

# Les composites, atout minceur des constructeurs

AXELLE DUBOSCQ, FLORENT ROBERT \*

*Légers, résistants, faciles à mettre en œuvre, les composites ont révolutionné la conception des voitures, des avions, des articles de sport et des prothèses médicales. Plébiscités par les constructeurs automobiles, ils devraient poursuivre leur essor. À condition d'améliorer leur recyclabilité.*

**M**algré leurs 50 ans d'existence, les composites n'ont pas encore atteint leur pleine maturité. Plusieurs raisons expliquent cette situation. Tout d'abord, leur coût de production. Par rapport à l'acier, ces matériaux restent plus coûteux du fait des faibles volumes en jeu, et les méthodes de conception n'exploitent pas tout leur potentiel. La capacité à s'adapter aux grandes cadences, comme celles de l'industrie automobile, constitue un autre défi. Enfin, les procédés d'assemblage, notamment multimatériaux, sont onéreux et complexes à dimensionner et mettre en œuvre.

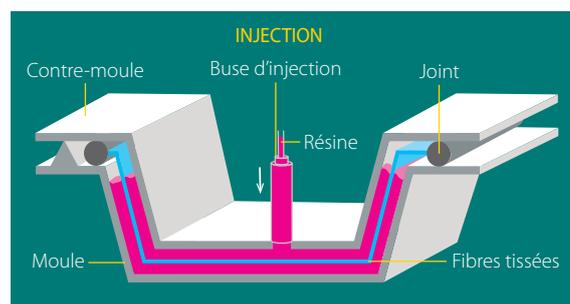
## Production : satisfaire les exigences de l'industrie

Le secteur des composites progresse toutefois rapidement, notamment en raison des contraintes environnementales accrues qui s'imposent aux acteurs de l'automobile, les poussant à faire maigrir leurs berlines pour limiter leurs émissions de CO<sub>2</sub>. En plus des nouveaux aciers et des alliages légers, les composites pourraient bien être une réponse de choix à cet enjeu écologique. Résultat : un foisonnement technologique pour concevoir, fabriquer, assembler, désassembler et recycler des pièces durables, plus légères et à moindre coût.

Parmi les principaux procédés de fabrication, on peut citer le développement du moulage par *resin transfer molding* (RTM) 1, un procédé d'injection basse pression de résine liquide dans un moule rigide. Il concerne aussi bien la fibre de carbone que les polymères thermoplastiques : par exemple, la résine acrylique Elium d'Arkema et l'AP-Nylon, résultant de la polymérisation *in situ* de monomères de caprolactame. La très haute fluidité de ces matériaux permet d'obtenir des cycles de mise en

### MOTS-CLÉS

matériaux, innovation, recherche et développement

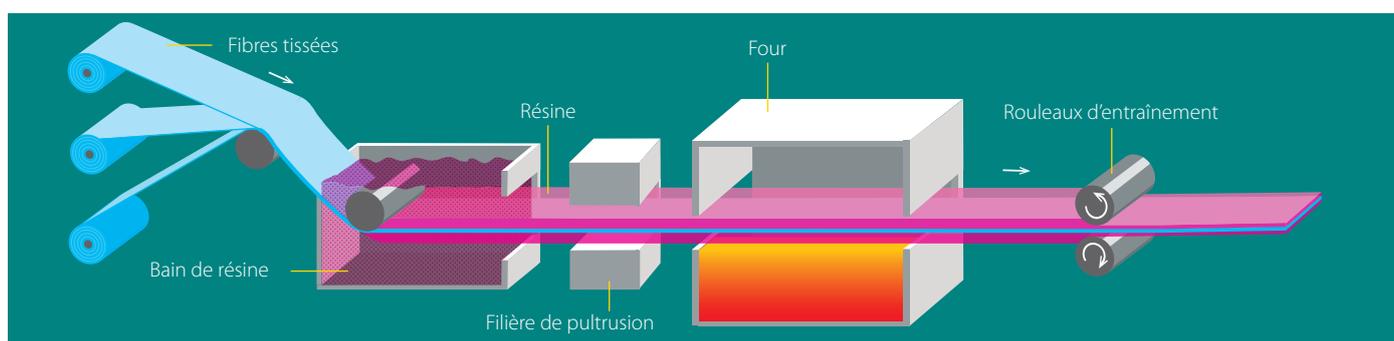


1 Le procédé *resin transfer molding* (RTM) repose sur l'injection d'une résine dans un moule rigide. Il convient aux pièces de forme un peu complexe, de grande taille, notamment dans l'aéronautique. Le RTM a des variantes, comme l'infusion de résine sous moule flexible (Rift), qui permet de réduire les coûts, et le *liquid resin infusion* (LRI)

