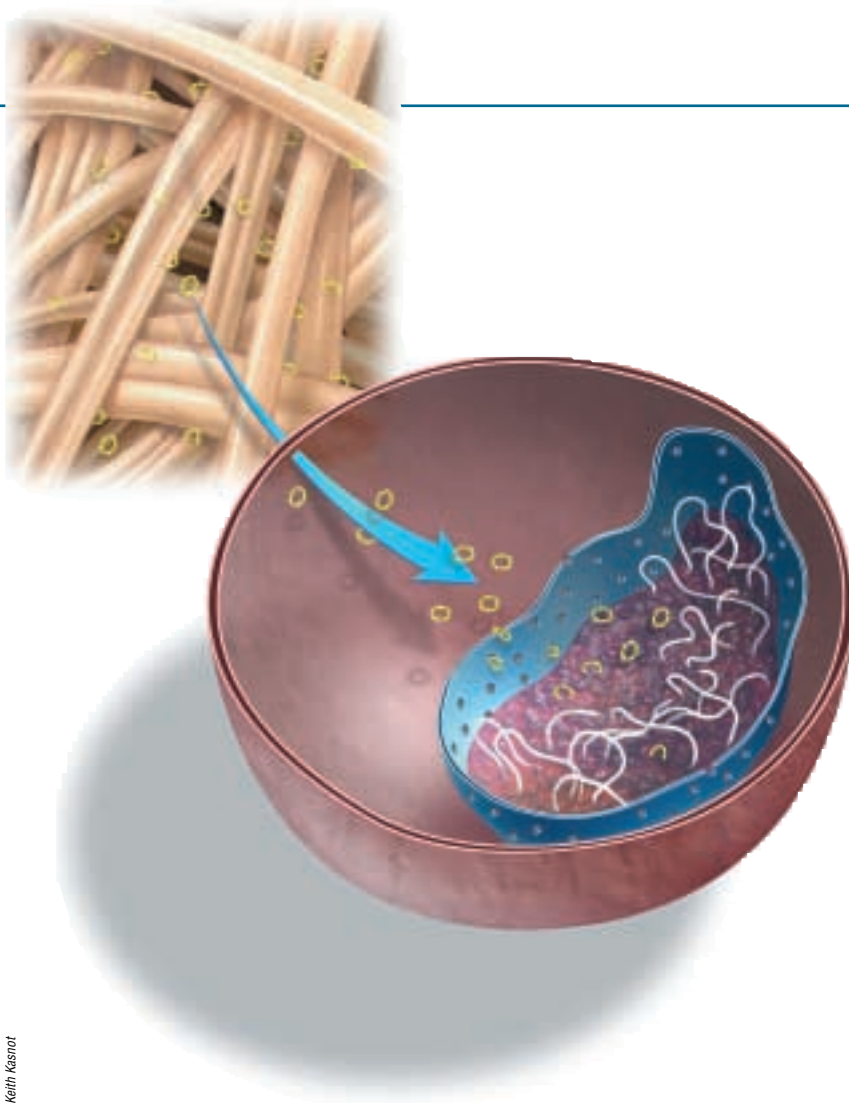




Keith Kasrot

6. DES PLASMIDES, c'est-à-dire des boucles d'ADN (en jaune), sont libérés par une matrice de polymère ; ils s'intègrent à une cellule de l'organisme qui synthétisera les protéines codées par l'ADN. Ce procédé est plus durable, car les protéines sont dégradées plus rapidement que les plasmides.

par un traumatisme ou par une thérapie anticancéreuse. On doit alors cultiver le tissu en un autre endroit de l'organisme avant qu'il soit implanté où il est nécessaire. Par exemple, un os maxillaire peut croître en liaison avec un os de la hanche bien vascularisé chez un patient atteint d'un cancer buccal, qui, à la suite d'une radiothérapie, souffre d'un défaut de vascularisation de la mâchoire.

Par ailleurs, nous tentons d'améliorer les propriétés des polymères biodégradables qui détermineront exactement la taille et la forme du tissu construit, contrôleront avec précision la fonction des cellules à son contact et se dégraderont à une vitesse en synergie avec celle de la formation du tissu.

Le graal de notre discipline reste l'organe complet. Comment obtenir un foie fonctionnel, par exemple, assurant toutes ses réactions chimiques

essentielles pour la vie? Plus de 10 000 personnes mourant chaque année, en France, d'une insuffisance hépatique, l'étude des néo-foies est amplement justifiée. Les bio-ingénieurs ont d'abord étudié la capacité de régénération partielle du foie, bien connue de Prométhée.

Des médecins ont vérifié que l'on obtient du tissu hépatique quand on greffe des cellules hépatiques à des animaux. De notre côté, nous avons mis au point des biomatériaux adaptés à la croissance des tissus de type hépatique et nous avons identifié des composés qui favorisent la croissance des cellules hépatiques transplantées. Les tissus hépatiques régénérés assurent certaines fonctions chimiques du foie, mais jamais la fonction de l'organe entier.

De même, grâce à des cellules rénales, David Humes, de l'Université du Michigan et A. Atala ont fabriqué

des néo-organes capables de filtrer le sang, tandis que l'équipe de J. Vacanti a montré que l'on peut développer de l'intestin dans la cavité abdominale d'un animal, puis le raccorder au tissu intestinal préexistant. Ces néo-intestins soulagent les patients atteints d'un raccourcissement de l'intestin, conséquence d'un défaut congénital ou d'un traumatisme, et qui perturbe le développement des enfants. Aujourd'hui, le seul remède est la greffe d'intestin, mais la pénurie d'organes limite les possibilités thérapeutiques. A. Atala a également montré que l'on peut former de cette manière une vessie complète et l'utiliser pour remplacer la vessie d'origine.

Le cœur, enfin, est activement étudié. Michael Sefton et ses collègues de l'Université de Toronto espèrent faire croître des cœurs : 10 à 20 ans leur seront probablement nécessaires pour réussir, mais ils obtiendront certainement avant des tissus, tels les valves cardiaques et les vaisseaux sanguins.

Comment prévoir les progrès de ces études? L'exercice est difficile, mais la consultation des spécialistes donne des ordres de grandeur raisonnables. Il faudra probablement cinq ans pour obtenir des peaux reconstruites entièrement fonctionnelles. En revanche, nous ne croyons pas que cinq ans suffisent pour mettre au point des foies entiers prêts à être implantés ; comptons plutôt 30 ans.

