

des édifices permanents, tels les six parasols géants installés dans les deux cours intérieures de la mosquée de Médine. Chaque parasol, enduit de polytétrafluoroéthylène, mesure 18 mètres de longueur et 17 mètres de largeur. L'ensemble se déploie en 90 secondes pour former une protection contre le soleil, à 14 mètres de haut (voir la figure 3) ; en outre, le textile des parasols retient l'air frais que soufflent les piliers.

Dans l'industrie du bâtiment, les textiles sont aussi une source d'innovations. Des structures creuses à double paroi textile parallèles, reliées par des fils qui leur sont perpendiculaires, récemment utilisées en Europe et aux États-Unis, ménagent un espace où gaz, liquides et poussières peuvent circuler. On peut aussi le remplir de matériaux solides, tels des granulés ou des matériaux thermodurcissables (mousses, béton). On sait varier les propriétés des deux parois textiles ; la distance qui les séparent peut atteindre un mètre.

Dans les champs et dans le corps

Avec les agrotextiles, dont la perméabilité à la lumière, à l'air et à l'eau est réglable, on construit des serres atteignant 80 mètres de longueur et 40 mètres de largeur, où les machines agricoles ont la place de circuler. D'autre part, des voiles «à respiration active» protègent les récoltes de plein champ : ils laissent passer l'air et la vapeur d'eau, mais limitent les échanges thermiques, évitant une chaleur excessive ou le gel. En réglant leur opacité, on blanchit certaines cultures au cours de leur croissance, par exemple les salades ou les poireaux. On envisage même des agrotextiles dont les fibres contiendraient des substances actives, telles des bactéricides, qu'on libérerait selon les besoins des cultures ; ce système réduirait la consommation de pesticides et d'engrais que la culture classique et il reviendrait moins cher.

Les textiles médicaux, eux, accélèrent la cicatrisation, après les interventions chirurgicales. On utilise déjà du matériau de suture et de fermeture des plaies qui se résorbe spontanément. Des implants textiles, en cours de mise au point, contiendront des cel-



2. EN ABSORBANT le pétrole répandu à la surface de l'eau, des tuyaux en fibres de polypropylène (à gauche) limitent l'étendue d'une marée noire. Des fibres contenant des tensioactifs (à droite, grossissement 5 200) sont capable d'absorber les polluants aqueux et les rejets industriels.



3. DANS LES COURS INTÉRIEURES de la mosquée de Médine, des textiles enduits de polytétrafluoroéthylène protègent les fidèles du soleil, en été. En hiver, les parasols sont fermés le jour et ouverts la nuit, pour retenir la chaleur. Ils se déploient en 90 secondes, grâce à un système de commande hydraulique, et forment un toit à 14 mètres du sol. Les mâts de ces parasols, les plus grands jamais construits, soufflent de l'air frais.

lules qui stimulent la formation de matière osseuse ou de peau neuve. Ils libéreront des principes actifs dans l'organisme, de façon régulière et prolongée. Pour l'instant, les biologistes essayent d'augmenter la biotolérance aux textiles.

Enfin des textiles industriels sont présents dans des matériaux composites. À résistance égale, ces derniers sont plus légers que les matériaux classiques. Cependant leur résistance n'est pas isotrope : les composites supportent mal les contraintes dans la direction perpendiculaire aux fibres. Aussi des constructeurs ont-ils remplacé des fibres par des textiles. Le Centre européen de composites Dupont, à Bad Homburg, a mis au point un textile imprégné de matière synthétique,

nommé organotôle. Après chauffage par un rayonnement infrarouge, il est thermoformable en pièces tridimensionnelles. Les premières applications des organotôles étaient des casques pour cyclistes et des vélos ultra légers. D'autre part, des composites contenant des textiles en fibres de carbone et du métal, souvent de l'aluminium ou du magnésium, sont à l'étude. Ils seraient légers, et auraient en même temps une résistance mécanique et chimique élevées. Ils seraient utilisés dans les véhicules aéronautique, spatiaux, ferroviaires et automobiles.

