

T
177
.C2
A3614
no. 4/86

Canada

COMPOSITES DE POINTE : DÉBOUCHÉS ET OBSTACLES

Rapport n° 4-1986

BUREAU DE L'INNOVATION
INDUSTRIELLE

L'INNOVATION



Gouvernement
du Canada

Government
of Canada

Expansion industrielle
régionale

Regional Industrial
Expansion



COMPOSITES DE POINTE :

DÉBOUCHÉS ET OBSTACLES

Bureau de l'innovation industrielle
Ministère de l'Expansion industrielle régionale
Mai 1986

AVANT-PROPOS

Les matériaux industriels de pointe font partie d'un groupe de technologies naissantes qui occasionnent actuellement la création d'une vaste gamme de produits industriels de pointe ayant une grande importance pour l'économie canadienne. Notre habileté à les mettre au point et à les utiliser donnera de plus en plus à notre industrie son degré de compétitivité.

Nous avons déjà observé que la demande pour les matériaux classiques a subi des fluctuations dès que les fabricants ont introduit des substituts originaux pour améliorer rendement et compétitivité. Les fibres optiques remplacent les fils de cuivre, les matériaux composites se substituent à l'aluminium dans les structures d'aéronefs, et une variété de plastiques et de nouveaux alliages supplantent l'acier dans les pièces d'automobiles. Les matériaux industriels de pointe sont en tête de ces mutations. Ils préparent la venue de changements encore plus spectaculaires.

Le rythme croissant du changement dans le domaine des matériaux offre des occasions sans précédent de créer de nouvelles ressources et de mettre au point des procédés et des produits. Nous ne pourrons pleinement profiter de ces occasions que si nous prenons conscience de ces changements alors qu'il est encore temps de prendre des mesures positives, et que nous relevons le défi qu'ils représentent.

L'industrie des matériaux classiques, depuis longtemps la principale richesse du Canada, affronte actuellement de graves problèmes économiques. L'origine de ces difficultés dépasse complètement, pour la plupart, le champ d'influence du secteur privé ou du gouvernement. L'évolution rapide des matériaux industriels de pointe peut également constituer un problème. Par ailleurs, nous disposons des ressources nécessaires pour nous approprier les innovations technologiques et les mettre à profit, stimulant ainsi le rajeunissement d'un secteur qui autrement serait stagnant.

La présente étude est la seconde d'une série sur les matériaux industriels de pointe. Son objectif, comme celui du Rapport n° 3-1986 sur les néo-céramiques, est de démystifier le domaine des composites de pointe, de déterminer, par le biais d'un bilan international, la situation des technologies et des marchés, d'identifier les parties en cause au Canada et d'indiquer quels sont les débouchés et les problèmes. Il a été préparé par l'Ontario Research Foundation à la demande du ministère de l'Expansion industrielle régionale; les opinions qui y figurent ne représentent pas nécessairement la position officielle du Ministère.

Bureau de l'innovation industrielle
Ministère de l'Expansion industrielle régionale
235, rue Queen
Ottawa (Ontario)
K1A 0H5
(613) 954-3450

SOMMAIRE

Bien que la technologie des composites remonte au début du siècle, les applications à grande échelle de cette technologie dans le domaine commercial n'ont été mises au point qu'après la Deuxième Guerre mondiale. Au cours des vingt dernières années, l'utilisation de matériaux composites a augmenté à un rythme annuel de 15 % et l'utilisation de composites de pointe s'est accrue de 30 % par année au cours de la dernière décennie. Ces nouveaux composites de pointe sont constitués de matrices polymères, métalliques ou céramiques et de matières de renfort à hautes performances comme les fibres de verre S, de Kevlar, de graphite ou de bore. Ces matériaux concurrencent grandement les matériaux classiques grâce à leur faible masse volumique, leur rigidité élevée, leur grande résistance et le fait qu'ils amortissent la vibration. On évalue que l'on a utilisé pour 1,3 milliard de dollars US de composites de pointe dans le monde en 1984, et on prévoit un chiffre de 12 milliards de dollars US d'ici l'an 2000. Les composites de pointe sont utilisés dans des domaines aussi divers que l'aérospatiale, les sports et les loisirs, la machinerie pour l'industrie automobile, le domaine médical ainsi que d'autres.

A l'heure actuelle, les composites de pointe à matrice polymère sont de loin les mieux commercialisés de tous les composites de pointe. Les composites carbone-carbone sont utilisés en particulier dans les freins d'avions et les tuyères de fusées où leur résistance élevée à la température est importante. Les composites à matrices métallique et céramique en sont encore au stade de la mise en point et n'ont que des débouchés très restreints. Cependant, si l'efficacité de la production industrielle était améliorée, on assisterait à une croissance rapide des débouchés pour ces matériaux.

Au Canada, les secteurs des pièces d'automobiles, de l'équipement sportif et de l'industrie aéronautique sont bien implantés et représentent des marchés désignés pour les composites de pointe. La compétence technique et industrielle dans le domaine des composites à matrice polymère, quoiqu'un peu limitée actuellement, constitue un bon point de départ pour cette nouvelle industrie.

Les technologies de pointe constituent à la fois une menace et une occasion exceptionnelle. Menace, parce que les produits actuels n'utilisant pas les nouveaux matériaux ne pourront pas soutenir la concurrence sur les marchés internationaux et, occasion exceptionnelle, parce qu'ils participeront à l'essor fantastique de cette technologie et aux nouveaux débouchés qu'elle crée.

TABLE DES MATIÈRES

	<u>Page</u>
1. INTRODUCTION	1
2. COMPOSITES A MATRICE POLYMÈRE	3
2.1 Les matrices	3
2.2 Les résines thermodurcissables	4
2.3 Les résines thermoplastiques	5
2.4 Les renforts	6
2.5 La fabrication	8
2.6 Les marchés	9
2.7 Les tendances futures	17
2.8 Sommaire	18
3. COMPOSITES CARBONE-CARBONE	19
3.1 La fabrication	19
3.2 Les propriétés	20
3.3 Les marchés	20
3.4 Les tendances futures	21
3.5 Sommaire	21
4. COMPOSITES A MATRICE MÉTALLIQUE	22
4.1 Les matrices	22
4.2 Les renforts	22
4.3 Les composites	23
4.4 La fabrication	23
4.5 Les marchés	24
4.6 Les tendances futures	25
5. COMPOSITES A MATRICE CÉRAMIQUE	27
5.1 Les matrices	27
5.2 Les renforts	28
5.3 Les composites	28
5.4 La fabrication	31
5.5 Les utilisations	32
5.6 Les tendances futures	33
6. RÉSUMÉ DE LA SITUATION INTERNATIONALE	35
6.1 Les États-Unis	35
6.2 Le Japon	36
6.3 L'Europe	38
7. RÉSUMÉ DE LA SITUATION AU CANADA	42
7.1 Les composites à matrice polymère	42
7.2 Les composites à matrice métallique	48
7.3 Les composites à matrice céramique	50
7.4 Les composites carbone-carbone	52
8. PROBLÈMES AU CANADA	53

1. INTRODUCTION

Au cours des vingt dernières années, la consommation de matériaux composites a augmenté à un taux annuel de 15 %, et celle des composites de pointe a connu une hausse de 30 % au cours de la dernière décennie. On a évalué la consommation mondiale des composites de pointe à 1,3 milliard de dollars US en 1984, et on prévoit qu'elle atteindra 12 milliards de dollars US d'ici l'an 2000.

Un matériau composite pourrait se définir comme étant la liaison synergique de deux matériaux ou plus pour former un composite dont les propriétés dépassent souvent celles de chacun des constituants. Les principales propriétés mécaniques d'un composite sont déterminées par les propriétés des matières de renforcement. Ces renforts peuvent prendre la forme de fibres, de flocons ou de particules irrégulières. Ils sont dispersés dans un autre matériau, que l'on nomme la matrice, dont le rôle principal est de répartir la tension entre les renforts, protéger ceux-ci et donner la forme finale au produit. Les matériaux composites entrent dans la fabrication d'articles aussi divers que des cartes de circuits imprimés, des raquettes de tennis, des boîtiers d'ordinateurs, des carrosseries d'automobiles, des freins d'avions et des récipients sous pression. On classe souvent les composites par type de matrice; il y a donc des composites polymères, de carbone ou de graphite et des composites céramiques et métalliques.

L'expression " composites de pointe " n'est pas très précise; cependant, elle désigne habituellement de nouveaux types de composites ayant des propriétés supérieures à celles des composites courants. Aux fins de la présente étude, nous avons classé dans cette catégorie les composites que voici :

- les composites à matrice organique de fibres de carbone, de Kevlar, de bore et de verre S (du verre ayant une résistance supérieure à celle du verre E habituellement utilisé);
- les matrices de carbone avec des fibres de carbone;
- les composites à matrice céramique;
- les composites à matrice métallique.

Le but de cette étude est de faire le bilan des technologies, des applications et des débouchés des composites.

Bien qu'on ait auparavant déjà utilisé différents matériaux composites (p. ex., les fibres de cellulose de bois dans une matrice de lignine), la technologie des composites modernes n'a été mise au point qu'au début du siècle lorsque Baekeland découvrit que l'adjonction de fibres de bois à la résine phénolique produisait un matériau fort, dur et relativement résistant. Le matériau ainsi obtenu a été fabriqué sous le nom déposé de bakélite.

Au cours de la Deuxième Guerre mondiale, on a expérimenté l'utilisation du papier imprégné de résine pour remplacer l'aluminium des revêtements de fuselage d'avion. L'utilisation de fibres de verre vers la fin de la Deuxième Guerre mondiale a accéléré la croissance des composites renforcés. Ceux-ci ont tout d'abord servi pour les boîtiers des balayeurs radar, mais leur utilisation s'est rapidement propagée à d'autres industries, celles du transport, de l'électricité, du bâtiment, des sports et des loisirs, par exemple.

L'avènement des matériaux composites représente probablement l'étape la plus révolutionnaire dans l'histoire des matériaux. Pour la première fois, les propriétés des matériaux pouvaient être prévues pour satisfaire aux exigences techniques. Depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale, l'ampleur prise par les matériaux composites a été spectaculaire. Leur croissance se poursuit encore, créant de nouveaux débouchés et menaçant les industries incapables de s'adapter au changement.

2. COMPOSITES A MATRICE POLYMÈRE

Les composites à matrice polymère sont de loin les mieux implantés, avec un marché de l'ordre de 1,3 milliard de dollars US. L'extraordinaire croissance du marché au cours des dix dernières années (30 %) est due, en partie, aux propriétés suivantes :

- haute résistance spécifique (résistance par unité de poids, haute résistance et faible masse volumique);
- haute rigidité spécifique (rigidité par unité de poids, haute rigidité et faible masse volumique);
- résistance à la corrosion;
- dureté (résistance au choc);
- facilité de fabrication.

La technologie des composites à matrice polymère et de fabrication de fibres de verre est bien rodée. De nouveaux matériaux de renforcement et de nouvelles matrices sont à l'étude afin d'améliorer certaines propriétés comme la résistance, la rigidité, la dureté et la tenue à la température. Les travaux visent, en outre, à introduire des procédés de fabrication plus efficaces.

2.1 Les matrices

Les plastiques se divisent en deux catégories :

- les thermodurcissables ou matériaux qui durcissent de manière permanente lors d'une réaction chimique qui se produit à la température de la pièce ou à une température plus élevée (résines époxydes et phénoliques);
- les thermoplastiques ou matériaux qui fondent à la chaleur et se solidifient au froid (polyéthylène et chlorure de polyvinyle).

Les résines thermodurcissables sont utilisées comme matrices pour la plupart des composites polymères de pointe. Bien que les thermoplastiques renforcés soient utilisés depuis longtemps, ces matériaux sont renforcés à l'aide de fibres courtes. Les nouveaux thermoplastiques renforcés désignés sous le nom de thermoplastiques de pointe sont présentement commercialisés. Ces composites comportent des fibres longues ou continues. Actuellement, seulement quelques entreprises fabriquent des composites thermoplastiques; par ailleurs, on prévoit que les emplois pour ces produits se multiplieront rapidement.

2.2 Les résines thermodurcissables

Pour une utilisation à la température ambiante :

Les époxydes sont les résines à matrices les plus couramment utilisées. Ils se travaillent bien et de plus viennent en une grande variété de formes, rétrécissent faiblement, se lient bien avec les fibres et possèdent de bonnes propriétés mécaniques.

Les polyesters sont habituellement utilisés pour des composites à performances inférieures. Ils entrent dans la composition d'un grand nombre de composites courants.

Pour une utilisation à des températures intermédiaires (150 à 250 °C) :

Les époxydes pouvant être utilisés dans cette plage de températures sont les novolacs, les cycloaliphatiques et les époxydes courants séchés avec des anhydrides. Les époxydes séchés à haute température ont tendance à être cassants.

Les bismaléimides (BMI) sont élaborés avec des méthodes semblables à celles utilisées pour les époxydes, mais on peut les utiliser à des températures plus élevées. Ces résines entrent de plus en plus dans la fabrication des pièces de moteurs d'avion qui doivent résister à de très hautes températures.

Les phénoliques ont une résistance à la chaleur allant jusqu'à 250 °C. Leur faible résistance mécanique limite cependant les possibilités quant à leurs applications.

Les silicones dérivent plutôt du silicium que du carbone. Certaines de ces résines peuvent même être utilisées à des températures dépassant 250 °C. Leurs propriétés mécaniques sont faibles et leurs applications limitées.

Pour une utilisation à des hautes températures (250 à 400 °C) :

Les polymères qui peuvent être utilisés à des températures de 250 °C et plus ont une structure de noyau aromatique hétérocyclique.

Voici quelques-uns de ces polymères à haute température :

- le polyimide;
- le polybenzimidazole;
- le polyquinoxaline;
- le polyamide-imide;
- le polybenzthiazole.

Les résines réagissant à température ambiante servent à la fabrication des articles de sport et des pièces intérieures d'aéronefs. Par ailleurs, on fabrique les pièces extérieures d'aéronefs avec des résines réagissant à haute température et à température intermédiaire.

Le prix de vente de ces résines augmente proportionnellement avec la température d'utilisation. Le prix de vente des résines à température ambiante se situe approximativement entre 2,20 \$ et 8,80 \$ le kilogramme. Les résines à température intermédiaire se vendent de 6,60 \$ à 44 \$ le kilogramme et les résines à haute température de 22 \$ à plus de 220 \$ le kilogramme.

2.3 Les résines thermoplastiques

La recherche et le développement relatifs à la technologie des composites de pointe se sont concentrés sur les résines thermodurcissables parce que celles-ci pouvaient être facilement utilisées pour imprégner les renforts. Les résines thermodurcissables présentent les désavantages suivants :

- les cycles de fabrication sont lents à cause du temps de durcissement de la résine;
- les déchets ne peuvent être recyclés;
- elles offrent une faible résistance.

Ces désavantages peuvent être évités si on utilise les thermoplastiques. Voici quelques résines qui entrent dans la fabrication des thermoplastiques de pointe :

- le polyamidéimide;
- le polyimide;
- le sulfure de polyphénylène;
- le polyétherétherkétone;
- d'autres résines comme les résines commerciales et industrielles.

Les résines commerciales se vendent environ 2,20 \$ à 4,40 \$ le kilogramme, les résines industrielles comme le polycarbonate et l'ABS se vendent de 4,40 \$ à 22 \$ le kilogramme et le prix de vente des thermoplastiques à hautes performances comme le polyétherétherkétone et le sulfure de polyphénylène est de 11 \$ à 44 \$ le kilogramme. Le bénéfice réalisé dans le commerce des thermoplastiques de pointe renforcés de fibres continues est élevé. Le prix des composites de fibres de verre (environ 2,20 \$ le kilogramme) et de polypropylène (environ 2,20 \$ le kilogramme) est fixé à 44 \$ le kilogramme.

Les composites sont fabriqués en imprégnant les fibres de renforcement de polymère. Dans le cas des thermoplastiques, la méthode la plus simple serait d'imprégner les renforts de polymère en fusion. La viscosité d'une coulée de ce genre est très élevée, ce qui rend l'imprégnation difficile.

