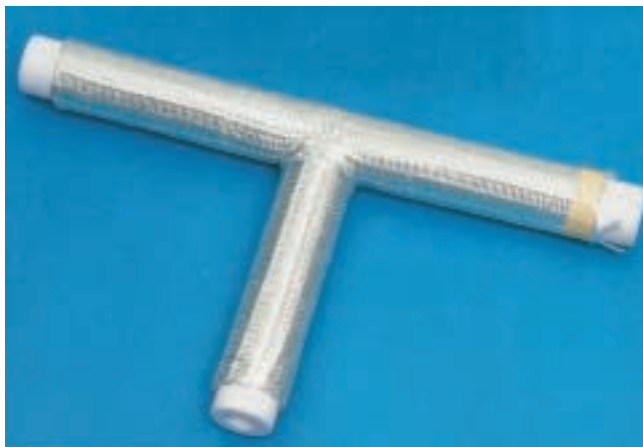




6. CE RACCORD tressé (à gauche) se fabrique en une seule étape. Le textile en carbone (à droite) renforce les tuyères de fusées.

chaque partie séparément, en choisissant la technique textile la mieux adaptée (en terme de propriétés mécaniques et de coût), puis assembler les parties par couture.

Les systèmes assistés par ordinateur déterminent la division des objets de forme complexe et de grande surface en plusieurs petites pièces. Par exemple, on coud des tricot multiaxiaux et des profilés tressés avec des fils de haute ténacité afin de fabriquer des plaques nervurées d'avions. L'assemblage par couture est plus solide que le collage : les couches externes de tricot ne se détachent pas aussi facilement, et les nervures qu'elles constituent supportent mieux les chocs.

Pour améliorer les propriétés mécaniques d'un composite à renfort textile, on peut aussi renforcer ce textile aux endroits où s'exercent les con-

traintes mécaniques maximales, en cousant des renforts supplémentaires. Les ordinateurs calculent leur orientation à l'aide d'une méthode d'optimisation qui simule une croissance quasi biologique, en optimisant la répartition des charges, même pour des géométries complexes. Les bases de cette technique ont été élaborées à l'Institut de recherche des polymères de Dresde (voir *Les renforts textiles brodés*, par Konrad Gliesche, page 182).

Des renforts textiles aux composites à fibres

L'imprégnation des renforts textiles par une résine est étudiée depuis plusieurs décennies. La technique de moulage par transfert de résine garantit une répartition homogène de la matrice tout en minimisant les inclusions d'air (retassures) : on dépose le renfort textile préformé dans un moule étanche, puis on injecte la résine. Après durcissement, on démoule la pièce et on la découpe à l'aide d'un jet d'eau rapide, par exemple. On produit ainsi des pièces en moins de cinq minutes. Si la résine époxy est la plus couramment employée (elle représente 50 pour cent des résines utilisées dans la fabrication des composites), les résines thermoplastiques peuvent imprégner les fibres dès l'étape de fabrication du renfort textile ; on chauffe ensuite la structure obtenue à une température supérieure à la température de fusion de la résine et on la presse, pour que celle-ci remplisse les espaces entre les fibres. D'autres méthodes d'imprégnation ont été mises au

point : dans le dépôt en phase vapeur, le tissu est enduit par bombardement de particules ; dans les techniques d'infiltration chimique sous vide, la matrice, en carbone ou en silicium par exemple, pénètre à l'état gazeux et à haute température entre les filaments du textile. On fabrique ainsi des composites à matrices céramiques, résistant à des températures de plus de 1500 degrés, dont les propriétés mécaniques devraient être améliorées, notamment par rapport à la céramique frittée, grâce à l'inclusion de renforts textiles tridimensionnels.

Avec les techniques dont on dispose aujourd'hui, on sait produire des composites en série. Des bords d'attaque d'empennages verticaux d'avions et des supports de moteur de voitures ont déjà été réalisés en laboratoire. Le coût des composites à renforts textiles tridimensionnel sera sans doute inférieur à celui des composites à fibres classiques. Bientôt, ces nouveaux matériaux seront utilisés pour la construction aéronautique. En revanche, avant qu'ils soient employés dans la construction automobile, on devra trouver des concepts structuraux nouveaux, adaptés aux matériaux utilisés dans ce secteur et des méthodes de diagnostic des défaillances et de réparation.

Jürgen BRANDT dirige le Département matières plastiques du Centre de recherche de la Société Daimler-Benz à Ottobrunn. Klaus DRESCHLER est responsable des procédés plastiques, dans ce département.



7. CE RACCORD EN T est rigidifié par un tricot tridimensionnel.

Les renforts textiles brodés

KONRAD GLIESCHE

On peut améliorer la résistance de composites en ajoutant des fils sur leurs tissus de renfort en fonction des principales contraintes.