Klaus-Dieter LINSMEIER est rédacteur à la revue *Spektrum der Wissenschaft* (édition allemande de *Scientific American*).

Des textiles à trois dimensions

JÜRGEN BRANDT • KLAUS DRESCHLER

Grâce à la mise au point de nouvelles techniques de tissage, tressage, tricotage, etc., les textiles ne sont plus limités à deux dimensions. Ces innovations répondent aux exigences des applications techniques, tel le renfort de composites.

Aujourd'hui, les textiles ont une place importante dans l'industrie, mais, depuis 20 ans, les importations de tissus d'Europe méridionale et d'Asie font chuter les prix dans le secteur de l'habillement et de l'ameublement. Pour être compétitifs, les industriels européens automatisent leur production, emploient des techniques innovantes et mettent au point des textiles techniques.

Dans les composites, par exemple, la matrice polymère est renforcée avec des textiles, souvent en fibres de verre ou de carbone. La rigidité, la résistance mécanique élevée et la légèreté des composites intéressent l'industrie aéronautique et spatiale : les ailettes qui assurent la stabilité de l'Airbus et les pales de rotor des hélicoptères sont

en composite. Dans la matrice, les textiles sont orientés en fonction des contraintes que subit le composite : ils sont placés parallèlement aux forces de traction et à 45 degrés des forces de cisaillement.

La fabrication manuelle de textiles de renfort est fastidieuse et ne se justifie que pour des pièces uniques ou pour des petites séries. Aussi les ingénieurs ont cherché des méthodes rationnelles où interviennent le tissage, le tressage, le tricotage et la couture, pour fabriquer des textiles de renfort adaptés à leurs applications. Ces méthodes ont fait entrer les composites dans l'industrie automobile, où l'allègement de certaines pièces réduit la consommation d'énergie et les émissions de polluants.



1. CE RÉSEAU TRIDIMENSIONNEL tissé est un renfort pour des composites de type «sandwich» : on l'imprègne d'une résine injectée à la fois par-dessus et par-dessous. Les deux couches de fibres externes sont fortement liées par un système de fils orientés dans l'épaisseur du tissu.



2. LES FISSURES se propagent dans les composites à fibres classiques, parce que les couches de textiles, faiblement liées, peuvent se détacher (à gauche). Les composites à renforts textiles tridi-



mensionnels n'ont pas cet inconvénient : les différentes épaisseurs de fils de chaîne et de trame sont liées par un système de fils qui leur sont perpendiculaires (à droite).



3. CE COMPOSITE À FIBRES CLASSIQUE, (à gauche, grossi 12 fois) présente plusieurs couches qui se séparent lors de la rupture. Au contraire, un composite à renfort textile tridimensionnel présente une meilleure



cohésion grâce aux fibres orientées dans le sens de l'épaisseur (à droite, grossi 19 fois). Ces deux photographies ont été prises au microscope électronique à balayage.