Le fait qu'il n'existe pas de procédé économique d'imprégnation des renforts dans une coulée à haute viscosité est le principal obstacle à une plus grande pénétration de ces matériaux sur les marchés. On consacre des efforts considérables de recherche et de développement dans ce domaine et, au cours des prochaines années, on s'attend à ce que les composites thermoplastiques de pointe accaparent une partie importante du marché des plastiques renforcés.

2.4 Les renforts

Les renforts transmettent aux composites la plupart de leurs propriétés mécaniques; le rôle de la matrice est simplement de transférer la tension d'une fibre à l'autre. Les renforts les plus couramment utilisés sont les suivants :

- les fibres de verre (verre E et S);
- les fibres aramides (Kevlar);
- le graphite;
- le bore.

Dans la figure 2.1, on compare la limite d'élasticité spécifique et le module d'élasticité spécifique de ces renforts.

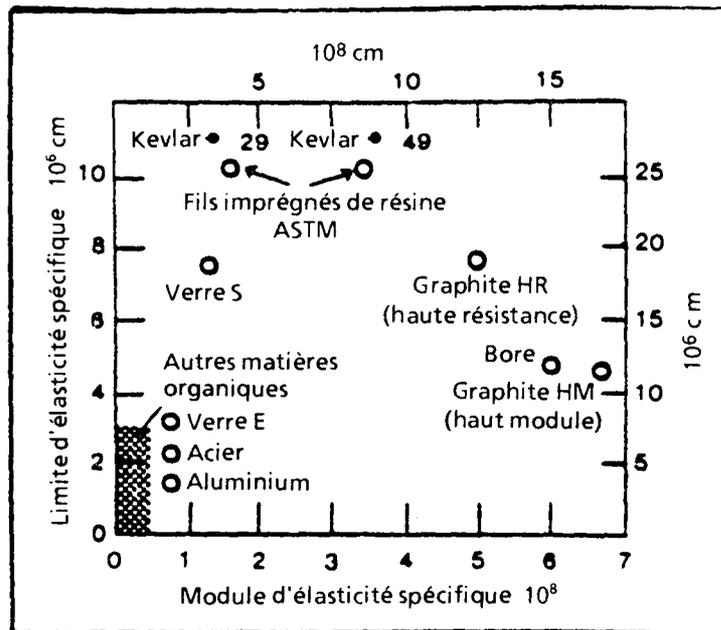


Figure 2.1

Limite d'élasticité spécifique et module d'élasticité spécifique des fibres de renforcement
(tiré de Rubber World, mai 1985)

Certains matériaux apparaissent en deux points suivant leur catégorie spécifique. Le Kevlar 29 est surtout utilisé dans la fabrication des pneus alors que le Kevlar 49 est utilisé comme fibre de renforcement. Le graphite se trouve dans les catégories de haute résistance (HR) à la traction et de haut module (HM). Les matériaux les plus en demande chez les concepteurs sont situés dans la partie droite supérieure du tableau. Ces matériaux sont caractérisés par une faible masse volumique et une haute résistance (en haut du tableau), ou une rigidité élevée (à la droite du tableau).

On utilise surtout les fibres de graphite lorsque l'on veut avoir un haut module d'élasticité spécifique, une grande conductivité de la chaleur et une faible dilatation thermique. Un désavantage du graphite est que le composite a une résistance plutôt faible aux chocs. Le Kevlar donne une résistance et une dureté spécifiques élevées. Sa résistance à la compression est cependant assez faible. Les composites de bore offrent d'excellentes résistances à la traction et à la compression.

Bien que la limite d'élasticité des composites de graphite à haute résistance soit semblable à celle des composites de bore, la résistance à la compression des composites de bore est beaucoup plus élevée. Les fibres de verre offrent de bonnes propriétés mécaniques à des prix inférieurs à ceux des fibres de carbone, de Kevlar ou de bore. Afin d'optimiser le rapport prix/performance des composites, on a souvent recours à une combinaison de deux renforts ou plus.

Le prix des fibres de renforcement varie énormément; cela varie approximativement de 3,30 \$ le kilogramme pour du verre E à 15,40 \$ le kilogramme pour du verre S, à 44 \$ le kilogramme pour le Kevlar et certaines catégories de graphite, et à 815 \$ le kilogramme pour les fibres de bore.

Les produits de renforcement se présentent sous plusieurs formes :

- en fils continus;
- en tissus;
- en boudins tissés;
- en fils coupés;
- en renforts tridimensionnels;
- en feutres;
- en fibres préimprégnées.

Les fibres préimprégnées (des renforts imprégnés avec une résine partiellement séchée ou avec une résine thermoplastique) sont couramment utilisées dans la fabrication de pièces à haute performance.

2.5 La fabrication

La fabrication de produits composites de pointe nécessite un ensemble d'activités exécutées par différentes entreprises :

- ° la production des matières premières (les résines, les additifs, les renforts). Ce sont principalement des grandes entreprises qui s'en occupent et pour cela il leur faut un énorme savoir-faire technique;
- ° la production des tissus de renforcement. Cette activité pourrait être menée par des entreprises de taille moyenne ayant de l'expérience dans le domaine du textile;
- ° la production des produits préimprégnés. Cette activité pourrait être menée par des entreprises de taille moyenne et comprend l'imprégnation des renforts avec de la résine;
- ° la fabrication.

Voici les différents procédés de fabrication utilisés pour produire les matériaux composites de pointe :

- ° Moulage par contact. Les renforts sont placés dans le moule et recouverts de résine qu'on laisse durcir. Cette méthode permet surtout de fabriquer des pièces à faible performance.
- ° Moulage au sac à vide. Cette méthode qui comprend un moulage humide fait à la main permet d'extraire l'air emprisonné dans la résine. Le renfort imprégné de résine est placé dans le moule, on le recouvre d'un film plastique et on fait le vide entre les deux couches. La pression atmosphérique comprime les renforts.
- ° Moulage au sac à pression. Cette méthode est un peu semblable à celle du sac à vide sauf que l'on recouvre la pièce d'une feuille de caoutchouc et que l'on applique une pression positive.
- ° Moulage en autoclave. Il s'agit d'une variation des méthodes de moulage aux sacs à pression et à vide. L'ensemble est placé dans l'autoclave, qui à pression et à température élevées, provoque un durcissement de la résine.
- ° Enroulement filamentaire. Le renfort sous forme de fil est imprégné de résine et enroulé autour d'un mandrin rotatif. Des rubans préimprégnés peuvent être utilisés au lieu du fil.

- ° Pultrusion. Les renforts sont imprégnés de résine et tirés à travers une matrice chauffée qui durcit la résine. On utilise principalement ce procédé pour obtenir des profilés continus, mais il a également été modifié afin de permettre la fabrication de ressorts à lames en fibre de verre pour l'industrie automobile.
- ° Estampage. On peut mettre en forme un thermoplastique renforcé en feuilles par estampage en utilisant de l'équipement de façonnage du métal à haute vitesse ayant subi certaines modifications.

La fabrication peut être entreprise par des grandes ou moyennes entreprises (les pièces d'avions, l'équipement de sport) ou par des petites entreprises (les antennes paraboliques).

2.6 Les marchés

Au cours des vingt dernières années, la consommation de plastiques renforcés a augmenté à un rythme annuel de 15 %, alors qu'on enregistrait, au cours de la dernière décennie, une hausse annuelle de 30 % dans la consommation de matériaux composites de pointe. Au cours de la même période, les matériaux de base, comme l'acier et l'aluminium, ne connaissent qu'une croissance annuelle de 4 %*. En 1984, la consommation mondiale de composites de pointe était évaluée à 48,5 millions de kilogrammes, soit une valeur de 1,3 milliard de dollars US. Le marché des composites se répartit ainsi** :

a) Renforts :	
Aramide	27 %
Carbone	30 %
Verre S	42 %
Autres	1 %
b) Résines :	
Époxydes	80 %
Autres thermodurcissables	12 %
Thermoplastiques	8 %

On prévoit que le marché s'accroîtra de 16 % annuellement au cours de la prochaine décennie, ce qui représente des ventes d'un peu plus de 12 milliards de dollars d'ici l'an 2000. L'industrie aérospatiale

* Rubber World, mai 1985.

** Reinforced Plastics, mars 1985.

connaîtra la croissance la plus importante (22 % par année) et les autres domaines d'application industrielle compteront pour une croissance annuelle de 10 %*. Les données équivalentes pour le marché canadien ne sont pas disponibles.

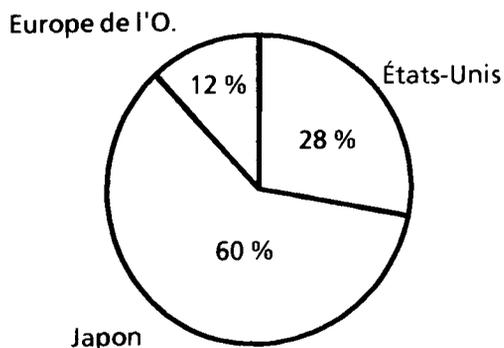
Voici les principaux débouchés pour les composites de pointe** :

- l'aérospatiale	38 %
- les sports et les loisirs	31 %
- l'industrie	23 %
- l'automobile et les camions	3 %
- autres	5 %

Les États-Unis constituent le principal marché pour les composites de pointe et sont en outre avec le Japon d'importants fournisseurs de renforts et de pièces composites. Cette situation est représentée à la figure 2.2 avec, comme exemple, la fibre graphite.

Il n'existe aucun fabricant canadien de fibres graphites ou de renforts utilisés dans les composites de pointe.

Répartition de l'offre (1983)



Répartition de la demande (1983)

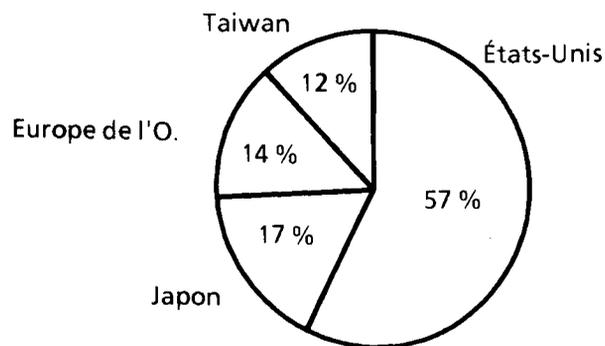


Figure 2.2

Offre et demande mondiales pour la fibre de carbone
(tiré de Japan's New Materials Industries, Japan Strategy Resources,
vol. X, n° 20, International Business Information Inc.)

* Reinforced Plastics, mars 1985.

** D.S. Brown, C.H. Eckert, Ch. H. Kline, Advanced Polymer Composites, Five Keys to Success, Material and Design, vol. 6, n° 5, 1985.

Voici quelques débouchés possibles pour les composites de pointe à matrice polymère :

L'AÉROSPATIALE ET L'EXPLORATION SPATIALE. L'aérospatiale est le plus important marché pour les composites de pointe. La principale raison pour laquelle on utilise des matériaux composites dans les structures d'aéronefs est l'économie de poids (le matériau composite pèse de 20 à 30 % de moins que l'aluminium) ainsi que la réduction du nombre de pièces. Les obstacles qui empêchent de les utiliser sur une plus grande échelle sont le prix élevé du matériau, c'est-à-dire 110 \$ à 154 \$ le kilogramme, alors que l'aluminium coûte de 4,40 \$ à 11 \$ le kilogramme, et la fabrication qui exige une main-d'œuvre considérable. Dans le futur, une station orbitale pourrait être fabriquée en composites de pointe, éventuellement élaborés dans l'espace.

L'absorption d'eau et un affaiblissement subséquent des propriétés mécaniques représentent un problème sérieux si on veut utiliser ces composites pour les carlingues des avions.

Les aéronefs commerciaux. Les prix élevés du carburant sont à l'origine d'une demande pour des avions de transport commercial plus légers; à l'heure actuelle, les prix du carburant représentent environ 60 % des frais d'exploitation. Un kilogramme de poids mort sur l'avion consomme 1 000 litres de carburant par année. Actuellement, tous les plus importants fabricants d'avions de transport commercial incorporent une grande quantité de pièces composites. On donne des exemples de pièces composites utilisées sur les Boeing 767 au tableau 1.

TABLEAU 1

Pièces composites utilisées sur les Boeing 767
 (tiré de Composites Use in Aircraft with Emphasis on Kevlar Aramid,
 P.R. Langston, Composites in Manufacturing 5, LA, janvier 1986)

Sommaire des poids des composites de pointe

Matériau	Application	Estimation de poids (lb)	Économie de poids (lb)
Graphite	Aileron intérieur	89	
	Aileron extérieur	75	
	Aérofrenés intérieurs et extérieurs	182	
	Gouvernail	280	
	Gouverne de profondeur	326	
	Sous-total	<u>952</u>	(- 160)
Hybride (Kevlar) (Graphite)	Plans fixes de l'aile de bord de fuite	325	
	Capots de l'inverseur de poussée et du ventilateur	326	
	Carénage de la timonerie du volet de bord de fuite	59	
	Panneaux de bordure du volet de bord de fuite intérieur	9	
	Carénage des ailes et du fuselage	298	
	Portes du train d'atterrissage	298	
	Plans fixes de bord de fuite	114	
	Plaques d'étanchéité de l'empennage	17	
	Portes du train d'atterrissage avant (poids du graphite seulement)	25	
		Sous-total	<u>1 471</u>
Fibre de Kevlar aramide	Conduits ECS	328	
	Plateau porte-charge	276	
	Conteneurs de rangement extérieur et supports de conteneur central	314	
	Système d'évacuation d'urgence	60	
	Lavabos, rangements et cloisons	84	
	Carénage du mât réacteur	77	
	Volet extérieur, de bord d'attaque et de bord de fuite	33	
	Écran protecteur du volet intérieur	24	
	Carénage de l'inverseur de poussée	14	
		Sous-total	<u>1 210</u>
	TOTAL	<u><u>3 633</u></u>	(-1 250)

Avion-navette. C'est probablement l'avion-navette Dash 8 de de Havilland qui possède le plus grand pourcentage de composites de tous les autres avions du même genre actuellement en circulation. A l'intérieur, des composites sont utilisés dans la fabrication des panneaux du plancher, des compartiments à bagages au-dessus des sièges, des lavabos, des rangements pour les vêtements et la nourriture et des conduits de climatisation. Quant aux pièces composites de l'extérieur, elles sont présentées à la figure 2.3.

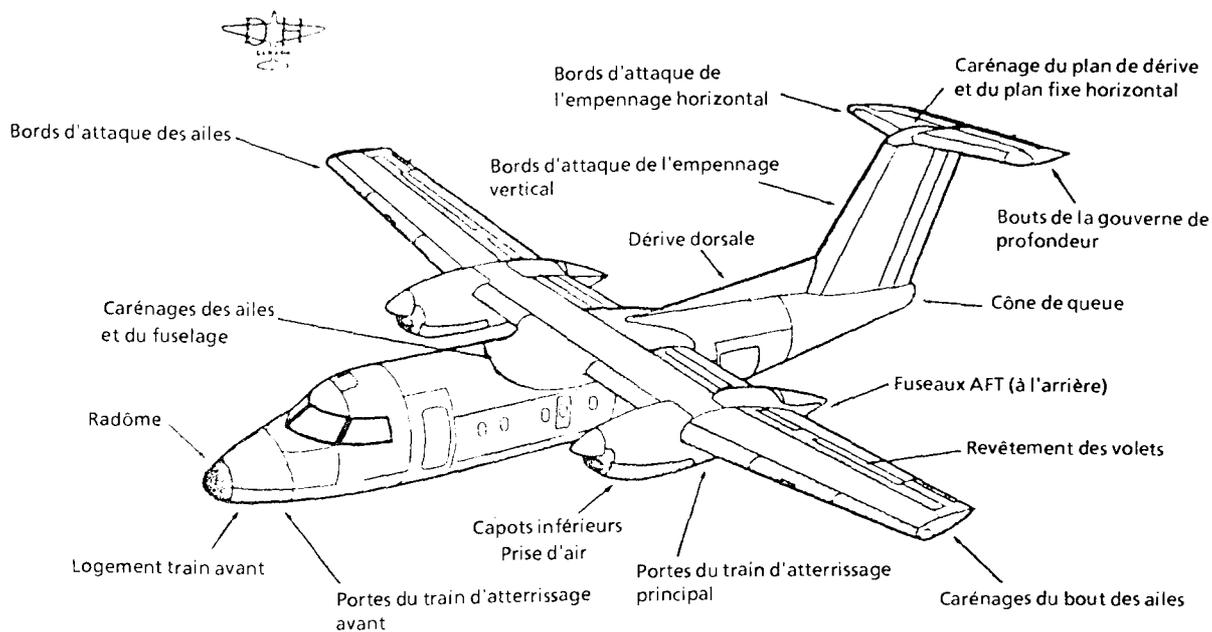


Figure 2.3

Structures composites extérieures sur le Dash 8
(L.K. John, De Havilland Aircraft of Canada, Aramid Composite Applications at de Havilland)

Une grande utilisation de composites dans le Dash 8 a permis de réaliser des économies de carburant de plus de 25 % supérieures à celles d'avions semblables fabriqués avec des pièces en aluminium.