œuvre relativement bas, de quelques minutes, selon la typologie de la pièce. En 2017, Solvay a lancé un nouveau préimprégné SolvaLite 730 sur une base vinyle hybride de Reichhold permettant la production de pièces composites par compression en soixante secondes. Autre procédé, la pultrusion 2, où l'on étire des fils, souvent en fibres de verre, via une filière. Elle convient bien aux pièces composites à bas coût. La fabrication des thermoplastiques, notamment pour l'automobile, recourt davantage à l'estampage 3. Enfin, l'enroulement filamentaire, autour d'un mandrin en rotation afin de créer des pièces de forme tubulaire, est de plus en plus utilisé dans l'industrie aéronautique, notamment pour les fuselages d'avion.

Le concept QSP (*quilted stratum process*), développé par le Cetim, met en œuvre des composites à matrice thermoplastique favorisant le recyclage, donc plus écologiques, et répondant à la problématique des cadences élevées. À partir des matières premières (fibres et polymère thermoplastique) mélangées par pultrusion thermoplastique, on produit des *tapes* à un coût optimisé en termes de largeur, d'épaisseur et de renforcement. Des patches sur mesure sont découpés dans ces *tapes*, selon une méthode de conception spécifique QSD offrant le meilleur compromis en matière d'épaisseur et d'anisotropie. Le procédé permet également d'identifier le meilleur plan de drapage de la préforme afin d'obtenir un bon

\* Article extrait de la revue *Industrie et Technologies*, n° 1001, septembre 2017, p. 62-67.

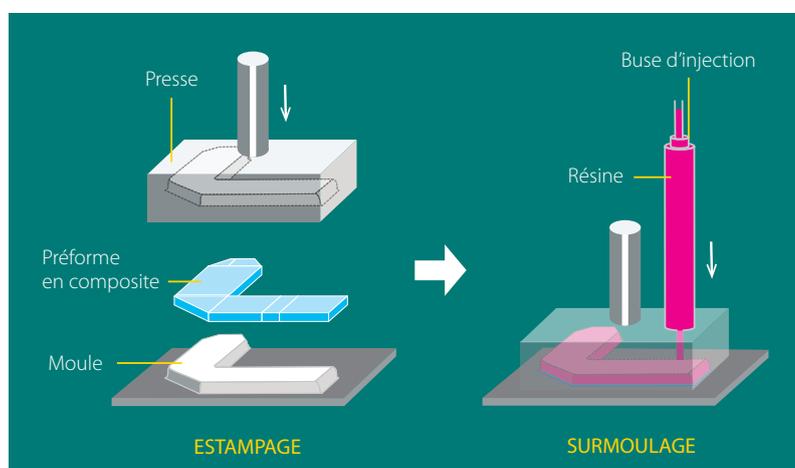


2 La pultrusion consiste à faire passer une fibre issue d'un rouleau dans un bain de résine pour l'imprégner. Elle est utilisée pour fabriquer des profilés composites de formes plus ou moins complexes (bande, tube, raidisseur, profilé alvéolé) au kilomètre et à bas coût

équilibre masse-coût. Ces patchs sont ensuite assemblés en une préforme *net shape* (« au plus près ») multicouche optimisée, chauffée par un système innovant. L'ensemble est transféré par un robot dans le moule sous presse. La pièce composite *net shape* est thermoformée avec ses zones d'assemblage multimatériaux et surmoulée avec du thermoplastique renforcé dans le même moule. Le cycle de fabrication total net est compatible avec des cadences de l'ordre de la minute, voire moins, pour un surcoût acceptable de 5 euros par kilo gagné 4.

