

L'industrie française des matériaux composites



*Des enjeux prioritaires
pour un développement durable*

L'industrie française des matériaux composites

Etude stratégique réalisée par

NODAL CONSULTANTS

pour le compte de la DiGITIP / SIM



Rapport final

Louis Berreur
Bertrand de Maillard
Stanislas Nösperger

Rév. 2 du 13 mai 2002
17 décembre 2001

AVANT-PROPOS

Au cours de ces dernières années, l'industrie française de la transformation des matériaux composites a bénéficié d'une croissance rapide et régulière, soutenue en particulier par la diversité des applications.

Pour contribuer à maintenir la croissance de cette industrie et alimenter la réflexion des acteurs industriels, la Direction Générale de l'Industrie, des Technologies de l'Information et des Postes (DiGITIP) du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie a réalisé cette étude stratégique sur "*l'industrie française des matériaux composites – des enjeux prioritaires pour un développement durable*".

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

Cependant, pour faire valoir ces atouts et atteindre ses objectifs, l'industrie des matériaux composites doit mieux intégrer dans sa stratégie de croissance la composante environnementale du développement durable. Les évolutions réglementaires en termes de recyclabilité et d'hygiène et sécurité constituent également des enjeux forts que cette industrie doit relever pour maintenir sa croissance.

Les directives européennes en vigueur et les projets discutés actuellement encouragent d'ailleurs la mise en place d'actions collectives volontaires de la part des différents secteurs ou filières industrielles, pour maîtriser l'impact environnemental des produits tout au long de leur cycle de vie. Le secteur des matériaux composites, comme les autres, est concerné par ces mesures.

Avec l'ensemble des acteurs de la filière, relevons le défi et faisons que la compétitivité des entreprises en sorte renforcée.

Jeanne SEYVET

Directrice Générale de l'Industrie,
des Technologies de l'Information et des Postes

SOMMAIRE

Chapitre 1 Objectifs & Contexte	7
1 Les composites, outil de créativité et de compétitivité	8
2 Exemples de secteurs d'application des composites	9
2.1 Construction aéronautique	9
2.2 Construction automobile.....	9
2.3 Secteur du bâtiment	10
2.4 Loisirs et sports.....	10
2.5 Exemples d'autres domaines d'utilisation des composites	10
3 Importance stratégique du secteur des composites.....	11
4 Objectifs de l'étude	11
4.1 Champ d'application de l'étude.....	11
4.2 Le secteur français des matériaux composites	12
5 Déroulement pratique de l'étude.....	13
Chapitre 2 Matériaux & Technologies.....	15
1 Définitions.....	16
2 Matériaux.....	17
2.1 Renforts.....	17
2.2 Matrices	22
2.3 Semi-Produits	25
3 Technologies de transformation	26
3.1 Principaux procédés utilisés en France	26
3.2 Acteurs français de la transformation des composites.....	27
3.3 Technologies manuelles de transformation	29
3.4 Procédés de transformation par moulage.....	30
3.5 Procédé de transformation en continu.....	35
3.6 Procédés de fabrication des formes de révolution	36
3.7 Procédés innovants	38
3.8 Répartition des procédés de transformation.....	39
Chapitre 3 Analyse fonctionnelle et applications.....	42
1 Analyse des fonctions	43
1.1 Classification des applications par fonction	43
1.2 Classification des fonctions par objectif	44
2 Fonctions spécifiques de chaque application	45
2.1 Fonctions apportées par les matériaux composites	45
2.2 Une exploitation inégale des fonctions des composites suivant les secteurs.....	47
2.3 Une obligation d'atouts différenciateurs	47
2.4 Des exigences variées suivant les secteurs d'applications	48
2.5 Aperçu sur les enjeux des marchés d'application.....	51
3 Les marchés d'application des composites	52
3.1 Les composites dans l'aéronautique.....	52
3.2 Les composites et l'automobile	54

3.3	Les composites dans le ferroviaire.....	56
3.4	Les composites dans la construction civile.....	58
3.5	Les composites et la construction industrielle	59
3.6	Les composites et la construction nautique	61
3.7	Les composites dans le secteur médical.....	63
3.8	Les composites dans les équipements de sports et loisirs.....	64
3.9	Les composites et la construction électrique	65
Chapitre 4 R&D et savoir-faire Technologique français		67
1	Place de la France dans la Recherche.....	68
1.1	Place de la France dans le domaine des brevets	68
1.2	Place de la France dans les programmes de recherche européens	71
2	R&D et savoir-faire technologiques français	73
2.1	Les centres de recherche français	73
2.2	Coopération industrie/centres de recherche dans la filière composite.....	74
2.3	Protection des innovations françaises	74
3	Positionnement de la France	75
3.1	L'offre française de matières premières.....	75
3.2	Evaluation qualitative de l'offre française	76
3.3	Maîtrise des procédés.....	77
Chapitre 5 Marchés.....		79
1	Marché des matières premières.....	80
1.1	Aperçu du marché mondial des composites.....	80
1.2	Répartition par marchés d'application.....	80
1.3	La production des composites en Europe	81
1.4	Disparité des poids relatifs des marchés d'application.....	82
2	Estimation du marché des composites	84
2.1	Estimation des prix de vente des composites par secteurs d'application	84
2.2	Marchés en valeur des matériaux composites en Europe	85
3	Particularités du marché français	86
3.1	Le marché des matières premières.....	86
3.2	Valeur ajoutée du marché des composites GD	87
3.3	Répartition du marché français des composites par technologie de transformation	87
Chapitre 6 Défis & Opportunités		90
1	Enjeux des matériaux composites.....	91
2	Defis sur l'industrie des composites.....	92
2.1	Limitation de l'exposition aux émissions de styrène.....	92
2.2	La législation sur l'obligation de recycler les composites.....	97
3	Difficultés posées aux concepteurs	99
3.1	La prise en compte de la spécificité des composites.....	99
3.2	Nécessité de développer des outils de simulation.....	100
3.3	Choix entre cadences de production et propriétés mécaniques.....	100
Chapitre 7 Recommandations.....		103
1	Appui à la filière des composites.....	104
1.1	Différents types d'actions en fonction de leur objectif.....	104
1.2	Choix des appuis au développement de la filière.....	104

Sommaire

2	Solutions aux défis industriels posés par les composites.....	106
2.1	Programme de développement du recyclage	106
2.2	Sensibilisation à la mise en conformité des installations.....	107
3	Développement et perfectionnement de procédés-innovants	108
3.1	Appui au développement de l'estampage TRE.....	108
3.2	Développer la pultrusion dans le secteur du bâtiment	108
4	Diffusion de l'approche composites.....	109
4.1	Promouvoir l'utilisation des composites dans le bâtiment.....	109
4.2	Former les concepteurs à l'analyse fonctionnelle.....	110
5	Inciter les acteurs à s'impliquer dans la résolution des problèmes de la filière.....	111
5.1	Inciter les PMI à participer à des programmes de R&D.....	111
5.2	Associer les fournisseurs de matières premières à la R&D	111
5.3	Développer des outils de caractérisation.....	112
5.4	Renforcer les organismes professionnels.....	113
Annexes	114
	Annexe 1 : Composition du Comité de pilotage.....	115
	Annexe 2 : Brevets déposés par pays et par thèmes de 1998 à 2000.....	116
	Annexe 3 : Listes des acteurs contactés	117
	Annexe 4 : Réseaux de Bragg	127
	Annexe 5 : Glossaire.....	128

CHAPITRE 1
OBJECTIFS & CONTEXTE

1 LES COMPOSITES, OUTIL DE CREATIVITE ET DE COMPETITIVITE

Les matériaux composites (à matrices métalliques, élastomères, polymères ou céramiques) offrent aux industriels et aux designers des possibilités nouvelles d'associer fonction, forme et matériaux, au sein de réalisations, matériaux, systèmes de plus en plus performants. Poids, anisotropie, plurifonctionnalité sont autant d'atouts de principe. Des processus nouveaux de conception, d'industrialisation et de fabrication permettent d'étendre les possibilités techniques, et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids, fonctions...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement.

La compétition reste très dure entre les solutions composites et les matériaux classiques, disposant d'une avance considérable en termes d'expérience et d'investissement chez les producteurs et les utilisateurs. Les contraintes de productivité sont transmises par les donneurs d'ordre et amplifiées vers les fournisseurs. A l'occasion de chaque décision industrielle ou normative, une classe de composants ou de systèmes peut apparaître ou disparaître.

La forte valeur ajoutée de ces réalisations, leurs exigences en termes d'équipements et de compétences de haut niveau, leur confèrent un rôle croissant dans la recherche de différenciation et de compétitivité, clé du succès des industriels des économies occidentales. L'innovation apparaît comme un facteur déterminant du succès durable des entreprises, même si elle ne suffit pas à justifier auprès du consommateur une augmentation significative des prix de vente. L'innovation n'est cependant souvent accessible, dans le secteur des composites comme dans d'autres, qu'aux entreprises capables de supporter des investissements de recherche, de développement et d'industrialisation de plus en plus lourds.

Les aspects financiers sont de plus en plus importants : l'industrie des composites est en effet fortement capitalistique ; d'importants investissements (R&D, pré-série, équipements industriels...) sont nécessaires avant de pouvoir réaliser un chiffre d'affaires significatif. Une entreprise doit pouvoir offrir à ses actionnaires et à ses partenaires financiers une rentabilité et une transparence compétitives.

L'internationalisation des marchés des matériaux de haute technologie est aujourd'hui accélérée par l'impact des groupements de constructeurs et de fournisseurs – par ailleurs concurrents – qui développent des places de marché virtuelles, portails d'achat sur Internet élargissant les sources de pièces et de composants à de nombreux fournisseurs et favorisant la comparabilité technique (partage de fichiers de CAO) et commerciale. Le risque de marginalisation pour les entreprises qui en sont absentes, ou qui ne proposent pas de produits suffisamment différenciant, est potentiellement important.

La question des ressources humaines spécialisées et qualifiées, indispensable à la pérennité d'une spécialité technologique nationale est également à traiter. De nombreuses entreprises et centres de recherche ne trouvent plus assez de jeunes ingénieurs brillants (y compris sortant des options les plus technologiques des Ecoles des Mines, Sup. Aéro., ENSMA...) ou docteurs, ayant consenti personnellement à développer une compétence technique moins attractive que les nouvelles technologies de l'Information et de la communication.

2 EXEMPLES DE SECTEURS D'APPLICATION DES COMPOSITES

2.1 Construction aéronautique

Les composites de haute performance ont été longtemps confinés dans l'aéronautique civile à des pièces de structure secondaire (habillage intérieur, volets), plus rarement primaire et jamais à la voilure, car il se posait deux difficultés :

- des coûts élevés par rapport à l'aluminium,
- des risques de délaminage les interdisant de vol sur les structures aérodynamiques chargées.

Certains obstacles à l'utilisation massive des composites sont progressivement levés, en particulier par des acteurs étrangers, par exemple :

- dans le cadre du programme *Advanced Composite Technology* mené par la NASA et Boeing, mise au point d'un nouveau procédé permettant de développer des ailes en composites 20% moins chers qu'avec des matériaux conventionnels,
- développement de composites à mémoire de forme mené par British Aerospace et Daimler Benz,
- décision d'Airbus d'équiper les fuseaux de ses futurs A380 en technologie composite dite « glare »...

La place future de l'aéronautique militaire française (Dassault, consortium Eurocopter) au sein de l'industrie militaire de défense européenne (EADS) dépend fortement de notre capacité à proposer un leadership durable dans des technologies critiques, en particulier les matériaux.

Il est donc important d'amener les transformateurs de composites dynamiques français (Composites Aquitaine, Vetrotex...) à profiter de l'intérêt du secteur pour ces nouvelles solutions.

2.2 Construction automobile

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, comme le montrent les décisions récentes de grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) de développer des coffres et hayons. Les composites à matrice thermoplastique sont, par contre, de plus en plus fréquents.

Les entreprises françaises de transformations de composites, notamment les deux leaders du marché de l'équipement automobile - Inoplast et Matra Automobile - devront profiter du rattrapage probable de l'Europe sur les Etats-Unis dans l'utilisation des composites dans l'automobile (estimée globalement à 113 kg par voiture aux Etats Unis contre 30 kg en Europe).

Pour industrialiser les procédés afin de satisfaire la forte demande prévue dans l'automobile, le développement prévu des thermoplastiques renforcés de fibres longues notamment, les divers transformateurs français, PME pour la plupart, se sont alliés à des partenaires plus gros (Inoplast-Plastic Omnium). Ils ont été imités par leurs concurrents étrangers (Menzolit Fibron). Le groupe français Hutchinson est un co-leader européen des systèmes de transfert de fluides à paroi composites (élastomères et polymères).

L'existence de deux constructeurs français est un atout pour le secteur domestique des composites dont certains des éléments peuvent bénéficier de l'implantation internationale des constructeurs.

Objectifs & contexte de l'étude

Il est important d'anticiper sur les procédés et les technologies susceptibles de correspondre aux exigences des constructeurs, et orienter les structures de recherche ou de transfert publiques (Cetim, Critt) ou privés (Cray Valley, Sora, Inoplast).

2.3 Secteur du bâtiment

Mis à part la fourniture de renforcement des structures en béton, les composites ont relativement peu pénétré le secteur du BTP, notamment du fait :

- d'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels (35 F/kg contre 18 F/kg pour l'acier et 6 F/kg pour le bois),
- d'une relative méconnaissance des architectes et bureaux d'études vis-à-vis des composites,
- d'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité).

Les qualités des composites (légèreté, résistance au feu, résistance mécanique et chimique, possibilité de créativité) sont cependant extrêmement prometteuses. Les fournisseurs de solutions composites (Acome, Uniject, Gimm Menuiseries, Owens Corning, etc.) ont développé de nombreux produits présentés au salon JEC d'avril 2000 : fenêtres, portes, substituts d'ardoise, renforts de poutres, etc.

Dans ce secteur également, l'origine française de leaders mondiaux du BTP (Bouygues, Vinci, etc.) est un atout fort pour le développement commercial des technologies composites.

2.4 Loisirs et sports

Les constructeurs de matériels de sport et loisirs ont depuis longtemps adopté les composites, développés notamment par Shappe Technique et Ems Chimie (Suisse) ; ces nouveaux matériaux leur ont permis de faire preuve d'une grande créativité, tout en présentant des propriétés mécaniques intéressantes qui ont, dans une large mesure, été à l'origine du développement récent des sports de glisse modernes. C'est précisément en utilisant des nouveaux matériaux (skis moulés et non stratifiés) que Salomon est devenu co-leader mondial du matériel de ski, aux côtés d'un autre français Rossignol.

Le leader mondial de la plaisance, le français Beneteau-Jeanneau, a su résoudre le problème de l'osmose, qui dégradait les premières coques composites à matrice organique, en améliorant encore ces matériaux.

L'environnement présente également un fort potentiel de débouchés pour les composites à matrices organiques, comme le démontrent les initiatives récentes du Pôle de plasturgie de l'Est ou du SIAAP (Syndicat Interdépartementale pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne) de développer des matériaux composites pour leur équipement de traitement des eaux.

2.5 Exemples d'autres domaines d'utilisation des composites

Les **matériels ferroviaires** présentent de nombreuses possibilités d'utilisation pour les matériaux composites, comme le montrent :

- les développements récents de l'entreprise allemande d'équipements de trains pendulaires, Comtas (Allemagne), secteur d'excellence où les acteurs européens font maintenant front commun,
- le projet de Bombardier-ANF de réaliser des wagons en structure composite.

Objectifs & contexte de l'étude

L'**équipement industriel** (boîtes de stockage, isolation) et l'**équipement électronique**, représentent déjà 26% du marché des composites à matrice organique. Le potentiel pluri-fonctionnel des composites (alliant par exemple étanchéité et propriétés électriques) y est important. En **électronique**, les boîtiers céramiques pour microprocesseurs d'Egide, récemment introduite au Nouveau Marché, sont utilisées dans le monde entier.

Les composites jouent un rôle croissant dans le **secteur dentaire** (implants) et **biomédical** (matériaux prothétiques), en dépit de fortes contraintes de bio-compatibilité.

Pour mémoire, la réalisation d'**instruments de musique** (pianos, clavecins, violons et même accordéons) peut offrir des opportunités de niches prestigieuses, porteuses d'image du savoir-faire de la France.

3 IMPORTANCE STRATEGIQUE DU SECTEUR DES COMPOSITES

Le développement durable d'une filière industrielle majeure est un enjeu national. Ainsi, l'industrie française de la machine outil et de la métrologie, faute d'une vision stratégique du secteur et d'un soutien réel, ont largement disparu. Les industriels français (aéronautique, espace, automobile...) subissent dans ce domaine une dépendance stratégique forte envers leurs concurrents d'Europe, du Japon, des Etats-Unis.

Les matériaux composites sont indispensables aux entreprises industrielles françaises, leaders ou co-leaders à l'échelon mondial, dans les domaines de l'aérospatiale civile (structures d'Airbus), de défense (EADS et à l'intérieur d'EADS, Dassault Aviation), automobile (PSA, Renault, Valeo...), et ferroviaire (Alstom), électricité et électronique.

Le secteur des matériaux composites est donc particulièrement critique pour conserver à la France une part de sa souveraineté économique et technique et sa position de leader technologique en Europe.

Aux côtés des entreprises industrielles, une place nouvelle est à accorder aux entreprises de services connexes à la production (conception, bureaux d'études, essais, prototypage rapide, logiciels de simulation...). La France dispose en particulier de leaders mondiaux dans le domaine des logiciels de conception assistée par ordinateur (Dassault Systèmes) et de simulation de produits et de processus (Matra DataVision, ESI Group pour la simulation). Ces produits logiciels sont autant de vecteurs privilégiés de la diffusion mondiale des technologies composites et de leur potentiel en termes d'innovation et de designs à succès.

4 OBJECTIFS DE L'ETUDE

4.1 Champ d'application de l'étude

Le champ d'application retenu pour l'étude ne concerne que les matériaux constitués par l'intime association de deux composants :

- *une matrice organique (résine),*
- *des renforts constitués de fibres de toutes natures.*

Objectifs & contexte de l'étude

Dans le secteur des composites, crucial pour de nombreuses industries stratégiques françaises et européennes, l'étude présente :

- les grandes évolutions du marché des composites et les segments majeurs,
- le potentiel économique de nouvelles solutions, les facteurs-clés de leur succès ainsi que les attentes des clients,
- les principaux acteurs mondiaux : laboratoires, fournisseurs, consommateurs de ces matériaux et, parmi eux, la place actuelle et potentielle des acteurs français,
- les forces et les atouts des chercheurs et des industriels français face à leur concurrence mondiale.

L'étude prospective des attentes des utilisateurs et des produits et procédés susceptibles d'y répondre, tentera de répondre aux objectifs suivants :

- construction d'un atout compétitif durable, en particulier grâce à des programmes de recherches performants,
- propositions concrètes d'appui ou d'incitation pour pallier aux faiblesses du dispositif national actuel,
- proposition d'intégration à la réflexion en cours sur les technologies clés.

4.2 Le secteur français des matériaux composites

Dans la nomenclature française des activités industrielles, le secteur des composites est actuellement **intégré dans le vaste secteur des matières plastiques (Groupe NAF 25.2 - NACE Rév. 1 25)**. Les études sectorielles existantes ne prennent pas en compte la spécificité des matériaux composites. On notera, par exemple que :

- les entreprises sont souvent des PMI : il n'existe aucun groupe important se consacrant exclusivement à la transformation des composites qui soit, par sa taille, comparable à Plastic Omnium ou Valeo ;
- les technologies de transformation des composites diffèrent notablement des technologies de moulage qui sont principalement utilisées dans la transformation des plastiques (injection) ;
- à l'instar de la métallurgie, l'industrie de la transformation des plastiques concerne essentiellement des mono-matériaux et a peu de relation avec d'autres secteurs industriels tels l'industrie textile qui est indissociable de celle des composites.

Ainsi, la présente étude vise à **délimiter** le secteur français des **composites** et à en dégager les principales caractéristiques :

- les technologies spécifiques aux composites ;
- les atouts des composites par rapport aux matériaux concurrents et leurs principaux secteurs d'application ;
- les principaux **obstacles et menaces** qui risquent de freiner le développement des composites en France et dans le monde ;
- le rôle et l'importance des centres de compétence français dans les technologies des composites face à ceux des pays européens et mondiaux ;
- la place de la France, par la taille du marché et en niveau de savoir-faire, sur le marché mondial des composites.

L'analyse de ces thèmes a permis de proposer un certain nombre de recommandations concernant les principaux **axes d'appui à l'innovation** qui devraient permettre à l'industrie française des matériaux composites de prendre une place significative sur le marché mondial.

5 DEROULEMENT PRATIQUE DE L'ETUDE

Nodal Consultants a réalisé l'étude stratégique des matériaux composites avec l'appui d'un comité de pilotage dirigé par Hervé Chalaye, Digitip/Sim, chargé de mission auprès du sous-directeur matériaux, responsable de l'étude, et réunissant des intervenants institutionnels (Sessi, CNRS, Anvar, CFCE, Drire Aquitaine, DARPMI) ou liés au secteur (GPIC, Mines de Douai)¹.

L'étude stratégique sur le secteur français des matériaux composites a été réalisée en trois phases :

1. recherche documentaire et des brevets pour déterminer la place de la France dans la R&D mondiale ;
2. approche directe de soixante-quinze acteurs de la filière des matériaux composites en France, en Europe, aux Etats Unis et au Japon;
3. synthèse des informations recueillies.

Intervenants de la filière interviewés au cours de l'étude²

Acteurs contactés	France	Europe	Etats Unis	Japon	Total
Fournisseurs du secteur amont (résines, fibres, semi-produits)	2	4	2	5	13
Transformateurs de composites	8	4	3	3	18
Fournisseurs d'équipements de transformation (machines, logiciels)	2	3	2	0	7
Utilisateurs de produits en matériaux composites	10	2	1	2	15
Fédérations professionnelles	3	1	0	0	4
Centres de recherche	6	3	0	2	11
Autres acteurs (transfert de technologie, institutions)	4	1	1	1	7
Total	35	18	9	13	75

Eléments méthodologiques

La méthodologie utilisée pour la réalisation de l'étude est caractérisée par une approche fonctionnelle des besoins. Les résultats de cette analyse ont permis d'orienter le recueil d'informations primaires, par des contact directs avec de nombreux acteurs nationaux et internationaux représentatifs du secteur des composites, permettant l'examen objectif des compétences et les moyens nécessaire pour améliorer l'offre française dans un contexte fortement concurrentiel.

L'analyse fonctionnelle a pour objet de formaliser les systèmes et les composants par les fonctions qu'ils assurent, les contraintes auxquelles ils obéissent et les performances qu'ils atteignent (cahier des charges fonctionnel), sans préjuger des solutions technologiques mises en œuvre. La recherche de solutions est une

¹ La liste des participants du Comité de Pilotage est donnée à l'annexe 1

² La liste des intervenants interrogés au cours de l'étude est données en annexe.

Objectifs & contexte de l'étude

étape ultérieure du processus d'innovation. Cette méthode d'analyse est particulièrement répandue dans l'industrie.

Dans le cadre de l'étude stratégique proposée, les besoins fonctionnels prioritaires des grands secteurs d'applications, actuels ou potentiels, des matériaux composites sont analysés. La capacité des grandes familles de technologies composites à répondre à ces besoins est ensuite évaluée, pour enfin aboutir à l'identification des ressources-clés françaises sur « ces compétences ou technologies-clés ».

Cette méthode a un double avantage : elle permet, à la fois, d'identifier les secteurs potentiellement utilisateurs de composites, dont les besoins fonctionnels pourraient être satisfaits par ces technologies, et les lacunes du système de recherche et développement, et de production français, par la mise en évidence de besoins non satisfaits (identifiés a priori par l'analyse fonctionnelle) ou de compétences absentes du tissu de compétences national.

Consultation directe d'acteurs

La réalisation de l'étude de Nodal Consultants est basée sur le recueil d'informations primaires auprès des acteurs concernés :

- D'abord une sélection segmentée de représentants de la demande en composites : entreprises conceptrices, fabricantes, intégratrices actuelles ou potentielles de composants, pièces et systèmes en matériaux composites, fédérations professionnelles des secteurs d'applications.. Ces entreprises sont amenées à exprimer leur vision prospective des fonctions assurées par les futurs matériaux stratégiques de leur secteur en général, et la position de leur entreprise en particulier sur ses marchés.
- Dans un deuxième temps, l'offre française scientifique et industrielle est plus spécifiquement étudiée et évaluée. Une sélection d'acteurs, de fédérations professionnelles et de partenaires fournisseurs de compétences et de technologies, entreprises, sociétés de recherche sous contrat, laboratoires, structures de transfert, ont été interrogés et leur offre étudiée en fonction des besoins.

Ces deux groupes d'interlocuteurs ont ainsi pu exprimer leur point de vue et leur expérience, d'une façon qui assure l'objectivité des analyses. Par croisement des besoins et des ressources nationales en matière de matériaux composites, l'étude aboutit à l'identification des forces et lacunes du dispositif national et à des recommandations concrètes, pragmatiques, de progression.

Le nombre d'entretiens permet de limiter l'impact individuel d'experts ou de professionnels biaisé du fait d'intérêts personnels ou professionnels particuliers.

Etalonnage international

La difficulté de l'étude stratégique sectorielle est la construction sans biais d'une image fidèle de la position de l'industrie française vis-à-vis de ses compétiteurs européens, américains et, dans une moindre mesure, en ce qui concerne les matériaux composites, japonais.

La publicité d'une étude stratégique pour le gouvernement français auprès d'acteurs majeurs étrangers, souvent fournisseurs de leurs gouvernements dans des secteurs sensibles comme l'aéronautique ou la défense, comporte le risque d'une information au mieux incomplète et biaisée, au pire intentionnellement fautive. Les interventions de personnels des ambassades, PEE, attachés scientifiques etc. sont en général trop transparentes pour de telles études.

Il convient donc de concilier la nécessité d'une information complète avec des contraintes de confidentialité graduées selon les interlocuteurs concernés. Le cabinet chargé d'une telle étude doit fournir les garanties d'indépendance tant vis-à-vis de puissances étrangères que, d'ailleurs, de groupements ou d'entreprises nationales pouvant avoir intérêt à favoriser leurs propres points de vue.

Nodal Consultants a consacré une proportion significative de son travail auprès d'acteurs européens, américains et japonais, dans le respect des objectifs stratégiques de l'étude pour l'industrie Française. Cette part importante de contacts à l'étranger est indispensable à la construction d'un point de vue objectif sur les forces et faiblesses des acteurs nationaux

CHAPITRE 2

MATERIAUX & TECHNOLOGIES¹

¹ Dans ce chapitre 2 – Matériaux & Technologies – de nombreuses données techniques proviennent des différents ouvrages de Maurice Reyne sur les composites. Nodal présente ses remerciements à l’auteur pour lui en avoir laissé l’usage.

1 DEFINITIONS

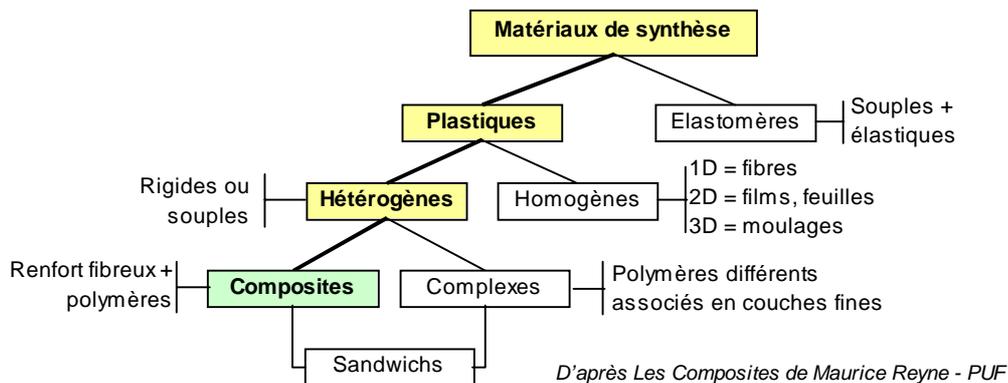
Un matériau composite est, par définition, tout alliage ou matière première comportant un **renfort sous forme filamentaire**. Il nécessite l'association intime d'au moins deux composants : le **renfort** et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, l'**interface**. Contrairement aux matières premières classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise, en même temps, le matériau et le produit.

Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites ; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale.

Les matériaux composites, tels qu'ils sont définis dans le cadre de cette étude, ont été volontairement limités à ceux constitués par :

- une **matrice organique**, résine thermoplastique (**TP**¹) ou thermodurcissable (**TD**),
- une **structure de renfort** constituée de fibres, qui peuvent être de verre, de carbone, d'aramide ou de fibres naturelles (lin, chanvre, sisal),
- ces deux constituants principaux reçoivent des **additifs** ou charges nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice. Ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés² : pigments de coloration, agents anti-UV, charges ignifugeantes, isolation thermique ou acoustique.

Arborescence des matériaux de synthèse



Ces composés organiques constituent une branche de la famille des matériaux de synthèse à laquelle ils se rattachent par la prépondérance de l'élément polymérique, la résine, qui constitue la matrice.

Dans le cadre retenu pour cette étude, on distingue, généralement, deux grandes familles :

- les composites de **grande diffusion (GD)**, peu coûteux, occupent une large part de marché,
- les composites **hautes performances (HP)**, assez onéreux, dont le marché est encore réduit.

¹ Les termes techniques sont explicités dans un glossaire reporté en annexe. Dans la version CD-Rom, un lien hypertexte y renvoie directement.

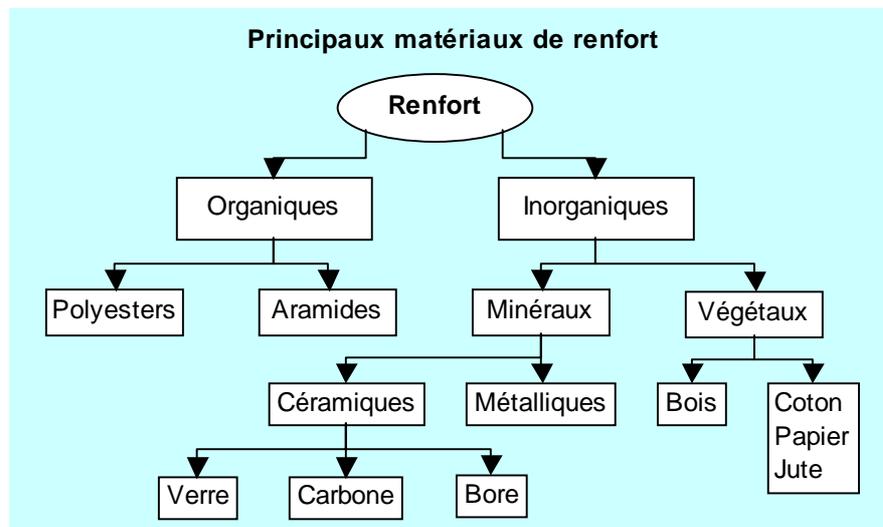
² D'après *Les Composites* de Maurice Reyne – PUF.

2 MATERIAUX

2.1 Renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif. Ils sont caractérisés par :

- la nature de la fibre, minérale ou organique,
- l'architecture du renfort.



2.1.1 *Fibres minérales ou organiques*

1. Les **fibres de verre** sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion à 1.250°C à travers une filière en platine-rhodium ; après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues. Suivant les application auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en **trois qualités** :

- **fibres E** pour les composites grande diffusion ([GD](#)) ;
- **fibres D** pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés) ;
- **fibres R** pour les composites haute performance ([HP](#)).

Les fibres de verre (500 kT/an en Europe) constituent le principal renfort, utilisé dans plus de 95% des matériaux composites, et plus particulièrement pour les produits de grande diffusion ([GD](#)). Elles offrent, pour un prix raisonnable de 10 à 50 F/kg :

- une bonne adhérence entre fibres et résines (matrices) ;
- de bonnes propriétés mécaniques, mais inférieures à celles de la fibre de carbone ;
- des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications.

En Europe, les fibres de verre utilisées dans les composites, représentant 500 000 tonnes/an, sont utilisées dans :

- la plupart des composites « grande diffusion » (automobile, construction, construction électrique) ;
- certains composites « hautes performances » avec des fibres de verre « R ».

L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement limitée par :

- une **rigidité** insuffisante pour certaines applications comme les pièces de structure primaire en aéronautique ;
- un **vieillessement** accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de températures élevées.

Les fibres de verre utilisées dans les composites ont un diamètre de l'ordre de **10 micromètres**, nettement supérieur au **diamètre critique** (de l'ordre de 3 micromètres) pour que la fibre ne présente pas de risque respiratoire et ne puisse engendrer des cancers.

Les principaux producteurs sont : Saint Gobain Vetrotex, Owens Corning, PPG.

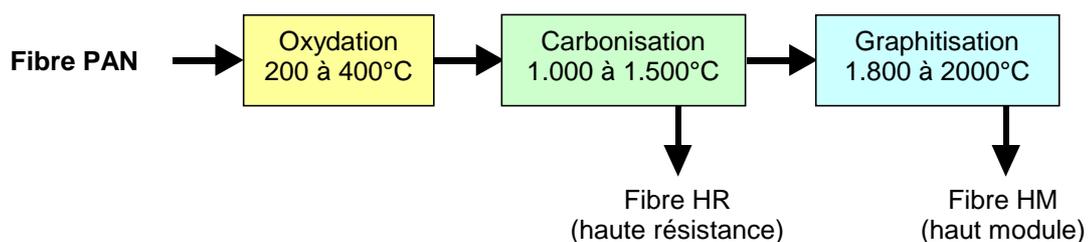
2. La production actuelle de fibres de carbone destinées aux renforts de composites s'établit à **3.000 tonnes/an**. Elles sont principalement utilisées pour les composites « hautes performances » en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs.

La production de **fibres de carbone** repose sur la maîtrise de la production des fibres acryliques, précurseurs traditionnels des fibres de carbone, de formule générique $(CH_2-CHCN)_n-(CH_2-CXY)_n$ (acrylonitrile + comonomère) par la voie classique du solvant, dite **ex-Pan**. On opère par carbonisation de la fibre de polyacrylonitrile (**PAN**) sous atmosphère neutre d'azote dans des fours à pyrolyse de façons à ne conserver que la chaîne carbonée.

La technologie développée par Sumitomo (Dialead), dite **ex-Bray**, fondée sur la distillation du pétrole, donne des fibres de qualité variable ; elle a connu un développement rapide suivi d'une concentration autour quelques producteurs.

En dehors des secteurs de l'aéronautique et des sports et loisirs, l'utilisation très large des composites à fibres de carbone, dans les **composites « grande diffusion »**, est conditionnée par une réduction importante du prix actuellement observé pour les fibres les moins chères (100 à 120 F/kg pour les fibres Zoltech) ; il conviendrait d'atteindre des prix de l'ordre de :

- 30 F/kg pour le bâtiment ;
- 50F/kg pour les équipements de transport.



A moyen terme (2 à 5 ans), le prix des fibres de carbone pourrait approcher environ 60 F/kg ; le coût des produits intermédiaires est fonction du nombre de fibres élémentaires entrant dans la composition des fibres : 12K (12.000 fibres élémentaires), 24K et jusqu'à 48K pour des applications particulières.

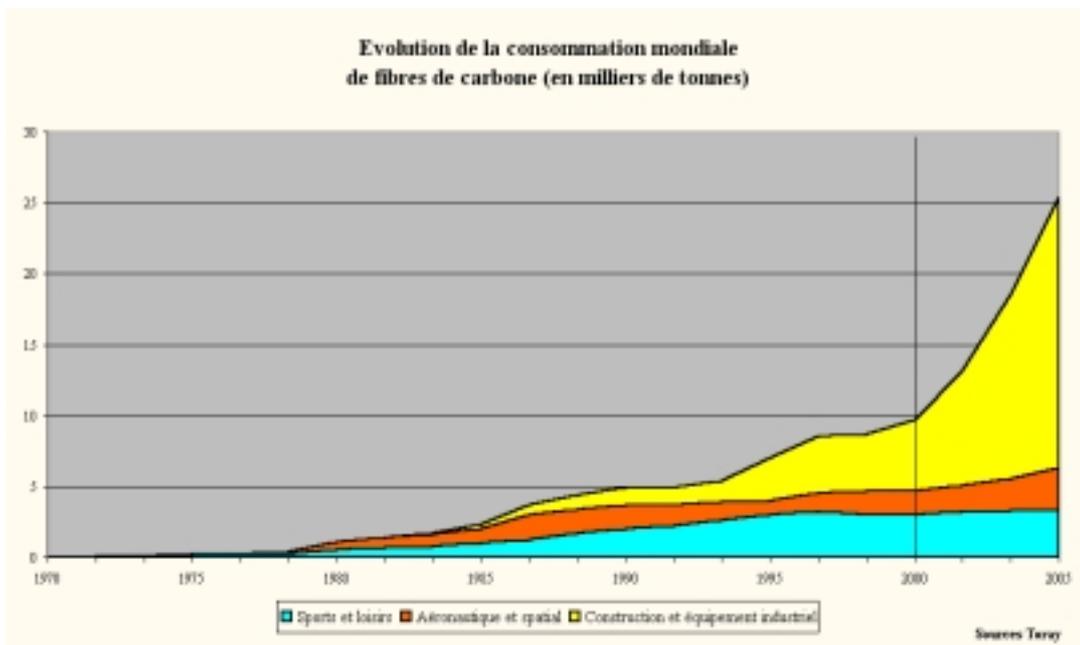
Les fibres de carbone souffrent de handicaps techniques qui limitent également leur utilisation pour certaines applications dans les composites :

- un allongement à la rupture insuffisant (inférieur à 2%) comparé à celui des fibres de verre et d'aramide (3 à 4%) ;
- une **caractérisation** encore insuffisante pour permettre une conception fiable à prix modéré.

Les fibres de carbone pourraient être utilisées à l'avenir en combinaison avec des fibres de verre.

Les fibres de carbone utilisées dans les composites représentent 10% à 15% de la consommation des fibres de carbone dans le monde, mais leur développement devrait suivre la même évolution que la consommation globale.

Le graphique ci-dessous montre la progression comparée de la consommation des fibres de carbone pour les trois secteurs des Sports & loisirs, Aéronautique & spatial, Construction & équipements industriels. Il montre, en particulier, la très forte progression envisagée par Toray de leur utilisation dans les secteurs de la construction civile et industrielle.



3. La **fibre aramide** est issue de la chimie organique des polyamides aromatiques (ou polyaramide) par synthèse chimique à basse température ; ses propriétés diffèrent des polyamides aliphatiques classiques (type PA 6-6, dit « Nylon ») ; on la nomme souvent « Kevlar », qui est la marque de son créateur, Dupont de Nemours.

Les composites renforcés de **fibres d'aramide** offrent une bonne stabilité en température (jusqu'à 200°C en fonction de la matrice) mais souffrent :

- d'une adhérence moyenne entre matrice et fibre,
- d'un prix encore trop élevé : le prix plancher est encore de l'ordre de 200 F/kg et certaines fibres comme la nouvelle fibre Zylon (PBO) peut atteindre 800 F/kg.

La production mondiale de fibres d'aramide atteint **40.000 tonnes/an**, dont seulement **4.000 tonnes** sont utilisées dans les composites.

4. Les fibres de **polyéthylène haute ténacité** présentent les avantages suivants :

- légèreté ($d=0,95$ à comparer à celle de l'aramide $d=1,44$) ;
- haute capacité de conversion de l'énergie cinétique (par exemple celle d'un projectile) en énergie thermique.

Les composites à **fibres de polyéthylène** restent encore marginaux ; ils se développent, en particulier, pour des applications balistiques et de blindage (gilets pare-balles de Arès, plaques de blindage, casques ONU).

Leur champ d'application est limité par leurs principales faiblesses :

- mauvaise résistance à la température (fluage dès 90°C ; l'aramide ne se dégrade qu'à 400°C) ;
- mauvaise adhérence entre les fibres et la matrice.

La production mondiale de **fibres de polyéthylène** haute ténacité représente **2.000 à 3.000 tonnes/an**, dont moins de 200 tonnes sont utilisées dans les composites

Les principales marques sont : Dyneema de DSM (Pays Bas), Spectra aux Etats Unis.

5. Les **fibres naturelles** pourront constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur plus grande facilité de recyclage lorsque leurs propriétés physiques seront mieux appréhendées.

Les industriels (Sommer) et certains CRITT (tels Appollor) développent des composites avec des fibres naturelles (lin, chanvre, mais également sisal) qui apparaissent plus écologiques que les fibres de verre, en particulier plus facilement recyclables car elles peuvent être brûlées. En outre :

- leurs propriétés mécaniques pourraient atteindre celles des fibres de verre (module de Young) ;
- la fibre se travaille très facilement avec les technologies du textile (tissage).

Les fibres naturelles présentent plusieurs **verrous techniques** majeurs pour une utilisation massive dans les matériaux composites :

- elles ne sont pas fabriquées par un processus industriel et la reproductibilité de leurs caractéristiques physiques ne peut donc pas être parfaitement maîtrisée ;
- la **quantité et la qualité dépendent de l'environnement** et de l'humidité (reprise jusqu'à 8 ou 10% du taux d'humidité),
- les fibres naturelles sont difficilement **calibrables** et plus difficilement manipulables que les fibres de verre (en particulier pour le lin).
- leurs caractéristiques mécaniques (résistance à la traction) moyennes ont engendré plusieurs échecs dans les projets d'intégration des composites à fibres naturelles dans l'automobile;

Certains producteurs de non-tissés appliquent des procédés textiles traditionnels aux fibres naturelles pour des applications de basse ou moyenne gamme.

