

Le présent document a pour but de donner une information de base à propos de la composition et des domaines d'application des plastiques renforcés de fibres (PRF). Les données de marché les plus récentes sont également détaillées et sont complétées par une série de tendances, d'opportunités et de menaces. Enfin est exposé l'état actuel de la technique en matière de recyclage et de valorisation des déchets FRP

Composites polymères renforcés de fibres

Données de marché, tendances et évolutions, opportunités et menaces.

*Bob Vander Beke,
Lien Van Der Schueren
Isabel De Schrijver
Wim Grymonprez*

© 2015 -2016 VKC / Centexbel

Données de marché, tendances et évolutions, opportunités et menaces.....	2
1. Cadre général.....	2
2. Composites renforcés de fibres.....	3
2.1. Généralités.....	3
2.2. Fabrication de composites polymères renforcés de fibres.....	9
2.3. Thermosets.....	13
2.4. Thermoplastiques.....	17
2.5. Autres propriétés des polymères renforcés de fibres.....	21
3. Données de marché.....	24
3.1. Généralités.....	24
3.2. Données de marché concernant les composites renforcés par fibres de verre (GRP).....	30
3.3. Données de marché pour les composites renforcés de fibre de carbone (CRP).....	35
3.4. Autres polymères composites renforcés de fibres.....	43
4. Tendances, évolutions du marché, opportunités et menaces.....	48
4.1. Opportunités et menaces d'ordre général, non spécifiques à des applications.....	48
4.2. Applications des FRP sur les marchés liés au transport et à la mobilité.....	52
4.3. Applications FRP dans des systèmes d'énergies renouvelables.....	60
4.4. FRP dans les ouvrages de génie civil, les matériaux et produits de construction.....	71
4.5. Applications FRP dans le secteur des soins de santé.....	88
5. Recyclage et valorisation de composites renforcés de fibres.....	90

Disclaimer

Centexbel vise à vous fournir des informations correctes et actuelles mais ne peut nullement garantir que ces informations le soient toujours au moment où elles sont réceptionnées ni ultérieurement. Vous ne pouvez dès lors revendiquer vos droits sur ces pages et Centexbel ne peut être tenu responsable des dommages subis à cause d'informations imprécises et/ou obsolètes.

Composites polymères renforcés de fibres

Données de marché, tendances et évolutions, opportunités et menaces.

VKC / Centexbel

Le VKC (Vlaams Kunststof Centrum) et CENTEXBEL représentent respectivement le « centre d'expertise pour le plastique » et le « centre scientifique et technique pour le textile » qui accumulent ensemble une connaissance spécifique au travers de recherches, d'essais et de prestations de services, et la mettent à la disposition d'entreprises.

Par cette note technique, nous voulons donner une image actualisée des composites polymères renforcés de fibres, indiquer des pistes concrètes d'innovation ainsi qu'expliquer la problématique du recyclage de ces matériaux composés.

1. Cadre général

Les composites renforcés de fibres sont utilisés avec succès dans un nombre croissant de domaines et supplantent de plus en plus, grâce à leurs propriétés spécifiques, d'autres matériaux tels que les plastiques non renforcés, métaux, céramiques, ...

On peut se demander si la substitution de ces matériaux traditionnels se poursuivra, car ces composites résistants, légers et inoxydables sont également assez coûteux et, en cas de rupture, ne peuvent pas ou que très difficilement être réparés. Suite à leur vieillissement, à l'apparition de microfissures, à la délamination, etc., les composites polymères renforcés de fibres perdent toutefois leurs exceptionnelles propriétés de résistance mécanique, ce qui impose de surveiller leur longévité dans certaines applications structurelles. Un recyclage économiquement réfléchi est actuellement limité à une série spécifique de composites renforcés de fibres.

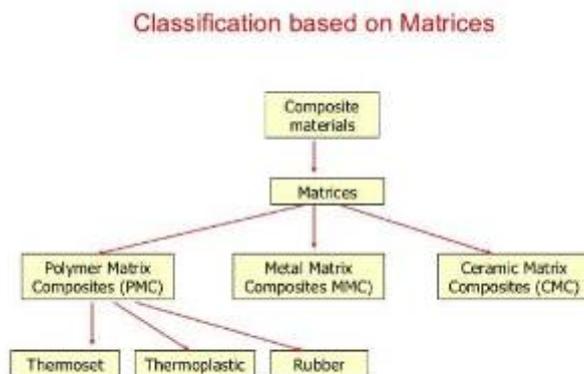
Avant d'aborder plus en profondeur certains marchés, évolutions, menaces et opportunités spécifiques ainsi que le recyclage de ces matériaux, nous voulons préciser ce que nous entendons par composites renforcés de fibres et comment ils sont fabriqués.

2. Composites renforcés de fibres

2.1. Généralités

Les composites sont des matériaux composés au sein desquels on peut identifier deux matériaux microscopiques ou macroscopiques différents voire plus, dans des phases différentes. Pour des applications structurelles, de tels matériaux sont généralement limités aux composites renforcés de fibres, dans lesquels des fibres sont dispersées dans une matrice.

En fonction de la matrice dans laquelle sont incorporées les fibres, nous pouvons distinguer les types de composites suivants :



Le terme « composite » n'est toutefois pas réservé aux plastiques renforcés de fibres (Reinforced Plastics). « Composite » est en effet le nom générique donné à des produits ou matériaux constitués de différents composants tels que panneaux de bois, béton, asphalte, textiles enduits, amalgames dentaires, verre de sécurité feuilleté, etc.

Certains des produits composés, comme les panneaux de bois (OBS, MDF et aggloméré), béton (polymère) et asphalte, ont une justification économique bien plus importante que les plastiques renforcés de fibres. Beaucoup des produits cités ci-dessus ne sont pas renforcés à l'aide de fibres, mais bien avec des « particules » micro ou macroscopiques.

Dans la présente note technique, nous nous limiterons aux plastiques renforcés de « fibres » (ou FRP : Fiber Reinforced Plastics) ou composites polymères renforcés de fibres, à savoir des thermoplastiques ou thermosets qui sont généralement renforcés à l'aide de fibres de renfort en verre, carbone, basalte ou aramide. Certains PRF contiennent, au lieu de ces fibres ultrarésistantes, des fibres moins robustes telles que des fibres naturelles en cellulose (dans des matériaux composites bois et plastique) ou du matériau renforcé de PP (dans des polypropylènes « auto-renforçants »). Les matériaux renforcés de nanofibres ne seront pas abordés non plus.

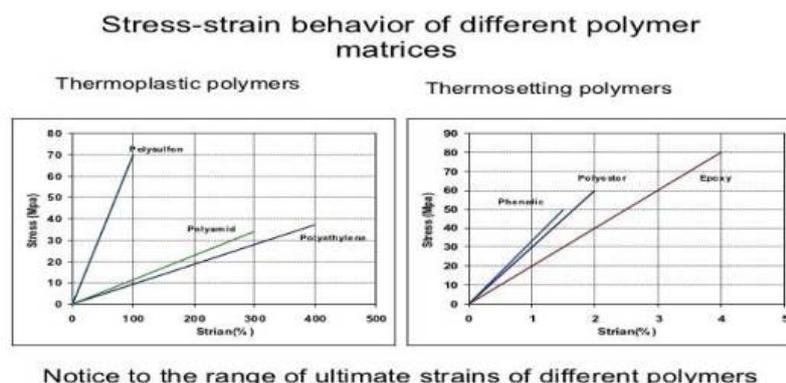
L'incorporation de fibres dans une matrice polymère permet d'améliorer les propriétés mécaniques des plastiques mais également de modifier d'autres propriétés telles que le phénomène de retrait thermique, la conductivité électrique ou thermique, la résistance au feu, etc.

Les plastiques sont des produits ou matériaux polymères organiques qui, en fonction de leur tenue thermomécanique, peuvent être subdivisés en thermoplastiques, thermosets et élastomères/caoutchoucs.

Le tableau ci-dessous indique les propriétés mécaniques très divergentes des composants PRF (fibres de renfort et matrice polymère).

Matériau	Densité	Résistance à la traction	Résistance à la traction (g/den)	Module de Young (GPa)	Module (g/den)	Allongement (%)
Thermoplastiques						
PP	0,9	25-40		2		100-600
PA	1,1	60-70		2		30-300
PEI	1,3	100		3		60
Thermosets						
résine époxy	1,1-1,4	35-90		2,5-4		1-8,5
résine polyester (UP)	1,1-1,5	50-85		1,3-4,5		1-6,5
résine phénol	1,3	60-80		4,5		1,5
Fibres						
Verre E	2,5	2000-3500	35-46	70	520-1250	2,5
carbone (PAN)	1,4	4000	20-45	230-240	1400-3500	1,4-1,8
lin	1,54	345-2000		27-85		1-4
chanvre	1,47	370-800		27-128		1,6

La figure ci-dessous illustre quelques propriétés mécaniques de polymères thermoplastiques et de thermosets, qui sont incorporés comme matrice dans des composites renforcés de fibres. En comparaison avec les fibres de renfort, les matrices tant thermosets que thermoplastiques constituent en effet des matériaux bien moins solides.



Les propriétés mécaniques des composites renforcés de fibres sont déterminées par divers facteurs tels que :

a. la composition de la matrice : composition chimique, cristallinité, degré de durcissement, présence d'additifs, ...

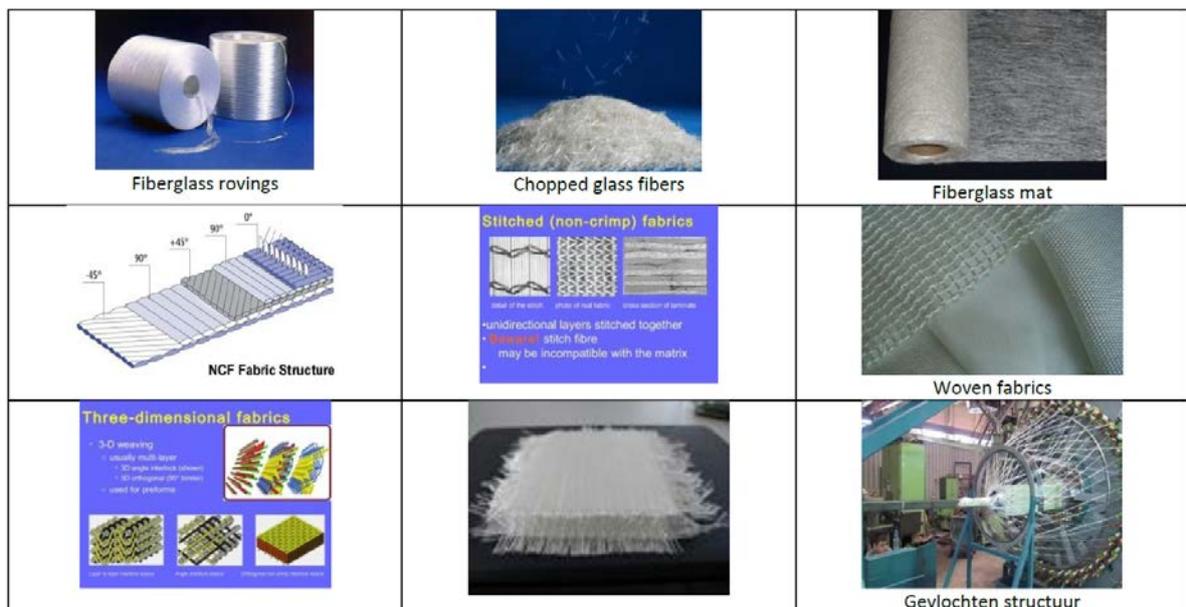
La fraction volumique de la matrice se situe le plus souvent entre 30 et 90%.

Une fraction volumique fréquemment rencontrée pour la matrice est 35%.

b. les fibres utilisées : composition (verre, carbone, aramide, ...) et finesse (les fibres de verre ont généralement un diamètre de 10 à 15 μm).

c. la structure du textile : les PRF peuvent être renforcés à l'aide de

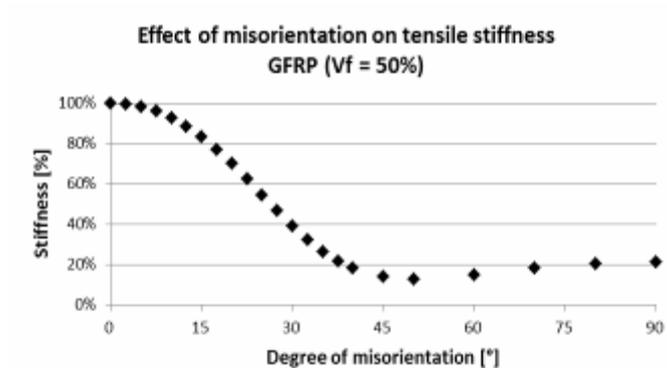
- fibres individuelles,
- fils continus (les fils présents dans des plastiques renforcés sont souvent dénommés « rovings »),
- produits textiles à base de fibres tels que fils (hybrides), mats de fibres, couches de fils superposées et cousues l'une sur l'autre (multiaxiales, également appelées « no crimp fabrics »), tissages textiles (3D), tricots, tresses, ...



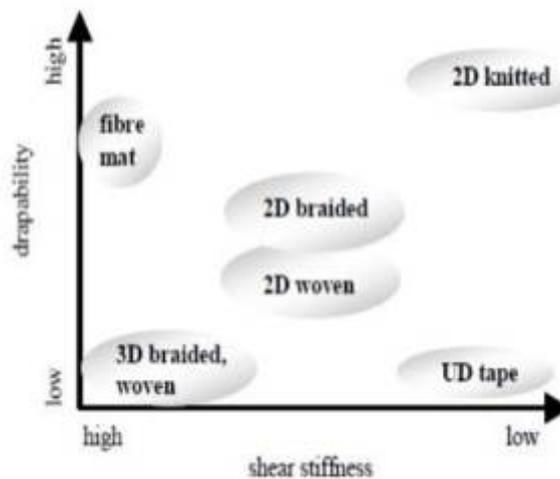
Les structures en fibre de verre les plus courantes parmi les composites :

- rovings 45%
- non-tissés 30%
- tissés 25%

La structure du textile détermine les propriétés mécaniques e.a. par l'effet généré par l'orientation différente de la fibre de renfort sur la rigidité.



La drapabilité du matériau textile dans un moule est également influencée par la structure du textile. La figure ci-dessous indique la drapabilité et la résistance à l'étirement de diverses structures de fibres.



d. la concentration des fibres (généralement exprimée en fraction volumique) : les fractions volumiques les plus courantes dans des PRF sont, en fonction de la structure de textile utilisée :

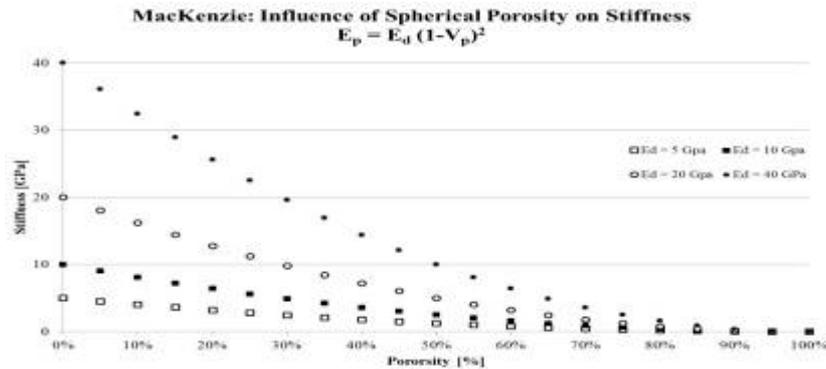
- rovings unidirectionnels (UD) : 50 à 70%
- tissu : 35 à 55%
- mat de fibres : 10 à 30%

Une augmentation de la fraction volumique en fibres n'induit pas toujours une amélioration des propriétés mécaniques du composite.

Si la fraction en volume des fibres est très élevée, les fibres assurant le renfort peuvent être écrasées, rompues et réduites durant les processus, ce qui induit une baisse des performances.

- Certains processus comme le moulage par injection et la mise en forme par compression, qui travaillent à de très hautes pressions, occasionnent davantage de rupture de fibres.

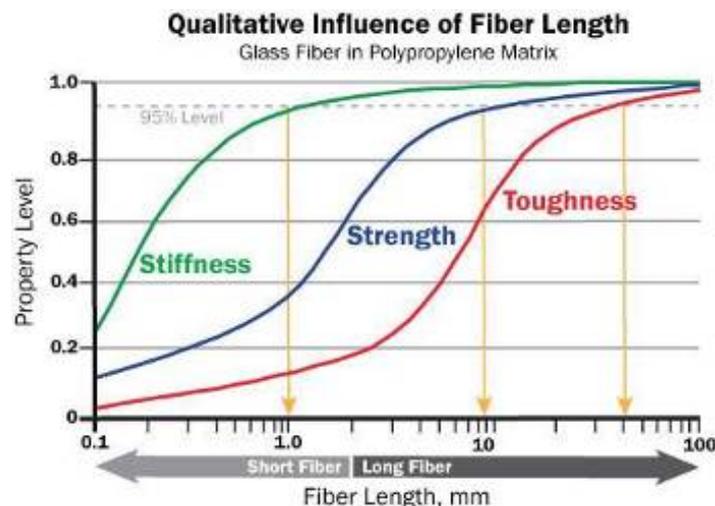
- La rupture des fibres et la diminution de leur longueur durant le traitement ne s'opère toutefois pas seulement en fonction de la fraction en volume, mais également d'autres facteurs tels que le caractère anisotrope, la finesse et la longueur des fibres, les paramètres appliqués dans le processus (température et pression), la viscosité de la matrice, ...
- Une fraction en volume de fibres trop importante peut compliquer l'imprégnation de la masse du tissu, ce qui génère des porosités indésirables dans la structure du composite et lui fait perdre une grande partie de ses propriétés mécaniques.



e. la longueur de fibre : on part du principe que, en cas de choc, la répartition des forces depuis la matrice vers les fibres est meilleure lorsque la longueur de fibre augmente.

- La longueur moyenne des fibres dans la matrice du composite doit être supérieure à la longueur critique des fibres, qui se détermine en fonction de la composition des fibres, de leur finesse et de leur fraction en volume.
- La longueur critique de la fibre de verre et de la fibre de carbone se situe généralement entre 800 et 940 μm .
- Lorsque des fibres courtes (d'une longueur inférieure à 6 mm généralement) sont utilisées, on parle de SFRP (Short Fiber Reinforced Plastics), mais, abusivement, ces produits ne sont pas classifiés comme composites renforcés de fibres (voir plus loin).

La figure ci-dessous indique à titre d'illustration l'influence de la longueur de fibre sur quelques propriétés mécaniques d'un matériau thermoplastique.

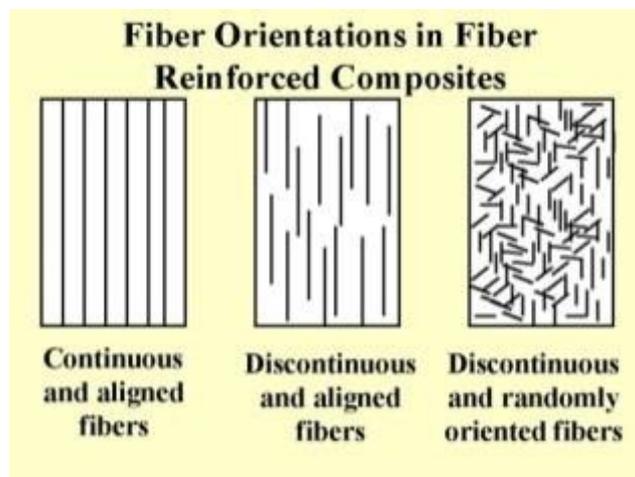


f. la liaison « fibre - matrice », qui est surtout déterminée par la compatibilité chimique entre les deux composants.

- Une bonne liaison est nécessaire pour éviter la délamination au niveau de la surface de contact (interface) « fibre-matrice » en cas de transfert de forces.
- La liaison chimique des fibres sur la matrice est optimisée en faisant usage de dimensions (« sizings ») spécifiques de fibres et de matrice (+/- 0,5%), qui améliorent la liaison entre la surface des fibres et la matrice.

g. l'orientation des fibres dans la matrice par rapport à l'impact

- Du fait que les fibres de renfort présentent des propriétés de résistance anisotropiques (la résistance à la traction est plus grande dans la direction des fibres que dans la direction transversale), le transfert optimal des forces sera déterminé par l'orientation des fibres par rapport à la direction de l'impact.
- Si toutes les fibres sont orientées dans une même direction, on parle de composites UD (unidirectionnels).
- Les fibres peuvent toutefois également être orientées dans toutes les directions, comme dans les mats de fibres.



h. Les conditions d'essai. Des températures et/ou des taux d'humidité plus élevés peuvent influencer négativement sur les propriétés des composites.