Le tissage spatial

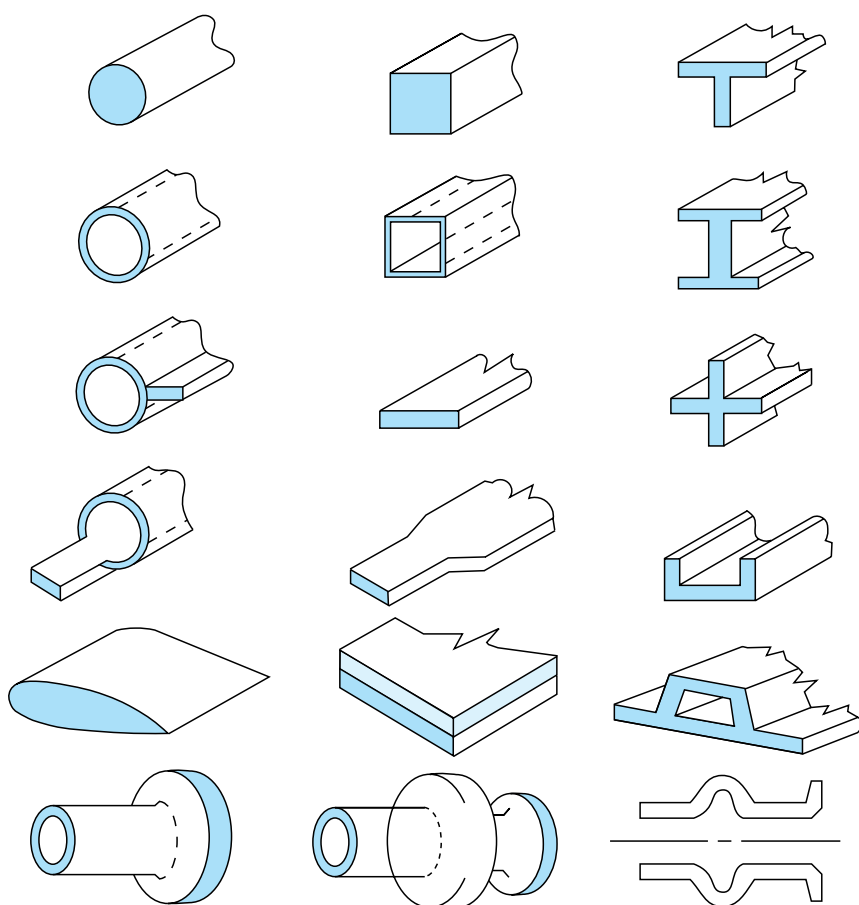
En Allemagne, un programme commencé en 1985 a favorisé l'innovation dans le domaine du tissage : des sociétés de l'industrie aéronautique et spatiale et de l'industrie textile ont d'abord reconnu que les tissus classiques, fabriqués en croisant des fils de chaîne et des fils de trame, sont limités à deux dimensions ; après quatre années de recherches, elles ont produit des textiles en trois dimensions, où des fils, orientés dans le sens de l'épaisseur, relient plusieurs couches (voir la figure 1). Ces textiles sont utilisés comme renforts d'éléments de construction. Auparavant on empilait plusieurs couches dans la matrice, les unes après les autres, pour obtenir la résistance désirée ; les tissus tridimensionnels sont incorporés en une seule étape. Ils améliorent la qualité du matériau, car ils absorbent les impuretés de la matrice, qui provoquent parfois la défaillance des composites classiques. Alors que ces derniers résistent mal aux essais de pelage, où le matériau fissuré est soumis à une traction, les tissus tridimensionnels empêchent presque totalement la propagation des fissures dans les composites (voir la figure 2). Ils évitent la délamination, c'est-à-dire le détachement successif des couches de fibres de renfort, qui engendre des ondes de choc et contribue à la rupture globale. C'est particulièrement utile dans le cas des composites à fibres de carbone, où les délaminations sont invisibles de l'extérieur. Les tissus tridimensionnels évitent ainsi les

inspections préventives, coûteuses, des structures qui contiennent des composites classiques.

Des groupes de chercheurs français et anglais, notamment du secteur aérospatial, ont également fabriqué des tissus tridimensionnels, mais selon une technique différente.

Les produits obtenus sont des profilés creux où l'orientation des fibres est optimisée.

La tenue à la rupture en traction et en compression des composites à renforts textiles tridimensionnels est meilleure que celle des composites à renforts textiles classiques (voir la



4. QUELQUES FORMES que l'on peut fabriquer par tissage.

figure 3), même quand le système de tissage tridimensionnel réduit le nombre de fils de chaîne et de trame, et donc la résistance du tissu. La technique de tissage mise au point à l'Université de Caroline du Nord pallie cet inconvénient, car les fils de chaîne et de trame ne sont pas courbés au cours du tissage, de sorte que leurs propriétés physiques sont mieux exploitées et que la résistance des tissus tridimensionnels qui en procèdent est la

même que celle des tissus classiques (voir la figure 5).