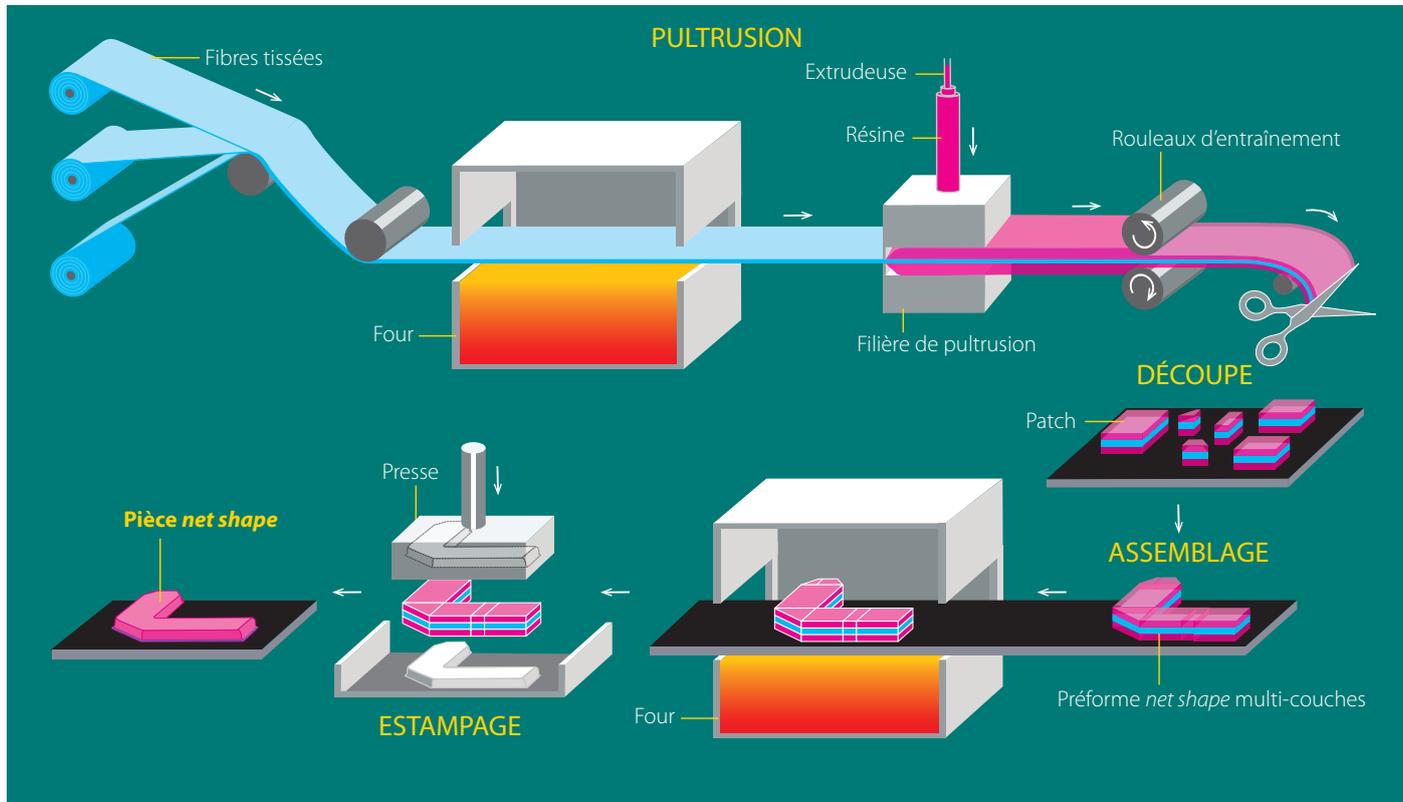
### Assemblage : une seule étape pour les multimatériaux

Le développement constant des matériaux et des systèmes mécaniques s'accompagne d'une réflexion sur le choix des technologies d'assemblage, notamment en ce qui concerne les systèmes mécaniques multimatériaux. La décision doit s'appuyer sur une démarche méthodologique et structurée, portant autant sur des aspects techniques qu'économiques. Les principaux paramètres servant à sélectionner la technologie d'assemblage sont les fonctions que doivent remplir la pièce et les fonctionnalités (démontable, conductrice, étanche...) que l'on souhaite lui attribuer, la nature des sollicitations auxquelles elle sera soumise et les certifications qu'elle doit respecter, le tout en prenant en compte les investissements nécessaires.