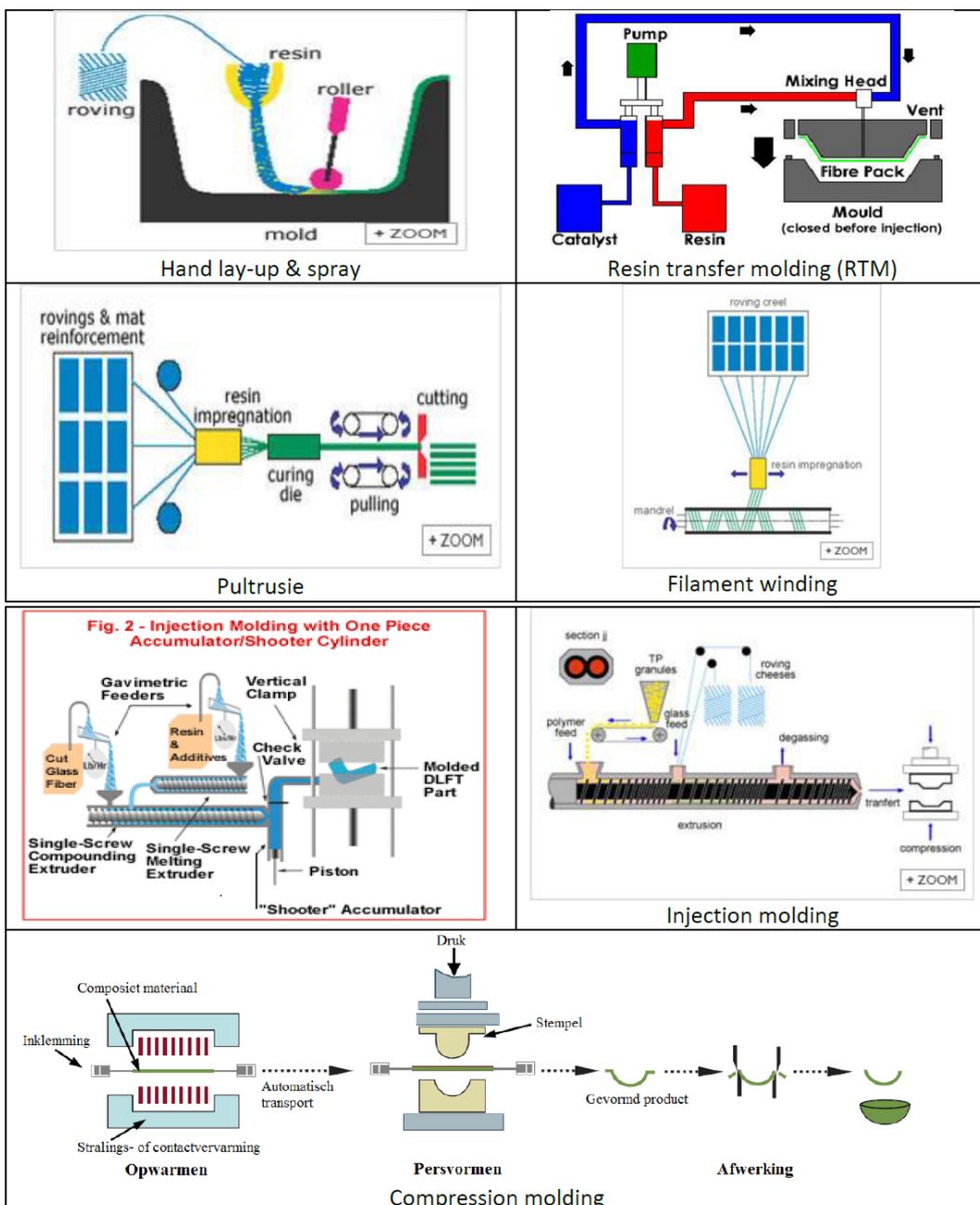
- Les thermoplastiques sont beaucoup moins stables thermiquement que les thermostets.
- Les composites renforcés de fibres naturelles sont sensibles à l'humidité (en raison du caractère hydrophile des fibres de cellulose, des fibres incorporées peuvent absorber de l'eau).

2.2. Fabrication de composites polymères renforcés de fibres

Diverses technologies peuvent être mises en œuvre pour la fabrication de plastiques renforcés de fibres.

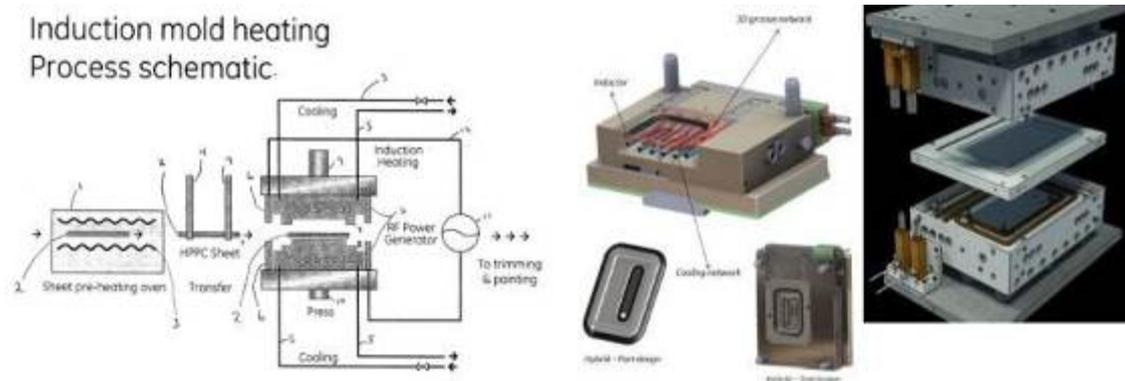
- Concernant la mise en forme du produit final, on peut opérer une distinction entre des techniques recourant à un moule ouvert ou fermé ; pour la fabrication de composites pour des applications de qualité supérieure, on ne travaille cependant qu'avec des techniques de production à moule fermé.
- Certaines techniques sont surtout adaptées à la fabrication de thermosets, et d'autres pour des composites thermoplastiques.

Les figures ci-dessous illustrent les techniques de production les plus courantes.



RocTool (Savoie Technolac France) a mis au point une presse qui, à l'aide de systèmes d'induction électriques intégrés, peut être chauffée en un temps très court puis de nouveau refroidie rapidement via un circuit d'eau.

Cette technologie permet des temps de processus très courts pour la compression à la chaleur et le refroidissement de polymères thermoplastiques renforcés de fibres.



La technologie de « Compression Molding » n'est pas uniquement appliquée pour la mise en forme de composites thermoplastiques, mais également pour des thermosets.

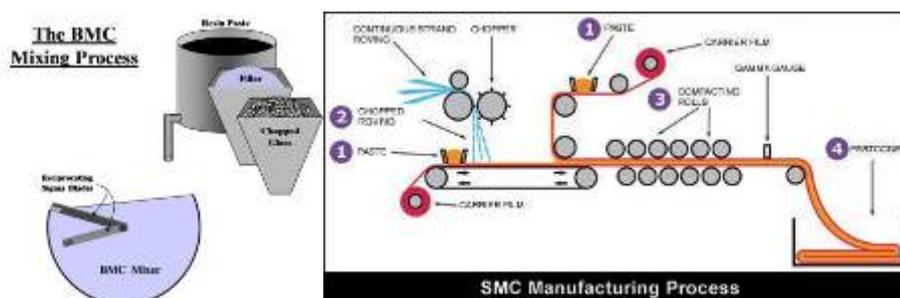
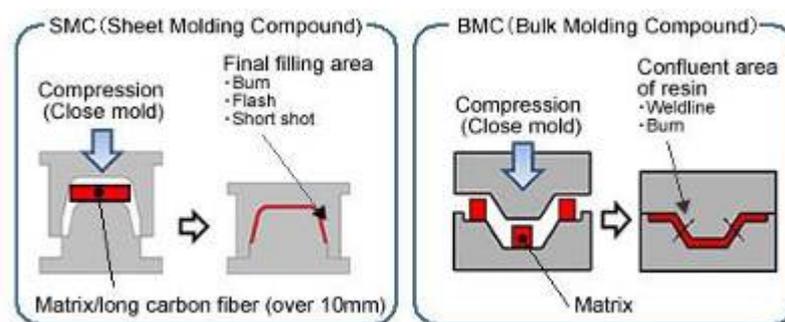
- Pour les thermoplastiques, la matrice reçoit la forme souhaitée par fusion et refroidissement.
- Les thermosets ne doivent pas seulement être pressés dans la forme souhaitée, mais également durcir chimiquement, ce qui prend généralement plus de temps que le refroidissement de thermoplastiques.

Pour des composites thermodurcissables, qui sont fabriqués par la technique de « Compression Molding », on distingue les SMC (« Sheet Molding Compound ») et les BMC (« Bulk Molding Compound »), selon que le matériau à comprimer puis à faire durcir est fourni en vrac ou en feuilles (« sheet »).



Les composites SMC et BMC sont préparés au préalable. Ces composites peuvent être considérés comme des formes spécifiques de « prépregs » (voir plus loin).

- Les composites BMC contiennent également, outre de la résine polymère et des fibres (généralement plus courtes), des charges minérales, pigments, stabilisateur(s) ainsi qu'un système catalyseur. Des additifs spécifiques tels que des retardateurs de feu peuvent aussi y être incorporés. La proportion de fibres dans les BMC se situe habituellement entre 5 et 30%. L'incorporation de charges minérales telles que le CaCo_3 sert surtout à réduire le coût des BMC.
- Les composites SMC contiennent à peu près les mêmes ingrédients que les BMC, mais la longueur de leurs fibres est beaucoup plus grande (généralement entre 12 et 25 mm), et la proportion de fibres se situe entre 10 et 60%. Pour faciliter le traitement des SMC, un « release agent » (produit de démoulage) est habituellement ajouté.



- Dans une structure composite fonctionnelle, tout le matériau fibreux doit être et rester bien lié avec la matrice polymère continue ; il ne contient de préférence aucune cavité (« void ») qui rendrait le transfert de forces plus problématique lors d'un choc.
- Les « voids » représentent des défauts de fabrication qui peuvent être limités, en fonction de la technologie utilisée (voir plus loin), du soin et de la qualité du contrôle lors de la production, mais qui ne peuvent en principe jamais être exclus.

- Les « voids » apparaissent suite à l'incorporation de bulles d'air ou du « mouillage » incomplet du matériau fibreux avec la matrice polymère. Comme déjà mentionné, une fraction volumique trop importante de fibres peut contrarier la bonne pénétration de la résine ; des paramètres mal déterminés du processus peuvent eux aussi générer des « voids ».
- Ces imperfections (toujours présentes) limitent la durée de vie et les performances du matériau renforcé de fibres.
- Le nombre de défauts admissibles se détermine par ailleurs en fonction du domaine d'application et des risques de sécurité pertinents. Dans des applications aéronautiques, le « void ratio » ne peut excéder 1%

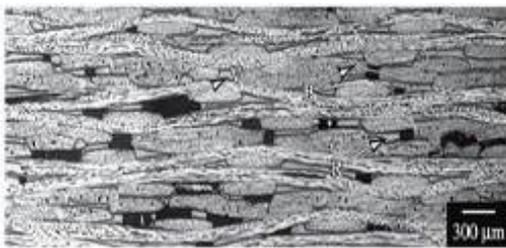


Figure 5. Typical cross-section of a $(0^{\circ}/90^{\circ})_2$ composite, void volume fraction of 7.06%.

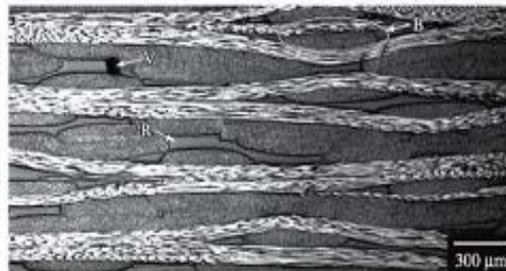
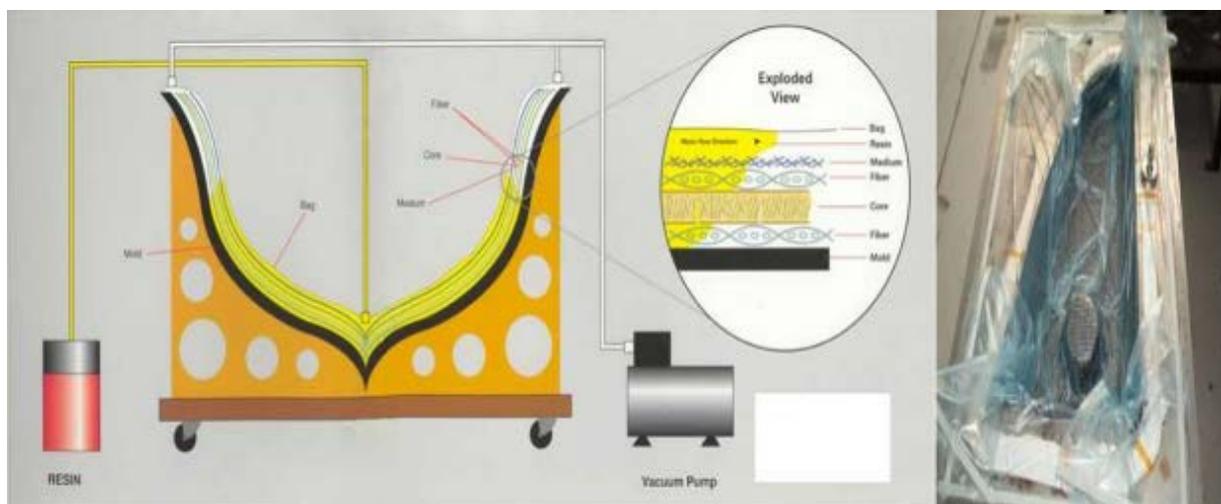


Figure 4. Typical cross-section of a $(0^{\circ}/90^{\circ})_2$ composite, void volume fraction of 0.31%.

La technologie d'infusion sous vide qui est notamment utilisée pour faire pénétrer la résine dans la structure de fibres peut minimiser l'incorporation de bulles d'air lors du durcissement.

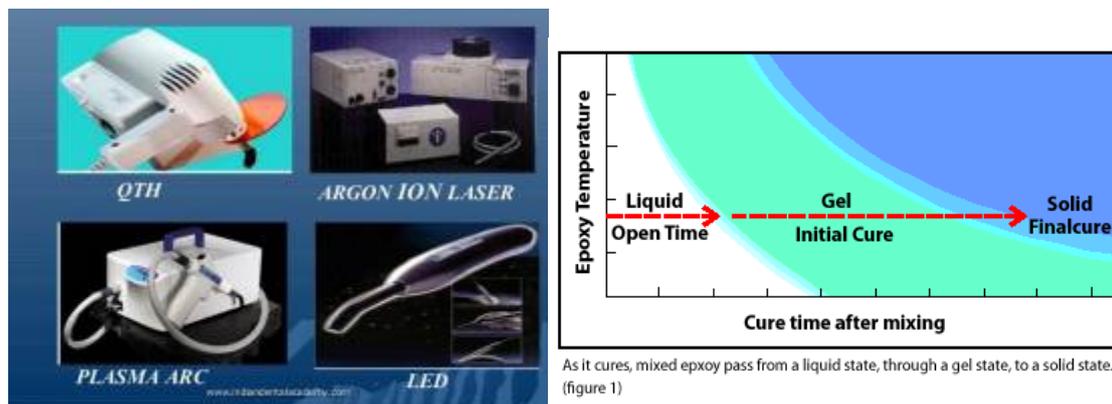
- Le moule recouvert de fibres est étanchéifié avec une feuille, et l'air est évacué à l'aide d'une pompe à vide. La résine est ensuite injectée.
- La technologie d'infusion sous vide doit être considérée comme une variante du procédé RTM (Resin Transfer Molding).



2.3. Thermosets

Les composites thermosets sont formés par l'infiltration et la répartition de résine relativement liquide dans la masse fibreuse, assurant ainsi le renforcement nécessaire.

- Les systèmes résineux représentent des systèmes réactifs qui sont composés d'une part de monomères, d'oligomères ou de prépolymères, et d'un système de durcissement d'autre part.
- Après imprégnation, la résine imprégnée doit durcir et ainsi se solidifier.
- Sous l'effet d'une énergie (chaleur, rayonnement UV, laser, plasma, ...) et des éventuels catalyseurs présents, des réactions se produisent pour constituer des réseaux de polymères 3D.
- Des résines fréquemment rencontrées sont le polyester insaturé, l'époxy et le polyuréthane.



Du fait que l'imprégnation de structures fibreuses par des systèmes de résine très liquide est facile et que la stabilité thermique de systèmes durcis est relativement bonne, les thermosets constituent encore et toujours les matrices polymères les plus utilisées pour des composites renforcés de fibres mis en œuvre dans des applications structurelles. Grâce à leurs bonnes performances de résistance, et ce même à des températures élevées, les composites thermosets ne seront jamais totalement remplacés par des composites thermoplastiques.

Les polymères durcis sont toutefois peu ou difficilement fusibles, ce qui rend plus malaisé le recyclage thermique (voir plus loin) de composites thermosets.

Le problème du recyclage n'explique pas à lui seul le rythme de croissance réduit des thermosets par rapport aux composites thermoplastiques : interviennent également les émissions possibles de monomères lors de la production ainsi que les temps de procédé relativement longs, nécessaires au durcissement.

Durant les dernières décennies, les producteurs de résine ont déployé de très nombreux efforts pour réduire le dégagement de monomères ou d'autres substances volatiles lors de la production, et/ou développer de nouveaux catalyseurs écologiques.

Divers systèmes de résine peuvent être mis en œuvre pour la production de thermosets.

- Chaque résine possède ses propres caractéristiques mécaniques et chimiques spécifiques.
- Au sein de chaque famille de résine, il existe généralement aussi diverses qualités de produit, qui :
 - possèdent certaines propriétés,
 - conviennent à certaines applications,
 - ont été adaptées ou reformulées par le fabricant de manière à pouvoir être plus aisément mises en œuvre dans certaines techniques de production.

Le tableau ci-dessous indique l'importance en % de différents types de résine utilisés dans la fabrication de PRF.

combinaisons résine / fibres	part (%)
UP / fibre de verre	57
Époxy / fibre de verre	14
Phénol / fibre de verre	9
Silicones / fibre de verre	4
Époxy / fibre de carbone	10
Polyimide / carbone ou Kevlar	4
Ester de cyanate / carbone	2

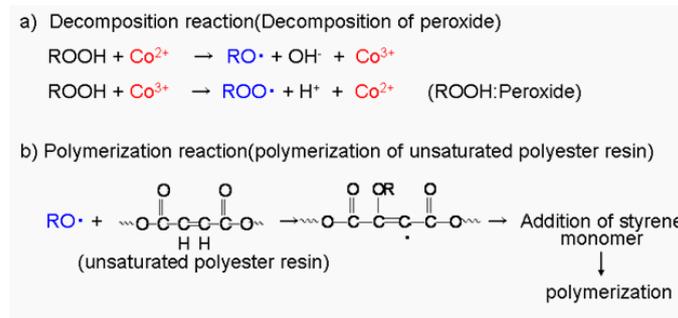
Le pourcentage de résines est déterminé en grande partie par le coût de la résine, mais également par ses propriétés spécifiques et par les exigences posées au produit composite ainsi formé.

Voici quelques prix indicatifs de résines :

Type de résine	Prix en euro/kg
UP (polyester insaturé)	1,2 à 2,8
Vinylester	2,8 à 5,5
Époxy	4 à 21
Phénol	1,7 à 5,4
Ester de cyanate	55
PU (polyuréthane)	2,7 à 11
Bismaleimide (BMI)	> 67
Polyimide	> 110

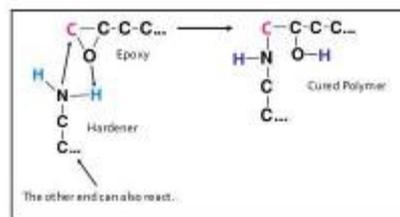
Les résines de polyesters insaturés restent de loin les principales résines utilisées pour des composites renforcés de fibre de verre. Ces résines UP, obtenues par polycondensation d'un acide dicarbonique

insaturé avec un diol, peuvent durcir en un réseau 3D complet suite à une réaction catalysée avec le styrène ou un autre monomère.



Les résines époxy sont les principales résines utilisées pour les composites renforcés de fibres carbone. Le durcissement ou la réticulation de la résine époxy se produit par l'adjonction d'un agent de traitement (« curing ») tel que le triéthylènetétramine, le benzène 1,3 diméthanamine ou l'isoforon diamine, dissous dans de l'alcool benzylique.