La broderie est une technique connue depuis l'Antiquité : on ajoute des fils à des textiles déjà tissés ou tressés, le plus souvent à des fins décoratives. La quantité de fils ajoutés, leur disposition et la manière de les ajouter varie à l'infini. Depuis le XIX^e siècle, la broderie se mécanise. Grâce à des pilotages par ordinateur, les machines modernes, automatiques et multi-têtes, réalisent toutes sortes de motifs, à grande vitesse (500 à 1 000 points à la minute) et avec une parfaite uniformité, pour l'industrie de l'habillement.

Leur principe est le même que celui des machines à coudre familiales qui appliquent des rubans, des fils ou des cordelettes sur des tissus. Le fil supérieur (celui de l'aiguille) traverse le tissu avant de passer dans un crochet qui le noue avec le fil du dessous (voir la figure 3). Lorsqu'on lève l'aiguille, le fil se tend et le pied presseur libère le textile, qui est alors déplacé pour le point suivant. Les machines à broder déplacent le tissu dans n'importe quelle direction, grâce à des moteurs pas-à-

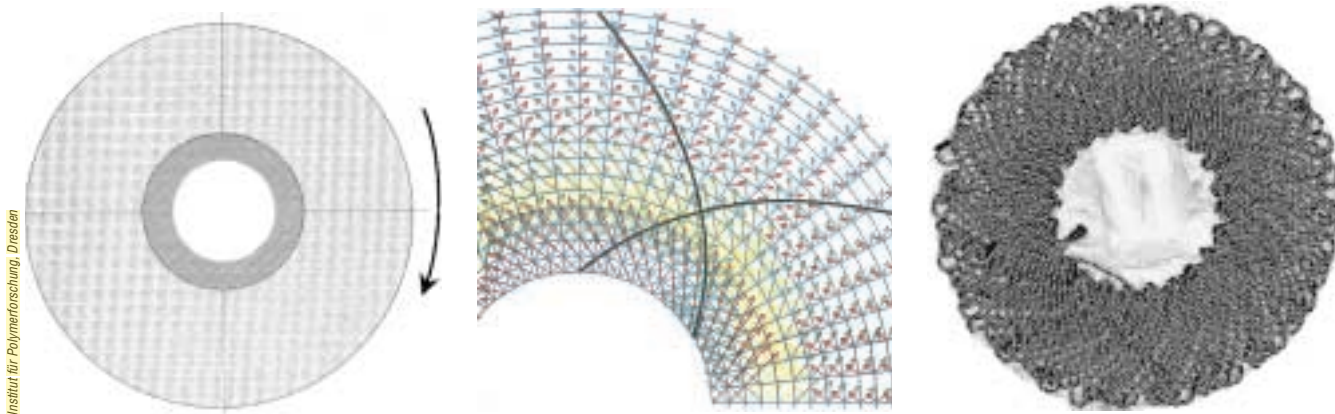
pas à commande électronique, tandis que la tête brodeuse reste fixe. Seule la taille de la machine limite celle du motif. Les systèmes multi-aiguilles actuels, entièrement automatiques, ont jusqu'à 16 fils supérieurs par tête. Ils brodent des motifs très grands, de couleurs variées, introduisant des fils, des rubans et des cordelettes dans les tissus. Les machines à broder industrielles les plus perfectionnées sont équipées de 20 têtes (voir la figure 2).

Pour programmer les contours d'un motif de broderie, la commande de la machine fonctionne de la même manière qu'un système de conception assistée par ordinateur. On scanne par exemple le dessin d'un motif, puis on élabore le programme par interpolation des données ainsi obtenues.

Notre collègue Horst Rothe a étudié l'utilisation de la broderie pour renforcer des textiles de composites. La rigidité et la résistance mécanique de ces matériaux est maximale dans la direction des renforts. Jusqu'à présent, seules des pièces soumises à des forces orientées dans des directions

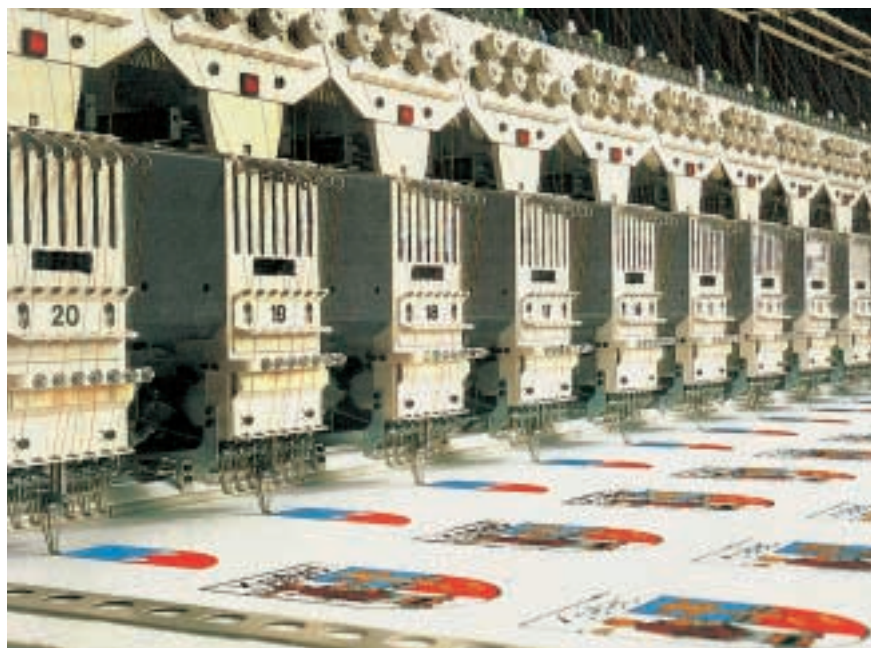
bien déterminées, par exemple des réservoirs sous pression étaient renforcées avec des textiles, tels des tissus et des tricotés multi-axiaux (voir *Des textiles à trois dimensions*, par Jürgen Brandt et Klaus Dreschler, page 178). Dans les autres cas, l'orientation et la quantité des fibres sont plus difficiles à définir et à réaliser, mais la broderie et la couture sont prometteuses.

