

# La fibre de carbone :

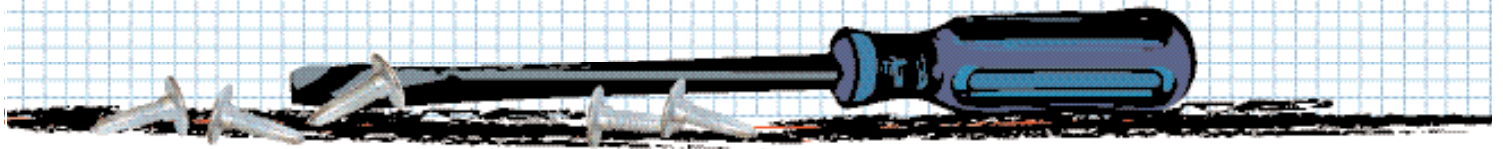
Fibre de carbone. L'expression à elle seule évoque une technologie exotique, celle des voitures de Formule 1 et des avions de chasse furtifs. Depuis quelques années, ce mystérieux matériau a gagné un peu en popularité et ne constitue plus l'apanage des entreprises à gros budget, comme l'indique son apparition sur des bicyclettes haut de gamme ainsi que dans divers composants de rechange légers pour motocyclettes et autres applications de haute performance. À ce stade, certains lecteurs se demanderont peut-être ce qu'un produit utilisé sur les vélos de montagne vient faire dans un magazine de motoneige. La réponse à cette question peut être résumée ainsi : réduction du poids. Nombre d'entre vous se souviendront peut-être qu'il y a une dizaine d'années à peine, le titane était utilisé exclusivement pour les véhicules de course et autres applications du genre, mais nous voici en 2007 et les motoneiges de série comportent à présent une multitude de composants faits de ce métal léger et résistant. Il en est de même pour le magnésium. Étant donné les efforts considérables récemment déployés par les fabricants afin de construire des motoneiges plus légères et rigides (pour des raisons évidentes comme l'amélioration de la performance, de la conduite et de l'économie de carburant), on peut s'attendre à ce qu'ils explorent de nouvelles possibilités dans leur quête. Autrement dit, il n'est pas déraisonnable de s'attendre à voir des composants en fibre de carbone apparaître chez votre concessionnaire dans un avenir pas si lointain. Ce mois-ci, nous tenterons donc de démystifier ce matériau et de répondre aux nombreuses questions que vous vous posez sûrement. Alors sans plus tarder...

## Nomenclature et origines

La fibre de carbone fait partie d'une famille de matériaux appelés les composites. Il s'agit de matériaux faits de deux ou plusieurs matériaux constitutifs qui demeurent séparés et distincts à l'échelle macroscopique tout en formant un seul composant. Autrement dit, les produits ne subissent pas de réaction chimique, mais demeurent deux entités chimiques séparées. Les matériaux composites les plus primitifs comprenaient la paille et la boue utilisées afin de fabriquer des briques pour la construction de bâtiments. La fibre de verre constitue un autre exemple plus moderne de ce type de matériau. Pour en revenir aux matériaux constitutifs, ceux-ci peuvent être classés en deux catégories : renforcement et matrice. Le renforcement est une fibre robuste (telle que la fibre de verre, le Kevlar ou la fibre de carbone) qui donne au matériau sa résistance à la traction. Quant à la matrice, généralement un polymère ou un époxyde, elle agit comme un adhésif afin de lier les fibres ensemble. Elle aide également le matériau composite à résister à la dégradation et protège les fibres de l'environnement. Le synergisme résultant de la combinaison de ces éléments donne des propriétés matérielles que n'offrent pas les matériaux naturels.