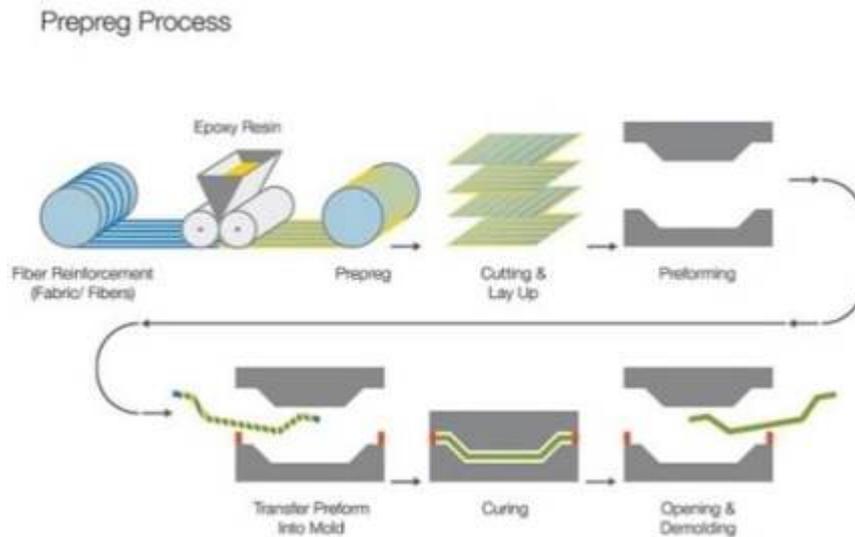
Epoxy Crosslink Mechanism



L'imprégnation et le durcissement de la résine peuvent également être dissociés.

- Les « prépregs » sont des fibres, fils, bandes, tissus, etc. imprégnés de résine, et qui peuvent être conservés dans des conditions spécifiques (par ex. à basse température et sans lumière UV) jusqu'à ce que leur durcissement puisse être initié lors d'un processus ultérieur.
- Certains prépregs ont un toucher « humide et collant », d'autres peuvent être complètement secs.
- Les prépregs sont généralement livrés en rouleau.
- Le matériau fibreux imprégné est la plupart du temps également recouvert d'un film anti-adhérent (en Téflon, par ex.).

Les prépregs sont découpés sur mesure puis déposés et durcis dans un moule ou sur un objet (généralement, dans un autoclave).

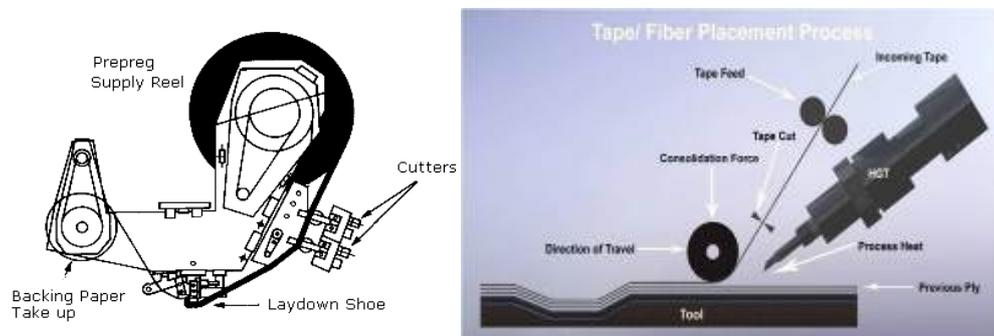


Les prépregs, se présentant sous la forme d'une bande enroulée continue, peuvent être déposés au moyen d'un bras robotisé sur une partie spécifique d'un objet (une aile d'avion, par ex.) dans les directions souhaitées, puis durcis à l'aide de la source de chaleur présente.

Le support sur lequel est appliquée la bande peut être éventuellement détruit après le durcissement, ce qui crée un objet composite creux, renforcé de fibres.

La technologie « Automatic Tape Laying » (ATL) est beaucoup utilisée dans des domaines d'application où l'orientation souhaitée des fibres est très importante et où également des surfaces relativement grandes doivent être couvertes à l'aide de matériau composite (par ex. des composants d'avion et des pales d'éoliennes).

Par le biais de cette ATL, différentes couches peuvent également être appliquées successivement, l'orientation de la bande pouvant alors varier selon la couche.





L'ATL est aussi utilisée pour la production d'un châssis de F1 à partir de composites à base de fibre de carbone.

Si le prix de la fibre de carbone pouvait encore baisser et que ce processus de production pouvait être significativement accéléré, cette technologie serait également appliquée pour la construction des carlingues d'avions classiques.

2.4. Thermoplastiques

Les thermoplastiques utilisés dans les PRF de cette catégorie sont généralement des polymères très conventionnels tels que les PP, PA, PET, PBT, mais également des polymères techniques fondant à très haute température, tels que des PEEK et PEI, peuvent également être utilisés.

Dans le cas de thermoplastiques (qui peuvent même être visqueux à plus haute température), l'imprégnation complète de la matrice dans la structure fibreuse peut devenir plus ardue lors de la production de composites thermoplastiques.

La technologie d'infusion qui est couramment utilisée pour des thermosets ne peut pas être utilisée pour l'imprégnation d'une structure fibreuse avec fusion de polymères.

Pour résoudre ce problème, différentes pistes peuvent être suivies.

(a) Une première piste pour la réalisation de composites thermoplastiques est la « **piste textile** », dans laquelle se retrouvent de très nombreux procédés textiles classiques. Par ces procédés, des fibres de renfort et des fibres thermoliantes thermoplastiques classiques (qui constitueront la matrice) peuvent être assemblées en « matériaux fibreux hybrides » et/ou « structures fibreuses hybrides »

- Le matériau textile hybride peut être découpé et drapé dans un moule à compression, ou mis de côté pour un traitement ultérieur (mise en forme et consolidation du composite).
- Les matériaux textiles hybrides à base de fibres de renfort et de fibres thermoplastiques peuvent être considérés comme une sorte de prépregs « secs » (même si le terme prépreg est déjà utilisé pour les thermosets).
- Le matériau fibreux fusible de la structure hybride est fondu dans la presse sous l'effet de la pression et de la température (mise en forme) puis refroidi (consolidation).

- Dans les structures textiles et les matériaux hybrides, la matrice et les fibres thermoliantes sont physiquement assez proches l'une de l'autre, ce qui raccourcit le parcours de dépôt du polymère résultant de la fusion des fibres thermoliantes et destinée à enrober le matériau fibreux.

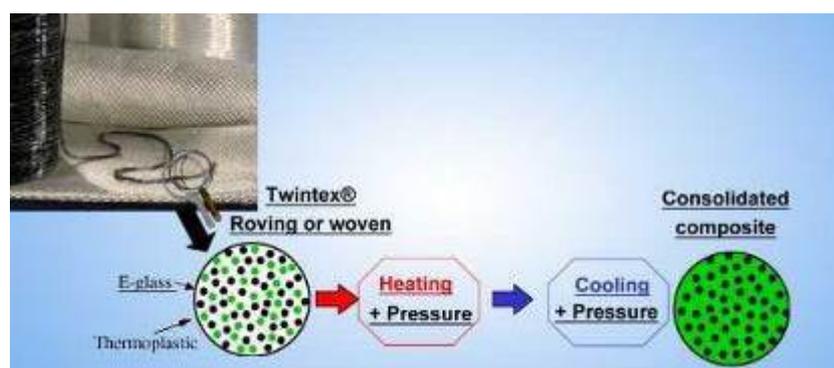
Du fait que tant les fibres de renfort que les fibres thermoliantes classiques peuvent être livrées sous forme de fils filamenteux (rovings), ces fils sont aisément hybridés par soufflage (« air entanglement », bobinage parallèle, retordage ou câblage).

Les rovings ronds peuvent aussi être étirés par des procédés textiles classiques en fibres synthétiques discontinues, pour former une structure de fils de type « âme / gaine ». Suite au filage autour des fibres de renfort orientées, on obtient des fils thermoplastiques UD.

Des fils hybrides, également appelés fils « commingled » ou « intermingled », peuvent être entremêlés, tricotés ou tressés en structures textiles spécifiques par le biais de procédés textiles classiques.

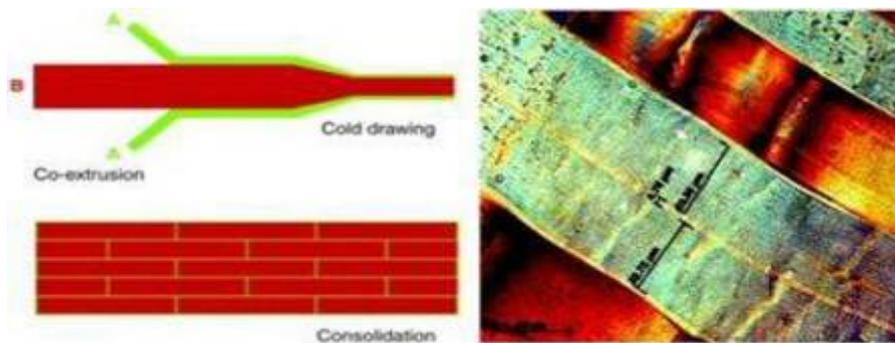


Twintex® est un exemple de fil textile hybride, réalisé par un mélange intime de rovings en fibre de verre et de fibres textiles thermoplastiques (par ex. PP ou PET).



(b) **L'hybridation de polymères** peut également se faire en assemblant des polymères ayant un point de fusion différent et d'autres propriétés mécaniques, en une seule et même structure, par exemple une feuille co-extrudée.

- Cette feuille laminée peut éventuellement être découpée en bandelettes étroites, qui peuvent alors être soufflées en fils « commingled », permettant de réaliser diverses structures telles que tissus, tresses, ...
- Le polymère ayant le point de fusion le plus élevé constituera, après compression à une température bien déterminée, la phase fibreuse, l'autre polymère fondant à une température plus basse formera la phase matricielle.
- La fabrication de composites au départ de ce type de structures hybrides s'effectue selon un procédé analogue, décrit dans la méthode textile classique.



Schematic of co-extrusion process (left) together with polarized cross-section of consolidated bicomponent polypropylene tapes (right; high-strength homopolymer core in green and copolymer adhesive in yellow)

(c) Un procédé de fabrication autre mais assez similaire pour des composites thermoplastiques est la méthode du « **film stacking** », dans laquelle une ou plusieurs couches de fibres de renfort (tissu, mat de fibres, ...) et des films plastiques fusibles sont empilés alternativement. L'orientation des fibres peut éventuellement varier selon la couche.

L'empilement souhaité des couches de fibres et de plastique est alors comprimé à la chaleur dans un moule puis refroidi selon la forme voulue.

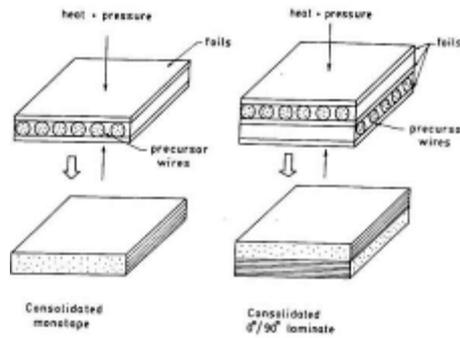


Fig. 3.12. Diffusion bonding process.

La figure ci-dessous illustre le processus de fabrication continue de composites PP auto-renforçants (Curv®), dans lequel des tissus PP (avec des bandelettes PP fortement étirées) sont comprimés thermiquement avec un film plastique, refroidis puis découpés en plaques. Suite à l'étirement des bandelettes PP, le matériau d'âme adopte une autre structure cristalline interne que le matériau de la gaine. Du fait de cette cristallisation différente, les matériaux de l'âme et de la gaine fondent à des températures différentes. En comprimant les bandelettes PP étirées à une température intermédiaire, seul le matériau de l'enveloppe est fondu sous forme de matrice, le matériau de l'âme constituant lui la fraction fibreuse de la structure composite.

Les plaques auto-renforçantes peuvent être comprimées lors d'un processus ultérieur pour prendre la forme souhaitée (par ex. une valise).



Les RFP thermoplastiques conservent toute leur vie leur caractère thermoplastique et peuvent dès lors, avant ou après broyage, être fondus à nouveau sous une nouvelle forme.

Comparativement aux thermosets, les composites thermoplastiques sont beaucoup plus faciles à recycler.

Le recyclage et la valorisation de composites renforcés de fibres sont discutés plus en détail plus loin.

2.5. Autres propriétés des polymères renforcés de fibres

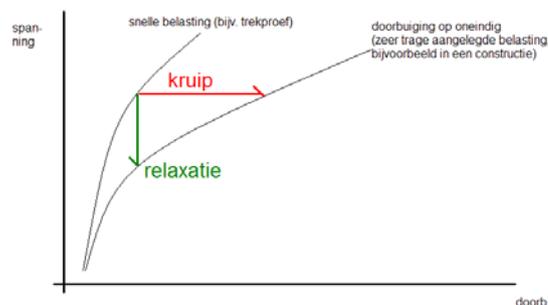
Nous voulons clôturer ces généralités se rapportant aux plastiques renforcés de fibres en pointant des propriétés spécifiques de certains PRF. L'ajout de fibres « de renfort » à une matrice plastique ne modifie pas seulement ses propriétés de résistance ; il peut être également très intéressant pour apporter d'autres propriétés au matériau composite.

(a) Tenue mécanique

L'ajout de matériau fibreux à des polymères n'influence pas uniquement les propriétés de résistance du plastique, mais peut également réduire fortement le comportement de retrait et le gauchissement à haute température.

Material and reinforcement	Tensile strength, psi	Stiffness (Flexural modulus), psi	Heat distortion temperature (HDT) at 264 psi, deg F
Nylon 6/6	11,800	410,000	150
Nylon 6/6 with 30% glass fiber	28,000	1,300,000	490
Nylon 6/6 with 30% carbon fiber	35,000	2,900,000	495

Ceci constitue un très gros avantage, surtout pour des plastiques thermoplastiques. Grâce à la présence du matériau fibreux dans la matrice polymère, le retrait sous charge (continue) est également réduit.



(b) Résistance au feu

Certaines fibres de renfort comme la fibre de verre ou de basalte possèdent une assez bonne résistance au feu ; l'adjonction d'un nombre relativement élevé de fibres inertes peut également être pratiquée pour améliorer la tenue au feu de plastiques.

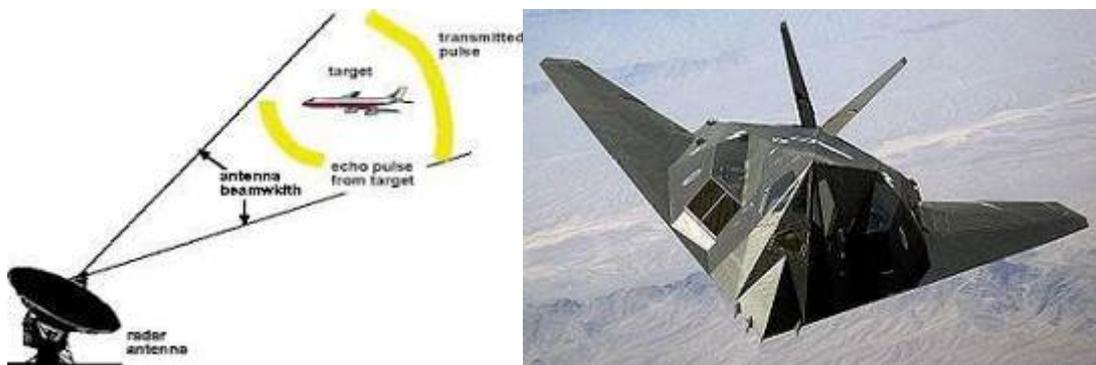
Sans adjonction de fibres inertes ou d'autres additifs retardateurs de feu, tant les thermostets que les thermoplastiques sont la plupart bien inflammables.

La longueur de fibre ne joue pas directement un rôle pour ces propriétés spécifiques, ce qui permet également d'incorporer des fibres relativement courtes et moulues.

(c) Conductivité thermique et électrique

L'ajout de fibres thermiquement et électriquement conductrices (telles que la fibre de carbone) permet de modifier l'assez bon pouvoir isolant de la plupart des plastiques.

La présence de fibres de carbone conductrices dans des panneaux ou des structures, par exemple, modifie leur détectabilité par des ondes radar (la furtivité au radar des CRP est exploitée dans des avions militaires) et peut également former une cage de Faraday autour d'appareils électroniques sensibles.



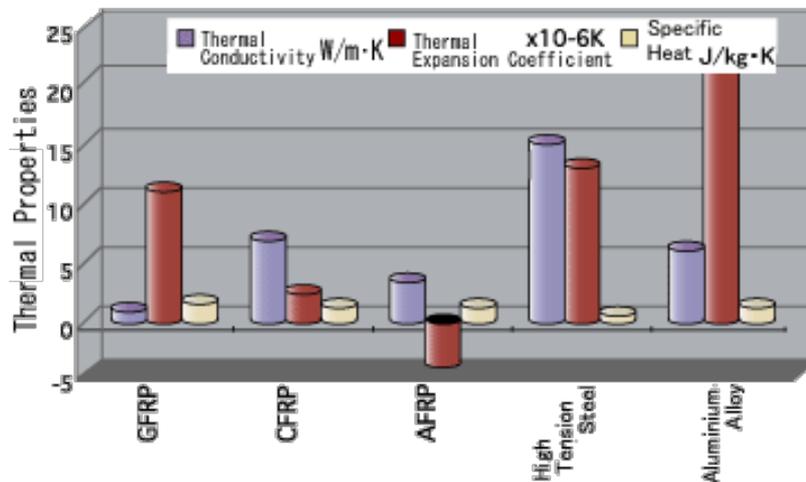
La présence de fibres conductrices de la chaleur (telles que les FC) peut également accélérer le processus thermique lors de la mise en forme ou du durcissement de systèmes polymères.

- Cette conductivité thermique des fibres présentes peut améliorer le transfert de chaleur dans des fours classiques, vers et au sein de la structure composite.
- La fibre de carbone peut également absorber des ondes électriques inductives, permettant ainsi d'utiliser des systèmes de chauffage par induction (cf. procédé de compression RocTool) en vue de réduire la durée du processus.

(d) Isolation thermique

La plupart des plastiques ainsi que des fibres de renfort conduisent très mal la chaleur, ou pas du tout. Le bon pouvoir d'isolation thermique de nombreux plastiques renforcés de fibres peut également être utilisé comme atout vis-à-vis de matériaux qui sont renforcés par des tiges, câbles, ... métalliques.

De nombreuses déperditions de chaleur sont en effet associées à des risques générés par la présence de ponts thermiques froids.



(e) Résistance à la corrosion

Contrairement à la plupart des matériaux métalliques de renfort (par ex., les fers d'armature du béton), la plupart des fibres de renfort et les matrices polymères sont inoxydables. Un grand nombre de composites renforcés de fibres doivent aussi leur utilisation dans divers produits de construction (tuyaux, cuves de collecte, ...) à leur résistance à la corrosion.

(f) Coloration et résistance au vieillissement

L'adjonction de matériau fibreux peut en effet aussi influencer la couleur (la fibre de carbone est noire, la fibre de basalte a une teinte dorée) et d'autres propriétés comme la résistance au vieillissement.

(g) Fonctionnalisation

Des composites polymères renforcés de fibres peuvent être assez facilement fonctionnalisés par des opérations de revêtement, d'impression, de laminage, ..., ce qui peut (pourra) présenter un avantage dans certaines applications. Différents capteurs et matériaux intelligents peuvent être incorporés dans ou combinés avec des composites.

Des systèmes de communication RFID et autres (codes à barres, etc.) peuvent par exemple être intégrés par des techniques d'IML (In Mould Labelling) dans des composites renforcés de fibres, ce qui peut promouvoir leur mise en œuvre dans de nouveaux domaines d'application. Dans un univers numérique où « l'internet des objets » jouera un rôle important, des composites fonctionnalisés seront de précieux atouts.



La connaissance des plastiques renforcés de fibres et la focalisation sur des propriétés spécifiques de ce matériau seront déterminantes pour que ces matériaux (trop coûteux) continuent à se répandre (voir le chapitre 4 plus loin).

3. Données de marché

3.1. Généralités

Le marché des PRF (PRF : Plastiques Renforcés de Fibres) est très hétérogène et complexe, non seulement en termes de domaines d'application, de taille d'entreprises, de technologies de production mises en œuvre, de polymères et de fibres utilisées (les fibres de verre et de carbone représentent elles-mêmes de grands regroupements de divers types), de composition et d'orientation des fibres (UD, mats, ...) au sein des produits ou composants fabriqués, mais également sur le plan des intérêts régionaux, des investissements publics, des liens de coopération entre des entreprises, des décisions politiques en matière de développement durable, de recyclage, ...