Avion pour l'aviation générale. Le premier avion réalisé entièrement en matériaux composites, le Windecker Eagle, a été certifié en 1968 et constituait une première expérience dans l'utilisation de composites pour la fabrication de petits avions. Deux avions de construction mixte, l'Avtek 400 et le Beech Starship, sont actuellement soumis aux modalités d'obtention d'un certificat de la FAA.

Les hélicoptères. L'utilisation de composites de pointe dans les structures d'hélicoptères s'est traduite en économies, en termes de prix et de poids. Sikorsky prévoit qu'un fuselage composite aboutira à une réduction de 25 % du prix et de 23 % du poids. La diminution des frais de fabrication est obtenue en consolidant les pièces et en réduisant les coûts de montage*. Les pièces composites les plus habituelles sont le moyeu du rotor, les pales du rotor, l'empennage et le train d'atterrissage.

L'avion militaire. L'utilisation de composites dans l'avion militaire permet de réduire le poids et d'augmenter la gamme et la taille de la charge utile. Un chasseur type de modèle récent comprend environ 400 kg de structures composites. Le AV8B Harrier II en est un bon exemple; il a été construit par McDonnell Douglas et contient 638 kg de composites graphite-époxyde, soit 28 % du poids total. La diminution de poids de 20 % est cruciale pour le rendement de cet avion à décollage et atterrissage vertical.

Les pièces composites les plus courantes comprennent entre autres, des sections de fuselage, l'empennage, les portes, les structures intérieures, les surfaces des commandes, et les stabilisateurs verticaux et horizontaux.

L'AUTOMOBILE. Malgré les nombreuses applications des plastiques renforcés dans le secteur automobile, le prix élevé des composites de pointe limite quelque peu leur utilisation. Par exemple, on ne pourrait augmenter l'utilisation de la fibre graphite dans l'industrie automobile sans que le prix baisse en dessous de 11 \$ le kilogramme. L'évolution des prix des fibres graphites est présentée à la figure 2.4.

La chute rapide des prix enregistrée dès le début, au cours des années soixante et soixante-dix, a été suivie d'une stabilisation dans les années quatre-vingt. La diminution de prix qui serait nécessaire à l'industrie automobile n'est pas prévue pour les prochaines années.

* R.R. Irving, Advanced Composites, They are Now Stronger and Cheaper, tiré de Iron Age, 3 oct. 1983.

Bien qu'on ne prévoie pas une percée importante des composites de pointe sur le marché général de l'automobile, il y a certaines pièces pour lesquelles le coût élevé des composites de pointe est justifié par leur rendement.

Des supports de montage pour les compresseurs de climatiseur en composite hybride verre-graphite ont été installés sur certains modèles Mustang de Ford et Capri de Mercury. Ces pièces pèsent 0,7 kg comparativement aux 3 kg des supports en métal qu'elles remplacent. On a utilisé pour la première fois un arbre de commande en composite verre-graphite sur une voiture de course qui participait au circuit Daytona Challenge. Depuis lors, des arbres de commande en composite sont installés sur les camionnettes, par exemple sur le modèle Econoline 1985. Les arbres de commande en composite réduisent le poids et augmentent le confort en amortissant les vibrations.

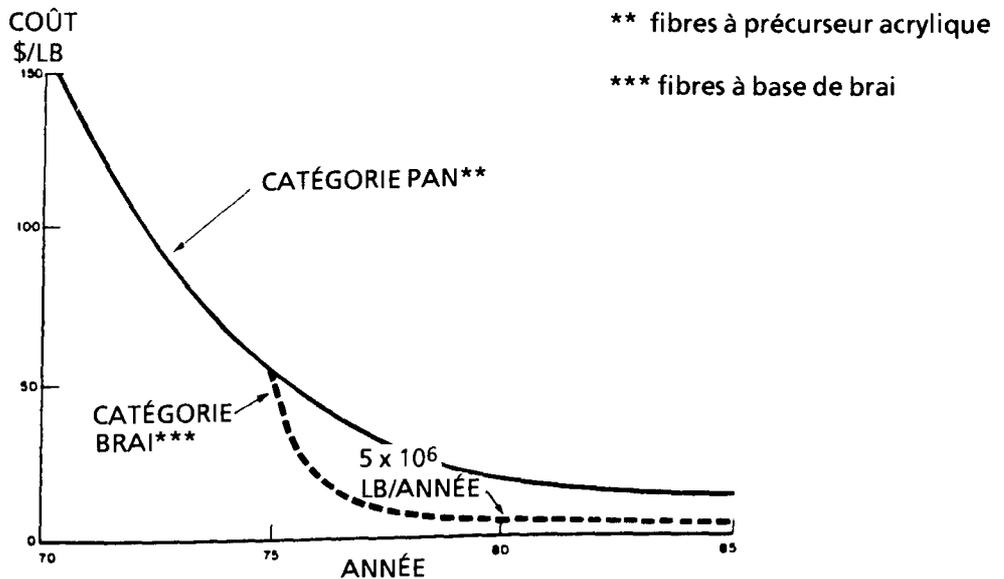


Figure 2.4

Évolution du prix des composites de graphite (\$ US)
(tiré de Commercial Opportunities for Advanced Composites, ASTM, 1980)
(*donne le plus bas prix de 1986 pour les fibres graphites)

SPORTS ET LOISIRS. Les débouchés les plus importants se trouvent dans le domaine nautique. On utilise les fibres aramides pour obtenir une structure très rigide et légère. Les fibres graphites servent à l'occasion de renforts locaux.

Un grand nombre de fabricants de raquettes de tennis utilisent des composites renforcés de graphite et, à plus petite échelle, de bore. Ces composites permettent aux concepteurs de réaliser des raquettes avec des centres de percussions (sweet spots) plus grands, produisant un meilleur rebond et moins de vibrations. Ces matériaux augmentent également la longévité de l'article.

Les manches de bâtons de golf figurent parmi les premiers articles d'équipement sportif où les matériaux composites ont été utilisés. Puisque le manche peut être allégé jusqu'à 40 % de son poids, on peut alourdir la tête du bâton, ce qui augmente la portée des coups.

Les composites de pointe ont en grande partie remplacé la fibre de verre et le bambou dans les cannes à pêche. En amortissant les vibrations, les composites de graphite augmentent la distance et la précision du lancer. D'autres articles comprennent des composites de pointe; par exemple, les bicyclettes, l'équipement de tir à l'arc, les planeurs, les kayacs et les raquettes de racketball.

APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DU GÉNIE. On utilise les composites renforcés de fibres de carbone lorsqu'une rigidité et une résistance spécifiques élevées, un faible coefficient de dilatation thermique et un pouvoir lubrifiant de la surface sont nécessaires.

Grâce à ces propriétés, les composites de fibre de carbone entrent pour une large part dans la fabrication de pièces de machines textiles où des mouvements alternatifs, oscillatoires et rotatifs à haute vitesse nécessitent des matériaux à faible inertie et à haute résistance à la fatigue. Les métiers à tisser comportant des composites de graphite fonctionnent plus rapidement et avec moins de bruit. Le faible coefficient de dilatation thermique des composites de graphite leur vaut leur emploi dans les micromètres de précision lorsque les erreurs de calcul dues aux variations de température doivent être réduites au minimum. Le pouvoir lubrifiant du graphite est mis à profit dans les engrenages composites qui, grâce au graphite, exigent des couples moins forts, produisent moins de bruit que celui des engrenages de métal et ne demandent pas de lubrification.

EQUIPEMENT MÉDICAL. Grâce à leur faible pouvoir d'absorption des rayons X, les composites de graphite sont utilisés de différentes façons dans l'équipement de radiologie; par exemple, les tables et les cassettes. En outre, grâce à cette faible absorption, il est possible de diminuer de manière significative le degré de radiation auquel le patient est exposé.

2.7 Les tendances futures

LES MATRICES. Bien que l'on s'attende à un emploi prépondérant de l'époxyde, de nouveaux matériaux stables à plus hautes températures verront le jour et seront commercialisés. On prévoit que les thermoplastiques accapareront une certaine part du marché des composites de pointe. En outre, ils offrent peut-être les meilleures possibilités de croissance. Les composites thermoplastiques de pointe semblent se prêter beaucoup mieux à une fabrication à l'échelle industrielle et présentent des avantages sur les composites à base de thermodurcissables quant à la dureté et la résistance à l'eau. Bien que ces matériaux n'aient été utilisés que depuis peu dans le domaine militaire, ils sont déjà employés pour la fabrication d'articles aussi courants que le bout renforcé des bottes de sécurité.

LES RENFORTS. Le marché est dominé par les fibres de verre S, de graphite et les fibres aramides, tendance qui se poursuivra probablement au cours des cinq à dix prochaines années. D'autres fibres sont actuellement commercialisées qui seront utilisées dans de nouveaux domaines ou viendront occuper les parts du marché détenues par d'autres produits. Ces nouvelles fibres seront à base de :

- céramique (comme le carbure de silicium, le nitrure de silicium, l'alumine);
- cristaux polymériques liquides;
- polymères ultra-étirés (comme le polyéthylène ultra-étiré introduit par Allied).

LA FABRICATION. Des procédés de fabrication plus rapides et plus fiables sont mis au point et commercialisés. Dans le secteur des thermodurcissables, la tendance est d'automatiser les procédés afin de réduire les besoins en main-d'œuvre et d'améliorer la précision.

Les thermoplastiques renforcés seront fabriqués par des procédés plus rapides. A l'heure actuelle, des modifications sont apportées aux méthodes courantes comme l'enroulement filamentaire et la pultrusion afin de traiter les thermoplastiques renforcés. On peut également s'attendre à ce que l'utilisation de procédés d'estampage à haute vitesse prenne plus d'ampleur. Les avantages de ces procédés sont présentés à la figure 2.5. Malgré le prix souvent plus élevé de l'équipement, ces méthodes sont plus adéquates pour la production de gros volumes.

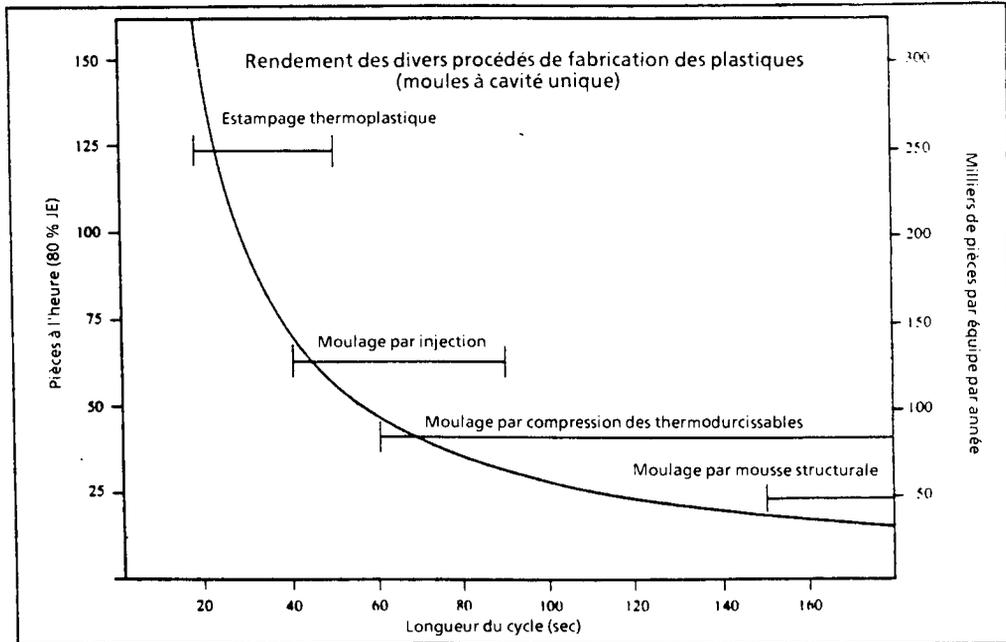


Figure 2.5

Rendement des divers procédés de fabrication des plastiques
(tiré de F. Studer, Automotive Applications of Stampable Reinforced Thermoplastics Development Prospects, Materials and Design, vol. 4, août/sept. 1983)

2.8 Sommaire

Une hausse de 16 % par année de la consommation de composites à matrice polymère de pointe est prévue, ce qui représente des ventes de l'ordre de 12 milliards de dollars d'ici l'an 2000. Certaines propriétés importantes de ces matériaux comme leur facilité de fabrication, leur faible masse volumique, leur résistance et leur rigidité élevées, leur résistance à la fatigue et à la corrosion, et l'amortissement de la vibration font qu'ils conviennent tout à fait aux secteurs de l'aérospatiale, des pièces de machinerie, de l'équipement de laboratoire, du matériel de transport et de l'équipement sportif. Un grand nombre de techniques de fabrication ont été mises au point, que ce soit des procédés très complexes exigeant un grand savoir-faire et d'importants investissements, ou des méthodes relativement simples qui peuvent être utilisées avec un minimum de savoir-faire et de capitaux.

3. COMPOSITES CARBONE-CARBONE

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'examiner la technologie, les divers emplois et les débouchés des composites carbone-carbone. Le carbone est un matériau industriel intéressant. Il se présente sous divers aspects dont le carbone pressé à chaud classique, le graphite densifié, le graphite pyrolitique et le graphite vitreux. Il possède un bon pouvoir lubrifiant, une haute conductivité électrique et thermique et, dans ses formes pyrolitique et vitreuse, il offre une haute résistance à l'oxydation. Toutes ces propriétés sont également le fait des composites carbone-carbone qui de plus, sont moins cassants que le carbone.

3.1 La fabrication

Les composites carbone-carbone sont fabriqués en imprégnant, de façon répétitive, des fibres graphites avec une résine organique qui sera, par la suite, soumise à la pyrolyse. La première étape de la transformation est semblable à celle des composites à matrice polymère. Les fibres graphites, sous la forme de fils, de rubans unidirectionnels, bidimensionnels ou tridimensionnels, sont imprégnées de résine phénolique ou de brai d'hydrocarbure et pressées à chaud pour leur donner leur forme finale. Il s'agira ensuite de soumettre la résine à la pyrolyse afin de la convertir en carbone. La pyrolyse rend la matière poreuse; il sera donc nécessaire de répéter les opérations d'imprégnation et de pyrolyse afin de la densifier. Une seule pyrolyse peut prendre jusqu'à 70 heures, ce qui explique le prix élevé des pièces en carbone-carbone. Le schéma de ce procédé se trouve à la figure 3.1. Dans le cas où les composites utilisés sont exposés à l'oxydation, la surface devra être gainée et étanchée avec un produit comme le carbure de silicium.