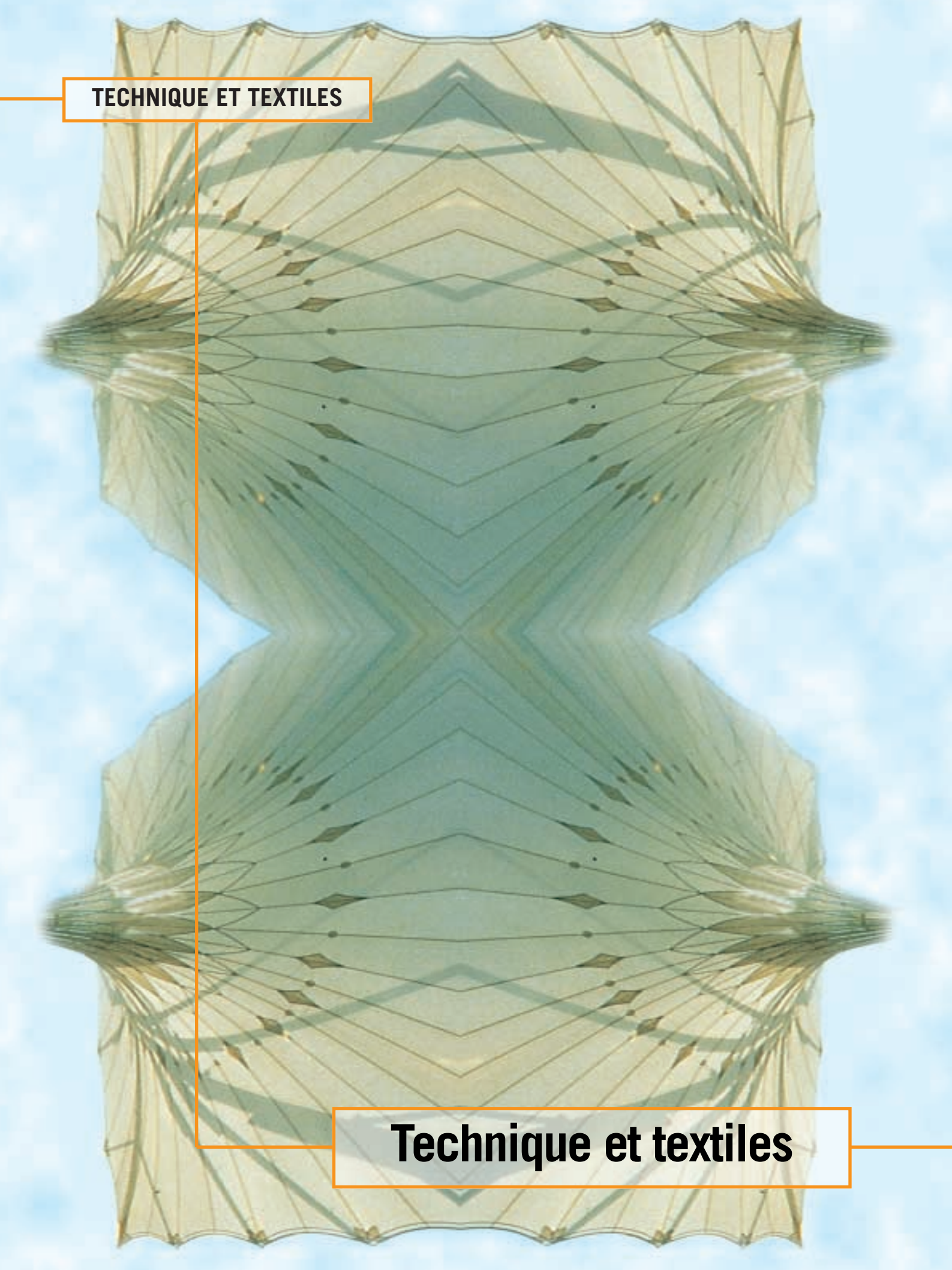
Il y a 10 000 ans, l'agriculture a donné à l'humanité les moyens de se nourrir, même lors des années de pénurie. L'ingénierie des tissus nous affranchira peut-être des limites de notre propre corps.

David MOONEY est professeur de biologie à l'Université du Michigan. Antonios MIKOS est professeur de bio-ingénierie à l'Université Rice.

Carol EZZELL, *Tissue Engineering and the Human Body Shop : Designing «Bio-artificial Organs»*, in *Journal of NIH Research*, vol. 7, n° 7, pp. 49-53, juillet 1995.

Principles of Tissue Engineering, sous la direction de R.P. Lanza, R. Langer et W.L. Chick, R.G. Landes, 1997.

Frontiers in Tissue Engineering, sous la direction de Charles W. Patrick, Jr., Antonios G. Mikos et Larry V. McIntire, Pergamon Press, 1998.



TECHNIQUE ET TEXTILES

Technique et textiles

Les textiles techniques

KLAUS-DIETER LINSMEIER

Nous savons évidemment que des textiles sont utilisés pour l'habillement, la literie, la tapisserie, les tentes, les stores... En revanche, on ignore souvent que des textiles spéciaux, dits techniques, composent des systèmes variés, des films d'emballage aux coussins autogonflants pour les automobiles.

L'homme travaille les fibres animales et végétales depuis au moins 5 000 ans ; il réalise ainsi des vêtements, des ustensiles domestiques, mais aussi des cordes, des câbles, des filets et des voiles, des bâches en feutre et en tissu, des tentes, des nattes et des tapis...

Les premières productions industrielles furent des tissus. Mécanisés très tôt, la filature, le tissage et le tricotage sont aujourd'hui entièrement automatisés. La chimie a fait considérablement progresser l'industrie textile ; on lui doit notamment des fibres synthétiques, qui composent des textiles classiques ou des textiles techniques. Le secteur des textiles s'est diversifié, à la demande des utilisateurs qui ont réclamé des textiles adaptés à leurs besoins variés ou en raison de la concurrence entre les entreprises de textiles, qui ont voulu élargir leur offre. Quatre à cinq millions de tonnes de fibres sont destinées à des usages techniques, chaque année, dans le monde.

La diversité du textile technique

Depuis quelques années, l'industrie du textile technique progresse et se spécialise, tandis qu'elle réapprend à utiliser des fibres naturelles. On distingue deux sortes de textiles techniques : les souples et les durs, qui servent à armer d'autres matériaux pour fabriquer des composites. On les classe également par catégories selon leurs utilisations. On parle ainsi de textiles de protection, de «géotextiles», de textiles de construction, d'«agrotextiles», de textiles médicaux et de textiles industriels. Les quelques exemples présentés dans cette partie donnent un aperçu général des applications de ces diverses catégories de textile, dont les limites sont d'ailleurs assez floues.

Les vêtements qui protègent du froid sont composés de textiles techniques, contrairement à ceux qu'on porte à la maison ou pour aller faire des courses en ville. L'Institut de recherche et d'essais des matériaux

de Leipzig en étudie un, qui contient des microcapsules d'un matériau à changement de phase : il stocke, puis restitue une grande quantité de chaleur, en changeant de phases selon la température de la peau. Ces microcapsules décuplent la capacité calorifique des fibres acryliques grâce à l'air qu'elles y emprisonnent. Avec elles, on fabriquera des vêtements fins, non doublés, pour les grands froids.