Le marché des plastiques renforcés par fibres de renfort est traditionnellement subdivisé en GRP (ou GFRP : Glass Fibre Reinforced Plastics) et CRP (ou aussi CFRP : Carbon Fibre Reinforced Plastics), même si des composites à base d'autres fibres comme les fibres naturelles, le basalte, l'aramide, ... ont également une importance économique.

La subdivision classique GRP / CRP porte essentiellement sur les différences assez grandes en :

- quantités produites (8,5 millions de tonnes de GRP, pour 0,08 million de tonnes de CRP),
- les coûts et prix de vente courants des matières premières utilisées dans ce cadre (fibres, résine, additifs) et des produits finaux. À titre d'illustration, quelques prix indicatifs de fibres :

Fibre de verre E	1,5 à 2,5 USD/kg
Fibre de verre S	10 à 15 USD/kg
Fibre de carbone	20 à 70 USD/kg

- les domaines d'application des différents composites.

En 2014, le marché mondial total des GRP s'élevait à 8.500.000 tonnes de composites renforcés de fibre de verre, ce qui est clairement bien supérieur à la quantité totale de composites renforcés de fibre de carbone (CRP), à savoir 79 000 tonnes en 2014 (pour lesquels ont été utilisées 46 000 tonnes de fibre de carbone).

La quantité de 8,5 millions de tonnes de plastiques renforcés de fibre de verre est malgré tout relativement modeste comparativement à la quantité totale de plastiques classiques, non renforcés. En 2007, la production mondiale de plastiques traditionnels (thermoplastiques et résines) s'élevait déjà à 260 millions de tonnes (on s'attend à ce que la demande de polymères atteigne 800 millions de tonnes en 2050).

Le marché des GRP comporte surtout des segments de marché pour lesquels sont essentiellement disponibles des données en volume (exprimées en kilotonnes - kT). Le marché des CRP s'inscrit, avec des « composites avancés » dans des domaines d'applications « niches », pour lesquels sont surtout publiés des chiffres d'affaires (« revenus », en dollars US).

Nonobstant le fait que les composites CRP sont (beaucoup) plus chers que les composites GRP, ils connaissent un rythme de croissance annuel plus important (8%) et supplantent aussi partiellement les produits GRP dans certains domaines d'application tels que l'énergie éolienne. Il n'est par exemple pas possible de réaliser des pales d'éoliennes d'une longueur supérieure à 60 m, sans recourir aux fibres de carbone. En augmentant le diamètre de rotor, on peut construire des éoliennes produisant beaucoup plus d'énergie tout en étant beaucoup moins lourdes (voir plus loin).



Les données de marché disponibles pour les GRP et CRP reposent essentiellement sur des données de production et de vente des principaux composites, mais provenant d'un nombre assez limité de

producteurs de fibres et de résine, qui sont par ailleurs des acteurs mondiaux possédant des installations de production et des succursales de vente sur tous les continents.

Contrairement aux très grosses multinationales productrices des matières premières pour fibres de renfort et polymères, la plupart des producteurs de composites sont des PME, qui dans de nombreux cas ne sont que des entreprises de traitement et des équipementiers pour des clients/utilisateurs à nouveau importants de composites pour éoliennes, moyens de transport, articles de sport, ..., tels que les grands constructeurs automobiles (BMW, Mercedes, Audi, PSA, Toyota,...), Bombardier, Siemens, Airbus, Boeing, Vestas, LM, Adidas, Decathlon, etc.

Un nombre restreint d'entreprises de plus grande taille, comme DIAB, Hexel Corporation, 3A-composites, Gurit Holding AG, Gill Corporation sont eux-mêmes de gros producteurs de composites.

Un nombre croissant d'équipementiers de catégorie 1 des grands constructeurs automobiles, tels que Faurecia, Johnson Controls, Lear, Magna, Peguform, Draexlmaier Group, etc., développent et produisent même des composites renforcés de fibres. Ces entreprises de catégorie 1 collaborent aussi avec des PME pour la production de composites spécifiques.

Avant d'examiner plus en profondeur les données du marché FRP spécifiques aux fibres, faisons quelques remarques d'ordre général. Ces remarques veulent surtout clarifier le fait que certains groupes de produits ou matériaux sont inclus ou non dans les chiffres concernant des composites FRP spécifiques, qui sont collectés par des fédérations, associations ou bureaux d'étude.

(1) certains plastiques renforcés de fibres ne sont pas présents dans les statistiques des composites.

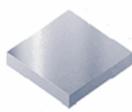
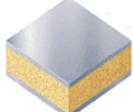
- Les composites plastiques de thermoplastiques (PP, PA, PET/PBT, PEEK, ...) qui contiennent (jusqu'à 80%) de fibres de renfort ou de fibres de verre « courtes » (généralement définies par une longueur inférieure à 6 mm) en sont un exemple.
- Ces composites, caractérisés par un rythme de croissance annuel plus élevé, de 6% (ce qui est supérieur aux 2% des composites classiques) ne sont habituellement pas considérés comme des composites, bien qu'ils le soient en principe.
- Les volumes de ces composites renforcés de fibres ne sont toutefois pas oubliés. En Europe par exemple, il est traité plus de fibre de verre dans ces composites (1 160 kT en 2014) que dans tout le marché européen des GRP (1 043 kT), qui ne tient compte que des composites réalisés avec des fibres « longues » (à l'aide de rovings ou de fibres coupées de plus de 12 mm).

- Le succès croissant des composites thermoplastiques renforcés de fibres s'explique surtout par la conception, la production et le recyclage aisés des produits plastiques réalisés par leur biais.
- Du fait que ces composites ne sont pas pris en compte, l'importance de producteurs régionaux de composites thermoplastiques renforcés de fibres est clairement sous-estimée, tout comme les entreprises de moulage par injection de ces composites.

(2) Les produits composites finaux ne sont souvent pas uniquement constitués de plastiques renforcés de fibres, mais ils comportent aussi très fréquemment des âmes en matériaux non renforcés de fibres (core materials) et/ou certains « inserts » (métalliques, pour la fixation à une structure externe ou pour la gestion de certains dispositifs incorporés).

- De nombreux produits FRP sont des matériaux stratifiés présentant une structure en sandwich, constitué d'une couche supérieure et inférieure relativement fine, renforcée de fibres (« pellicule FRP ») et d'une couche intermédiaire en matériau d'âme léger mais plus épais.
- Grâce à l'insertion d'un matériau d'âme, la rigidité en flexion du produit composite est fortement augmentée. Ces structures composites en sandwich sont très utilisées dans les éoliennes, les applications maritimes et l'industrie aéronautique.

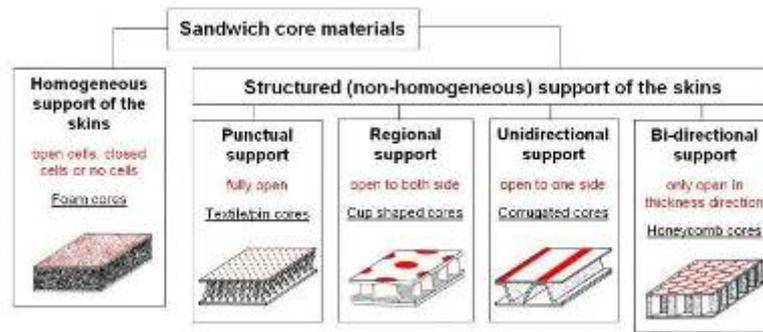
<u>Single Skin - t</u>	<u>Sandwich - 2t</u>	<u>Sandwich - 4t</u>
Weight: 1	Weight: 1	Weight: 1
Strength: 1	Strength: 6	Strength: 6
Stiffness: 1	Stiffness: 12	Stiffness: 48


Les âmes les plus courantes dans les composites renforcés de fibres sont :

- plastiques mousses (PVC, PET, SAN, PUR, ...),
- textiles 3D,
- structure en nid d'abeille (dans du plastique, du métal ou de la céramique),
- plaques ondulées (carton, métal, plastique, ...),
- structures légères en bois (balsa notamment).





De plus en plus, des plastiques recyclés (PET, ...) sont utilisés pour la fabrication d'âmes en mousse.

- Les pellicules composites sont d'ordinaire stratifiées à l'aide de colles réactives sur le matériau d'âme, mais elles peuvent également y être ancrées physiquement, par ex. via la couture de la mousse et du mat de fibres à l'aide de fils de renfort ; après cette couture, l'ensemble est imprégné de résine et durci (panneaux Acrosoma).



- Le marché mondial global des matériaux d'âme a atteint en 2014 la valeur de 915 millions USD, et se caractérise par une très forte croissance annuelle (8 à 9%). Il n'est pas précisé si ce chiffre d'affaires est inclus dans la production de composites.

(3) De très nombreux produits composites tels que piscines, navires, pales d'éoliennes, ... sont également revêtus, soit lors de la production, soit lors d'un processus ultérieur. Le système de revêtement peut consister en plusieurs couches et ne fait pas que décorer (couleur, brillance) la pièce composite, il sert également à protéger le matériau renforcé de fibres contre les éléments naturels (rayons UV, eau de mer, ...), à réduire l'infiltration possible d'eau (une eau y pénétrant peut provoquer des micro-craquelures par temps de gel et affaiblir la structure composite).

Le revêtement permet de prolonger la durée de vie des composites renforcés de fibres. De tels systèmes de revêtement sont souvent des systèmes réactifs qui doivent durcir. Actuellement, aucune donnée traçable du marché n'existe pour les systèmes de revêtement avec FRP, ce qui empêche d'esquisser dans l'immédiat d'éventuelles tendances concernant les gels de revêtement.



(4) Les composites polymères renforcés de fibres sont également utilisés pour réparer des constructions ou objets endommagés. Des données portant sur le marché des matériaux utilisés à cet effet (tissus ou mats de fibres, résines, catalyseur, ...) et des kits de réparation ne sont pas directement disponibles.



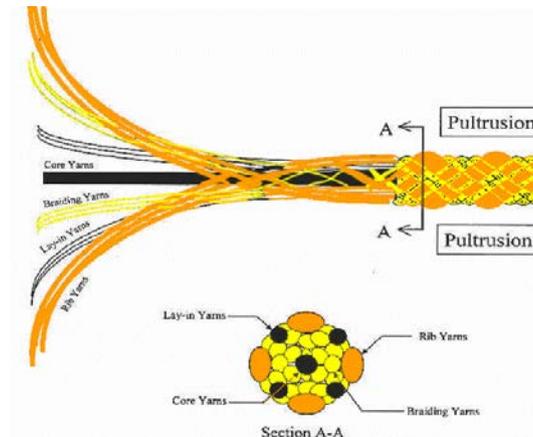
(5) Des composites thermoplastiques recyclés d'une part et des fibres de renfort récupérées de thermosets pyrolysés peuvent être réutilisés pour la fabrication de composites. Pour le recyclage et la récupération des fibres de carbone (RCF) dans des déchets de production ont été mis au point des systèmes industriellement rentables de tri, de décomposition et de recyclage (vois plus loin).

Aucune donnée de marché claire n'est actuellement publiée sur les composites produits à l'aide de fibres recyclées.

(6) Différentes fibres de renfort (par ex. verre et carbone, basalte et verre, carbone et aramide...) peuvent être incorporées au même composite unique. L'hybridation de différentes fibres de renfort dans le même produit composite est réalisée non seulement pour des raisons économiques, mais également pour exploiter au maximum les propriétés spécifiques des différentes fibres de renfort.

Un exemple de composites hybrides est le D-H-FRP (Ductile Hybrid FRP), un composite fabriqué à partir de fibres de carbone et de fibres d'aramide.

Ces produits D-H-FRP sont utilisés avec succès pour réparer des dégradations prématurées (suite à la corrosion de structures en béton à armature en acier) dans des ponts, gratte-ciels, et autoroutes.



D-H-FRP

Il n'est toutefois pas clairement déterminé dans quelles données du marché FRP sont repris ces composites hybrides.

3.2. Données de marché concernant les composites renforcés par fibres de verre (GRP)

Les données de marché les plus récentes proviennent du rapport « Composites Market Report 2014 » d'AVK (German Federation of Reinforced Plastics).

Le marché européen global des GRP (à l'exclusion des 1,16 million de tonnes de SFRTC, Short Fibre Reinforced Thermoplastic Compounds, voir 3.1. ci-dessus) a connu en 2014 une croissance de 2% et a maintenant atteint, avec un volume de 1 043 kT, le même niveau qu'en 2004 (1 041 kT), ce qui signifie également que les contrats perdus lors de la crise financière et économique de 2008-2009 ne sont pas encore totalement compensés.

Les plus importants débouchés pour les composites GRP en Europe sont :

- le transport (35%) : véhicules (voitures, camions, bus, trains, rames de métro, ...), avions, marine (yachts, navires, ...), fauteuils roulants, containers, remorques, ...
- la construction (34%) : canalisations, armatures de béton, cuves de stockage, projets d'énergie éolienne, profilés de porte et de fenêtre, ... De nombreuses applications de GRP s'appuient sur la propriété anticorrosion des plastiques renforcés par fibres de verre.
- l'électricité/l'électronique (15%) : tableaux de distribution, circuits imprimés, coffrets, ...
- le sport et le loisir (15%) : canoés, casques, skateboards, fauteuils roulants de sport, arcs à flèches, ...

- d'autres applications (1%) : mobilier, ...



Le chiffre d'affaires mondial global des GRP en 2014 est estimé à 55 milliards USD.

Le prix de vente des composites GRP est en effet spécifique au produit et aux applications, mais se situe généralement entre 4 et 15 euro/kg.

Le tableau ci-dessous fournit quelques données du marché mondial (source : JRC - 2013) :

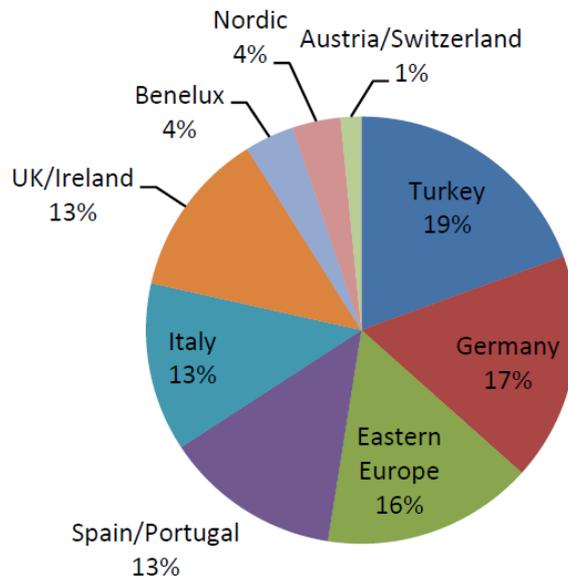
Processus / Produit	Volume (kilotonnes)	Chiffre d'affaires (millions d'euro)	Prix moyen du kilo (euro)
Injection moulding	116	515	4,
	4	9	4
Hand lay-up	91	643	7,
	2	6	1
SMC/BMC	72	370	5,
	7	4	1
Prépregs	62	835	13,
	7	7	3
Filament winding	58	359	6,
	2	3	2
Resin Infusion	42	251	6
	1	0	
Pultrusion	20	82	4
	5	5	

De fait, le prix n'est pas uniquement déterminé par la technologie du produit mais également par :

- les matières premières qui sont utilisées à cet effet,
- les dimensions du produit à réaliser. Les pales d'éoliennes sont par ex. des composites renforcés par fibres plus volumineux. Une éolienne d'une puissance d'1 MW comporte +/- 7,5 tonnes de fibre de verre.

- le domaine d'application.

L'importance des différentes régions de production en Europe se répartit comme suit en 2014 :

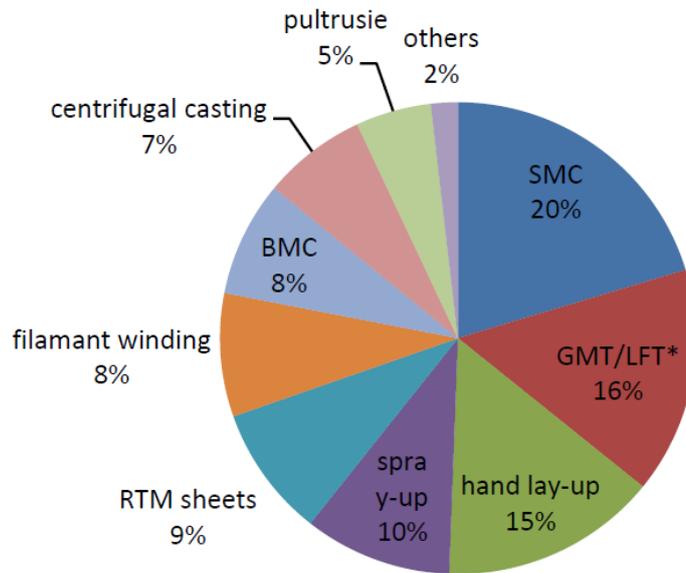


GRP production 2014

- Dans le rapport d'AVK, la Turquie est considérée comme un producteur européen. Avec une production de 225 000 tonnes, la Turquie est même un producteur plus important que l'Allemagne. Près de 70% de la production de GRP en Turquie est, contrairement aux autres producteurs européens de composites, axée sur les produits de construction (canalisations, pipelines, armatures du béton, collecteurs, stations d'épuration de l'eau, ...) et les grands projets de construction. À peine 18% des produits GRP concernent les transports.
- L'Allemagne, avec une production de 200 000 tonnes en 2014, a connu durant les 4 dernières années une croissance de 24%, due essentiellement à la relance du marché automobile allemand.
- La part de l'Europe de l'Est (Pologne, Tchéquie, Slovaquie, Hongrie, ...) dans la production de produits GRP continue à augmenter (+ 40% depuis 2010).
- L'Espagne et le Portugal, en tant que plus gros producteurs de produits GRP, produisent cependant 25% moins qu'il y a 4 ans.
- Nonobstant le fait que les pays du Benelux produisent 7% de plus qu'en 2010, leur importance stagne au niveau européen avec 43 000 tonnes, soit +/- 4% de parts du marché européen. Si l'on tenait compte des composites thermoplastiques renforcés de fibres (courtes), la part des pays du Benelux serait beaucoup plus importante (les grandes entreprises chimiques qui produisent des polymères à Anvers, Terneuzen ou Rotterdam proposent également des produits renforcés par fibre de verre).

Les différentes techniques de production se répartissaient comme suit en 2014 :

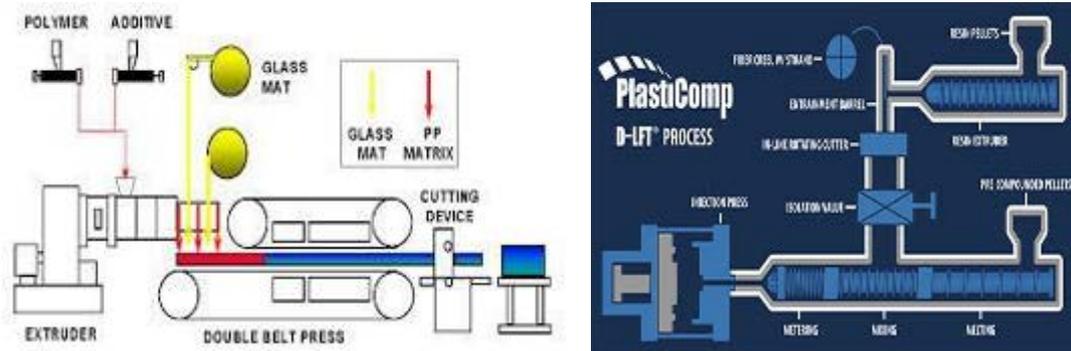
GRP production technologies 2014



Comparativement à 2010, des glissements importants se font dans les technologies mises en œuvre pour la fabrication des GRP.

- Le procédé de production « hand lay-up », à fort coefficient de travail, continue à perdre du terrain en Europe occidentale (baisse de 14% par rapport à 2011), mais reste encore important pour les GRP. Cette technologie de fabrication, exigeante en termes de travail et qui est surtout exploitée dans des plus petites entreprises en raison de son faible coût d'investissement, a pris à présent autant d'importance que la technologie RTM (RTM = Resin Transfer Moulding) qui reste elle toujours prépondérante (+ 16% depuis 2010).
- Les SMC (Sheet Moulding Compounds) et BMC (Bulk Moulding Compounds) restent les technologies « thermoset » les plus importantes, avec des parts de marché de respectivement 20% et 8%. Ces deux technologies fournissent des produits comprimés et durcis présentant un assez bon fini de surface, et sont essentiellement utilisées pour la réalisation de pièces pour automobiles. Les BMC sont des composites prémélangés généralement constitués de fibres de renfort hachées, relativement courtes, ce qui les rend moins aptes à des applications structurelles et à la réalisation de produits de plus grande taille.
- Les composites thermoplastiques, issus des technologies GMT (Glass Mat reinforced Thermoplastic) et LFT (Long Fibre Reinforced Thermoplastic), ont connu une expansion de 21% depuis 2011. Les techniques classiques de traitement des plastiques (compoundage, extrusion, moulage par injection et compression à la chaleur) utilisés pour les GMT et LFT, sont devenues à présent les 2 plus importantes technologies de fabrication de composites, après les SMC.

