

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.

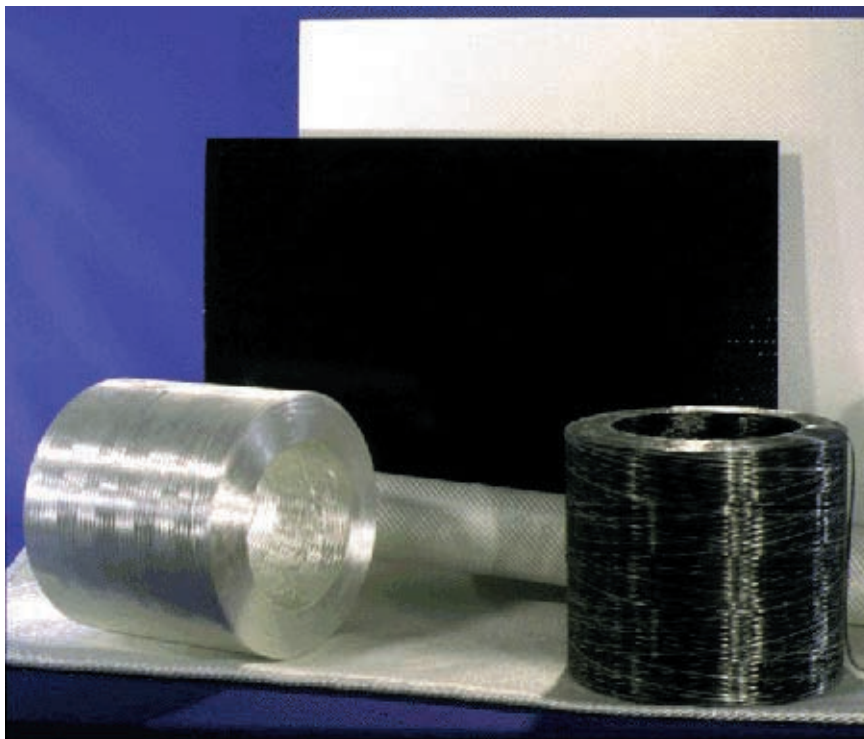
Filaments de verre et de polymère

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.

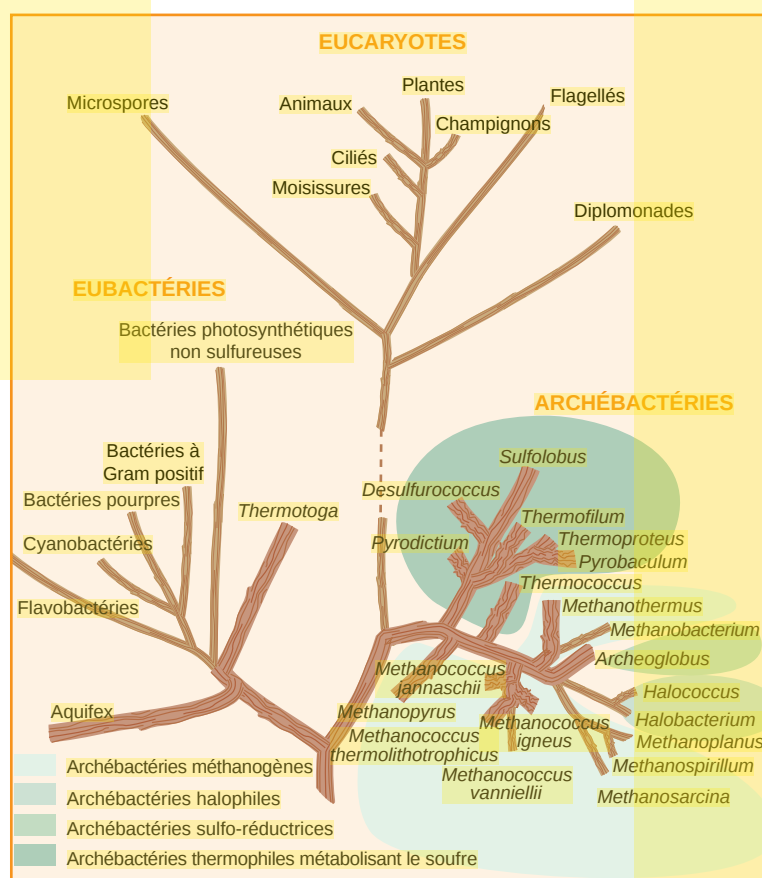
Au fond des océans, près des sources hydrothermales, la vie foisonne. Les organismes et micro-organismes qui y vivent sont soumis à des conditions de température (entre 2 °C et 100 °C) et de pression (entre 2×10^7 et 10^8 pascals, soit entre 200 et 1 000 atmosphères), d'acidité ou de salinité extrêmes. 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 environnantes 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 psychrophiles 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 épaissies de cet arbre phylogénétique. Les archéobactéries sont celles qui résistent aux conditions de vie les plus extrêmes.