Compte tenu de ce qui précède et pour plus de précision, ce que nous appelons communément fibre de carbone devrait en fait être appelé plastique renforcé de fibre de carbone. Au sens propre, la fibre de carbone (parfois appelée graphite ou fibre de graphite) désigne habituellement le tissu fait de fils fabriqués à partir de brins

de carbone extrêmement fins. L'histoire de ce matériau remonte à la fin du 19<sup>e</sup> siècle lorsque Thomas Edison et Joseph Swan ont inventé une ampoule électrique à l'aide de fibre de carbone obtenue en carbonisant du coton et du bambou. Les choses ont très peu changé par la suite jusqu'en 1957, lorsque des scientifiques ont découvert comment fabriquer la fibre à partir de coton et de rayonne. Le prochain développement important s'est produit en 1961, lorsque la fibre a commencé à être fabriquée à partir de polyacrylonitrile (PAN) à Osaka, au Japon. Cette avancée a marqué le début des matériaux en fibre de carbone de « haute performance », puisque c'est à cette époque qu'on a découvert que le tissu obtenu en tissant des brins de carbone représentait un élément constitutif formidable pour un matériau composite extrêmement léger et rigide (essentiellement celui que nous connaissons aujourd'hui). En 1971, de petites quantités de fibre de carbone PAN ont été produites et vendues dans l'industrie, puis ont commencé à apparaître sur des cannes à pêche et des bâtons de golf dès 1973. Au milieu des années 1970, des fils de fibre de carbone de haute performance étaient utilisés dans l'industrie aéronautique et aérospatiale. L'utilisation de plastique renforcé de fibre de carbone s'est notamment répandue dans cette dernière dès que les ingénieurs aérospatiaux se sont rendu compte des réductions du poids possibles comparativement aux matériaux traditionnels comme les métaux. Repoussant toujours les limites, le matériau a également fait ses débuts en Formule 1 en 1981 avec McLaren et est devenu depuis un élément essentiel du monde de la course automobile.



# le matériau de l'avenir

Texte Michel Garneau

Plus récemment, les efforts considérables en matière d'énergies renouvelables ont entraîné une explosion de la demande puisque les pales de 50 m de long utilisées dans les éoliennes sont faites de plastique renforcé de fibre de carbone. L'industrie aérospatiale continue également d'étendre son utilisation du matériau, comme l'indique clairement le fait que les plus récents avions de passagers vedettes, soit le Boeing 787 et l'Airbus A380, sont faits de plastique renforcé de fibre de carbone à 60 et 50 % respectivement!



*Le nouvel Airbus A380!*

Dans l'industrie automobile, le matériau commence enfin à apparaître sur le marché des automobiles de performance haut de gamme. Ainsi, la dernière M6 de BMW possède des pare-chocs avant et arrière, un toit, des poutres et des structures internes en plastique renforcé de fibre de carbone. Plus près de chez nous, General Motors a aussi commencé à utiliser le matériau sur son modèle Corvette haut de gamme.



*L'impressionnante M6 de BMW.*

Le prix du plastique renforcé de fibre de carbone a longtemps constitué son talon d'Achille et limité son utilisation. Une demande croissante, résultat d'une augmentation du nombre d'applications dans le domaine des articles de sport et dans les industries mécaniques plus générales, a heureusement coïncidé avec une baisse

régulière du prix au fil des ans. Par conséquent, le matériau est à présent utilisé dans une multitude d'applications allant des bicyclettes aux casques et des bateaux aux motocyclettes, ce qui n'est que le début. Si l'industrie aérospatiale consomme actuellement environ 41 % du plastique renforcé de fibre de carbone produit, cette proportion devrait chuter à mesure que d'autres industries prennent le train en marche et adoptent le matériau.