Les différentes étapes du processus peuvent être reliées l'une à l'autre au moyen de bandes transporteuses et de robots.

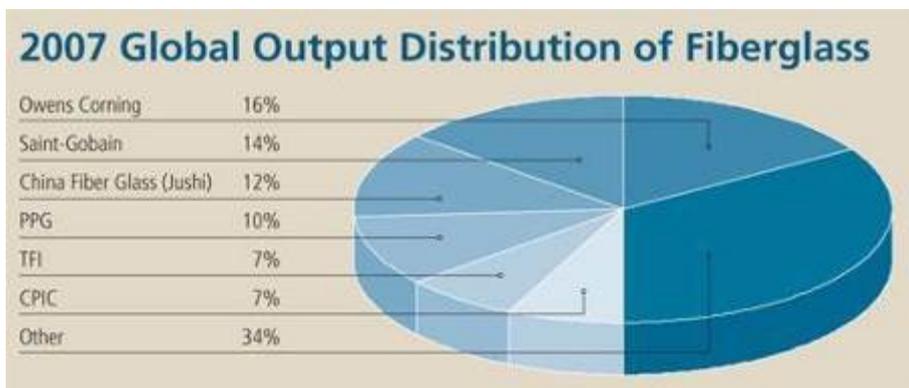


Les thermoplastiques prépondérants pour les GRP sont respectivement :

polymère	proportion (%)
PA	54
PBT/PET	19
PP	13
PPS	4
PC	3
Autres	7

Le % de répartition « composites thermoplastiques / thermosets » au sein des GRP (à l'exclusion des composites renforcés par fibres courtes) s'élève à l'heure actuelle à 16 / 84.

60% de toute la fibre de verre destinée aux composites est fournie par 6 grands producteurs de fibre de verre. Les autres 40% du marché de la fibre de verre se répartissent sur une cinquantaine de fournisseurs de moindre importance.



3.3. Données de marché pour les composites renforcés de fibre de carbone (CRP)

Les produits CRP connaissent une forte croissance depuis plusieurs années déjà. Cette croissance est essentiellement due à leurs propriétés mécaniques supérieures par rapport au verre, et au faible poids volumique du carbone (par rapport au verre), ce qui est surtout important dans les produits liés aux transports (avions, véhicules, trains, ...) et dans des applications de construction structurelles (énergie éolienne, ...).

L'économie d'énergie résultant de l'utilisation de composites plus légers dans les moyens de transport, les éoliennes, etc. est l'incitant majeur pour l'utilisation de plastiques renforcés par fibre de carbone.

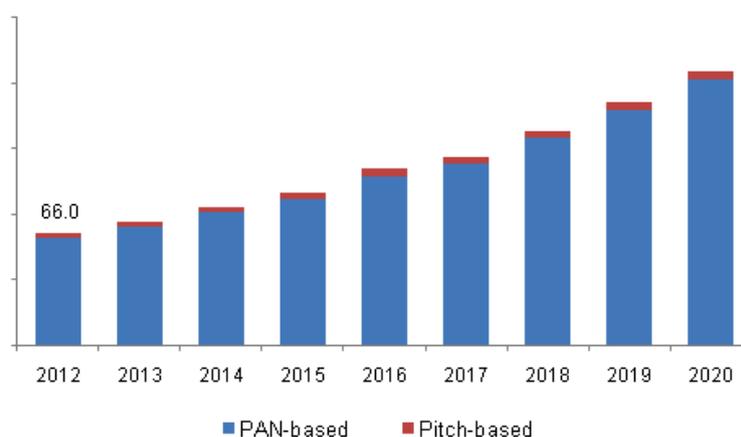
Dans des applications structurelles de construction, les composites CRP sont e.a. mis en œuvre pour la réparation et le rapiéçage de constructions en béton attaquées par la corrosion du béton, telles que viaducs, tunnels, pylônes, etc.

Dans des applications militaires, l'invisibilité au radar (transparence vis-à-vis des ondes radar) est un atout important pour les CRP.

En 2013, la demande en fibre de carbone atteignait 46 500 tonnes, soit 7% de plus qu'en 2012. Depuis 2008, la production de fibre de carbone a cru de presque 50%. La capacité totale de production à l'échelle mondiale est actuellement de 104 600 tonnes, ce qui signifie par ailleurs que moins de 50% de cette capacité de production disponible est effectivement exploitée.

L'Europe possède 24% de cette capacité de production mondiale (6% en Hongrie, 5% en Allemagne, 5% en France, 4% au Royaume-Uni, 3% en Turquie, 1% en Espagne).

La fibre de carbone est réalisée, pour plus de 97%, à l'aide d'un précurseur de PAN (acryle), moins de 3% est fabriquée à partir de pitch. Le graphique ci-dessous montre clairement que cette situation persistera dans les années à venir.



Les 10 plus importants producteurs de fibre de carbone contrôlaient en 2013 91% de la capacité mondiale de production. Toray, qui a aussi repris récemment Zoltek en Hongrie (après Toray, Zoltek était le 2e plus grand producteur), est à présent et de loin le plus gros producteur de fibres de carbone, avec une capacité de production de 38 500 tonnes, et possède en propre après cette reprise 39% de la production de fibre de carbone.

Le chiffre d'affaires mondial des « fibres de carbone » s'élevait en 2013 à 1,77 milliard de dollars US. À partir de ces fibres peuvent à présent être fabriquées 79 000 tonnes de composites en fibre de carbone. Le prix moyen de la fibre de carbone est déterminé par sa résistance et par ses caractéristiques de module d'une part, et par le domaine d'application d'autre part (voir tableau plus loin).

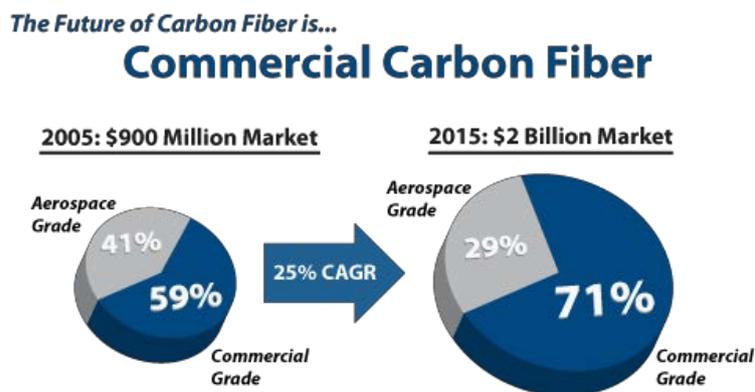
Les fibres de carbone, qui ont chacune leur coût, peuvent être subdivisées en :

- Fibres UHM (Ultra High Modulus) avec un module > 500 GPa,
- Fibres HM (High Modulus) avec un module > 300 GPa,
- Fibres IM (intermediate Modulus) avec un module > 200 GPa,
- Fibres (High Strength) avec un module > 4 GPa.

Dans les applications aéronautiques et militaires, les prix des fibres de carbone sont deux fois supérieurs à ceux applicables dans d'autres domaines d'application. Les aspects de très haute sécurité, les licences et les pourcentages relativement élevés de déchets de production (20 à 40% de pièces non conformes, déchets de coupe, ...) dans ces secteurs expliquent ces grandes différences.

Pour poursuivre la croissance dans différents secteurs (e.a. l'automobile, l'électronique), le prix des fibres de carbone doit encore baisser.

Le « grade » ou spécificité de la fibre de carbone a été clairement modifié au cours des dernières années. La part des fibres de carbone « commerciales », utilisable dans plusieurs domaines, continuera à augmenter.



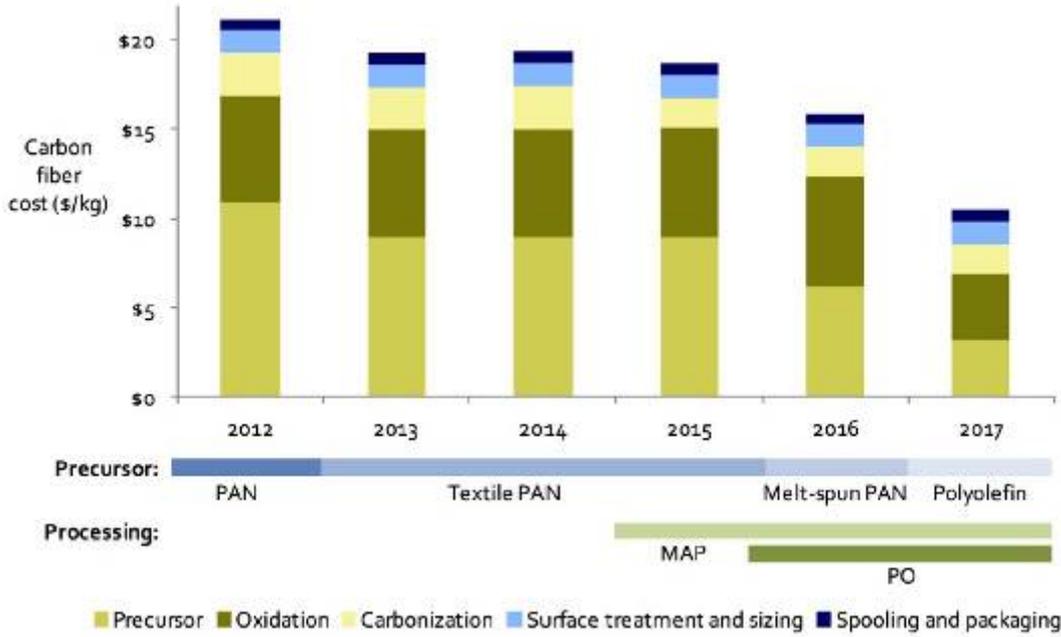
L'usage croissant de fibres de carbone recyclées (RCF) dans certaines applications et surtout dans des composites thermoplastiques y jouera dans ce cadre un rôle important.

Une récente étude de Boeing (Aero Q408 art.02) compare les coûts de matière et d'énergie des RCF (chopped recycled carbon fiber) et des VCF (chopped virgin carbon fiber) hachées, qui possèdent des propriétés comparables.

Ces très grandes différences feront encore davantage baisser les prix de vente de la fibre de carbone.

Fibre (hachée)	Coût matière	Coût de l'énergie
VCF (vierge)	15-30 USD/livre	25-75 kWh/livre
RCF (recyclée)	8-12 USD/livre	1,3-4,5 kWh/livre

Pour faire encore baisser le prix de la fibre de carbone, les producteurs de fibre de carbone cherchent d'autres précurseurs. Le graphique ci-dessous donne quelques indications ainsi que la période à laquelle de nouveaux types de fibre de carbone seront probablement disponibles.



Source: Lux Research, Inc. www.luxresearchinc.com

En 2013, le chiffre d'affaires des composites à base de fibre de carbone s'élevait à 14,7 milliards USD. Sur base de ces chiffres globaux, on peut dire que le prix moyen de composites à base de carbone est de 186 USD/kg, ce qui est bien supérieur à celui d'un composite GRP.

Le prix moyen élevé de composites en fibre de carbone indique clairement que les produits CRP trouvent pour l'instant surtout leur application dans des segments de marché fortement normés (industrie aéronautique et défense) et dans certains produits de luxe (voitures de F1, vélos en carbone, clubs de golf, ...), où les chiffres de vente importent moins.

64% du chiffre d'affaires global des composites à base de fibre de carbone est réalisé avec des matrices polymères renforcées de fibre de carbone (CRP). Les autres matériaux de matrice sont respectivement le carbone (13%), la céramique (10%), le métal (8%) et les matrices hybrides (5%).

Les systèmes de matrice polymère au sein de composites CRP peuvent être à leur tour subdivisés en thermosets (76%) et en thermoplastiques (24%) ; pour les GRP, cette proportion était respectivement de 84% et 16%).

32% du chiffre d'affaires mondial en composites au carbone est réalisé en Europe. Cette part européenne importante dans le marché des CRP est essentiellement due à une industrie aéronautique propre à l'Europe (Airbus, ...), à l'implantation européenne de grands constructeurs automobiles (BMW, Mercedes, VW, PSA, ...) et à l'importance croissante des parcs éoliens off-shore en Europe.

Le tableau ci-dessous reprend les principaux domaines d'application de la consommation de fibres, du chiffre d'affaires des fibres et des composites.

Domaine d'application	poids (%) des fibres de carbone Sur un total	chiffre d'affaires (%) des fibres de carbone Sur un total	Prix moyen Fibre de carbone (USD/kg)	chiffre d'affaires (%) des composites carbonés Sur un total de
Aéronautique et défense	30%	49%	62	28%
Éoliennes	14%	9%	23	12%
Sport & loisir	14%	11%	30	10%
Molding compounds	11%	8%	24	
Automobile	11%	7%	26	15%
Réservoirs sous pression	5%	4%	30	
Applications civiles	5%	4%	29	
Marine	2%	1%	23	
Autres	7%	7%	30	

Plusieurs domaines d'application mentionnés ci-dessus peuvent être répartis en segments spécifiques de marché et/ou familles de produits.

Les tableaux ci-dessous indiquent l'importance relative de quelques sous-domaines au sein des trois domaines d'application majeurs.

Aérospatiale et défense	Total de 4,1 milliards USD	Sport & loisir	Total de 1,47 milliards USD	Automobile	Total de 2,2 milliards USD
Aviation commerciale	60 %	Manches de clubs, têtes	38 %	Voitures	46 %
Aviation militaire	16 %	Raquettes	21 %	Camions	18 %
Avions d'affaires	8 %	Vélos	14 %	Sports moteurs	15 %
Hélicoptères	7 %	Autres	27 %	Trains	13 %
Autres	9 %			Autres	8 %

Nonobstant le fait que toute la surcapacité existante (de plus de 50%), la plupart des producteurs de fibre de carbone sont toujours en train d'étendre leur capacité de production.

Cette extension de la capacité de production est surtout liée à la croissance attendue dans les applications automobiles et à la demande fortement accrue de CRP dans les avions et dans les éoliennes off-shore de grande puissance.

Les producteurs de fibre veulent clairement être prêts vis-à-vis de la croissance attendue des CRP dans le secteur automobile.

Les principaux constructeurs automobiles ont conclu des accords de coopération avec les producteurs de fibre, axés sur les développements stratégiques de produits. BMW, le pionnier des applications de fibre de carbone dans les voitures, a fondé avec SGL la joint venture « SGL Automotive Carbon Fibers (ACF) ». General Motors a fait alliance avec Toho Tenax, Daimler avec Toray, Jaguar Land Rover avec Cyttec, Ford avec DowAksa.

Le tableau ci-dessous indique clairement que l'utilisation possible d'1% de composites CRP dans les modèles courants de voitures (production de masse) générera une énorme demande en fibre de carbone.

Global Automotive Market Impact of Low-Cost Carbon Fiber

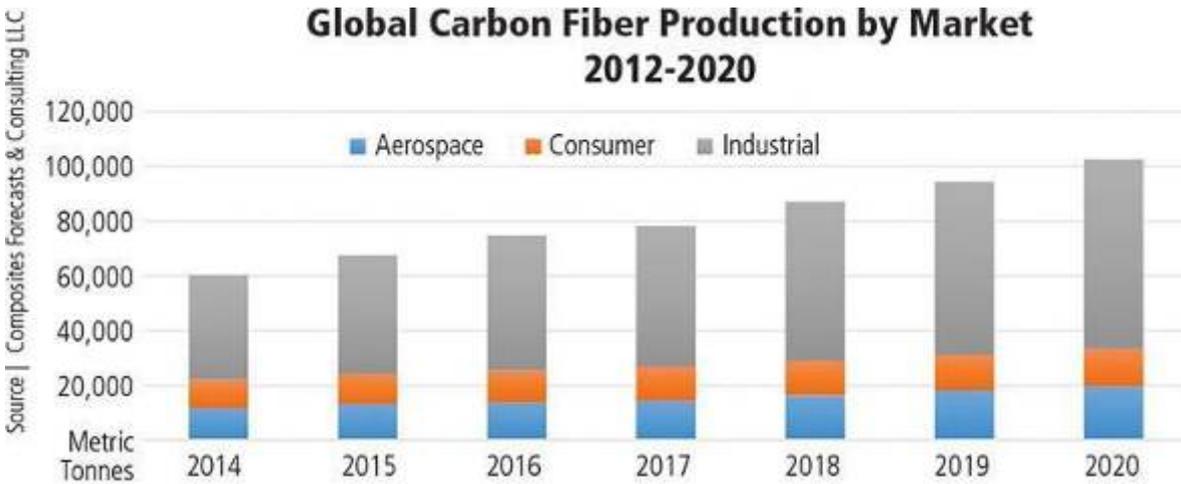
Carbon fiber potential in 2017 at 50% of current price

Global Automotive Production by Car Type in 2017	Expected Vehicle Production in 2017	Expected use of CF in Cars	Carbon Fiber Demand (M lbs) <small>@ 0.50 X current price</small>	Carbon Fiber Demand (\$ M) <small>@ 6.50 X current price</small>
Super Cars	6K	100% of cars	1.3 M lbs	\$7 M
Super Luxury Cars	600K	10%	101.2 M lbs	\$506 M
Luxury Cars	4 Million			
Other/Regular Cars	92 Million	1%	202.4 M lbs	\$1,012 M
Global Automotive Production in 2017	97 Million		305 M lbs	\$1,525 M

Source: Lucintel, ACMA Composites 2012
for the U.S. Department of Energy

~ 3X current global CF demand for ALL APPLICATIONS

Le bureau de consultance LLC attend, en matière de consommation de fibre de carbone (en tonnes) l'évolution suivante sur les années à venir :



Les marchés industriels se rapportent surtout à la production de moyens pour le transport et la mobilité.

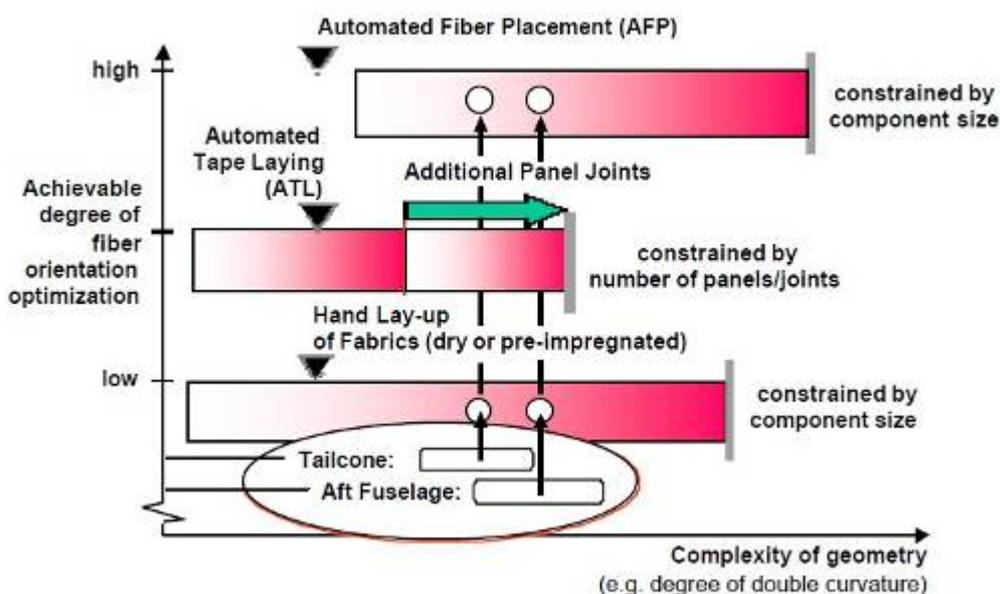
Les évolutions prévues ou espérées du marché, les menaces et les opportunités seront dans tous les cas spécifiques aux types de fibre et aux applications. Ceux-ci sont abordés en détail dans un chapitre séparé (chap. 4).