Sur l'île de Ténérife, aux Canaries, des films étanches en textile enduit, extrêmement résistant aux intempéries, tapissent le cratère du volcan éteint Taco : un réservoir de 825 000 mètres cubes (voir la figure 1) améliore l'irrigation des cultures.

Dans les Alpes, une toile de jute empêche temporairement l'érosion par le vent, par les glissements de terrain, et par la croissance des plantes, en améliorant leur enracinement. Elle se dégrade finalement en humus. À la surface de la mer, un tuyau tissé dont les fibres sont des céramiques réfractaires, déposé par des remorqueurs, confine les nappes de pétrole, de sorte qu'on peut les brûler sans danger. Des nappes à base de polypropylène sont également utilisées dans des applications similaires (voir la figure 2) : ce polymère lipophile aspire le pétrole par les pores du textile. Quand on lui ajoute des tensioactifs (des molécules qui se lient à la fois à l'eau et aux molécules hydrophobes), on peut aussi capter des rejets industriels, sans qu'ils modifient la structure du matériau de la nappe.

En architecture, on utilise des textiles solides et résistant aux intempéries pour les constructions légères. Ils servent à réaliser des édifices temporaires, tels les halls d'exposition, ou



Hochstetler, Frankfurt am Main

1. LE CRATÈRE du volcan Taco, sur l'île de Ténérife, est tapissé d'un tissu étanche. Il sert de réservoir d'eau pour l'agriculture.

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'extension 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

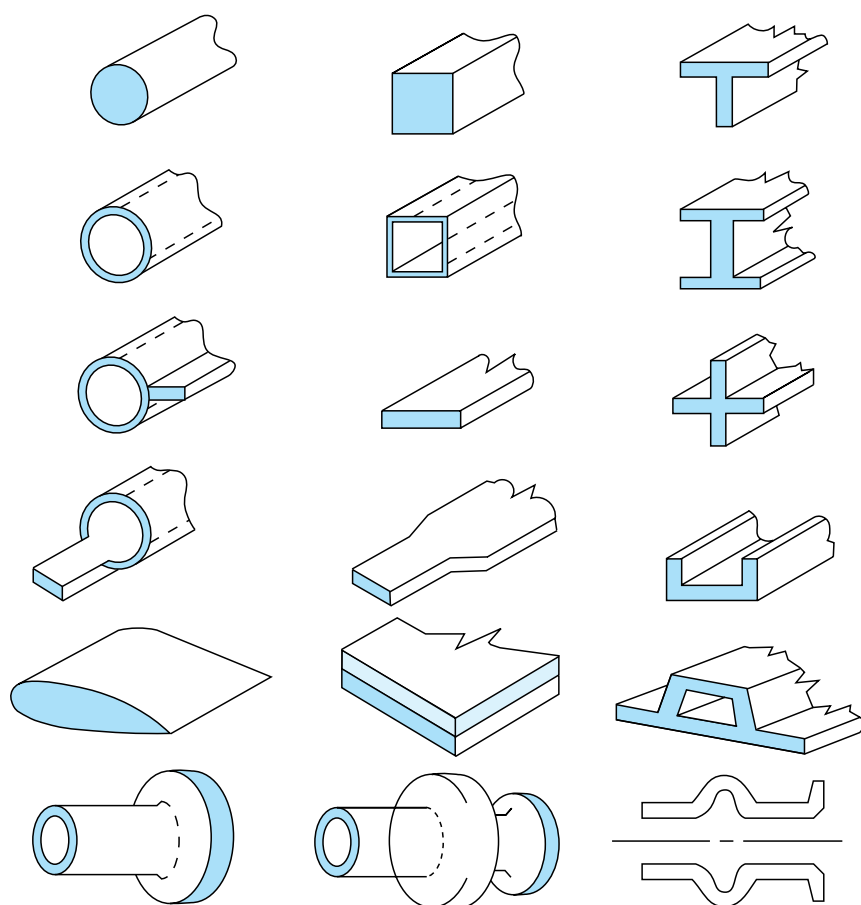
En Allemagne, un programme commencé en 1985 a favorisé l'innovation dans le domaine du tissage : des sociétés de l'industrie aéronautique et spatiale et de l'industrie textile ont d'abord reconnu que les tissus classiques, fabriqués en croisant des fils de chaîne et des fils de trame, sont limités à 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.

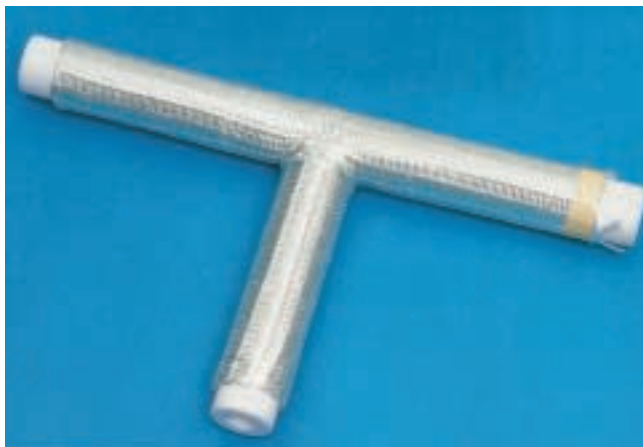
Le tricotage consiste à faire passer des fils à travers des mailles existantes pour en former de nouvelles. Les fibres ainsi courbées supportent moins bien les charges, mais leur organisation spatiale est plus souple. En Allemagne, on a mis au point une machine à tricoter, dotée d'un système de conception 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.

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-

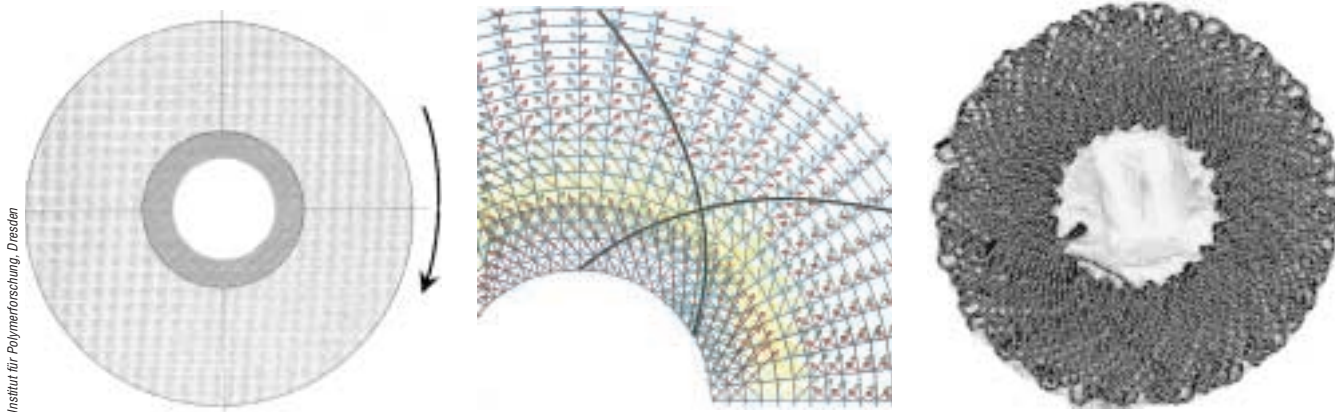
pas à commande électronique, tandis que la tête brodeuse reste fixe. Seule la taille de la machine limite celle du motif. Les systèmes multi-aiguilles actuels, entièrement automatiques, ont jusqu'à 16 fils supérieurs par tête. Ils brodent des motifs très grands, de couleurs variées, introduisant des 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