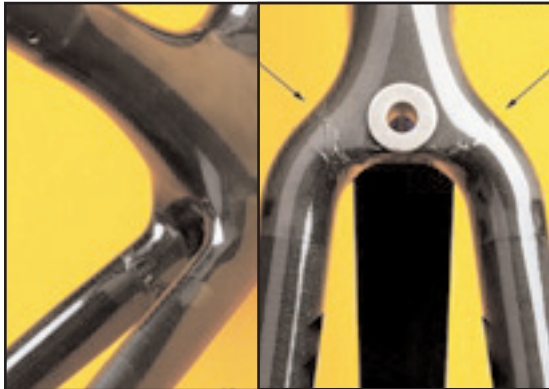
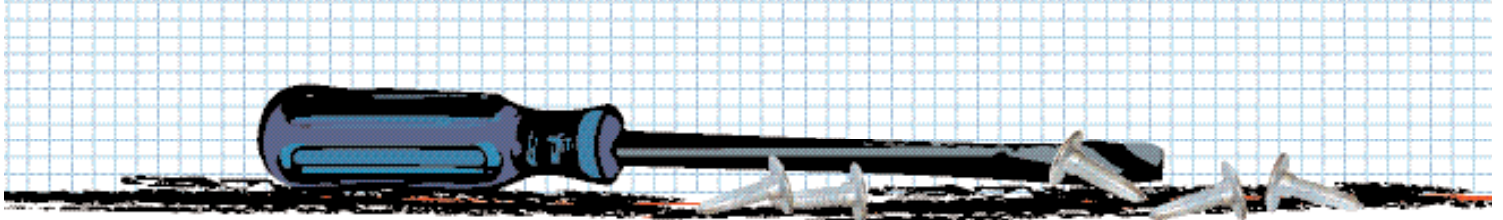
## Propriétés

Pourquoi le plastique renforcé de fibre de carbone est-il si attrayant pour les ingénieurs? Eh bien, ce matériau est généralement considéré comme le plus robuste qu'on connaisse et possède un rapport résistance/poids incomparable. Sa résistance provient de la fibre de carbone (chaque filament de carbone étant constitué de longues feuilles minces comme le graphite), dont la résistance à la traction est environ dix fois supérieure à celle de l'acier. Ainsi, un pouce carré de fibre de carbone peut résister à une traction de 226 500 kg (500 000 livres)! En fin de compte, les structures en plastique renforcé de fibre de carbone peuvent être jusqu'à 75 % plus légères que celles en acier et dix fois plus robustes. Leur longévité est également un avantage puisqu'elles ne connaissent pas de problèmes d'allongement, de fluage, de fatigue, de pliage, de faiblesse ou de corrosion avec le temps. De plus, le matériau peut être enroulé, tressé, enveloppé, stratifié ou taillé de façon unique afin de répondre aux exigences de sécurité et de performance. La fibre de carbone conduit aussi l'électricité, contrairement à la plupart des fibres de renforcement. Enfin, elle ne se dilate pas et ne se contracte pas lorsque la température change, ce qui est important pour les avions stationnés sur une piste tropicale un instant, puis volant dans la stratosphère glaciale dix minutes plus tard.

À ce stade, on pourrait croire qu'il s'agit du matériau idéal, mais il comporte également des inconvénients, dont le principal est sa faible résistance aux chocs (comparativement à d'autres plastiques renforcés de fibre). En fait, une fois que la fibre commence à se défaire, le résultat peut être catastrophique. Les amateurs de Formule 1 se souviendront sûrement d'incidents ayant nécessité le drapeau jaune ou la voiture de sécurité après une collision, la piste étant jonchée de fragments pointus de plastique renforcé de fibre de carbone. Afin de résoudre ce problème, les ingénieurs utilisent souvent d'autres matériaux donnant à ce plastique plus de flexibilité. Par exemple, les fabricants de kayaks le mélangent souvent avec d'autres matériaux comme le Kevlar ou la fibre de verre. Ainsi, un seul matériau peut être obtenu en tissant des fils de fibre de carbone et de Kevlar ou en alternant des couches de fibre de carbone et de Kevlar.

Un problème connexe est la difficulté de détecter les bris, car le plastique renforcé de fibre de carbone peut absorber





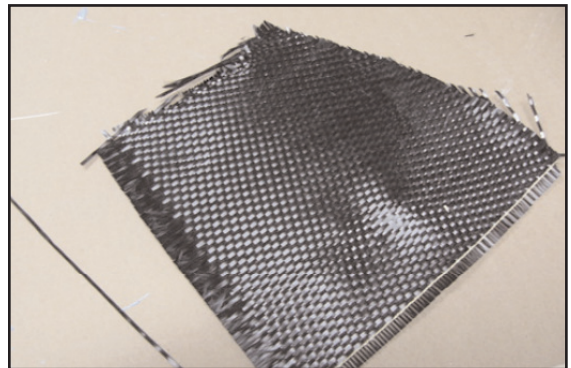
Un bris dans ce cadre de vélo illustre comme il est difficile d'identifier le délaminage.