Le marché actuel mondial des CRP, à savoir 9,4 milliards USD représentant 64% du marché des composites à base de fibre de carbone, peut être subdivisé en fonction de la technologie de production utilisée, de la manière suivante :

Technologie	proportion (%) de chiffre d'affaires CRP
Pultrusion & winding	40
Prepreg lay-up	37
Wet lamination & infusion	12
Pressing & injection	7
Autres	4

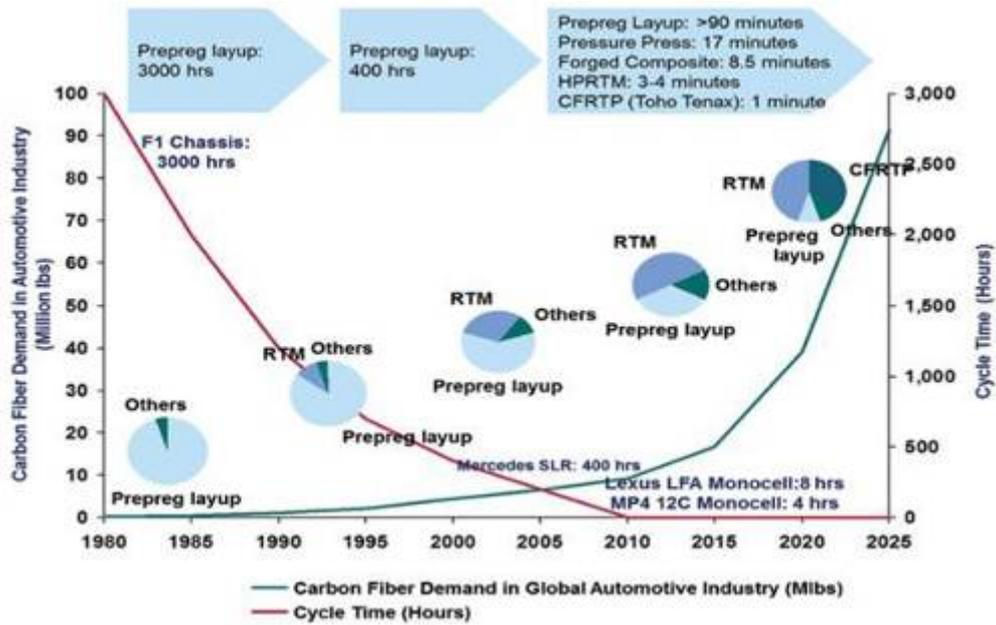
Cette subdivision montre que les producteurs de GRP et de CRP possèdent et mettent en œuvre d'autres ressources de production et de contrôle. La baisse de production chez les producteurs de CRP est aussi beaucoup plus importante que chez les producteurs de GRP. Les producteurs de CRP sont généralement aussi de bien plus grandes entreprises, qui peuvent plus ou beaucoup plus aisément investir ainsi que constituer des stocks de ces matières premières coûteuses. Par ailleurs, il existe également des entreprises qui produisent tant des GRP que des CRP, mais la plupart d'entre elles appliquent pour ces deux groupes de produits des plans de contrôle qualité différents, avec d'autres critères de qualité.

Le graphique ci-dessous montre les différentes technologies de production utilisées pour la fabrication de différents composants CRP pour un avion Airbus 380.



La suite de la croissance des CRP sera influencée par le développement futur des procédés et technologies mentionnées ci-dessus.

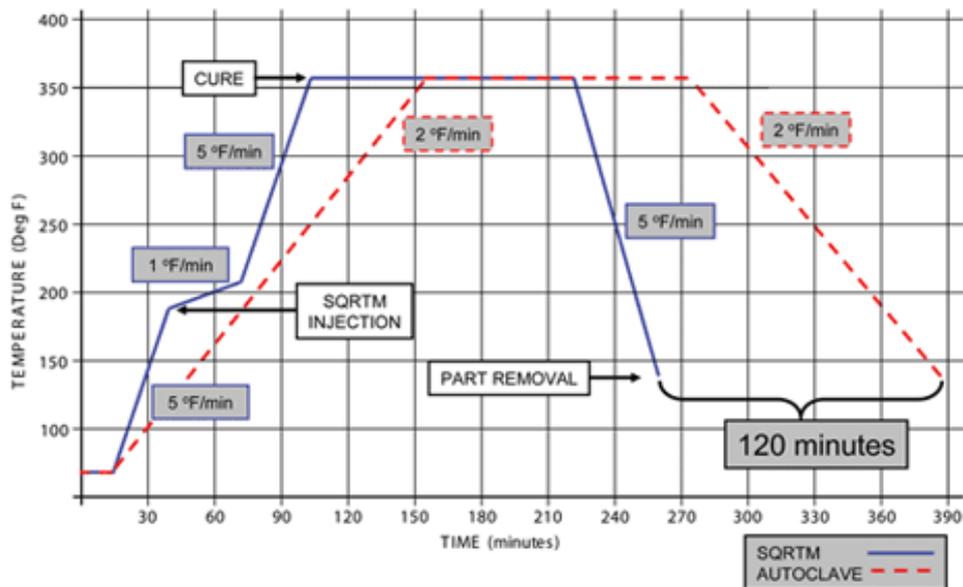
L'utilisation de composites à base de fibre de carbone dans le secteur automobile sera déterminée dans une grande mesure par la possible réduction des temps de cycles de procédé.



Carbon Fiber Consumption in Global Automotive Industry with Reduction in Part Fabricating Cycle Time (source : Lucintel)

Le procédé SQRTM illustre le gain en temps possible pour le durcissement de thermosets.

SQRTM Cycle and Autoclave Cure



Developed by Radius Engineering Inc., the Qualified Resin Transfer Molding Process (SQRTM) uses existing qualified prepreg in a closed mold under high pressure to reduce cost and shorten composite curing time.

3.4. Autres polymères composites renforcés de fibres.

Outre le verre et le carbone, d'autres fibres sont également utilisées : fibres naturelles, basalte, aramide, ... Toutefois, le nombre de données de marché consultables via l'internet est beaucoup plus réduit concernant ces composites.

(1) Composites à base de fibres naturelles

En 2013, les plastiques thermoplastiques renforcés de fibres de cellulose (provenant de plantes ou d'arbres) comprenaient en Europe 99 000 tonnes de NFRP (Natural Fiber Reinforced Plastics, provenant de plantes) et 260.000 tonnes de WPC (Wood Plastic Composites - à base de fibres de bois, provenant d'arbres).

La distinction entre les deux n'est pas toujours aisée à établir. Les fibres de bois (d'arbres) sont par eux-mêmes des « composites » constitués de fibres de cellulose qui sont incorporées dans les résines naturelles, mais les fibres de cellulose de plantes qui sont utilisées dans des composites NFRP, ne sont pas seulement constituées également de matière cellulosique mais elles ont pour la plupart une composition assez complexe.

La cellulose et les fibres de bois utilisées à cet effet peuvent être subdivisées comme suit :

- Fibres de bois : 38%
- Coton : 25%
- Lin : 19%
- Chanvre de Deccan : 8%
- Chanvre : 5%
- Autres (sisal, ...) : 5%

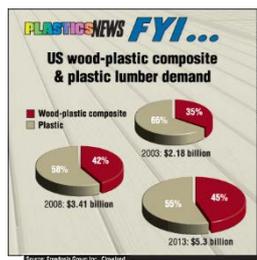
Attention : le thermoset classique - composites bois tels que panneaux OSB (Oriented Strand Board), MDF (Medium Density Fiberboard), HDF (High Density Fiberboard) et agglomérés ne sont pas inclus ici.



NF compression moulded parts – superior lightweight properties	
Automotive interior parts	Area weight in g/m ²
WPC – extruded and moulded	2,500
Injection moulded pure plastic or glass fibre reinforced plastics	> 2,200
Compression moulded PP-NF	1,800
Compression moulded PP-NF with bonding agent MAPP	1,500
Compression moulded Thermosets-NF	1,400 – 1,500
Compression moulded Thermosets-NF In development, production expected after 2018	800 – 1,000

Les WPC trouvent leur application dans les domaines / produits suivants :

- 67% decking (planchers de terrasse)
- 23% pièces auto
- 6% siding & fencing (revêtement de façade et grillages)
- 2% applications techniques
- 1% meubles
- 1% produits autres



Les marchés des NFRP et WPC continuent leur croissance

(2) Composites à base de fibres d'aramide.

Les fibres d'aramide sont des fibres de renfort relativement chères (+/- 24 euro/kg), essentiellement utilisées dans des applications spéciales (produits militaires et balistiques principalement).

En 2013, la production de fibres d'aramide pour composites a atteint selon une étude JRC un volume de 2 000 tonnes et un chiffre d'affaires de 48 millions d'euro.

Les composites avancés à base d'aramide connaissent encore actuellement un taux de croissance annuel de 3 à 4% dans l'industrie aéronautique.

Le nombre total de producteurs de fibres d'aramide est assez restreint. Les 5 plus gros producteurs de fibre d'aramide contrôlent +/- 25% de la production mondiale.

Table 4.4 The Top Global Aramid Fibre Composites Companies 2014 (Rank, Company Name, Total Market Revenue (\$bn), Total Company Revenue (\$bn), Company Sector Revenue (\$bn), Market Share (% of Total Market Revenue))

Rank	Company Name	Total Market Revenue (\$bn)	Total Company Revenue (\$bn)	Company Sector Revenue (\$bn)	Market Share (% of Total Market Revenue)
1	DuPont	7.62	34.72	0.65	8.5%
2	Teijin		7.43	0.52	6.8%
3	Kuraray		4.59	0.37	4.9%
4	Innegra Technologies		0.40	0.20	2.6%
5	Kolon Industries		5.07	0.05	0.7%
The Top Global Aramid Fibre Composites Companies					
Others					76.5%

Les fibres d'aramide absorbent l'humidité et présentent une stabilité aux UV limitée. Il faut en tenir compte lors de la mise en œuvre de ces fibres.

(3) Composites à base de fibres de basalte.

Le basalte est une fibre un peu plus chère que la fibre de verre, mais possède de meilleures propriétés mécaniques et thermiques. Ces performances mécaniques et thermiques supérieures permettent de réduire le poids des pièces en composite, en remplaçant la fibre de verre par la fibre de basalte.

Le tableau ci-dessous compare une série de propriétés de la fibre de basalte et de la fibre de verre E.

Propriété	Basalte	Verre E
Résistance à la traction	600-730	300-500
Module	84-87	72-76
Plage de température	-260 °C + 560 °C	- 60 °C + 460 °C
Densité	2,5	2,5
Conductivité thermique	0,031-0,038 W/m ² K	0,038-0,042 W/m ² K

Le basalte présente en outre de meilleures propriétés acoustiques.

Le chiffre d'affaires total de la fibre de basalte et des composites renforcés de fibre de basalte est actuellement estimé à 100 millions USD. Basaltex, un fournisseur flamand de fibre de basalte en est un acteur mondial majeur.

Les composites en fibre de basalte sont très souvent utilisés pour le renforcement (armatures) de béton, et ce en remplacement des armatures métalliques classiques. Les économies d'énergie rendues possibles par le remplacement des barres de renfort métalliques du béton font espérer que le chiffre d'affaires des composites à base de basalte atteigne 200 millions USD d'ici 2020.

(4) Composites auto-renforçants.

Les composites auto-renforçants (SRP : Self Reinforced Plastics) sont des composites thermoplastiques dont la matrice et le renfort de fibres ont la même composition de polymère (même famille de polymères), mais qui diffèrent par leurs points de fusion.

Des SRP peuvent être produits à base de polymères classiques tels que PE, PP, PA en PET.

Le projet de recherche européen FPO7-ESPRIT 214355 « Resource-efficient SRP materials and processing » étudie le développement de granules SRP pour le moulage par injection et l'extrusion. Une piste possible est la réalisation de fils hybrides à partir de 2 polymères ayant un point de fusion différent. Les faisceaux de fils hybrides sont chauffés à une température à laquelle fond le composant au plus bas point de fusion. Après refroidissement, les 'spaghetti' souples ou les bâtonnets, solidifiés, sont découpés en granules.

Le projet collectif « Bio-SPC » de Centexbel a développé une alternative de type bio pour les composites polymères auto-renforcés, à partir de polymères PLA (acide polylactique) aux différents points de fusion. Des filaments de PLA à haute résistance ont été mis au point comme fibres de renfort et combinés avec des fibres de matrice PLA à bas point de fusion, à travers diverses étapes d'hybridation textile. Avec ce type de structures hybrides sont obtenus des composites auto-renforçants par le biais du processus de moulage par compression (Compression Moulding). Les propriétés mécaniques de ces composites à base de bio sont d'un ordre de grandeur similaire voire supérieur à celui des composites PP connus auto-renforçants (par ex. Curv®).

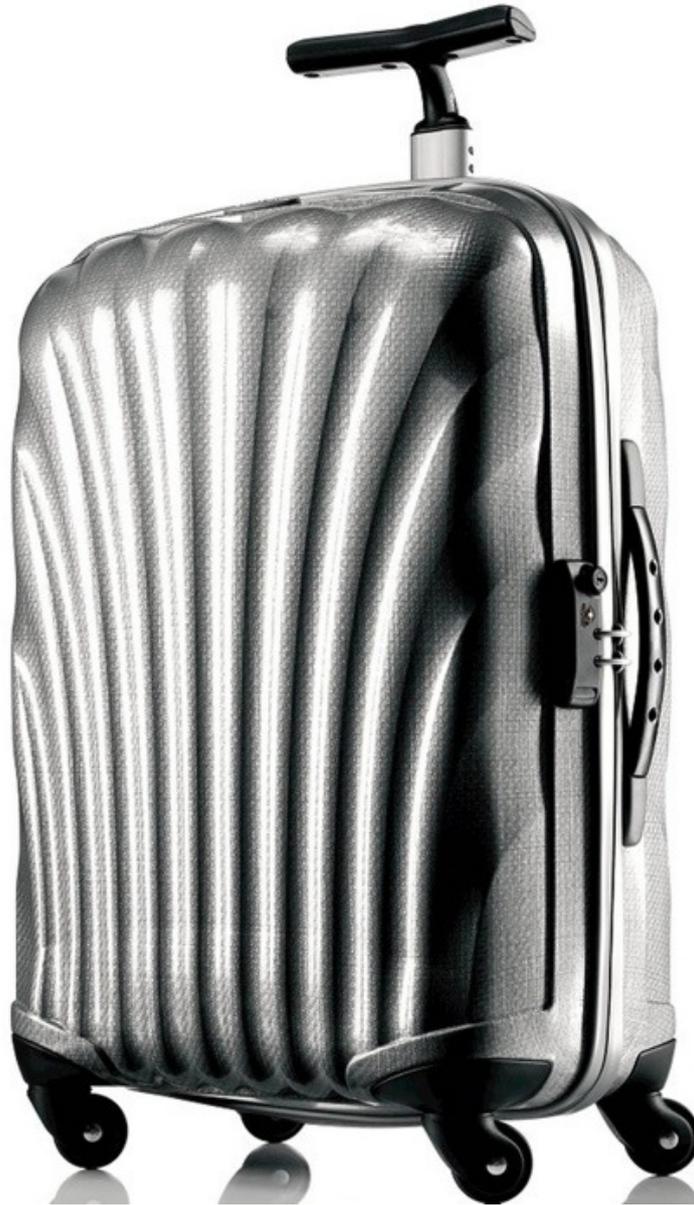
Des matériaux tissés et plats à base de PO sont disponibles dans le commerce et sont utilisés dans un nombre croissant d'applications non structurelles telles que prothèses orthopédiques, balistique, sport, coffrages, conteneurs de transport, pavillons de toit pour voitures, ...

Leur faible poids, leur résistance élevée aux chocs et la facilité de leur recyclage constituent d'importants atouts dans ce cadre.

Les inconvénients des SRP sont leur sensibilité à la température et la tenue au retrait propres au caractère thermoplastique, ce qui ne pose toutefois aucun problème dans certaines applications.

Les SRP PP les plus connus sont :

- Curv™ (<http://www.curvonline.com/>),
- Pure® (<http://www.pure-composites.com/>),
- Armordon® (<http://www.donlow.co.uk/static/wovens/srpp/srpp/>) Certaines valises Samsonite sont réalisées à l'aide de plaques Curv™.



Des données de marché ne sont pas directement accessibles pour ces composites SRP.

4. Tendances, évolutions du marché, opportunités et menaces

Avant d'examiner plus en profondeur les évolutions et tendances au sein de quelques domaines d'application spécifiques, nous voulons adresser une série d'aspects généraux qui influencent (fortement) l'utilisation de composites polymères renforcés de fibres.

4.1. Opportunités et menaces d'ordre général, non spécifiques à des applications

Le nombre de domaines d'application et le recours à des composites polymères renforcés de fibres ont augmenté ces dernières années, mais n'ont connu une forte croissance que dans un nombre limité de domaines. Il n'est certainement pas établi que ces matériaux, avec une série de remarquables propriétés telles que leur faible poids, leur résistance à la corrosion, etc., ont supplanté aisément au fil des ans les matériaux traditionnels tels que métal, céramique et plastiques non renforcés.

Faire preuve de propriétés exceptionnelles n'est certes pas suffisant pour remplacer la plupart des matériaux bien moins chers.

Ceci s'applique surtout aux produits de masse qui sont fabriqués traditionnellement en métal depuis des années. Les conteneurs maritimes en sont un exemple typique. Nonobstant le fait que les FRP permettraient de réaliser des conteneurs beaucoup plus légers, résistants à la corrosion et même repliables, ce qui réduirait drastiquement les coûts logistiques (par une économie de carburant ou de volume), la commercialisation en masse de conteneurs maritimes de FRP n'a jamais réussi.

L'utilisation ou non aux matériaux FRP dans des produits et applications de béton est en effet déterminé par les auteurs de projet, bureaux d'ingénieurs, (grands) donneurs d'ordre et le travail de lobbying d'associations qui soutiennent le recours à des matériaux connus.

Le choix du matériau est déterminé dans une importante mesure par le coût et la connaissance et l'expérience de matériaux connus, même si des considérations sociétales, la législation et les aspects environnementaux commencent à avoir un impact accru et contraignant.

Dans ce contexte général, on peut établir que :

- Les FRP sont (beaucoup) trop chers pour de nombreuses applications. Pour certaines d'entre elles, le prix des fibres de renfort et des matrices devra encore (fortement) baisser avant qu'elles ne soient mises en œuvre à une échelle suffisante dans des productions de masse, mais les coûts de production des FRP eux-mêmes devront continuer à baisser, par l'automatisation et l'accélération des procédés (par le biais de l'utilisation de la technologie micro-ondes, les systèmes de chauffage par induction, etc.).
- De nombreux utilisateurs des matériaux ont une attitude conservatrice et sont réticents vis-à-vis des matériaux novateurs.

- Les conséquences financières positives (résultant par ex. des économies d'énergie, des opérations d'entretien réduites, ...) rendues possibles par l'utilisation de FRP dans certains produits et applications ne sont pas ou insuffisamment chiffrées, trop vagues ou beaucoup trop peu étayées. De ce fait, les décideurs ne sont pas ou pas assez convaincus d'utiliser ou de commander des produits FRP.
- Les propriétés de matériau (tant les forces que les faiblesses vis-à-vis de matériaux classiques) des différents FRP et leur influence sur la conception, la production, l'installation ou l'entretien sont peu connues ou comprises par les auteurs de projet, les collaborateurs de production, les installateurs, les services de maintenance technique.
- Les plastiques renforcés de fibres s'appuient sur des polymères (résines et thermoplastiques) qui sont quasiment exclusivement réalisés à partir de combustibles fossiles (chimie du carbone). Pour générer un monde moins dépendant du carbone, l'origine fossile des matières premières constitue un obstacle, même si cet argument peut être réfuté en grande partie.
- Le recyclage de produits FRP (l'état actuel de la technique en matière de procédés et d'applications de recyclage sera exposé au chapitre 5) et les processus logistiques et de collecte correspondants sont encore trop peu matures ou trop coûteux. Dès lors, la plupart des matières premières recyclées à partir de composites polymères renforcés de fibres ne sont pas assez performantes, ou le sont à un prix trop élevé comparativement aux matières premières vierges.

La résolution des problèmes ci-dessus ou la levée des malentendus existants constituent de grands défis, non seulement pour les entreprises de recyclage et les producteurs de fibres, de produits chimiques, de composites concernés, mais également pour les instituts d'enseignement et de recherche.

Les projets E&R ne doivent pas uniquement être innovants, les résultats de recherche doivent aussi être scientifiquement mieux étayés. Le développement durable (dans tous ses aspects, économiques et financiers inclus) doit également recevoir une attention décuplée.

La législation et les directives environnementales concernant les déchets, le recyclage (objectifs, ...), l'énergie, la durabilité (rapportage, ...) sont plus contraignantes et peuvent limiter ou orienter l'applicabilité de matériaux FRP au sein de certains marchés.