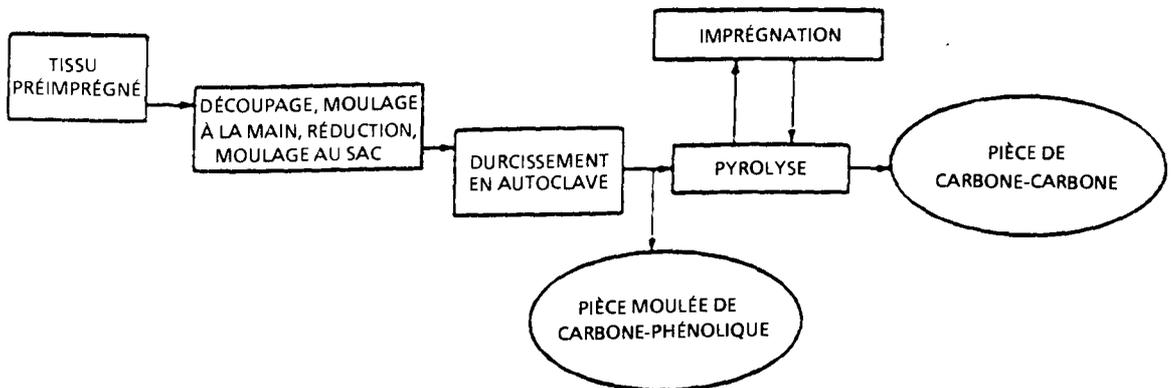


Figure 3.1

Schéma d'un procédé de fabrication de composites carbone-carbone
(tiré de D.R. Rummler, Recent Advances in Carbon-Carbon Materials Systems,
Conf. de la NASA, publication n° 2251, 1982)

3.2 Les propriétés

Voici les principales propriétés des composites carbone-carbone :

- faible masse volumique (environ 70 % de celle de l'aluminium);
- faible coefficient de dilatation thermique;
- grande conductivité thermique;
- résistance au choc thermique;
- résistance constante à la traction à haute température.

Cette dernière propriété est illustrée à la figure 3.2. Les trois composites carbone-carbone qui y sont présentés n'ont pas été renforcés avec la même fibre graphite.

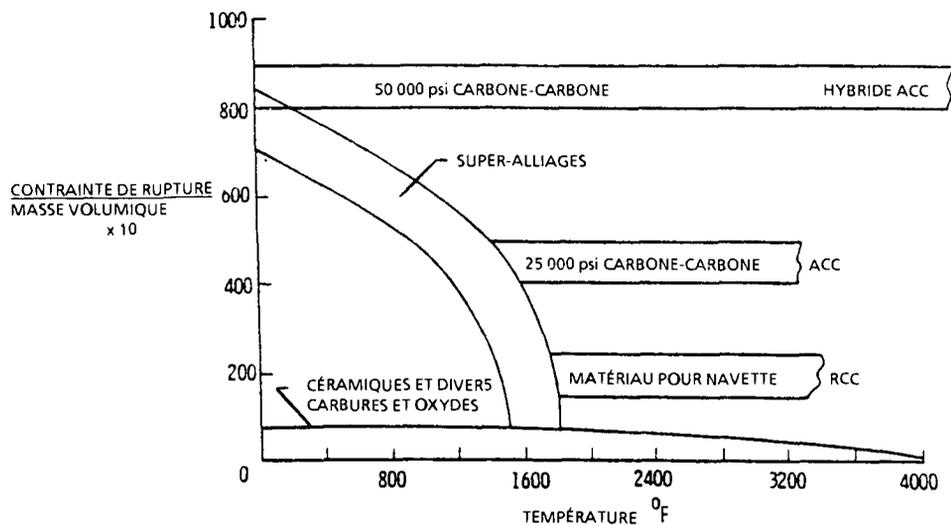


Figure 3.2

Propriétés des composites carbone-carbone à haute température
(tiré de D.R. Rummel, Recent Advances in Carbon-Carbon Materials Systems,
Conf. de la NASA, publication n° 2251, 1982)

3.3 Les marchés

Il a été impossible d'évaluer l'importance réelle du marché pour ce produit car il est très spécialisé et il n'existe, dans le monde, qu'une demi-douzaine d'entreprises qui le produisent. De plus, les États-Unis limitent la divulgation de renseignements sur cette technologie.

Le prix de revient très élevé de la fabrication des composites carbone-carbone, c'est-à-dire 330 \$ à 440 \$ le kilogramme, limite la gamme de ses divers emplois dont voici quelques exemples :

- le bouclier thermique de la navette spatiale pour les surfaces exposées à des températures allant jusqu'à 1 650 °C (le cône avant et les bords d'attaque);
- les rotors et les tampons de freinage pour les aéronefs et les voitures de course;
- les tuyères de fusées.

Actuellement, les composites carbone-carbone sont le plus couramment utilisés pour la fabrication des freins d'avion. Leur rendement de frottement est stable jusqu'à 2 000 °C (l'acier fond à 1 600 °C). Les freins mis au point par la compagnie Goodyear pour les avions F-15 pèsent environ 27 kg alors que ceux en acier pèsent 90 kg, et ils en améliorent le rendement de trois à cinq fois. Ces freins sont maintenant utilisés sur les F-14, les F-15, les F-16 et les B-1B, de même que sur les avions commerciaux. Certaines voitures de course sont également munies de freins en composite carbone-carbone. De plus, HITCO, le fournisseur américain de disques de freins d'avions en carbone-carbone, effectue également de la recherche dans le secteur des freins de motocyclettes, alors que les compagnies japonaises Nissan Spinning et Toho Rayon travaillent à la mise au point de freins en carbone-carbone pour les automobiles.

Puisque le carbone est généralement très compatible avec des éléments de nature biologique, il pourrait également y avoir des débouchés pour les composites carbone-carbone dans la fabrication de prothèses et d'appareils cardio-vasculaires.

3.4 Les tendances futures

Le prix de revient de la fabrication constitue probablement la principale entrave à une plus grande utilisation des composites carbone-carbone. A l'heure actuelle, le plus gros défi technologique est de réduire les prix de la transformation en raccourcissant le temps nécessaire à la pyrolyse de la résine.

3.5 Sommaire

Dû au fait que leur fabrication revient cher, les composites carbone-carbone ne sont utilisés que lorsque leur résistance à de hautes températures et leur faible masse volumique justifient leur prix. Ils sont surtout utilisés pour la fabrication de freins d'avions. Cependant, grâce à l'excellente compatibilité du graphite avec les éléments de nature biologique, ces composites devraient, dans l'avenir, entrer dans la fabrication de prothèses et d'appareils cardio-vasculaires.

4. COMPOSITES A MATRICE MÉTALLIQUE

Les composites à matrice métallique (CMM) sont des alliages renforcés de fibres, de trichites (whiskers), de macroparticules et de fils. Ces composites ont été mis au point pour la première fois il y a plus de vingt ans; cependant, à cette époque, on a trouvé peu d'applications pour les CMM. Le premier système CMM d'importance a été le bore-aluminium, mis au point vers la fin des années soixante. La récente élaboration de nouveaux systèmes CMM offrant des propriétés mécaniques supérieures et des caractéristiques physiques uniques, comme un faible coefficient de dilatation thermique, et une bonne tenue à l'eau et à de hautes températures, a fait renaître l'intérêt pour les CMM.

4.1 Les matrices

Les matrices les plus utilisées actuellement sont l'aluminium, le magnésium, le titanium et leurs alliages. L'aluminium et le magnésium, ainsi que leurs alliages, ont une faible masse volumique et sont utiles lorsqu'on a besoin de matériau d'une grande légèreté. Par contre, le titanium et son alliage ont un point de fusion élevé et sont utilisés lorsqu'une résistance à de hautes températures est nécessaire. Comparées aux matrices polymères, qui sont plus populaires, les matrices métalliques possèdent d'autres avantages : une résistance à de plus hautes températures, une rigidité transversale et une résistance à la flexion plus grandes, de plus hauts modules de cisaillement, des conductivités électriques et thermiques supérieures, une meilleure tenue aux radiations et à la flamme, et une absorption d'eau nulle.

4.2 Les renforts

Les fibres de renforcement les plus courantes sont le bore, le béryllium, le graphite, l'alumine et le carbure de silicium. Toutes ces fibres possèdent une haute résistance à la traction d'environ 2 000 MPa et un module d'élasticité d'à peu près 350 GPa, ce qui fait qu'elles sont très appropriées à servir d'agent de renforcement pour les composites utilisés dans les ouvrages structuraux. Bien que les propriétés mécaniques des trichites et des macroparticules de renforcement soient normalement inférieures à celles des fibres, elles possèdent un plus grand nombre de propriétés isotropes. Dans les secteurs où la conductivité électrique revêt une grande importance, on utilise des fibres métalliques ou des fibres gainées de métal comme renforts. Parmi les fils de renforcement les plus courants, il y a le tungstène, le béryllium et le titanium, alors que les fibres gainées les plus utilisées sont les fibres de carbone gainées d'argent, de cuivre et d'or.

4.3 Les composites

Les propriétés des composites à matrice métallique sont impressionnantes. En général, si on les compare aux métaux massifs, les composites à matrice métallique possèdent des rapports résistance-masse volumique et rigidité-masse volumique plus élevés, une meilleure résistance à la fatigue, un coefficient de dilatation thermique inférieur et une meilleure résistance à l'usure. Par exemple, la résistance maximale à la traction de l'aluminium 6061 est d'environ 344,8 MPa; une fois renforcé avec du SiC, on atteint un maximum de 1 462 MPa.

4.4 La fabrication

On peut généralement diviser les méthodes de fabrication des composites à matrice métallique en deux étapes principales : la phase primaire et la phase secondaire. La phase primaire a pour objectif d'assurer une bonne liaison entre la fibre et la matrice et de réunir les constituants du composite à matrice métallique. La seconde phase sert à donner aux composites bruts leur forme finale à l'aide de procédés comme le formage, le laminage, le soudage métallurgique et l'usinage. Le choix de la technique pour la phase primaire dépend beaucoup de la fibre et de la matrice sélectionnées.

Dans beaucoup de cas, le prétraitement de la fibre avant la fabrication proprement dite est nécessaire. Ce prétraitement, qui souvent consiste à gainer la fibre, contribue à prévenir la perte de rigidité et de résistance de la fibre à haute température et à améliorer la capacité d'absorption d'eau et de liaison entre la fibre et la matrice. Diverses techniques ont été mises au point pour gainer les fibres, parmi lesquelles le dépôt en phase vapeur, le dépôt en phase physique, le jet de plasma et le placage électrochimique.

La première étape de la fabrication des composites, que ce soit avec des fibres prétraitées ou non traitées, peut être exécutée avec des méthodes de transformation à l'état solide ou liquide. Les techniques courantes de la fabrication à l'état solide sont le soudage par diffusion, la compression isostatique à froid, le laminage à chaud, la compression isostatique à chaud, l'extrusion, et le soudage par étirage ou par explosion. Parmi les méthodes de transformation à l'état liquide, l'infiltration est celle qui est la plus utilisée, bien que beaucoup d'efforts aient été consacrés à la mise au point d'alliages eutectiques solidifiés de manière unidirectionnelle.

La seconde étape de la fabrication sert surtout à changer la forme des composites déjà fabriqués. On utilise couramment, pour travailler les composites à matrice métallique, les techniques d'usinage, d'assemblage et de formage employées pour les métaux classiques. Par exemple, on se sert de décharge électrique et de rayon laser pour découper; le soudage ou le brasage servent à assembler, et le formage

sous presse constitue un procédé de mise en forme. Cependant, avec l'amélioration des composites à matrice métallique et avec la croissance de leur utilisation, bon nombre des techniques classiques utilisées dans la seconde phase de la fabrication sont inadéquates ou inefficaces pour travailler des matériaux ayant des propriétés mécaniques d'une si grande supériorité. En conséquence, un grand nombre des techniques précitées sont en voie de subir des modifications révolutionnaires afin de faire face aux innovations de plus en plus nombreuses dans le domaine des composites à matrice métallique.

4.5 Les marchés

A l'origine, il y a vingt ans, la mise au point des composites à matrice métallique était destinée exclusivement à l'industrie aérospatiale. Cependant, grâce aux propriétés exceptionnelles habituellement rencontrées dans les composites à matrice métallique, on les utilise maintenant dans d'autres secteurs comme les industries navale, automobile et électronique, les sports et les loisirs et l'orthopédie.

Ces propriétés uniques assurent aux composites à matrice métallique un potentiel de croissance énorme. La technologie en est toutefois à ses débuts et les utilisations commerciales actuelles sont encore extrêmement limitées. Il est impossible d'évaluer l'importance véritable du marché, mais le tableau ci-dessous donne quelques indications des volumes de production et des prix des produits.

<u>Entreprise</u>	<u>Produit</u>	<u>Production annuelle</u>	<u>Prix (\$ US)</u>
DWA	SiC/Al	20 000 lb/an	50 \$/lb (base de 1 000 lb)
	Al ₂ O ₃ /Al	100 lb/an	20 \$/lb (base de 10 000 lb)
ARCO Chemical	SiC/Al	non publié	70-100 \$/lb
American Inc.	SiC/Al	quantité expérimentale	300-400 \$/lb
	Al ₂ O ₃ /Al	quantité expérimentale	non publié
AVCO	SiC/Al	quantité expérimentale	non publié
	Al ₂ O ₃ /Al		
Superior Graphite Co	SiC/Al	200 000 lb/an*	1-15 \$/lb selon la catégorie
Mitsubishi Al.Co.	SiC/Al	quantité expérimentale	200 \$/lb

* capacité de production

Dans le secteur de l'aérospatiale, où la dilatation thermique et une rigidité spécifique élevée sont des propriétés d'une importance capitale, les composites graphite-aluminium et graphite-magnésium se sont révélés les plus efficaces dans certains cas, entre autres les satellites et les antennes paraboliques. Dans l'industrie navale, le composite carbure de silicium-aluminium semble être prometteur en ce qui concerne des utilisations dans les superstructures des navires, des torpilles et les structures sous-marines.

Dans l'industrie automobile, Toyota a déjà utilisé le composite alumine-aluminium pour la bielle de son nouveau modèle d'exposition, le FX-1. Le matériau possède une ténacité équivalente à celle de l'acier tout en ayant une faible masse volumique. Actuellement, les composites graphite-plomb sont utilisés dans la fabrication des plaques d'accumulateurs, car ce produit est plus résistant au fluage que le plomb. De manière statistique, il a été démontré que la longévité des plaques d'accumulateurs a doublé depuis l'introduction des plaques en composite.

Dans le domaine des sports, les composites de bore-aluminium, graphite-aluminium et carbure de silicium-aluminium entrent dans la fabrication de raquettes de tennis, de skis, de bâtons de golf, de cadres de bicyclettes et de cannes à pêche. En électronique, les composites de fibres de carbone renforçant une matrice de cuivre sont utilisées lorsqu'une stabilité chimique et électrique et une conductivité thermique sont nécessaires.

4.6 Les tendances futures

Il est généralement possible de diviser la tendance technologique actuelle pour les composites à matrice métallique, que ce soit à court ou à long terme, en quatre orientations principales :

- la mise au point de nouveaux emplois;
- une conception plus efficace du produit et la réduction du prix de revient de production;
- l'élaboration de données techniques;
- l'amélioration des méthodes de fabrication.

La recherche se poursuit afin d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des matières de renforcement et d'élaborer de nouvelles compositions de composites à matrice métallique. On estime que de nouvelles techniques, comme celle de la solidification rapide, permettront d'en améliorer encore plus les propriétés. A titre d'exemple, le composite carbure de silicium-aluminium rapidement solidifié uniformise la distribution des dispersoïdes résistants au cisaillement comme le Al_3Ti , ce qui stabilise les joints de grain et renforce les grains, améliorant ainsi la tenue à haute température.