un choc et sembler intact, mais présenter un bris interne extrêmement difficile à détecter. Essentiellement, la science permettant de déterminer les défauts des matériaux composites demeure assez primitive. On peut procéder à un examen attentif avec une lumière vive en recherchant le délaminage dans certains cas, mais cette méthode n'est pas infaillible. Une approche plus sophistiquée utilise les ultrasons afin de capter les échos doubles signifiant le délaminage. Les ultrasons sont assez directs sur une surface plate, mais au niveau des articulations, qui constituent habituellement les zones critiques, les couches de fibre confondues donnent logiquement des échos confondus. Les ingénieurs peuvent alors comparer les nouveaux résultats des ultrasons aux résultats précédents en recherchant les différences entre

les échos signalant le délaminage. Même si des signes de dommages sont détectés, les matériaux composites sont difficiles à réparer, car le perçage coupe la fibre qui donne sa résistance au matériau. C'est pour cette raison que les composants sont généralement collés et non vissés en place. Enfin, étant donné sa composition en carbone, le plastique renforcé de fibre de carbone ne doit pas être exposé aux flammes.

### Éléments de base de la production

La production du plastique renforcé de fibre de carbone est un processus en plusieurs étapes qui commence bien sûr par la production des matières premières mêmes. Dans le cas de la fibre de carbone, l'élément de base peut être une substance composée d'un polymère à longue chaîne avec des atomes de carbone formant la « colonne vertébrale » principale de la molécule (comme le



### ExtremeGraphic Moto Design : un homme et ses rêves de carbone



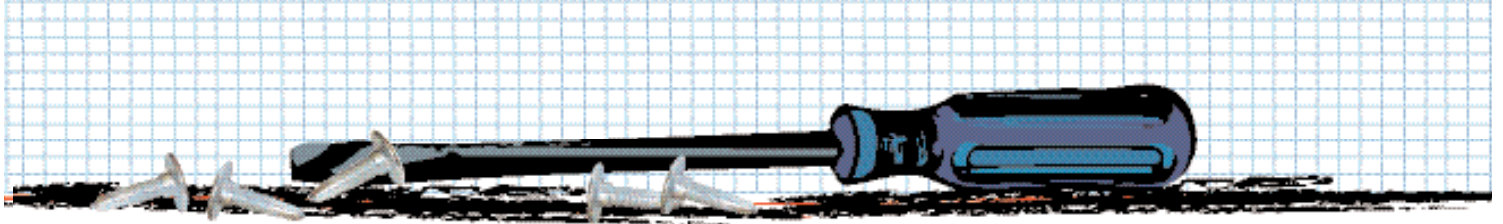
Christian Bourdages, propriétaire d'ExtremeGraphic Moto Design à Jonquière, a toujours été un amoureux de la motoneige. Puisque sa famille n'en avait pas lorsqu'il était jeune, M. Bourdages a décidé de prendre les choses en main et de construire sa propre motoneige à l'âge de 12 ans! Son père a rapidement compris la passion de son fils et celui-ci est vite devenu le fier propriétaire d'une Moto-Ski Zephyr. Depuis lors, il a eu entre 35 et 40 motoneiges!

Au fil du temps, son amour de la création et du travail manuel l'ont mené à poursuivre une carrière qui a commencé dans un atelier de réparation de carrosseries d'automobiles ainsi qu'un centre de peinture, et qui l'a finalement conduit à fonder sa propre entreprise d'accessoires de motocyclette, ExtremeGraphic Moto Design. La petite entreprise qui fabriquait des passages de roues de motocyclette en fibre de verre, générant des ventes de 59 000 \$ en 1999, a rapidement développé une expertise particulière en matière de fibre de carbone, élargissant sa gamme de produits et générant plus d'un million de dollars de ventes en 2002!