6. Les polymères biodégradables à base d'acide **poly-lactique (PLA)** sont utilisés pour des composites à fibres et à matrice PLA (composites **PLA/PLA**) pour des applications médicales d'ostéosynthèse ; ils pourraient constituer de nouvelles alternatives aux fibres existantes.

Caractéristiques moyennes des principales fibres de renforts

(d'après Maurice Reyne)

Type de renfort	Diamètre mono filament (μ)	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance		Module d'allongement	
			Traction (Gpa)	Compression (Gpa)	Elasticité (Gpa)	Rupture (%)
Verre E	10 à 20	2,6	2,5	1 à 1,2	72	4,5
Verre R		2,5	3,5		85	5,2
Carbone HR	6 à 7	1,8	3 à 4	1,1 - 1,8	230-250	1,3
Carbone HM		1,9	2,7		400-500	0,5
Aramide	12	1,45	2,8 à 3	0,3 - 0,5	120-130	2,5
Polyéthylène haut module		0,96	3		100	

2.1.2 Architectures de renforcement

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la texture des renforts (leur architecture) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. En fonction des propriétés recherchées, on rencontre plusieurs architectures de renforcements :

- **unidirectionnelle** : les fibres parallèles peuvent se présenter sous deux formes :
 - sans liaison particulière ([roving](#)) ;
 - reliées par un fil (nappes).
- multidirectionnelle aléatoire :
 - fibres coupées et broyées, sans arrangement particulier ;
 - feutre de fibres agglomérées par un liant : le [mat](#) peut être à fibres courtes (longueur inférieure à 50 mm), sans orientation particulière ou à fibres continues.
- **orientée** : le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles) ; suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile, un sergé ou un satin.
- on réalise également, pour des applications particulières (aérospatial, défense), des armatures de renforcements bi- ou tridimensionnelles.



Les performances résultantes de ces différents types d'architecture sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Performances comparées des différents types d'architecture

Architecture des fibres	Comportement mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximal de renfort	Type de fibres
Fibres coupées et broyées	Moyen	quelconque	30%	verre
Mats fibres coupées	Moyen	quelconque	30%	verre ou carbone
Mats fibres continues	Moyen	orientée	30%	verre
Fibres continues	Intermédiaire	unidirectionnelle	50 à 70%	toutes
Tissu	Fort	bi ou tri directionnelle	30 à 70%	toutes
Nappe	Très fort	Unidirectionnelle (Bi-directionnelle si superposition)	50 à 85%	toutes

Certains composites haute performance ([HP](#)) utilisent des structures de fibres à orientation maîtrisée pour des performances mécaniques élevées.

2.1.3 Interfaces

L'utilisation d'une couche d'interface (sizing) permet d'assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice. Les fibres destinées à la fabrication des composites reçoivent un apprêt spécifique comportant un agent collant qui permet de coller les filaments pour en faire des fils et assure, en outre, une fonction de lubrification (pour le protéger contre l'abrasion due au frottement entre fibres).

2.2 Matrices

La matrice a pour rôle de :

- lier les fibres de renforts,
- répartir les contraintes,
- apporter la tenue chimique de la structure,
- donner la forme désirée au produit final.

Les deux types de résines qui sont, actuellement, utilisées présentent des propriétés foncièrement différentes :

- des **résines thermodurcissables (TD)** qui sont, en général, associées avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se ponte (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. **La transformation est irréversible.**
- l'emploi des polymères **thermoplastiques (TP)**, renforcés avec des fibres courtes (et, prochainement, avec des fibres longues) se développe fortement. Les **polymères thermoplastiques** ont une structure linéaire ; ils sont mis en forme par chauffage (les chaînes se plient), et durcissent au cours du refroidissement (les chaînes se bloquent). **La transformation est réversible.**

Principales différences entre matrices TP et TD

(d'après Maurice Reyne)

Matrices	TD	TP
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

2.2.1 Résines thermodurcissables (TD)

Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

- les **polyesters insaturés** ; ce sont les résines les plus utilisées dans les applications [GD](#). Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide + polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker.
- les **vinylesters** : ce sont des variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique. Elles ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles.
- les **résines époxy** (ou époxydes) constituent la résine type des composites [HP](#).
- les **résines phénoliques** sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre.
- les **polyuréthanes** ont une faible viscosité qui facilite un bon remplissage du moule.

D'autres résines TD sont utilisées pour des applications particulières comme par exemple le silicone (bonnes qualités électrique, thermique, chimique), les poly-imides (composites HP pour une bonne stabilité à la température). En Europe, les composites à matrice thermodurcissables (TD) représentent **70% de la totalité des composites transformés**.

Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Module de flexion (Gpa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
Polyester (UP)	1,2	50-65	3	120
Vinyl-ester	1,15	70-80	3,5	140
Phénolique	1,2	40-50	3	120-150
Epoxyde	1,1-1,4	50-90	3	120-200
Polyuréthane (PU)	1,1-1,5	20-50	1	100-120
Poly-imide	1,3-1,4	30-40	4	250-300

2.2.2 Résines thermoplastiques (TP)

Les thermoplastiques (TP) présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue mécanique et thermique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Toutefois, l'appellation « composite » n'est pas interprétée d'une manière uniforme, et certains industriels n'y incluent pas les thermoplastiques renforcés de fibres courtes qui représentent pourtant **90% des composites à matrice thermoplastique**.

Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont :

- les polyamides ([PA](#)) 6, 6-6, 12 ;
- les polytéréphtalates éthylénique ([PET](#)) et butylénique ([PBT](#)) ;
- les polycarbonate ([PC](#)) ;
- les polyoxides de phénylène ([PPO](#) ou [PPE](#)) ;
- les polyoxyméthylène ([POM](#)) ;

- le polypropylène (**PP**) est un polymère semi-technique, peu onéreux, assez stable en température, mais combustible.

D'autres résines **TP** commencent à être utilisées pour leurs propriétés de thermo-stabilité (tenue thermique supérieure à 200°C) et de bonne tenue mécanique :

- le polyamide-imide (**PAI**) ;
- le polyéther-imide (**PEI**) ;
- le polyéther-sulfone (**PES**) ;
- le polyéther-éther-cétone (**PEEK**).

Les composites entièrement plastiques devraient prochainement atteindre la phase industrielle : 5 000 tonnes de **composites à matrice et fibre en polypropylène (PP)** devraient être produits par BP en Allemagne en 2001.

Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques (**TP**) non renforcées (M. Reyne)

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Module de flexion (Gpa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
Polypropylène (PP)	1,1-1,2	20-30	1-1,6	85-115
Polytéréphtalate butylénique (PBT)	1,5	45-55	2,2-2,6	120
Polytéréphtalate éthylénique (PET)	1,6	55-75	2-2,2	105-120
Polyoxide de phénylène (PPO -)	1,3	55-65	2,4-2,6	80-105
Polyoxyméthylène (POM)	1,6	60-70	7-9	95-105
Polyamides (PA)	1,3-1,4	60-90	6-9	80-120
Polyamide-imide (PAI)	1,3-1,4	195	4,9	275
Polyéther-imide (PEI)	1,5	105	3	170
Polyéther-sulfone (PES)	1,6	85	2,6	180
Polyéther-éther-cétone (PEEK).	1,5	100	3,7	>240

2.2.3 Principales combinaisons de résines et de renforts.

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des combinaisons matrices/renfort les plus couramment utilisées donnant lieu à des composites « hautes performances » (**HP**) ou « grande diffusion ». On notera que les composites « hautes performances » (**HP**) se distinguent essentiellement des composites « grande diffusion » (**GD**) par leurs meilleures propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la traction) et, corollairement, par leur coût plus élevé.

Tableau de synthèse de l'utilisation des résines et renforts

Résines		Fibres de renfort				
		Verre E	Verre D	Verre R	Carbone	Aramide
Thermodurcissables ID	Polyesters	GD	GD			
	Phénoliques	GD				
	Polyuréthanes	GD				
	Epoxy		HP	HP	HP	HP
Thermoplastiques TP	Polypropylènes	GD				
	PA 6 et 6-6	GD		HP		
	PA 12, PEEK			HP	HP	HP

2.3 Semi-Produits

Les procédés de transformation des composites peuvent mettre en œuvre des semi-produits élaborés séparément ou réaliser simultanément matériau et produit. Les technologies de transformation des composites peuvent être regroupées en deux familles :

- la **méthode humide** consiste à imprégner les renforts au moyen de la résine liquide (**TD**) au cours de la fabrication du produit : produit et matériau composites sont réalisés simultanément. Le préimprégné est pré-catalysé ; avant utilisation, il doit être conservé en chambre froide (-5°C).
- la **méthode sèche** consiste à mettre en forme des renforts préimprégnés avec une matrice **TD** ou **TP** et l'on dispose alors d'un semi-produit prêt à l'emploi. La difficulté réside dans l'accrochage de la matrice sur le renfort, en particulier lorsque celui-ci est sous forme de fibre longue ou de tissu. La réalisation se déroule en deux étapes :
 - fabrication et stockage du semi-produit ;
 - mise en forme du semi produit et polymérisation.

2.3.1 **Résines thermodurcissables (TD)**

Il existe deux types de semi-produits « prêt à l'emploi » à base de **résines thermodurcissables** :

1. **Prémix**, dit **BMC** (« Bulk Molding Compound ») : il se compose en partie presque égales de renfort, de résine et de charges mélangés dans un malaxeur à pales. On l'appelle « choucroute » :
 - renfort : fibres de verre coupées (longueur de 6 à 12 mm), taux de 15 à 20% ;
 - matrice : résine polyester chargée de carbonate de calcium.
 - le produit est livré sous forme de boudin prêt à l'emploi ; il a une durée de stockage limitée.
2. **Mat préimprégné**, dit **SMC** (« Sheet Molding Compound ») ; il est produit à partir de renfort, sous forme de **mat**, imprégné de résine, par calandrage sur un film support :
 - mat de verre à fibres coupées (longueur de 25 à 50 mm), taux d'environ 30%.
 - matrice : résine polyester chargée de carbonate de calcium.
 - le produit est prêt à l'emploi, mais sa durée de stockage est limitée.

Caractéristiques moyennes des BMC et SMC (d'après Maurice Reyne)

Semi-produits TD	Taux de renfort (%)	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Module de flexion (Gpa)
BMC	25	1,8-1,9	40-70	7,5
SMC	30	1,7-1,8	130	14

2.3.2 Résines thermoplastiques (TP) :

On utilise deux types de semi-produits à base thermoplastique ([TP](#)) :

- **granulé**, dit [TPR](#) (« thermoplastique renforcé »), existe sous les formes :
 - à *fibres courtes* : polymères techno-plastiques ou PP, renforcés de fibres de verre (taux de l'ordre de 30%) ;
 - à *fibres longues* : fibre continue enrobée de polymère ; la fibre a la même longueur que le granulé après découpe.
- **plaque**, dite [TRE](#) (« thermoplastique renforcé estampable ») : composée de 2 feuilles de TP extrudées entre lesquelles on insère 1 ou 2 mats de renforts ; l'ensemble est repris par calandrage à chaud, puis refroidi et découpé à la demande. Le renfort est constitué de mat de fibre de verre avec un taux d'environ 30%.

Les principaux semi-produits utilisés lors de la fabrication de pièces en composites sont résumés dans le tableau suivant.

Semi-produits utilisés dans la fabrication des composites

Type de semi-produit	Type de résine	Renfort	Structure du renfort	Mise en oeuvre
BMC	Thermodurcissable	Verre	Fibres courtes (12 mm)	Compression
SMC			Mats fibres longues (50 mm)	
Granulé TPR	Thermoplastique	Verre ou carbone	Fibres courtes ou longues (0,1 à 10 mm)	Injection
Plaque TRE			Mats de fibres courtes ou continues	Estampage
Préimprégné thermoplastique : combinaison ou comélange de fils renforts/matrices (Twintex, Schappe)	Thermoplastique (PET , PP , PE)	Verre ou carbone	Mats de fibres continues ou tissu	Enroulement, pultrusion, estampage, compression

3 TECHNOLOGIES DE TRANSFORMATION

3.1 Principaux procédés utilisés en France

Les procédés de mise en œuvre des matériaux composites sont plus nombreux que les techniques de transformation des métaux ; toutefois leur industrialisation est encore récente ce qui engendre de nombreuses difficultés quant à la prédictibilité des résultats.

Les principaux procédés de transformation actuellement utilisés sont présentés le tableau ci-après [Synthèse des procédés de transformation](#) présentant les différents procédés de transformation parmi lesquels on a distingué les grands types suivants :

- les techniques de mise en oeuvre :
 - formes 3D moulées sans presse avec un seul moule ;
 - formes 3D moulées avec presse avec deux moules ;
 - formes profilées ou produits longs ;
 - formes de révolution.

- la classe de composites pouvant être réalisés par les différents procédés :
 - composites **GD** avec matrice **TD**, généralement polyester ou vinylester ;
 - composites **HP** avec matrice **TD**, époxy ;
 - composites **GD** avec matrice **TP**, essentiellement polyuréthane ;
 - composites **HP** avec renforts préimprégnés thermoplastiques (**PET**, **PP**, **PE**).

3.2 Acteurs français de la transformation des composites

Seuls une soixantaine d'acteurs français travaillent sur les technologies **RTM** ou de compression **BMC/SMC**, qui sont les principales technologies de transformation susceptibles de se développer.

En France, selon le GPIC, environ 1 500 industriels sont concernés par la transformation des composites, mais seulement 400 à 450 y consacrent la plus grande partie de leur activité. En effet, de nombreuses PME/PMI qui réalisent des pièces par injection, ne consacrent qu'une faible partie de leur activité à la transformation des composites.

Le tableau ci-dessous présente quelques uns des principaux acteurs français de la transformation des composites et les classes de produits concernées.

Exemples d'acteurs français de la transformation des composites¹

Procédés	Classe de composite	Acteurs France	Exemples	Cadences	Evolution
Moulage au contact ou projection	GD	125	Plastim, Natec, Stratiforme , chantiers navals	Très faibles	En déclin
Drapage	HP	16	Composites Aquitaine , EADS, Dassault, Bretagne Composites	Très faibles	Déclin léger
Compression SMC/BMC	GD	29	Inoplast , Sotira , Nief Plastic	Elevées	En développement
Injection TPR	GD	142	Allibert Equipement Nief Plastic, Sogeplast	Elevées	Stable
RTM	GD/HP	35	Stratiforme, Sotira , Stratim	Moyennes	En développement
RIM	GD	10	Sotira , Peguform , Compreforme, Faurecia, Hutchinson	Moyennes	Stable
Imprégnation en continu	GD	4	Oceane Composites, Topflex	Elevées	Stable
Estampage TRE	GD	4	Nief Plastic Bretagne Composites	Moyennes	Fort développement
Pultrusion	GD	5	Allibert Equipement , Hussor, PRP Planet GDP, DCP	Moyennes	Développement
Enroulement filamentaire	GD/HP	15	Composites Aquitaine , Carlier	Moyennes	Stable
Centrifugation	GD	3	Calorna Purflo Fimor, Hermex	Moyennes	Stable
Procédés innovants	GD/HP		Schappe, Vetrotex	Moyennes à élevées	En développement

¹ Pour chaque procédé, les acteurs les plus impliqués sont notés en gras.

Matériaux & Technologies

Synthèse des procédés de transformation

Procédés de transformation	Utilisation	Renfort		Matrice	Cycle
		Nature	Taux (%)		
1.- Formes 3D moulées, sans presse avec 1 seul moule					
Contact	GD	Mat ou tissu de verre	30-40	Polyester, vinylester	Jour
Projection simultanée	GD	Fibres coupées (l=4-6 cm)	25-30	Polyester	2 jours
Drapage autoclavé	HP	Tissus préimprégnés carbone, aramide, verre R	Jusqu'à 50	Epoxy	2 jours
2.- Formes 3D moulées à la presse avec 2 moules					
Pressage basse pression RTM	GD	Mats de verre	22-28	Polyester	20-30 mn
	HP	Tissu verre R ou carbone	Jusqu'à 80	Epoxy	20-30 mn
Compression moyenne pression	GD	Semi-produit BMC ou SMC		Matrice TD	2-3 mn
Estampage TRE	GD	Plaques TRE		Matrice TP	1 mn
Injection haute pression TP	GD	Granulé TPR		Matrice TP	De 10 s à 1 mn
Injection transfert haute pression TD	GD	Semi-produit BMC		Matrice TD	1,5-2 mn
Injection réaction R-RIM (moule fermé)	GD	Fibres de verre broyées l=0,1-0,2 mm	15-20	Polyuréthane	1-2 mn
Injection réaction S-RIM (moule ouvert)	GD	Mat de fibres longues	<30	Polyuréthane	1-2 mn
3.- Formes profilées ou produits longs					
Stratification en continu	GD	Mat de verre fibres coupées	25-30	Polyester	6-12 mn
Pultrusion	GD	Fibres continues verre	50-80	Polyester	1-2 m/mn
	HP	Fibres continues carbone	50-80	Epoxy	0,5 m/mn
4.- Formes de révolution					
Centrifugation	GD	Fibres coupées, mat enroulé ou tresses de verre	35-45	Polyester	Quelques heures
Enroulement filamentaire	GD	Fibres continues verre E	50-70	Polyester, vinylester	De 1 heure à 1 jour
	HP	Fibres continues verre R, carbone, aramide	60-80	Epoxy	De 1 jour à quelques jours
GD avec matrice TD		HP avec matrice TD		GD avec matrice TP	
				HP avec matrice TP	

3.3 Technologies manuelles de transformation

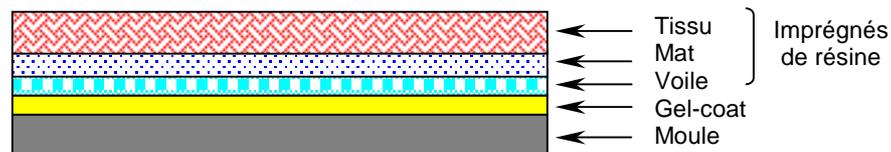
Les technologies manuelles de transformation des composites représentent 21% du secteur français des composites mais leur développement pourrait être menacé par les directives limitant les émissions de styrène (COV). Les procédés manuels sont utilisés pour la fabrication de **pièces de grandes dimensions** destinées principalement aux industries :

- de l'aéronautique (voilure, empennage, mobilier) ;
- du ferroviaire (panneaux et aménagement de voitures) ;
- de la construction nautique (coques).

Les technologies manuelles de transformation des composites utilisent des moules ouverts ; ce sont principalement :

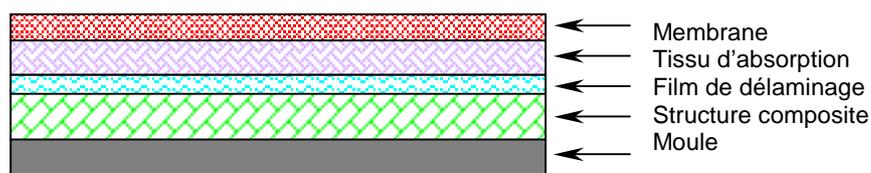
- le **moulage au contact** est utilisé pour les composites « grande diffusion » ; le procédé consiste à déposer sur la forme :
 - une couche de surface (gel coat) et des catalyseurs de polymérisation ;
 - alternativement des couches de renforts (mats ou tissus) imprégnés au rouleau d'une résine polymérisant dans des conditions proches de l'environnement ambiant de l'atelier.

Principe du moulage au contact



- la **projection simultanée** : la résine catalysée et les fibres de renfort coupées sont projetées simultanément au moyen d'un pistolet sur une forme ;
- le **drapage autoclavé**, réservé aux composites « hautes performances », est devenu très **industrialisé** (en particulier en aéronautique) grâce au développement de machine à draper ; les étapes de la fabrication sont les suivantes :
 - dépose des tissus ou nappes préimprégnés préalablement découpés à la forme voulue dans ou sur une forme par plis successifs (phase de drapage) ;
 - couverture de l'ensemble par une membrane souple et étanche et mise sous vide pour éliminer les solvants parasites ;
 - l'ensemble est porté en autoclave à haute température (>200°C) et haute pression (15 bars) pour la polymérisation (phase d'autoclavage).

Principe du drapage autoclavé



Les technologies manuelles de transformation représentent encore 21% des composites transformés en France, dont 7% pour la projection simultanée ; ils sont toutefois en en déclin relatif pour les raisons suivantes :

- sous la pression des pays nordiques, les émissions toxiques (**COV**), tel le **styrène contenu dans les polyesters insaturés**, sont susceptibles, à terme, d'être limitées d'une exposition moyenne de 50 ppm admise aujourd'hui à 20 ppm d'ici 2004 ;
- des **cadences sont faibles**, de l'ordre d'**une pièce par journée**, incompatibles avec la productivité des secteurs de l'automobile, des sports et loisirs.

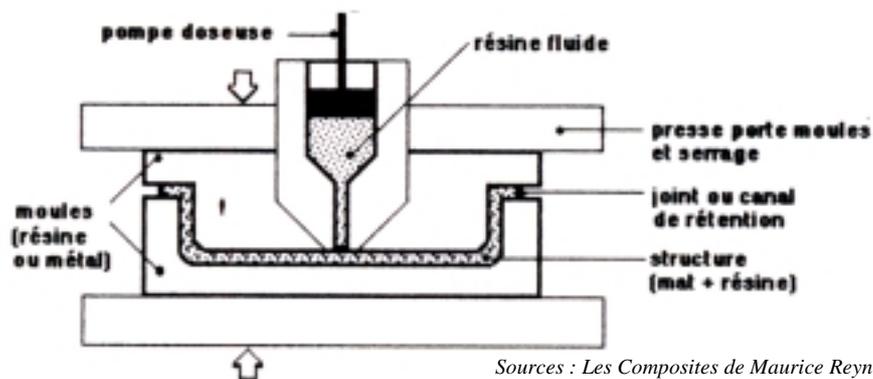
3.4 Procédés de transformation par moulage

3.4.1 Le procédé RTM

Le procédé **RTM** (Resin Transfert Molding) devrait se développer à un rythme de 8% par an en Europe, en particulier pour la réalisation de petites séries, grâce à l'amélioration des méthodes de simulation de l'injection de résine. Il permet, en 20 à 30 minutes, la réalisation simultanée du matériau composite et de l'objet fini :

- le renfort, sous forme de **mats** ou tissus, est placé entre un moule mâle et un moule femelle,
- la résine thermodurcissable (polyester) de faible viscosité est injectée sous une pression de 5 bars,
- la polymérisation est auto-entretenue grâce à l'échauffement dégagé au cours de la réaction de polymérisation.

Procédé de moulage RTM



Le procédé RTM assure la transformation d'environ **5% des composites en France** contre 8% en Europe ; il tend à se substituer aux technologies manuelles pour les raisons suivantes :

- le procédé est en moule fermé (donc, pas de dégagement de vapeurs nocives),
- les cadences sont plus élevées, de 10 à 100 pièces par jour.

Ce procédé est bien adapté à la réalisation de pièces de petite taille en **petite série** :

- en aéronautique, pour les pièces de dimension inférieure au mètre,
- dans le secteur automobile : toits, structure porteuse de petites voitures, cabines de camions, spoilers,
- dans le secteur ferroviaire : mobilier d'intérieur des voitures,
- dans la construction : salles de bains, réservoirs à essence, panneaux d'éoliennes,
- pour les sports et loisirs : raquettes de tennis, skis,
- dans la construction nautique, secteur en progression, pour de petites pièces.

La progression de l'utilisation de la technologie RTM se heurte à un certain nombre de **difficultés technologiques** :

- une meilleure connaissance du procédé et de la simulation de l'injection doivent être développées, par exemple par l'utilisation de mèches de carbone conductrices pour suivre le front d'injection ;
- les pompes à piston actuelles n'injectent la résine que de manière discontinue et en trop petite quantité, d'où :
 - difficulté à maîtriser le débit et la pression d'injection ;
 - apparition de défauts dans la structure du composite consécutive à l'injection discontinue.

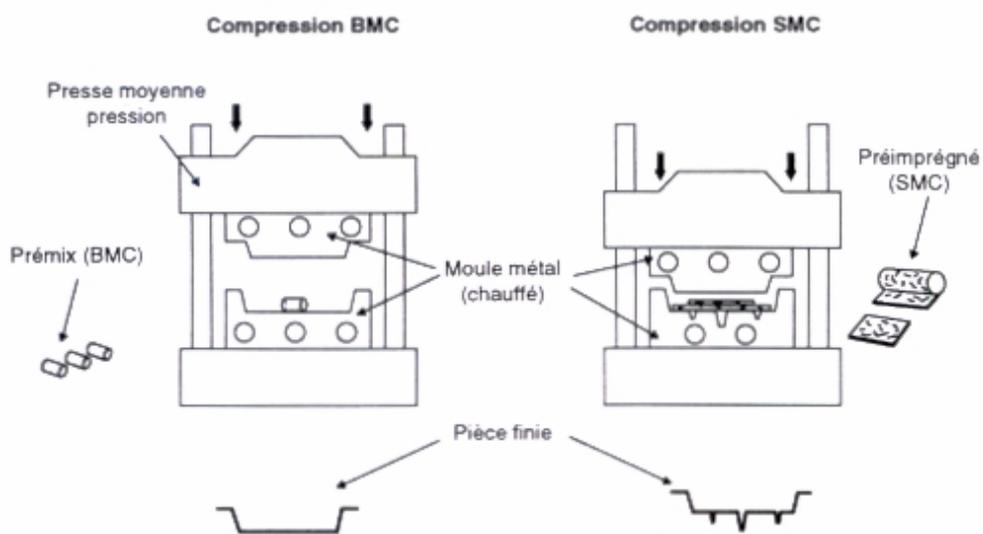
3.4.2 La compression de semi-produits thermodurcissables

Les technologies de compression de semi-produits thermodurcissables [SMC/BMC](#), bien adaptées à la fabrication en grande série, devraient, au cours des prochaines années, croître au rythme de 6% par an en Europe.

Toutefois, les semi-produits SMC/BMC doivent être stockés à une température comprise entre -5°C et -18°C ; ils sont moulés par compression dans les conditions suivantes :

- en moule fermé,
- sous une pression de 50 bars et une température de 150°C , pour permettre la polymérisation,
- pendant une durée de **2 à 5 minutes**.

Principe du moulage par compression des semi-produits



D'après Plastiques & Composites

Les **BMC** peuvent également être transformés par un procédé d'**injection** comparable à celui des thermoplastiques.

Le procédé de compression de semi-produits SMC/BMC est le plus répandue en France ; il représente environ **35% des composites transformés** contre 12% en Europe. Ce procédé trouve ses principales applications dans les applications suivantes :

- la **construction électrique** : boîtiers, composants électriques, supports de lampes ;
- le **secteur automobile** : boîtiers de phares, poutres de pare-chocs ;
- la **construction** : panneaux, composants de cuisines et de salles de bain ;
- les sports et loisirs.

Les technologies de compression SMC/BMC devraient progresser au rythme d'environ **6% par an en Europe** ; elles présentent, en effet, les avantages suivants :

- elles sont bien adaptées aux cadences élevées de fabrication de produits de « grande diffusion » ;
- elles utilisent des moules fermés, limitant les émanations de **COV** (styrène).

Avantages et inconvénients des semi-produits

Procédés	Atouts	Handicaps
BMC	Technologie compatible avec des cadences élevées (jusqu'à 600 pièces/jour) Travail en moule fermé (pas d'émission)	Durée de stockage des semi-produits Conditions de stockage (température <-5°C) Propriétés mécaniques moyennes
SMC	Cadences élevées (jusqu'à 1000 pièces/jour) Résistance à des procédés haute température (cataphorèse) avec un revêtement approprié	Durée de stockage des semi-produits Conditions de stockage (température <-5°C)

3.4.3 Le procédé d'estampage TRE

Le procédé d'estampage des semi-produits **TRE** constitue, pour la fabrication des composites TP, un compromis entre des caractéristiques mécaniques moyennes et des cadences élevées.

Le semi-produit **TRE** (**GMT** – Glass Mat Thermoplastics) se présente sous forme de plaques ; il est ramolli à 200°C et pressé dans un ensemble poinçon-matrice sous une pression de 200 bars. Le cycle de fabrication est d'une durée de l'ordre d'une minute. Le procédé permet de produire des **pièces épaisses** :

- avec des cadences élevées, grâce à un temps de cycle de l'ordre de 5 minutes ;
- sans qu'il soit nécessaire de respecter les conditions particulières de stockage des semi-produits ;
- avec un gain pondéral de 30% sur les semi-produits **SMC** transformés.

Les principales applications de l'estampage TRE concernent le **secteur automobile** : poutres de pare-chocs, faces-avant de caisses, dossiers de sièges, carters.

Le procédé d'estampage TRE est très récent et ne concerne en France que 3% des composites thermoplastiques transformés. Par rapport à leurs **homologues thermodurcissables**, les semi-produits **SMC** comprimés présentent :

- des caractéristiques mécaniques inférieures ;
- un état de surface de moins bonne qualité.

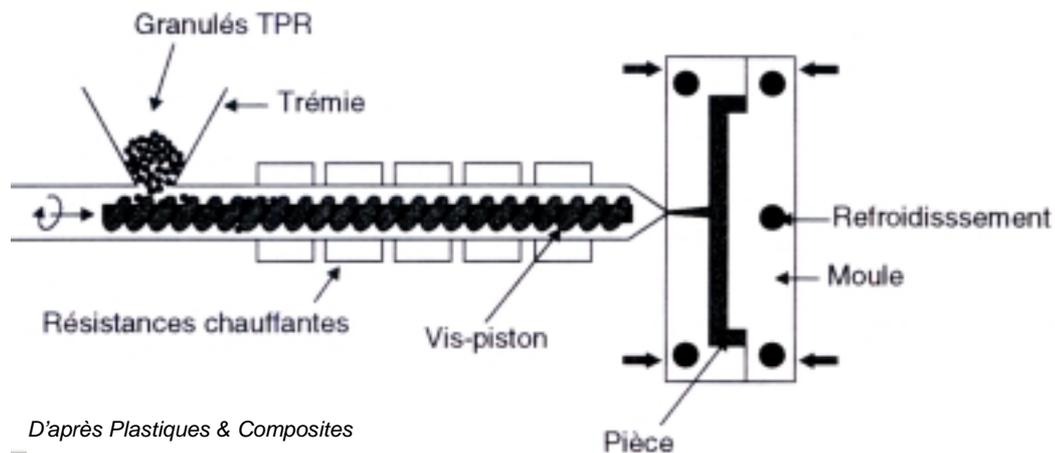
L'absence de contraintes de stockage permet au procédé d'estampage TRE de s'imposer face à la compression SMC pour des pièces ne nécessitant que des caractéristiques mécaniques moyennes et des états de surface médiocres. L'utilisation de l'estampage TRE devrait croître de **15% par an en Europe**.

3.4.4 L'injection des thermoplastiques renforcés TPR

L'injection des thermoplastiques renforcés représente la quasi-totalité de la production des composites thermoplastiques en France, mais le produit obtenu a des propriétés mécaniques limitées. Le procédé consiste à introduire des plastiques sous forme de granulés (par exemple, Pultrex® d'Atofina) vers un moule métallique en deux parties :

- à **haute température** (entre 200 et 300°C),
- sous **haute pression** (entre 300 et 1.000 bars).

Procédé d'injection de granulés TPR



La durée du cycle de production, de 30 secondes à 1 minute, permet des productions en grande série.

L'injection des thermoplastiques renforcés représente 25% de la transformation des composites en France ; elle est principalement utilisée pour la fabrication de petites pièces n'exigeant que des caractéristiques mécaniques limitées dans les marchés de « grande diffusion » :

- automobile (poutres de pare-chocs) ;
- construction électrique et électroménager.

Le procédé d'injection de thermoplastiques renforcés produit des matériaux qui sont considérés comme à la limite du domaine des matériaux composites ; en effet, leurs propriétés mécaniques sont très inférieures à celles des autres matériaux composites.

Toutefois, l'injection des [TPR](#) est **le seul procédé actuel** de transformation des thermoplastiques qui puisse être mis en œuvre par un très grand nombre de petits transformateurs. D'autres procédés de transformation, encore en phase de développement, devraient à terme concurrencer ce procédé en améliorant les propriétés mécaniques des produits.

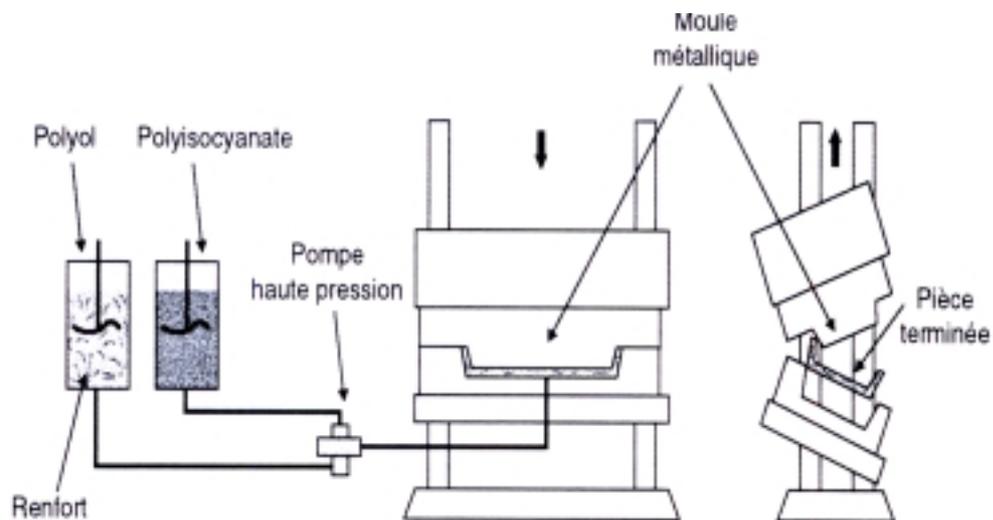
Le procédé d'injection peut également être utilisé pour la production de matériaux **composites à matrice thermodurcissable** par injection de semi-produits [BMC](#). Les seules applications connues concernent l'automobile (hayons).

3.4.5 Le procédé d'injection par réaction

Les procédés d'injection par réaction (**RIM**) permettent la réalisation rapide d'objets de formes complexes, mais ne représentent que 3% des composites transformés en France. Le procédé permet de réaliser **simultanément** le matériau composite et le produit fini.

Le procédé RIM originel utilise des **résines polyuréthane (PU)** - thermodurcissable ; il consiste à injecter dans un moule métallique les produits réactifs formant la base du polyuréthane (polyols, poly-isocyanates), l'expansion due à la réaction remplit alors l'empreinte.

Procédé d'injection par réaction



D'après Plastiques & Composites

Il existe deux variantes du procédé RIM suivant le mode de mise en œuvre des renforts :

- dans le cas du **R-RIM**, les renforts, sous forme de **fibres courtes**, sont injectées dans le polyols **en moule fermé** ;
- dans le cas du **S-RIM**, le renfort, sous forme de **mats de fibres longues**, est disposé dans le **moule ouvert**, puis imprégné par injection du polyuréthane après fermeture.

Le **cycle de fabrication** est d'une durée d'environ **2 minutes**.

Les applications du RIM se situent essentiellement dans l'automobile pour la fabrication d'éléments de carrosserie (pare-chocs, bas de caisse, capotage de motos).

Malgré les avantages liés à la souplesse des formes réalisables et à la bonne adhésion des peintures (bonnes propriétés adhésives des polyuréthanes), les procédés RIM ne représentent que **3% des composites transformés en France** et en Europe, car :

- les caractéristiques mécaniques sont réduites comparées à celles des produits obtenus par les procédés **SMC** et **TRE** ;
- l'entretien du moule (nettoyage) est fréquent et onéreux (inconvenient lié à la forte adhésion des formules polyuréthanes).

Le développement des procédés RIM en Europe devrait être limité.

3.5 Procédé de transformation en continu

3.5.1 **La pultrusion**

Le procédé de transformation en continu, dit **pultrusion**, est peu développé en France, utilisé par seulement 5 ou 6 transformateurs ; il permet de fabriquer par une opération unique et continue le matériau composite et le produit fini sous forme de profilés longs.

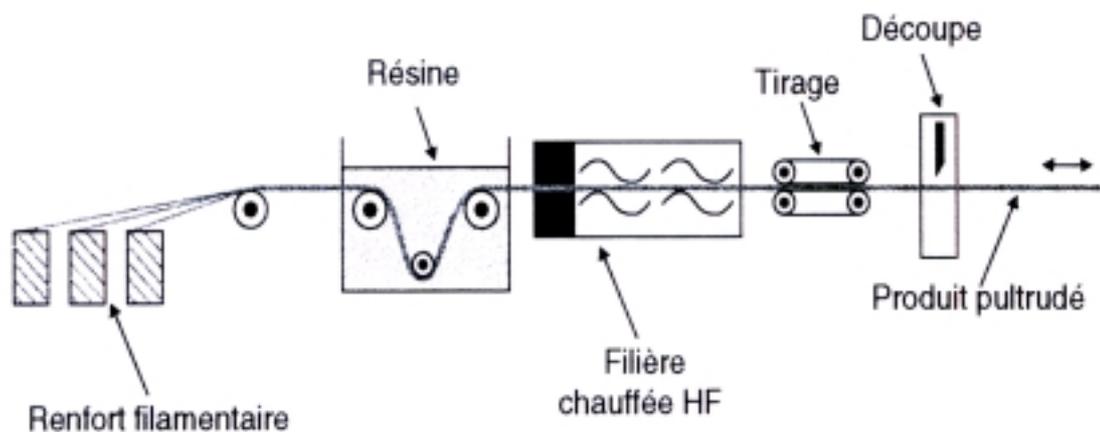
Le renfort filamenteux est imprégné de résine puis formé par traction à travers une filière chauffée qui assure la polymérisation. Les cadences de production sont de l'ordre du mètre de profilé par minute. La pultrusion utilise :

- des résines polyester (**GD**) ou époxy (**HP**) ;
- des fibres de verre (**GD**) ou de carbone (**HP**) avec des taux de renforts de 50 à 80%.

Les principales applications des matériaux composites réalisés par la pultrusion concernent des profilés destinés à :

- la **construction électrique** : isolant électriques ;
- la **construction civile et industrielle** : plates-formes de ponts, signalisation, échelles ;
- les **sports et loisirs** : cannes, clubs, perches.

Principe de la pultrusion



D'après Plastiques & Composites

La pultrusion est encore peu développée **en France** (moins de 2%) malgré quelques projets « vitrine » comme le renforcement en poutres pultrudées d'une route au Mont Saint Michel, et faiblement représentée en **Europe** (de l'ordre de 5%). Cependant, le procédé commence à se développer, en particulier en Allemagne et au Royaume Uni, avec une **croissance** annuelle d'environ 10%.

La pultrusion représente au **Canada, et aux Etats Unis** près de **10% des composites transformés**, en particulier dans les domaines suivants :

- la construction civile (poutres pultrudées), pour le renforcement de structures existantes;
- la construction industrielle (plates-formes);
- l'automobile (sols isolants de camions).

80% des produits en composites pultrudés aux Etats Unis correspondent à des **réalisations spécifiques** pour un client, le reste étant des produits standards.

Des normes de tolérances et de sécurité européennes spécifiques à la pultrusion sont développées par un groupe dirigé par le GPRMC et l'*European Pultrusion Technology Association* (EPTA), mais seules des directives générales sont applicables aux Etats Unis.

3.5.2 L'imprégnation en continu

L'imprégnation continu a été le premier procédé industrialisé de fabrication des composites mais elle ne représente plus en France que 4% des composites transformés.

Le procédé permet de produire **simultanément et d'une manière continue** le matériau composite et les produits finis sous formes de plaques ; le cycle de fabrication est de l'ordre de **6 à 12 mètres/minute**. Les étapes de mise en œuvre du procédé sont les suivantes :

- les renforts ([mats](#) de fibres de verre coupées) et la résine **polyester** sont mélangées par **absorption et pression mécanique** sur un rouleau transfert ;
- la polymérisation a lieu dans une étuve entre 60°C et 80°C.

Les principales applications concernent essentiellement la **construction civile et industrielle** avec des plaques ondulées, des bacs de couverture (toiture) industrielle, des couvertures d'étanchéité d'habitation et des chemins de câbles.

Malgré l'ancienneté du procédé – il constitue le premier essai d'industrialisation des composites - l'imprégnation en continu ne représente que **4% des composites transformés en France** et moins de 8% en Europe. Les applications des composites réalisés par le procédé d'imprégnation continue sont limitées par le peu de diversité des formes compatibles avec le procédé et les médiocres caractéristiques mécaniques du produit obtenu.

3.6 Procédés de fabrication des formes de révolution

3.6.1 La transformation par centrifugation

Les composites transformés par centrifugation ont des propriétés mécaniques moyennes ; la place de cette technologie reste marginale en France, utilisée par seulement 3 transformateurs. Elle permet de réaliser **simultanément** le corps de révolution et le matériau composites :

- la résine **polyester** et le renfort, sous forme de **fibres de verre coupées**, sont introduits successivement dans un moule métallique cylindrique tournant ;
- la résine imprègne le renfort sous l'effet de la force centrifugeuse et forme, après polymérisation, une structure de révolution.

Le cycle de fabrication est d'une durée de quelques heures (fonction du volume réalisé). Le procédé n'a que des applications **marginales** réduites à quelques pièces cylindriques tels des mâts ou supports et des silos. Le choix des formes est limité et les caractéristiques mécaniques sont moins bonnes que celles des composites obtenus par enroulement filamenteux.