Parmi d'autres nouvelles compositions, on trouve les " hybrides " qui peuvent être constitués soit de plus d'un type de fibres de renforcement dans une seule matrice, soit d'une feuille de métal, d'une composition différente de la matrice, déposée sur le composite à matrice métallique. On estime que les feuilles de métal peuvent faire augmenter les propriétés transversales de certaines compositions de composites à matrice métallique. Il existe également d'autres types de compositions hybrides, dont le graphite-aluminium entrecroisé de bore-aluminium et les fibres de graphite et d' Al_2O_3 formées en un fil continu et dans lesquelles on a infiltré de l'aluminium. Dans cet exemple, le graphite augmente le module spécifique alors que l' Al_2O_3 améliore la résistance à la compression.

Pour que la fabrication soit plus efficace, il faut améliorer ou mettre au point l'automatisation des opérations de bobinage, de tissage, de moulage, de formage et de soudage. Les tendances dans ce domaine sont de l'ordre de la supervision informatisée du procédé, de l'inspection en cours de transformation et du traitement des données. Ces opérations permettront de fabriquer, plus économiquement, des pièces et des structures composites fiables et de qualité supérieure.

A l'heure actuelle, ces matériaux composites sont principalement employés dans les secteurs militaire et aérospatial. Dans le secteur commercial, l'utilisation des composites à matrice métallique est freinée du fait que, ces produits n'ayant été mis en service que très récemment, on connaît mal leurs performances. Il est donc essentiel d'avoir accès aux données techniques décrivant le comportement des composites à matrice métallique pour augmenter leur utilisation dans le secteur commercial.

De plus, le prix est un autre facteur important qui limite l'utilisation des composites à matrice métallique dans d'autres secteurs. On s'attend à ce que, avec l'amélioration des techniques de fabrication et donc par conséquent avec des frais de production comparables à ceux des matériaux classiques, les composites à matrice métallique soient employés dans d'autres secteurs.

5. COMPOSITES A MATRICE CÉRAMIQUE

La majorité de la recherche effectuée sur les composites à matrice céramique a eu lieu tout récemment. Au cours des vingt dernières années, le degré d'intérêt pour ces produits a grandement varié, suivant les divers problèmes techniques rencontrés ou résolus. La technologie n'en est encore, en grande partie, qu'au stade de la recherche.

On envisage actuellement d'utiliser des céramiques de pointe là où elles sont déjà utilisées ou pour des possibilités d'utilisation qui sont à l'étude, afin de tirer profit de leur rendement élevé, de l'abondance de l'approvisionnement en matières premières et de l'éventualité d'une diminution des coûts de production. Elles sont d'autant plus précieuses que leurs performances sont supérieures, dans certains milieux physiques et chimiques sévères, à celles des matériaux classiques. Toutefois, les céramiques modernes souffrent d'un défaut majeur, leur fragilité, ce qui ne permet pas de prédire leur durée de vie. A l'origine, la mise au point des composites à matrice céramique a découlé, en grande partie, du besoin d'améliorer la ténacité à la rupture et la résistance des céramiques monolithiques, tout en conservant leurs qualités intrinsèques.

Sur le plan théorique, on réalise des progrès pour résoudre la difficulté qui se pose à établir un rapport entre la taille des grains ou des fibres dispersés, leur espacement dans la matrice céramique, les différences entre les propriétés des matrices et celles des matières de renforcement, et la taille de la cassure caractéristique ayant un effet sur la résistance du matériau. Toutefois, des travaux systématiques sont consacrés à la démonstration de ces théories à l'aide de combinaisons de matériaux qui semblent très prometteuses dans le cas d'utilisations très précises. En somme, la technologie des composites à matrice céramique est en grande partie fondée sur la recherche réalisée dans le domaine des matériaux à matrice métallique et des résines renforcés.

Les composites à matrice céramique sont encore, dans une large mesure, en cours de développement, n'ont trouvé que peu de débouchés et sont utilisés de façon limitée dans le secteur commercial.

5.1 Les matrices

Grâce aux avantages techniques et financiers qu'elles offriraient par rapport à d'autres types de matériaux, les céramiques monolithiques ont pu être utilisées dans une grande variété de secteurs. Parmi les matériaux constituants des céramiques, citons un groupe important d'oxydes et d'oxydes complexes, de carbures, de nitrures, de borures, de siliciures et d'halogénures. Dans le domaine de la technologie des matériaux de pointe, ces matériaux sont déjà utilisés, ou leur utilisation s'annonce très bien, pour la fabrication de pièces électriques et magnétiques, ou de pièces mécaniques qui doivent offrir une grande solidité et une résistance à l'usure à des températures ambiantes ou moyennes. De plus, les céramiques sont à l'étude pour

des emplois mécaniques impliquant de hautes températures. Tous ces matériaux peuvent être utilisés, en principe, comme matrices dans la fabrication des composites, suivant l'usage que l'on veut en faire.

5.2 Les renforts

Le choix des matières de renforcement est aussi varié que celui des matrices céramiques. Fondamentalement, il y a deux types de renforts couramment utilisés : les fibres et les macroparticules. Parmi les matériaux les plus fréquemment utilisés comme fibres, on trouve le graphite (carbone), les métaux (le bore, le tungstène, le niobium et l'acier inoxydable), le verre et les céramiques (la silice fondue, les borosilicates, l'alumine et le carbure de silicium). La plupart de ces matériaux sont au moins aussi résistants que les matrices céramiques et sont normalement incorporés dans la matrice afin d'améliorer sa résistance mécanique et sa ténacité à la rupture par un mécanisme de transfert de charge qui freine la propagation des fissures. Les caractéristiques de certaines fibres sont présentées au tableau II.

Les macroparticules sont habituellement du verre ou de la céramique, mais on utilise parfois des métaux ou des polymères. Elles sont incorporées à des céramiques structurales à haute résistance et ont pour fonction d'augmenter la ténacité à la rupture et la résistance à l'usure de la matrice. Dans d'autres cas d'utilisation, comme dans le secteur de l'électronique, l'insertion de macroparticules dans une pièce de céramique monolithique sert à amplifier la gamme des propriétés électriques utiles comme la résistance, la conductivité et la capacité, ou à ajouter de nouvelles propriétés à la matrice afin que les exigences pour chaque utilisation soient remplies.

5.3 Les composites

Un composite à matrice céramique type est constitué de fibres très fines, ou macroparticules, insérées dans une masse qui serait autrement une céramique monolithique. La fibre ou macroparticule de renforcement peut être distribuée au hasard ou de façon partiellement ou entièrement ordonnée, selon les exigences de la conception.

Parmi les composites à matrice céramique actuellement mis au point pour des applications structurales à haute température, citons le zircon partiellement stabilisé, l'alumine renforcée de zircon ou de macroparticules de nitrure de bore, et les silicates d'aluminium-lithium renforcés de fibres de carbure de silicium. Toutes ces combinaisons se signalent par une amélioration substantielle de la dureté, de la ténacité à la rupture et de la résistance aux chocs par rapport à leurs équivalents en céramique monolithique. On trouvera une brève comparaison au tableau III.

TABLEAU II
 Caractéristiques des fibres de renforcement
 courantes pour les composites à matrice céramique
 (tiré de Fabrication of Composites, North-Holland, 1983)

Fibres	Module de Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Dilatation thermique coeff. α ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Masse volumique e ($\text{g} \times \text{cm}^{-3}$)	Diamètre des fibres d (μm)
Carbone à haut module ^a	360	2 400	radial 8 axial 0	1,8	8
Fil de carbure de silicium provenant de polymères organo-métalliques ^b	220	2 060	4,8	2,7	10
Filament de carbone gainé de carbure de silicium ^b	415	3 450	4,8	3,2	140
α -alumine ^c	385	> 1 400	8,5	3,9	20
Alumine-borosilicate ^d	152	1 550		2,5	11
Bore	420	3 000	8,2	3,4	100
Tungstène	340-410	2 900-3 800	4,8	19,3	
Niobium	83-124	500-1 030	8,1	8,6	
Acier inoxydable	150-210	2 050-2 550		7,7-8,0	

TABLEAU III
 Comparaison des caractéristiques des systèmes structuraux
 des céramiques et des composites à matrice céramique à la température ambiante
 (tiré de Chemtech 13 (4), avril 1983)

Matériau	Résistance (10 ³ psi / MPa) ^a	Ténacité à la rupture (K _{1C} MPa m ^{1/2}) ^b	Résistance aux chocs thermiques (ΔT °C) ^c
Céramiques classiques			
A base de SiC (p. ex. borosilicates)	10/70	0,5	300
Al ₂ O ₃	50-100/350-700	4	225
B ₄ C	50/350	4	225
ZrO ₂ (complètement stabilisé)	20-50/140-350	2,5	225
Si ₃ N ₄ (pressé à chaud)	100-125/700-860	5	450
Composites céramiques			
Cristaux ZrO ₂ (partiellement stabilisés)	200/1 400	6	450
Al ₂ O ₃ (10 % vol ZrO ₂)	100/700	8	>900
Al ₂ O ₃ (30 % vol BN)	50/350	6 - 9	500
B ₄ C (50 % vol C)	30/200	3,5	1100
Composite de fibre de verre-SiC	50-100/350-700	20	>900

^a Résistance à la traction mesurée en flexion.

^b Bien que la résistance et la ténacité à la rupture soient fondamentalement apparentées, elles ne varient pas toujours parallèlement car elles sont dépendantes de la taille des fissures propres aux différents essais effectués pour mesurer les deux propriétés.

^c Le choc thermique est obtenu, dans ce cas-ci, avec l'essai courant de la variation de température (ΔT) dans lequel, habituellement, une éprouvette est trempée afin de dégrader sensiblement sa dureté.

Voici quelques exemples de composites à matrice céramique utilisés dans l'électronique : le laminé de titanate de baryum-métal à haute capacité, les résistances variables de verre-SiC et le titanate de plomb-zirconate piézo-électrique renforcé d'élastomère. Le premier exemple est caractéristique de la fabrication du condensateur à plusieurs couches dans lequel les couches de rubans diélectriques de titanate de baryum donnent la haute capacité. Dans le second exemple, le verre sert à lier les particules de SiC, lui donnant sa forme, sa maniabilité et sa stabilité, alors que les particules de SiC donnent à l'ensemble des propriétés de résistance non linéaires. Le dernier exemple est fondamentalement un macro-composite dans lequel l'élastomère communique de nouvelles propriétés au composite, comme la flexibilité et la résistance aux chocs, tout en améliorant la capacité de réaction piézo-électrique et la sensibilité de la matrice céramique.

Grâce à ces exemples, nous sommes peut-être parvenus à illustrer adéquatement les nombreuses possibilités de compositions de composites à matrice céramique et la grande variété des combinaisons de matrices et de renforts.

5.4 La fabrication

Un bon nombre de techniques de fabrication de pièces de composite à matrice céramique ont été étudiées et publiées par des chercheurs. En principe, les pièces faites avec ces composites, peuvent être élaborées en deux étapes. La première consiste à incorporer du renfort à la matrice céramique non consolidée; la seconde, à consolider immédiatement après la matrice renforcée, ce qui exige habituellement un traitement à chaud et une pressurisation. Dans certains cas, ces deux étapes peuvent être combinées en un seul procédé.

Les renforts de fibres courtes et de macroparticules distribuées de façon aléatoire peuvent normalement être incorporés dans la matrice céramique en mélangeant le renfort avec la matrice pulvérisée. Pour la fabrication des composites à fibres courtes alignées, on procède généralement à l'alignement des fibres par cisaillement pendant l'écoulement dans un agent fluide comme la glycérine et l'alginate d'ammonium. L'introduction de la matrice à l'état de poudre dans le mélange liquide se solde par le dépôt des fibres et de la poudre intimement liées en un mat, ou feutre, aligné et cohérent. Les composites à fibres continues et alignés sont habituellement produits par la mise en forme d'un ruban de fibre imprégné de la matrice pulvérisée à l'état de boue. Les produits finis de tous ces composites sont formés par frittage ou pressage à chaud après le séchage, le découpage et l'empilement des trames jusqu'à l'épaisseur désirée du feutre ou du ruban de fibre. Les composites à fibres courtes et à macroparticules distribuées au hasard peuvent également être moulés par injection.

5.5 Les utilisations

La technologie des composites à matrice céramique n'a eu que très peu d'applications dans le commerce jusqu'à maintenant. Parmi celles-ci, l'exemple le plus connu est celui des plaquettes pour outils de coupe en céramique renforcée de trichites de SiC. Cependant, il existe un grand nombre de possibilités d'applications dans le commerce. Dans le secteur militaire, par exemple, citons les radômes, les cônes de rentrées et les fenêtres d'antennes d'engins balistiques, les boucliers, les pièces de moteur comme les échangeurs de chaleur, les pièces de turbine à gaz, les paliers et les injecteurs.

Il existe d'autres domaines importants où les composites à matrice céramique pourraient être utilisés, par exemple, celui des technologies reliées au secteur énergétique, comme les éléments semi-structuraux pour les réacteurs à fission ou à fusion nucléaire, les systèmes de conversion de l'énergie solaire à grande échelle, la liquéfaction et la gazéification du charbon, les batteries à haute densité d'énergie et les électrodes M.H.D. A l'heure actuelle, on concentre la R-D sur les composites à matrice céramique ou de verre renforcés de fibres céramiques. L'électronique se prêterait très bien à de nombreuses utilisations des composites à matrice céramique, mettant à profit leur propriétés diélectriques, piézo-électriques et pyroélectriques.

Le développement de la technologie des composites à matrice céramique repose fondamentalement sur les progrès actuels de la science des céramiques et de la technologie de fabrication de la fibre, puisque la variété de l'emploi et les performances des pièces de composites à matrice céramique sont limitées par les propriétés des deux principaux constituants : la matrice et les matières de renforcement. Actuellement, la diffusion de la technologie des composites à matrice céramique dans l'industrie ou dans d'autres domaines technologiques se fait graduellement, mais déjà on entrevoit plusieurs débouchés. Le succès de l'utilisation des composites à matrice céramique à des fins commerciales sera le résultat d'innovations considérables en ce qui concerne la conception technique, la garantie de qualité, les méthodes de fabrication et l'outillage. Ces trois derniers points sont particulièrement importants pour les pièces que l'on produit en grande quantité et qui doivent avoir une qualité uniforme et coûter relativement peu cher. De plus, la conception technique fera obligatoirement appel à une technologie originale pour l'assemblage des pièces de composites à matrice céramique avec des éléments faits de matériaux différents.

5.6 Les tendances futures

Puisque la technologie des composites à matrice céramique n'en est encore qu'à ses débuts et n'est utilisée commercialement que pour une poignée d'emplois, toute prévision quant à ses tendances en termes de progrès technologiques ou de mise au point de nouvelles applications, ne peut relever que du domaine de la spéculation. Toutefois, on peut apprendre beaucoup en observant l'évolution de la technologie des composites à matrice organique qui est mieux rodée et, dans une plus faible mesure, celle des composites à matrice métallique.

A moyen terme, on prévoit que les recherches dans la technologie des composites à matrice céramique se feront principalement sur l'amélioration des connaissances relatives à la conception, la fabrication et la vérification de la fiabilité, afin d'obtenir des propriétés qui donnent un rendement optimal. Simultanément, les résultats obtenus serviront à mettre au point d'éventuels produits particuliers, comme les pièces mécaniques des turbines à gaz à haute température et les dispositifs électriques et électroniques.

Un système mécanique qui suscitera probablement beaucoup d'intérêt est celui des composites à matrice verre-céramique renforcés de fibres de carbure de silicium. Bien qu'il soit pratiquement impossible d'obtenir de l'information sur les progrès de cette technologie, technologie qui est presque l'apanage du secteur militaire, il semble que l'on continuera à y investir d'importantes sommes d'argent et des efforts substantiels. En conséquence, on prévoit beaucoup de progrès dans ce secteur pour les cinq prochaines années, mais ces travaux demeureront confidentiels.

A long terme, lorsque la technologie des composites à matrice céramique sera mieux implantée, les intérêts se concentreront probablement sur deux points : la mise au point d'une autre génération de composites à matrice céramique et la recherche d'autres domaines d'application. Les efforts déployés pour la mise au point d'une autre génération dépendront grandement de la disponibilité de fibres de renforcement de meilleure qualité et moins onéreuses. Une meilleure qualité des fibres améliorera les performances globales des composites, permettant ainsi de les appliquer dans de nouveaux secteurs avec succès.