Christian Bourdages a découvert la fibre de carbone en rencontrant par hasard un mécanicien d'avion de chasse stationné à la base des Forces canadiennes de Bagotville. N'étant pas du genre à craindre les défis, il a rapidement commencé à travailler avec ce nouveau produit et a fabriqué quelques articles à la main dans son atelier. Intéressé, il a alors demandé et obtenu une subvention de recherche du gouvernement afin de perfectionner une technique de moulage par transfert de résine spécialisée. Son expertise s'est vite développée et il a conclu une entente avec Yamaha Canada en 2001 afin de produire des accessoires en fibre de carbone pour la motocyclette FZ1 de la marque.

Au fil des ans, malgré les exigences croissantes de son entreprise, M. Bourdages est demeuré un motoneigiste actif. Ainsi, il a participé au premier événement Challenge Kanada (où son équipe et lui ont obtenu une respectable sixième place en tout) en plus de faire de la course d'accélération ainsi que du snocross et allant même jusqu'à s'essayer à la course de motoneige sur l'eau. Bien sûr, sa passion pour la motoneige a fini par trouver sa place dans son travail et en 2005 son amour des courses radar l'a mené à concevoir des pièces améliorant les caractéristiques aérodynamiques de sa propre Mach Z, le résultat de ses efforts étant l'ensemble Aero-Deflector présenté dans la chronique Quoi de neuf du numéro de novembre 2006.

Qu'est-ce que l'avenir réserve à Christian Bourdages et à son équipe? Eh bien, la concurrence croissante dans le domaine des composants de motocyclette l'oblige à orienter son entreprise dans de nouvelles directions, qui devraient inclure entre autres une vaste gamme de pièces de motoneige en fibre de carbone (et en fibre de verre) légère. Pour en savoir plus sur ExtremeGraphic Moto Design, rendez-vous sur le site Web de l'entreprise au [www.extremegraphicfsm.com](http://www.extremegraphicfsm.com).



polyacrylonitrile ou PAN), la chaleur ou des produits chimiques étant utilisés afin de retirer tout ce qui n'est pas du carbone de la molécule en laissant la « colonne vertébrale » intacte. La fibre est alors tissée afin de produire une « étoffe » qui formera la base du plastique renforcé de fibre de carbone. Lors de notre visite chez Christian Bourdages, propriétaire d'ExtremeGraphic Moto Design (voir encadrés), celui-ci nous a affirmé qu'il n'existait actuellement que quatre sources de cette fibre dans le monde et que la croissance rapide de la demande (due en grande partie à la prospérité de l'économie chinoise) faisait monter son prix et la rendait plus difficile à obtenir.

Lorsqu'il s'agit de la fabrication même du plastique renforcé de fibre de carbone, il existe différentes techniques adaptées aux applications uniques et de quantité moyenne ou élevée. La production en faible quantité utilise généralement des moules et une technologie de moulage par transfert de résine, tandis qu'à l'autre extrême les pièces produites en quantité élevée peuvent être matricées en utilisant des matériaux composites thermoplastiques. En combinant cette technique avec le moulage par injection, des centaines de pièces par heure peuvent être facilement produites.

Quelle que soit la technique utilisée, il est important d'orienter la fibre très précisément dans la direction supportant la charge. Comme les couches du contreplaqué, les brins de chaque couche de fibre sont résistants dans une direction, mais faibles dans l'autre. Il est donc important d'en tenir compte en disposant la fibre. Enfin, toutes les précautions doivent être prises afin de

minimiser les vides, car ceux-ci constituent la principale source de dommages et de bris du plastique renforcé de fibre de carbone.

Si le choix de la fibre se limite essentiellement à différents motifs de tissage et à différentes dimensions de brins, il en va autrement des matrices. En fait, diverses résines sont disponibles et utilisées pour la fabrication du plastique renforcé de fibre de carbone, chacune présentant des propriétés, des avantages et des inconvénients particuliers. La résine époxyde est la plus dure et la plus résistante. Par contre, elle est aussi la plus coûteuse et a tendance à jaunir lorsqu'elle est exposée aux rayons ultraviolets. Une deuxième possibilité est le polyester, la même substance typiquement utilisée pour la fibre de verre. Le polyester est facilement disponible et offre une résistance et une longévité exceptionnelles. Christian Bourdages nous a d'ailleurs affirmé qu'il s'agit de la résine qu'il utilise le plus souvent. Enfin, il y a l'ester, la plus faible des résines recommandées. Il est à noter que toutes ces résines peuvent être et sont également utilisées dans la fibre de verre. Cependant, l'élément clé donnant au plastique renforcé de fibre de carbone sa résistance exceptionnelle demeure la fibre de carbone même, et c'est pourquoi ce matériau présente généralement une teneur en fibre de 40 à 60 % par volume.