3 L'estampage ajuste une préforme composite à l'aide d'un moule et d'une presse. Du polymère est ensuite injecté dans l'outillage d'estampage pour ajouter des fonctions à la pièce (raidisseurs, zone d'assemblage...). Ce procédé est très utilisé dans le secteur automobile, et de plus en plus dans celui de l'aéronautique, pour la fabrication de pièces thermoplastiques renforcées de fibres continues ou non. Le chauffage s'effectue à l'intérieur du moule

Le procédé QSP, par exemple, intègre un maximum de fonctions pendant l'opération de thermoestampage. Pour cela, des solutions innovantes et brevetées d'assemblage intramoule ont été mises au point, afin de réaliser des assemblages *one shot* en temps masqué du thermoestampage. Ainsi, la création de trous dans le composite, en vue de futurs



4 Le procédé *quilted stratum process* (QSP), développé par le Cetim, combine la pultrusion, puis l'estampage d'une préforme fabriquée à partir de fragments des bandes obtenues par pultrusion. Ces étapes permettent d'optimiser la largeur, l'épaisseur et le renforcement, et donc d'obtenir une pièce technique à un coût maîtrisé

assemblages, est réalisée directement dans le moule, lorsque le composite est encore liquide. Les fibres sont principalement déviées, au lieu d'être sectionnées sur une solution d'usinage classique. La matière extraite du logement est réutilisée pour créer un renfort local fibré autour du trou, permettant de mieux enserrer le rivet. Pour optimiser la valeur ajoutée au produit, une solution d'intégration directe d'un insert métallique au travers du composite pendant l'opération de thermo-estampage a par ailleurs été développée 5.

**Simulation : la durabilité sous contrôle**

Les procédés d'assemblage doivent être compatibles avec les contraintes du secteur auquel ils sont destinés. En outre, l'acceptabilité des composites par les concepteurs est conditionnée par la prédictibilité de leurs propriétés. La simulation, qui ne cesse de progresser, joue donc un rôle déterminant. Ainsi, la modélisation d'un stratifié peut être effectuée à différentes échelles. Dans le cadre de la conception des structures composites, l'échelle d'analyse la plus pertinente et pragmatique est généralement celle du pli (échelle mésoscopique).

Le modèle de simulation doit représenter chaque pli constituant la pièce. Les codes de calcul par éléments finis proposent des éléments surfaciques

multicouches qui permettent une mise en données facile de ces empilements. Le comportement d'un composite à fibres continues étant orthotrope, les directions des fibres doivent être définies pour chaque pli. La caractérisation du matériau doit être établie à l'échelle du pli considéré comme homogène. Des essais dans plusieurs directions sont nécessaires pour obtenir deux grandeurs. Le module de Young, ou coefficient de Poisson, d'une part, mesure la résistance en traction et en compression dans les directions fibres et transverses ; le module de Coulomb, d'autre part, mesure la résistance en cisaillement dans le plan.

Pour effectuer des études de conception simplifiée, on s'appuie sur les fiches techniques des constituants (fibre et matrice) et sur des lois d'homogénéisation afin d'estimer les caractéristiques élastiques du pli. *A contrario*, s'il est nécessaire de représenter des phénomènes complexes dans l'épaisseur du composite, tels que le délaminage, les caractéristiques hors plan du matériau doivent également être connues et un maillage d'éléments finis volumiques devra être utilisé.

Lorsque les pièces composites présentent des formes complexes, il peut être nécessaire de modéliser leur procédé de fabrication, notamment pour déterminer les variations locales des propriétés. Des éléments ayant un impact sur les caractéristiques des

plis, en premier lieu l'orientation et le taux de fibres, résultent du procédé et peuvent varier localement.

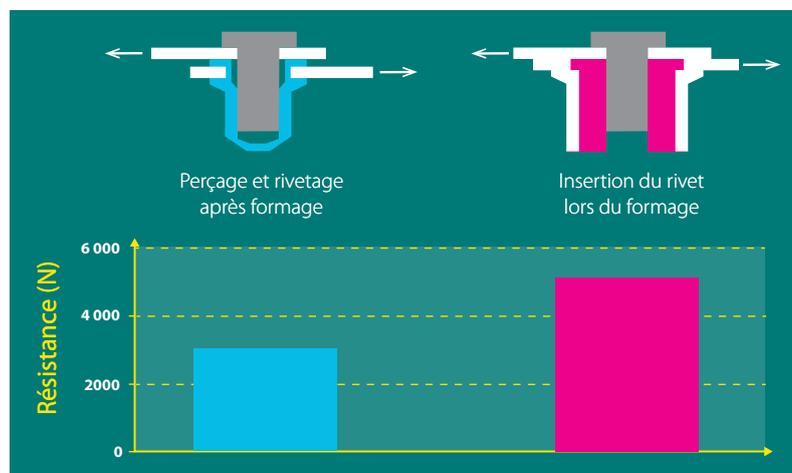
Différents modèles peuvent être utilisés suivant le type et la phase du procédé à modéliser. Des modèles géométriques permettent d'estimer la position des fibres après un enroulement filamentaire sur un dôme ou le drapage d'une forme à double courbure. La simulation du formage consiste à représenter la déformation d'un tissu sec ou d'un pré-imprégné lors de la fermeture du moule. La rhéologie permet de simuler l'écoulement d'une résine dans une pré-forme fibreuse ou d'un plastique chargé de fibres dans les cavités d'un moule. La thermique, complétée si nécessaire par la cinétique chimique, permet quant à elle d'appréhender les déformations résiduelles ou les contraintes internes après fabrication.