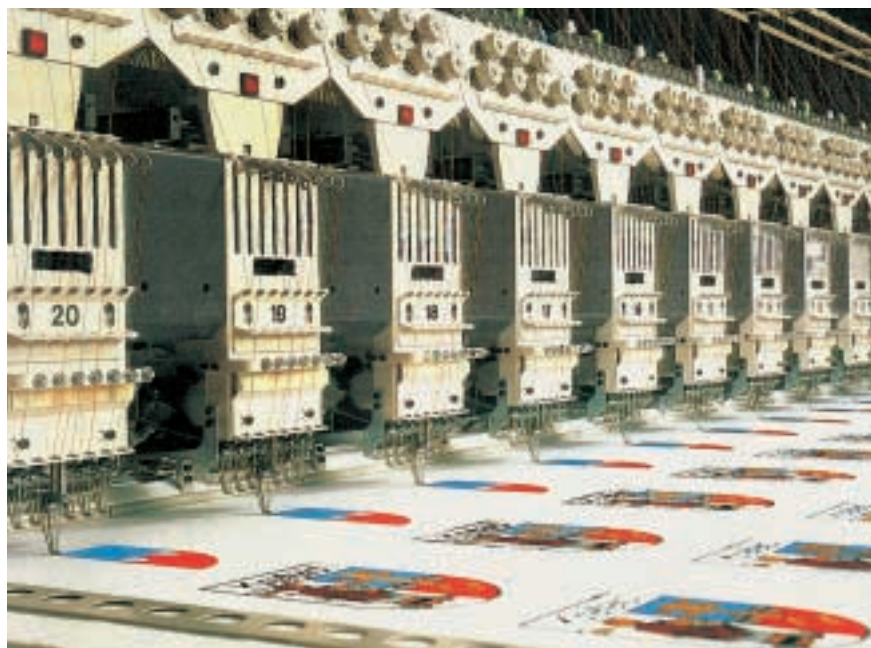
bien déterminées, par exemple des réservoirs sous pression étaient renforcées avec des textiles, tels des tissus et des tricotés multi-axiaux (voir *Des textiles à trois dimensions*, par Jürgen Brandt et Klaus Dreschler, page 178). Dans les autres cas, l'orientation et la quantité des fibres sont plus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



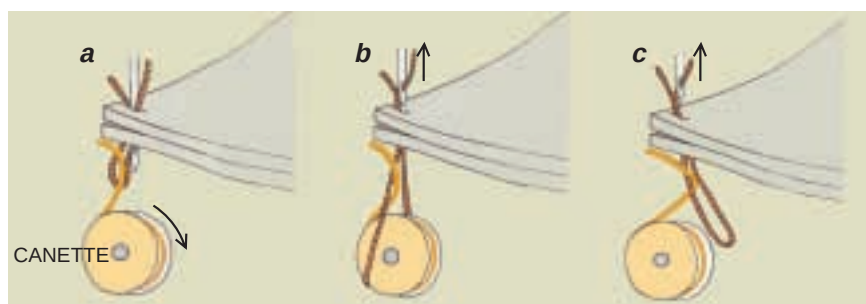
1. ON ALLÈGE des composites en brodant des fibres sur leur textile de renfort : quand ces broderies passent dans les zones de contraintes maximales, les pièces brodées sont plus résistantes ; on peut donc en réduire la taille. Pour appliquer cette technique à un disque d'embrayage (à gauche), on étudie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

Les fibres naturelles dans les composites

ANDRZEJ BLEDZKI • JOCHEN GASSAN

Biodégradables et peu coûteuses, les fibres naturelles commencent à s'imposer dans les composites. Les performances des matériaux obtenues égalent parfois celles de composites classiques.

Il y a 70 ans environ, on utilisait surtout des fibres naturelles pour fabriquer les objets d'usage courant et les produits techniques, même dans les pays industrialisés. Par exemple, les textiles, les cordes et les voiles étaient en lin et en chanvre. À la fin du siècle dernier, les sièges et les réservoirs à carburant des premiers avions étaient en fibres naturelles imprégnées d'un peu de polymère, qui jouait le rôle de liant. En 1908, du papier et du coton renforçaient des résines de bakélite. Avec ces matériaux, les premiers composites, l'industrie produisait des panneaux et des tubes pour l'électrotechnique. À partir des années 1950, les matériaux synthétiques s'imposèrent, notamment dans les domaines techniques, grâce au bas prix du pétrole et au développement fulgurant de la pétrochimie. Les matières premières renouvelables ne retiennent à nouveau l'attention que depuis quelques années.

Les pays en développement, qui n'ont jamais abandonné les fibres naturelles, peuvent aujourd'hui guider les pays industrialisés. En Inde, plusieurs instituts étudient le jute (plante herbacée) dont les fibres, associées à du polyester, entrent dans la composition de produits semi-finis, tels des tubes et des panneaux. Du polyester renforcé au jute a été utilisé pour construire une maison à Madras, en 1978, et un silo à céréales. Dans certaines régions du monde, l'argile mélangé à de la paille est depuis toujours le principal matériau de construction.

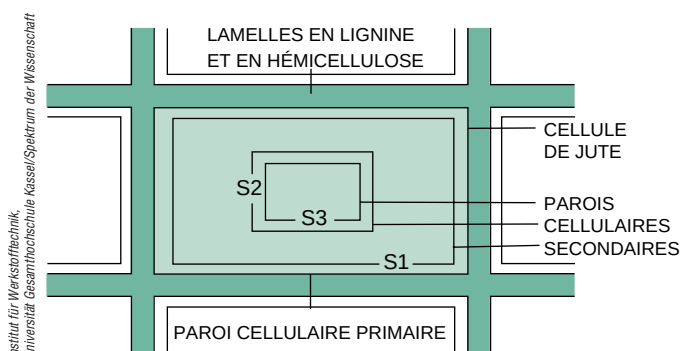
L'industrie automobile des pays occidentaux cherche également à utiliser les fibres naturelles. Pendant des décennies, des fibres issues de déchets textiles ont renforcé le matériau synthétique de la carrosserie de la *Trabant*, en Allemagne de l'Est. La Société *Mercedes-Benz* met aujourd'hui au point sa série *K*, pour *Kraut* (plante) ou *Kompost* (compost), qui contient des fibres de

bois, de lin, de ramie (sorte d'ortie) et de chanvre. Par exemple, on étudie des garnitures de portes en bois moulé ou en fibres naturelles agglomérées, des toits en résine époxy ou polyuréthane, renforcées avec des fibres de lin.