Il existe une autre possibilité en ce qui concerne les combinaisons de fibre de carbone et de résine, soit la fibre de carbone préimprégnée. Comme ce nom l'indique, la résine est préimprégnée dans la fibre. Ce type de plastique renforcé de fibre de carbone doit cuire dans un four à 90,5 °C (195 °F) afin que la résine devienne active et

### Haute teneur en fibre

Christian Bourdages n'est pas du genre à se contenter du minimum. Au début de 2005, son ingéniosité et ses compétences dans la fabrication de fibre de carbone l'ont donc mené à envisager la possibilité de construire un tunnel de motoneige en utilisant ce matériau. Étant un homme d'action, M. Bourdages a rapidement commencé à transformer son bolide de snocross Polaris 440 2003 adoré en une véritable plateforme d'essai pour ses idées. Il a d'abord entrepris de construire un tunnel personnalisé unique de 403,9 cm (159 po) fait de fibre de carbone (qui serait combiné avec la cloison de série). Des moules ont été fabriqués et quatre couches de fibre de carbone (ainsi qu'une de Kevlar afin de prévenir les ruptures et de réduire la fragilité) plus tard, le nouveau tunnel a fait son apparition. Le produit final présente un poids identique à celui de la version de série en aluminium de 307,3 cm (121 po) et est beaucoup plus rigide.



La suspension arrière de série a été conservée et des extensions de glissières ont été ajoutées. Une version personnalisée de 403,9 cm de la chenille Ripsaw de Camoplast a également été ajoutée afin de compléter le tout. Le résultat final est selon M. Bourdages une motoneige légère, polyvalente et robuste qui ne cesse d'impressionner.

Et sa durabilité, demandez-vous? Eh bien, après un an

d'utilisation intensive, le seul signe d'usure visible est une légère fente dans le revêtement à l'arrière du tunnel, résultat d'une rencontre avec un caillou à la fin de la saison.

L'aventure se poursuit et vous pouvez être certain qu'il ne s'agira pas du dernier tunnel en fibre de carbone à sortir de l'atelier de Jonquière. D'ailleurs, Christian Bourdages envisage déjà de construire un châssis entier en fibre de carbone. Comme quoi le travail d'un pionnier n'est jamais terminé!



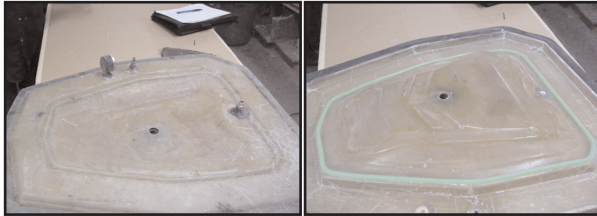




uniforme. En plus d'être coûteux, il doit également être entreposé dans un environnement frais (réfrigérateur) en tout temps avant d'être utilisé. Malgré cela, son utilisation devient de plus en plus répandue.

### La production en pratique

Ayant eu le privilège de visiter l'atelier d'ExtremeGraphic Moto Design à Jonquière, nous avons pu observer directement le processus de production des composants de plastique renforcé de fibre de carbone. Au cours des dernières années, l'entreprise de Christian Bourdages a développé une expertise reconnue dans le moulage de composants de plastique renforcé de fibre de carbone et de fibre de verre. Bien sûr, étant donné que le processus de fabrication de base est le même pour les deux produits, sans parler des moules utilisés, il s'agit d'une combinaison logique.