Une fois le modèle construit, le simulateur doit définir les critères de rupture. Des travaux à l'échelle mondiale sont menés pour établir un consensus sur le meilleur critère parmi ceux qui existent. Au-delà du critère de rupture, la durabilité d'un composite doit s'analyser en fonction de la tolérance au dommage. Un chargement en fatigue, par exemple, crée un endommagement diffus du composite qui modifie légèrement sa raideur, mais abaisse aussi sa résistance résiduelle. Le comportement en fatigue des fibres (notamment carbone) est performant, de sorte que le principal risque concerne la résine, dans laquelle peut se développer une fissuration entre les couches (délaminage). La fatigue n'est cependant pas la seule à affecter la résistance résiduelle d'un composite. Le cycle thermique, la reprise hydrique (diffusion de l'eau) ou la présence d'un impact local sont autant de menaces à évaluer.

### Contrôle non destructif : un impératif pour la sécurité

Outre la prédiction, le contrôle de l'intégrité des pièces au cours de leur fabrication, voire de leur utilisation, est indispensable. Le contrôle non destructif ne provoque aucune dégradation. Cette activité regroupe de nombreuses techniques reposant sur des principes physiques divers : ultrasons, rayons X, thermographie infrarouge... Ces examens sont généralement réalisés sur des pièces à coûts élevés ou dont la fiabilité est primordiale pour la sécurité des biens et des personnes.

S'assurer de la qualité d'une structure composite peut nécessiter des examens à différents stades de sa vie. On distingue notamment : les essais de qualification de prototypes, le contrôle en ligne au cours de la fabrication des structures, le contrôle en sortie de production, le contrôle en maintenance et la surveillance *in situ* en cours d'utilisation. La technique d'examen à privilégier pour l'analyse non destructive dépend donc notamment du stade de l'examen, mais



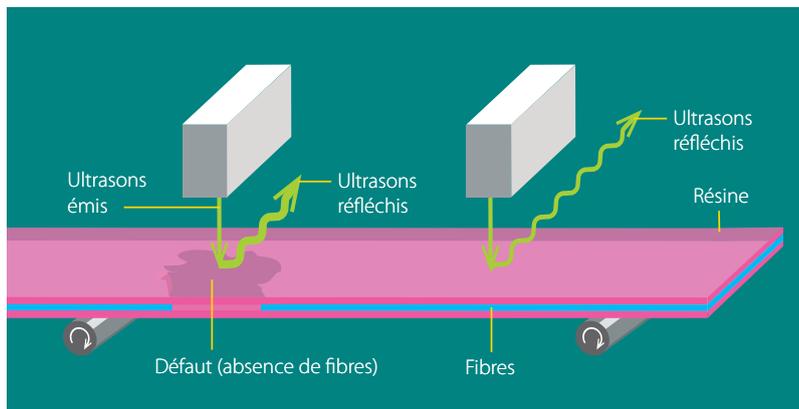
5 Pour réaliser un trou dans un composite, le procédé le plus simple consiste à pratiquer un perçage avant de poser un rivet métallique (à gauche). Mais cette méthode déchire les fibres. Une technique consiste à « noyer » l'insert métallique dans la peau composite lorsqu'elle est encore liquide. Ainsi, les fibres ne sont pas cassées mais seulement repoussées. Elles enserrant le rivet (compactage), ce qui améliore la tenue au cisaillement

également des matériaux qui constituent la structure, des défauts présumés, de leur localisation, de leur orientation et des contraintes opérationnelles pour effectuer le contrôle.