Les enzymes utilisées en routine dans les procédés industriels présentent des limites, car elles sont fragiles : elles ne sont actives que dans des zones de température ou de pH très limitées ; elles sont inactivées par divers solvants et dès que la salinité est trop élevée. Ainsi certaines réactions enzymatiques sont interdites. On recherche donc des enzymes plus résistantes et, dans ce cadre, les micro-organismes de l'extrême sont une source potentielle d'enzymes plus performantes : dans certains procédés industriels, les enzymes de l'extrême se substituent à leurs homologues classiques.

Elles sont plus faciles à conserver et à utiliser, elles permettent de réduire le nombre d'étapes des procédés, et d'augmenter la productivité sans risques pour l'environnement : actives dans des conditions extrêmes, ces enzymes résistent mieux aux conditions imposées par certains procédés de synthèse chimique. De surcroît, la résistance de ces enzymes leur ouvre des domaines d'application interdits aux enzymes usuelles. Les producteurs d'enzymes disposent désormais de toute une panoplie de molécules extrémophiles et commencent à diversifier les domaines d'application de ces enzymes dans l'industrie.

La recherche de nouvelles sources de micro-organismes et d'enzymes a un intérêt économique indéniable. Le marché mondial des enzymes industrielles, estimé à plus de deux milliards de francs en 1983, était de l'ordre de six milliard de francs en 1995 et atteindra vraisemblablement 12 milliards de francs en 2005.

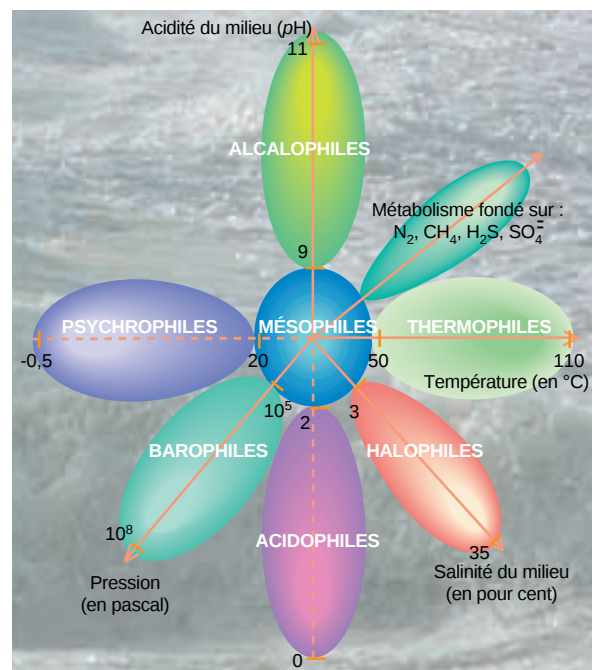
Les enzymes sont utilisées dans de nombreux secteurs de l'industrie : l'industrie des détergents, les industries alimentaires (industrie laitière, brasseries, production de jus de fruits, d'huiles, d'arômes), l'industrie de la pâte à papier, les secteurs de la pharmacie, de la cosmétique, de la chimie fine, sans oublier l'industrie textile.

En effet, les enzymes sont de plus en plus utilisées dans le traitement des textiles, notamment dans le finissage des tissus et des vêtements. Pour que les fibres textiles soient plus résistantes et qu'elles ne se rompent pas pendant le tissage, elles sont généralement encollées, c'est-à-dire enduites avec de l'amidon. Après le tissage, l'amidon doit être éliminé pour que les teintures et les impressions prennent sur le tissu.