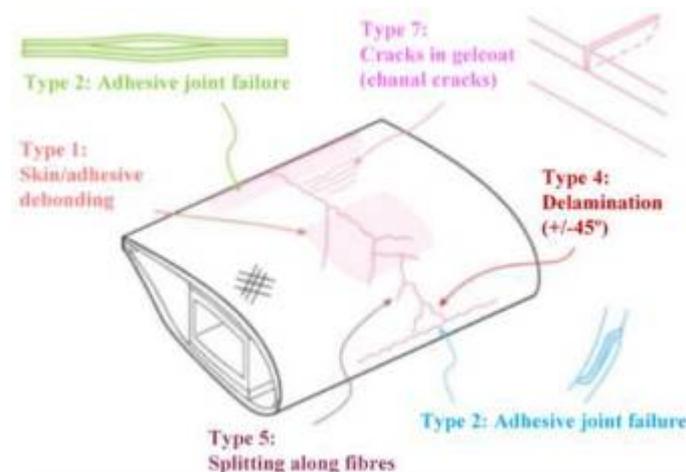
- Les directives européennes relatives aux véhicules EOL, déchets électroniques, la transformation de déchets en matières premières (et l'interdiction subséquente d'encre mettre en décharge ou incinérer), ... forceront les producteurs de FRP et leurs clients à trouver des solutions durables tant pour les déchets de production et d'installation que pour les produits mis au rebut. Faute de réussir dans ce domaine, la consommation de FRP diminuera.

- Les processus logistiques et de recyclage existants devront probablement être adaptés à certains produits afin d'obtenir des matières recyclées de qualité. On peut par exemple se demander si les vieilles éoliennes off-shore (de plus de 20 ans) ne devraient pas être démontées sur place et immédiatement recyclées.
- Si l'on réussit à convertir de manière efficiente le flux de déchets FRP en matériaux recyclés ou matières premières bon marché et de qualité, il est très vraisemblable que s'ouvrent un grand nombre de nouvelles possibilités. Les fibres de carbone recyclées, qui sont bien moins chères que les fibres vierges, pourront également être plus aisément utilisées dans de nouveaux produits.

Mais les normes entourant les (nouveaux) matériaux et produits FRP seront aussi toujours plus importantes. Les activités de normalisation devront également être mieux conduites et suivies par les concernés.

Comme tous les matériaux, les composites polymères renforcés de fibres peuvent être endommagés ou cassés, ce qui ne les rend plus fonctionnels dans leur domaine d'application spécifique. L'endommagement ou la rupture peut trouver son origine dans une microfissure, mais s'étendre assez rapidement. Ces microfissures peuvent survenir à la suite d'un choc bref mais trop important, de fortes sollicitations mécaniques répétitives, de vieillissement par UV, de l'influence de liquides ou de gaz, de sollicitation thermique, ...

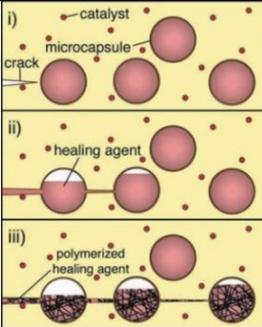
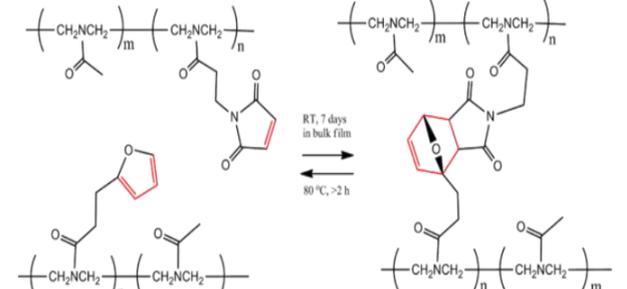
Le dommage s'établit définitivement lorsque la liaison matrice/fibre au sein du matériau composite est trop affaiblie ou disparaît complètement. Les liaisons entre les différents composants (matériau de l'âme, pellicule du composite, revêtement, ...) peuvent également être partiellement ou totalement rompues. La figure ci-dessous illustre les défauts possibles entre les différentes parties d'une pale d'éolienne.



La préservation maximale des propriétés intrinsèques du matériau, dans des conditions d'utilisation connues et tout au long de la durée de vie d'un produit FRP, est primordiale pour des composites FRP, souvent plus coûteux que des matériaux traditionnels.

Si des microfissures peuvent être automatiquement réparées, cela aura aussi une grande influence sur la longévité et les performances de produits FRP. Différents systèmes de « self-healing » (auto-guérison) ont été développés dans un passé récent, pour réparer partiellement ou totalement de petites fissures ou des liaisons déjà rompues dans la matrice.

Les figures ci-dessous illustrent certains systèmes de « self-healing ».

		<p>A microencapsulated healing agent is embedded in a structural composite matrix containing a catalyst capable of polymerizing the healing agent.</p> <p>(i) Cracks form in the matrix wherever damage occurs.</p> <p>(ii) The crack ruptures the microcapsules, releasing the healing agent into the crack plane through capillary action.</p> <p>(iii) The healing agent contacts the catalyst triggering polymerization that bonds the crack faces closed</p>
		<p>reversible Diels Alder cross-linking of modified poly(<i>N</i>-acetyleneimine) containing either maleimide or furancarboxyl pendant moieties.</p> <p>The transparent organic polymeric material can repeatedly mend or “re-mend” itself under mild conditions. The reaction is fully reversible and can be used to restore a fractured part of the polymer multiple times and does not require additional ingredients such as a catalyst, monomers or special surface treatment of the fractured interface. ((science april 2002)</p>

De tels systèmes sont toutefois encore en développement, et doivent être améliorés avant de pouvoir être appliqués avec succès à grande échelle.

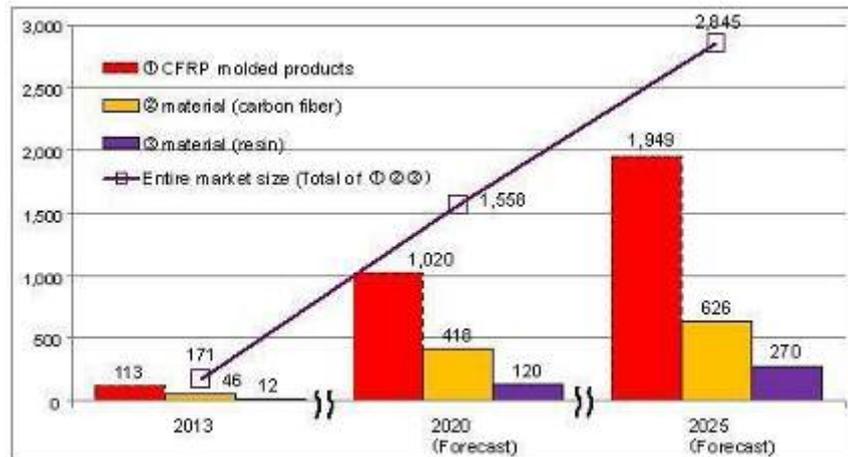
La prolongation de la durée de vie d'un produit ou d'une installation s'intègre complètement dans le contexte sociétal de développement durable. Cela signifie que les produits FRP seront remplacés moins rapidement, mais seront probablement aussi mis en œuvre dans des domaines d'applications totalement neufs, où importe une fonctionnalité consistante tout au long de la durée de vie.

Les producteurs de fibres, de résines et de polymères d'une part, et les constructeurs de machine et fournisseurs de technologies d'autre part, se rendent compte que d'autres développements sont nécessaires pour poursuivre l'expansion du marché des FRP.

Au Japon, on part du principe que le prix des composites à base de CFRTS (Carbon Fiber Reinforced Thermoset resin) diminuera, de 5000 à 6000 yens au kg en 2013, à 2000 - 3000 yens au kg en 2025, du fait de :

- temps de processus raccourcis,
- matières premières moins coûteuses,
- meilleur rendement de production.

Cette chute des prix aura toutefois pour effet un marché (automobile) bien plus vaste. Le graphique ci-dessous indique les conséquences d'une telle chute des prix.



4.2. Applications des FRP sur les marchés liés au transport et à la mobilité.

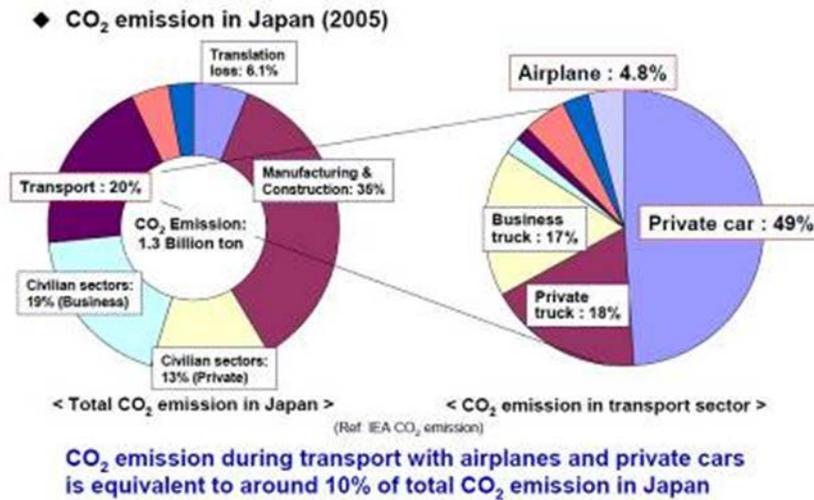
Le transport de personnes et de marchandises nécessite, outre des services spécifiques, de très nombreux « moyens » divers tels que :

- une infrastructure adéquate : routes, pistes cyclables, terrains d'aviation, chemins de fer, murs anti-bruit, ...
- moyens de transport : voitures, vélos, bus, trains, avions, téléphériques, ...
- moyens de communication : panneaux de signalisation, antennes GSM, ...
- autres matériels annexes : conteneurs, emballages de transport, ...

Dans quasiment tous les segments de marché peuvent être utilisés des matériaux et produits FRP, en exploitant les propriétés spécifiques de composites renforcés de fibres bien déterminés.

La mobilité et le transport sont toutefois des activités impactant assez fort l'environnement.

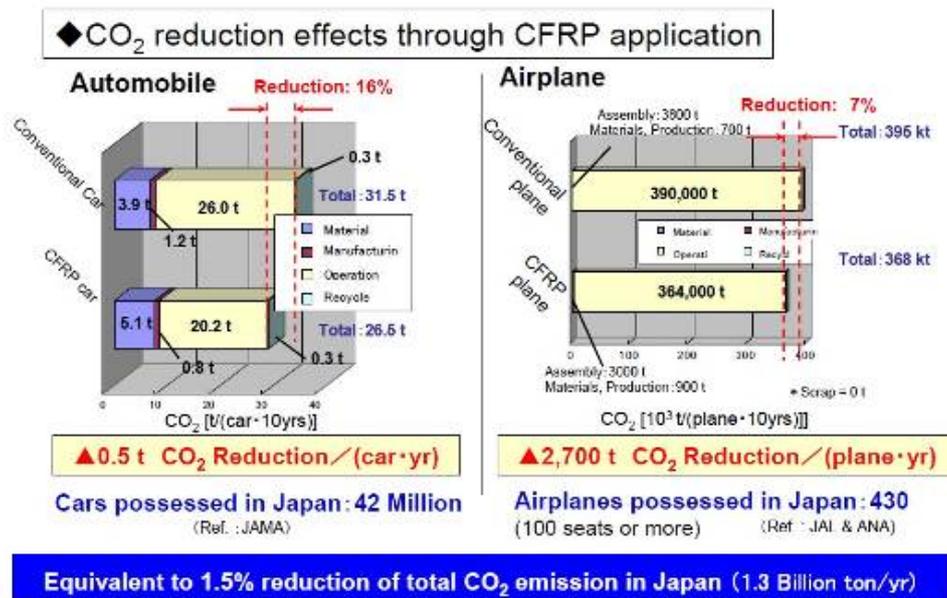
Les graphiques ci-dessous indiquent la part d'émissions de CO₂ générées par une série d'activités au Japon en 2005 ; ils ne donnent en fait pas la répartition actuelle, mais sont encore et toujours représentatifs pour illustrer le pourcentage d'importance de l'empreinte carbone de différents moyens de transport.



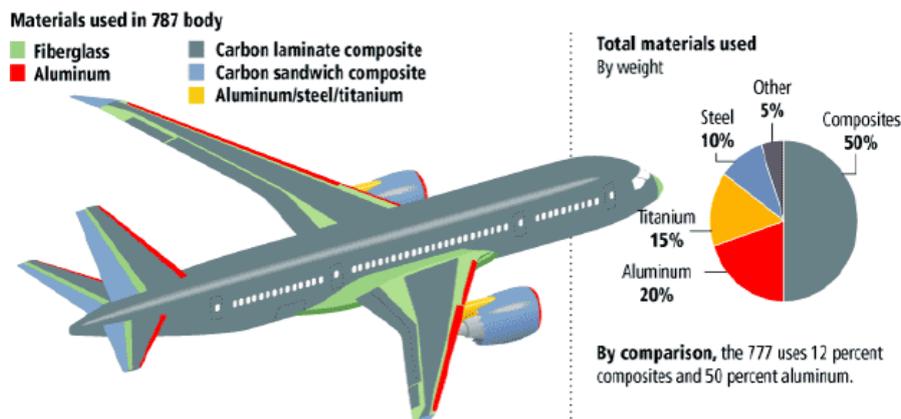
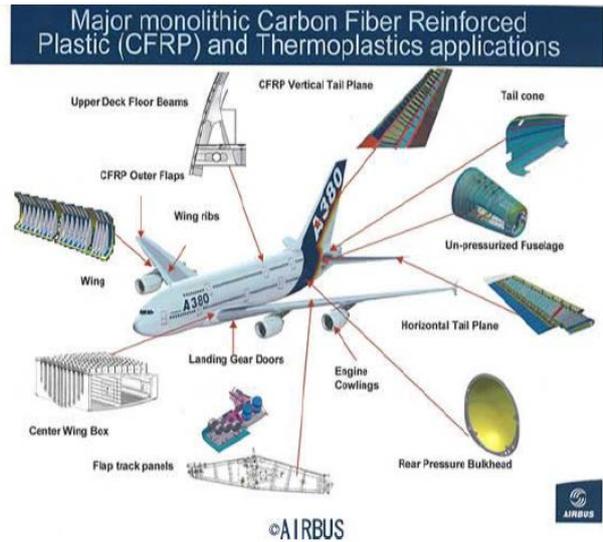
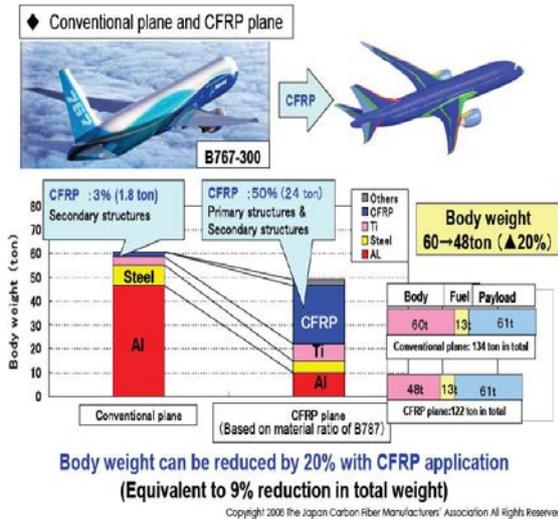
Dans le cadre d'un certain nombre de grands défis sociétaux tels que le climat, le développement durable, l'industrie pauvre en carbone, ... la volonté est de réduire l'impact environnemental des activités humaines. L'utilisation de matériaux et produits FRP peut y jouer un rôle important.

La réduction de poids des moyens de transport permet de limiter significativement la consommation de carburant de voitures ou d'avions, ainsi que les émissions de CO₂ qui y sont liées.

Les graphiques ci-dessous illustrent la réduction de CO₂ obtenue par la réduction du poids d'une voiture et d'un avion de catégories moyennes.



Les grands constructeurs aéronautiques Airbus et Boeing ont obtenu une assez forte réduction de poids en utilisant un maximum de CRP et d'autres composites pouvant être mis en œuvre dans des composants tant structurels que non structurels.



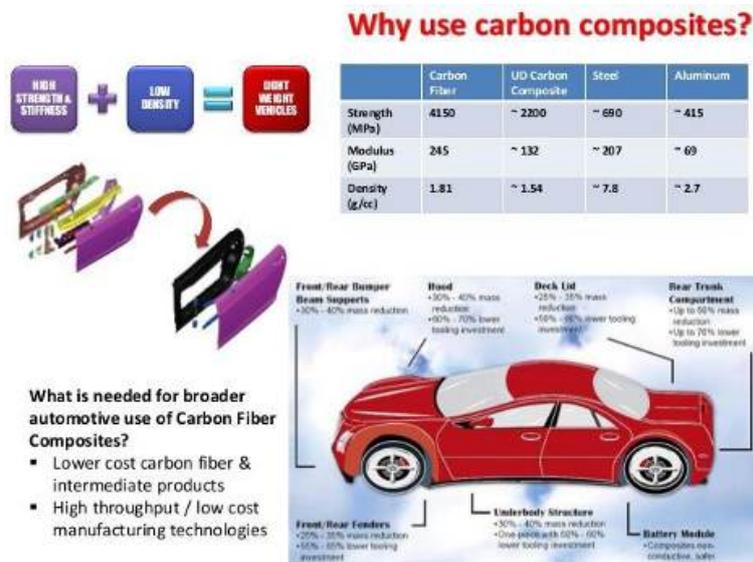
Un développement analogue peut être rapporté pour les automobiles, mais on constate en pratique que le poids des voitures n'a certainement pas diminué au fil des ans. Suite à l'introduction de moteurs plus puissants, de l'incorporation de divers systèmes ICT, de confort et de sécurité, le poids de quasiment tous les véhicules a même augmenté. Cette augmentation a pu être limitée en remplaçant des éléments métalliques non structurels par des produits FRP.

Voir la figure ci-dessous à titre d'illustration :

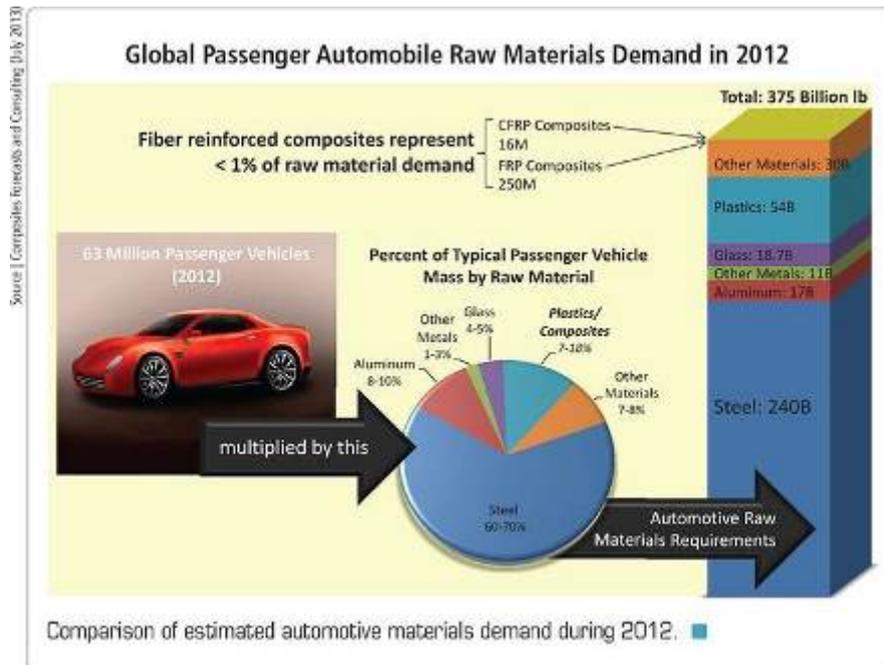


Si l'on parvenait à remplacer la carrosserie et d'autres éléments constructifs en métal et les composites GRP déjà utilisés en produits CRP, le poids pourrait dans ce cas être encore réduit.

Le schéma ci-dessous indique pourquoi des composites CRP peuvent remplacer divers métaux, et quels composants sont les mieux adaptés pour cela. Il est également rappelé que cette substitution n'est envisageable qu'en abaissant le prix des matières premières des composites, et en rendant le traitement de ces composites moins cher et plus rapide.



La part actuelle de FRP dans les voitures reste encore très modeste comparativement à d'autres matériaux (moins de 1% en 2012).



Les spécialistes de Fiat prétendent cependant que le grand défi ne constitue pas uniquement dans la mise en œuvre de composites structurels dans l'automobile, mais surtout de développer des composites dits « intelligents », qui pourraient reprendre un grand nombre de fonctions électriques, mécaniques et électroniques (qui sont jusqu'à présent assumées par des systèmes composites, lourds et complexes) ainsi qu'assurer la sécurité requise.

L'illustration ci-dessous montre quelques systèmes intelligents de contrôle et de mesure, qui sont actuellement mis en œuvre dans les voitures et qui peuvent peut-être être transformées en « composites intelligents » en combinant et en intégrant des matériaux intelligents (matériaux piézo-électriques, à mémoire de forme, ...) dans des composites renforcés de fibres.