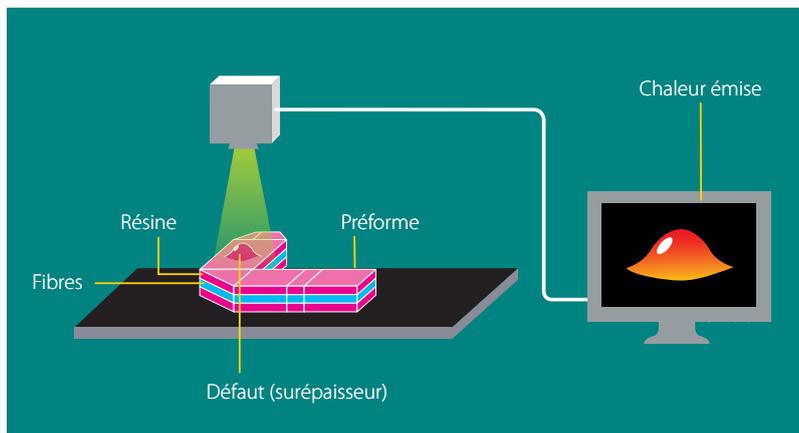
La qualification de l'intégrité structurelle de prototypes composites peut ainsi s'appuyer, entre autres, sur l'utilisation d'examens par tomographie aux rayons X. Cette technique issue du domaine médical, et plus connue sous le nom de scanner à rayons X, permet d'observer en trois dimensions la structure interne du prototype afin d'en révéler les éventuelles imperfections. Cet examen peut être complété par des essais mécaniques instrumentés par émission acoustique, de façon à déterminer, en plus de la limite de résistance mécanique des matériaux composites, les prémices de l'endommagement, et de comprendre les mécanismes aboutissant à la rupture finale. Pour cela, des capteurs d'émission acoustique sont disposés judicieusement sur la structure afin de la mettre entièrement sur écoute. Grâce à eux, il sera possible de détecter l'énergie libérée sous forme d'ondes élastiques, qui trahiront la présence de défauts évolutifs au sein du prototype.

Afin de s'affranchir du contrôle qualité en sortie de production, qui peut s'avérer onéreux et provoquer un goulot d'étranglement, de nombreux industriels cherchent des solutions de contrôle en ligne, c'est-à-dire au cours de la fabrication même des pièces composites. Cela constitue un enjeu majeur pour accompagner le développement des composites dans des secteurs tels que l'automobile ou le génie civil et rendre acceptable économiquement leur emploi. Le Cetim propose des moyens de contrôle en ligne sur les procédés QSP et Spide TP, développés au Technocampus Composites de Nantes.

*Par définition, le contrôle non destructif ne provoque aucune dégradation*



6 Le contrôle par ultrasons permet de détecter un défaut local, comme la mauvaise répartition des fibres au sein de la résine polymère, grâce à l'envoi d'ultrasons dans la bande en matériau composite lors de son défilement et à la mesure de leur réflexion



7 La mesure en temps réel de la température de la pièce par une caméra infrarouge permet de détecter un défaut. Une zone plus froide à la surface de la préforme, indiquant la qualité de la pièce après estampage, peut ainsi révéler la présence d'une surépaisseur de résine

Les semi-produits, obtenus par pultrusion et qui serviront à l'élaboration des pièces QSP, sont contrôlés en continu par ultrasons multiéléments. Ce contrôle, à l'instar de l'échographie médicale, repose sur l'absorption et la réflexion d'ondes ultrasonores au sein de la structure composite. Il permet notamment de détecter tout manque d'imprégnation ou des fibres sèches, et garantit ainsi la santé matière du composite qui constituera les préformes des pièces produites par QSP 6. L'homogénéité de chauffe de ces préformes composites avant thermo-estampage sous presse est vérifiée par thermographie infrarouge. Cette méthode consiste à utiliser la chaleur émise par la préforme pour évaluer les différences de température au sein de celle-ci et ainsi vérifier leur conformité par rapport aux spécifications requises pour obtenir une pièce saine après estampage 7.