3.6.2 L'enroulement filamenteux

Le procédé d'[enroulement filamenteux](#) est adapté à la production en petite série de corps creux de révolution ; il ne représente que 2% des composites produits en France. Le procédé réalise simultanément le matériau et le produit ; il consiste à enrouler un renfort continu imprégné de résine sur un mandrin tournant. Le temps de cycle peut atteindre quelques jours en fonction du volume et de la complexité des formes ; il est utilisé avec :

- des matrices époxy ou polyester ;
- des fibres continues de verre standard ou à haut module et les fibres de carbone ; les taux de renforcement peuvent être élevés (jusqu'à 80%).

Ce procédé est adapté à la production de **petites séries de corps creux de révolution** :

- dans l'aéronautique : moteurs de fusée, pales d'hélicoptères, arbres de transmission ;
- dans la construction nautique : mats de bateaux ;
- dans la construction industrielle : tubes, oléoducs, citernes, silos ;
- dans la construction électrique : poteaux de distribution ;
- pour les sports et loisirs : cadres de vélos, cannes à pêche.

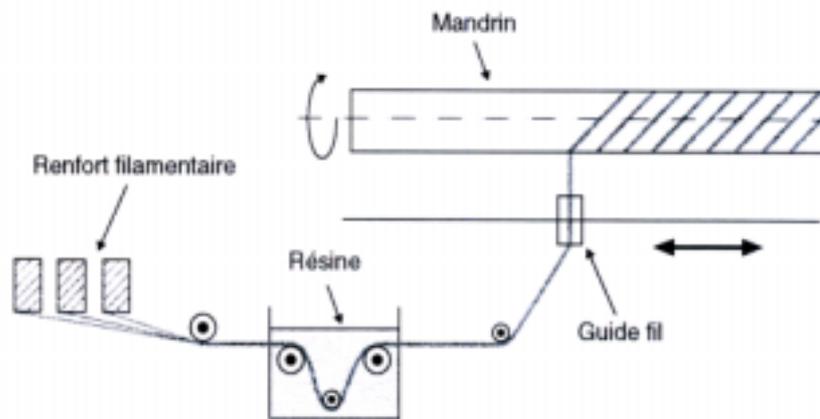
L'enroulement filamentaire est particulièrement adapté aux composites « hautes performances » (HP) car le procédé, compatible avec des taux élevés de renfort, permet une orientation précise des fibres.

L'enroulement filamentaire ne représente en France qu'environ 2% des composites transformés contre 5% en Europe ; il représente également environ 5% des composites transformés aux Etats Unis, et devrait de développer avec le marché des poteaux de distribution électrique.

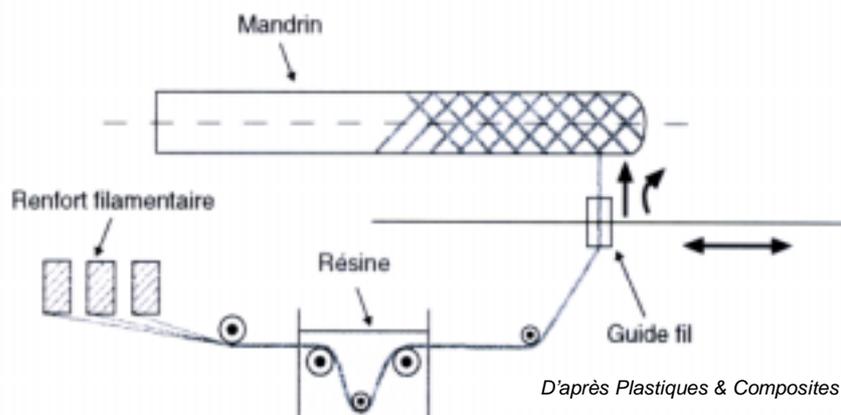
En France, l'utilisation de cette technologie semble limitée à des applications « hautes technologies », tandis que dans d'autres pays d'Europe et aux Etats Unis, ce procédé semble plus largement utilisé pour des applications « grande diffusion ». Le développement de cette technologie devrait être limité par les cadences très faibles.

Principe de l'enroulement filamentaire

Enroulement Cylindrique



Enroulement Polaire



D'après Plastiques & Composites

3.7 Procédés innovants

Les procédés de transformation innovants concernent essentiellement la mise en œuvre des composites thermoplastiques ou des améliorations apportées au procédé [RTM](#).

1. La **technologie d'injection pour grande série** (Large Injection Moulding Technology - [LIMT](#)) consiste à utiliser des composites thermoplastiques à matrice [PA](#), polypropylène ou [PET](#), chargées de 15% à 40% de fibres de verre courtes.

Cette technologie devrait permettre de réaliser 100.000 pièces par an avec un seul équipement de production.

2. **RocTool** a développé deux procédés de transformation permettant de réduire de façon considérable les temps de cycles, de baisser les consommations énergétiques et de supprimer le pré-chauffage des outillages ; ces procédés transforment directement les composants sans chauffage préalable du moule :

- **par chauffage résistif** : un courant électrique circule dans la matrice qui chauffe en quelques secondes permettant d'initier la réaction de polymérisation ; ce procédé est applicable à des matrices conductrices ou chargées de matériaux conducteurs ;
- **par chauffage inductif** : un champ magnétique est créé dans la surface de l'empreinte qui chauffe en quelques secondes (matériaux composites non conducteurs).

Le système développé par **Schappe Techniques** est basé sur l'utilisation de « préformes » : fils, tresses, tissus 2D, tissus multiaxiaux et UD qui combinent fibres de renfort (carbone ou para-aramide) et fibres TP (PA 12, PPS, PEEK). Ces préimprégnés secs, nommés TPFL[®], peuvent être mis en œuvre par des procédés rapides (TRE, BIM, Diaphragm Forming), voire ultra rapides (procédé RocTool), pour obtenir des composites hautes performances.

3. Le procédé par imprégnation a été amélioré par la technologie [RIFT](#) (Resin Infusion Processes), qui consiste à remplacer une des faces du moule fermé par un **film flexible** recouvrant le renfort préalablement disposé sur le moule. Cette méthode favorise l'imprégnation et la rend plus homogène. En effet, la dépression créée entre le moule et le film souple permet de **chasser l'air** contenu dans le tissu et d'**aspérer la résine** à injecter sur le renfort.
4. Un procédé comparable au RTM, mis au point par **Ems Chimie** pour les **PA 12**, utilise le **lauro lactam**, un catalyseur et un fluidifiant afin de limiter, au cours de la polymérisation, l'élévation de la viscosité qui est susceptible de réduire l'imprégnation des renforts.
5. Au Japon, les sociétés Teijin Ltd et Hiroshima Plastics ont développé un procédé innovant pour la réalisation, en moule ouvert, de composites sandwich destinés à l'automobile et à la construction ; ce procédé est fondé sur la **dilatation thermique des particules thermoplastiques**. Le procédé, dit **EPM**, a été récompensé par la *Japan Society of Polymer Processing* en 2000. Le procédé comporte trois étapes :
 - les constituants du composite sandwich (résine thermodurcissable, fibres, thermoplastiques sous forme de particules) sont placés dans le moule entre deux parois de renfort ;
 - le moule est chauffé ; sous l'action de la chaleur, les particules de thermoplastiques **se dilatent et se répartissent** uniformément avec la résine thermodurcissable et les fibres ;
 - le moule est ouvert et l'ensemble démoulé.

Les composites sandwich réalisés par Teijin sont utilisés pour des **récepteurs mobiles** de signaux satellites et des panneaux de renfort des **constructions en ciment**.

3.8 Répartition des procédés de transformation

La répartition des procédés de transformation est tirée d'estimations de Nodal réalisées à partir des données de Vetrotex, du Poste d'expansion économique au Japon, du *Composite Fabricator Association* (USA) et du GPIC.

On constate de fortes disparités géographiques concernant l'utilisation des procédés de transformation. Par exemple, la compression [SMC/BMC](#) est la technologie la plus couramment utilisée par l'industrie française de transformation des matériaux composites (35%), suivie par l'injection des [TPR](#) (25%) ; par comparaison, en Europe, c'est l'injection TPR qui prédomine (37%), et, loin derrière, le moulage par contact et projection (18%). Aux USA, c'est ce dernier procédé qui est encore, de loin, le principal procédé de transformation avec 45% des produits transformés. Toutefois, ces distinctions doivent être modulées par l'importance des tonnages effectivement transformés dans chacune des zones concernées.

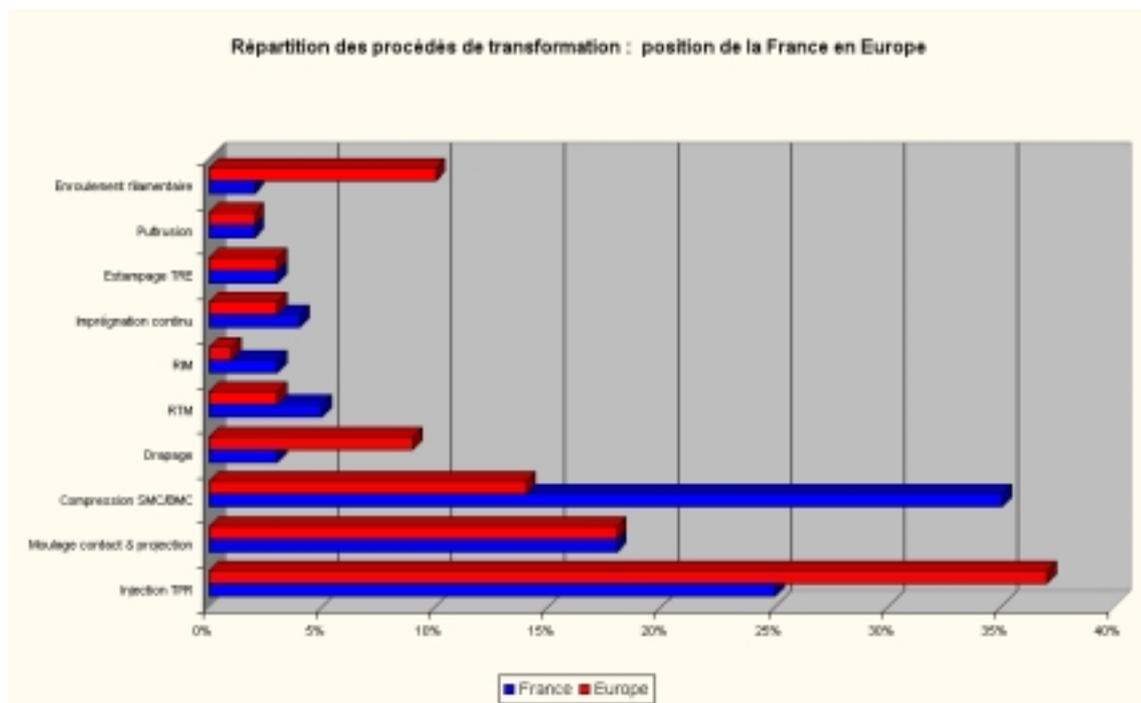
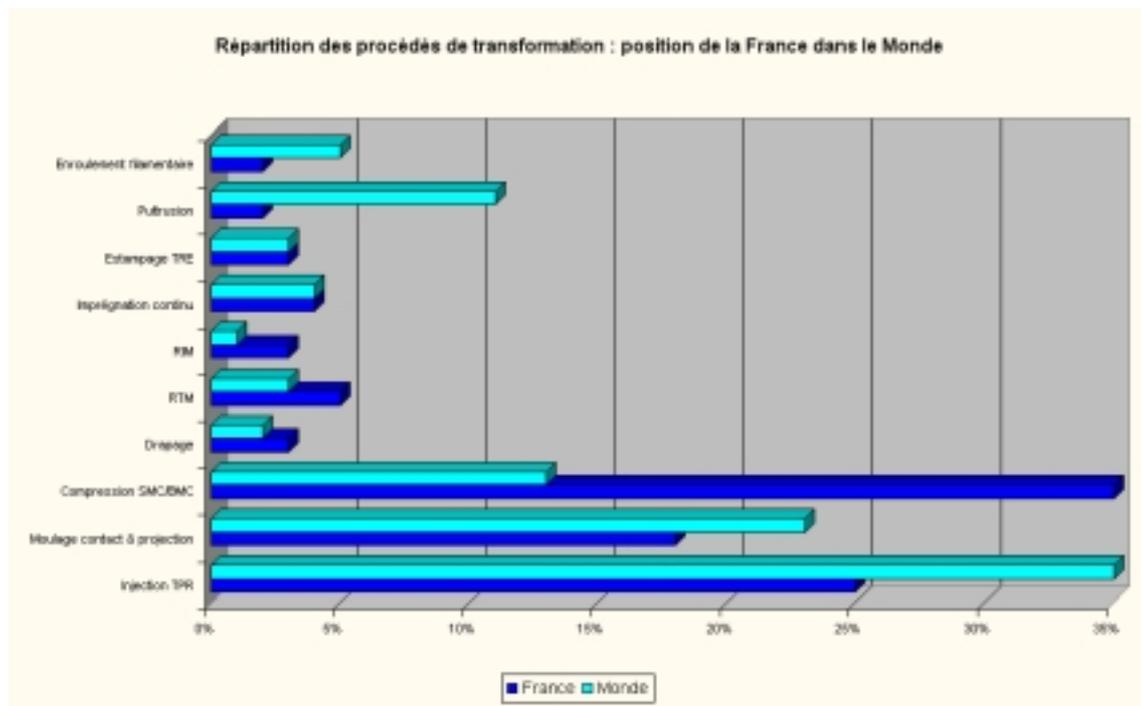
L'ensemble de ces informations, en tonnage (milliers de tonnes et en pourcentage) est indiqué dans les tableaux et graphiques qui suivent ; afin de ne pas les surcharger inutilement, on n'a présenté qu'une partie des résultats du tableau ci-dessous, pour laquelle les quantités transformées sont au moins égales, dans l'une des zones géographiques, à 10% du total.

Répartition des procédés de transformation (en pourcentage des produits transformés)

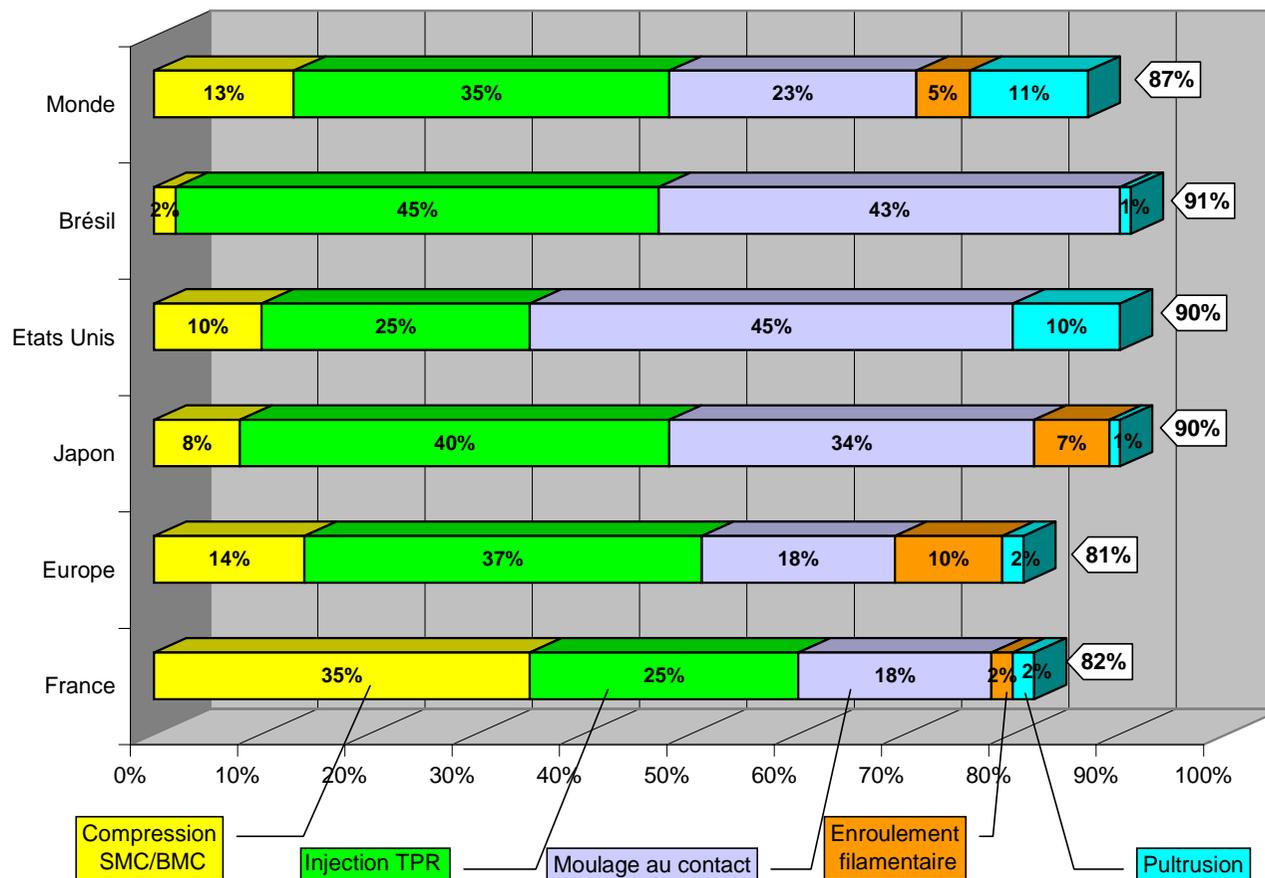
Procédés	France	Europe	Japon	Etats Unis	Brésil	Monde
Compression SMC/BMC	35%	14%	8%	10%	2%	13%
Injection TPR	25%	37%	40%	25%	45%	35%
Moulage contact & projection	18%	18%	34%	45%	43%	23%
Enroulement filamenteaire	2%	10%	7%	0%	0%	5%
Pultrusion	2%	2%	1%	10%	1%	11%
Imprégnation continu	4%	3%	6%	2%	4%	4%
RTM	5%	3%	1%	3%	3%	3%
Drapage	3%	9%	1%	1%	1%	2%
RIM	3%	1%	1%	1%	0%	1%
Estampage TRE	3%	3%	1%	3%	1%	3%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%

(en milliers de tonnes de produits transformés)

Procédés	France	Europe	Japon	Etats Unis	Brésil	Monde
Compression SMC/BMC	105	280	136	340	3	930
Injection TPR	75	740	680	850	76	2 503
Moulage contact & projection	54	360	578	1 530	73	1 645
Enroulement filamenteaire	6	200	119	0	0	358
Pultrusion	6	40	17	340	2	787
Imprégnation continu	12	60	102	68	7	286
RTM	15	60	17	102	5	215
Drapage	9	180	17	34	2	143
RIM	9	20	17	34	0	72
Estampage TRE	9	60	17	102	2	215
Total	300	2 000	1 700	3 400	169	7 150



Répartition de 80% des procédés de transformation par zone géographique



CHAPITRE 3

ANALYSE FONCTIONNELLE ET

APPLICATIONS

1 ANALYSE DES FONCTIONS

Une segmentation des marchés est proposée au chapitre 5 ci-après ; les applications sont agrégées en 9 secteurs principaux qui représentent la quasi-totalité du marché des composites.

L'analyse des fonctions remplies par les matériaux composites, complétée et orientée par les informations recueillies au cours des entretiens directs avec les intervenants du secteur, est développée suivant deux axes :

- une classification des fonctions par discipline scientifique :
 - les fonctions mécaniques sont présentées dans le tableau I ci-dessous,
 - les fonctions chimiques dans le tableau II,
 - les fonctions physique dans le tableau III.
- une classification des fonctions par objectifs.

1.1 Classification des applications par fonction

I.- Classification par fonctions mécaniques

Fonction	Déterminant	Secteurs d'application	Exemples d'applications	Critères et valeurs cibles
Résister	à la traction	Aéronautique	Bielles de reprises d'efforts pour les avions en composites HP	Limite de tenue à la traction (100 à 1000 MPa)
	à la flexion	Bâtiment	Eléments de murs rideaux en composites GD à fibres longues	Module de flexion : (8 à 18 GPa)
	à la fatigue	Automobile, ferroviaire, aéronautique	Hayons Citroën en composites TD à fibres longues	Durée de vie jusqu'à trente ans
	à la fissuration	Automobile, bâtiment	Toile de fibre de verre et de résine pour revêtement de bâtiment	
	à la température	Automobile, aéronautique	Capot moteur en composites TD à fibres longues	Conservation de 50% des caractéristiques mécaniques pendant 2,000 heures/150°C
	à la rayure	Bâtiment	Baignoires en composites à matrice TD	
Réduire	l'abrasion l'usure	Automobile	Composites en matrice PEEK pour pièces d'usure	
	les déformations thermiques	Construction, automobile, bâtiment	Carters d'huile en composites TP à fibres courtes	Coefficient de dilatation thermique (70-100 micron/m°C)
Absorber	l'énergie	Automobile	Lames de ressorts de camionnettes	
Adapter	à une structure	Bâtiment	Charpente avec composites à enroulement filamenteux	
Maîtriser	l'élasticité	Sports & Loisirs, automobile	Embouts de chaussures de sécurité	Module d'élasticité longitudinal 20-300 Gpa Module d'élasticité transversal 2-25 Gpa
Amortir	les chocs	Automobile	Couvercles de boîtes de vitesses composites à matrice TP	
	les vibrations	Automobile, aéronautique	Couvercles de boîte de vitesse : composite matrice TP	
	le bruit	Bâtiment	Sanitaires en composites à matrice TD	

Applications et analyse fonctionnelle

II.- Classification par fonctions chimiques

Fonction	Déterminant	Secteurs d'application	Exemples d'applications	Critères et valeurs cibles
Résister	à la corrosion	Ferroviaire, électricité, naval, électronique, construction, papier, articles de sport	Coques de bateaux, collecteurs d'admission d'air dans les carburateurs, réservoirs pour véhicules fonctionnant au gaz naturel	
	aux attaques chimiques	Construction, industrie chimique	Baignoires en composites à matrice TD	
	au feu	Bâtiment		
Limiter	les émissions toxiques	Bâtiment	Réservoirs dans l'industrie chimique	

II.- Classification par fonctions physiques

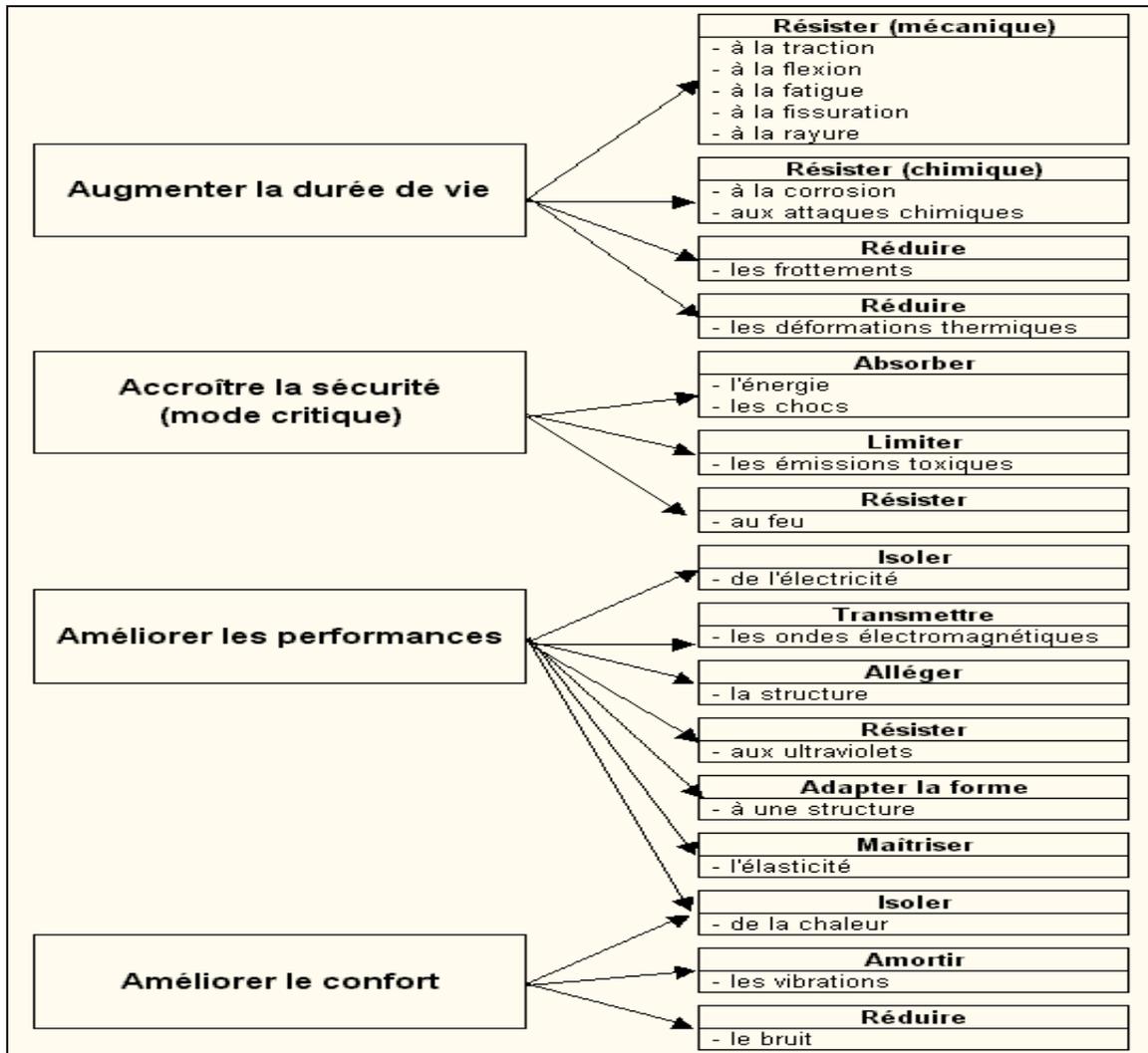
Fonction	Déterminant	Secteurs d'application	Exemples d'applications	Critères et valeurs cibles
Résister	aux ultraviolets	Bâtiment	Toile de fibre de verre et de résine pour revêtement de bâtiment	
Alléger	les structures	Automobile, ferroviaire, aéronautique	Volets et ailerons d'avions en composites HP	Masse spécifique 1-2 kg/dm ³ alléger la structure d'1 kg
Transmettre	les ondes OEM	Génie électrique, électronique	Noyaux de transformateurs solutions de CEM, Radômes	
Isoler	de la chaleur	Aéronautique, automobile, bâtiment	Réservoirs d'huile en composites HP pour les avions	Coefficient d'isolation K=1,1 à 1,2W/m ² .°K isolation jusqu'à 1200 °C
	de l'électricité	Génie électrique, électronique	Isolants THT en composites à fibres longues	

1.2 Classification des fonctions par objectif

La classification des fonctions est établie par rapport aux objectifs ci-dessous :

- augmentation de la durée de vie des produits,
- accroissement de la sécurité,
- amélioration des performances,
- amélioration du confort.

III. - Classification des fonctions par objectifs (sécurité, confort)



2 FONCTIONS SPECIFIQUES DE CHAQUE APPLICATION

2.1 Fonctions apportées par les matériaux composites

Les principales fonctions, identifiées ci-dessus, apportées par les matériaux composites ont été classées suivant trois thèmes :

- la durée de vie,
- la facilité de conception,
- la sécurité.

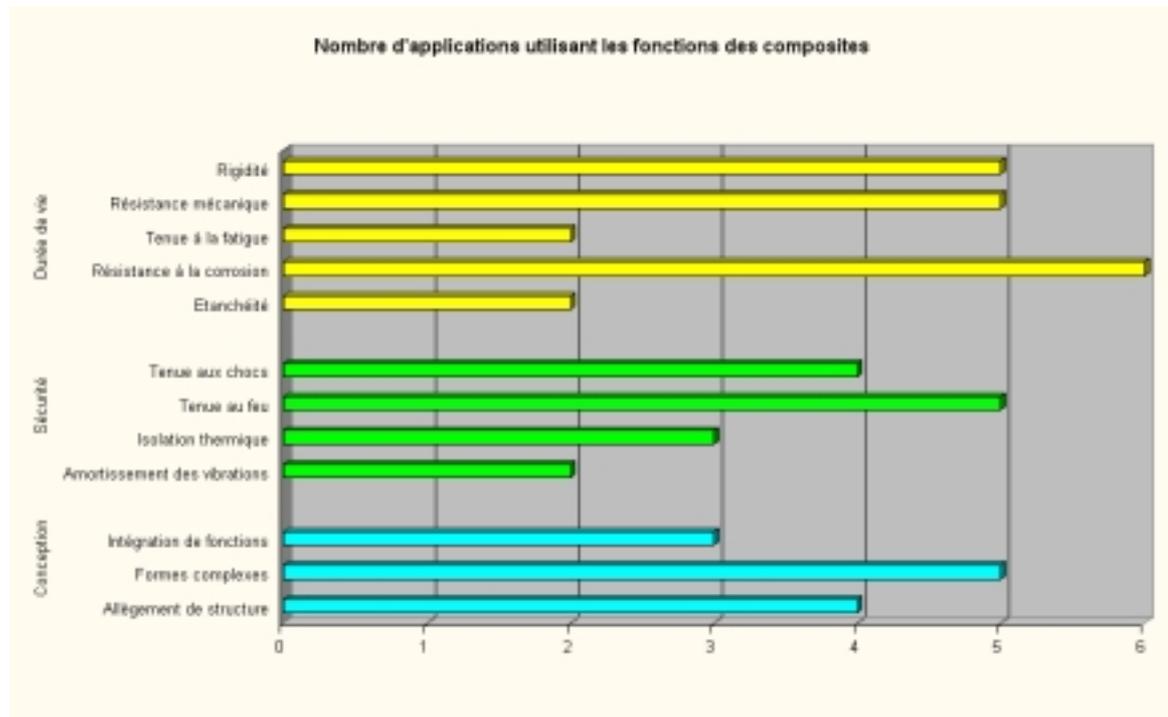
Pour chacun des 9 principaux secteurs, le tableau ci-dessous analyse l'intérêt d'utiliser ces fonctions spécifiques des composites ; la résistance à la corrosion (6 applications), la rigidité (5), la résistance mécanique (5), la tenue au feu (5) et l'adaptabilité aux formes complexes (5) sont les fonctions spécifiques apportées par les composites qui sont le mieux appréciées.

Applications et analyse fonctionnelle

Principales fonctions apportées par les composites aux applications

		Aéronautique	Automobile	Ferroviaire	Bâtiment	Construction industrielle	Industrie navatique	Médical	Electricité	Sports & loisirs
Durée de vie	Rigidité				X		X	X	X	X
	Résistance mécanique				X	X	X	X		X
	Tenue à la fatigue	X					X			
	Résistance à la corrosion	X	X		X		X	X	X	
	Etanchéité				X	X				
Sécurité	Tenue aux chocs		X				X	X		X
	Tenue au feu	X		X	X	X			X	
	Isolation thermique				X	X			X	
	Isolation électrique								X	
	Amortissement vibrations					X				X
Conception	Intégration de fonctions	X	X						X	
	Formes complexes	X	X	X	X					X
	Transparence OEM								X	
	Allègement de structure	X	X					X		X

Note : Dans le tableau ci-dessus, les fonctions applicables aux composites thermoplastiques et aux thermodurcissables sont indiquées par les cases jaunes ; les fonctions spécifiques des thermoplastiques sont indiquées par les cases vertes.

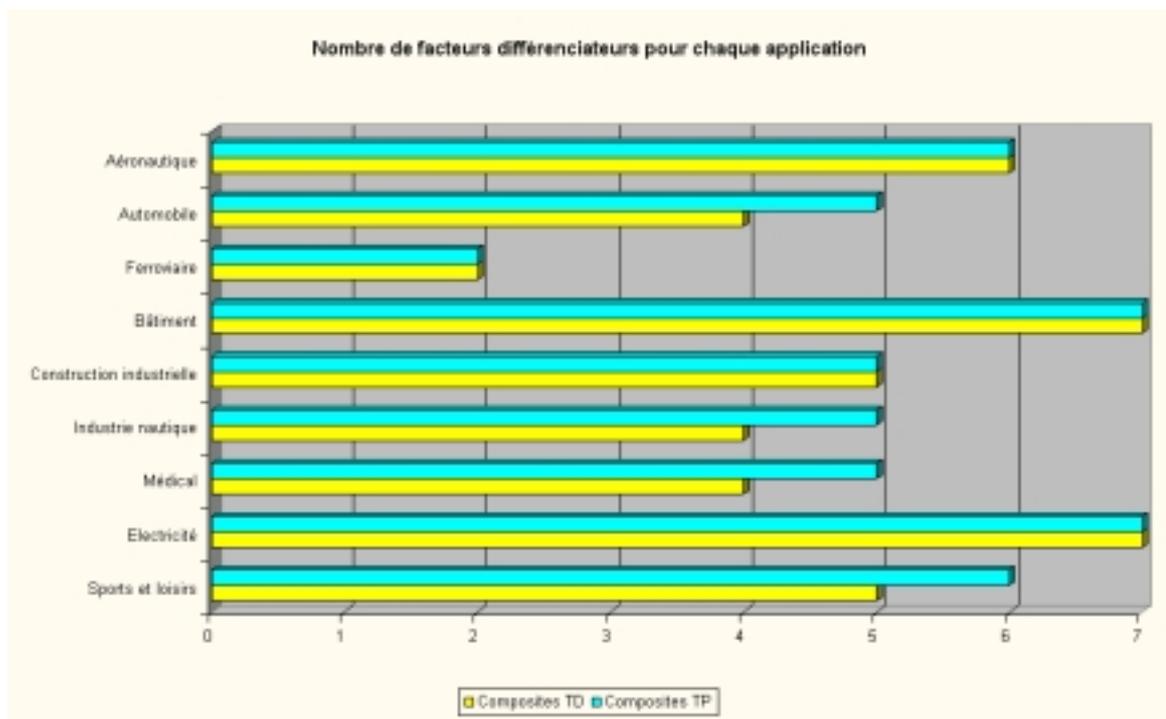


2.2 Une exploitation inégale des fonctions des composites suivant les secteurs

Certaines applications sont susceptibles d'utiliser au moins six fonctions spécifiques apportées par les composites, par exemple : le bâtiment en utilise sept (7), l'électricité (7), l'aéronautique (6) et les sports et loisirs (6).

Dans le secteur automobile, qui utilise potentiellement 5 fonctions des composites TD et 6 des composites TP, la place des composites est concurrencée par les autres matériaux (pour des raisons de cadences et de rupture de la chaîne logistique de production, le hayon arrière de la Matra Espace est désormais réalisé en aluminium).

Dans le secteur ferroviaire, les avantages des composites sont relativement peu reconnus ; ce secteur, en effet, ne reconnaît potentiellement que deux fonctions intéressantes aux composites (tenue au feu et possibilité de formes complexes).



2.3 Une obligation d'atouts différenciateurs

Pour être adoptés face aux solutions traditionnelles (métal, aluminium), les composites doivent se différencier des technologies alternatives par leurs apports fonctionnels positifs portant sur au moins cinq critères, par exemple :

- gain de poids (légèreté) ;
- intégration de fonctions (réduction de nombre de pièces ou de composants) ;
- bonne tenue à la corrosion ;
- facilité de mise en œuvre ;
- isolation électrique ;
- compatibilité électromagnétique ;
- caractéristiques mécaniques (rigidité, transformation élastique).

On constate que les exigences des industriels ont tendance à augmenter : auparavant, trois avantages concurrentiels étaient suffisants pour adopter les composites face aux solutions traditionnelles, désormais, cinq avantages sont indispensables.

Cette exigence croissante des industriels s'explique par le fait que la « solution composite » représente toujours pour le concepteur un « saut technologique », alors que les **solutions traditionnelles** (acier, aluminium) sont **constamment enrichies** (légèreté, traitements spéciaux) et apparaissent comme une solution sécurisante (et plus facile !) en raison de la bonne connaissance des matériaux et de la prédictibilité de leur comportement.

Aussi, face à la pression des solutions innovantes proposées par les métallurgistes, les composites doivent apporter au minimum cinq avantages concurrentiels pour s'imposer sur une application donnée.

2.4 Des exigences variées suivant les secteurs d'applications

Pour que l'utilisation de matériaux composites soit acceptée, chaque application a des exigences variables en terme de performances, de coût et de cadence de production.

Pour chacune des neuf applications étudiées, Nodal a estimé l'importance relative de trois exigences caractéristiques de l'utilisation des matériaux composites :

- les **performances** demandées au produit final,
- le **coût relatif** de la fabrication du produit,
- les **capacités** de production actuellement accessibles pour chaque type de produit.

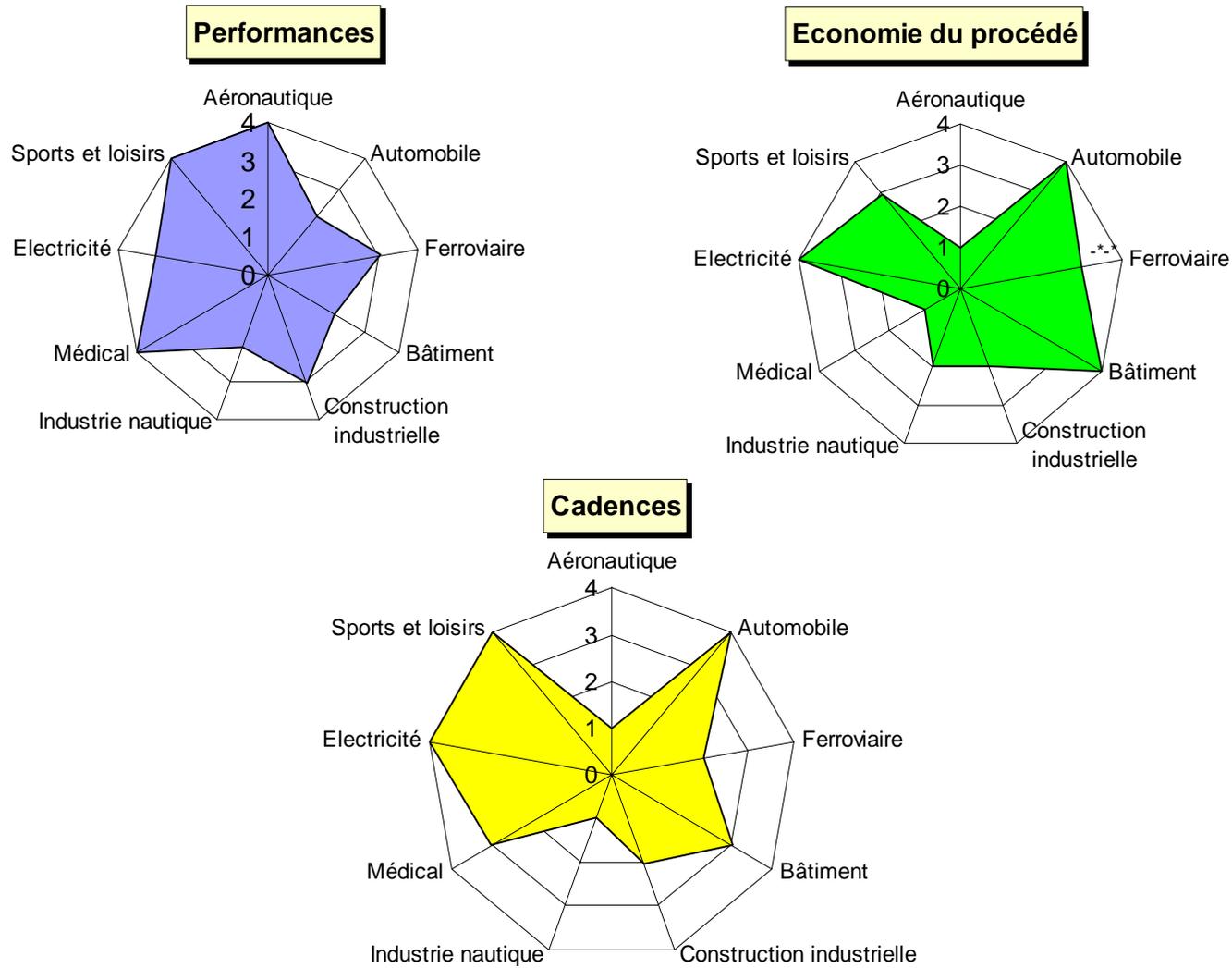
Ces estimations ont permis d'établir le tableau ci-dessous qui propose une notation des neuf applications pour chacune des trois exigences retenues. Les résultats de ce tableau sont traduits dans les pages suivantes sous forme de graphiques comparatifs.