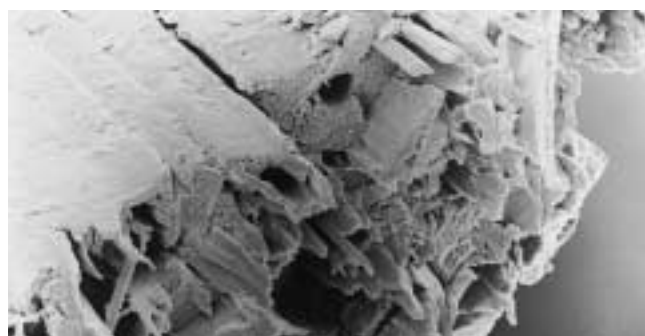
Du naturel amélioré

Les fibres naturelles sont de trois types : les fibres végétales, tels le coton, le lin, le chanvre, la ramie, le jute, le sisal... ; les fibres animales, telles la laine et la soie ; et les fibres minérales, telle l'amiante. Pour renforcer les matériaux synthétiques, on utilise généralement des fibres végétales. Elles sont constituées soit de filaments (coton, kapok), soit de faisceaux de tissus de soutien de plantes dicotylédones, soit de faisceaux de nervures de monocotylédones (lin, sisal).

Aujourd'hui, on produit mondialement 3,6 millions de tonnes de fibres de jute et 0,8 million de tonnes de fibres



1. UNE FIBRE DE JUTE est composée de cellules ordonnées (celle du centre est en vert clair), séparées par des lamelles en lignine et en hémicellulose (en vert foncé). Chaque cellule a une paroi pri-



maire et trois parois secondaires, en fibrilles de cellulose. À droite, des fibres de jutes, observées au microscope électronique à balayage, sont grossies 2 680 fois.

de lin par an (et 1,2 million de tonnes de fibres de verre). Parmi les fibres végétales, la fibre de lin est la plus solide, mais elle revient 30 pour cent plus cher que la fibre de verre, sans tenir compte des fluctuations des cours, durant les dernières décennies.

Les traitements des fibres naturelles déterminent le prix et la qualité de ces fibres. Comme leurs propriétés sont plus hétérogènes que celles des fibres synthétiques, on les uniformise par délignification ou par dégomme, c'est-à-dire qu'on élimine la couche adhésive qui entoure les fibres. D'autres traitements agissent sur les propriétés structurales des fibres, pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques, et sur leur état de surface, pour accroître leur adhérence à une matrice polymère, les rendre imperméables et ininflammables (les fibres de verre sont également enrobées de composés qui améliorent leur adhérence à la matrice, mais ce traitement est moins cher que le précédent).

On ne remplace donc pas les fibres de verre par des fibres naturelles pour faire des économies, mais parce que les matières premières renouvelables ont des avantages écologiques : elles font un meilleur emploi des ressources et conduisent à un dégagement réduit de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, puisque la combustion des fibres naturelles ne produit qu'une quantité de dioxyde de carbone égale à celle que la plante a absorbée pendant sa croissance. Enfin les objets en composites à fibres naturelles sont plus faciles à recycler. Si leur matrice était biodégradable, ils pourraient même servir de compost.

Des systèmes structurés

Les fibres végétales ont toutes une composition chimique comparable : elles contiennent de 60 à 85 pour cent de cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des pectines. Les proportions dépendent des conditions de croissance, notamment météorologiques, de l'âge des fibres et du traitement de délignification.

L'organisation structurale de leurs constituants détermine leurs propriétés mécaniques. En général, les cellules d'un filament de fibre végétale sont organisées en plusieurs couches, dont chacune

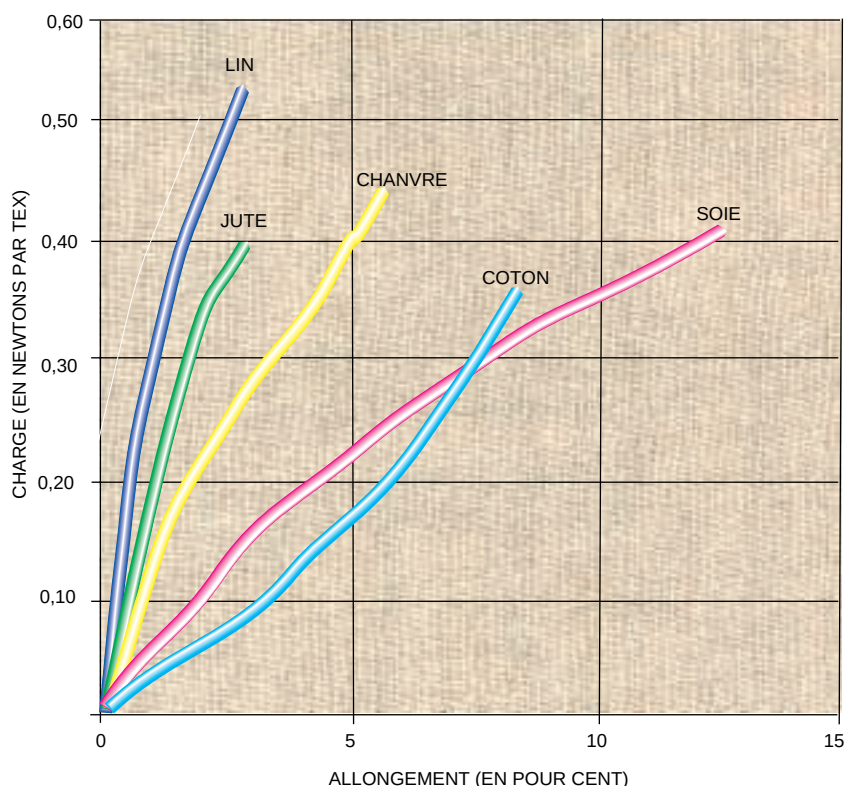
renferme des domaines cristallins (ordonnés) de cellulose, séparés par de la lignine et par des hémicelluloses formant des zones amorphes. Les cellules de la plupart des plantes à fibres ont quatre parois concentriques : la paroi primaire et trois parois secondaires (voir la figure 1). Dans la dernière, l'agencement et l'orientation des domaines de cellulose déterminent les caractéristiques mécaniques des fibres (voir la figure 2). D'autres caractéristiques déterminent les propriétés mécaniques des fibres : le degré de polymérisation, la cristallinité (selon le type de cellulose), l'orientation des chaînes de polymère dans les domaines cristallins et amorphes, ainsi que le nombre et la taille des pores de la paroi végétale. En général, les fibres végétales sont deux fois moins denses que les fibres de verre, mais elles sont aussi solides et rigides.