La recherche pour de nouvelles utilisations englobera tous les secteurs où les composites sont déjà utilisés de même que ceux qui sont encore inexploités. On prévoit que cette recherche sera en partie orientée vers la mise au point de méthodes et d'outillages rentables pour la fabrication en série. La disponibilité de matériaux à bon marché, les fibres de renforcement par exemple, sera également un facteur capital. On fera connaître aux secteurs industriels et aux secteurs de la consommation, qui traditionnellement étaient dominés par d'autres matériaux, les diverses utilisations des composites à

matrice céramique. En fait, on considère que le marché où les composites à matrice céramique pourraient supplanter les matériaux traditionnels est un secteur d'importance en termes d'expansion à long terme. Toutefois, l'ampleur de cette expansion dépendra beaucoup des prix des futurs composites à matrice céramique par rapport à ceux des autres matériaux.

6. RÉSUMÉ DE LA SITUATION INTERNATIONALE

A l'origine, c'est le besoin de pouvoir disposer de matériaux supérieurs pour des emplois dans le domaine de la défense qui a donné son élan à la recherche dans les matériaux composites. Quoique, à l'heure actuelle, l'utilisation des composites de pointe se soit étendue aux produits non militaires, ce sont encore les besoins des secteurs de la défense et de l'aérospatiale qui stimulent la recherche pour trouver des applications dans des nouveaux secteurs. En ce qui concerne les réalisations techniques et l'intensité des efforts accordés à ce domaine, les États-Unis sont probablement le chef de file, suivis de près par le Japon. D'autres pays comme le Royaume-Uni, la République fédérale d'Allemagne, la France et l'Union soviétique participent également au mouvement, bien que leurs efforts soient de beaucoup inférieurs à ceux des États-Unis.

6.1 Les États-Unis

Le gouvernement américain appuie grandement la R-D dans le domaine des matériaux composites. L'aide est surtout accordée pour les composites à matrice polymère de pointe; ceci a pour effet de diminuer le financement pour les composites à matrice céramique et à matrice de carbone. Les trois principaux organismes accordant des subventions sont : le Department of Defense (par le biais de la Defense Advanced Research Project Agency, d'organismes de l'armée, de la marine et de l'aviation des États-Unis), la NASA et le Department of Energy.

La recherche effectuée dans le secteur de la défense est concentrée dans les domaines suivants :

- la mise au point de structures mixtes pour les avions, les missiles et les navires;
- l'élaboration de procédés de fabrication plus efficaces;
- la production de données techniques nécessaires pour la conception des structures mixtes.

Le Department of Energy accorde une aide aux travaux sur les composites de pointe ayant pour objet les moteurs en céramique, le stockage de l'énergie et les sources d'énergies de remplacement.

Tout en concentrant la majorité des efforts dans les applications des composites au secteur militaire, les autorités américaines sont également préoccupées par le retard que pourrait prendre l'industrie nationale dans la concurrence que se livrent les pays divers pour les composites de pointe. Le Japon, en particulier, a déjà effectué une percée sur les marchés intérieurs et étrangers des États-Unis, principalement dans le secteur des matières de renforcement. Étant donné ces circonstances, la National Science Foundation a accordé

7,5 millions de dollars (US) à la University of Delaware pour créer un centre sur la science et la technique de fabrication des composites*. En plus de l'aide gouvernementale, le centre bénéficie du soutien de 30 grandes entreprises pour effectuer des recherches.

Les principaux programmes de recherche sont les suivants :

- fabrication et transformation;
- mécanique et conception;
- automatisation, logiciel et transfert d'information;
- conception des matériaux;
- longévité des matériaux.

La plus grande partie de la recherche industrielle, dans le domaine des composites de pointe, est réalisée par les fabricants de matériel militaire. Voici quelques-unes des entreprises possédant d'excellentes ressources pour la R-D et la fabrication : Lockheed, Pratt & Whitney, Boeing, Sikorsky, Rockwell et Martin-Marietta. Certains fournisseurs de fibres de renforcement ou de matrices, comme Hercules, DuPont et Allied-Signal, fabriquent également des pièces composites.

La compagnie DuPont a récemment lancé un programme très important dont le but est de mettre au point la technologie des composites de pointe et de découvrir de nouveaux débouchés. La compagnie ne se limitera pas seulement à élargir la gamme des fibres et des matrices, mais elle produira également des fibres préimprégnées courantes ou spéciales à base de Kevlar, de graphite et de verre, et fabriquera des éléments et des ensembles structuraux à hautes performances.

6.2 Le Japon

Ce qui sous-tend le programme japonais de recherche sur les composites, ce sont les besoins de la nation et les ouvertures sur le plan économique. Le pays manque de ressources naturelles, dispose d'une superficie très limitée et est très densément peuplé. Par conséquent, l'économie de matériaux et d'énergie, et l'utilisation rationnelle des ressources sont depuis longtemps des critères fondamentaux. Le fait d'avoir reconnu le potentiel des matériaux composites, ainsi que leurs avantages économiques, lorsqu'ils servent à des applications structurales et pour des engins aérospatiaux, a suscité un effort intensif au niveau de la R-D.

*N.D.T. : traduction libre pour Centre for Composites Manufacturing Science and Engineering.

Le gouvernement japonais a déjà commencé à subventionner des programmes à long terme visant les besoins du XXI^e siècle. L'orientation générale pour tous les programmes japonais sur les matériaux composites au Japon est donnée par le Basic Technologies for New Industries. Cet organisme a été institué pour une période de dix ans, ayant obtenu à l'origine une subvention annuelle de 40 millions de dollars (US), dont environ la moitié est actuellement allouée à la recherche sur les matériaux.

En 1981, la Agency of Industrial Science and Technology du ministère du Commerce extérieur et de l'Industrie a lancé huit programmes nationaux de R-D pour des industries futures au Japon. Parmi ceux-ci, il y avait un programme de R-D de huit ans sur les matériaux composites de pointe, dont le but est d'élaborer des matériaux composites de pointe pour des emplois dans l'aérospatiale, les moteurs d'avions à réaction et l'automobile.

Le Japon est actuellement au premier plan de la technologie des fibres de renforcement; il comble, par exemple, 60 % de la demande mondiale pour les fibres graphites. En fait, suffisamment de raisons expliquent cette avance technologique :

- Premièrement, toutes les organisations réalisant de la recherche sur les fibres fournissent un effort intense pour mettre au point une méthode plus économique de fabrication de la fibre.
- Deuxièmement, le Japon est assez entreprenant pour fabriquer une fibre spécialement préparée pour le marché américain.
- Troisièmement, lorsqu'il s'agit de mettre à l'essai des applications de fibres dans de nouveaux secteurs, il est toujours possible d'obtenir la coopération des autres secteurs industriels du pays.

Le tableau IV donne une liste des compagnies japonaises qui produisent des fibres de renforcement.

TABLEAU IV

Entreprises japonaises engagées dans la mise au point de fibres

<u>Entreprise</u>	<u>Type de fibre</u>
Tokai Carbon Co.	Carbone
Nippon Carbon Co.	Carbone
Kureha Chemical Industries	Carbone
Mitsubishi Chemical Industries	Carbone
Toray	Carbone
Toho Beslon	Carbone
Nippon Carbon Co.	Carbure de silicium
Mitsubishi Aluminum	Filaments de carbure de silicium
Unitika	Métal amorphe
Nippon Seisen	Acier inoxydable

Parmi les laboratoires gouvernementaux œuvrant sous l'égide de la Agency of Industrial Science and Technology (ministère du Commerce extérieur et de l'Industrie), les deux que voici sont plus profondément engagés dans la recherche sur les composites : le Research Institute for Polymers and Textiles (RIPT), qui met l'accent sur la mise au point d'une méthode de tissage d'un tissu de renforcement tridimensionnel pour les matériaux composites; le National Research Institute for Metals (NRIM), dont la fonction est de mettre au point des matériaux pour les secteurs de l'aérospatiale, du nucléaire et des semi-conducteurs.

Au Japon, les activités se rapportant aux composites à matrice céramique sont en premier lieu destinées à appuyer les programmes nationaux sur les moteurs diesel non réfrigérés et sur l'énergie de grande puissance. Bien que l'effort accordé à la mise au point des composites à matrice céramique soit relativement récent, et à plus petite échelle que celui des États-Unis, la situation pourrait changer dans un proche avenir, dès que l'importance de cette nouvelle catégorie de matériaux sera mieux connue dans le monde.

Les fabricants d'automobiles, comme Toyota et Honda, prennent actuellement la tête en ce qui concerne la mise au point des composites à matrice métallique. Certaines entreprises d'autres secteurs, comme Hitachi, le plus gros fabricant de produits électriques et électroniques, et Kobe Steel, une des plus importantes aciéries japonaises, travaillent également très activement à l'élaboration de composites à matrice métallique.

6.3 L'Europe

En Europe, la recherche et le développement axés sur les composites de pointe obéit à des motifs différents de ceux des États-Unis et du Japon. Il n'y a, en Europe, aucun pays qui possède une industrie

aérospatiale aussi développée que celle des États-Unis (bien que plusieurs nations européennes aient participé aux programmes Airbus et Ariane, devenant ainsi des concurrents de l'industrie aérospatiale américaine). L'industrie automobile n'est pas non plus aussi imposante qu'au Japon où la technologie de pointe doit être mise à profit afin de surpasser les limites des performances des matériaux classiques. L'intérêt que les pays européens accordent aux matériaux composites est plutôt dû au fait qu'ils ont reconnu les possibilités économiques que représentaient les composites pour leurs industries. D'autres facteurs importants, comme l'impact qui suit le développement des composites aux États-Unis et au Japon et la disponibilité et le prix des matières premières importées, ont également contribué à motiver les nations européennes à enchaîner le pas à la recherche et au développement qui sont centrés sur ce domaine.

La Communauté européenne a proposé d'allouer environ 120 millions de dollars au cours des quatre prochaines années pour des recherches sur de nouvelles technologies d'extraction, de traitement et d'élaboration des matières premières et des matériaux composites. Plus du tiers de cette somme (40 millions de dollars) serait dépensé pour la recherche sur l'élaboration de matériaux de pointe comme les alliages, les céramiques et les composites techniques, les composites étant considérés comme le facteur clé du développement futur de la Communauté européenne. Celle-ci est consciente qu'il est essentiel pour l'Europe de demeurer à l'avant-garde dans ce domaine et de maintenir cette position dans de secteurs aussi différents que les transports, l'électronique et la technologie biomédicale.

On estime que le Royaume-Uni, la France et la République fédérale d'Allemagne ont investi relativement plus d'efforts dans la R-D sur les composites que les autres pays membres de la Communauté européenne.

Royaume-Uni. A l'instar de la University of Delaware aux États-Unis, un centre de recherche sur les matériaux composites a été créé au Imperial College de Londres pour être mis à la disposition des industriels qui utilisent des matériaux composites. Il est destiné à devenir un centre d'expertise et de consultation mis au service de l'industrie pour l'analyse et la vérification de la conception des matériaux composites. La recherche qui s'effectue par le biais de l'entreprise privée est habituellement orientée sur les produits.

L'Imperial Chemical Industries fabrique des composites thermoplastiques préimprégnés, surtout pour des applications dans le domaine de l'aérospatiale. Un certain nombre d'entreprises fabriquent des pièces composites destinées au secteur militaire aérospatial et au secteur naval.

France. En France, une part considérable de la R-D s'effectue dans les universités, les laboratoires gouvernementaux et l'industrie. L'accent est particulièrement mis sur la fabrication de pièces d'armement et de structures destinées à être utilisées dans l'aéronautique et l'automobile.

La mise au point de matériaux composites à matrice céramique et de leurs utilisations est principalement effectuée par des industries liées par contrat à des agences responsables de la défense. Aérospatiale et la Société Européenne de Propulsion sont les deux entreprises spécialisées dans la production de composites céramiques qui utilisent une fibre continue et des renforcements multidirectionnels. Les ensembles composites sont le C-SiC, le SiC-SiC, le C-Al₂O₃ et le SiO₂-SiC, dont l'objectif principal est de desservir les marchés des armements, des missiles, des avions et des voitures de course. Marcel Dassault C^{ie} produit également, pour son propre usage, des matériaux composites à matrice céramique de pointe, qui sont destinés à son usine de montage de chasseurs à réaction.

Nombreux sont les programmes de R-D sur la technologie des composites à matrice céramique qui ont été lancés par des compagnies comme Cératech, Desmarquest et Aérospatiale. La compagnie Cératech s'est orientée vers les composites à matrice verre-céramique renforcés de fibres continues de SiC, alors que Desmarquest et Aérospatiale se sont tournées vers les céramiques renforcées de fibres courtes.

La compagnie Pêchiney Aluminium mise sur les propriétés des alliages d'aluminium de fonderie renforcés pour l'industrie automobile. Par ailleurs, l'Université de Bordeaux mène des recherches sur la chimie des interfaces et les propriétés mécaniques des ensembles composites. En outre, l'Université de Technologie se penche sur le mécanisme de rupture des matériaux composites. Le CNRS (Centre national de recherche scientifique et équivalent français du Conseil national de recherches du Canada) sert également de cadre pour de la recherche fondamentale sur les composites à matrice métallique qui revêt une importance considérable.

Le gouvernement français et l'industrie nationale ont conclu que le retard accusé dans la mise au point de composites était causé par l'absence d'une production nationale de fibres. En conséquence, la Société Européenne de Propulsion et Desmarquest ont entamé des travaux importants pour mettre au point une technologie de fabrication pour les fibres SiC et une autre pour les fibres Al₂O₃. Une coparticipation des compagnies Pêchiney et ELF, avec la collaboration de la compagnie japonaise Toray, a abouti à l'établissement d'une usine produisant des fibres de carbone. Les compagnies américaines Narmco et Hexel se sont aussi associées à un partenaire français pour la fabrication de produits préimprégnés en France.

République fédérale d'Allemagne. La République fédérale d'Allemagne poursuit ses activités de R-D de manière assez systématique. Tout comme le Japon, elle a lancé un programme décennal sur les matériaux de pointe, en y consacrant un budget de 70 millions de DM pour l'année financière 1985. Ces matériaux perfectionnés comprennent les composites, les poudres métallurgiques et les matériaux et céramiques à haute température. Aux programmes gouvernementaux s'ajoute la recherche du secteur privé qui est orientée sur les produits.

Dans le domaine des composites de pointe, les États-Unis font figure de proue dans la fabrication de pièces composites, ce qui est dû, en grande partie, aux exigences des industries de l'aérospatiale et des armements. Le Japon est le premier producteur de fibres de renforcement et on s'attend à ce qu'il prenne une position dominante, sinon la première, dans le secteur naissant des composites à matrices céramique et métallique.

7. RÉSUMÉ DE LA SITUATION AU CANADA

Le Japon a amplement prouvé l'importance que revêt la technologie de pointe pour le bien-être économique d'un pays. La technologie fondée sur les composites à matrice céramique est en plein essor et offre des débouchés considérables pour les pays industrialisés, comme les États-Unis, le Japon et les pays membres de la Communauté européenne. En ce moment, le Canada se trouve à une croisée de chemins; des pressions sont exercées afin qu'il étudie quelle technologie des composites de pointe conviendrait aux communautés scientifiques et aux gens d'affaires, et qu'il prenne une décision quant à ses engagements futurs.

Au fond, comme pour beaucoup d'autres nouvelles technologies de pointe, l'influence que pourrait avoir la technologie des composites de pointe au Canada serait surtout perceptible dans le secteur industriel. Cette nouvelle technologie offre des possibilités de croissance et de diversification à l'industrie nationale, tant pour consolider que pour élargir les marchés actuels. Elle pourrait même aider à créer de nouveaux débouchés. Elle ouvre même la porte à l'expansion de nouvelles industries, à la fois dans le secteur des matériaux et dans celui des usagers.