Exigences comparatives des neuf secteurs d'application

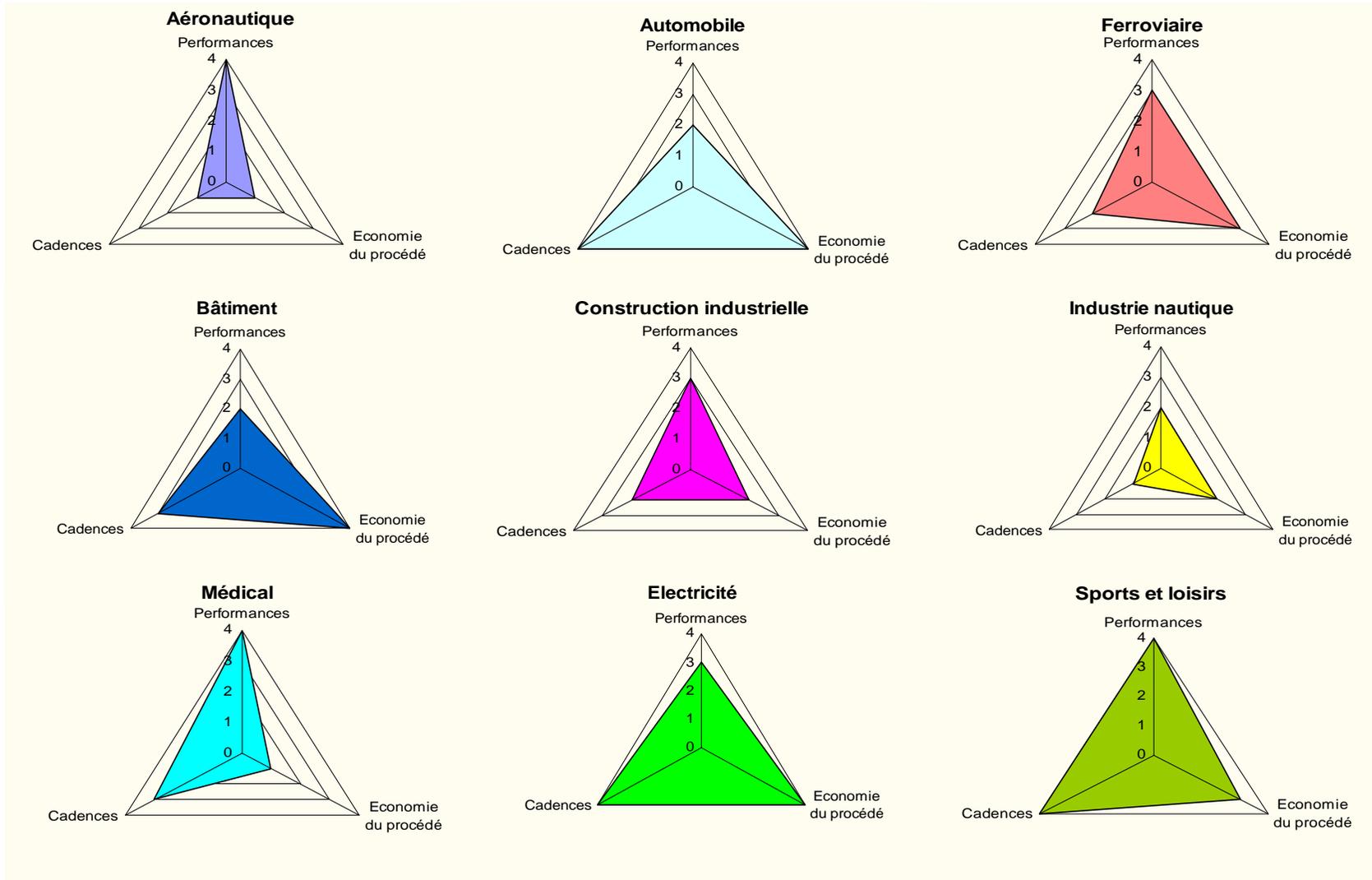
Secteurs d'application	Performances	Economie du procédé	Cadences
Aéronautique	Très hautes	Non prioritaire	1-10 pièces/jour
Automobile	Moyennes	Essentielle	Plus 500 pièces/jour
Ferroviaire	Hautes	Importante	10-50 pièces/jour
Bâtiment	Moyennes	Essentielle	50-500 pièces/jour
Construction industrielle	Hautes	Appréciee	10-50 pièces/jour
Industrie nautique	Moyennes	Appréciee	1-10 pièces/jour
Médical	Très hautes	Non prioritaire	50-500 pièces/jour
Electricité	Hautes	Essentielle	Plus 500 pièces/jour
Sports et loisirs	Très hautes	Importante	Plus 500 pièces/jour

Estimation Nodal

2.4.1 Comparaison de chacune des exigences pour les neuf secteurs



2.4.2 Comparaison des exigences pour chacune des neuf applications



2.5 Aperçu sur les enjeux des marchés d'application

Le tableau ci-dessous présente une synthèse rapide des principales caractéristiques de chacune des neuf applications étudiées : type de composites principalement utilisés, taille du marché en tonnage, évolution envisagée à court terme, technologies de transformation et principaux facteurs de développement ou handicaps.

Dans les applications notées « en développement », le marché pourrait croître de 5 à 10% par an pendant les cinq prochaines années ; les secteurs indiqués comme « stables » correspondent à une croissance comparable ou inférieure à celle du PIB (2%).

L'évolution des marchés de l'automobile, de la construction civile et de la construction nautique est considérée comme « incertaine » car :

- l'application de nouvelles réglementations européennes à l'horizon 2004 risque de menacer, voire de condamner, l'utilisation des composites dans ces secteurs, compte tenu de l'état actuel de l'art,
- par contre, si ces facteurs critiques sont maîtrisés, ces marchés devraient rester très porteurs.

Synthèse des principales applications

Evolution probable du secteur d'application	Marchés	Types de composites	Taille (kT)		Procédés	Facteurs clés du développement
			France	Europe		
Développement en cours	Sports et loisirs	HP et GD	31	204	RTM, SMC Enroulement, TRE	Industrialisation des composites TP/HP
	Aéronautique	HP	15	26	RTM Composites TP HP	Assemblage, composites résistants aux chocs
	Matériel médical	HP	3	23	Procédés pour composites TP	Industrialisation des composites TP/HP
Développement incertain	Automobile	GD	145	8560	SMC, TRE, RTM, RIM	Recyclage maîtrisé Aspect, Cadences
	Construction civile	GD et HP	70	685	Pultrusion, SMC Injection	Conception et prescriptions
	Construction nautique	GD et HP	13	168	RTM	Maîtrise du rejet des COV
Développement stabilisé	Construction électrique	GD	47	126	SMC/BMC	Cadences
	Construction industrielle	GD et HP	25	210	Pultrusion, SMC Enroulement	Expérience capitalisée des concepteurs
	Ferroviaire	GD	6	42	RTM	Conception orientée « composites »

3 LES MARCHES D'APPLICATION DES COMPOSITES

Les sous-chapitres suivants présentent chaque marché d'application des composites suivant un schéma unique comportant trois volets :

- les technologies utilisées et émergentes identifiées pour chaque marché,
- les atouts et les apports des matériaux composites dans le marché concerné,
- les freins et les handicaps des composites spécifiques à chaque marché.

3.1 Les composites dans l'aéronautique

3.1.1 **Technologies utilisées et émergentes**

L'aéronautique utilise principalement des composites « hautes performances » constitués d'une matrice époxy associée à un taux élevé de renforts en fibres de carbone.

Les composites les plus couramment utilisés dans l'aéronautique sont constitués :

- d'une **matrice époxy** (100-150F/kg) et des fibres de carbone (150-300F/kg), avec un taux de renfort dépassant 60% ;
- d'une matrice **TP** (**PEEK**, Poly Ether Imide **PEI**) ou hybride (TP/époxy), qui :
- est mise en forme par des technologies simples ne nécessitant pas d'autoclaves : les composites thermoplastiques sont réalisés par dépôt successif de rubans de fibres imprégnés de résines, soumis à une forte pression et chauffés ;
- ne pose pas de contrainte de stockage (contrairement aux composites **TD**).
- les composites à fibres de verre et matrices polyesters ou époxy sont utilisés pour des applications particulières qui nécessitent une bonne isolation électrique.

Les technologies principalement utilisées sont :

- le **drapage manuel** pour les grandes pièces ; les développements actuels permettent de faire évoluer ce procédé vers une certaine automatisation ;
- le procédé **RTM**, dans une certaine mesure automatisable, mais peu adapté aux grandes pièces de l'aéronautique.

Le développement prévisible des **composites thermoplastiques** est conditionné par l'utilisation de résines plus faciles à mettre en œuvre que le **PEEK** (un seul fournisseur) ou le **PEI** qui présente une mauvaise résistance aux fluides hydrauliques.

Les tendances technologiques, pour les dix prochaines années, sont orientées vers :

- la standardisation et la normalisation des matières premières à travers une gamme limitée à une dizaine de produits, ce qui permettra d'approfondir les connaissances sur :
 - le calcul de résistance des matériaux,
 - la modélisation,
 - la standardisation des **contrôles non destructifs** (**CND**).
- le perfectionnement des procédés de fabrication (**RTM**) et des procédés adaptés aux composites thermoplastiques.

3.1.2 Atouts et apports des composites

L'aéronautique utilise les composites « hautes performances » pour la fabrication de pièces de structure primaire des appareils en raison de leur légèreté et de leur souplesse de forme.

Les composites facilitent et réduisent la maintenance des appareils (par exemple les pales d'hélicoptère en métal doivent être remplacées toutes les 50 heures ; celles en composites, après plusieurs mois d'utilisation) grâce à :

- leur résistance à la corrosion,
- leur résistance à la propagation des fissures,
- leur excellente tenue à la fatigue.

Les composites allègent la structure de l'avion ou de l'engin balistique et améliorent la rentabilité des appareils :

- un gain de 450 kg sur la structure de l'avion autorise 6 passagers supplémentaires ;
- 100 kg de gain sur la structure d'une fusée permet un allongement du parcours de 200 km.

L'utilisation des composites s'étend progressivement des pièces de structure secondaire vers des fonctions aux **fortes exigences mécaniques** :

- auparavant, leur utilisation était limitée aux pièces peu sollicitées mécaniquement : aérofreins, volets, meubles de cabines, car les **risques de délaminage** étaient élevés ;
- aujourd'hui, ils constituent certaines des **pièces principales de la structure** : poutres ventrales raidissant le fuselage du A 340/600, voilure extrême de l'ATR 72 (8 m de long), tronçon central de l'A380 (en projet).

Les composites **résistent bien au feu** et **limitent les émissions toxiques**, en particulier pour les composites à matrice époxy.

Les composites permettent d'**adapter le matériau aux fonctions de la pièce** en réalisant des pièces multifonctions (tronçon central A380) ; ils évitent la pose d'une multitude de rivets, constituant autant de points faibles.

Les propriétés isolantes des composites à fibres de verre et à matrice polyesters ou époxydes sont utilisées pour la réalisation de radômes et de guides d'ondes.

3.1.3 Freins et handicaps des composites

Les méthodes d'assemblage des pièces en composite et leur médiocre résistance aux chocs constituent les principaux handicaps des composites dans le secteur aéronautique.

Dans l'aéronautique, un des freins à l'utilisation plus généralisée des composites est constitué par le **coût de finition** des pièces, essentiellement lié à :

- la difficulté de la préparation des états de surface pour la peinture ;
- l'obligation d'effectuer le décapage et le traitement de surface avec des produits très agressifs, car les composites sont justement utilisés pour leur grande résistance chimique.

Les difficultés d'assemblage des pièces en composite réduisent les gains en performances mécaniques et en fiabilité :

- le **perçage et le boulonnage** des pièces en composites posent le problème de la dégradation rapide de leurs propriétés mécaniques ; ce problème est encore mal appréhendé faute d'une connaissance et d'une simulation suffisantes ;
- par ailleurs, les **procédés de collage** des pièces en composite restent encore peu utilisés : ils sont considérés comme coûteux, car entièrement manuels, et peu sûrs dans la mesure où il est impossible d'effectuer des contrôles non destructifs (CND) de la liaison.

La faible résistance aux chocs des composites thermodurcissables (**TD** - époxydes) pose également un problème majeur pour la généralisation de l'utilisation des composites dans l'aéronautique car elle :

- induit des risques de fissuration et de délaminage en profondeur des pièces ;
- provoque des incertitudes liées à la méconnaissance des valeurs exactes de la résistance aux chocs des pièces ; par exemple, la chute accidentelle d'un outil sur une pièce lors de travaux de maintenance peut avoir des répercussions mal évaluées et dont les conséquences ne sont pas immédiatement repérables avant la remise en service de l'appareil,
- constitue un frein au développement pour les pièces de structure.

3.2 Les composites et l'automobile

3.2.1 **Technologies utilisées et émergentes**

Le secteur de l'automobile utilise pour 95% des composites à matrice polyesters et fibres de verre, mais devrait intégrer massivement les composites thermoplastiques d'ici 2003-2006.

Les composites les plus couramment utilisés dans le secteur automobile sont du type « grande diffusion » (**GD**) :

- ce sont, à 95%, des composites thermodurcissables (**TD**) à **résine polyester et fibres de verre** ;
- en quantité limitée, des composites thermoplastiques (**TP**) (polypropylènes, essentiellement à fibres courtes avec un taux de renfort de 20 à 40%) ;
- en quantité très limitée, des composites à matrice époxy (lames de ressort) ;
- de façon marginale, les composites à fibres de carbone (Formule 1).

Le secteur automobile utilise principalement les procédés suivants :

- la compression de **semi produits SMC** (Inoplast, Sotira) pour les moyennes et grandes séries ;
- le **procédé RTM** de Sotira (groupe Sora) pour des petites séries ;
- l'**injection pour les polypropylènes** chargés de fibres courtes ou longues.

Les technologies actuellement en cours de développement concernent les domaines suivants :

- la généralisation de solutions en **composites thermoplastiques** sous forme de pré-imprégnées **TRE/GMT** (par exemple à base de Twintex®) à estamer (Ford, Mercedes, Skoda, Porsche) ;
- le développement des technologies **RIM** ;
- le développement des composites renforcés de fibres minérales ;
- dans 2 à 3 ans, les composites thermoplastiques (**TP**) à fibres longues tels les polypropylènes ;
- l'intégration des **composites tout plastiques** (Curv de BP) en remplacement des **TRE** et **SMC** pour des pièces de garniture;
- l'utilisation de composites renforcés fibres de carbone à condition que le **prix** des fibres de carbone se réduise au niveau de 30F/kg ;
- le dépôt électrostatique d'un revêtement sous forme de poudre sur des pièces en composites **SMC** pour permettre leur **passage en cataphorèse à 190°C** ;
- la réalisation de réservoirs d'hydrogène sous pression pour piles à combustibles.

3.2.2 Atouts et apports des composites

Les composites apportent au secteur de l'automobile une facilité d'entretien, une grande liberté de conception et un allègement valorisé à 20F/kg par les constructeurs.

Les composites permettent une plus grande liberté de conception :

- l'**intégration de fonctions**, c'est à dire la conception de pièces complexes multi-usages, réduit le nombre des pièces nécessaires à la réalisation de sous-ensemble ; par exemple :
 - le hayon arrière de Class A,
 - l'arrière des camionnettes légères américaines (« pick-up »),
 - le tablier multifonction de Microcar, voiture sans permis fabriquée par Bénéteau ;
- les **possibilités de diversification** des séries automobiles sont accrues, car ne nécessitant que des investissements faibles : par exemple, la Renault Mégane peut donner naissance à cinq modèles différents.

Chaque kilo de gagné par l'utilisation des composites sur le poids total d'un véhicule autorise un surcoût de 3 € ou permet d'économiser 1,5 € de carburant par 100 km :

- la réalisation en composite d'un hayon économise 1kg sur 9kg ;
- une consommation d'essence plus faible permet aux constructeurs de respecter des normes plus sévères, comme la norme californienne ayant récemment envisagée de limiter la consommation à 4,5 litres aux 100km ;

Des pièces techniques peuvent être réalisées en **polypropylène chargé de fibres de verre** (par injection ou [TRE](#) estampé) pour leur **résistance aux chocs** (renfort de panneau d'habillage, poutre de pare-chocs).

La durée de vie des pièces est accrue grâce à la meilleure **résistance à la corrosion** des pièces de carrosserie en composite, sans traitement particulier, comparée à celle des pièces en aluminium ou acier traité.

Les pièces en composite facilitent l'entretien de la voiture grâce :

- à la **facilité du montage et du démontage** permise par la conception de formes complexes ; le nombre de pièces et de liaisons mécaniques (vissage) est réduit (pare-chocs) ;
- au **retour automatique** des pièces à leur forme initiale en cas de **choc léger**, dans la limite de la déformation élastique du matériau.

3.2.3 Freins et handicaps des composites

Dans l'automobile, le développement à long terme des composites est menacé par la difficulté de les intégrer dans les chaînes de fabrication et par les exigences de recyclabilité.

Les pièces en composite thermodurcissable ne peuvent pas être assemblées avec les autres composants du véhicule pour être peintes en ligne :

- elles résistent mal aux températures de l'ordre de 190°C du traitement de cataphorèse ;
- elles doivent être peintes hors ligne de montage, ce qui complique et ralentit les cadences de production, et ne permet pas de donner un aspect uniforme aux pièces passées en cataphorèse.

Toutefois, un nouveau procédé, actuellement en cours de développement, de pré-traitement des composites [SMC](#) devrait permettre, à moyen terme (2-5 ans), de les rendre compatibles avec le procédé de cataphorèse et autoriser ainsi l'intégration des étapes de traitement de surface des pièces en composite dans la chaîne de production.

Les procédés de transformation sont limités à la **petite et moyenne série** :

- le procédé **RTM** est limité à 50 à 100 pièces/jour ;
- le procédé **SMC** est limité à 400 pièces/jour ; il pourrait prochainement atteindre 600 pièces/jour.

Les contraintes **écologiques** en amont et en aval de la production du véhicule constituent des handicaps supplémentaires :

- les composites sont classifiés « **produits rouges** » **non écologiques** dans le transport ;
- en fin de vie du véhicule, la **recyclabilité des composites** est insuffisante, malgré quelques efforts isolés comme ceux de Valcor (Mécelec/Inoplast) ; elle reste peu compatible avec l'obligation des constructeurs de concevoir, dès 2004, des véhicules recyclables à 95 %.

Les **difficultés de conception et de fabrication** posées par les composites pourraient **menacer leur développement pérenne** dans ce secteur, car des technologies concurrentes sont en pleine évolution :

- aciers spéciaux plus légers et structures en aluminium nid d'abeilles ;
- la technologie des nanocomposites, aux propriétés mécaniques comparables et à la recyclabilité meilleure que celle des composites TP et TD, pourrait se développer dans le secteur d'ici 5 ans.

3.3 Les composites dans le ferroviaire

3.3.1 **Technologies utilisées et émergentes**

Le secteur ferroviaire utilise principalement des composites à matrice thermodurcissable et fibres longues, mais il apparaît peu dynamique. Les composites les plus utilisés sont :

- à matrice thermodurcissable, essentiellement des **polyesters** ;
- renforcés en fibres de verre à fibres longues.

Les principales technologies de transformation utilisées dans le secteur ferroviaire sont :

- les procédés au contact pour des pièces de petite série (panneaux d'habillage, nez de TGV) ;
- le **RTM pour des pièces d'aménagement intérieur**, fabriquées en plus grande série, est compatible avec les cadences souhaitées : de l'ordre de 50 voitures voyageur par an, soit 4000 sièges par an ou 18 par jour.

Aucun développement technologique majeur n'apparaît dans le secteur ferroviaire, malgré quelques essais menés conjointement par Alstom et la SNCF pour réaliser des voitures en composite.

3.3.2 **Atouts et apports des composites**

Dans le secteur ferroviaire, la facilité de conception et le bon comportement au feu sont les principaux atouts des matériaux composites.

Les composites permettent une **grande liberté de conception** pour des pièces d'habillage aux formes complexes en 3D (pas de profil plan) :

- pièces extérieures : nez de TGV, faces avant de métros ;
- pièces d'intérieur : tablettes, sièges.

Applications et analyse fonctionnelle

L'utilisation de composites permet d'améliorer la **résistance au feu** en réduisant :

- l'opacité des fumées et les émissions toxiques suivant les normes MAF1 de la SNCF ;
- la propagation des flammes.

L'**allègement des voitures** que permet l'utilisation des composites présente néanmoins quelques avantages :

- le respect d'une charge à l'essieu maximale (7 à 20 T) pour des aménagements améliorés ou la **réduction de l'usure des voies**,
- un gain sur l'énergie de traction consommée (panneaux de métros), particulièrement important pour les voitures à deux étages,
- toutefois, les gains de poids sont **valorisé plus modérément** que pour l'automobile (1F/kg seulement).

Les composites apportent au secteur ferroviaire une **maintenance plus économique** grâce à :

- leur bonne résistance à la corrosion ; cet avantage est cependant considéré comme un **apport mineur**, en dehors de quelques applications spécifiques comme les **wagons pour produits chimiques** ;
- un montage et démontage de composants rendus plus aisés, qui permettent la rationalisation de la production des constituants et des procédures de montage.

L'isolation sonore autorisée par les matériaux composites augmente le confort des voitures de voyageurs.

3.3.3 Freins et handicaps des composites

La généralisation des composites dans le ferroviaire est handicapée par leur coût supérieur à 50F/kg, contre 10F/kg pour les solutions en acier.

Les composites therm durcissables renforcés fibres de verre, les plus utilisés dans le secteur, ont un **mauvais comportement** face à :

- des sollicitations mécaniques poly-directionnelles,
- des contraintes statiques,
- des rayons ultraviolets, responsables du vieillissement prématuré de l'aspect des pièces.

La réalisation de pièces de structure en composites « haute performance » (matrice thermoplastique ou époxy, fibres carbone ou Kevlar) est techniquement faisable ; toutefois, elle ne présente pas une rentabilité suffisante pour être prise en considération par les concepteurs : en effet, les composites **HP** (plus de 150 F/kg) sont encore beaucoup trop chers par rapport aux tôles traitées (10F/kg).

La faible rentabilité des composites est accrue par la **relative inexpérience** des concepteurs qui ont tendance à reproduire en composite la conception de pièces habituellement réalisées en métal, sans tenir compte des spécificités de ces nouveaux matériaux.

Les composites ne représentent que 100 kg dans une locomotive de 80 tonnes, mais ils sont heureusement plus présents dans les voitures voyageurs.

3.4 Les composites dans la construction civile

3.4.1 **Technologies utilisées et émergentes**

L'utilisation des composites renforcés de fibres de carbone pourra se développer dans le secteur de la construction civile lorsque leur prix deviendra inférieur à 30F/kg.

Les composites utilisés dans le bâtiment peuvent être :

- à **matrice thermodurcissable (TD)** (polyester, vinylester, phénolique, polyuréthane),
- à **matrice thermoplastique (TP)** ; ces derniers sont en nette progression,
- les renforts sont en **fibres de verre** tissées ou non.

Au Japon, les composites à matrice époxy (TD) et **fibres de carbone** sont assez largement utilisés pour les structures des bâtiments, tandis que les composites à matrice thermoplastiques (TP) sont utilisés pour les aménagements intérieurs.

Les procédés de transformation utilisés dans le bâtiment sont principalement :

- la **compression SMC** et **BMC**, le drapage ou le procédé **RTM** pour les surfaces gauches,
- la découpe de rouleaux thermoplastiques renforcés, par exemple en polycarbonate (PC),
- la **pultrusion**, largement développée aux USA, reste encore peu développée en France.

Les technologies évoluent actuellement vers :

- l'utilisation de composites à matrice thermoplastiques (TP) ;
- le développement du marché de la **rénovation** ;
- les **composites intelligents** qui, en intégrant des capteurs à fibres optiques, permettent de mesurer les déformations des structures ;
- le développement des composites renforcés fibres de carbone en France, si le prix plancher des fibres **atteint 30F/kg**.

3.4.2 **Atouts et apports des composites**

Les composites apportent au bâtiment la souplesse des formes, la résistance aux contraintes climatiques, et les composites renforcés de fibres de carbone la résistance aux séismes.

Les composites permettent de mieux protéger les bâtiments contre les **agressions extérieures** grâce à leurs qualités :

- de **résistance à la corrosion**, qui justifie l'utilisation des composites dans la réhabilitation des ponts aux Etats Unis et en Grande Bretagne (matériaux pultrudés en particulier),
- d'étanchéité et d'**isolation thermique** (panneaux isothermes),
- d'isolation phonique,
- de bonne tenue aux variations climatiques, de température et d'humidité (dômes, maisons mobiles).

La grande rigidité, la résistance aux vibrations des composites à fibres de carbone et leur haut pouvoir d'absorption d'énergie justifient leur emploi dans les constructions en zone sismique, comme au Japon pour :

- la rénovation de bâtiments et d'ouvrages d'art (colonnes)
- la réalisation d'immeuble récents, en particulier à la suite du tremblement de terre de 1995.

Les composites jouent un rôle important dans la sécurité en cas d'incendie :

- réduction des émissions toxiques ;
- limitation de la propagation des flammes.

La capacité des matériaux composites (notamment [BMC](#)) à adopter des **formes complexes** facilite la conception :

- des surfaces gauches, par exemple pour la **réhabilitation** de cathédrales,
- des **formes complexes de grande taille** pour la réalisation de cabines de douche ou de salles de bain monobloc.

La **légèreté** des composites constitue dans certains cas un avantage intéressant pour leur utilisation dans les bâtiments, par exemple pour des charpentes sous-toiture réalisées en poutres **pultrudées** ou des tabliers.

La mise en œuvre des structures en composites requiert des équipements moins chers, plus légers et de taille plus réduite que pour la réalisation de bâtiments en béton et limite le recours aux grues. Cet avantage est décisif en milieu très urbanisé (Tokyo).

3.4.3 Freins et handicaps des composites

L'utilisation des composites dans le bâtiment ne pourra se développer en France que si les prescriptions techniques actuelles sont mieux adaptées à leur spécificité.

Les caractéristiques mécaniques des composites sont généralement inférieures à celle des bétons pour certaines fonctions structurelles, en particulier :

- la résistance à la fissuration,
- la fragilité, conséquence de l'absence de déformation plastique.

Les composites doivent s'imposer face à la forte concurrence des bétons spéciaux (béton étanche, béton résistant à la fissuration) dont l'utilisation est mieux connue des concepteurs du génie civil.

Les composites souffrent également d'un **prix nettement plus élevé** que les matériaux traditionnels :

- 6F/kg pour le bois,
- 15 F/kg pour les bétons,
- 35F/kg pour les composites à fibres de verre.

En France, le développement des composites dans le secteur du bâtiment repose sur une adaptation des réglementations et prescriptions actuelles à la spécificité des composites. Cette démarche, déjà effectuée au Canada et au Japon, a récemment été engagée en France entre le **CSTB** et **Polybat**, groupement d'entreprises constitué pour la promotion des composites dans le BTP.

3.5 Les composites et la construction industrielle

3.5.1 Technologies utilisées et émergentes

Dans la construction industrielle, les fibres de carbone pourront être utilisées à la fois comme renfort et comme capteur, et seront associées à des résines polyesters ou époxy.

Les composites utilisés pour la **fabrication des tuyauteries** sont constitués par :

- une matrice polyester ou époxy,
- des renfort en fibres de verre tissées ou fibres de carbone.

Pour la construction des **réservoirs industriels**, ils sont constitués par une matrice thermodurcissable époxy (haute performance) ou polyester, ou thermoplastique (polyéthylène, polyamide), renforcée de fibres de verre ou de carbone.

Les technologies de mises en œuvre des composites sont essentiellement :

- par **enroulement filamentaire** pour la réalisation de corps creux,
- par drapage ou procédé au contact, pour les pièces de grande dimension,
- par **pultrusion**, essentiellement aux Etats Unis,
- par compression de semi-produits [SMC](#),
- par moulage [RTM](#), pour quelques pièces spécifiques.

Les principales technologies en développement concernent :

- l'intégration de fibres de carbone comme **renfort et capteur** de mesure de déformations ou de contraintes dans certaines constructions industrielles sensibles,
- l'utilisation des composites comme renforcement de structures existantes en béton.

3.5.2 Atouts et apports des composites

L'utilisation des matériaux composites peut contribuer à améliorer la sécurité de certains sites industriels sensibles et faciliter la conception des bâtiments.

Les composites permettent d'**augmenter la fiabilité et la longévité** des équipements en raison de leurs qualités :

- de résistance à l'humidité (éoliennes),
- d'isolation thermique,
- de résistance aux attaques chimiques et à la corrosion (réservoirs de produits chimiques, oléoducs) ;
- de rigidité et de **résistance mécanique** aux fortes pressions (réservoirs jusqu'à 700 bars, conduites jusqu'à 100 bars) et aux **secousses sismiques** pour les conduites de centrales nucléaires.

L'utilisation d'**armatures** en composites (époxydes et aramide) est intéressante pour l'environnement de laboratoire nécessitant une **neutralité magnétique**, par exemple pour les salles de RMN dans des laboratoires ou hôpitaux (au Japon).

Les composites permettent de réduire les conséquences d'un incendie grâce à leur résistance au feu et à leur capacité de limiter l'opacité des fumées et les émissions toxiques.

Les composites facilitent le travail du concepteur grâce à leurs propriétés :

- d'**adaptabilité à des formes complexes** permettant d'intégrer, dès le stade de la création, des fonctions de cadres formant poteaux et de charpentes des bâtiments, de toiture pour la couverture de réservoir d'eau potable.:
- la facilité d'assemblage des pièces (charpente pour un bâtiment de test informatique),
- l'allègement des structures autoportantes de grande taille (cheminées, silos).

Grâce à leur grande rigidité, des pièces industrielles en composite à matrice époxy renforcée de fibres de carbone peuvent être animées de **mouvements précis** n'entraînant que **des vibrations limitées** :

- bras de robots intégrés dans les chaînes de fabrication, rouleaux de presse ;
- pales d'éoliennes, ventilateurs, bras de mélangeurs.

3.5.3 Freins et handicaps des composites

Pour les constructions industrielles standard, les matériaux composites ont un prix encore trop élevé et leur caractérisation en milieu corrosif est insuffisamment connue.

Les matériaux composites résistent mal aux températures élevées : la température maximale admissible pour les tuyauteries est de **200°C**.

Les composites ont un prix élevé par rapport aux solutions traditionnelles pour des applications relevant de normes de sécurité courantes telles que :

- les conduites en PEE et PVC pour des pressions inférieures à 10 bars,
- les conduites en acier inox pour des pressions supérieures à 100 bars.

Malgré les facilités de conception qu'ils autorisent, les composites se heurtent à la concurrence de matériaux traditionnels (béton, alliages) :

- les concepteurs **manquent de recul** pour l'évaluation des performances des constructions industrielles en composite,
- les pièces en matériaux composites soumises à des **contraintes mécaniques fortes**, en **milieu fortement corrosif**, subissent une dégradation importante de leurs propriétés mécaniques en même temps que leur résistance à la corrosion décroît dans des proportions qui ne sont pas, actuellement, mesurables.

3.6 Les composites et la construction nautique

3.6.1 Technologies utilisées et émergentes

Le moulage au contact représente encore 85% des composites utilisés dans la construction nautique. Parmi les composites utilisés dans l'industrie nautique :

- les plus répandus sont à matrice polyester et fibres de verre,
- les composites à matrice époxy et fibres de carbone ne sont utilisés que pour les bateaux de compétition,
- les composites à matrice polyuréthane et fibres de verre et les composites à matrice polypropylène et fibres courtes (Pultrex) pour les structures sandwich progressent notablement.

Les technologies de transformation actuellement dominantes sont :

- le **moulage au contact** en moule ouvert, qui représente encore **85% des composites transformés** dans le secteur, en particulier pour les pièces de grande taille (coques et ponts),
- le **procédé RTM** pour les pièces de taille moyenne,
- le **procédé SMC** pour les jet-skis.

Les technologies qui sont en cours de développement tendent vers :

- l'adoption de **procédés plus écologiques** pour améliorer les conditions de travail : [RTM](#), injection sous vide [SCRIMP](#),
- la généralisation des composites **thermoplastiques renforcés de fibres de verre** et de la technologie d'**injection**, au **détriment du moulage au contact**,
- l'industrialisation des procédés de fabrication (mécanisation des déplacements, robotisation partielle),
- l'utilisation des fibres naturelles.

3.6.2 Atouts et apports des composites

Dans la construction nautique de plaisance, les composites sont indispensables pour les embarcations de taille inférieure à 40 mètres.

L'**allègement des structures** est le principal apport des composites utilisées dans la construction nautique :

- des bateaux commerciaux de transport de fret et de passagers,
- des dragueurs de mines,
- des petites embarcations de tourisme et les bateaux de compétition.

Les composites permettent la réalisation de **formes complexes** pour la fabrication de :

- structures autoporteuses (coques, ponts, réservoirs),
- pièces de structure.

L'**entretien** des bateaux se trouve facilité grâce à :

- la **résistance à la corrosion** qui permet de réduire la fréquence des carénages,
- l'accroissement de la durée de vie des composants.

Les composites participent au renforcement des structures par :

- une meilleure résistance aux chocs pour les composites thermoplastiques,
- leur bonne **résistance mécanique et leur rigidité** (panneaux sandwich, structures en composite à fibres de carbone).

Les composites sont majoritairement utilisés pour **95% des petites embarcations** allant jusqu'à 40 mètres de longueur et représentent :

- 100 % des bateaux de 5 à 15m,
- 50% des bateaux de 30 à 40 m.

Les constructeurs nautiques de plaisance sont très fortement dépendants de l'industrie des composites.

3.6.3 Freins et handicaps des composites

Les problèmes d'environnement sont susceptibles de menacer à terme l'industrie nautique des matériaux composites ; en effet, les nouvelles réglementations européennes limitant les émissions de **COV** (styrène) pourraient constituer une menace pour l'industrie nautique si elle ne s'adapte pas¹ :

- la nouvelle législation européenne, en cours d'élaboration, pourrait limiter les **émissions de styrène** en dessous de 30 ppm, alors qu'aujourd'hui encore certains industriels de l'industrie nautique **rencontrent des difficultés pour respecter** la limitation actuelle à 50 ppm.
- les **conditions d'application** des procédés de mise en œuvre, qui imposeront à moyen terme des dispositifs de contrôle d'atmosphère.

Les autres problèmes posés par les composites pour la réalisation des pièces dans l'industrie nautique concernent le stockage des matières premières : en effet, les résines polyesters, les plus couramment utilisées, doivent être stockées, pendant une **durée limitée** à trois mois, à température inférieure à -18°C pour éviter la polymérisation.

¹ Voir ci-après le chapitre 6 : Menaces & Opportunités

Le coût d'achat des fibres « hautes performances » (aramide, carbone), **supérieur à 100F/kg** freine également leur utilisation dans les composites techniques en dehors des bateaux de compétition.

3.7 Les composites dans le secteur médical

3.7.1 **Technologies utilisées et émergentes**

Les applications des composites aux secteurs médical et de la sécurité sont très récentes et concernent très peu les solutions traditionnelles (résine polyester et fibres de verre), mais plutôt les composites :

- à **matrice époxy** et fibres de carbone, ou d'aramide
- à matrice thermoplastique (**polyamide 12 ou autre**) et fibres longues de verre, d'aramide ou de carbone.

Les applications médicales des composites sont réservées aux **composites « haute performances »** et font appel à des procédés encore peu industrialisés :

- l'enroulement filamentaire,
- la réalisation de préimprégnés thermoplastiques associée à des procédés d'estampage ([TRE](#)).

3.7.2 **Atouts et apports des composites**

L'utilisation des composites permet d'**augmenter la fiabilité et la précision** des instruments grâce à :

- une meilleure résistance aux chocs,
- une grande rigidité pour les instruments chirurgicaux de précision (guides de perçage auparavant en Inox, prothèses),
- une bonne résistance à la corrosion (prothèses, brancards).

La réalisation en composites des bouteilles d'oxygène pour l'assistance respiratoire autorise une **augmentation de capacité** grâce à :

- leur **allègement** par rapport aux bouteilles traditionnelles en alliages, ce qui permet de ménager la fatigue des intervenants (pompiers - une bouteille en composite pèse **3 kg contre 10 kg** pour une bouteille de même volume en acier) et, à masse égale, de doubler la capacité de stockage.
- une meilleure tenue à la pression, autorisant des pressions de stockage de 700 bars contre 400 avec des alliages.

La **transparence aux ondes électromagnétiques** peut également justifier l'emploi de matériaux composites dans certaines applications (rayons X) : tables de scanner (au Japon).

3.7.3 **Freins et handicaps des composites**

Le médical reste attaché à l'utilisation des aciers spéciaux dont le prix de 50F/kg reste bien au-dessous de celui des composites [HP](#) qui peut atteindre 300F/kg. La généralisation de l'utilisation des composites pour des applications médicales ou de sécurité est freinée par le **coût des pièces** en composites comparé à celui des solutions traditionnelles :

- les **aciers spéciaux** reviennent à 50 à 70 F/kg,
- les matériaux constituant les composites coûtent plus de 300F/kg.

Les équipements médicaux, à l'inverse de l'aéronautique, représentent un secteur d'application dans lequel l'adoption de solutions en matériaux composites est récente et souvent encore au stade expérimental :

- l'utilisation des composites est limitée à quelques applications en **phase pré-industrielle** ou en série limitée ([enroulement filamentaire](#), estampage [TRE](#), composites à base de polyamide 12),
- les alliages spéciaux, tels les aciers 440, bénéficient d'une **forte implantation**.

3.8 Les composites dans les équipements de sports et loisirs

3.8.1 **Technologies utilisées et émergentes**

Les sports et loisirs utilisent des composites « hautes performances » avec un taux de renforts de plus de 70% :

- à **matrice époxy** et fibres de verre tissées avec un taux de renforts pouvant atteindre 70%, l'époxy assurant, en outre, une fonction adhésive entre les différents constituants,
- à matrice polyamide 12 et fibres de carbone,
- à tissus en Twintex ®

Les pièces en composite renforcé de fibres courtes, provenant du moulage sous pression de semi-produits [SMC](#), sont majoritairement utilisées.

Pour les composites « hautes performances » utilisés dans les cannes à pêche, les raquettes de tennis, les cadres de vélos, les procédés les plus répandus sont :

- l'enroulement filamentaire,
- le procédé RTM.

Des technologies de transformation des **composites thermoplastiques** font leur apparition :

- le moulage en compression,
- le procédé RTM appliqué aux polyamides 12 par Ems-Chimie,
- l'utilisation de préimprégnés combinée à l'estampage [TRE](#),
- l'utilisation des matrices polyuréthane ([PU](#)).

3.8.2 **Atouts et apports des composites**

Les composites permettent d'augmenter sur mesure les performances et la fiabilité des articles de sports. Ils permettent d'accroître la longévité des articles de sport, sans réparation, pendant toute leur durée de vie (de 1 à 7 ans) grâce à :

- leur résistance mécanique (raquettes, skis de Rossignol),
- pour les composites thermoplastiques, leur résistance aux chocs (raquettes),
- leur rigidité (clubs de golf, battes de base-ball),
- leur résistance à l'humidité (toboggans aquatiques).

Les composites augmentent les performances et le **confort des articles de sport** grâce à :

- leur **légèreté** (cadre de vélos, raquettes),
- leur capacité d'amortissement des vibrations variables (skis, guidon de vélo),
- l'optimisation des formes en raison de l'adaptabilité des composites.

Les applications des composites dans les sports et loisirs sont **très largement diversifiées**, mais elles mettent systématiquement en concurrence les matériaux en fonction des **différentes gammes de comportement souhaitées** ; par exemple, un ski professionnel utilisera :

- les composites pour amortir les vibrations,
- au contraire, l'aluminium pour un meilleur comportement en neige profonde.

Les matériaux composites représentent une part significative dans les sports et loisirs et peuvent constituer jusqu'à 65% du poids d'une paire de skis.

Les composites peuvent être intégrés dans des structures complexes constituant des « composites de composites », par exemple pour les skis.

3.8.3 Freins et handicaps des composites

La résistance mécanique et élastique des **composites thermoplastique TP** est encore trop faible comparée à celle des alliages légers, en particulier pour les composites à matrice en polypropylène (**PP**) et en polyamide (**PA**).

Les matériaux composites à matrice thermoplastique se prêtent difficilement à leur intégration dans des structures complexes du fait de leurs propriétés adhésives **médiocres par rapport à celles des époxydes**.

L'utilisation des composites dans les sports et loisirs doit faire la part entre économie et écologie :

- la transformation des composites à bas coût provoque des émissions toxiques (imprégnation humide des époxy),
- les procédés de transformation des composites thermoplastiques sont plus écologiques mais leur coût est encore trop élevé (plus de 350F/kg).

3.9 Les composites et la construction électrique

3.9.1 Technologies utilisées et émergentes

Le secteur de la construction électrique et électronique utilise massivement des **composites « grande diffusion »**, essentiellement sous forme de semi-produits **SMC** comprimés :

- à matrice thermdurcissable (polyester),
- renforcés par des fibres de verre (courtes ou longues).

Du fait des cadences de fabrication élevées imposées par le secteur, les principales technologies de transformation utilisées sont la **compression de préimprégnés thermdurcissables** :

- de **plaques SMC**, technologie majoritaire dans la construction électrique ;
- de semi-produits **BMC**.

Des technologies d'**injection de thermoplastiques renforcés ou de thermdurcissables** peuvent être également utilisées pour des pièces soumises à de faibles sollicitations mécaniques.

Bien qu'il utilise massivement les matériaux composites, le secteur de la construction électrique et électronique n'envisage pas de grands bouleversements technologiques ; les procédés de transformation et les matériaux utilisés devraient rester relativement stables.

3.9.2 Atouts et apports des composites

En utilisant les propriétés remarquables des matériaux composites, la construction électrique réalise des équipements fiables, aux fonctions multiples et longue durée de vie

Les caractéristiques propres aux matériaux composites permettent de répondre à des besoins liés à la sécurité, tels que :

- leur propriété d'**isolant électrique** pour les supports de rail, les noyaux de transformateurs, les coupe-circuits,
- leur **transparence aux ondes électromagnétiques** pour les radômes (guidage d'ondes),
- leur **résistance au feu** (boîtiers de disjoncteurs),
- la **résistance aux températures élevées** des composites à matrice polyesters (radiateurs d'intérieur surmoulés sur insert métallique).