Comme la qualité des composites dépend notamment de l'adhérence des fibres à la matrice, on l'améliore en enrobant les fibres par des composés qui ont deux parties : l'une se lie à la surface des fibres, tandis que l'autre se lie à la matrice. Les silanes, l'acide maléique anhydre et le polyméthylène-

polyphényle-isocyanate sont de tels composés de liaison. On peut aussi rendre la surface des fibres plus réactive en la bombardant par des ions de haute énergie (traitements par plasmas). On double ainsi les modules qui mesurent les propriétés mécaniques de certains composites.

À la recherche de stabilité

Les fibres naturelles sont biodégradables. C'est un avantage, pour le recyclage des composites qui en contiennent, mais c'est un inconvénient au moment de la fabrication. Les acides, les bases et les rayonnements ultraviolets détruisent la cohésion des fibres naturelles. Les enzymes digèrent les fibres de cellulose en l'espace de six mois à un an. Ce délai peut être porté à deux ans par certains traitements, sans dégradation des caractéristiques mécaniques des fibres. Un stockage dans un endroit sec permet même d'atteindre deux ans et demi, avec une réduction minime de la solidité et de l'allongement à la rupture. Le sisal donne des fibres légèrement plus stables qu'une autre sorte d'agave



2. COURBES D'ALLONGEMENT en traction de fibres naturelles. La charge maximale que supportent les fibres dépend de leur masse par unité de longueur. Celle-ci est exprimée en tex, une unité qui correspond à la masse, en grammes, d'un kilomètre de fibre.

Institut für Werkstofftechnik, Universität Gesamthochschule Kassel/ Spektrum der Wissenschaft

DES CAILLOUX DANS LES CHOSES SÛRES

DIDIER NORDON

**Des cailloux
dans les choses sûres**



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 70 F
Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 194

(henequén) et que l'abaca (fibre tirée des feuilles de bananier).

Le séchage atténue les dégradations dues aux basses températures (à partir de 70 °C au-dessous de zéro). Les températures élevées dégradent aussi les fibres : après 80 jours, à 130 °C, la solidité du coton est ramenée à 68 pour cent de sa valeur initiale ; à 100 °C, elle est réduite à 10 pour cent de cette valeur. Pour le lin, ces réductions sont respectivement de 41 pour cent et de 12 pour cent ; pour la ramie, de 26 pour cent et de 6 pour cent.

Dans un composite à matrice synthétique, l'eau qui diffuse réduit les caractéristiques mécaniques (l'eau de mer provoque plus de dégâts que l'eau douce) ; des bactéries et des champignons attaquent les fibres. Les fibres de ramie et de jute résistent mieux à ce type d'agression que les autres fibres végétales.

Des composites mixtes

Les fibres naturelles renforcent surtout des polymères thermodurcissables et thermoplastiques. Les thermodurcissables, telles les résines époxy et polyester, sont réticulés : ils ne peuvent plus être mis en forme par la suite. Les thermoplastiques, telles les polyoléfines, sont moulés à chaud pour fabriquer des produits semi-finis. Contrairement aux précédents, leur transformation est réversible.

Aujourd'hui, on utilise surtout les composites à matrice thermodurcissable et à fibres naturelles pour fabriquer les pare-chocs, les hayons et les accessoires de carrosserie de voitures, ainsi que les blindages et les boîtiers d'appareils électriques.

Pour les applications techniques, on choisit plutôt des polymères thermoplastiques, qui peuvent être refondus et réutilisés. Comme les fibres naturelles sont stables jusqu'à 230 °C seulement, la matrice polymère doit avoir une température de mise en forme inférieure à cette valeur. On utilise essentiellement des polyoléfines, tels le polyéthylène et le polypropylène. Le polyamide, le polyester et le polycarbonate ne conviennent pas, car ils ont une température de mise en forme supérieure à 250 °C. Les nappes de fibres de verre sont les renforts les plus courants des matières thermoplastiques. La Société BASF met aujourd'hui au point un composite à

matrice thermoplastique, renforcée avec des nappes en fibres naturelles. On fabrique tout d'abord les nappes : une installation de cardage transforme les fibres en voiles réguliers (couches de fibres très fines). Plusieurs voiles sont ensuite liés pour former une structure non tissée, qu'on intègre à la matrice en polypropylène dans une presse en acier à chaud : la matière synthétique fondue imprègne les fibres, puis le composite refroidit sous pression. La Société Daimler-Benz met également au point un procédé nommé «Express», qui pourrait concurrencer la méthode précédente : une extrudeuse à filière plate injecte la matière thermoplastique dans un moule contenant des voiles de fibres naturelles, puis l'ensemble est pressé. Ce procédé en une seule étape produit un matériau multicouche, composés de deux voiles séparés par un film thermoplastique.

Les propriétés mécaniques et physiques des composites à fibres naturelles semblent moins bonnes que celles des composites à fibres de verre, sauf dans certaines conditions. En associant les deux sortes de fibres, on remédie partiellement à cet inconvénient. De tels composites, dits hybrides, sont nettement moins sensibles aux effets de l'environnement.

Pour obtenir des matières biodégradables, on étudie également les biopolymères à fibres naturelles, notamment à fibres de lin : la résistance à la traction et le module d'élasticité de ces composites dépendent de l'adhérence entre la matrice et les fibres, donc de la matrice utilisée. Certains spécialistes considèrent que les biocomposites peuvent servir de matériaux de construction dans l'industrie automobile, l'ameublement ou les chemins de fer à condition qu'ils ne soient pas soumis à des conditions environnementales trop rigoureuses.

Les composites à fibres naturelles ouvrent de nouveaux débouchés aux produits agricoles. Au lieu d'être réduits par des subventions, les excédents de l'agriculture seront ainsi utilisés dans de nouvelles applications techniques.

Andrzej BLEDZKI est professeur de plasturgie et de recyclage des plastiques à l'Université de Kassel. Jochen GASSAN est spécialiste des fibres de renfort pour composites.

Des composites à partir de textiles

DOMINIQUE LOUBINOUX

On obtient des composites en fondant un textile mixte, composé de filaments de verre et de filaments de matière plastique.

Les matériaux composites sont communément constitués d'une matrice et d'une charge renforçante : l'association apporte au produit final les avantages des deux composants. Par exemple, la plupart des matières plastiques, ou matériaux macromoléculaires (les molécules sont composées de milliers, voire de millions d'atomes), sont légères, résistantes à la corrosion et aptes à former des structures compliquées par moulage ; elles sont aussi de bons isolants thermiques et électriques. Par ajout d'une charge renforçante, cette matrice polymère acquiert des qualités qui lui sont étrangères : faible coefficient de dila-

tation, rigidité et résistance mécanique, par exemple.

Les charges les plus efficaces sont des fibres dont la longueur est bien supérieure au diamètre : de la sorte, le renfort assuré par une fibre est relayé par une autre fibre voisine. Il est plus efficace si les fibres s'étendent sur toute la longueur de la pièce. La finesse de ces fibres, qui correspond à une grande surface d'échange, assure un bon transfert des contraintes mécaniques, de la matrice aux fibres.