Au Canada, la plus grande partie de la R-D sur les composites de pointe et sur les méthodes de fabrication, comme aux États-Unis, est concentrée dans les entreprises d'aérospatiale et a surtout pour objet les composites à matrice polymère. Actuellement, il n'y a aucune production industrielle de composites à matrice métallique, céramique et de carbone au Canada et que très peu de R-D sur ces matériaux.

7.1 Les composites à matrice polymère

La liste ci-dessous énumère les activités canadiennes dans le domaine des composites à matrice polymère à hautes performances :

ACTIVITÉS DES ORGANISMES GOUVERNEMENTAUX DANS LE DOMAINE DES COMPOSITES A MATRICE POLYMÈRE

NOM DE L'ORGANISME

ACTIVITÉS DE R-D

Centre de recherche
pour la défense

Des études sur les composites de pointe (graphite-époxyde) relativement au Hornet F-18. Ces recherches ont pour objet l'entretien à long terme et les effets dangereux des dommages causés lors de combats ou d'accidents. On prépare des échantillons et on effectue des essais de performance.

Des études sont aussi menées sur les caractéristiques chimiques des composites à matrice résine :

- les propriétés des résines et l'influence du milieu sur leurs propriétés chimiques;

- le collage : notamment la mise au point d'adhésifs qui élimineraient la préparation des surfaces et les réparations à haute température;
- le programme Hornet F-18 : on étudie les effets de la lumière, de la chaleur et de l'eau sur la chimie des systèmes graphite-époxyde;
- la recherche pour trouver des substituts thermodurcissables et thermoplastiques pour les époxydes qui résisteraient à de plus hautes températures, p. ex., PEEK, PPS.

Établissement aéro-
nautique national

Un petit programme sur l'élaboration et la caractérisation des matériaux a débuté il y a environ dix-huit ans. Il avait pour but l'étude de résines à plus haute résistance, et s'est soldé par la mise au point d'un renfort époxyde.

Il y a trois ans, le programme a été élargi afin d'y inclure la mise au point de composites à matrice résine pour des applications structurales, en mettant l'accent sur les nouvelles combinaisons époxyde-graphite préimprégnées. Des recherches sont en cours sur la tolérance aux chocs, l'influence du milieu, la fatigue, les effets de la fabrication, les méthodes de mise en forme et les propriétés acoustiques. La recherche se déroule sous les auspices de différents ministères.

Institut de génie des
matériaux industriels

Organise un symposium annuel sur les composites. Effectue de la R-D sur les essais non destructifs, l'évaluation de la tolérance et les composites pour des applications dans l'industrie.

ACTIVITÉS DES AGENCES DE CONSULTATION CANADIENNES
DANS LE DOMAINE DES COMPOSITES A MATRICE POLYMÈRE

NOM DE L'ENTREPRISE

ACTIVITÉS DE R-D

Composites Develop-
ment International

L'entreprise a été constituée en 1979 par M. Leone Dyke. Le CDI offre des services d'expert-conseil sur les composites à matrice résine.

Engineering Research
Associates (ERA)

L'entreprise, une filiale de Tennyson, Hansen, Mabson and Uffen Associates Limited, a été constituée en 1979 dans le but d'effectuer de la recherche sur les structures et sur les matériaux. Les contrats obtenus ont permis de procéder à l'étude des composites de graphite, de Kevlar, de verre et de bore-époxyde, études nécessitant à la fois analyse et expérimentation. Parmi ses clients, se retrouvent toutes les compagnies d'aviation au Canada, les divers organismes canadiens de recherche sur la défense et la NASA.

ACTIVITÉS DES ENTREPRISES CANADIENNES DANS LE DOMAINE
DES COMPOSITES A MATRICE POLYMÈRE

<u>NOM DE L'ENTREPRISE</u>	<u>ACTIVITÉS DE PRODUCTION</u>	<u>ACTIVITÉS DE R-D</u>
Allied Canada Inc. Mississauga (Ontario) (affiliée à la compagnie américaine)		Subventionne des programmes à la Canadian Aircraft Products et à l'Université de C.-B. sur la sélection de résines et l'évaluation de composites comprenant la fibre Spectra 900.
Bay Mills Midland (Ontario)	Elle fabrique aux É.-U. un tissu industriel composé de fibres de verre-carbone. Elle construit actuellement une usine à Midland pour fabriquer des produits préimprégnés à partir de ce tissu.	Des programmes sur l'utilisation de ce tissu ne font que débiter.
Boeing of Canada Winnipeg (Manitoba)	Fabrication de pièces d'avions et de véhicules spatiaux en utilisant des combinaisons de graphite ou de Kevlar-époxyde.	Effectue de la R-D sur les composites résistant à de hautes températures en utilisant des époxydes à hautes températures, de même que sur l'enroulement filamentaire automatisé.
Bristol Aerospace Winnipeg (Manitoba)	Composites liés à l'époxyde; pièces pour les Dash 7 et 8, et le CL215; tuyères de fusées; mise en forme et séchage sous vide.	R-D sur la fibre de verre, de Kevlar, de graphite avec des matrices polyester et époxydes.
Canadair Limitée Montréal (Québec)	Des pièces composites intérieures et extérieures d'aéronefs utilisant des fibres époxydes, de graphite, de verre et de Kevlar. Des radômes faits de composites de polyester.	On a mené des recherches avec des combinaisons époxydes dans le but d'améliorer la résistance à la rupture.
Canadian Aircraft Products Richmond (C.-B.)	Des matériaux composites sont utilisés pour fabriquer des pièces d'avions : les capots, les stabilisateurs, les carénages et les bouts de la gouverne de profondeur.	Travaux de recherche privés sur les composites de résine. Un laboratoire de R-D a été créé il y a environ un an et fonctionne de manière autonome. Boeing, Bristol, Allied, de Havilland et Canadair comptent parmi ses clients.

Composite Technology Canada Limited Winnipeg (Manitoba)	Réparation des empennages et des pales des rotors des hélicoptères fabriqués par Bell, Hughes et Aérospatiale.	Aucune R-D.
English Plastics Brampton (Ontario)	Des pièces et des produits préimprégnés utilisant de l'époxyde, du verre et du Kevlar pour de Havilland, et de la fibre de verre préimprégnée pour Litton Industries.	Aucune R-D.
Enheat Inc. Aircraft Division Amherst (N.-É.)	Des produits préimprégnés en fibre de verre, de Kevlar et de graphite pour la plupart des compagnies d'aviation d'Amérique du Nord.	Aucune R-D.
Fleet Industries Fort Erie (Ontario)	Des sections de pales pour les hélicoptères Black Hawk de Sikorsky; des portes d'antennes pour les compagnies Raytheon, Lockheed Electronics et LIT Gilfillan.	La R-D a débuté dans les années cinquante. Plus d'efforts sont consacrés à mettre au point des sièges d'avion en composite et des trains d'atterrissage.
Lindhall Composite Materials Burnaby (C.-B.)	Des produits préimprégnés pour l'industrie aéronautique, consistant de verre tissé et unidirectionnel et de matrices époxydes. On prévoit ajouter le Kevlar et le graphite.	Le président, M. Darcy Lindhall, est expert-conseil auprès de Uniroyal pour le programme de renforts époxydes. Sa spécialité est l'élaboration des époxydes.
Relmech Manufacturing Elmira (Ontario)	Une pierre synthétique moulée à froid, utilisée dans l'industrie électrique de haute tension. Ce produit utilise des renforts d'amiante.	La compagnie effectue de la R-D depuis l'an dernier. Les travaux se rapportent à la mise au point de produits sans amiante, à l'élaboration de nouveaux produits et l'obtention de résistance plus élevée à la température.
Uniroyal Limited Service de la recherche Guelph (Ontario)	Des renforts époxydes.	Travaille depuis 1981 en collaboration avec le CNRC sur les renforts époxydes qui amélioreraient les propriétés des matrices de résine époxyde.

Universal Insulation Aurora (Ontario)	Des rubans pour l'industrie de l'électricité, produits préimprégnés pour des carters d'engrenages.	La R-D est orientée sur les marchés par le fait même de la capacité de production de l'entreprise. Cette compagnie bénéficie de subventions de l'IRAP pour évaluer l'utilisation des renforts époxydes avec des systèmes de durcissement autres que celui du type amine.
--	--	--

ACTIVITÉS DES UNIVERSITÉS CANADIENNES DANS LE DOMAINE
DES COMPOSITES A MATRICE POLYMÈRE

NOM DE L'UNIVERSITÉ

ACTIVITÉS DE R-D

Colombie-Britannique	Département de génie métallurgique : Des études sur la fatigue, la friction et l'usure des composites, avec des combinaisons courantes d'époxyde, de Kevlar et de verre. L'université effectue également des recherches sur la résistance à la rupture des composites de graphite-époxyde. Depuis environ 1980, des travaux ont été menés pour Allied sur la fibre polyéthylène à très haute résistance " Spectra 900 ". Les résines utilisées avec la fibre sont des esters et des polyesters vinyliques. Deux professeurs responsables, deux Ingénieurs, cinq techniciens et cinq étudiants diplômés sont affectés à ces travaux.
Concordia	Département de génie mécanique : Les travaux en cours sont destinés à l'industrie chimique (p. ex. les récipients sous pression), à quelques applications dans l'industrie aéronautique et automobile. Le financement provient d'aide gouvernementale et de contrats établis avec différentes entreprises. L'université effectue cette R-D depuis six à sept ans, quelques-unes des principales sources d'aide sont le CNRC, Spar Aerospace, le gouvernement du Québec et Imperial Oil. Le verre-polyester, le Kevlar-époxyde et le graphite-époxyde sont également à l'étude en utilisant le moulage sous vide. Dix personnes travaillent sur ces travaux, dont les professeurs, des étudiants diplômés et des assistants de recherche.
Ottawa	Département de génie mécanique : Programme Flywheel : des rotors en composite sont dessinés et fabriqués avec des combinaisons époxyde-verre S-2 et fibre de carbone. Récipients sous pression : les fibres sont du verre S-2 embobiné par enroulement filamentaire, du Kevlar 49, du carbone Grafil E-XA-F. La matrice époxyde est séchée par un procédé de type amine. Dans les programmes de conception, on aborde les couches multiples, les matériaux différents et les angles de vent différents. Des prototypes sont actuellement en cours de fabrication et, dès 1986, l'enroulement filamentaire sera robotisé.

Sherbrooke

Département de génie mécanique :

Cinq professeurs travaillent sur les composites polymères, deux en génie mécanique et trois en génie civil. Ils travaillent actuellement sur quatre contrats :

- Canadair : Un programme d'étude de trois ans (un an s'est écoulé) sur la résistance des composites carbone-époxyde. Le personnel est composé d'un professeur, M. Roy, d'un ingénieur chercheur, de trois étudiants diplômés et d'un technicien.
- Le ministère fédéral des Communications : étude de l'émission acoustique et des dommages causés par la contrainte, recherche fondamentale sur la signature spectrale des divers mécanismes et analyse des signaux.
- Hydro-Québec : étude par méthode acoustique des flèches en fibre de verre sur les camions d'Hydro-Québec.
- Ministère de la Défense (Les Arsenaux Canadiens Ltée) : mise au point de composites adéquats pour les enveloppes des munitions.

Toronto

Département de génie mécanique :

Des travaux sur les composites ont été menés à petite échelle au cours des quatre ou cinq dernières années. Ils ont pour objet le carbone et le Kevlar dans des matrices époxydes, l'étude de la tenue à la rupture de ce système par des essais non destructifs.

Institute of Aerospace Studies : les travaux en cours comprennent des travaux sur la corrosion relativement au bras spatial; les effets de l'espace sur les composites; l'effet corrosif des fluctuations vacuothermique de l'oxygène atomique. L'université met au point des spécimens de rupture et de fatigue pour les chasseurs F-18 et effectue des travaux de conception de joints pour le Communications Research Centre. Elle élabore également des composites pour des mémoires à supra-conducteurs et elle crée, pour la NASA, des spécimens de résistance pour la fabrication d'avions. Des compositions à moulage de fibres coupées-tissus renforcés ont été mises au point pour des utilisations dans le domaine de l'automobile. Aucune élaboration de matériaux n'est effectuée, mais des structures sont conçues, et on procède à la modélisation analytique et à la simulation spatiale.

Département de génie chimique :

Les travaux en cours ont pour objet l'amélioration des composites à fibres graphites et des polymères ultra-étirés.

Le Canada possède l'infrastructure industrielle pour produire des composites à matrice polymère. Le marché national pour les pièces d'avions est limité et son expansion dépend uniquement de la diffusion de la technologie dans d'autres marchés, comme celui de l'équipement sportif, et de l'amélioration de l'ouverture aux marchés extérieurs, principalement celui des États-Unis.

7.2 Les composites à matrice métallique

Au Canada, l'actuelle activité de R-D dans le secteur des composites à matrice métallique se limite à un noyau de chercheurs dans les universités, les industries et le gouvernement. Voici quelques-uns des facteurs qui sont à l'origine du peu de recherches effectuées sur ces composites au Canada. A l'heure actuelle, il n'y a encore aucune organisation professionnelle pour cette technologie, et comme les États-Unis en restreignent l'exportation, l'information qui lui est reliée est impossible à obtenir. De plus, les échanges de connaissances techniques sur ce sujet, même à l'intérieur du pays, se font très difficilement puisque les procédés de fabrication des composites à matrice métallique sont la propriété de compagnies privées.

Aucune université importante au Canada n'a lancé de programme à grande échelle sur les composites à matrice métallique, quoiqu'un bon nombre d'universités aient manifesté de l'intérêt dans ce sens là (voir le tableau V). Les principaux composites à matrice métallique qui font l'objet de recherches à l'Université de la Colombie-Britannique et à l'Université McMaster sont le SiC-aluminium et l'alumine-aluminium. L'Université de Waterloo, par ailleurs, poursuit des recherches sur le composite carbone-aluminium. L'unique source possible de subventions gouvernementales dans ce domaine de recherches provient du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNGC), mais les montants alloués sont presque insignifiants. Les universités intéressées dans la recherche sur les composites à matrice métallique prennent elles-mêmes en charge les frais des travaux, alors que d'autres n'envisageraient d'entreprendre une recherche sur le sujet que si elles étaient subventionnées.

TABLEAU V

Universités canadiennes engagées dans la R-D sur les composites à matrice métallique et celles ayant manifesté un intérêt pour le domaine

Université de la Colombie-Britannique
Université de Waterloo
Université Queen's
Université McMaster
Université d'Ottawa
Technical University of Nova Scotia
Université de Windsor

Une situation semblable à celles des universités prévaut dans les laboratoires gouvernementaux ou au sein des organismes à but non lucratif : aucun programme à grande échelle sur les composites à matrice métallique n'est en cours. Les programmes sur les composites à matrice métallique entrepris dans le passé étaient surtout orientés sur des produits et la recherche menée sur ces composites est de nature théorique. A un moment donné, le Conseil national de

recherches du Canada (CNRC) a travaillé en collaboration avec la compagnie Westinghouse Canada sur les composites à matrice métallique dans le but de les utiliser dans les turbines à gaz; son champ d'intérêt actuel se porte sur la combinaison graphite-aluminium. L'Institut de génie des matériaux effectue une recherche sur les composites à matrice métallique réalisés à l'aide de la métallurgie des poudres.

Énergie, Mines et Ressources Canada (EMRC) a exécuté des travaux sur les composites à matrice métallique il y a environ dix ans, mais il n'y a actuellement aucun travail en cours sur ces matériaux. Cependant, EMRC a de nouveau manifesté de l'intérêt pour ce domaine à la suite de l'engagement résolu des États-Unis dans cette technologie. L'Ontario Research Foundation (ORF) met actuellement au point une technique de fabrication des composites à matrice métallique dans le cadre d'un programme maison. Le savoir-faire technique qui en découlera devrait servir à inciter l'industrie canadienne à utiliser les composites à matrice métallique et à leur fournir l'aide nécessaire pour ce faire.

Au Centre de recherche pour la défense Pacifique (CRDP), on mène des programmes d'essais exclusivement sur les composites à matrice polymère. Par ailleurs, le Centre de recherche pour la défense Valcartier (CRDV) a manifesté de l'intérêt dans la mise au point des composites à matrice métallique.