Les matériaux composites apportent également aux équipements électriques une **grande durée de vie**, permise par :

- une bonne **résistance à la corrosion** pour les éléments de protection extérieure (armoires, coffres de compteurs, pylônes),
- des propriétés mécaniques suffisantes, en particulier une assez bonne **rigidité**, permettant la réalisation d'antennes, de paraboles, de supports de lampes.

La **souplesse des formes** obtenue par le moulage par compression [SMC](#) ou [BMC](#) permet :

- leur adaptation aux petites pièces comme les circuits imprimés,
- l'intégration de fonctions pour la réalisation de circuits imprimés, de coffres de compteur.

La construction électrique et électronique devrait poursuivre l'utilisation massive de matériaux composites en **remplacement** de certains composants métalliques, mais ne devrait pas consommer davantage de composites car la taille des composants va en diminuant.

3.9.3 Freins et handicaps des composites

Les cadences de production des composants électriques, pouvant atteindre plusieurs milliers par jour, sont peu compatibles avec celles du procédé de compression [SMC](#)

Les composites thermoplastiques, en particulier les pré-imprégnés estampables [TRE](#), malgré les conditions de stockage favorables et les cadences de production autorisées sur ces matériaux, sont handicapés par rapport aux composites [TD](#) du fait des conditions de fonctionnement exigées pour les équipements électriques :

- les **caractéristiques mécaniques** sont moins bonnes que celles obtenues par [SMC](#),
- leur résistance aux températures élevées est plus faible.

Pour les circuits imprimés, les **cadences de production**, imposées par les besoins du secteur de la construction électrique, sont de l'ordre de **plusieurs milliers par jour** :

- elles sont à la limite des capacités permises par les procédés SMC/BMC qui atteignent à peine 600 pièces par jour, ou conduisent le transformateur à s'équiper de plusieurs presses ;
- en l'absence de petites séries utilisant une chaîne de montage particulière, elles rendent plus difficile la mise en place de procédés innovants.

Pour les applications « grande diffusion » (circuits imprimés, boîtiers), l'obligation, imposée à terme aux transformateurs, d'apporter des solutions aux problèmes de **recyclage des matériaux composites** pourrait créer de nouvelles difficultés dans ce secteur.

CHAPITRE 4
R&D ET SAVOIR-FAIRE
TECHNOLOGIQUE FRANÇAIS

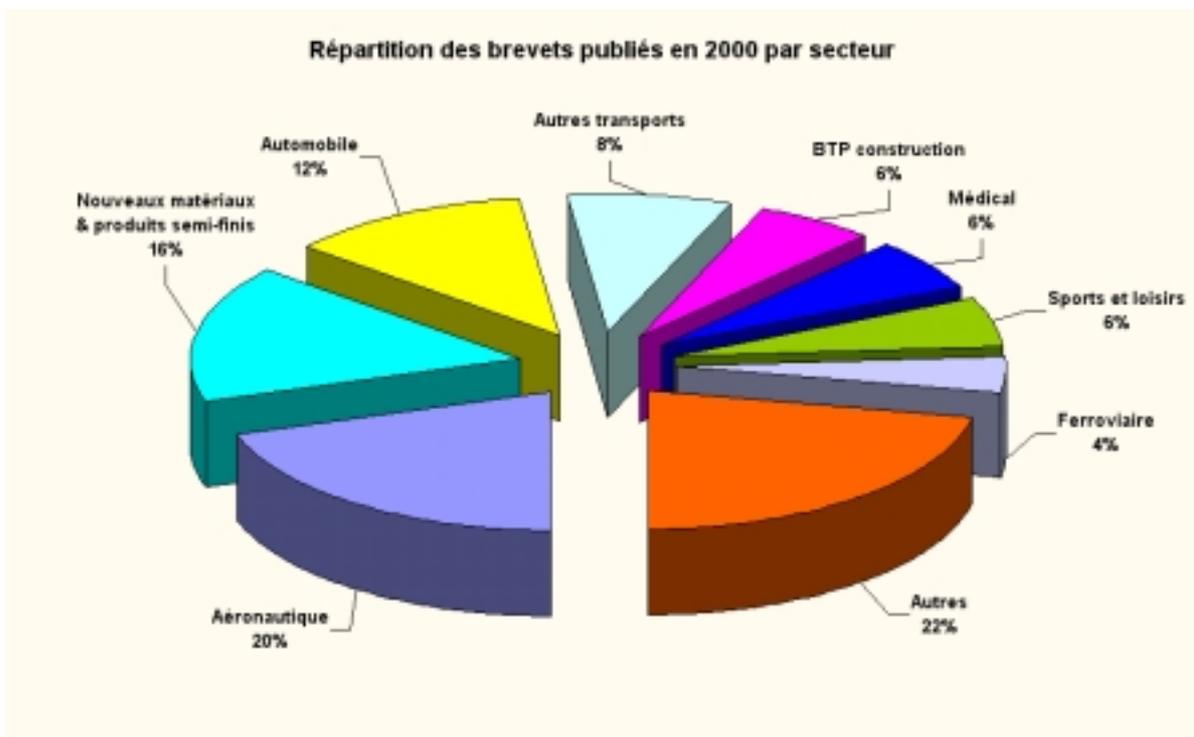
1 PLACE DE LA FRANCE DANS LA RECHERCHE

1.1 Place de la France dans le domaine des brevets

L'étude bibliométrique présente une analyse des brevets, concernant l'élaboration ou l'utilisation des matériaux composites, déposés par des sociétés françaises comparée avec les brevets déposés dans le monde¹.

En France, le nombre de brevets publiés en 2000 concernant les composites indique que :

- entre 1998 et 2000, les acteurs français du domaine des composites ont déposé 100 brevets contre 800 pour les américains,
- une douzaine de brevets sont déposés par des individuels sur des innovations ponctuelles ; d'une manière générale ces brevets sont mal protégés au plan international ;
- les secteurs industriels qui déposent le plus grand nombre de brevets en France en 2000 sont respectivement :
 - le transport (tous types), concernés par 21 brevets, soit 44% du nombre total de brevets ;
 - la fabrication de nouveaux matériaux ou produits semis-finis, concernés par 8 brevets.



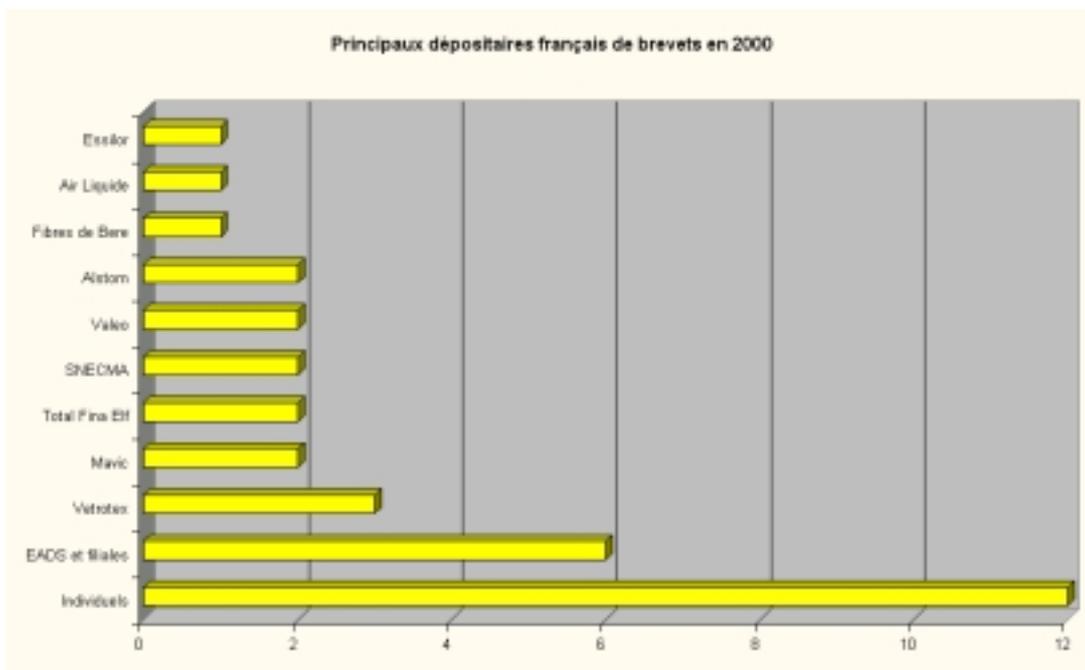
L'étude comparative des brevets internationaux de l'Office Européen des Brevets (PCT) publiés entre 1998 et 2000 traitant des matériaux composites montre que :

1. les **acteurs américains** restent les principaux dépositaires de brevets internationaux publiés entre 1998 et 2000 avec plus de 800 brevets entre 1998 et 2000, et près de 300 en 2000.

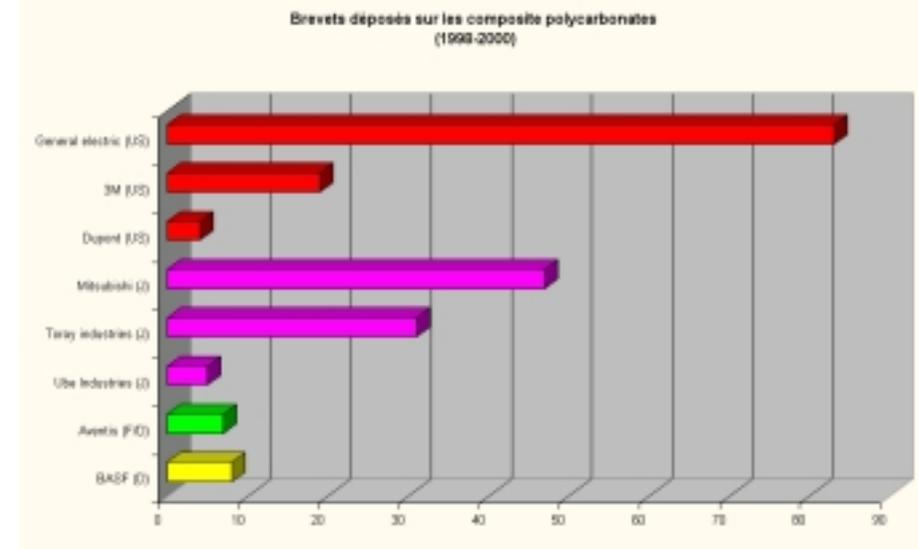
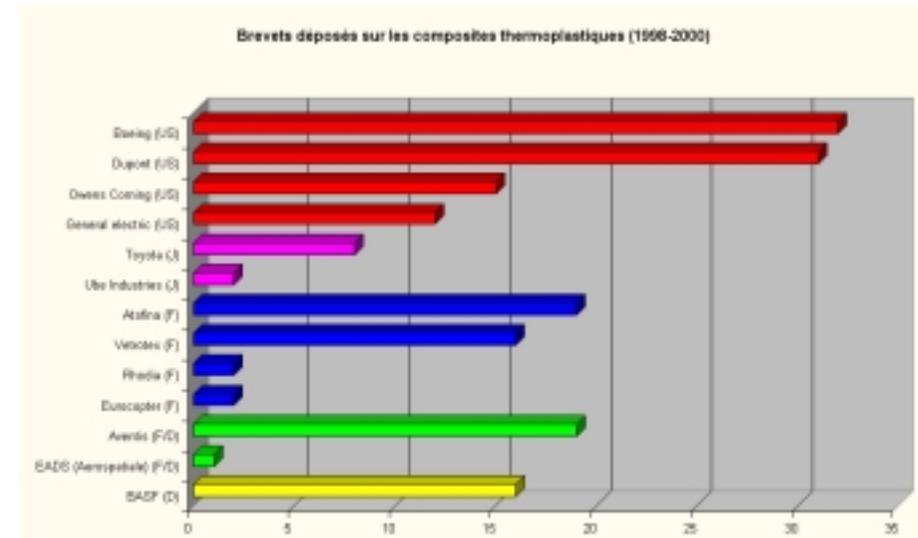
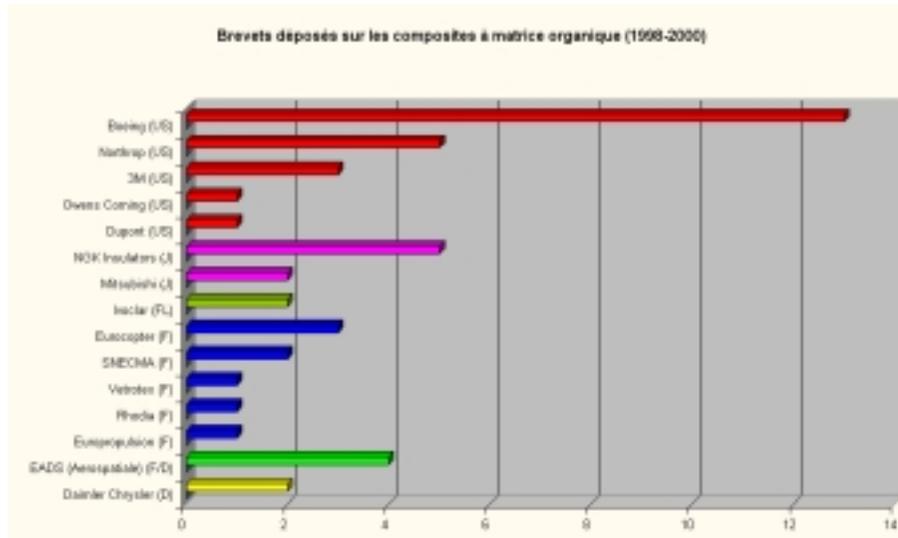
¹ Voir en annexe le tableau « Brevets déposés par pays et par thèmes de 1998 à 2000 ».

R & D et savoir faire technologique français

- les acteurs américains de l'aéronautique (Northrop, Boeing, Lockheed Martin) sont particulièrement actifs dans les composites à matrice thermoplastique (TP) ;
 - les industriels de la chimie (GE Plastics, Dupont, 3M) s'intéressent plus particulièrement aux brevets sur les composites thermoplastiques à matrice polycarbonate.
2. les **acteurs japonais** (NGK Insulators, Toray, Mitsubishi) représentent la deuxième nation pour le nombre de brevets publiés sur les matériaux composites :
- plus de 200 de brevets sur les matériaux composites entre 1998 et 2000, dont plus de 80 en 2000 sont déposés par des sociétés japonaises ;
 - la plupart des brevets déposés entre 1998 et 2000 traitent des composites à fibre de carbone, secteur contrôlé majoritairement par les japonais ;
3. les **allemands** sont les acteurs européens les plus actifs dans le domaine des composites :
- environ 200 brevets ont été publiés entre 1998 et 2000, mais seulement 70 en 2000 ;
 - les brevets concernent essentiellement l'utilisation des résines (BASF, Hoechst) ou les applications dans l'automobile (Daimler Chrysler) ;
4. les **acteurs français** (producteurs et utilisateurs) sont distancés par leurs homologues américains, japonais et allemands, mais ont été relativement dynamiques en 2000 :
- une centaine de brevets ont été publiés entre 1998 et 2000 par des acteurs français, dont une soixantaine en 2000 ;
 - les fournisseurs de produits pour la transformation des composites (Vetrotex, Atofina) se sont concentrés sur les brevets traitant des composites à matrice thermoplastique ;
 - les acteurs français ou franco-européens de l'aéronautique (EADS, Snecma, Eurocopter) sont les seuls utilisateurs des matériaux composites à avoir publié massivement des brevets sur ce sujet, en particulier sur les matériaux composites à fibres de carbone.

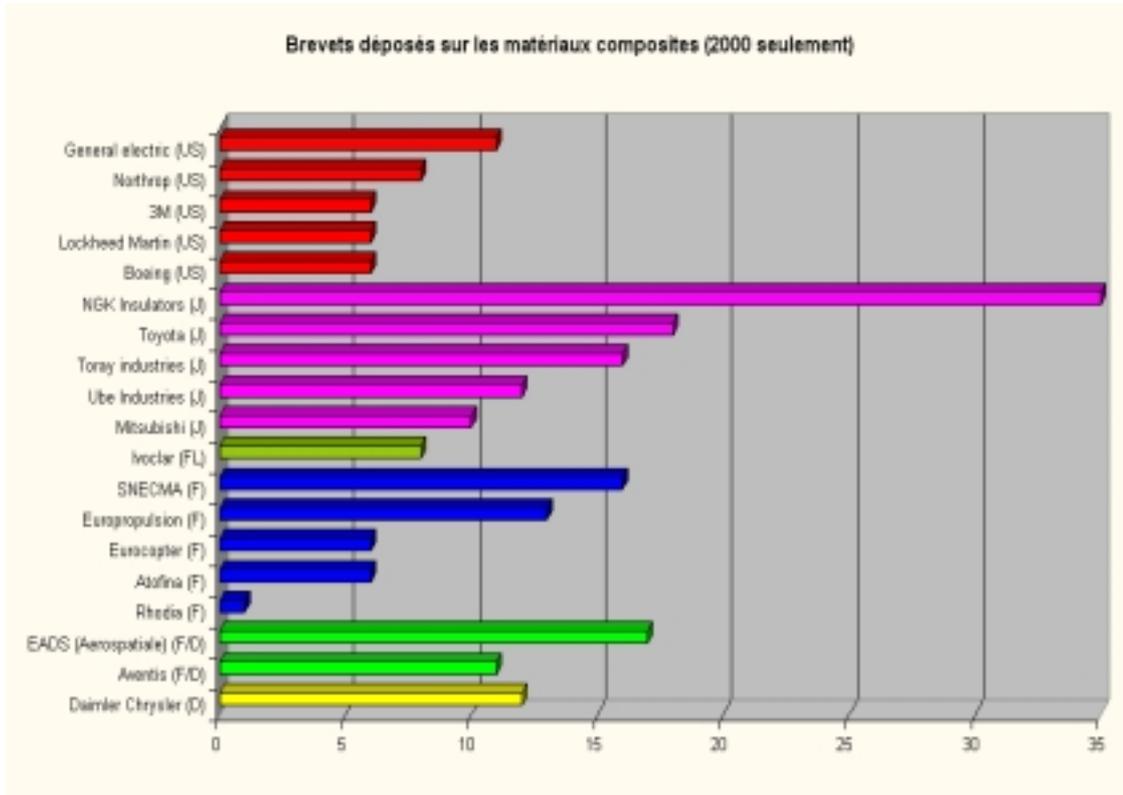


Nombre de brevets déposés sur les différents types de matériaux composites



5. chacun des autres acteurs européens a publié moins de brevets sur les matériaux composites que la France entre 1998 et 2000 :

- environ 50 brevets sur les composites ont été publiés par les entreprises anglaises,
- 20 brevets sur les matériaux composites proviennent de sociétés italiennes.



1.2 Place de la France dans les programmes de recherche européens

Les acteurs français participent à au moins 8 programmes de recherche sur les composites et ont investi plus de 80 M€ dans les projets Eureka. Depuis 1987, 17 projets Eureka ont concerné l'élaboration ou l'utilisation des composites :

- les acteurs français ont pris part à six (6) projets, soit moins que le Royaume Uni (8), et plus que l'Allemagne (2) : EADS (Sodern, Aérospatiale), PSA, Cetim, Vetrotex ;
- le financement des projets Eureka par les acteurs français est le plus élevé (52 M€), devant l'Allemagne (21 M€) et le Royaume Uni (19 M€) ;
- les projets à faible budget (moins de 8 M€) représentent un investissement global de 40 M€ et concernent :
 - l'utilisation des composites dans la construction (6 projets),
 - le développement de nouveaux matériaux ou procédés (5 projets).
- les acteurs français ont eu une participation majoritaire dans trois projets représentant un investissement global de 135 M€ :
 - PSA, Cetim, Vetrotex : projet de recherche sur les nouveaux matériaux pour l'automobile (budget de 60 M€), traitant en partie des applications des composites,
 - Renault : projet d'optimisation des matériaux pour l'automobile (budget de 51 M€),
 - EADS : projet de contrôle des matériaux pour l'aéronautique (budget de 24 M€).

R & D et savoir faire technologique français

Les projets Eureka concernant les composites sont tous terminés, à l'exception du projet nommé **Comrehab**, traitant de la réhabilitation des monuments historiques par l'utilisation de matériaux composites (budget de 4 M€).

La France apparaît moins impliquée que l'Allemagne ou le Royaume Uni dans les quinze projets de recherche rattachés au cinquième programme cadre de la recherche européenne (5^{ème} PCRD) traitant des matériaux composites :

- les acteurs français sont présents dans 8 projets contre 13 pour les acteurs allemands et anglais,
- le GIE Airbus (Toulouse) est le seul représentant français maître d'œuvre d'un projet.

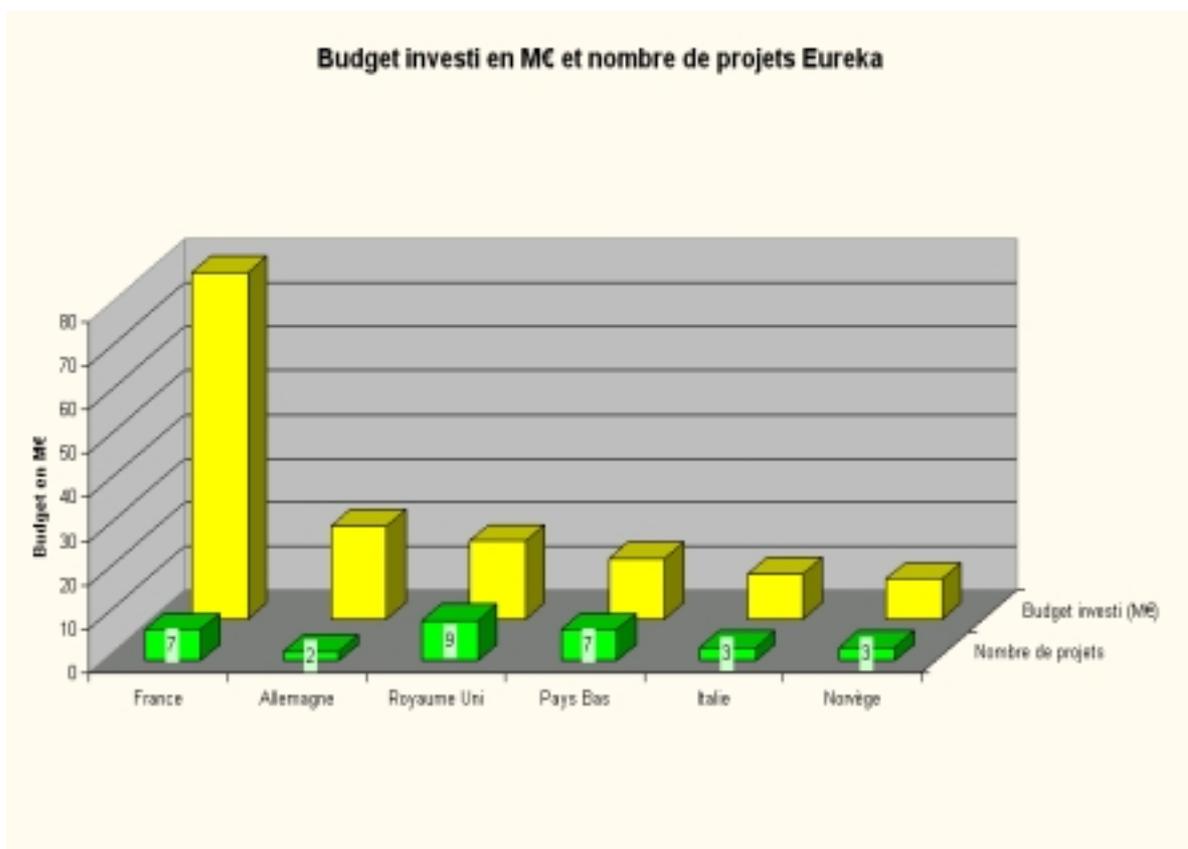
Les programmes de recherche du 5^{ème} PCRD sur les matériaux composites dans lesquels des français sont impliqués traitent de l'étude de caractérisation et de contrôle des matériaux composites en vue d'applications, essentiellement dans les domaines de :

- l'automobile, en particulier pour la réduction de poids permettant moins de rejets polluants,
- l'aéronautique.

Les acteurs français impliqués dans les programmes de recherche du 5^{ème} PCRD sur les composites sont principalement :

- les industriels de l'aéronautique (EADS, SNECMA) ou automobile (Renault),
- les laboratoires et centres de recherche (CEA, Mines de Douai, Cetim).

Les fournisseurs français de la filière composite (résiniers, producteurs de fibres, tisseurs, transformateurs) sont peu représentés dans les programmes du 5^{ème} PCRD, à l'exception de Vetrotex et de Composites Aquitaine.



2 R&D ET SAVOIR-FAIRE TECHNOLOGIQUES FRANÇAIS

2.1 Les centres de recherche français

Les centres de recherche français spécialisés dans les composites, diversifiés et répartis, manquent relativement de notoriété face aux autres centres européens, plus concentrés. En France, les principaux spécialistes des centres de recherche universitaires traitant des matériaux composites se sont **répartis suivant leur spécialités** :

- pour la **modélisation** des composites : École des Mines de Douai, École des Mines de Paris (Sophia Antipolis) ;
- pour les tests par **émission acoustique** : ENS Cachan ;
- pour l'**étude des résines** : INSA de Lyon ;
- pour l'étude des **procédés de transformation** : Ecole des Mines de Douai ;
- pour la **caractérisation** des composites : ENSAM, Ecole des Mines de Douai.

Les centres de recherche industrielle les plus souvent cités sont :

- **Onera** pour les composites « hautes performances » ([HP](#)) ;
- le **Pôle de Plasturgie de l'Est** (PPE, Saint-Avold), essentiellement pour les procédés [RTM](#) ;
- le **Pôle Européen de Plasturgie** (PEP, Oyonnax), pour les composites thermoplastiques ;
- **Compositec**, pour les composites à matrice thermodurcissable ([TD](#)) ;
- **Cetim** (Nantes) et **CRITT Matériaux** (Rochefort) ;
- **Saint Gobain** (Vetrotex), pour les renforts en fibres de verre.

L'importance des centres français de recherche français auprès de certaines multinationales françaises apparaît **relativement faible** comparée à celle de certains autres centres de recherche européens, car ils sont plus spécialisés et proches des PME/PMI.

- [IVW](#) de Kaiserslautern, où le Pôle de Plasturgie de l'Est de Saint Avold (à 100 km) est peu connu ;
- [EPFL](#) de Lausanne, qui travaille en particulier avec les entreprises savoyardes du secteur des composites ;
- [IKV](#) d'Aix la Chapelle ;
- Université de Delft.

Les centres français de R&D, répartis sur le territoire et diversifiés, apparaissent d'une taille insuffisante face aux centres étrangers :

- qui concentrent leurs travaux sur les différents procédés de transformation (cas de IKV) ou les différents types de composites ([EPFL](#)),
- ou qui sont adossés à une **université reconnue** internationalement par sa grande taille (Université de Delft, EPFL).

En participant aux programmes français ou européens, les industriels français, impliqués dans la filière composite, ont la possibilité de **développer des projets** que leur capacité propre de recherche ou de financement **ne leur permettrait pas**.

2.2 Coopération industrie/centres de recherche dans la filière composite

La collaboration entre universités et PME/PMI du secteur des composites pourrait être développée d'une manière plus large.

Les centres de recherche industrielle ont développé des modes de collaborations avec l'industrie très différents en fonction des objectifs poursuivis :

- les **centres nationaux spécialisés** (Comositec, [PPE](#)) collaborent plus particulièrement sur des projets à **long terme** et plutôt avec des organisations de grande taille ;
- les [CRITT](#) et les [CRT](#) travaillant sur les composites (notamment Poitou-Charentes, Picardie, [ISPA](#)) réalisent en **quelques semaines** des études sur un problème technique ponctuel. Leurs services s'adressent généralement aux PMI locales :
 - par le faible niveau de prix de leur intervention (quelques milliers d'euros) ;
 - en les faisant bénéficier de l'utilisation d'équipements de contrôle qui ne sont en général disponibles que dans les groupes industriels de taille internationale.

La collaboration entre les centres de recherche et les industriels est plus institutionnalisée en France qu'à l'étranger, mais elle est plus systématique en Allemagne, par exemple :

- des projets **concrets et fréquents** impliquant des étudiants remplacent les stages aux contenus souvent mal définis ;
- les **laboratoires universitaires** fournissent des services comparables à ceux des CRITT.

2.3 Protection des innovations françaises

Il semble également que les industriels soient encore réticents à effectuer les démarches et à assumer les coûts pour protéger leurs innovations par le dépôt de brevets.

En effet, le dépôt de brevets, nécessairement internationaux, par des PMI est freiné par :

- une relative méconnaissance des procédures de dépôt par les industriels ;
- le coût élevé, pour une PME/PMI, que représente le dépôt de brevet : 40 k€ à la publication et 7,5 €/an pour l'entretien.

Il serait toutefois nécessaire que les institutions et les PMI françaises surmontent ces difficultés et fassent l'effort de déposer un **brevet international** pour **conforter leur avance technologique** et bénéficier de la protection de leur innovation. Le dépôt de brevet permettrait, en outre, à ces entreprises de disposer d'une source de revenu provenant des licences qui pourrait contribuer au financement de leur R&D et d'arguments supplémentaires lors de négociation avec des partenaires étrangers éventuels.

Les programmes de recherche aux Etats Unis

Le National Institute of Standards and Technology (NIST) aux Etats Unis a lancé un programme de soutien à l'innovation et à la R&D dénommé Advanced Technology Program (ATP).

Plusieurs programmes de l'ATP concernent le développement des matériaux composites sur les thèmes

- *de nouveaux procédés de transformation, plus industriels que les moulage au contact par projection, pour assurer la compatibilité des composites avec les cadences de l'automobile et réduire les coûts de production liés à une utilisation intensive de main d'œuvre.*

- *d'une meilleure utilisation des composites dans la construction civile et industrielle, en particulier par la résolution de certains problèmes techniques concernant la réparabilité, l'élaboration de normes et de codes, les contrôles de qualité.*

La dotation des programmes ATP de soutien à la recherche - 250 M€ entre 1994 et 1999 - est sensiblement inférieure à la dotation des programmes européens, qui s'élève à environ 550 M€ pour la même période pour les programmes Brite Euram et 150 M€ pour les programmes Eureka. Toutefois les programmes ATP paraissent mieux ciblés sur des applications concrètes et plus lisibles car regroupés sous une bannière unique.

3 POSITIONNEMENT DE LA FRANCE

3.1 L'offre française de matières premières

En amont de la transformation des composites, l'offre française en fibres, en résines et en semi-produits manque de cohérence face aux producteurs allemands, américains et japonais.

A l'amont des composites, la production française de résines ne couvre pas l'ensemble de la gamme :

- l'offre française de l'industrie chimique se limite aux résines de base (polyesters, polypropylène chargé, tel que le Pultrex®),
- les résines plus élaborées sont fournies par des producteurs américains, voire européens :
 - époxy,
 - polycarbonate (Dupont),
 - polyamides, développées par Ems (CH), mais où les français sont bien implantés (Atofina pour le PA 12, Rhodia).

La production de **fibres de carbone** n'est pas maîtrisée par les européens :

- Soficar (groupe japonais Toray) produit des fibres à 75% japonaises,
- Accordis (Tenax) produit des fibres de carbone sous licence japonaise,
- Zoltech est une société hongroise émigrée aux USA.

Les européens ont développé, dans les années 1970, une activité de production de fibres de carbone, mais le choix du précurseur, déterminant pour la qualité des fibres, s'est révélé moins pertinent que celui des japonais et américains.

Seule la **production de fibres de verre** (Saint Gobain - Vetrotex), mais elle ne donne pas systématiquement au secteur industriel français des composites une avancée technologique notable : c'est, en effet, aux Etats Unis que, depuis 1997, Vetrotex, pourtant bien implanté en France, a développé la production de **Twintex®**.

La production des fibres d'aramide est maîtrisée par Dupont de Nemours (Kevlar®) et le germano-batave ENKA (Twaron®)

Bien que la compression [SMC/BMC](#) représente le tiers des composites transformés en France, la production française de **semi-produits SMC/BMC**, essentiellement réalisée par Inoplast, est encore marginale par rapport à celle de ses concurrents allemands (Lorenz, Menzolit, cette dernière étant en forte expansion), et américaines (BMC Inc., Premix).

3.2 Evaluation qualitative de l'offre française

A l'horizon 2005, l'offre française de composites devrait être améliorée dans les secteurs de l'automobile, de la construction et de l'industrie nautique.

La qualité de l'offre française, par secteur, confrontée aux solutions internationales, peut être évaluée en fonction de plusieurs critères :

- maîtrise des technologies-clefs de transformation par secteur ;
- maîtrise des moyens de mise en conformité aux contraintes connexes, comme le recyclage.

Les marchés américains et japonais ont été plus précoces que les marchés européens, mais les procédés de production des transformateurs américains et japonais restent, dans l'ensemble, peu automatisés, ce qui risque, à terme, de constituer un handicap face à leurs homologues français, généralement plus innovants.

La qualité de l'offre française n'apparaît que **moyenne** pour les secteurs de l'automobile et du nautique ; cette notation, apparemment en contradiction avec les résultats de ces secteurs, provient de la faible prise en compte des contraintes environnementales (émissions de [COV](#), recyclage), en particulier face aux pays germaniques et nordiques.

Dans le domaine de la construction civile, la place de la France serait assez facilement perfectible, en particulier avec le développement des profilés pultrudés.

Nodal a établi une notation comparative de la qualité de l'offre technique, par secteurs, et par zone géographique ; elle est proposée dans le tableau ci-dessous et dans les quatre graphiques suivants. Il est en particulier intéressant de noter la bonne qualité de l'offre technique du Japon et des USA dans les domaines du bâtiment et de la construction industrielle, comparée aux moins bonnes performances de la France et de l'Europe.

Comparaison de la qualité des offres par pays et par secteur

Notation de l'offre	Aéro nautique	Auto mobile	Ferro viaire	Bâtiment	Constr. industrie	Constr. nautique	Matériel médical	Sports & loisirs	Electricité
France	Bonne	Moyenne	Bonne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Lacunaire	Bonne	Bonne
Europe	Bonne	Bonne	Bonne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Bonne	Bonne	Bonne
USA	Bonne	Moyenne	Moyenne	Bonne	Bonne	Bonne	Lacunaire	Lacunaire	Moyenne
Japon	Lacunaire	Lacunaire	Moyenne	Bonne	Bonne	Moyenne	Bonne	Bonne	Bonne

Estimation Nodal

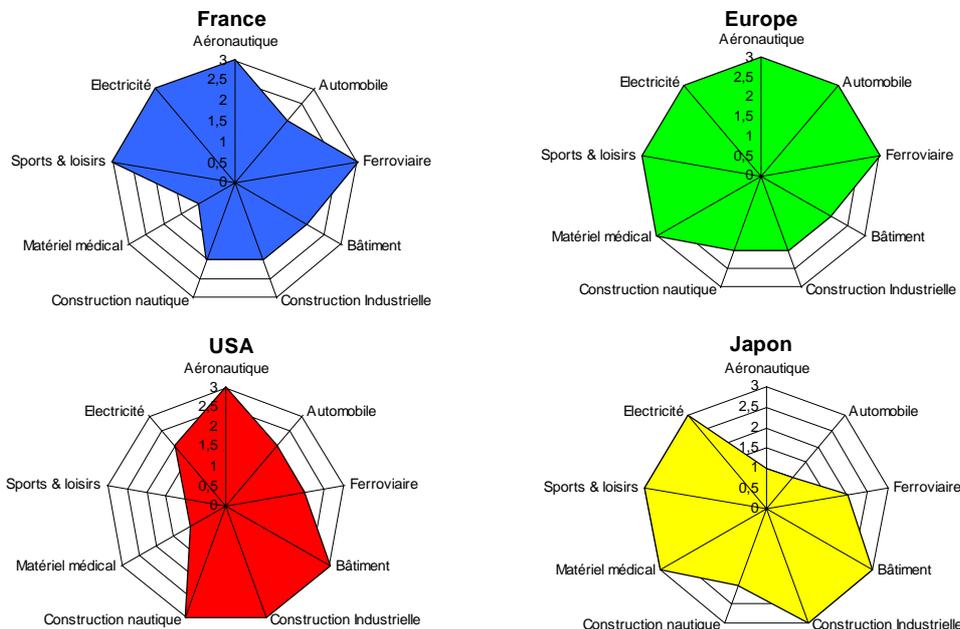
Note : pour établir les graphiques comparatifs de l'offre par zone géographique, on a attribué les notes suivantes aux critères d'évaluation :

– **bonne** = 3

– **moyenne** = 2

– **lacunaire** = 1

Comparaison de la qualité des offres par pays



3.3 Maîtrise des procédés

L'industrie française de la transformation des composites possède dans l'ensemble une bonne maîtrise des procédés, mais son implication dans l'étude de leur simulation est insuffisante.

Le secteur français de la transformation des composites bénéficie d'une **avance technologique** certaine par rapport aux autres pays européens ou mondiaux :

- les procédés manuels de moulage, technologiquement les moins avancés, sont beaucoup **moins utilisés en France qu'aux Etats Unis** (40% des composites) ou au Brésil (43%) ;
- la **compression de semi-produits SMC et BMC** est, en France, plus utilisée qu'en Allemagne, aux Etats Unis, au Brésil et au Japon, pays dans lesquels cette technologie est peu développée ;
- la France possède la maîtrise technologique des autres procédés de transformation actuellement en phase industrielle, à l'exception de la pultrusion ; dans l'ensemble, elle est alignée sur l'Europe et sur les Etats-Unis ;
- la **pultrusion, marginale en France**, constitue la principale faiblesse de l'industrie française de transformation des composites par rapport autres pays industrialisés, compte tenu, en particulier, des nombreuses possibilités que ce procédé offre dans la construction civile.

Par contre, l'**implication des acteurs français** dans le développement de programmes pour améliorer la **simulation des procédés** et du **comportement** des composites est **inégal** :

- des programmes de recherche sur la simulation des procédés se sont récemment développés en France : procédé de compression **BMC** (après dix ans de relative inactivité) et procédé de moulage **RTM** (Ecole des Mines de Douai et Stratiforme) ;
- le développement de **composites intelligents** intégrant des **fibres optiques** afin de mieux les caractériser n'est encore qu'au stade de projets en France, tandis que des sociétés anglaises et belges entament déjà leur **commercialisation**.

R & D et savoir faire technologique français

Les principales spécialités françaises dans les composites concernent les procédés RTM et l'utilisation des renforts filamenteux en verre ou Aramide :

Exemples de pôles de compétences français

Spécialité	Centre de compétences	Industriels
Résines	INSA Lyon	Atofina Rhodia
Renforts	IFTH	Vetrotex (Verre) Rhodia (Aramide)
Procédé RTM	Mines de Douai Pôle Plasturgie de l'Est	Sotira
Procédé SMC	Compositec	Inoplast Menzolit
Composites thermoplastiques	Pôle Européen de Plasturgie	Vetrotex Schappe
Simulation et caractérisation	Mines de Douai ENSAM	EADS ESI
Contrôles non destructifs	ENS Cachan CETIM	EADS

CHAPITRE 5

MARCHES

1 MARCHE DES MATIERES PREMIERES

1.1 Aperçu du marché mondial des composites

En volume, le marché mondial des composites croît de 5,7% en moyenne par an ; la production européenne représente 28% de ce marché.

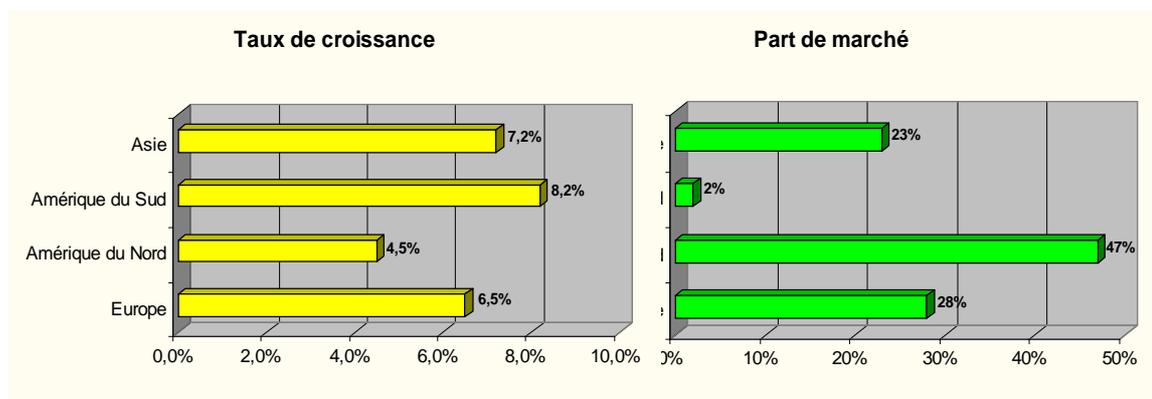
Le graphique ci-dessous présente le marché mondial des renforts en fibres de verre¹, qui s'établit à **2,5 millions de tonnes en 2000**. La répartition de la production mondiale des composites à renforts de fibres de verre, qui représentent plus de 95% de la production des matériaux composites, traduit de manière assez réaliste la répartition globale des composites dans le monde.

Depuis 1994, le marché mondial des composites est en croissance moyenne annuelle de 5,7%, avec des taux de croissance de 7% en Asie, 6,5% en Europe et 4,5% en Amérique du Nord.

La croissance moyenne annuelle des composites thermodurcissables (TD) est de 3%, contre 9% pour les composites thermoplastiques (TP).

L'Asie (23%) et l'Europe (28%) représentent des parts de marché équivalentes, derrière l'Amérique du Nord (47%).