Pour des applications où des performances supérieures s'imposent, l'industrie utilise beaucoup les fibres de

carbone, qui ont la structure du graphite, et les fibres de para-aramides (des polyamides aromatiques) : leur rigidité est élevée, mais elles sont coûteuses. Toutefois les fibres de verre, un peu moins rigides, sont nettement moins coûteuses. Elles renforcent aujourd'hui la plus grande partie des matériaux composites de grande diffusion : coques de bateaux, skis, surfs, plaques de circuits imprimés, coffrets électriques, pièces pour l'automobile...

Les polymères utilisés dans les matrices sont de deux types : les thermodurcissables, qui, comme leur nom l'indique, durcissent quand on les chauffe, et les thermoplastiques, qui fondent alors réversiblement. La mise en œuvre des polymères thermodurcissables impose une imprégnation préalable des renforts de verre placés dans un moule par les constituants liquides de la résine non polymérisée ; puis on «cuit» la matrice thermodurcissable, c'est-à-dire que l'on déclenche une réaction chimique qui provoque la réticulation des macromolécules en un bloc qui enserre les fibres.

Les polymères thermoplastiques sont particulièrement appréciés pour les grandes séries, car on peut simplement les mouler en les chauffant à une température supérieure au point de fusion du polymère, puis en les refroidissant. De surcroît, les durées de fabrication sont inférieures : au lieu d'attendre la réaction chimique de polymérisation et, parfois, l'évaporation de solvant, on attend seulement le refroidissement de la résine. Enfin, la technique est écologiquement plus intéressante : on n'utilise pas de solvant, et les produits sont



1. UTILISATION du Twintex pour la réalisation de profilés : les bobines du matériau sont tirées, et les fils mixtes, composés de filaments de verre mêlés à des filaments de polymère, sont tirés jusqu'à un four (non représenté), où la matrice polymère est fondue ; l'ensemble est alors poussé à travers des filières dont la section est celle du profilé recherché.

totalement recyclables. En revanche, l'imprégnation d'un tissu ou d'un non tissé de verre par du polymère fondu impose d'exercer des pressions considérables, car la viscosité du polymère reste très importante. Comment imprégner les renforts ? C'est la question que nous avons étudiée.

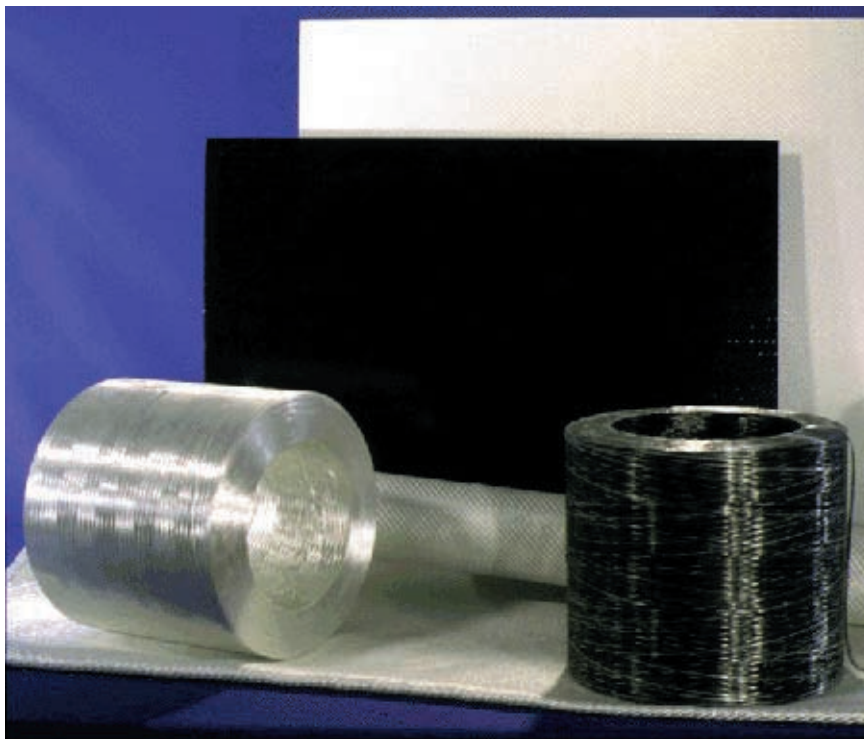
Filaments de verre et de polymère

Afin de favoriser le développement des matières composites à polymère thermoplastique, nous avons voulu proposer un semi-produit qui réunit une matrice et des fibres de verre aussi longues que possible : ainsi l'utilisateur n'a plus à imprégner ses renforts avant le moulage ; pour mettre en œuvre le produit, nommé Twintex, il lui suffit d'effectuer un cycle comportant des phases de chauffage, de mise en pression et de refroidissement. Les pièces en composite réalisées comportent des renforts continus et orientés, du fait de la présentation du produit sous forme de « roving » (gros fil multifilamentaire) ou de tissus de roving.

Le roving est constitué de filaments continus de verre et de filaments, également continus, de thermoplastique. Le polymère choisi, le polypropylène, a été principalement retenu pour son rapport performances / prix avantageux (le polypropylène est largement utilisé par l'industrie automobile, l'électroménager, le mobilier de jardin, l'emballage).

Les filaments de verre sont formés par l'étirage du verre fondu à plus de 1 200 degrés, à travers une multitude de trous aménagés dans une filière. Les filaments sont refroidis par de l'air et recouverts d'un ensimage dont les composants chimiques assurent un bon mouillage du polymère thermoplastique du fil composite.

D'autre part, les filaments de polypropylène sont obtenus au moyen d'une extrudeuse qui fond le polymère (introduit dans la machine sous la forme de granulés) en même temps qu'elle le mélange à des additifs tels que des colorants, des stabilisants thermiques, des anti-ultraviolets... Le polymère fondu est extrudé sous la forme de filaments à travers une plaque filière, également perforée de nombreux trous dont la géométrie est adaptée au comportement rhéologique de ce polymère. À la sortie des filières, les deux popu-



2. BOBINES de Twintex prêtes à l'emploi. Le matériau peut être teinté par ajout de colorant (noir, à droite) dans la matrice de polymère thermoplastique. Derrière les bobines, on voit du tissu à partir duquel on a obtenu les plaques composites d'arrière plan.

lations de filaments sont mêlées à grande vitesse (plusieurs centaines de mètres par minute), puis regroupées en une mèche unique, qui est bobinée en spires croisées : les bobines se tiennent alors mieux, et leur dévidage chez l'utilisateur est facilité.

Le concept de multifilaments à deux composants peut être étendu à d'autres matrices thermoplastiques, telles que les polyesters, qui présentent une rigidité et une tenue thermique supérieures. Ces produits sont aujourd'hui étudiés par notre société.