Aux États-Unis et au Japon, il est possible de classer sommairement en deux groupes les entreprises engagées dans la R-D sur les composites à matrice métallique. Le premier comprend les fournisseurs de fibres, alors que le second est composé des fabricants de composites à matrice métallique et des utilisateurs du produit fini. Au Canada, il n'y a pas de fournisseur de fibres, ni de fabricant, ni d'utilisateur de composites à matrice métallique. Alcan est un des quelques éventuels futurs fabricants de composites à matrice métallique qui effectuent actuellement de la R-D dans ce secteur.

La position des éventuels utilisateurs de composites à matrice métallique face à cette technologie est complètement différente. Dans l'industrie de l'aérospatiale, des compagnies comme Canadian Astronautic Limited (CAL), Fleet Industries, Bristol Aerospace Ltd. et Applied Space Mechanics Communications ont démontré un vif intérêt à utiliser cette technologie pour leurs produits. Cependant, elles estiment qu'il ne serait pas rentable de lancer, à leurs frais, un programme de développement des composites à matrice métallique. Ainsi, beaucoup plus de programmes de R-D seraient entrepris si une aide gouvernementale était accordée, comme celle dont bénéficient les compagnies américaines.

La réaction de l'industrie de l'automobile a été presque identique à celle de l'industrie de l'aérospatiale; elle dit mal connaître les composites à matrice métallique mais se montre intéressée par cette

technologie. Une fois de plus, aucune entreprise n'ose s'aventurer pour entreprendre de la R-D dans ce domaine.

On estime que l'utilisation des composites à matrice métallique dans d'autres secteurs, comme ceux des semi-conducteurs et de l'équipement de loisir, est relativement récente, même aux États-Unis et au Japon; il n'est donc pas étonnant qu'aucun programme de ce genre n'existe au Canada.

Actuellement, les composites à matrice métallique ne sont utilisés que de façon limitée dans le secteur commercial; on les retrouve surtout dans les secteurs de l'aérospatiale et militaire. Toutefois, si l'on en juge par la quantité des travaux de R-D en cours, cette technologie fera son entrée sur beaucoup plus de marchés généraux, comme ceux des pièces automobiles et de l'équipement sportif. Malheureusement, l'engagement canadien dans ce secteur de la technologie des matériaux est minime et insuffisant pour miser sur les possibilités de commercialisation de cette technologie naissante. Puisque les États-Unis contrôlent et limitent le transfert de la technologie de composites à matrice métallique, les fabricants canadiens devraient se tourner vers le Japon pour ce transfert technologique ou vers la technologie canadienne en cours de développement.

7.3 Les composites à matrice céramique

Au Canada, les activités de recherche et de développement dans le domaine de la technologie des composites à matrice céramique n'en sont qu'à l'état embryonnaire. Ni le gouvernement, ni l'industrie ne semblent avoir mené des travaux d'une certaine envergure sur cette technologie. Dans l'état actuel des choses, le Canada est peut-être de cinq à dix ans en retard sur les principaux intervenants, c'est-à-dire les États-Unis et le Japon, autant en ce qui concerne ses réalisations concrètes que ses capacités technologiques. Cette évaluation ne tient pas compte de l'énorme écart entre la capacité industrielle du Canada et celle de ces deux pays.

Actuellement, un petit nombre d'organisations canadiennes poursuivent de la R-D sur les composites à matrice céramique, surtout dans le domaine des céramiques renforcées de macroparticules. La R-D est de faible impact et habituellement de nature scientifique. En outre, il n'y a pas réellement de coordination entre les activités, car les organisations collaborent entre elles seulement sur la base de travaux précis, ou travaillent individuellement à l'amélioration de leur capacité interne pour satisfaire leurs besoins spécifiques respectifs. Les programmes de R-D subventionnés par le gouvernement dans le domaine des céramiques de pointe en sont tous à leurs débuts, et l'accent n'est pas mis sur les composites à matrice céramique.

Parmi ces programmes, on peut citer en exemple celui des céramiques pour les moteurs, qui est sous la tutelle du ministère de la Défense nationale et du Conseil national de recherches du Canada.

Une liste des organisations canadiennes dans les secteurs gouvernementaux industriels et des organismes de recherche effectuant des travaux relatifs aux composites à matrice céramique est présentée au tableau VI. Il faut noter que les efforts ne sont généralement pas intenses, même selon les normes nationales. Parmi toutes les organisations gouvernementales, industrielles et universitaires échantillonnées dans cette étude, seules celles qui apparaissent sur la liste effectuent des travaux sur les composites à matrice céramique. De plus, on ne connaît qu'une compagnie, Alcan International Ltée, qui ait mené des travaux maison importants au cours des quatre dernières années. La compagnie Electrofuel Manufacturing Co. a travaillé pendant un an environ à un projet de R-D, subventionné par le gouvernement, sur les composites à fibres de nitrure de bore, alors que B.M. Hi-Tech, bénéficiant également de l'aide gouvernementale, s'est engagée dans la mise au point de composites céramiques-polymères piézo-électriques.

TABLEAU VI

R-D SUR LA TECHNOLOGIE DES COMPOSITES A MATRICE CÉRAMIQUE AU CANADA

Laboratoires gouvernementaux

Centre de recherche pour la défense Pacifique, Victoria (C.-B.)	Essais non destructifs
Conseil national de recherches Division du génie mécanique Ottawa (Ontario)	Céramiques pour moteurs (céramiques à base de zirconia)
Conseil national de recherches Centre de l'aéronautique Ottawa (Ontario)	Essais non destructifs de composites de pointe
Conseil national de recherches Laboratoires de recherche de l'Atlantique Halifax (Nouvelle-Écosse)	Céramiques à base d'alumine
Conseil national de recherches Institut de génie des matériaux Boucherville (Québec)	Essais non destructifs de céramiques et composites piézo-électriques

Universités et organismes de recherche provinciaux

Université McMaster Hamilton (Ontario)	Céramiques renforcées à base d'oxydes, évaluation des propriétés
---	---

Université de Toronto Toronto (Ontario)	Technologie des fibres
Ontario Research Foundation Mississauga (Ontario)	Composites $Al_2O_3-ZrO_2$ verre renforcé de fibres longues et céramiques de verre
Nova Scotia Research Foundation Halifax (Nouvelle-Écosse)	$Al_2O_3-ZrO_2$

Compagnies

Electrofuel Manufacturing Co. Toronto (Ontario)	Composites de fibres de nitrure de bore
Home Technics Ltd. Peterborough (Ontario)	Céramiques à base de ZrO_2O_3
Alcan International Ltée Kingston (Ontario)	Composites à matrice alumine et autres composites à matrice céramique
B.M. High Tech. Inc. Collingwood (Ontario)	Composites piézo-électriques
Almax Industries (1980) Ltd. Lindsay (Ontario)	Composites à macroparticules, composites piézo-électriques

Jusqu'à maintenant, il y a peu de produits à base de composites à matrice céramique sur le marché canadien, et ils sont tous importés pour être utilisés dans la fabrication d'outils de coupe et dans l'électronique.

7.4 Les composites carbone-carbone

A l'exception d'un petit programme de R-D lancé tout dernièrement par l'Ontario Research Foundation (ORF), il n'existe aucun autre programme de R-D ou de fabrication dans ce domaine. Le marché actuel pour les composites carbone-carbone est assez limité et consiste principalement de pièces pour les freins d'avions et pour les fusées. Toutefois, il existe des débouchés dans d'autres domaines comme ceux des prothèses et des pièces de moteurs d'avion. Actuellement, on ne dispose d'aucune technologie canadienne pour exploiter ces possibilités. Puisque la plupart des travaux effectués dans ce domaine aux États-Unis et au Japon sont soit la propriété d'entreprises privées, soit confidentiels, l'information est très limitée.

8. PROBLÈMES AU CANADA

Certains obstacles empêchent les composites de pointe de progresser; en voici quelques-uns :

- la mentalité de filiale;
- l'accès au savoir-faire : l'information relative aux nouveaux matériaux est souvent contrôlée et limitée, habituellement pour des raisons stratégiques;
- l'absence de prise de conscience de la part des gens d'affaires;
- la R-D est fragmentée et on manque d'information à son sujet. Les contacts entre l'industrie et les universités sont insuffisants;
- le marché national est restreint : par exemple, le marché canadien global pour les produits préimprégnés n'est que de 1 million de dollars par année. Aucune initiative n'est prise pour pénétrer de nouveaux marchés ou pour élaborer une stratégie nationale. Le Canada a traditionnellement exporté des matières premières, état de chose qui a tendance à décourager l'innovation, spécialement dans le secteur des matériaux de pointe;
- une pénurie d'entrepreneurs innovateurs et de stimulants financiers à l'innovation;
- l'introduction de nouveaux matériaux dans certaines industries (p. ex., l'aérospatiale) est très onéreuse, car ces secteurs ont des exigences très strictes;
- le nombre limité d'employés qualifiés dû à l'actuelle pénurie d'emplois*.

La concurrence internationale menée par les États-Unis, le Japon et l'Europe de l'Ouest est intense. Les États-Unis et le Japon sont devenus les chefs de file dans la technologie des composites et il est à prévoir qu'ils maintiendront cette position en investissant d'énormes ressources, que ce soit des ressources humaines ou de gros montants d'argent destinés à la R-D. Des programmes nationaux très importants sont mis sur pied aux États-Unis et au Japon, ce qui contribue à augmenter l'écart technologique entre ces pays et le Canada.

L'aspect positif de la situation est que le Canada possède une industrie des composites à matrice polymère bien implantée, dont la production, en 1985, a été approximativement de 64 millions de kilogrammes. L'expérience acquise dans cette industrie pourrait être mise à profit dans le traitement des composites de pointe. Les industries des grosses pièces automobiles et aérospatiales pourraient, si elles étaient encouragées adéquatement, donner un élan considérable au marché.

Grâce à l'expansion rapide de la technologie et des utilisations des matériaux composites perfectionnés, il est possible pour de nouvelles entreprises de s'implanter. Un certain nombre de domaines peuvent être cités en exemple :

* Tiré de Advanced Materials : A National Opportunity, Plastics Business, janvier-février 1986.

L'aérospatiale. C'est le domaine le plus prometteur pour les composites de pointe. Puisque le marché canadien est restreint, on devrait exploiter les débouchés aux États-Unis et en Europe. Selon le déroulement des événements, ce secteur pourrait être le catalyseur à l'origine de la commercialisation des composites de pointe.

Sports et loisirs. Voici un domaine où des produits à hautes performances peuvent être mis en marché à prix d'or. Le Canada jouit d'une bonne crédibilité sur ce marché et l'utilisation de composites de pointe faciliterait encore plus la pénétration des produits canadiens sur les marchés mondiaux.

Pièces de machinerie. Il existe un marché pour les pièces faites de composites à hautes performances pour l'équipement spécialisé (p. ex., l'équipement à haute vitesse). L'industrie canadienne de la machinerie industrielle devrait être encouragée à explorer les possibilités des composites de pointe dans ce domaine.

Renforts. A l'heure actuelle, il n'existe aucun fabricant canadien de matières de renforcement pour les composites de pointe. Puisque les marchés pour les fibres graphites (notamment les fibres à bon marché et à base de brai) se développent, il est possible pour le Canada d'entrer sur ce marché.

Produits " créneaux ". Des pièces composites peuvent trouver à se loger dans différents créneaux commerciaux. A titre d'exemple, les matériaux composites pourraient concurrencer avec succès les produits actuellement utilisés dans la fabrication de prothèses. Ils pourraient également être mis à profit pour les bouts renforcés des bottes de sécurité. Dans ce cas-ci, les composites de pointe viendraient remplacer un matériau, ayant l'avantage, comparativement aux produits d'acier moins coûteux, d'être plus légers, plus résistants et non magnétiques. Afin d'exploiter ces débouchés, il serait nécessaire de mieux informer les milieux d'affaires et techniques sur ces nouveaux matériaux.

Automobile. Le Canada a une industrie automobile fort développée. Différents composites de pointe (notamment les composites métal-métal) pourraient être utilisés pour remplacer les matériaux actuellement utilisés, ce qui augmenterait le rendement des pièces. L'utilisation des composites de pointe dans les automobiles est toutefois limitée car le prix des matériaux et de la fabrication est relativement élevé. Cependant, même les plus petites pièces constituent de bons débouchés pour un produit à si gros volume.

On devrait probablement considérer les composites à matrice céramique comme faisant partie de la technologie moderne des céramiques. Il est impossible d'imaginer l'expansion des composites à matrice céramique sans avoir au préalable mis au point une technologie pour les céramiques de pointe. Il est donc nécessaire, avant tout, d'encourager le progrès dans ce domaine, les composites à matrice céramique ne venant qu'en second lieu pour l'instant.

Au Canada, on a reconnu de toute évidence que le développement de la technologie des composites à matrice métallique aurait un impact marqué sur la structure industrielle du pays et sur son économie, malgré les obstacles qui doivent être surmontés. Le succès dans ce domaine exigerait la mise au point de technologies connexes comme celle de la production de fibres, de la fabrication des composites à matrice métallique, de l'assemblage, de l'usinage et de la conception. La croissance de l'industrie de ces composites, en introduisant la technologie de fabrication des composites à matrice métallique au Canada, entraîne donc la croissance de bien des industries connexes. Ceci rajeunira certainement l'actuelle industrie des matériaux et suscitera automatiquement l'expansion d'un bon nombre d'industries périphériques. Si l'on en juge par les industries actuellement en expansion au Canada, les secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale et des semi-conducteurs par exemple, la technologie des composites à matrice métallique a déjà prouvé qu'elle pouvait être profitable pour certaines utilisations.

Il en résulte que ce marché éventuel pourrait à lui seul justifier l'introduction de la technologie des composites à matrice métallique au Canada. De plus, les utilisations de ces composites ne sont pas limitées aux secteurs précités. Les possibilités d'utiliser ces matériaux dans les domaines des loisirs, de la communication et même du pétrole et du gaz, ont été démontrées aux États-Unis, au Japon et dans les pays européens.

Au Canada, même si l'utilisation des composites à matrice métallique dans les grandes industries de l'automobile, du pétrole, du gaz et de l'aérospatiale ne s'est pas encore concrétisée, l'existence de ces industries est une bonne indication de l'énorme potentiel du marché pour cette technologie.

Le prix actuel des composites carbone-carbone étant si élevé, il est évident qu'ils n'ont qu'une faible valeur commerciale. Cette situation pourrait bientôt changer car d'importants programmes de R-D sont en cours aux États-Unis et au Japon. Si le prix de revient de la fabrication était diminué, les freins en composite de carbone remplaceraient peut-être les freins en amiante. Un autre débouché serait l'utilisation de ces composites pour les prothèses, car en fait, ils devraient avoir un meilleur rendement que les actuels appareils en métal.

Puisque la majorité des travaux effectués aux États-Unis sur les composites de carbone-carbone sont confidentiels, l'unique moyen pour le Canada de pénétrer ce marché serait d'effectuer des recherches qui seraient subventionnées par le gouvernement.

Les matériaux composites de pointe se substituent de plus en plus aux matériaux classiques dans une grande variété de domaines. Au Canada, les industries des pièces automobiles, de l'aérospatiale et de l'équipement sportif sont très bien implantées; elles constituent automatiquement des marchés pour les composites de pointe. L'industrie canadienne des composites courants est bien rodée et technologiquement apte. Les

compétences techniques et industrielles dans le domaine des composites à matrice polymère de pointe, bien qu'un peu limitées pour l'instant, pourraient servir d'assises à la nouvelle industrie. Les nouvelles technologies représentent à la fois une menace et une ouverture. Elles sont une menace parce que les produits qui ne seront pas fabriqués avec les nouveaux matériaux ne seront plus en mesure de concurrencer les marchés mondiaux. Mais, par contre, elles permettent de participer au développement rapide de cette technologie et ainsi d'avoir accès aux nouveaux marchés que celle-ci génère.