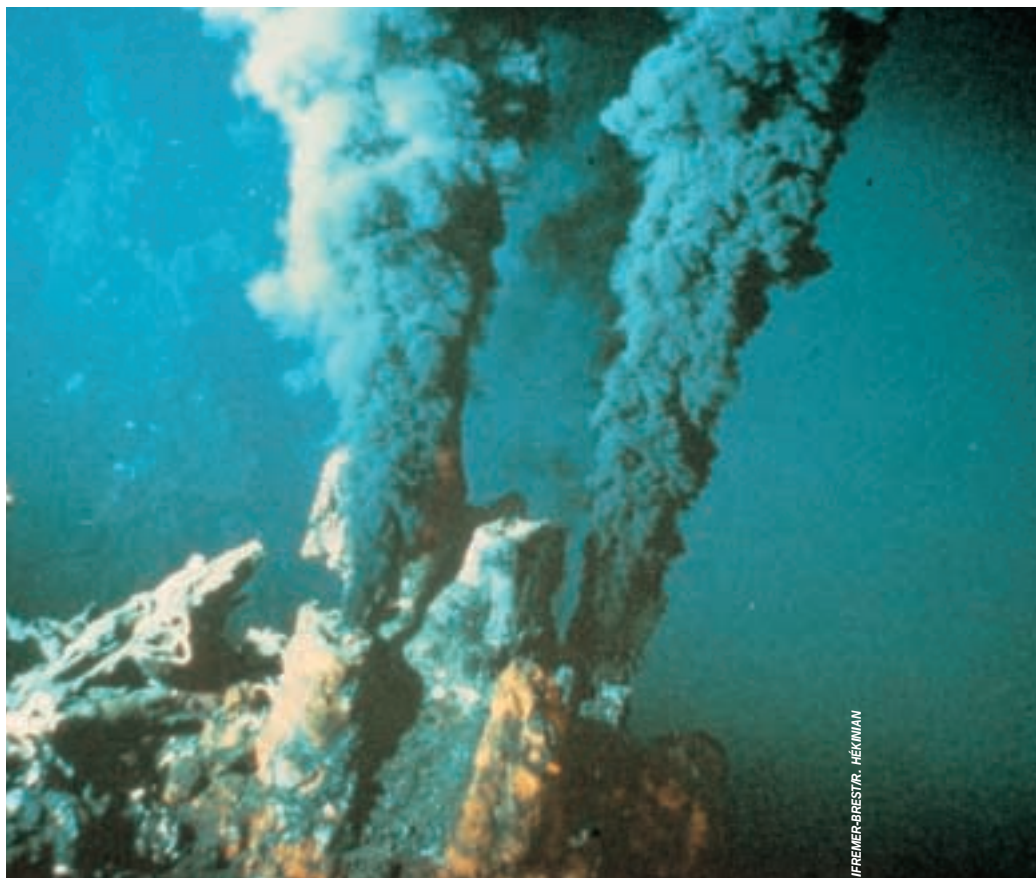
Cette opération peut être effectuée par un traitement du tissu avec des produits chimiques puissants, tels des acides, des bases ou des agents oxydants. Depuis plusieurs années, les enzymes nommées amylases sont utilisées en raison de leur efficacité et de leur spécificité : elles éliminent complètement l'apprêt d'amidon, sans aucun effet indésirable sur le vêtement.

Les amylases catalysent la réaction d'hydrolyse de l'amidon : parce qu'elles diminuent l'énergie qu'il faut fournir au système pour que la réaction ait lieu, elles facilitent la réaction de désencollage et l'accélèrent. Jusqu'à présent, on utilisait des amylases bactériennes classiques ; les amylases thermorésistantes réduisent la durée de l'étape d'hydrolyse de l'amidon à moins d'une minute, tandis qu'il faut une à quatre heures avec les autres amylases.

Le délavage des jeans est une autre application des enzymes. De nombreux vêtements subissent un lavage qui leur confère un aspect légèrement usé. Récemment encore, on préparait les jeans



2. LES CONDITIONS de vie (température, pression, etc.) des bactéries extrémophiles ont été rassemblées sur ce schéma, où figurent, au centre, les bactéries usuelles, dites mésophiles.



3. AU VOISINAGE DES SOURCES CHAUDES, les micro-organismes pullulent. Leur métabolisme est assuré par des enzymes qui résistent à des conditions extrêmes de température et de pression. Ces enzymes résistent mieux que les enzymes classiques aux conditions physico-chimiques de divers procédés industriels.