Le processus de moulage par transfert de résine commence par le positionnement d'une étoffe de fibre de carbone entre deux moules. Il est à noter que les deux moules sont scellés ensemble grâce à des lèvres de caoutchouc assurant une fermeture hermétique. Un conduit est ensuite fixé à un raccord de purge d'air sur l'un des moules. Ce conduit est utilisé afin d'aspirer l'air hors du moule à une pression de  $-14 \text{ lb/po}^2$  (ou une atmosphère). Un autre conduit (sur le moule opposé) est alors relié au contenant de résine. Le vide créé permet à la résine de pénétrer dans le moule et de remplir la cavité disponible. Afin d'empêcher la formation de microbulles dans la résine, l'excès de résine est aspiré à une pression de  $-7 \text{ lb/po}^2$  (ou une demi-atmosphère). La résine pénètre dans le moule jusqu'à ce que celui-ci soit plein, puis le conduit d'alimentation est pincé afin d'arrêter le débit. Dans le cas de la résine de polyester utilisée lors de notre visite, le moule sèche ensuite pendant approximativement 15 minutes à une température ambiante de  $23,3 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $74 \text{ }^\circ\text{F}$ ). Étant donné que la résine sèche sous vide, il n'y a pas d'odeur émise. Une fois la période de séchage terminée, un conduit d'air comprimé est fixé à l'un des raccords d'air et l'air est utilisé afin de séparer les moules l'un de l'autre.



La nouvelle pièce est alors retirée, inspectée, coupée, percée (pour les trous de fixation), poncée à l'eau et préparée pour l'apprêt et la peinture. Dans la plupart des cas, un revêtement transparent est appliqué, mais certaines pièces sont simplement peintes de la couleur désirée.

### Utilisations possibles (motoneige)

Essentiellement, le plastique renforcé de fibre de carbone peut être utilisé presque partout où l'on utilise actuellement l'acier, l'aluminium ou tout autre matériau synthétique, ce qui comprend le tunnel, le châssis, les composants de suspension, le capot, la boîte à air, les pièces de protection et ainsi de suite. Les utilisations sont donc pratiquement illimitées. L'inconvénient principal du matériau est son prix. Sa résistance aux chocs est également un problème, bien que celui-ci puisse être en grande partie résolu en intégrant d'autres substances comme le Kevlar dans le mélange.

### L'avenir

Qu'est-ce que l'avenir réserve au plastique renforcé de fibre de carbone? Eh bien, pour commencer, nous sommes convaincus que son utilisation continuera de s'accroître, mais le potentiel de découverte de nouvelles propriétés est peut-être encore plus important, tout comme la mise au point de nouvelles utilisations uniques pour ce matériau remarquable. Par exemple, la capacité du plastique renforcé de fibre de carbone de conduire l'électricité jette les fondements d'un nouveau domaine de recherche appelé « électronique structurale », qui fait référence à la possibilité de mettre au point des structures intelligentes offrant aux ingénieurs une façon de surveiller leurs créations plus étroitement. Cette innovation pourrait mener à des composants aéronautiques constituant d'énormes dispositifs de stockage d'énergie ou à des voitures solaires dont les panneaux de carrosserie stockeraient aussi l'énergie. De nouveaux types de composants électroniques moins coûteux à fabriquer et prenant moins de place pourraient également être envisagés. De plus, étant donné que les composants de carbone sont plus faciles et moins coûteux à fabriquer que ceux de silicium (qui exigent des usines extrêmement propres), en plus d'être plus résistants, on pourrait voir apparaître des ordinateurs sans puces de silicium traditionnelles. Et ce n'est que la pointe de l'iceberg en ce qui concerne ce matériau remarquable et prometteur.

### Conclusion

Compte tenu de toutes les propriétés hautement désirables de la fibre de carbone, dans combien de temps verrons-nous ce matériau jusqu'à présent exotique figurer sur une motoneige de série? Eh bien, personne ne le sait vraiment. Nous nous attendons cependant à ce qu'elle apparaisse initialement dans le catalogue d'accessoires d'un ou plusieurs fabricants. En fait, à mesure que les possibilités de réduction du poids des méthodes plus traditionnelles (rationalisation et reconception des pièces, utilisation accrue du magnésium, du titane et des plastiques, etc.) s'épuiseront, la fibre de carbone se retrouvera inévitablement sur les motoneiges de série, ce qui nous convient parfaitement.