Les tricots multiaxiaux ont aussi une bonne tenue à la rupture (le terme de tricot est réservé aux textiles fabriqués par formation de mailles). Les fils de chaîne et les fils de trame ne se croisent pas à angle droit, contrairement au cas du tissage. Plusieurs épaisseurs de fils de chaîne et de trame, au maximum sept, sont liés par un troisième système de fils.

Tressage et tricotage

Alors que le tissage spatial et le tricotage multiaxial engendrent des objets plats, le tressage (où les fils de chaîne et de trame se croisent à 45 degrés) sert plutôt à réaliser des objets tridimensionnels, principalement des profilés (voir la figure 4), comme les raccords de treillis ou les tuyères de fusées. Les premiers ont été réalisés à l'Université de Pennsylvanie et à l'Université de Caroline du Nord : on fabrique d'abord une pièce support, en mousse ou en cire, que l'on enlève ensuite, après l'avoir entourée de textile tressé (voir la figure 6). Pour les pièces de protection contre les chocs, on utilise une mousse qui absorbe l'énergie et qui n'est pas enlevée après l'étape de tressage. L'Institut des techniques textiles d'Aix-la-Chapelle et ses partenaires industriels cherchent à piloter le tressage tridimensionnel, par ordinateur. C'est un tressage fil par fil, donc coûteux. Les profilés formés peuvent avoir des sections variées. L'orientation des fibres est optimisée, dans chaque secteur de la structure, comme dans les plantes. L'industrie automobile combine le tressage à d'autres techniques afin d'orienter les fibres dans plusieurs directions différentes ; on fabrique ainsi les sangles qui assurent la rigidité des profilés en T.

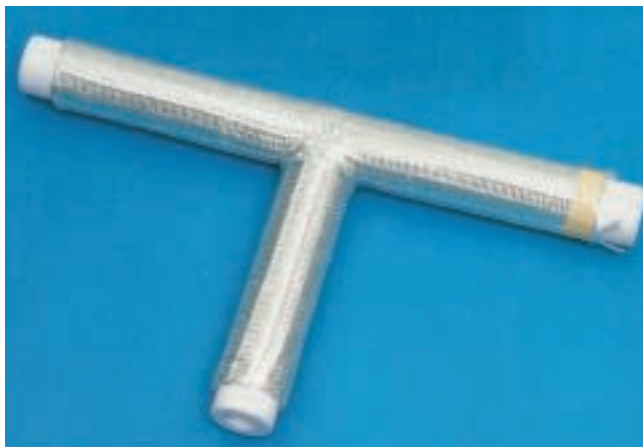
Le tricotage consiste à faire passer des fils à travers des mailles existantes pour en former de nouvelles. Les fibres ainsi courbées supportent moins bien les charges, mais leur organisation spatiale est plus souple. En Allemagne, on a mis au point une machine à tricoter, dotée d'un système de conception assistée par ordinateur. Elle produit des pièces variées, de toutes formes, par exemple pour rigidifier les raccords en T (voir la figure 7) ou pour les revêtements intérieurs des casques de moto. Un projet de recherche européen vise à améliorer les propriétés mécaniques des composites renforcés avec des tricots, à l'aide de fils de trame rectilignes.

Malgré les progrès du tissage, du tressage et du tricotage, on ne produira vraisemblablement jamais de textiles aussi complexes qu'une carrosserie de voiture ou qu'un fuselage d'avion. Pour obtenir des pièces textiles complexes, on doit fabriquer



North Carolina State University

5. MACHINE DE TISSAGE tridimensionnel, où les fils de chaîne et de trame sont tissés sans courbure, ce qui compense leur faible proportion (par rapport à un tissu classique) et rend le textile plus résistant aux tractions longitudinales.



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.