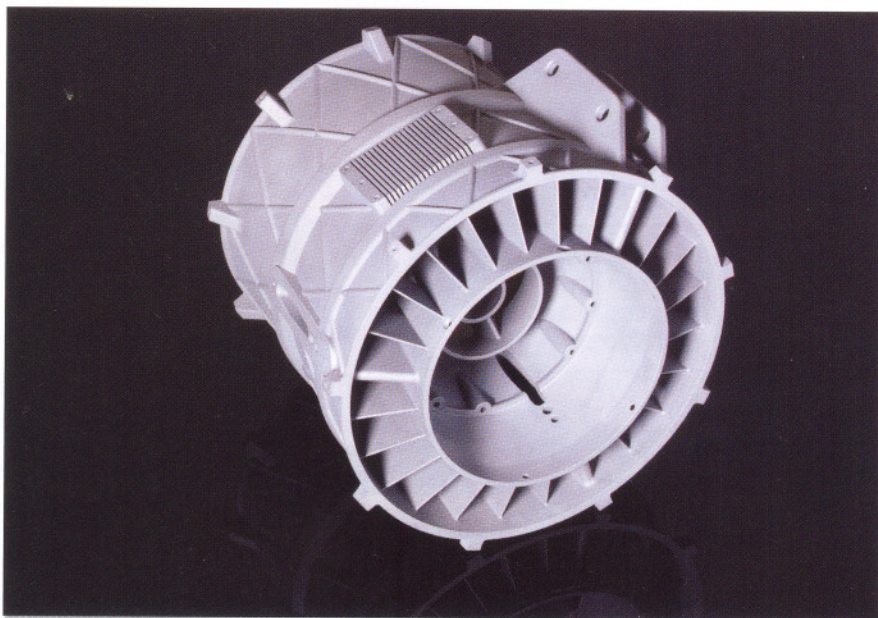
Solvay, des composites pour l'automobile

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.

Linking process simulation to performance simulation using micromechanical modeling



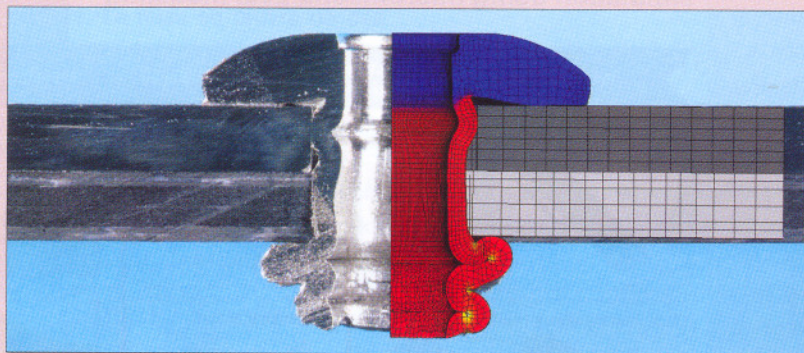
mesures de tests sinon le modèle sera toujours mis en doute », assure Paulin Fideu. Les courbes expérimentales caractérisant le comportement d'un matériau en fonction de la température s'obtiennent avec de nombreuses éprouvettes du matériau qui sont testées en déformations, torsion, tension, flexion... 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



© 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



© Simufact

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.

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.

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.

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

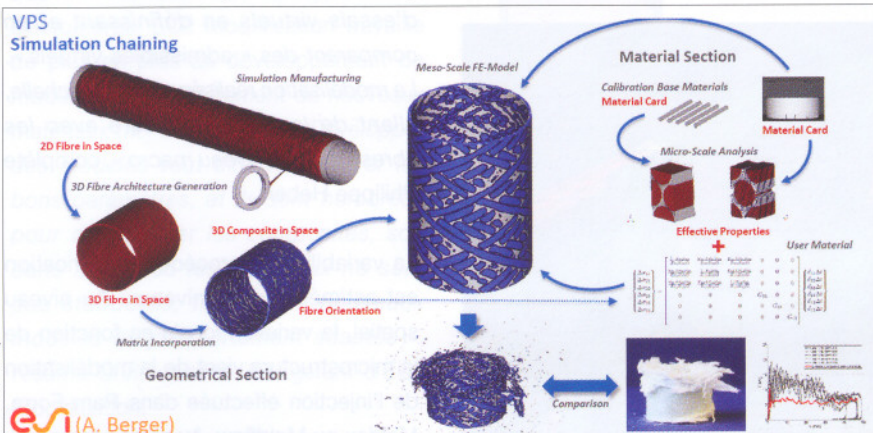
comprendre le comportement de la pièce finale. Chez Airbus, une modélisation spécifique est mise en œuvre pour chaque étape du process, pour le compactage avec le placement de fibres, la préforme, le formage et le chauffage des matériaux pré-compactés, pour l'infusion réalisée chez les fournisseurs, 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,

Nuclear system fuel elements

PWR	PWR	SFR	MTR	GFR	MTR
ALCYONE	CYRANO3	GERMINALV2	MAIA	CELAENO	ATLAS

The infographic displays various nuclear fuel elements and associated simulation results. It includes 3D models of fuel assemblies, cross-sections of fuel rods, and simulation outputs like stress distributions and material properties. A vertical banner on the left reads 'PLEIADES'. At the bottom, there are boxes for 'Innovative studies Experimental devices LICOS' and 'Application R.E.V.' with corresponding simulation images.



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

Mais nous demeurons malgré tout un peu désarmés en simulation devant la complexité et la lourdeur des calculs », confie Caroline Petiot.

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 fonda-

mentaux, 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.

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.

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. ■