Marché mondial des renforts en fibres de verre

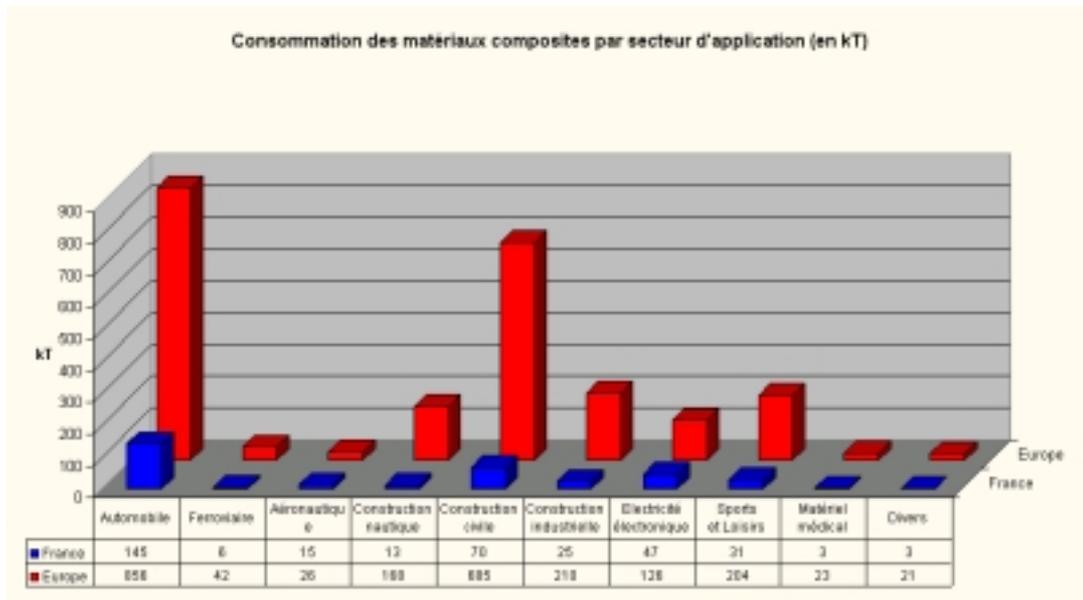


1.2 Répartition par marchés d'application

La consommation mondiale de composites devrait croître de 47% d'ici 2006, passant de 7 millions de tonnes en 2000, à environ 10 millions de tonnes. Les prévisions de l'évolution des marchés européens et mondiaux en volume des composites à cinq ans reposent sur des **estimations de croissance annuelle** propres à chaque secteur :

- 6% pour l'automobile et 5% pour l'aéronautique et les sports et loisirs ;
- 3% pour le matériel médical et 2% pour la construction civile ;
- 1% pour les autres secteurs.

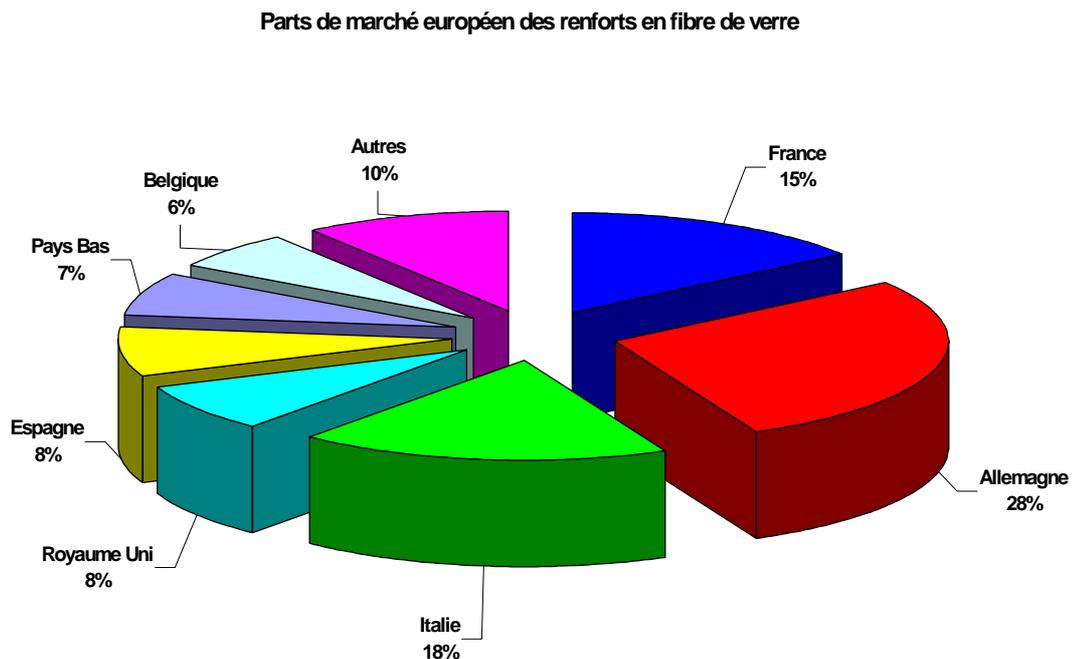
¹ Données Vetrotex



Pour sa part, l'*Automotive Composites Alliance* (ACA) prévoit une croissance de la consommation mondiale des composites supérieure à 47% dans les cinq prochaines années.

1.3 La production des composites en Europe

La part de la production française de composites représente environ 15% de la production européenne en volume. Comme ci-dessus, on peut globalement assimiler la répartition de la consommation des renforts en fibre de verre avec la production de composites.



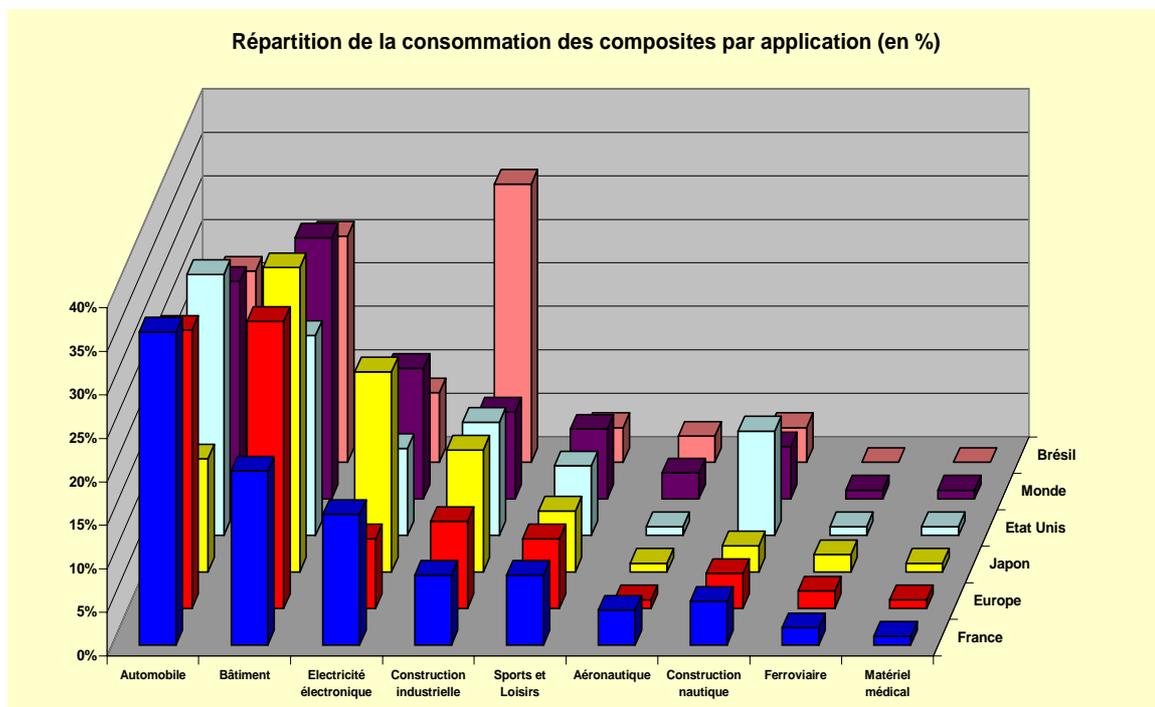
Toutefois, la répartition du marché européen des composites en 2000¹ doit être pondérée par :

- l'absence de prise en compte des **composites à fibres de carbone**, présent en France, qui représentent plus de 5% en tonnage et 20% en valeur ;
- les **fortes fluctuations** relatives des marchés nationaux : par exemple, le marché français des composites représentait 23% du marché européen en 1998 ; il n'en représenterait plus que 15% aujourd'hui.

1.4 Disparité des poids relatifs des marchés d'application

On constate de grandes disparités, en fonction des applications, dans l'utilisation des composites entre les différentes zones géographiques. Le tableau et les trois graphiques ci-dessous² présentent une comparaison des consommations ; à titre d'exemples :

- en France, l'automobile représente 36% des composites, soit un taux comparable à ceux de l'Europe (32%) et du monde (25%), tandis que le Japon n'en utilise que 13% ;
- dans le bâtiment, les matériaux composites sont nettement plus utilisés au Japon (35%) et au Brésil (32%) qu'en France (21%) ; la consommation des composites indiquée ci-dessous prend en compte leur utilisation dans les aménagements intérieurs (salles de bain monoblocs, accessoires, etc.) ;
- dans l'ensemble, l'utilisation des composites en France est très comparable à celle observée en Europe ; les disparités sont sensiblement plus importantes à l'égard de la consommation mondiale.

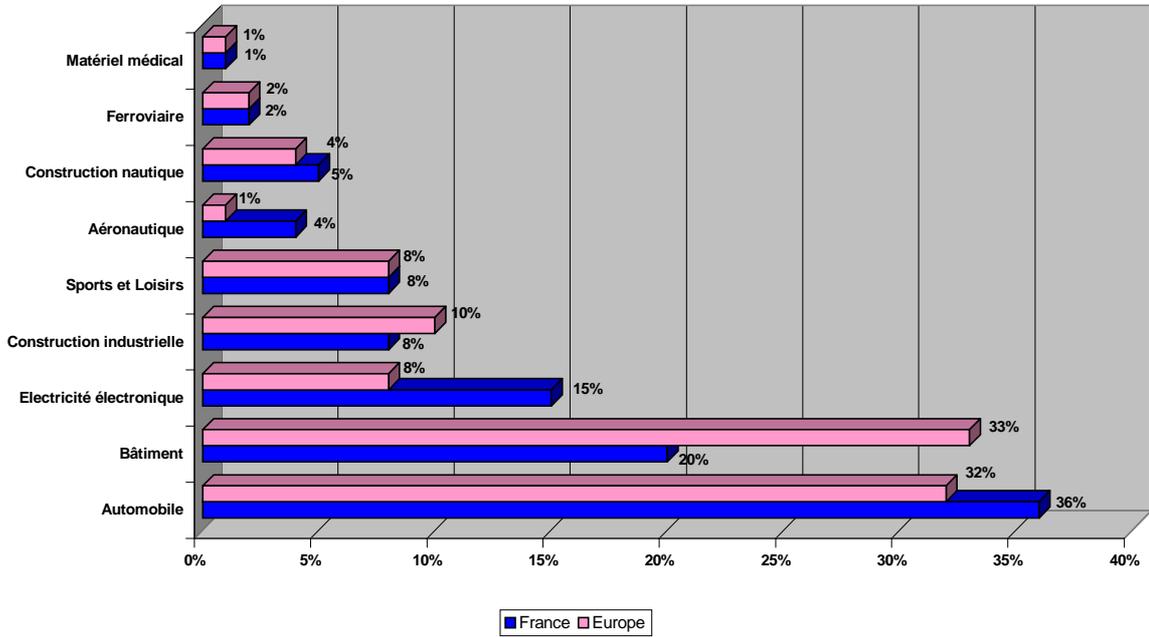


¹ Source Vetrotex

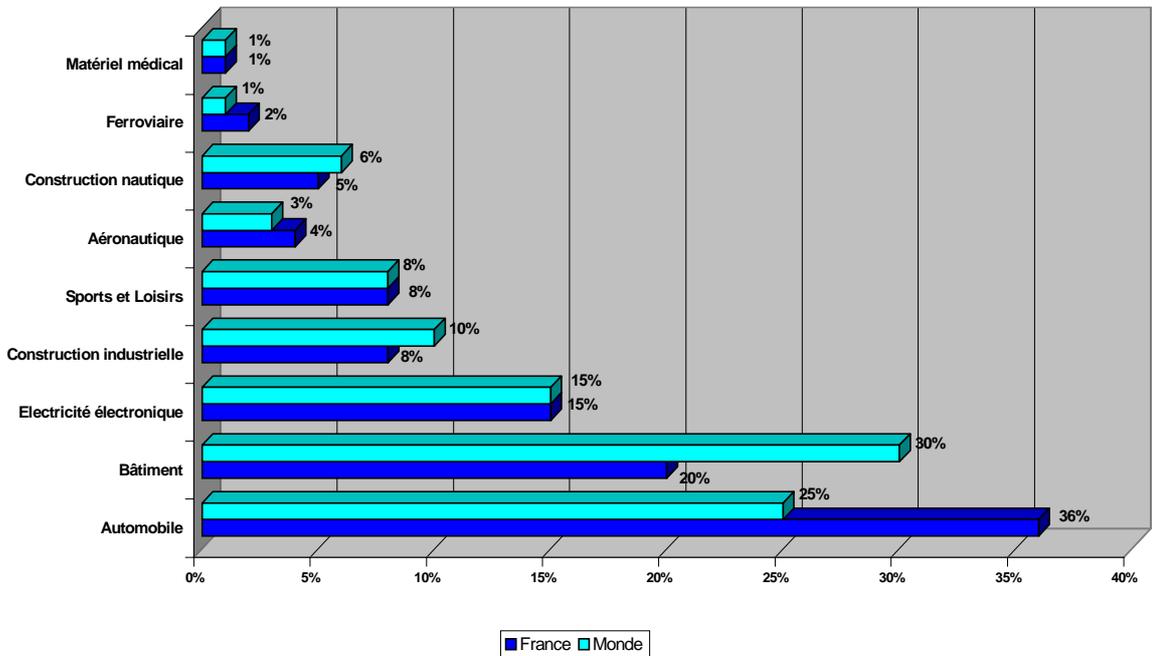
² Sources GPIC & Vetrotex).

Marchés

Utilisation des composites par application :
position de la France en Europe (en tonnage)



Utilisation des composites par application :
position de la France dans le Monde (en tonnage)



Marchés

Poids relatifs des applications par zone géographique
(répartition en pourcentage)

Application	France	Europe	Japon	Etat Unis	Brésil	Monde
Automobile	36%	32%	13%	30%	22%	25%
Ferroviaire	2%	2%	2%	1%	0%	1%
Aéronautique	4%	1%	1%	1%	3%	3%
Construction nautique	5%	4%	3%	12%	4%	6%
Construction civile	20%	33%	35%	23%	26%	30%
Construction industrielle	8%	10%	14%	13%	32%	10%
Electricité électronique	15%	8%	23%	10%	8%	15%
Sports et Loisirs	8%	8%	7%	8%	4%	8%
Matériel médical	1%	1%	1%	1%	0%	1%
Divers	1%	1%	1%	1%	1%	1%

(répartition en milliers de tonnes)

Application	France	Europe	Japon	Etat Unis	Brésil	Monde
Automobile	108	640	221	1.020	37	1.788
Ferroviaire	6	40	34	34	0	72
Aéronautique	12	20	17	34	5	215
Construction nautique	12	160	51	408	7	429
Construction civile	63	620	595	782	44	2.145
Construction industrielle	24	200	238	442	54	715
Electricité électronique	45	120	391	340	14	1.073
Sports et Loisirs	24	160	119	272	7	572
Matériel médical	3	20	17	34	0	72
Divers	3	20	17	34	2	72
Total	300	2.000	1.700	3.400	169	7.150

2 ESTIMATION DU MARCHÉ DES COMPOSITES

2.1 Estimation des prix de vente des composites par secteurs d'application

L'évaluation en valeur des marchés des secteurs d'application des composites repose sur les estimations des prix moyens par kilo des composites à partir des entretiens avec les principaux acteurs concernés. Elle est présentée dans le tableau ci-dessous.

Le prix de vente moyen des composites varie de moins de 5 €/kg pour les composites GD utilisés dans les secteurs de la construction et de l'électricité, à plus de 38 €/kg pour les composites HP, principalement utilisés dans l'aéronautique.

Prix moyen des composites par secteur d'application

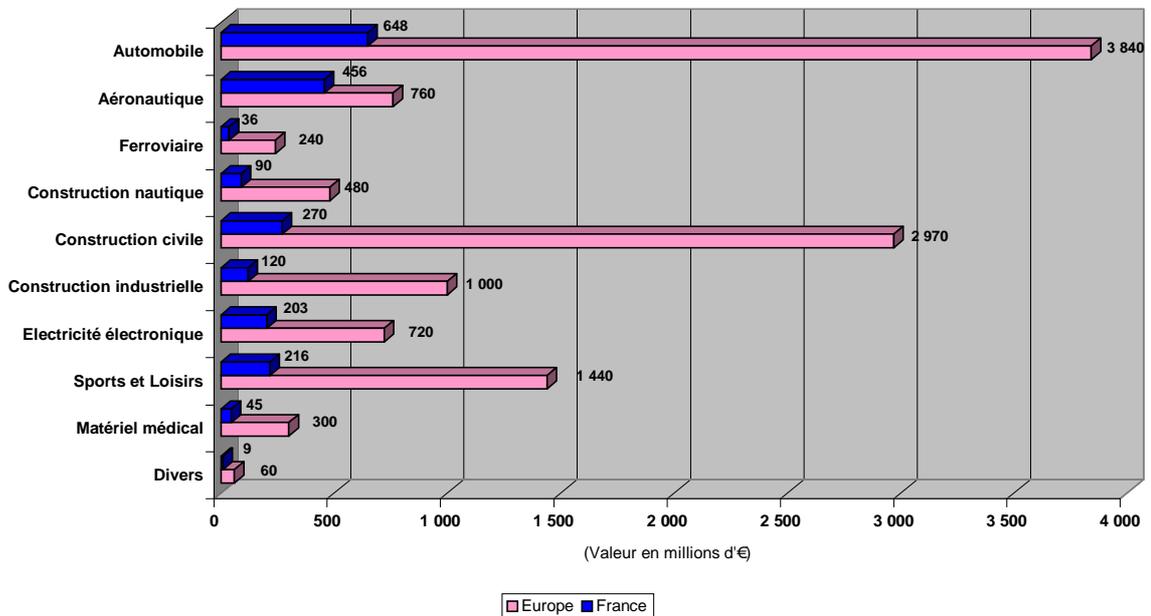
Type de composite	Secteur industriel	Prix moyen en €/kg
Composites « Grande diffusion »	Divers	3
	Construction civile	4,5
	Electricité/électronique	4,5
	Construction industrielle	5
	Automobile	6
	Ferroviaire	6
	Construction nautique	6
Composites « Hautes performances »	Sports et loisirs	9
	Matériel médical	15
	Aéronautique	38

Estimation Nodal

2.2 Marchés en valeur des matériaux composites en Europe

Pour 1999, et compte tenu des valeurs moyennes estimées ci-dessus, on peut valoriser le marché européen à 12 milliards d'euros et le marché français à un peu plus de 2 milliards d'euros.

Marchés français et européens en M€ par application



Marchés

Estimation des marchés français et européens par application

	Prix moyen en €/kg	France		Europe	
		Marché (kT)	Marché (M€)	Marché (kT)	Marché (M€)
Automobile	6	108	648	640	3.840
Ferroviaire	6	6	36	40	240
Aéronautique	38	12	456	20	760
Construction nautique	6	15	90	80	480
Construction civile	4,5	60	270	660	2.970
Construction industrielle	5	24	120	200	1.000
Electricité électronique	4,5	45	203	160	720
Sports et Loisirs	9	24	216	160	1.440
Matériel médical	15	3	45	20	300
Divers	3	3	9	20	60
Total		300	2.093	2.000	11.810

En valeur, le secteur français des composites représente 18% du marché européen, contre 15% en volume. Ce positionnement du marché français dans le haut de gamme est largement favorisé par le poids important que représente, en France, l'utilisation des composites dans les secteurs de l'aéronautique et des sports et loisirs (utilisation importante de composites HP).

En effet, l'aéronautique représente en France 22% du marché en valeur, contre 6% en Europe, derrière l'automobile (31%), mais devant la construction civile (14%) et l'électricité (10%) ; à eux seuls, ces 4 marchés représentent plus de 75% de l'utilisation des composites en France.

3 PARTICULARITES DU MARCHÉ FRANÇAIS

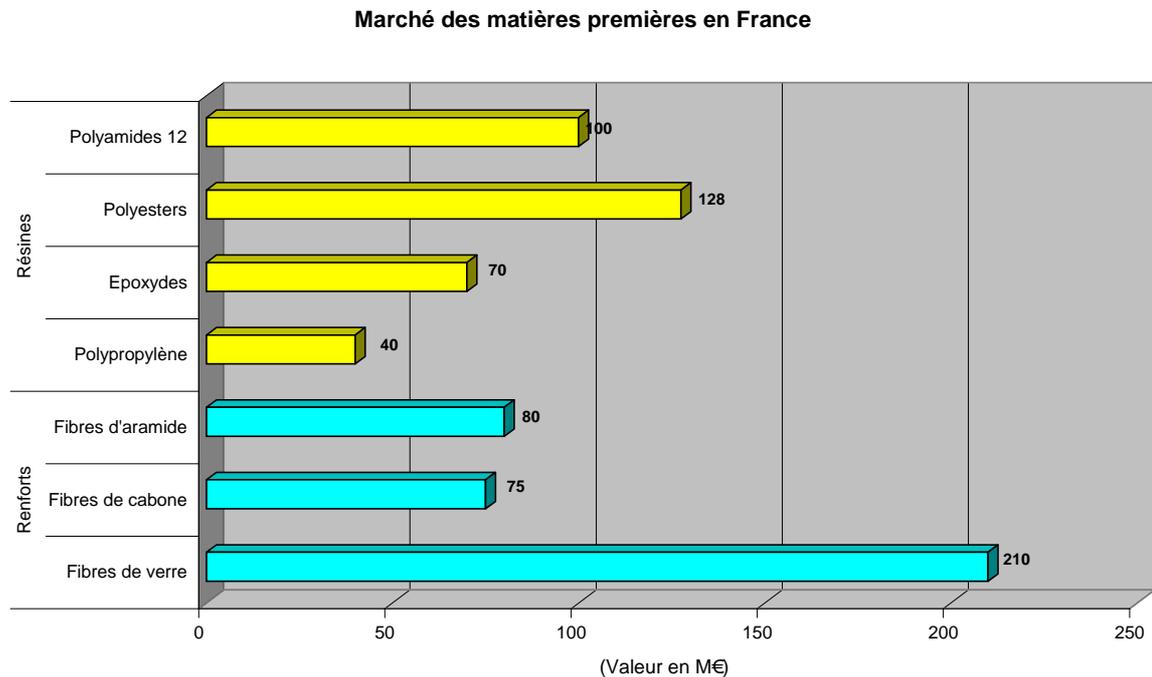
3.1 Le marché des matières premières

En 1999, le marché français des matières premières (matrices et renforts) destinées à la production des matériaux composites a atteint environ 3,3 milliards d'euros.

Cette valeur a été estimée à partir des données de consommation et des prix moyens de vente par kilo des différents composants (par exemple : fibres de verre : 2 €/kg, fibre de carbone : 25 €/kg, aramide : 20 €/kg, polyester : 1,5 €/kg, époxydes et polyamide 12 : 7 €/kg, polypropylène : 3€/kg). Les valeurs indiquées ci-dessous prennent en compte l'ensemble des matières premières.

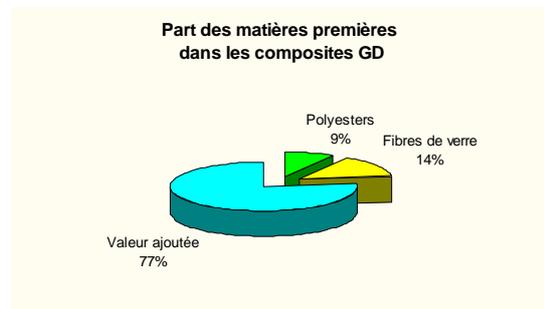
Marché français des matières premières

	Composants	Consommation en kt	Prix en €/kg	Marché en M€
Résines	Polyesters	85	1,5	128
	Epoxydes	10	7	70
	Polypropylène	40	1	40
	Polyamides 6, 6-6	25	4	100
Renforts	Fibres de verre	105	2	210
	Fibres de carbone	3	25	75
	Fibres d'aramide	4	20	80



3.2 Valeur ajoutée du marché des composites GD

La valeur totale des constituants des composites « grande diffusion », essentiellement des polyesters et fibres de verre, est estimée à 1,4 milliard d'euros ; cette valeur ne représente qu'environ 25% du marché français des composites GD. Ainsi, la **valeur ajoutée des transformateurs** représente **75%** du prix final des composites.



3.3 Répartition du marché français des composites par technologie de transformation

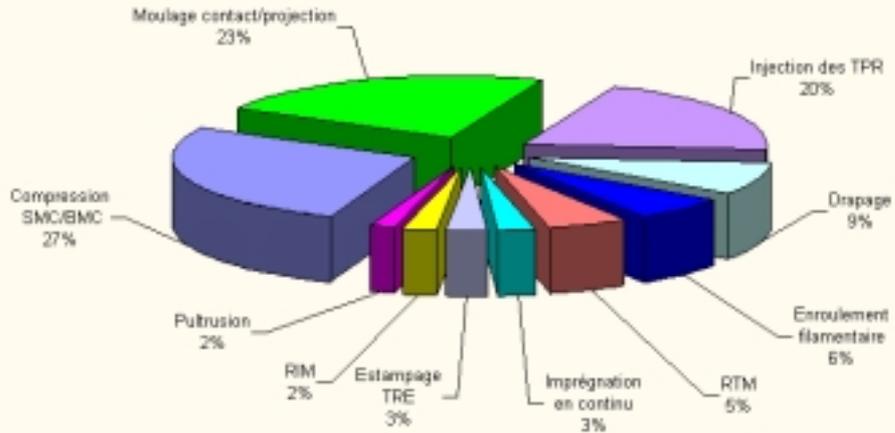
La compression [SMC](#) et les procédés de moulage au contact représentent plus de 1 milliard d'euros, soit plus de 50% du marché français.

Les procédés [RTM](#), [RIM](#) et drapage, malgré leur faible utilisation, représentent néanmoins une **part de marché importante** (plus de 100 M€ chacun) du marché français car ils sont utilisés dans la réalisation de composites [HP](#) de valeur élevée.

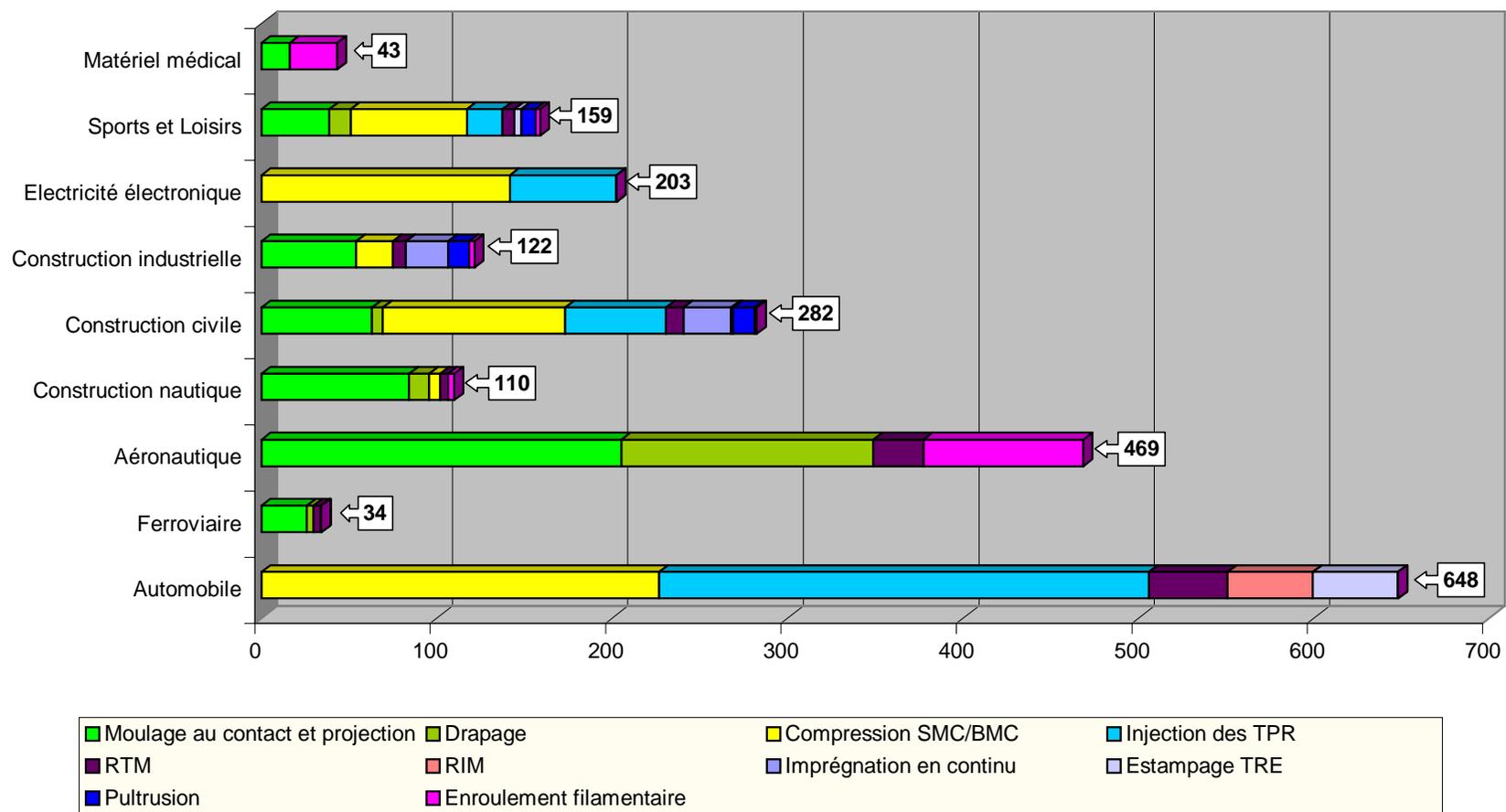
Répartition des marchés par procédé de transformation

(valeurs en millions €)	Automobile	Ferroviaire	Aéronautique	Construction navique	Construction civile	Construction industrielle	Electricité électronique	Sports et Loisirs	Matériel médical	Divers	Total
Moulage contact/projection		26	205	84	63	54		39	16		488
Drapage		4	144	11	6			12			177
Compression SMC/BMC	227			6	104	21	142	66			566
Injection des TPR	279				57		61	20			417
RTM	45	5	29	5	10	8		7		2	109
RIM	49									3	51
Imprégnation en continu					27	24				4	55
Estampage TRE	49				1			4		1	54
Pultrusion					12	12		8			32
Enroulement filamenteux			91	4	1	3		3	27		129
Total	648	34	469	110	282	122	203	159	43	9	2 078

Marché français des composites par procédé



Marché français des composites réparti par procédés de fabrication en M€



CHAPITRE 6
DEFIS & OPPORTUNITES

1 ENJEUX DES MATERIAUX COMPOSITES

Les premiers composites ont fait leur apparition au cours de la seconde guerre mondiale. Bien que leur histoire ne remonte pas à plus de cinquante ans, ils ont déjà accumulé plus d'une douzaine de procédés de mise en œuvre, c'est à dire plus qu'il n'existe de grandes techniques de transformation des métaux (fonderie, frittage, forge, emboutissage, soudage) développées au cours des 150 ou 200 dernières années.

Compte tenu de cette expérience trop brève, les transformateurs rencontrent encore de nombreuses difficultés pour dimensionner leurs produits avec une totale prédictibilité. Aussi, le développement d'outils logiciels de conception et de simulation constitue un axe important d'évolution tandis que les concepteurs de bureaux d'études et les organismes normatifs de certains secteurs industriels doivent faire un réel effort pour intégrer, dès le stade de la conception, la spécificité des composites par une approche fonctionnelle permettant de mieux identifier les caractéristiques attendues et demandées aux composites.

Les composites se distinguent des autres produits plastiques de synthèse par des caractéristiques qui leur permettent, avec des propriétés intéressantes d'inaltérabilité et de faible poids, de concurrencer les métaux, grâce justement aux possibilités qu'ils offrent de réaliser un matériau spécifiquement adapté aux performances demandées et d'optimiser le couple prix-performances, au contraire du métal ou du bois qui doivent s'adapter à l'usage que l'on veut en faire.

Comparée aux 18 millions de tonnes de métaux ouvrées chaque années, l'industrie des composites n'est encore aujourd'hui qu'une petite industrie : elle ne représente que 300 à 350.000 tonnes de produits finis. En France, 400 à 450 entreprises consacrent toute leur activité à la transformation des matériaux composites et elles n'emploient qu'une vingtaine de milliers de salariés. Et pourtant, ses applications concernent à peu près toutes les activités humaines : transports (avions, trains, automobiles, bateaux, aérospatiale), sport, électricité et électronique, médical, bâtiment...

Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Leur spécificité reste cependant inégalement appréhendée par les concepteurs et leur recyclabilité reste insuffisante. Face aux solutions traditionnelles (bois, acier, aluminium), ils doivent s'imposer par de nombreux atouts fonctionnels.

La législation sur l'obligation de recyclabilité des composites devrait être mise en vigueur dès 2004 dans le secteur de l'automobile, qui représente plus de 30% de leurs débouchés. Du fait de leur composition hétérogène, la recyclabilité des composites se heurte au problème de la séparation de la matrice et des fibres pour lequel aucune solution satisfaisante n'est encore pleinement opérationnelle, ni économiquement viable.

De plus, comme les résines thermodurcissables ne sont pas réutilisables en tant que telles, la seule valorisation possible des composites TD est sous la forme de charges à très faible valeur ajoutée pour résines, bitumes et ciments. Les matrices thermodurcissables sont réutilisables, mais les propriétés mécaniques des composites ainsi formés sont dégradées. Face à l'enjeu majeur que constitue la recyclabilité des composites issus des VHU (véhicules hors d'usage), principal marché d'application des composites en volume, et en dehors de quelques programmes spécialisés et de quelques unités de recyclage, la mobilisation des acteurs de la filière (fournisseurs de matières premières, transformateurs, utilisateurs) est insuffisante. Une prise de conscience de la part de l'ensemble de ces acteurs semble nécessaire.

Les procédés de transformation des composites en moule ouvert créent d'autres contraintes, liés aux problèmes d'exposition du personnel aux émanations de produits organiques volatils (COV), en particulier le styrène. En Europe, l'exposition admissible est limitée par des réglementations

nationales différentes variables d'un pays à l'autre. Sous la pression des industriels scandinaves et allemands, qui appliquent des normes plus strictes qu'en France, une harmonisation des réglementations nationales est évoquée. L'abaissement des normes actuellement en vigueur en France, constituerait, pour les transformateurs en moule ouvert, une contrainte supplémentaire.

L'absence de modélisation et de normalisation précise des matériaux composites pourrait constituer un frein pour l'optimisation du dimensionnement des pièces face à des matériaux traditionnels (acier notamment), dont les caractérisation et le dimensionnement font l'objet de normes nationales ou européennes. La mise en œuvre d'un programme national de caractérisation pourrait, sans doute, permettre de soutenir la crédibilité des composites face aux matériaux traditionnels aux comportements bien connus et prévisibles.

La spécificité des composites en termes fonctionnels doit être appréciée dès le stade de la conception afin de déterminer les gains apportés en composites (nombre de pièces, usinages, maintenance) par rapport aux solutions alternatives traditionnelles et de prévoir les essais spécifiques à réaliser. La conception fonctionnelle, opposée à la conception par pièce est encore inégalement intégrée par les bureaux d'études.

Le développement des composites organiques renforcés présente un taux de croissance moyen qui est de l'ordre de deux fois celui du PIB ; c'est donc un secteur plein de promesses, en pleine évolution, encore loin d'avoir atteint sa pleine maturité. Il revient à l'ensemble des acteurs de la filière de prendre en main son avenir et de relever les défis qui peuvent entraver son développement.

2 DEFIS SUR L'INDUSTRIE DES COMPOSITES

2.1 Limitation de l'exposition aux émissions de styrène

Le secteur des composites doit prendre en compte l'éventualité d'une évolution réglementaire européenne limitant l'exposition du personnel aux émissions de styrène ([COV](#)) à un seuil maximum de 20 ppm.

2.1.1 **Situation actuelle de la réglementation**

Le styrène est un des plus importants composés de la série des monomères benzéniques. Il est largement utilisé dans la production de polymères et copolymères, ainsi que dans la fabrication des polyesters dans l'industrie des composites, comme solvant et déclencheur de polymérisation des résines thermodurcissables. Ces résines comprennent entre 30% et 50% de styrène.

L'exposition excessive au styrène présente des risques pour l'organisme¹, mis en évidence par de très nombreuses études épidémiologiques. On peut estimer à 6.250 le nombre de salariés exposés quotidiennement au styrène en France².

Des **recommandations nationales** fixant les valeurs moyennes d'exposition (**VME**) ont été définies. Elles présentent actuellement une certaine disparité entre les grands pays industriels.

Pour sa part, la France a retenu une valeur de 50 ppm³ et se situe dans une fourchette

¹ Notamment sur le système nerveux central et le comportement psycho-moteur

² "Emissions de styrène : risques, réglementation, solutions", JC Limasset INRS, Lorient juin 1999.

³ ppm = partie par million

Valeurs moyennes d'exposition par zone géographique

Pays Industriels	VME Période de 8h / ppm
Royaume Uni	100
France ¹	50
USA	50
Japon	50
Pays Bas, Danemark	25
Allemagne	20
Suède, Finlande	20

Si durant les phases de production du monomère lui même, l'exposition au styrène est relativement faible et respecte aisément ces recommandations, il n'en est pas de même pour certaines étapes de la fabrication des composites, selon la nature des procédés utilisés. En particulier L'utilisation de procédés de transformation en moule ouvert (moulage au contact, projection) peut conduire à une exposition plus importante des opérateurs.

Des travaux actuellement en cours au niveau européen, laissent entrevoir une harmonisation des pratiques nationales, avec un abaissement du seuil à 20ppm.

Compte tenu de la disparité des pratiques actuelles, cette évolution peut constituer une source de tensions entre les transformateurs des différents pays. En effet, les pays nordiques et germaniques, qui représentent 45% de la production de composites en Europe et dont les VME sont déjà à 20 ppm, font pression pour que la future recommandation européenne s'aligne sur cette valeur.

2.1.2 Pratique actuelle de l'industrie française des composites

Une étude réalisée par l'INRS² à partir des informations de la base de données COLCHIC, qui collecte les mesures effectuées par les laboratoires interrégionaux de chimie des CRAM³ lors des inspections en entreprises, permet d'évaluer l'évolution de l'exposition des opérateurs industriels sur une période de presque 15 ans.

En effet, cette étude exploite 7082 mesures d'exposition au styrène sur l'ensemble des secteurs industriels, effectuées de 1987 à nos jours. Plus de la moitié de ces mesures (3580) concernent directement l'industrie des composites.

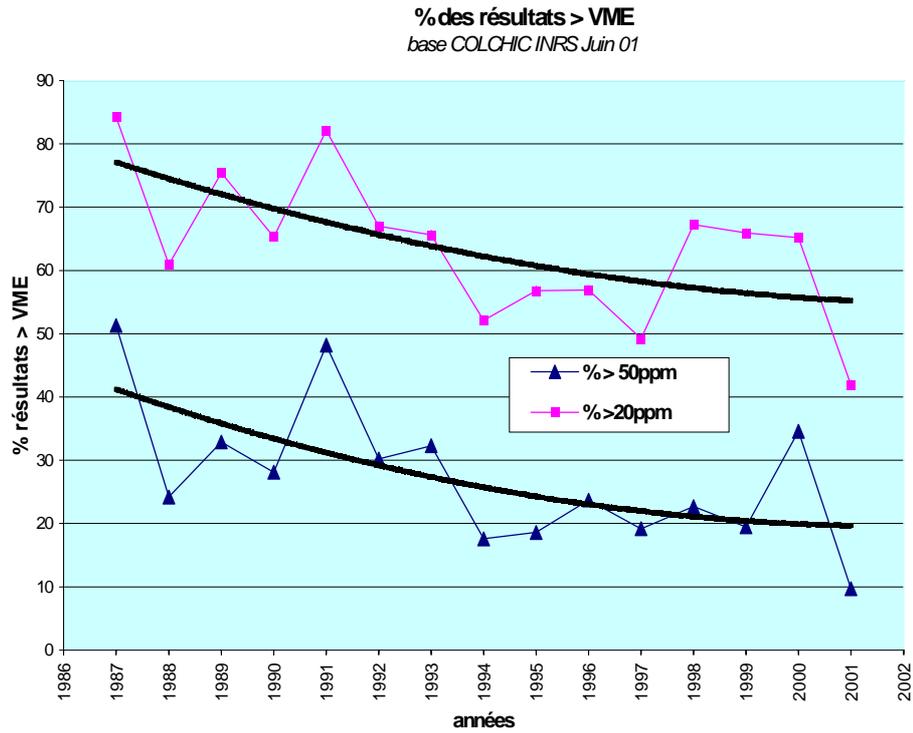
Sur **l'ensemble des résultats** (tous secteurs d'activités confondus, période 1987-2001), on observe une certaine diminution de l'exposition moyenne, ce qui traduit une amélioration de la pratique industrielle. On note cependant que sur les 5 dernières années, environ 20% des mesures ne satisfont pas la recommandation française actuelle en vigueur de 50 ppm. Si l'on envisage une VME de 20 ppm, la proportion de mesures dépassant ce seuil atteindrait 55%.