Les usages du Twintex

Comment réaliser des pièces en matériaux composite, à partir du semi-produit qui contient tous les composants élémentaires ? La transformation comportera toujours les étapes suivantes : fusion des filaments de polypropylène ; compression du produit ; refroidissement sous pression. Directement à partir des rovings, on peut faire des corps creux par enroulement filamentaire ou des profilés par pultrusion (contraction, du verbe anglais *pull*, « tirer », et extrusion, technique utilisée dans la fabrication des profilés en thermoplastique). Avant toute transformation en pièce

composite, les rovings peuvent être arrangés pour former des surfaces textiles telles que tissus chaîne et trame, tissus cousus uni- ou multidirectionnels, non tissés plus ou moins directionnalisés. À partir de ces étoffes, on peut réaliser des plaques, des sandwichs, par compression à chaud, ou calandrage ; des pièces en formes démoulables par moulage haute pression ou par estampage de produits préchauffés ; des pièces creuses ou de grandes dimensions par moulage dans un four à air chaud avec une membrane souple en silicone à haute tenue thermique, la pression étant appliquée par de l'air comprimé ou par l'effet du vide.

C'est ainsi que les industries des transports et des articles de sport, notamment, ont fabriqué des plaques antichocs pour des remorques de camions, des poutres de pare-chocs thermoformées pour les voitures monospaces, des éléments de fixation pour surf des neiges, des renforts antiperforants pour siège de parapente, ou des dos estampés de sac à dos...

Dominique LOUBINOUX est ingénieur de recherche et développement à la Société *Vetrotex International*.

Textiles et enzymes de l'extrême

YANNICK GUEGUEN • JACQUES DIETRICH

Les enzymes des micro-organismes des sources chaudes, au fond de l'océan, résistent à des températures et à des pressions extrêmes : elles sont bien adaptées aux conditions contraignantes de certaines réactions industrielles.

Au fond des océans, près des sources hydrothermales, la vie foisonne. Les organismes et micro-organismes qui y vivent sont soumis à des conditions de température (entre 2 °C et 100 °C) et de pression (entre 2×10^7 et 10^8 pascals, soit entre 200 et 1 000 atmosphères), d'acidité ou de salinité extrêmes. Pourtant, leur machinerie cellulaire est parfaitement adaptée à ces conditions. Depuis une dizaine d'années, l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, IFREMER, a organisé plusieurs campagnes océanographiques pour étudier ces sites et réaliser une collection de micro-organismes hydrothermaux de l'extrême, qui appartiennent au monde des extrémophiles.

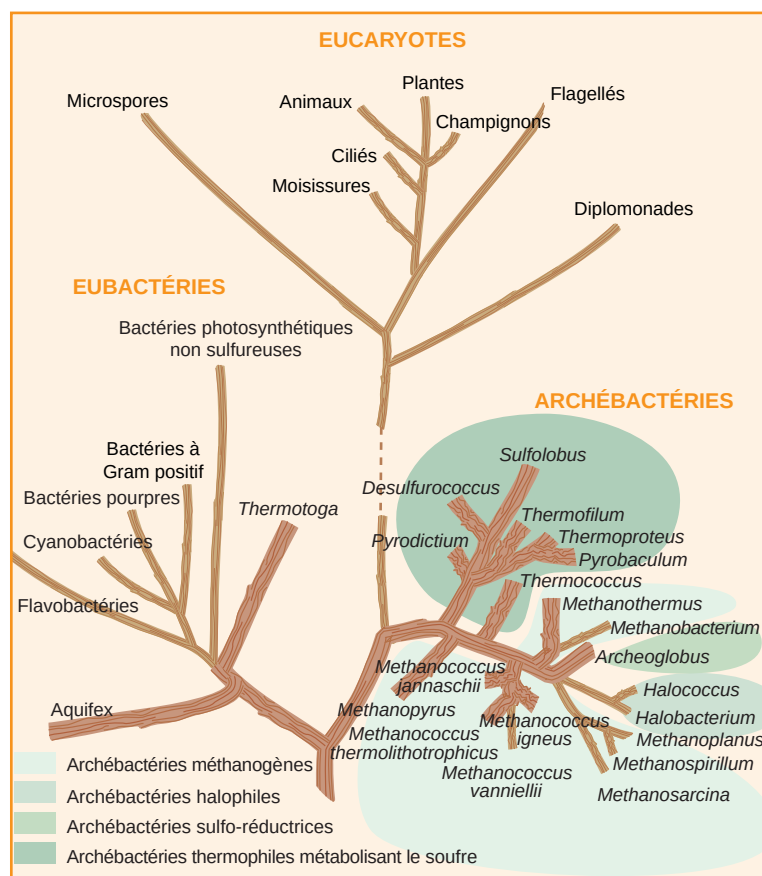
Ces organismes fonctionnent notamment grâce à des enzymes qui résistent aux conditions environnementales et qui fournissent l'énergie nécessaire à leur métabolisme, à leur croissance et à leur reproduction. Plusieurs enzymes ont été isolées et brevetées par le laboratoire de biotechnologie de l'IFREMER. Elles sont en cours d'évaluation ou déjà utilisées dans divers domaines industriels, tels que le diagnostic médical, la

chimie, l'industrie agro-alimentaire et l'industrie textile. Toutefois, si elles ont des propriétés qui intéressent les industriels, elles n'ont pas livré tous leurs secrets : sept génomes d'archéobactéries ont déjà été séquencés, mais on n'a produit, en laboratoire, qu'un très petit nombre d'enzymes de l'extrême, car on manque de systèmes d'expression de ces gènes, assez performants pour produire ces enzymes en quantité suffisante.

Aujourd'hui, la plupart des enzymes industrielles sont issues de micro-organismes, tels des champignons, des levures ou des bactéries. Seule une infime fraction des micro-organismes existant sur Terre a été identifiée. Le monde microbien est une source inépuisable de biodiversité et, par conséquent, un réservoir de nouvelles enzymes.

Les extrémophiles ont été regroupés selon les conditions physico-chimiques où ils se développent. Ainsi, les psy-

chrophiles croissent à des températures voisines de 0 °C, sous la calotte glaciaire de l'Antarctique ; les thermophiles se développent à des températures proches du point d'ébullition de l'eau (entre 80 et 105 °C), près des geysers ou des sites hydrothermaux océaniques profonds ; les barophiles supportent des pressions atteignant 1 000 atmosphères ; les acidophiles et les alcaliphiles poussent dans des milieux où le pH est très acide (0) ou basique (10) ; les halophiles colonisent les marais salants et les milieux dont la concentration en sel est proche de la saturation ; enfin, d'autres micro-organismes poussent dans des environnements riches en soufre, tels les solfatares, ou dans les nappes pétrolifères (voir la figure 2).



1. LES BACTÉRIES EXTRÊMOPHILES ont été représentées par les branches les plus épaisses de cet arbre phylogénétique. Les archéobactéries sont celles qui résistent aux conditions de vie les plus extrêmes.