Par ailleurs, la thermographie infrarouge a également été implémentée sur le procédé d'enroulement filamentaire Spide TP, qui consiste à chauffer

un *tape* préimprégné de résine thermoplastique à l'aide d'un laser haute puissance afin de le faire fondre, puis de l'enrouler sur un moule métallique ou composite. La thermographie infrarouge passive, utilisant la chaleur transmise du laser au matériau, permet de détecter en temps réel tous les décollements, chevauchements ou espacements *inter-tapes*. Pour améliorer la sensibilité de détection, il est également possible d'employer un moyen de sollicitation thermique externe (de type flash), afin de chauffer le matériau de façon homogène très rapidement (moins de 10 ms). On observe ensuite l'évolution de la température résultante à l'aide de la caméra thermique.

Dans le cas où aucun contrôle en ligne n'a été mis en œuvre, les pièces composites jugées critiques pour la sécurité devront systématiquement être contrôlées en sortie de production. Ce contrôle pourra être manuel, pour les faibles cadences de production, ou automatisé, pour respecter les cadences élevées et rentabiliser le contrôle de grandes structures. Ces contrôles reposant principalement sur des méthodes visuelles, ultrasonores, de radiographie X et de thermographie infrarouge pourront également être employés périodiquement en maintenance pour s'assurer qu'aucune dégradation n'est apparue au cours de l'utilisation opérationnelle des structures.

Dans le cas où ces contrôles périodiques ne seraient pas suffisants pour assurer la sécurité des biens et des personnes, la surveillance *in situ* en cours d'utilisation des pièces peut s'avérer nécessaire et permettre de détecter en temps réel l'apparition de défauts. Des techniques de contrôle santé intégré à base d'émission acoustique, de fibres optiques, d'ondes guidées... devront alors être mises en place spécifiquement sur les structures à surveiller.

### Recyclage : un vrai défi

L'usage des matériaux composites est encore limité par des contraintes réglementaires croissantes, obligeant l'industrie à utiliser des matériaux plus vertueux en termes de recyclabilité. En effet, aujourd'hui, dans près de 90 % des cas, malgré tous les développements technologiques de ces dernières décennies, les chutes de production comme les produits en fin de vie partent en enfouissement. Les causes de cette situation sont multiples : faible volumétrie des fabrications (30 000 t/an pour la France), manque de débouchés économiques viables, absence de filière structurée, faible coût de l'enfouissement...

Ces déchets sont à 90 % constitués d'une matrice thermodurcissable bon marché (polyester insaturé principalement), associée à un renfort (fibre de verre) qui l'est tout autant. Une valorisation matière n'est possible qu'une fois le composite réduit à l'état de charge et incorporé à des ciments, des résines

thermoplastiques ou thermodurcissables. Ces réutilisations à faible valeur ajoutée sont préférables à l'enfouissement, mais l'intérêt technique du matériau originel est perdu. Malgré la hausse annoncée du gisement de déchets – les premières générations de composites arrivant en fin de vie –, les applications post-valorisation demeureront inchangées. Seule la fibre de carbone, compte tenu de son prix élevé, présente un avantage économique pour le recyclage. Réservée à des applications à forte valeur ajoutée, comme les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile haut de gamme ou du sport et des loisirs, elle ne représente cependant que 5 % du marché. Des technologies complexes et coûteuses (thermolyse, solvolysse, vapo-thermolyse...) sont utilisées pour décomposer la matrice et récupérer le renfort. Néanmoins, le développement annoncé de fibres de carbone à plus bas coût – nettement moins rentables à recycler – risque de cantonner durablement ces traitements à des marchés de niche, pour lesquels l'usage de fibres haut de gamme sera maintenu.

L'industrie des composites opère aujourd'hui une mue pour se rapprocher de la plasturgie. En créant des synergies avec celle-ci, elle pourrait bénéficier du savoir-faire des plasturgistes et du haut niveau d'automatisation des procédés de fabrication. Objectif : ouvrir une brèche pour trouver une solution à la gestion des chutes de production et des produits en fin de vie. Cela est particulièrement vrai pour les composites thermoplastiques : la nature thermoplastique de leurs polymères permet d'envisager des voies de recyclage jusqu'alors inédites.

Reste que les composites véhiculent une image de technicité et de performance qui contraste avec une quasi-absence de revalorisation matière (préférable à l'incinération ou à l'enfouissement). La généralisation de leur usage devra passer par l'adoption de nouveaux matériaux, impliquant le développement de nouveaux procédés, plus fiables, moins chers, tout en intégrant des contraintes de recyclabilité afin de répondre aux enjeux environnementaux du XXI<sup>e</sup> siècle. ■