¹ INRS ND 2098-174-99 Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail - N° 174, 1^{er} trimestre 1999

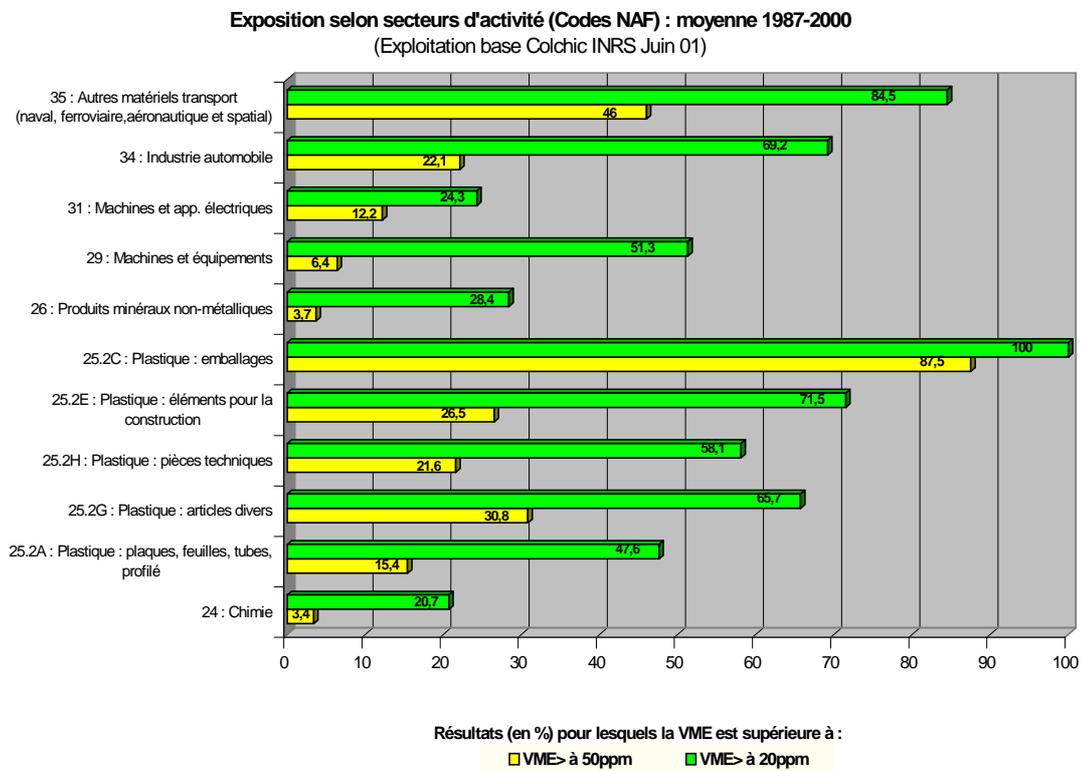
² Institut National de Recherche et de Sécurité, Département Métrologie des Polluants / Vandoeuvre 54

³ Caisses Régionales d'Assurance Maladie

Défis & Opportunités



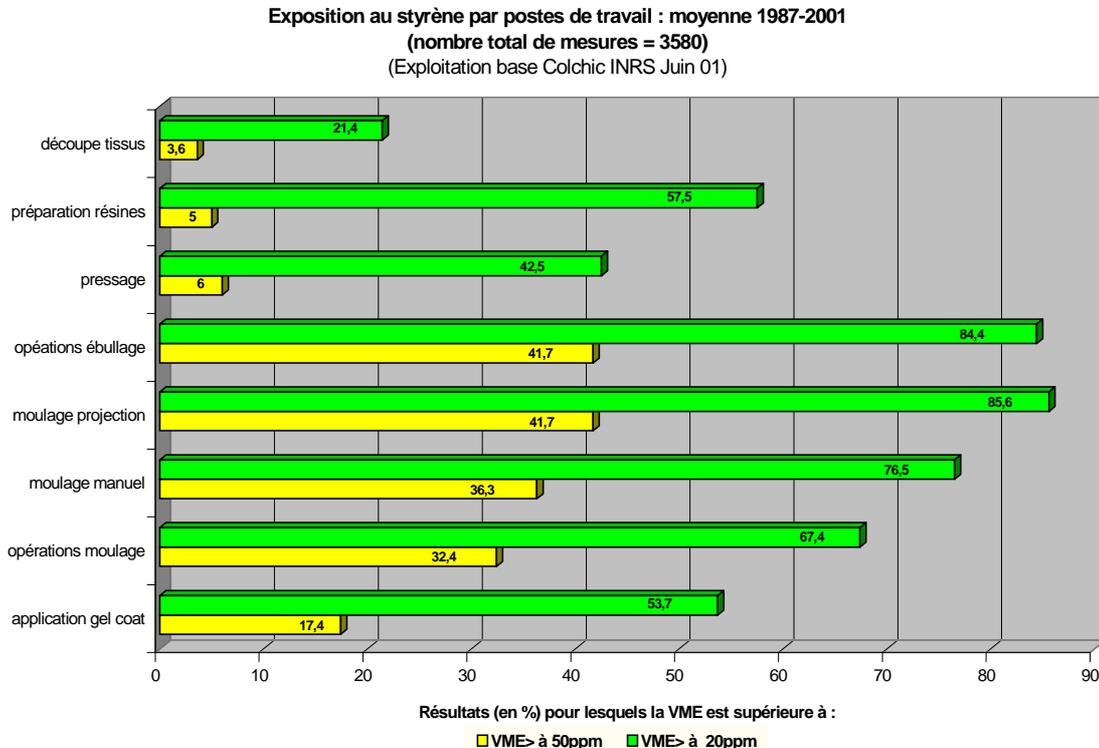
Les secteurs d'activité de la plasturgie (NAF 25.2 et sous-secteurs) et des transports (industrie automobile NAF 34, autres matériels de transport NAF 35) sont particulièrement affectés¹.



¹ Le secteur des composites n'est pas identifié en tant que tel dans la nomenclature, il est noyé dans le grand secteur de la plasturgie

Défis & Opportunités

Un certain nombre d'informations relatives au poste de travail, saisies dans la base de données COLCHIC, permettent de fournir une vision plus fine de l'exposition au styrène dans le secteur des composites.



Les mesures dépassant le seuil de 50 ppm sont nombreuses. La proportion peut atteindre 30 à 40% pour les opérations les plus exposées de moulage et d'ébullage.

2.1.3 Conséquences envisageables d'une évolution de la VME

Alors même que le respect de la recommandation nationale n'est pas aujourd'hui pleinement assuré, la mise en place au niveau européen d'une [VME](#) à 20 ppm pourrait représenter une contrainte supplémentaire pour l'activité des transformateurs en **moule ouvert**, en général des PMI, qui transforment **plus de 20% des composites** en France.

Appliquée unilatéralement en UE, cette limitation de la VME pourrait induire une baisse substantielle des marchés, au profit de pays émergents aux normes **plus souples** (VME > 100 ppm), comme le Brésil, avec un risque réel de délocalisation **des activités de moulage au contact**.

Une solution consisterait à encourager le remplacement des techniques de transformation en moule ouvert par des techniques en moule fermé. Toutefois, les techniques de transformation en moule fermé, par exemple le RTM, ne peuvent que difficilement se substituer aux méthodes de moulage par contact ou projection pour les pièces de grande taille destinées, en particulier, à l'aéronautique et à la construction nautique. Dans certains secteurs, les composites constituent « le » matériau de remplacement des matériaux traditionnels ; il apparaît incontournable pour la fabrication de bateaux de plaisance.

Défis & Opportunités

Un nouveau composite prend la mer

Les milliers de chantiers navals qui parsèment les rivages de l'Europe bénéficient désormais d'une nouvelle technologie de moulage de matériaux composites performante et non nocive pour l'environnement. Une innovation appelée à se diffuser dans de nombreux autres secteurs.

En avril dernier, le constructeur de bateaux britannique Halmatic remportait le prix d'innovation industrielle JEC Composite 2000 pour la mise au point d'une première technologie de moulage thermoplastique à basse pression de grandes structures en polypropylène renforcé de fibres. Fruit du projet européen Envirocomp¹, (Envirocomp est un exemple parmi les nombreux projets soutenus par les programmes européens de recherche industrielle de l'Union) ce nouveau composite constitue une alternative au moulage traditionnel des structures classiques en polyester armé de fibres de verre qui pose d'importants problèmes pour l'environnement et la protection sanitaire sur les chantiers.

Dans un tel contexte réglementaire posant des difficultés croissantes à l'activité du secteur, l'objectif du consortium de recherche Envirocomp fut d'apporter une alternative technologique éliminant radicalement ce problème des solvants. Outre des constructeurs de bateaux, le projet, coordonné par la firme britannique spécialiste des matériaux composites Euro-Projects, réunissait des fabricants de pales d'éoliennes, des fournisseurs de matériaux polymères ainsi que des organismes de recherche et de certification danois, français, allemands et anglais.

Une solution thermoplastique : la solution proposée est un procédé thermoplastique basé sur un polymère différent du polyester: le polypropylène. Au sein du projet, la firme française Vetrotex a développé un amalgame de fibres de verre tissées et de polypropylène baptisé Twintex. Disposé dans un moule, avec toutes les pièces et accessoires requis, ce matériau est chauffé sous vide pour prendre parfaitement la forme de la structure voulue.

« Ce procédé élimine tous les problèmes de pollution dus aux solvants. Le polypropylène forme, en outre, un composite doté d'une excellente qualité de résistance aux attaques de l'eau et des produits chimiques, tout en offrant de meilleures performances mécaniques face aux chocs et à la délamination que le polyester. Il permet également des économies par le recyclage aisé des chutes. A coût de matières premières égal, il demande moins de main-d'œuvre puisqu'il permet d'obtenir l'épaisseur voulue en une seule opération ».

D'après RDT Info, Magazine de la recherche européenne

2.1.4 Rejets dans l'atmosphère des émissions de COV

La réglementation actuelle ne prend pas en compte les rejets dans l'atmosphère des émissions de COV. A cet égard, la Directive européenne du 11 mars 1999, relative à la réduction des émissions de COV dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations industrielles a été transcrite en droit français par l'arrêté du 29 mai 2000.

L'action du GPIC et du GPRMC a permis d'obtenir confirmation, en juin 2000, de la DG Environnement que les solvants qui réticulent lors du durcissement ne tombent pas sous le coup de la Directive. Les installations de transformation du polyester restent toutefois soumises à la directive COV en raison de l'utilisation de produits qui sont à l'origine d'émissions de COV. Il s'agit de styrène n'ayant pas réagi ou solvants de nettoyage (acétone et chlorure de méthylène).

L'arrêté du 29 mai 2000 offre à l'industriel une double option, soit de respecter les valeurs limites de COV pour les émissions canalisées et diffuses, soit de mettre en place un schéma de maîtrise des émissions (SME)².

¹ Research, development and evaluation of environmentally friendly advanced thermoplastic composites for the manufacture of large surface area structures (Réf. BRPR960228)

² Le GPIC et la Fédération de la Plasturgie ont entrepris la rédaction d'un guide de maîtrise des émissions de COV disponible fin 2001 ; il permettra aux entreprises du secteur d'élaborer leur propre SME.

2.2 La législation sur l'obligation de recycler les composites

La législation sur l'obligation de recyclabilité des composites devrait être mise en vigueur dès 2004 dans le secteur de l'automobile, qui représente plus de 30% de leurs débouchés.

L'accord cadre du 10 mars 1993, relatif au retraitement des VHU en France, signé entre les professionnels de l'automobile et les pouvoirs publics, prévoit que :

- les déchets issus du traitement des véhicules retirés de la circulation en 2002 ne devront pas dépasser 15 % du poids du véhicule (ou 200 kg/ véhicule hors d'usage),
- les véhicules mis sur le marché à partir de 2002 seront conçus de manière à ne pas produire plus de 10 % de déchets pendant leur destruction,
- les véhicules mis sur le marché en 2015 ne devront pas produire plus de 5 % de déchets.

La future directive européenne sur les VHU.

Dans la plupart des pays d'Europe, les constructeurs se sont engagés à améliorer la gestion des VHU du point de vue de l'environnement. Les engagements visent à limiter la fraction des VHU mis en décharges et/ou à fixer des objectifs de valorisation.

Les réglementation ou engagements contractuels entre profession et pouvoirs publics diffèrent sur les taux et les échéances, mais concourent aux mêmes objectifs. En France, l'engagement des constructeurs est que les nouveaux modèles pourraient être recyclés de telle sorte que les déchets ultimes n'excèdent pas 10 %.

Devant ce foisonnement, la Commission a été tentée de proposer d'uniformiser les objectifs. L'objectif fixé par la proposition de directive¹ est de parvenir à un taux de réutilisation/valorisation de 85% du poids du véhicule d'ici 2005 et 25% d'ici 2015 et un taux de réutilisation/recyclage de 80% d'ici 2005 et 95% d'ici 2015.

Etant donné qu'actuellement 75% des VHU sont recyclés (la fraction métallique est recyclée à 95 %, voire 100 %), l'objectif visé par la directive ne concerne en réalité que la seule fraction des résidus automobiles et vise à un gain de 10% supplémentaire d'ici 2005, 20% d'ici 2015.

Selon la Commission, le démontage et recyclage de 10 millions de véhicules hors d'usage représente un gisement de 10 à 15.000 emplois.

Cet objectif paraît tout à fait accessible. Le marché du recyclage matière notamment peut être accru en recyclant le verre, les pneus. En revanche, les professionnels sont moins optimistes que la Commission concernant les plastiques.

Calendrier : *Ce dispositif s'applique à partir du 1^{er} janvier 2001 pour les véhicules mis sur le marché à cette date et à partir du 1^{er} janvier 2007 pour ceux mis sur le marché avant le 1^{er} janvier 2001. Les Etats membres qui le souhaitent pouvant d'emblée avancer ces dates d'application. A partir du 1^{er} janvier 2006, au moins 85% du poids moyen d'un véhicule devrait être récupéré et 80% du poids moyen devra être réutilisé ou recyclé. A partir de 2015, ces taux seront respectivement de 95 et 85% mais pour les voitures produites avant le 1^{er} janvier 1980, les obligations seront plus faibles : respectivement 75 et 70%.*

Extrait de senat.fr²

¹ Proposition de directive du Conseil COM 97 final 358, JOCE 9 juillet 1997.

² Le 7 septembre dernier, le parlement a adopté le texte final de la directive sur les véhicules hors d'usage (VHU).

2.2.1 Description et implications

Les matériaux composites ne sont pas explicitement classifiés dans :

- la liste de l'OCDE, appelée « liste verte/ambre/rouge » ; la liste rouge correspondant aux produits les plus dangereux ;
- la liste de la Convention de Bâle qui distingue deux groupes, A et B, ce dernier étant le plus néfaste.

Non classés dans ces listes, les composites sont automatiquement **assimilés aux produits des listes les plus contraignantes** (la liste « rouge » de l'OCDE, la liste B de la Convention de Bâle).

De ce fait, l'assimilation *de facto* des composites aux produits considérés comme dangereux pour l'environnement entraîne un certain nombre de contraintes concernant la gestion des déchets des composites, en particulier :

- leur **mise en décharge** est interdite ;
- la **valorisation énergétique** par incinération est **menacée à moyen terme** (2 à 5 ans) ;
- le **transport international** de ces déchets, vers un centre de recyclage, est soumis à une réglementation stricte.

A l'horizon 2015, la législation prévoit, pour les véhicules en fin de vie, que :

- 85% des constituants devront être réutilisés ou recyclés ;
- 10% des constituants « verts » pourront être valorisés énergétiquement ; toutefois les composites, considérés comme dangereux, ne devraient pas pouvoir être incinérés ;
- 5% des constituants, issus de l'opération de recyclage, pourront être mis en décharge.

La durée de vie d'un véhicule étant d'une dizaine d'année, la modification de gestion du cycle de fin de vie des véhicules automobiles devra être **prise en compte dès 2004** par les constructeurs. L'industrie des composites devra alors **justifier** de solutions de recyclage fiables et éprouvées face à des technologies **concurrentes facilement recyclables**, telles que les aciers spéciaux ou l'aluminium:

En l'absence de solutions de recyclage satisfaisantes, les composites pourraient ne plus jouer **qu'un rôle marginal** dans l'automobile, qui représente pourtant en France 36% de leur débouché : il est donc impératif que des solutions aux problèmes de recyclabilité soient trouvées afin de lever cette hypothèque incontournable.

2.2.2 Prise en compte des difficultés du recyclage

Les difficultés et les enjeux du recyclage sont peu ou mal perçus par les industriels français de la transformation des composites.

Le recyclage des composites thermodurcissables (**TD**) se révèle difficile car la matrice ne **peut être refondue**, et n'est pas réutilisable sous forme de matière première. Les solutions actuelles de recyclage des composites à matrice TD consistent à les broyer en poudre utilisable uniquement sous forme de charges à faible valeur dans de nouveaux composites, en particulier dans les semi-produits **SMC/BMC** ou dans des bitumes. Ces solutions sont handicapées par leur coût qui rendent les charges obtenues peu compétitives.

Du fait de leur **composition hétérogène** (présence de fibres) et en dépit de divers arguments publicitaires, le **recyclage** ou la revalorisation des **composites thermoplastiques (TP)** pose les **mêmes difficultés** que les composites TD : la revalorisation la plus simple est sous forme de poudres pour charges et bitumes, mais la charge constituée de composites TP recyclés coûte plus cher que la matière première et son utilisation ne peut pas être directement rentabilisée.

La solution consistant à séparer les fibres et la matrice TP, bien que techniquement possible, reste encore très coûteuse.

Le recyclage des matrices TP, même séparées des fibres, est **mal maîtrisé** aujourd'hui car les composites thermoplastiques contenant, par exemple, 25% de matière recyclée ont des **propriétés mécaniques très dégradées** et ne peuvent être utilisés que dans des applications n'exigeant que des propriétés mécaniques très faibles (par exemple, des fauteuils de jardins).

Les transformateurs français n'ont pas, dans l'ensemble, pris conscience **des échéances et des difficultés** posées par le recyclage. Ils n'anticipent pas l'entrée en vigueur prochaine de nouvelles réglementations et, **en l'absence de contraintes réglementaires**, n'envisagent pas de développer de nouvelles solutions ; toutefois quelques initiatives se font jour, notamment :

- en France, dans le cadre de programmes de recherche financés par Renault, PSA, Menzolit, Vetrotex, Mécelec a développé une filiale de recyclage (MCR) ; mais cette initiative ne concerne que 3% des [SMC](#) par an soit moins de 3.000 tonnes ;
- en Allemagne, Ercom recycle les composites thermodurcissables pour leur utilisation dans les semi-produits SMC/BMC, mais, compte tenu de la législation sur les transports internationaux des produits dangereux, n'envisage pas d'accepter les composites provenant d'autres pays européens.

3 DIFFICULTES POSEES AUX CONCEPTEURS

3.1 La prise en compte de la spécificité des composites

Dès le stade de la conception, la spécificité des composites devrait être prise en compte par les bureaux d'études au moyen d'une approche fonctionnelle permettant de mieux identifier les caractéristiques attendues et demandées aux matériaux composites.

Pour intégrer la spécificité des composites, les bureaux d'études doivent, dès le stade de la conception, raisonner en termes de fonctions et d'analyse globale de la *valeur d'usage* et non plus en termes de pièces isolées, afin de déterminer :

- les pièces et procédés d'assemblage économisés par les capacités d'intégration de fonctions propres aux composites ;
- les traitements et protections économisés ;
- mais également, les essais techniques spécifiquement adaptés aux composites à la place des essais traditionnellement effectués sur des pièces en acier, par exemple :
 - les essais de pression à 1,5 fois la pression de service ; ces essais traditionnels, liés aux caractéristiques de plastification des métaux, ne présentent que peu d'intérêt dans le cas des matériaux composites qui ne possèdent pas cette propriété ;
 - les essais de flexion, qui ne permettent pas de déterminer la résistance à la torsion des pièces en composites.

En fait, on constate que deux cultures opposées s'expriment au sein des bureaux d'études :

- les ingénieurs de culture orientée « acier » ont tendance à se limiter à substituer des pièces en composites aux pièces en matériaux traditionnels ;
- d'autres concepteurs, en général de formation plus récente, ont une meilleure perception des problèmes liés à l'utilisation des matériaux composites et une réflexion plus orientée « fonction ».

Toutefois, une certaine évolution des mentalités des concepteurs est perceptible dans les secteurs de la construction navale, de l'aéronautique et de l'automobile.

Cette **difficulté à intégrer** la spécificité des composites n'est pas propre à la culture française ; elle se retrouve dans les pays européens et aux Etats Unis. Dans ce pays, l'association des producteurs de composites ([CFA](#)), publie des guides et organise des formations, destinés aux non-spécialistes des composites, dans lesquels la conception particulière imposée par les composites est soulignée.

3.2 Nécessité de développer des outils de simulation

On a constaté que la recherche sur la simulation du comportement des composites [SMC](#) et [BMC](#) et des procédés de transformation associés a été pratiquement arrêtée pendant une dizaine d'années.

Dans certains cas, l'aéronautique par exemple, il s'avère que les logiciels de conception, de simulation et de dimensionnement des pièces en composites ont été développés en interne, à un moment donné pour répondre, à des besoins ponctuels ; les modules qui sont issus de cette recherche sont hétérogènes et mal maîtrisés car les développeurs, pour la plupart des stagiaires, ont quitté l'entreprise sans laisser de notes suffisamment explicites permettant une exploitation optimale de leur travail.

La recherche sur la modélisation des procédés de **compression** [SMC](#) et [BMC](#), qui représentent pourtant **35% des composites transformés** en France, a été réduite au cours de la dernière décennie, mais reprend progressivement, en particulier sur les thèmes suivants :

- la modélisation de la simulation d'écoulement et de remplissage pour le procédé SMC ;
- l'édition d'un logiciel spécialisé dans la compression BMC d'ici un an par [ESI](#).

Dans le domaine de la conception industrielle, les logiciels actuellement les plus couramment utilisés par les transformateurs sont :

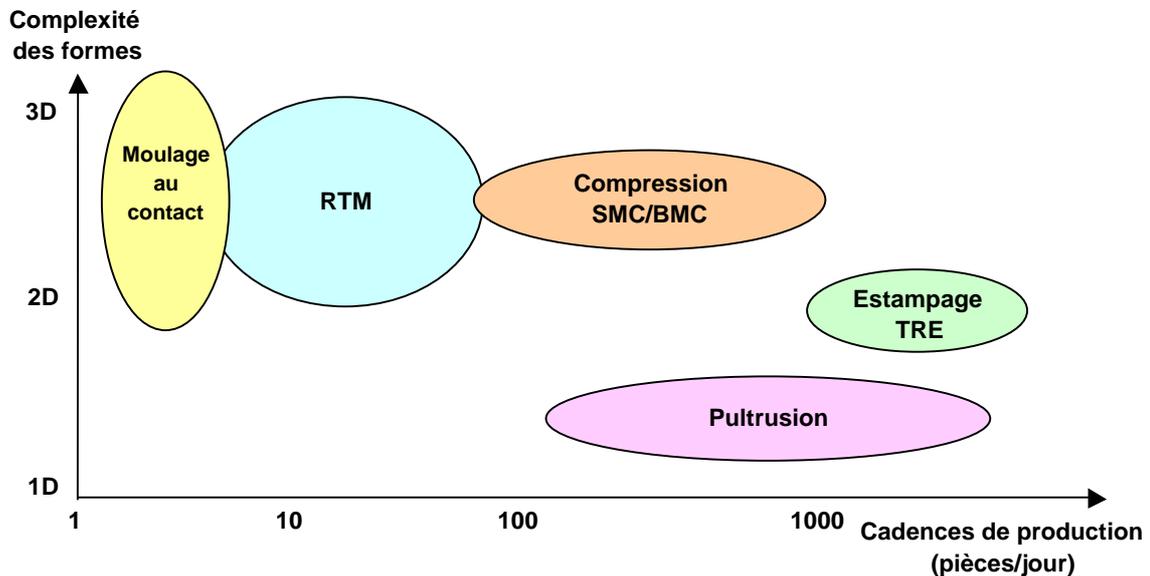
- **Composic/Sysply** ([ESI](#)) pour la simulation d'injection ;
- le module spécifique aux composites thermodurcissables de **Molflow** ;
- certains logiciels développés par plusieurs centres de recherche comme ceux de l'Ecole des Mines de Douai ([ENSTIMD](#)) ou le Pôle de Plasturgie de l'Est (PPE) peuvent être utilisés pour des prestations de services offertes aux industriels.

3.3 Choix entre cadences de production et propriétés mécaniques

L'industrialisation en grande série des procédés de transformation des composites nécessite encore des choix entre cadences de production élevées et hautes performances. En effet, l'utilisation des matériaux composites impose un choix entre :

- des procédés pour la réalisation de pièces aux formes complexes et possédant de bonnes caractéristiques mécaniques, mais avec des cadences faibles - 10 à 50 pièces par jour pour le procédé [RTM](#) - peu compatibles avec le secteur automobile ;
- des procédés de fabrication à cadences élevées, comme la compression [SMC](#) (600 pièces/jour), mais qui dégradent les performances apportées par les composites et la compétitivité de ces matériaux :
 - les pièces réalisées ne peuvent prendre que des formes relativement simples (en 2D),
 - les pièces ont des caractéristiques mécaniques plus réduites.

Choix des procédés en fonction des cadences et de la complexité



Des éléments de réponse à ces problèmes peuvent être apportés par l'utilisation des propriétés de conductibilité électrique des fibres de carbone

La caractérisation des matériaux, la simulation des procédés peut être facilitée par le suivi du processus d'injection de résine par la mesure de la résistivité de fibres de carbone intégrées dans les renforts des composites ; en effet, la **résistivité de ces mèches varie** au fur et à mesure de l'avancement du front d'injection, ce qui permet :

- **de suivre** l'avancement du **front d'écoulement** par la mesure de la résistivité électrique ; l'acquisition du signal est simple et peu coûteuse (ohmmètre) ;
- si un défaut est constaté (insertion d'air, défaut de renfort, perte d'orientation), **de modifier les paramètres** d'injection par bouclage ;
- d'atteindre un **temps de réaction** de l'ordre de quelques **millisecondes** ;
- de coupler les résultats obtenus avec un logiciel de simulation.

Les fibres de carbone mises en place pourraient également permettre de suivre l'évolution dans le temps du produit fini et d'étudier les caractéristiques du vieillissement ; à terme, ce procédé permettra d'étudier les conditions de réparabilité des matériaux composites et de perfectionner les modèles généraux de simulation et de comportement des matériaux composites.

L'intégration de fibres optiques à réseaux de Bragg dans les composites pourrait également permettre d'améliorer la caractérisation des matériaux composites¹

L'intégration de **fibres optiques** utilisant la technologie des **réseaux de Bragg** dans les renforts des matériaux composites hautes performances pourrait permettre de suivre et de contrôler l'évolution des contraintes mécaniques et des éventuelles déformations, ainsi que celle de la température.

¹ Voir en annexe un note sur l'utilisation des réseaux de Bragg

Défis & Opportunités

Les composites intégrant des fibres optiques, appelés « **smart composites** » sont encore marginaux mais pourront être utilisés pour des applications demandant de **hautes performances mécaniques** ou une **grande fiabilité** :

- sports et loisirs de compétitions, mâtures de bateaux de compétition ;
- construction civile et industrielle : ponts dans les **régions sismiques**, repérage de **véhicules hors gabarit** ;
- aéronautique.

La technologie des « smart composites » a été développée :

- aux **Etats Unis**, par le Centre de Recherche **Blue Road**, qui développe les logiciels de traitement des données fournies par les fibres optiques ;
- au Japon, par l'**université de Tokyo** qui développe deux techniques de caractérisation par voie optique : fibres optiques au diamètre réduit (40 microns contre 125 en Europe), fibres d'aluminium, permettant de détecter les ombres provenant des fissures (cette technologie est moins coûteuse que celle des fibres optiques).
- en Europe, la société britannique **Smart Fibres Ltd** qui commercialise des composites intégrant des fibres optiques et par la société allemande **Glötzl**, et sa filiale belge, spécialisée dans les capteurs optiques « Glötzl Europe Sensors ».

Peu d'acteurs français semblent impliqués dans les essais de caractérisation des matériaux composites par incorporation de fibres optiques à réseaux de Bragg, technologie **alternative** à l'intégration de mèches de carbone et **déjà commercialisée** pour certaines applications de composites haute performance.

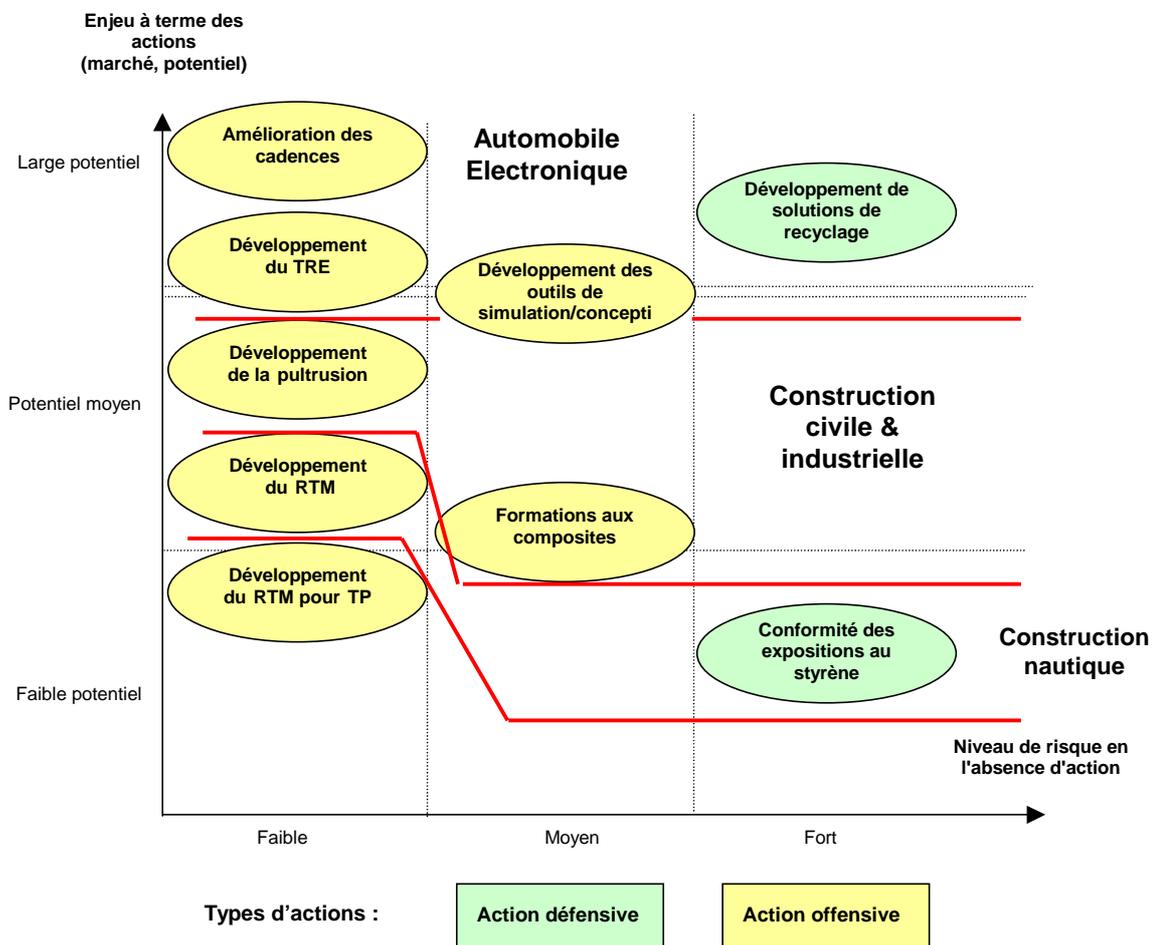
CHAPITRE 7
RECOMMANDATIONS

1 APPUI A LA FILIERE DES COMPOSITES

1.1 Différents types d'actions en fonction de leur objectif

Parmi les actions à entreprendre pour appuyer le développement de la filière composites en France, on peut en distinguer deux types en fonction de leur objectif final :

1. les actions défensives avec pour objectif de **défendre** les composites sur certains marchés,
2. les actions offensives avec pour objectif de les **développer** sur des marchés existants ou nouveaux.



1.2 Choix des appuis au développement de la filière

Le tableau [Synthèse des actions d'appui à la filière composite](#) présente la liste des actions envisagées pour assurer le développement de la filière composite classées suivant trois thèmes :

- la gestion environnementale absence face aux défis industriels,
- le développement de certains procédés, en particulier la pultrusion et le procédé RTM,
- la diffusion de l'approche composite par formation des prescripteurs.

Recommandations

Synthèse des actions d'appui à la filière composite

	Marchés les plus concernés	Taille des marchés concernés	Importance de l'action	Echéance	Situation actuelle en France
Solutions aux défis industriels					
Développement de solutions de recyclage à grande échelle	Automobile Electricité	108 000 tonnes 45 000 tonnes	Essentielle Souhaitable	2004	Solutions existantes mais isolées
Mise en conformité des émissions de styrène avec les directives européennes	Construction nautique Construction	18 000 tonnes 12 000 tonnes	Essentielle Souhaitable	2003	Emissions supérieures de 20 ppm à l'objectif
Développement/perfectionnement des outils de simulation et de conception	Tous les marchés sauf aéronautique	288 000 tonnes	Souhaitable	2003	Retard technologique partiel sur d'autres pays européens
Amélioration des cadences pour compatibilité avec des grandes séries	Automobile Electricité	108 000 tonnes 18 000 tonnes	Souhaitable	2005 2008	Cadences adaptées aux moyennes séries
Développement et perfectionnement de nouveaux procédés					
RTM	Aéronautique	12 000 tonnes	Souhaitable	2003	Procédé déjà utilisé mais encore minoritaire
	Construction nautique	18 000 tonnes		2003	
	Automobile	108 000 tonnes		2005	
Composites thermoplastiques TRE	Automobile	108 000 tonnes	Essentielle	2005	Procédé utilisé mais minoritaire
Procédés Thermoplastiques « HP » de type RTM	Sports et loisirs	18 000 tonnes	Souhaitable Souhaitable Essentiel	2005	Retard technologique relatif en France
	Aéronautique	108 000 tonnes		2005	
	Matériel médical	3 000 tonnes		2005	
Pultrusion	Construction	12 000 tonnes	Essentielle	2005	Inexistant en France
Diffusion de l'approche composites					
Formation des bureaux d'études	Ferroviaire	6 000 tonnes	Souhaitable Souhaitable	2005	Approche fonctionnelle insuffisamment appréhendée
	Matériel médical	3 000 tonnes		2005	
Formation des prescripteurs techniques	Construction	12 000 tonnes	Essentielle	2005	Réserves du CSTB et des architectes

2 SOLUTIONS AUX DEFIS INDUSTRIELS POSES PAR LES COMPOSITES

2.1 Programme de développement du recyclage¹

*Le recyclage des **SMC** devrait recevoir un appui de l'ensemble des acteurs de la filière, transformateurs et fournisseurs de matières premières, avec pour objectif d'être en mesure de retraiter 80 000 tonnes/an de matériau en 2005.*

Le programme Valcor, initié dès 1994 par PSA, Renault, et des acteurs de la filière composite (Faurecia, Valeo, Matra) pour développer des programmes de recyclage des matériaux composites issus de l'automobile devrait être renforcé afin d'être en mesure de :

- concerner **l'ensemble des transformateurs des composites** utilisés par l'industrie automobile : actuellement seuls trois transformateurs majeurs (Péguform, Inoplast, Menzolit) participent à ce projet ;
- recycler **la totalité des composites SMC/BMC** utilisés en France pour l'automobile, soit 40.000 tonnes/an.

Dans le secteur de l'électricité, les nouvelles réglementations devraient également imposer à moyen terme l'obligation de recyclage des matériaux composites. Le tonnage annuel à traiter pourrait alors atteindre entre **80 000 et 100 000 tonnes** de semi-produits SMC/BMC.

Pour prendre en charge le recyclage, deux actions complémentaires pourraient être envisagées :

- **élargir les activités de l'Association Valcor²** à l'ensemble de l'industrie des composites, intégrant, en particulier, les procédés SMC/BMC, très concernés par l'industrie automobile et par les impératifs du recyclage,
- **mettre en place**, dans un Centre Technique existant, **un centre d'étude du recyclage** des composites par types de matériaux : Valcor et MCR pourraient alors être intégrés comme partenaires de ce Centre d'étude.

Resterait toutefois à définir le mode de financement de ce Centre afin de mettre en place les outils permettant de :

- **mutualiser les efforts de R&D** de l'ensemble des acteurs de la filière sur le thème du recyclage et de rendre accessible aux **petites structures** des programmes de recherche de taille significative permettant de maintenir leur activité,
- réaliser les **investissements initiaux** indispensables pour la création d'une unité de recyclage de SMC/BMC,
- **soutenir la capacité d'innovation** du centre et de l'unité de recyclage en réduisant son besoin en financement ; le chiffre d'affaires de la vente des matériaux recyclés pourra être réinvesti dans une augmentation de capacité.

¹ Voir l'analyse du problème, traité au Chapitre 6 – Défis & Opportunités - § 1.2, sur la situation actuelle de la réglementation tant française qu'europpéenne.

² Le Grand Programme Innovant (GPI) Valcor réunit PSA et Renault ainsi que 10 autres partenaires industriels pour développer des techniques de valorisation des matériaux composites à base de polyesters insaturés. Les voies explorées visent la réutilisation des broyats fibreux dans les bétons, bitumes et thermoplastiques. Ce programme est à l'origine de la mise en place, en 1994, d'une unité de recyclage industrielle (Mecelec Recyclage) capable de traiter 3 000 tonnes par an.

Le principal marché des composites concerné par des actions de recyclage représente en France **108 000 tonnes**, soit environ 650 M€ la réussite de cette opération donnerait au marché de l'automobile la possibilité de se développer et d'atteindre 900 M€ à l'horizon 2006.

2.2 Sensibilisation à la mise en conformité des installations¹

Face à l'évolution réglementaire envisageable et à la pratique actuelle, la diminution de l'exposition au styrène constitue un enjeu important pour l'industrie française des composites et notamment les **secteurs de l'aéronautique** et de la **construction nautique**. Il paraît indispensable d'inciter les transformateurs de composites utilisant les méthodes de transformation à moule ouvert à évoluer vers des procédés de moulage sous vide ou des procédés de type **RTM**, plus respectueux de l'environnement.

Il ne semble cependant pas que le styrène soit à l'ordre du jour des discussions du SCOEL (*Scientific Committee on Occupational Exposure Limits*, groupe européen géré par la direction Emploi-Affaires sociales de la Commission). Pour l'instant la seule valeur limite applicable au niveau français est la valeur indicative de 50 ppm, soit 215 mg/m³ sur 8 heures (identique aux limites admises aux USA). Toutefois, si une évolution réglementaire de l'abaissement de la VME à 20 ppm devait se confirmer, il appartiendrait aux industriels de prendre les mesures permettant de mettre leurs installations en conformité.

Les organisations professionnelles auraient alors un rôle important à jouer pour s'assurer de la **compatibilité** de la nouvelle réglementation européenne avec les **capacités techniques** et financières des transformateurs français.

Elles devraient mener des actions **auprès des transformateurs** utilisant les procédés en moule ouvert pour les inciter à **évoluer et à innover**, quand cela est possible, vers des procédés dans lesquels les émissions de styrène sont plus réduites. Ces incitations pourraient consister, par exemple, à la mise en place d'un **accompagnement technique**, proposé par une cellule spécialisée au sein du GPIC. Plusieurs axes de développement sont à mettre en place pour une protection renforcée des salariés :

- aménagement des ateliers par la mise en place d'installations d'extraction et de ventilation ;
- évolution des procédés vers des moules fermés : déjà observable par le développement du RTM, cette évolution connaît malgré tout ses limites techniques pour des pièces de grande dimension.

En amont, la formulation par les fournisseurs de résines à faible taux de styrène constitue également un axe d'amélioration à encourager.

L'encouragement, l'information des syndicats professionnels nationaux et internationaux auprès des transformateurs et notamment des PME-PMI sont importants dans la démarche de **substitution** des techniques de transformation en moule ouvert par des **techniques en moule fermé** (par exemple le **RTM**) dans tous les cas où cela sera possible.

Un des marchés très concerné par ces mesures est constitué par le secteur de l'industrie nautique, qui représente, en France, **18 000 tonnes** soit environ 70 M€² ; ce marché est, en effet, tout particulièrement menacé, car très dépendant de l'utilisation des matériaux composites, pour lesquels il n'existe plus, aujourd'hui, de solutions économiques de remplacement.

¹ Voir l'analyse du problème, traité au Chapitre 6 – Défis & Opportunités - § 1.1, sur la situation actuelle de la réglementation tant française qu'europpéenne.