On calcule le sens et l'intensité des contraintes par la méthode des éléments finis (voir *La mécanique des tissus*, par Jean-François Ganghoffer et Massimo Magno, page 88). Pour un disque isotrope, soumis à un effort de torsion, tel un disque d'embrayage (voir la figure 1, à gauche et au milieu), les contraintes sont maximales au centre (sur le moyeu), car la surface d'absorption des charges est inférieure, à épaisseur constante. Les lignes de champ, reliant les forces qui s'exercent aux différents points, y sont également plus denses (voir la figure 1, au milieu). Si on les prend comme contours de motifs de broderie, on obtient une répartition des



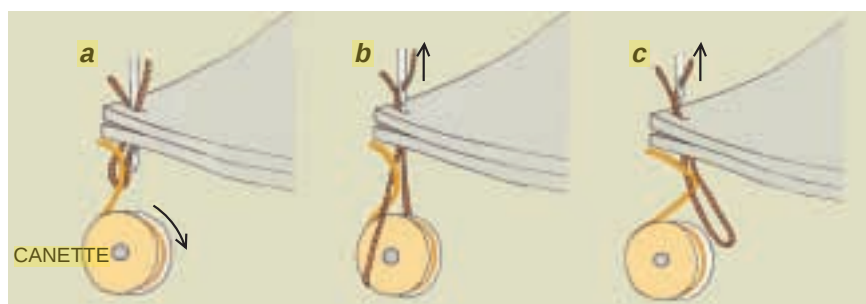
1. ON ALLÈGE des composites en brodant des fibres sur leur textile de renfort : quand ces broderies passent dans les zones de contraintes maximales, les pièces brodées sont plus résistantes ; on peut donc en réduire la taille. Pour appliquer cette technique à un disque d'embrayage (à gauche), on étudie d'abord les contraintes qui s'exer-

cent sur lui. Puis on trace les courbes reliant les vecteurs principaux de contrainte (les deux lignes noires en sont des exemples au centre), dont la densité est maximale au centre du disque. Enfin, on brode des cordelettes de fibres de carbone sur le renfort textile, selon un motif calqué sur ces courbes.



ZSK Strickmaschinen-Gesellschaft, Krefeld

2. CETTE MACHINE À BRODER industrielle possède 20 têtes multi-aiguilles.



3. PRINCIPE DES MACHINES À COUDRE et à broder : le fil supérieur, entraîné par l'aiguille, traverse les deux pièces de tissu à assembler (a). Il forme ainsi une boucle au-dessous des tissus, dans laquelle se glisse un crochet (non représenté). Le crochet tourne (voir la flèche) pour que la boucle passe autour de la canette (b), puis autour du fil du dessous qui y est enroulé (c). Au total, le fil du dessus est accroché au fil du dessous.

contraintes uniforme sur l'ensemble des fibres, ce qui permet de réduire leur nombre, donc la masse de la pièce (voir la figure 1, à droite).

On utilise des écheveaux de fibres de renfort en verre, en carbone, en aramide ou en matériaux hybrides (des fibres de renfort imprégnées d'une résine). Toutes les matières fibreuses que l'on peut filer sont également utilisables, tels le lin, la ramie (une sorte d'ortie) et le jute, ainsi que celles dont on peut faire des faisceaux, telles les fibres céramiques. Leur emploi devrait réduire le prix de revient des composites à fibres : l'étape de coupe et les chutes sont éliminées, puisqu'on donne directement aux produits leur forme finale ; on peut utiliser des fibres naturelles, bon marché, car elles donnent d'aussi bon

résultats que les fibres de verre. Les procédés automatisés de couture sont capables de reproduire les mêmes pièces avec une grande précision, ce qui garantit une qualité élevée.

En outre, d'autres procédés ont été mis au point à partir de cette technique. Par exemple, on inclut des réserves de fibres étirables dans des pièces textile, qui peuvent ensuite être mises en forme pour fabriquer des produits semi-finis, tels les tôles et des renforts textiles tridimensionnels. La combinaison de ces innovations est particulièrement prometteuse.

Konrad GLIESCHE est spécialiste des composites à renforts brodés, à l'Institut de recherche sur les polymères de Dresde.