² Estimation Nodal

3 DEVELOPPEMENT ET PERFECTIONNEMENT DE PROCEDES-INNOVANTS

3.1 Appui au développement de l'estampage TRE

*En France, l'appui au développement de la technologie d'estampage **TRE** devrait rendre l'offre française plus compétitive dans l'industrie automobile.*

L'estampage de semi-produits TRE pourrait constituer une **solution alternative de la compression SMC** pour l'industrie automobile. Le procédé n'est encore que peu répandu en France (de l'ordre de 3%), mais dans des proportions comparables à la situation européenne (voir le tableau *Répartition des procédés de transformation*). L'appui au développement du procédé d'estampage TRE permettrait :

- de donner au secteur français des composites une **avance technologique** dans un marché de « grande diffusion » ;
- de faciliter le développement des composites thermoplastiques, plus facilement à recyclables que les composites thermodurs, et s'intégrer à une mesure d'appui au développement des solutions de recyclage.

Les mesures nationales pour la mise en application de procédés **TRE** pourraient s'**intégrer dans les programmes Predit**, car le débouché principal de l'estampage TRE demeure l'industrie automobile.

Un programme de recherche pour l'**industrialisation des composites TRE** pourrait réunir les acteurs de la filière concernés par le marché automobile :

- les constructeurs automobiles,
- les industriels de la chimie qui cherchent actuellement à se rapprocher des constructeurs (Atofina est un producteur significatif de polypropylène et de polyamide 12, utilisé dans la formulation des TRE),
- les **transformateurs de composites** impliqués dans la technologie similaire de compression SMC, tels Sotira,
- les **éditeurs de logiciels** de simulation de procédés.

Si un développement rapide des équipements de production était initié, le marché des composites TRE pourrait croître de 15% par an ; l'automobile devrait continuer à représenter le principal débouché de ce nouveau procédé, dans la mesure où les problèmes de recyclage seraient réglés. Le marché des TRE pourrait alors représenter **quelques 18 000 tonnes** en France à l'horizon 2006, soit environ 108 M€

3.2 Développer la pultrusion dans le secteur du bâtiment

*En France, pour que la **pultrusion** puisse se développer, il sera nécessaire de sensibiliser les acteurs de la construction à l'égard d'une meilleure utilisation des matériaux composites (Ministère de l'Equipement, **CSTB**, industriels).*

Les éléments pultrudés sont essentiellement utilisés dans la **construction et le génie civil**. Le développement de ce procédé de transformation devrait rendre l'offre des matériaux composites **plus convaincante** dans le BTP et s'intégrer dans la démarche de pénétration des composites dans le marché du génie civil.

Recommandations

Les mesures d'encouragements à l'égard des industriels devraient les inciter à examiner plus attentivement les avantages et contraintes de ce type de matériaux et permettre la création de **cahiers des charges** spécifiques à la construction utilisant les produits pultrudés.

Le Ministère de l'Équipement mène plusieurs actions de promotion de l'innovation dans le bâtiment ; l'un de ces axes pourrait être d'inciter le CSTB à définir les conditions d'utilisation des composites pultrudés dans le bâtiment.

Pour **améliorer la réceptivité** des acteurs de la construction à l'égard des composites, un programme de définition des conditions d'utilisation des produits pultrudés pourrait être intégré à la démarche initiée par Plasti-Ouest ; parmi ces acteurs, il convient de mentionner :

- les maîtres d'œuvre (Bouygues) et les bureaux d'études (architectes et ingénieurs),
- les transformateurs de composites pultrudés (Hussor),
- les industriels déjà concernés par la réalisation d'infrastructures à base de composites pultrudés (Top Glass),
- les organismes professionnels tels le [GPIC](#), le [CSTB](#).

L'objectif du développement de la pultrusion en France pourrait être de prendre une part d'environ 10% des composites transformés en France, soit **environ 30.000 tonnes**, essentiellement dans le domaine de la construction. Le marché induit par le développement de la pultrusion pourrait atteindre 135 M€.

4 DIFFUSION DE L'APPROCHE COMPOSITES

4.1 Promouvoir l'utilisation des composites dans le bâtiment

Inciter les entreprises de construction à investir dans la création de centres de R&D internes devrait permettre à la profession d'acquérir une meilleure compréhension des spécificités des composites et de leurs applications.

Les concepteurs du bâtiment et de la construction industrielle - architectes, ingénieurs spécialisés dans la résistance des matériaux, entreprises de BTP – méconnaissent les propriétés spécifiques des composites et leurs applications dans leur domaine de compétence ; en France, cette situation est encore aggravée par le sous-dimensionnement **des centres de R&D internes** des entreprises du BTP. Aussi, la totalité des actions de diffusion des spécifications repose sur le CSTB.

Il serait souhaitable que les entreprises de la construction et du génie civil puissent acquérir, en interne, un potentiel de recherche comparable à celui de certaines entreprises de BTP au Japon, où l'on rencontre des exemples tels que celui de cette entreprise de 9.000 salariés qui emploie 250 personnes dans la R&D. Une structure interne de R&D, propre à l'entreprise, lui permettrait de :

- développer la connaissance des composites afin de mieux appréhender leur mise en œuvre et d'en mieux connaître les conditions d'utilisation ;
- déterminer l'impact des avancées technologiques, comme, par exemple, la limitation des grues, une meilleure résistance aux contraintes climatiques, une limitation des besoins de traitements spécifiques ;
- développer une **expertise technique** comparable à celle du CSTB afin de participer activement à la définition des normes techniques concernant la résistance au feu et le vieillissement, ainsi que les normes de résistances chimiques et mécaniques.

¹ Estimation Nodal

Recommandations

Les entreprises de la construction civile et industrielle pourraient également être incitées à confier des programmes de développement à des laboratoires externes et à s'équiper de structure propre de R&D par des actions :

- de communication : publication des meilleures pratiques de R&D à l'étranger dans la construction et des compétences en composites des laboratoires de recherche ;
- d'appui à la recherche : présentation des contrats Cifre (*Conventions Industrielles de Formation par la Recherche*) et de leur utilité.

Une approche plus fonctionnelle des spécificités des composites par les sociétés de construction permettrait de développer leur utilisation dans le bâtiment et la construction ; à l'image de ce qui se passe au Japon, leur utilisation pourrait atteindre une valeur proche des 35% observés au Japon. Le marché supplémentaire ainsi créé pourrait atteindre en France **42 000 tonnes** de composites, soit près de 200 M€

4.2 Former les concepteurs à l'analyse fonctionnelle

Les concepteurs des bureaux d'études, familiers des matériaux traditionnels, devraient être formés à l'analyse fonctionnelle, indissociable de la culture technologique des composites. En outre, elle constitue un moyen d'accroître la valeur ajoutée par les transformateurs.

La prise en compte de la spécificité des composites doit être encouragée par une **formation au niveau des écoles d'ingénieurs** (Ensi, Insa) et des bureaux d'études, afin d'assurer l'émergence d'une **culture « composite »** qui puisse prendre la place qui lui revient à côté des cultures technologiques traditionnelles (bois, béton, acier).

Une formation adaptée des concepteurs peut comporter plusieurs étapes et traiter d'aspects complémentaires intimement liés :

- initiation aux **concepts de l'analyse fonctionnelle** et de ses apports à la conception des pièces et sous-ensembles ;
- présentation des caractéristiques et des performances comparées des **composites et de leur spécificité** dans la conception de produits ;
- initiation à l'analyse économique des avantages de l'utilisation des composites à travers le concept de « coût complet de possession » ;
- mise à disposition de bases de données technico-économique comparées sur les composites.

Pour assurer une large diffusion de l'analyse fonctionnelle et de la culture technologique des concepteurs sur les composites, la formation devra s'insérer en priorité :

- dans le **cursus initial** des écoles d'architectes, dans lesquelles la formation technique est moins poussée en France qu'elle ne l'est dans d'autres pays européens (Allemagne, Suisse) ;
- dans la **formation continue** pour les concepteurs des industries dans lesquelles les cultures traditionnelles sont le plus profondément ancrées : **ferroviaire, construction**, éventuellement automobile.

La formation des concepteurs, assurée aux Etats Unis par le [CFA](#), par des publications et des colloques, pourrait être assurée en France par le [GPIC](#).

5 INCITER LES ACTEURS A S'IMPLIQUER DANS LA RESOLUTION DES PROBLEMES DE LA FILIERE

5.1 Inciter les PMI à participer à des programmes de R&D

Les PMI de la filière des composites ont besoin d'être accompagnées dans le maquis des procédures et de disposer, à travers le GPIC ou lors du JEC, d'une présentation claire des dispositifs d'aides dont elles peuvent bénéficier. Dans leurs démarches d'appui à la recherche, les Pouvoirs publics pourraient mettre en place des moyens d'incitation pour aider les PMI qui recherchent des technologies innovantes à :

- privilégier des collaborations avec les centres de recherche nationaux (Ecole des Mines de Douai, Pôle de Plasturgie de l'Est) en remplacement d'actions internes de développement qui sont souvent peu efficaces parce que trop limitées par la taille des entreprises ;
- participer davantage aux **programmes français ou européens** (Eureka, Craft, Performance, ex-Brite Euram) orientés vers la solution d'un besoin fonctionnel de secteur d'application spécifique (composites pour l'automobile, construction) dans lequel les composites seront **valorisés selon des critères d'analyse fonctionnelle**.

L'appui aux PMI pourrait également consister en un **accompagnement au cours des procédures** de soumission des dossiers pour l'obtention d'aides nationales ou européennes.

Une présentation des différents leviers d'aide à l'innovation et des axes d'appui dans l'industrie des composites devrait également être effectuée à travers les canaux de communication spécialisés de la profession :

- les revues, telles *Plastiques Modernes et Elastomères* ou *Composites International* ;
- salons, tels GO Plast, **JEC** où des conférences pourraient être organisées ;
- organisations professionnelles (GPIC).

5.2 Associer les fournisseurs de matières premières à la R&D

En **amont de la filière** des composites, les fournisseurs de matière première - les fournisseurs de **résines** (Rhodia, Atofina) et les fournisseurs de **fibres de verre** (Vetrotex), d'aramide (Rhodia) ou de carbone (Soficar) – devraient être **associés plus étroitement et systématiquement** aux programmes de recherches concernant les matériaux composites :

- ils pourraient ainsi se rapprocher des transformateurs de composites, appréhender leurs difficultés concrètes et formuler de nouveaux matériaux de base mieux adaptés à leurs besoins ;
- une coopération plus approfondie avec les transformateurs, directement en **contact avec les clients finaux**, permettrait de mieux répondre aux exigences **fonctionnelles** (durée de vie, température limite, aspect) ; en permettant à ces fournisseurs d'acquiescer une meilleure perception des besoins, elle s'intégrerait dans une stratégie de rapprochement avec les utilisateurs finaux de produits (équipementiers, constructeurs automobile ou aéronautique) ;
- les moyens financiers et la capacité de R&D, répartie en centres de compétences spécialisés, de ces groupes de taille internationale, permettraient d'apporter à la filière composites les moyens et la structure indispensable pour soutenir l'effort de développement des transformateurs, dont les moyens sont trop dispersés et les capacités financières trop limitées.

Recommandations

A juste titre, les fournisseurs de matière première apporteraient, ainsi, une contribution significative à la réflexion de la profession concernant les menaces qui pèsent sur l'industrie de transformation des composites, celle-ci représentant, ne l'oublions pas, une part non négligeable de leur marché (environ 5% en France) ; les thèmes proposés à leur réflexion pourraient, entre autres, inclure :

- le développement de technologies et d'infrastructures de **recyclage** ;
 - en particulier, la dissociation de la matrice et des fibres ;
 - la limitation de la dégradation des propriétés mécaniques.
- le développement d'outils de **simulation**, en particulier des procédés RTM et SMC ;
- la participation à la définition de normes de **caractérisation des matériaux**,
- dans le domaine du bâtiment, la pultrusion : amélioration des propriétés mécaniques des produits et définition de normes d'utilisation ;
- le développement de procédés de fabrication de composites thermoplastiques « hautes performances » ;
- les moyens de **caractérisation des composites et les matériaux intelligents**¹.

La **sélection** de ces technologies liées aux matériaux composites pourrait être réalisée en liaison avec les acteurs de **la filière** (résiniers, [GPIC](#), transformateurs, éditeurs d'outils de simulation, éventuellement utilisateurs).

5.3 Développer des outils de caractérisation

Parmi ces axes de recherche, la mise en œuvre d'un programme national ou international de caractérisation pourrait, sans doute, permettre de soutenir la crédibilité des composites face aux matériaux traditionnels aux comportements bien connus et prévisibles.

L'absence de modélisation précise constitue un **frein pour l'optimisation** de la quantité utile de matière et du dimensionnement des renforts des pièces en matériaux composites.

La normalisation incomplète des composites peut, dans certaines applications, constituer un **handicap par rapport aux matériaux traditionnels** aux comportements bien connus (étudiés et utilisés depuis longtemps) ; ceux-ci ont ainsi réussi à récupérer certains marchés, comme, par exemple, celui des équipements de voitures dans le secteur ferroviaire.

Il ne semble pas qu'une caractérisation systématique des composites ait jamais été entreprise à **l'échelle nationale ou internationale** ; toutefois, quelques programmes locaux partiels de caractérisation sont actuellement développés :

- l'IFTH participe à un programme de caractérisation des composites en fonction de la texture et du croisement des fils du tissage ;
- les centres de recherche universitaires développent des programmes partiels de caractérisation sur des applications particulières ;
- EADS a développé en interne une base de données de comportements « de composites types » ;
- la [FAA](#) (équivalent américain de la DGA) met à la disposition des transformateurs de composites pour l'aéronautique, le spatial et la défense, une base de données de caractérisation des matériaux composites.

¹ Cet axe de recherche fait, déjà, l'objet d'un soutien de la part du gouvernement japonais.

Recommandations

Un tel programme de caractérisation pourrait être développé à partir des thèmes suivants :

- le choix de **2 ou 3 matériaux composites de référence** définissant avec précision la résine, les fibres, les taux et architecture de renfort ;
- l'étude de leur comportement à long terme (15 ans) ;
- la définition de procédures-tests d'essais mécaniques et de contrôles non destructifs ;
- la standardisation des méthodes de production.

5.4 Renforcer les organismes professionnels

Les organisations professionnelles de la filière composites devraient être renforcées afin de disposer d'une taille leur permettant de jouer un rôle significatif lors des négociations avec les instances réglementaires tant en France qu'en Europe.

Du fait de leur taille et de leur dispersion, les PME/PMI de la transformation des composites ne disposent pas d'un grand pouvoir de négociations ; ils sont pris en tenaille entre :

- les industriels **fournisseurs de résines**, dont la politique de vente à prix élevé est justifiée par les faibles quantités achetées par chaque transformateur ;
- les **clients finaux** (constructeurs automobile) qui font pression sur les prix de vente des transformateurs et les conditions de production (cadences, recyclage).

Seulement **un tiers des transformateurs** de composites (environ 400) sont regroupés au sein du *Groupement de la Plasturgie Industrielle et des Composites* (GPIC), qui du fait de ses moyens limités et de sa taille réduite ne peut jouer un rôle significatif de **représentation et de décision** auprès des partenaires externes de l'industrie des composites.

Dans le prolongement du GPIC, une organisation professionnelle forte et représentative de la filière permettrait d'attirer les transformateurs actuellement dispersés dans des organisations de la plasturgie, comme Plasti-Ouest. Une telle organisation aurait pour principaux avantages :

- de **représenter la diversité de la filière composite**, avec des sections spécifiques pour les transformateurs des composites « grande diffusion » ou « hautes performances », dont peu d'industriels connaissent actuellement le GPIC ;
- d'avoir un **rôle représentatif et consultatif fort** face aux partenaires industriels et institutionnels pour la définition de nouveaux axes de développement ;
- de pouvoir, à l'instar du *Composite Fabricator Association* (CFA) aux Etats Unis, jouer un **rôle de sensibilisation aux spécificités des composites et de formation** par le biais de publications et de colloques destinés à l'ensemble des industriels.

Une organisation professionnelle représentative de l'industrie des composites pourrait avoir un prolongement par la création d'une **fédération européenne puissante**, participant à la définition des normes et des axes de programmes de recherche internationaux et disposant d'un pouvoir important de négociation auprès des instances européennes. Actuellement, le GPRMC, réduit à sa plus simple expression, ne peut guère rivaliser avec des organisations professionnelles puissantes, tel l'EuPC qui représente environ 30.000 PMI de la plasturgie en Europe.

ANNEXES

<i>Annexe 1 : Composition du Comité de pilotage.....</i>	115
<i>Annexe 2 : Brevets déposés par pays et par thèmes de 1998 à 2000.....</i>	116
<i>Annexe 3 : Listes des acteurs contactés.....</i>	117
<i>Annexe 4 : Réseaux de Bragg.....</i>	127
<i>Annexe 5 : Glossaire.....</i>	128

Annexes 1

Liste des membres du comité de pilotage de l'étude

Nom	Organisme	Fonction
Sylvie DUMARTINEIX	ANVAR	Chargée d'Affaires à la Direction de la Technologie
Sylvie FURE	CFCE	Responsable sectorielle Matériaux nouveaux
Jean-François BAUMARD	CNRS	Responsable du Programme Matériaux
Bernard HYON	DARPMI	Chargé de mission à la S/Direction développement industriel technologique régional
Fabrice LEROY	DIGITIP	Chef du bureau de financement de l'industrie
Grégoire POSTEL-VINAY	DIGITIP / SEINE	Chef de l'observatoire des stratégies industrielles
Jean-François LOUE	DIGITIP / SESSI	Chargé de mission
Joël BOCHER	DIGITIP / SESSI / CES Caen	Chef de la division sectorielle caoutchouc, matières plastiques
Pascal BROCARD		Chargé d'études sectorielles
Hervé CHALAYE	DIGITIP/ SIM	Chargé de mission auprès du sous-directeur matériaux
Gilbert BOUKOBZA		Responsable sectoriel construction navale et plaisance
Michel ARIBART		Responsable sectoriel équipements automobiles
Jacques Tellier		Chargé de mission textile habillement cuir
Sabine PORTIER		Sous-Directeur Matériaux
Michel MUSSINO		Chef division matériaux avancés
Claude CHIANELLI	DIGITIP / SIQ	Appel à propositions Techno-clés et Performances
Damien CABY	DRIRE Aquitaine	Chef de la division développement industriel
Jean-Luc ROUSSEAU		Transfert de technologie
Prof. Patricia KRAWCZAK	Ecole des Mines de Douai	Directrice département polymères et composites
Jean-Pierre de LARY	GPIC	Délégué Général Adjoint

Annexes 2

Brevets déposés par pays et par thèmes de 1998 à 2000

Entreprises	Pays	Matériaux composites (2000 seulement)	Composites à matrice organique (1998-2000)	Composites thermoplastiques (1998-2000)	Composites et fibres de carbone (1998-2000)	Composite et polycarbonate (1998-2000)	Total
NGK Insulators	J	35	5		22		62
Toyota	J	18		8			26
EADS (Aérospatiale)	F/D	17	4	1	15		37
SNECMA	F/D	16	2		7		25
Toray industries	US	16			39	31	86
Europropulsion	F	13	1		9		23
Daimler Chrysler	D	12	2				14
Ube Industries	J	12		2		5	19
General electric	US	11		12		83	106
Hoechst (Aventis)	F	11		19		7	37
Mitsubishi	J	10	2		15	47	74
Ivoclar	FL	8	2				10
Northrop	US	8	5				13
Atofina	F	6		19			25
Boeing	US	6	13	32	5		56
Eurocopter	F	6	3	2			11
Lockheed Martin	US	6			9		15
3M	US	6	3			19	28
Rhodia	F	1	1	2			4
BASF	D			16		8	24
Dupont	US		1	31	5	4	41
Owens Corning	US		1	15			16
Vetrotex	F		1	16			17
Total		218	46	175	126	204	769
Europe		90	16	75	31	15	227
dont France		70	12	59	31	7	179
US		53	23	90	58	137	361
Japon		75	7	10	37	52	181

Annexes 3

Fournisseurs de résines et de fibres

Saint Gobain Vetrotex

Paul Lucas
Directeur Twintex®
767 quai des Allobroges BP929
73009 Chambéry Cedex
Tél : +33 4 79 75 56 68
Fax : +33 4 79 75 53 99
Paul.lucas@saint-gobain.com

Toray (Soficar)

Guy Dupupet
Directeur industriel
Route de Lagor
64150 Abidos
Tél : 05 59 60 71 00
Fax : 05 59 60 71 20
Soficar.guy.dupupet@wanadoo.fr

Mitsubishi Chemical Functional Products

Mr Iwao YAMAMOTO General Manager
Mr Akira NAKAGOSHI Manager
Composite Materials Division
Tekko Building 8-2, Marunouchi 1-chome
Chiyoda-Ku, Tokyo 100-0006 JAPON

Accordis AG/ Fortafil Fibers

Dr-Ing Ernst Braches
Directeur développement Europe
Kasinostrasse 19-21
Wuppertal
Allemagne
Tél : +49 2 02 32 33 45
Fax : +49 202 32 23 35
Ernst.Braches@Accordis.com

Schappe Techniques

M. Giroux
Directeur Commercial
M. Bontemps
Responsable R&D
Rue Monetroi
01800 CHARNOZ SUR AIN
Tél. : 04.74.46.31.00
Fax : 04.74.34.79.35

Christian Neyroud
Directeur mercatique France
5 chemin du Jubib
69570 Dardilly
Tél : 04 374 49 67 78
Fax : 04 37 49 97 87
Christian.neyroud@twaron.fr

Toray Industries, Inc.

Tohru HIRAMATSU, General Manager
Ryuichi YAMAMOTO, Deputy Gal. Manager
ACM Technology Dept.
2-1, Nihonbashi-Muromachi 2-chome
Chiyoda-Ku, Tokyo 103-8666 JAPON

Owens Corning

Frédéric Calvel
Tél : 06 08 84 46 08
Fax : 03 44 54 72 48
Frederic.calvel@owenscorning.com

Owens Corning

Richard Palmer
Responsable développement
P.O. Box 215
Walworth, Wisconsin 53184
Etats Unis
Tél : +1 262 275 0177
Fax : +1 419 325 91117
Richard.palmer@owenscorning.com

Zoltek

Kamal Ismail
Directeur projet
Zoltek Rt.
2537 Nuergesűjfalú, Varga J. tér 1.
Hongrie
Tél : +36 33 536 184
Fax : +36 33 536 020

Flemings Industrial Fabrics

George Ballard
Directeur technique
Belford Mills Lawson Street
Kilmarnock
Ayrshire Scotland KA1 3HZ
Tél : +44 1563 52 5203
Fax : +44 1563 52 2022

Sumitomo Corporation

Koji Fukuda
Assistant DG département carbone
Sumisho Nishikicho
3-11-1 Kandanshikicho Chiyoda-ku
Tokyo 101-8461
Japon
Tél : +81 3 3296 2932
Fax : +81 3 3296 3679
Koji-a.fukuda@sumitomocorp.co.jp

Ems Chemie AG

Petre Maskus
Directeur division PA-12
7013 Domat/ems
Suisse
Tél : +41 81 632 65 79
Fax : +41 81 632 76 59

Dr. Andrea Palinsky
Vazinerstrasse 49
47138 Duisburg-Meiderich
Allemagne
+49 2 03 42 96 612
Fax : +49 2 03 42 96 672

Bakelite AG

Eric Garnier
Chef des ventes France Résines Epoxydes
52 Quai de Dion Bouton
F-92806 Puteaux Cedex
Tél : +33 1 46 93 93 36
Fax : +33 1 47 73 99 46

Transformateurs de composites

Composites Aquitaine

M. Chassner
Directeur R&D
19 route de Lacanau
33160 SALAUNES
Tél. : 05.56.68.55.00
Fax : 05.56.58.51.93

Sora Composites/Sotira

M. Guery
Responsable qualité
1984 avenue des Landiers
73000 CHAMBERY
Tél. : 04.79.69.92.09
Fax : 04.79.96.32.03

Plastim Aquitaine

M. Fouco
Directeur
ZI Croix d'Hins
33380 MARCHEPRIME
FRANCE
Tel : +33 (0) 557711179
Fax : +33 (0) 557718922

Inoplast

M. Longueville
Directeur technique
ZI Saint Desirat
07340 ST DESIRAT
Fax : 04.75.34.28.29

Natec

M. Lagarde
Responsable Technique
1 ZI de Luget
33290 LE PIAN MEDOC
FRANCE
Tel : +33 (0) 556702370
Fax : +33 (0) 556702417

Stratiforme

M. Lorrain
Directeur R&D
26 Route Nationale
59235 BERSEE
Tél. : 03.20.84.90.10
Fax : 03.20.59.28.00

Nief Plastic

M. Berthet
Directeur R&D
10 rue Jean Rostand
Zone Industrielle
69745 GENAS CEDEX
Tél. : 04.78.40.11.52
Fax : 04.72.47.01.48

Creative Pultrusions international Ltd

Ron Brown
Directeur Général
6 The Drive
Rushden
Northants
NN10 9JT - Royaume Uni
Tél : +44 1933 356652
Fax : +44 1933 411976

Mecelc Composites et Recyclage (MCR)

Stéphane Lambert
Division recyclage
ZI des Iles Feray
07302 Tournon sur Rhône
Tél : 04 75 07 82 88
Fax : 04 75 07 11 77

ATP Intellitec

Carla D. Caputto
Directrice sectorielle RTM
2000 Brunswick Lane
DeLand FL 32724-2001
Etats Unis
Tél : +1 904 738 8155
Fax : +1 904 738 8191

Annexes

Phoenixx

David B. Park
Président
455 Somerset Avenue
Dighton MA 02764
Tél +1 508 977 9501
Fax : +508 977 9502

Gerard Sutton
Vice Président
+1 904 738 8103

Chelton Radomes

Marcus Lawton
PO Box 55
Gunnels Wood Road
Stevenage, Herts SG1 2db
Royaume Uni
+44 1 1438 752362
Fax : +44 1438 753813

Hiroshima Plastics Company

Masataka INOUE Manager
New Products Dev. Dep.
118 Yonemitsu Hachihommatsu
Hiroshima Pref. 739-0133 JAPON

Menzolit Fibron

Division profilés
Alte Hünxer Strasse 139
45562 Voerde
Allemagne
Tél : 649 281 13231
Fax : +49 281 13 231

TEIJIN Limited

Dr. Hiroo INATA
Senior Manager R&D
1-1, Uchisaiwaicho 2-Chome
Chiyoda-Ku, Tokyo 100-8585 JAPON

KTK

Thomas Beck
Directeur commercial
Hansestrasse 51
38112 Braunschweig
Allemagne
Tél : +49 531 21001 13
Fax : +49 531 21001 16
Allemagne

Nitsche Kunststofftechnik

Steffen Nitsche
Gérant
Radeberger Landstrasse 19
01328 Dresden/Rossendorf
Allemagne
Tél : +49 351 265695 2
Fax : +49 351 265695 3

Fournisseurs de machines et d'éditeurs de logiciels

Roctool

Alexandre Guichard
Directeur Général
Savoie Technolac BP 341
73375 Le Bourget du La Cedex
Tél : 04 79 26 49 97
Fax : 04 79 26 49 91

Moldflow

Catherine Baghdigian
27 Boulevard du 11 Novembre 1918
BP 2132 69603 Villeurbanne Cedex
Tél : 04 72 82 11 30
Fax : 04 72 82 11 39

BSD /EHA Spezial Maschinenbau

Johannes Weg
Directeur général
Niedereisenhausen Bauhofstrasse 2
35239 Stefefenberg Allemagne
Tél : +49 64 64 91 50 17
Fax : +49 64 64 91 50 52

Brenner International

Robert M. Fitzgerald
Président Directeur Général
32 East North street Newak Ohio 43055
Tél : +1 740 345 8845
Fax : +1 740 345 8846

Flow Europe

Jean Christophe Vidil
Responsable ventes France
38 Place des pavillons
69007 Lyon
Tél : 04 72 80 82 03
Fax : 04 72 80 82 04

Blue Road Research

Eric Udd
2555 N.E. 205th Avenue
Fairview, Oregon 97024 Etats Unis
tél: 503-667-7772
Fax: 503-667-7880

Gloetzl

Rainer Gloetzl
GLÖTZL Gesellschaft für Baumeßtechnik mbH
Forlenweg 11 76287 Rheinstetten Allemagne
Tel : + 49 7 21 51 66 – 0

Utilisateurs de composites

Sommer Allibert

M. de Bettignies
Directeur R&D
Route Villemonty
08210 Mouzon
Tél : 03 24 22 36 34

EADS

Jacques Hognat
Chef du département matériaux
Centre de recherche
12 rue Pasteur BP 76
92152 Suresnes Cedex
Tél : 01 46 97 32 95
Fax : 01 46 97 37 30
Jacques.hognat@eads-nv.com

Entrepose Montalev

Gilles Mangaud
Responsable Zone Sud Ouest
Rue Roger Espagnet - BP. 1 -
33440 SAINT-LOUIS DE MONTFERRAND
Tél. : 05 56 77 41 95 -
Fax : 05 56 77 46 07
mangaud.g@entrepose.fr

Rossignol

M. Cristou
Responsable R&D skis
rue du Docteur Butterlin
BP 329
38509 VOIRON CEDEX
Tél. : 04.76.66.65.65
Fax : 04.76.05.90

Plastic Omnium

Frédéric Viot
Responsable matières brutes, peinture et
recyclage
Centre technique
11 rue Ampère
01117 Oyonnax Cedex
Tél : 04 74 81 76 73
Fax : 04 74 81 76 89fviot@plasticomnium.com

Alstom

M. Chappet
Responsable matériaux
3 avenue des Trois Chênes
90018 BELFORT CEDEX
Tél. : 03.84.55.10.10
Fax : 03.84.55.13.98

CFD

Arnaud Fleurquin
Responsable Bureaux d'Etudes
9 rue Benoît Malon
92156 SURESNES CEDEX
Tél. : 01.45.06.44.00
Fax : 01.47.28.48.84

Takenaka Corporation –

Dr. Eng. Sadatoshi OHNO Chief Researcher
R&D Institute

Market Creation Section

1-5-1, Ohtsuka, Inzai
Chiba 270-1395 JAPON

Bénéteau

Vincent Guilbaud
Responsable bureau d'études
40 Rue Félicien Thomazeau
44400 REZE
Tél : 02 51 60 50 00

Construction navale de Bordeaux

M. Belmont
162 quai de Brazza
33100 BORDEAUX
Tél. : 05.57.80.85.50
Fax : 05.57.80.85.51

Soprema

Rémi Perrin
Directeur R&D
SOPREMA
14 rue de Saint Nazaire BP 121 –
67100 - STRASBOURG
Téléphone - 03 88 79 84 00
Fax - 03 88 79 84 01

Hightex/IPF

Konrad Gliesche
Président directeur général
Henningsdorferstrasse 25
01257 Dresden
Allemagne
Tél : +49 351 218 37 30
Fax : +49 351 218 37 59
Gli@ipfdd.de

IMA

Udo Berthold
Responsable Département matériaux
Hermann Reichelt Strasse
01109 Dresden
Tél : +49 51 88 37 419
Fax : +49 351 88 37 530

Sakura

Mr Hideo MACHIDA Assistant to the President
Mr Hiroshi NAKAMURA Managing Director
Mr Akira SATO Deputy General Manager
Mr Yoshihiko GOTO Manager
1-21-17, Sasazuka, Shibuya-KU
Tokyo 151-8587 JAPON

Smart Fibres

Michael Hill-King
Directeur mercatique et vente
Unit 9, Mitchell Point
Ensign Way
Hamble
Southampton
Hampshire
SO31 4RF – Royaume Uni
Tel +44 (0) 23 80 454 639

Organisations professionnelles

GPIC

Jean Pierre de Lary
Délégué général Adjoint
65 rue de Prony
75854 Paris Cedex 17
Tél : 01 44 01 16 39
Fax : 01 42 67 77 19

Plasti-Ouest

Joyce Legeay
2 Allée du Bâtiment
BP 7707
35077 Rennes Cedex
Tél : 02 99 87 42 87
Fax : 02 99 36 49 47

Groupement de la Plasturgie Automobile

Jean Luc Brillanceau
Délégué Général
65 rue de Prony
75854 Paris Cedex 17
Tél : 01 44 01 16 38
Fax : 01 42 67 77 19

GPRMC

Gustaaf Bos
Secrétaire Général
Diamant Building, Bld A Reyerslaan 80,
1030 Bruxelles
Tel: +32 2 706 79 60, Fax: +32 2 706 79 66
gustaaf.bos@agoria.be

Centres de recherche

Pôle de Plasturgie de l'Est

Jean Pierre Cauchois
Directeur technique
18 avenue du Général Patton
BP 50207 57506 saint Avoild Cedex
Tél : 03 87 92 93 94
Fax : 03 87 92 92 92

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW)

Martin Schlottermüller
Responsable procédés
Université de Kaiserslautern
Erwin-Schrödinger-Strasse
67663 Kaiserslautern Allemagne
Tél : +49 631 20 17 446
Fax : +49 631 20 17 197

Mines de Douai (ESMD)

Prof. Patricia Krawczak
Directrice Technologie polymères & composites
941 rue Charles Bourseul
BP 838 - 59508 Douai Cedex
Tél : 03 27 71 21 75
Fax : 03 27 71 25 25
krawczak@ensm-douai.fr

**Institut für Konstruktion und
Verbundbauweisen (KVB)**

Dr Petra Schulz
Annaberger Strasse 240
09125 Chemnitz
Allemagne
Tél : +49 371 43 47 5 20
Fax : +49 371 53 47 5 23

Compositec

M. Pady, Directeur
Savoie Technolac - BP 252 –
73375 LE BOURGET-DU-LAC CEDEX
Tél : 04.79.26.42.42 –
Fax : 04.79.26.42.43

Matra Missile

Serge Catoire,
directeur général délégué aux opérations
d'Aérospatiale
Tél : 01.47.46.21.52

Pôle Européen de Plasturgie

2, Rue P. et M. Curie
01100 BELLIGNAT
Tel : (33) 4 74 81 92 60
Fax : (33) 4 74 81 92 612

National Aerospace Laboratory of Japan

Dr. Takashi ISHIKAWA Director
Advanced Composite Evaluation Technology
Center
6-13-1 Ohsawa, Mitaka
Tokyo 181-0015 JAPON

Ecole Polytechnique de Lausanne (EPFL)

Dr Martyn Wakeman
Composites and Polymer Technology
Laboratory (LTC),
Parc scientifique, Bâtiment A (PSE-A),
1015 Lausanne Suisse
Tel: +41 21 693 8803
Fax: +41 21 693 5880
martyn.wakeman@epfl.ch

Takeda Laboratory

Professor Nobuo TAKEDA
Komaba Open Laboratory
The University of Tokyo
Dept. of Advanced Energy
Dept. of Aeronautics and Astronautics
4-6-1, Komaba
Meuro-Ku, Tokyo 153-8905 - Japon

**Institut Français du Textile et de
l'Habillement (IFTH)**

Guy Nemoz
Secrétaire Général de la Recherche
Avenue Guy de Collonge
69134 Ecully
Tél : 04 72 86 16 13

Autres contacts

CRITT Toulouse (Mécanique et composites)

Christophe Lorenzato
Ingénieur Chef de projet
133 avenue de Ranguel 31400 Toulouse
Tél : 05 62 25 87 39
Fax : 05 62 25 87 41

Poste d'Expansion Economique Houston

Bernard François
Attaché industries chimiques
777 Post Oak Boulevard, Suite 600
Houston, Texas 77056
Tél : +1 713 985 32 78
Fax : +1713 572 2901
Bernard.français@dree.org

CRITT Polymères Picardie

Florence Ginestet
Responsable caractérisation
6, Chemin de Ronde
F-60550 Verneuil en Halatte
Tél : 03.44.28.54.36

Hutchinson/ Réunion Nationale Matériaux et Procédés

Gilles Argy
Directeur
2 rue Balzac
75008 Paris
Tél : 01 40 74 82 95
Fax : 01 40 74 83 17

Think Composites

Roland Harry
3 rue Branlac
33170 Gradignan
Tél : 05 56 84 58 55

Chambre Economique de Saxe

Matthias Gerhardt
Bertolt Brecht Allee 22
01309 Dresden
Tél : +49 351 31 99 12 25
Fax : +49 351 31 99 10 99

FRP Services

Pascal Clément
Parc de la Duranne
235 rue Louis de Broglie
13857 Aix en Provence cedex 3
Tél : 04 72 42 28 95

Centre for Materials Measurement & Technology

National Physical Laboratory
Dr. Graham D. Sims
Director for Composites & Polymers
Queens Road
Teddington – Middlesex – UK – TW11 OLW
Tél: 01 81 977 3222
graham.sims@npl.co.uk

Annexes 4

Capteurs à fibre optiques à réseaux de Bragg

Principe et technologie des réseaux de Bragg :

- les réseaux de Bragg sont des réflecteurs spectralement sélectifs, à la longueur d'onde: $\lambda_B = 2n\Lambda$, avec Λ la période des franges inscrites, et n l'indice de réfraction de la fibre. Sous l'influence d'une contrainte (température, déformation) la raie spectrale réfléchie par le réseau de Bragg se déplace. La mesure de ce déplacement fournit l'amplitude des grandeurs d'influence.
- **pour la surveillance des structures, ils** présentent des avantages inégalés pour les mesures de température, pression, déformation, détection d'impacts ainsi que d'autres grandeurs via un conditionnement approprié.

Performances : la sensibilité aux principaux paramètres (température T, pression P et déformations ($\varepsilon = \Delta L/L$)) est :

- Température : 10pm/K
- Pression : - 5 pm/Mpa
- Déformations : 1 pm/ μ strain pour $l = 1,3 \mu\text{m}$
- Dynamiques de mesure :
 - Température : 4 K à 800 K
 - Pression : 1 bar à kbar
 - Déformations : 10^{-6} (1 μ strain) à 10^{-2}

Atout du système :

- système intégré (fully integrated system)
- insensibilité aux fluctuations du signal (insensitive to power fluctuation),
- de nombreux capteurs par ligne de mesure (several sensors per line),
- logiciel convivial de pilotage (user-friendly software).

Applications

- amélioration du processus de fabrication
- contrôle non destructif
- contrôle santé
- structures intelligentes

Annexes 5

Glossaire

BMC : Prémix (*Bulk Molding Compound*), semi-produit de la classe des bases thermodurcissables

CFA : *Composite Fabricator Association*, association professionnelle américaine des transformateurs de composites

CND : contrôles non destructifs

COV : Composés Organiques Volatils

CRITT : Centres Régionaux d'Innovation et de Transfert Technologique

CRT : Centres de Ressources Techniques

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

Drapage manuel : procédé de transformation des composites thermodurcissables pour des grandes pièces, en général suivi par une polymérisation en autoclave; faibles cadences

Enroulement filamentaire : procédé de transformation des composites thermodurcissables hautes performances pour la réalisation des pièces en corps creux de révolution

ENSTIMD : Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Douai

EPF : Ecole Polytechnique Fédérale (Lausanne ou Zürich)

EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne

ESI : Editeur français de logiciels de calculs et de simulation

FAA : *Federal Aviation Administration*, autorité de régulation et de normalisation des techniques aéronautiques aux Etats-Unis

GD : composites « grande diffusion »

GMT : *Glass Mat Thermoplastic*, traduction anglaise de [TRE](#)

GPIC : *Groupement de la Plasturgie Industrielle et des Composites*, association française des transformateurs de composites

HP : composites « haute performance »

IKV : Institut des composites à Aix la Chapelle

ISPA : Institut Supérieur de Plasturgie d'Alençon

IVW : Institut für Verbundwerkstoff (composites en allemand)

LIMT : (*Large Injection Moulding Technology*) technologie d'injection pour grande série.

Mats : disposition des fibres de verre courtes ou longues sous une forme non tissée, aux propriétés mécaniques plus limitées que les tissus

PA : polyamides (6, 6-6, 12)

PAI : polyamide imide

PAN : polyacrylonitrile; voie classique d'obtention des fibres de carbone, dite **ex-Pan**.

PBT : polytéréphtalates butyléniques, appartient à la classe des polymères thermoplastiques (TP).

PC : polycarbonate, appartient à la classe des polymères thermoplastiques ([TP](#))

PE : polyesters

PEEK : polyéther-éther-cétone

PEI : Polyéther-imide, appartient à la classe des polymères thermoplastiques (TP), thermostable (tenue thermique >à 200°C)

PES : polyéther-sulfone

PET : polytéréphtalates éthyléniques; appartient à la classe des polymères thermoplastiques (TP).

PLA : acide poly-lactique

PLA/PLA : composites à matrice et fibres en acide poly-lactique

PMMA : Polymétachrylate de méthyle, thermoplastique

POM : polyoxyméthylène, résine thermoplastique.

PP : polypropylène, polymère semi-technique, appartient à la classe de polymères thermoplastiques (TP).

PPE : Pôle de Plasturgie de l'Est.

PPO : polyoxide de phénylène.

PU : Polyuréthane, appartient à la classe des résines thermodurcissables (TD) ; caractérisée par sa faible viscosité qui permet un bon remplissage du moule.

Pultrusion : procédé de transformation de composites pour des profilés

RIFT : *Resin Infusion Processes*, nouveau procédé de transformation des composites

RIM : Injection réaction (*Reaction Injection Molding*) pour composites GD.

Roving : rouleaux de feuilles de fibres de verre

R-RIM : *Reinforced RIM*, variante du procédé RIM

RTM : *Resin Transfer Moulding*, procédé de transformation de composites HP et GD

SCRIMP : procédé de transformation des composites par moulage sous vide

SMC : *Sheet Moulding Compound*, semi-produit composites TD

S-RIM : Structural RIM

TD : composites thermodurcissables

TP : composites thermoplastiques

TPR : Thermoplastique Renforcé sous forme de granulés

TRE : Thermoplastique Renforcé Estampable

UP : polyester

VLE : Valeur Limite d'Exposition (aux COV)

VME : Valeur Moyenne d'Exposition (aux COV)