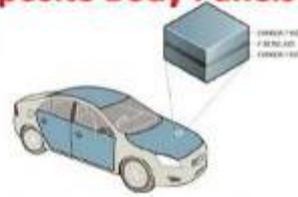
Il importe que l'on ne se focalise pas sur une seule caractéristique des composites polymères (par ex. le faible poids), mais que l'on s'efforce de maximiser également d'autres propriétés de composites renforcés de fibres spécifiques. Les CRP non seulement constituent des produits très résistants qui peuvent être utilisés dans des voitures de F1, elles peuvent aussi contribuer à réaliser d'autres fonctionnalités.

Un exemple d'un tel développement est le nouveau système de Volvo, dans lequel la carrosserie en CRP assume une fonction de batterie.

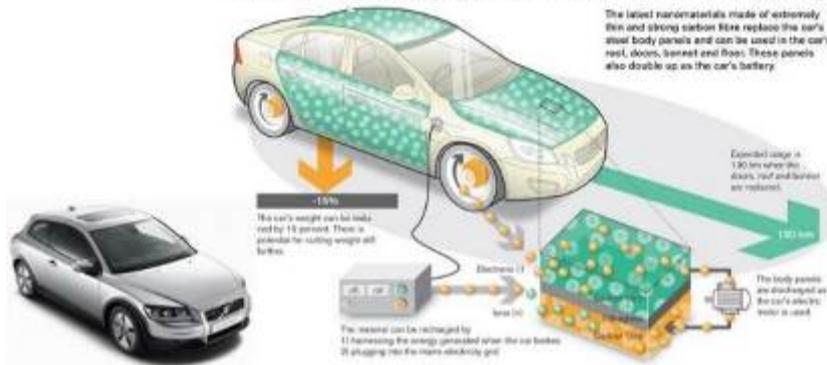
VOLVO : Batteries in Composite Body Panels

Volvo is developing a special composite material consisting of carbon fiber and polymer resin which will be –

- capable of storing and discharging electrical energy
- holding enough charge for 81 miles of electric driving
- and will recharge faster than the conventional EV batteries used today.



The car's body panels serve as a battery



Si l'on réussit, d'une manière économiquement sensée, à remplacer un grand nombre de métaux (une carrosserie complète ou des parties de celle-ci) par des matériaux FRP, il sera alors possible de pouvoir réduire encore davantage la consommation de carburant, et ce durant toute la vie du véhicule.



Mais du fait de cette substitution croissante des matériaux, l'application correcte de la directive européenne EOL-V (= End Of Life of Vehicles) deviendra de plus en plus ardue.

- Les techniques de recyclage existant à ce jour et très utilisées pour des véhicules déclassés, à savoir le broyage (shredding) et le tri par densité des morceaux obtenus, s'appuient en effet sur la très grande proportion de « métaux » présents, qui peuvent être aisément triés et recyclés (dans des fours).
- Si la transition des matériaux (du métal vers le composite) dans l'automobile se poursuit et s'intensifie dans les années à venir, la proportion de métaux se réduira énormément, suite à quoi l'ensemble du processus de recyclage devra être repensé.
- Le démontage et le regroupement aisés et économiquement réfléchis de composants CRP (qui constituent la source de fibres de carbone recyclées) au départ de véhicules EOL représentent un très grand défi.

Une approche similaire, s'appuyant sur le remplacement de matériaux lourds par d'autres plus légers, peut en effet s'appliquer également à d'autres moyens de transport (camions, bus, métros, trains, motos, vélos électriques, ...).

La mobilité et le transport ne sont pas uniquement une affaire de moyens de transport différenciés, mais également d'infrastructure et d'autres moyens. Des développements possibles de composites ayant trait à « l'infrastructure » seront expliqués plus en détail dans les applications de construction.

Nous voulons refermer ce chapitre sur la mobilité et le transport par quelques réflexions sur l'utilisation de FRP dans des conteneurs de petite et de grande taille, des camions citernes, des coffres et des palettes de transport.

Le rapport JRC 2013, « Review of industrial manufacturing capacity for FRP as prospective structural components in shipping containers », conclut que les FRP pour conteneurs maritimes ne peuvent rencontrer le succès qu'aux conditions suivantes :

- de nouveaux matériaux de matrice doivent être mis au point, moins chers, robustes, résistants à l'abrasion et aisés à recycler,
- les composites doivent pouvoir être reliés à des systèmes ICT d'une manière flexible et bon marché.

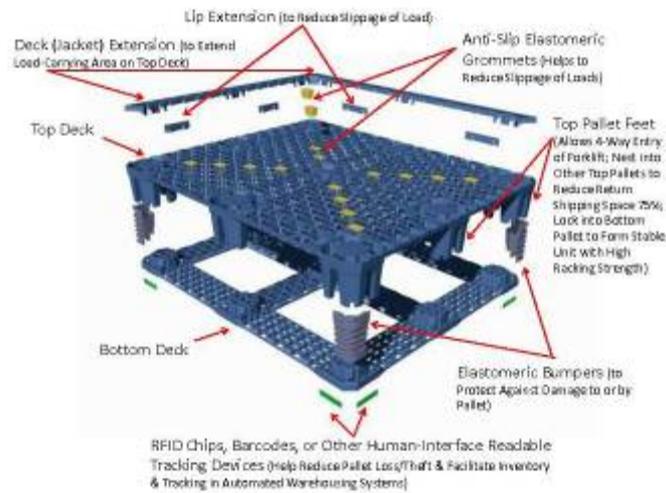
Nonobstant le fait que, selon nous, de nouvelles résines et fibres de renfort ne pourront pas constituer des thermosets qui seraient résistants à l'abrasion et recyclables, il existe de plus en plus de développements à base de FRP dans le domaine des conteneurs (maritimes).



Outre les développements possibles pour les conteneurs (maritimes), nous observons de plus en plus d'applications de FRP et de SRP (Self Reinforced plastics) dans l'aéronautique (flight cases, conteneurs à roues, ...) ainsi que dans des domaines d'application où des propriétés très spécifiques de FRP peuvent être exploitées : coffres anti-explosion pour le transport de munitions (à base d'aramide), réservoirs et bonbonnes sous pression pour le transport de gaz ou liquides corrosifs, conteneurs à blindage IEM, etc.

Du fait que les palettes classiques en bois sont assez lourdes ou peuvent être interdites dans certains secteurs ou pays en raison d'éventuels problèmes d'hygiène, des palettes plastiques sont de plus en plus utilisées. Sans renfort par fibres, les palettes en plastique pur se rompent facilement. Le procédé

classique de moulage par injection permet de produire des palettes de transport légères et multifonctionnelles, à base de FRP. Par des techniques d'IML (In Mould Labelling), certains dispositifs de communication (RFID, codes à barres, ...) peuvent y être intégrés sans aucun problème, ce qui permet par ailleurs aux palettes de transport renforcées de fibres de devenir « intelligentes » et de jouer un rôle actif dans notre économie digitalisée.

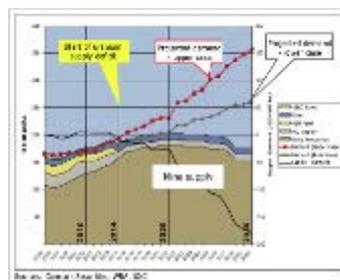
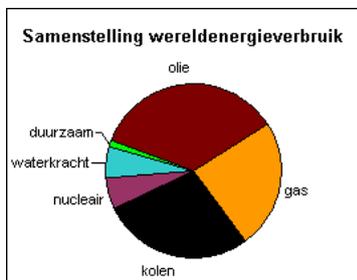


Si les prix des thermoplastiques à base de fibre de carbone continuent à baisser (suite à l'utilisation de fibre de carbone recyclée), on verra apparaître de plus en plus de plastiques qui seront renforcés par ces fibres plus légères.

4.3. Applications FRP dans des systèmes d'énergies renouvelables

L'énergie disponible et payable prend une place toujours plus grande dans une civilisation moderne. Nos systèmes de chauffage, les activités ménagères quotidiennes (cuire, laver, repasser, ...), la mobilité, la production industrielle, les examens médicaux, ... sont devenus très gourmands en énergie et déterminent dans une très grande mesure notre mode de vie et notre confort. Comme de plus en plus d'habitants de cette planète adoptent cette forme de vie en société moderne mais consommatrice d'énergie, l'approvisionnement en énergie devient un grand défi sociétal.

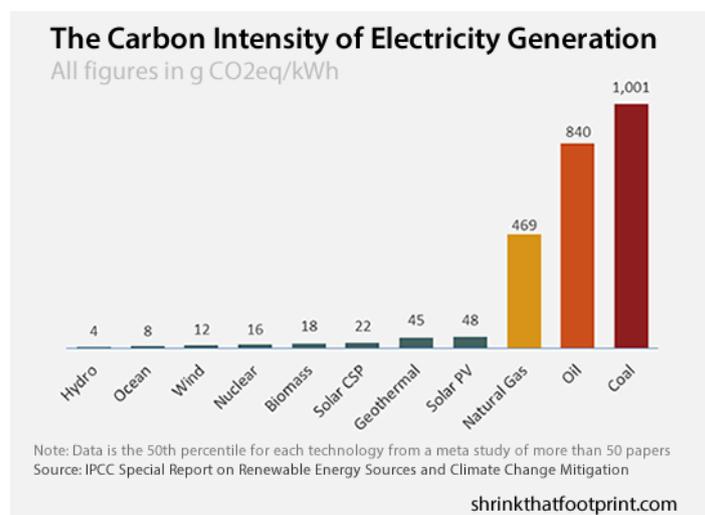
Une très grande partie de notre approvisionnement énergétique repose encore actuellement sur l'exploitation de sources d'énergies épuisables (combustibles fossiles : pétrole, gaz et charbon et énergie nucléaire).



Uranium : demande et réserves mondiales

réserves de pétrole connues

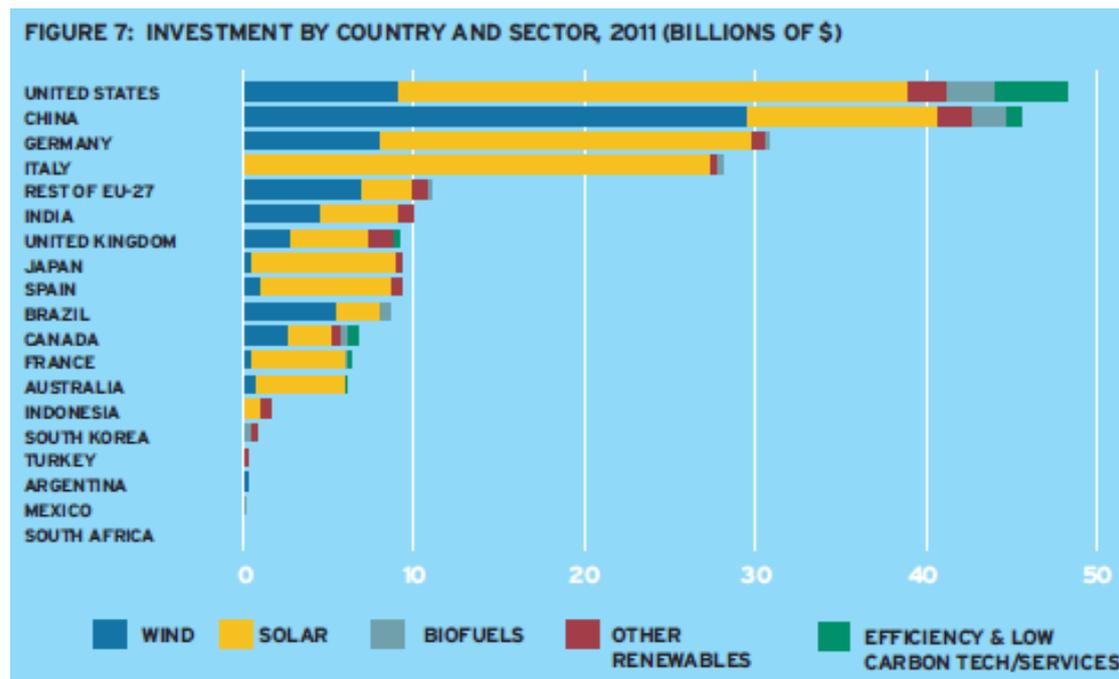
Si nous voulons assurer notre approvisionnement énergétique à terme ainsi que minimaliser les impacts environnementaux associés (tels que les émissions de CO₂ dans la production d'électricité) et les risques liés à la santé (particules fines, ...), nous devons passer (en masse) à des sources d'énergies renouvelables et à des processus peu gourmands en énergie.



Bien entendu, d'autres facteurs joueront un rôle important dans ce contexte énergétique : l'isolation des bâtiments, des transports publics fonctionnels, la récupération de la chaleur résiduelle, le recyclage des produits, etc.

Diverses alternatives durables existent, mais l'exploitation de sources d'énergies renouvelables est encore assez récente (moins de 30 ans) et nécessite d'importants investissements.

Ci-dessous sont illustrés les principaux investissements (en 2011) sur le plan des énergies renouvelables.



Non seulement les investissements dans des systèmes d'énergie renouvelable sont assez récents, mais la connaissance elle-même de très nombreuses technologies utilisées à cet effet et de systèmes est encore peu mature.

Sur plusieurs plans, il faut encore accumuler et partager beaucoup plus de connaissances et d'expérience. Cela s'avère nécessaire dans les domaines suivants :

- la construction de très grandes installations,
- l'optimisation d'installations existantes,
- la gestion et l'association de systèmes énergétiques différents,
- les activités de maintenance corrective et préventive,
- la rénovation et le démontage d'installations anciennes,
- le recyclage et la valorisation des matériaux utilisés dans ce cadre, etc.

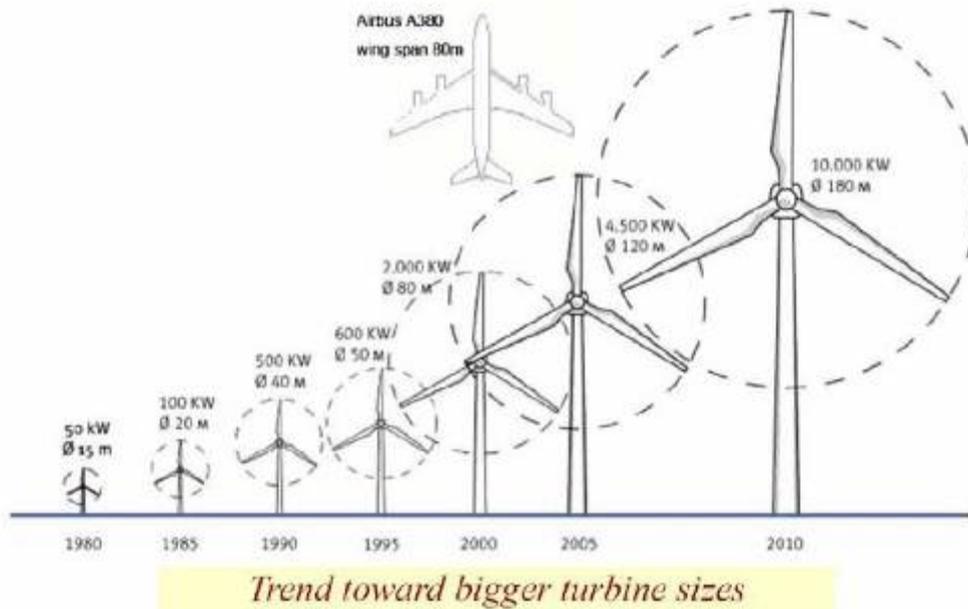
Du fait que de très nombreuses sources d'énergies alternatives nécessitent des matériaux non oxydables, légers, isolants, ..., l'utilisation de FRP s'avère opportune dans des systèmes d'énergie durable.

Nous examinerons plus en détail une série de systèmes d'énergies renouvelables, et adresserons surtout les opportunités pour les composites polymères renforcés de fibres.

(1) Énergie éolienne

Les premières éoliennes datent du début des années 80. Elles avaient un diamètre de rotor de +/- 15 m et délivraient une puissance relativement faible (50 à 100 kW). En 2013, les éoliennes avaient un diamètre de rotor moyen de +/- 100 m et délivraient une puissance de 2,5 MW. Une éolienne d'une puissance de 2 MW fournit en moyenne 4 millions de kWh par an, ce qui correspond à une consommation de +/- 1300 ménages. Cet accroissement du diamètre de rotor se poursuit clairement (voir les graphiques ci-dessous).

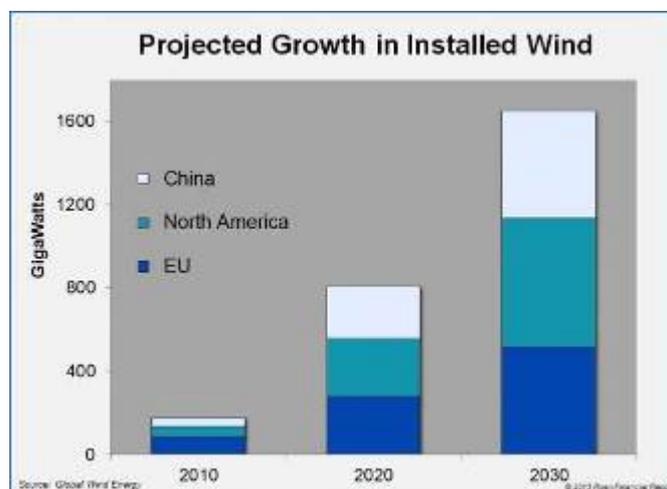




Cette évolution est logique, car la puissance fournie par des éoliennes classiques (à axe vertical et pales suspendues verticalement) est proportionnelle au carré du diamètre de rotor.

En 2013, la puissance éolienne totale dans le monde s'élevait à 320 GW. Une puissance de 35 MW provenait de nouvelles installations.

Global Wind Energy décrit l'évolution suivante pour l'énergie éolienne.



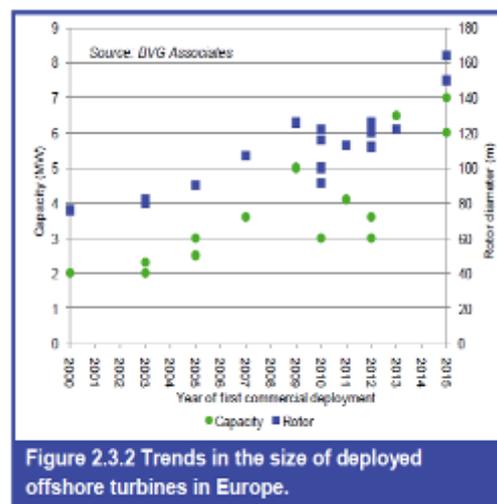
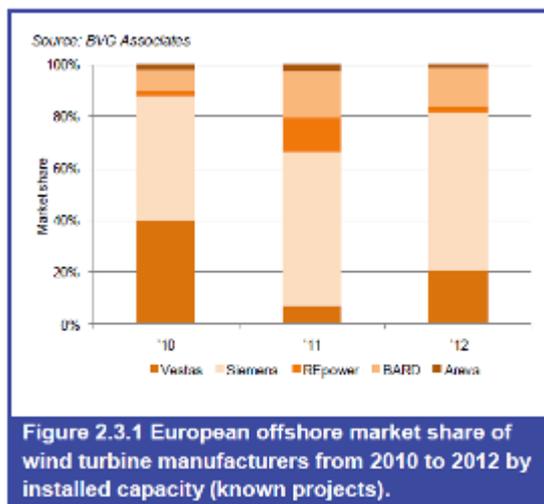
Pour disposer quasi en permanence d'une force de vent suffisante, de telles éoliennes sont de plus en plus construites en mer. Ce déplacement off-shore évite également la résistance présentée par les riverains lors de la construction d'éoliennes sur la terre ferme (pollution de l'horizon, effets d'ombres, ...).

Pour emmagasiner le courant non utilisé de parcs éoliens off-shore, il est possible de pomper de l'eau dans un énorme réservoir ou lac de retenue (comme cela était prévu dans l'atoll énergétique projeté à De Haan, mais n'a pas pu être réalisé pour des raisons politiques). L'énergie potentielle de l'eau pompée peut alors être reconvertie en électricité en cas d'absence de vent.

Une alternative pour emmagasiner l'énergie éolienne excédentaire dans de tels îlots énergétiques est de pomper de l'eau hors de réservoirs de stockage se trouvant à une profondeur de 400 à 800 m. Lorsqu'il y a une demande d'énergie, de l'eau est admise dans ces réservoirs de stockage en ouvrant une vanne ; l'eau s'écoulant fait tourner une turbine produisant de l'électricité. La profondeur de 400 à 800 m est nécessaire pour obtenir une pression suffisante de l'eau sur la turbine. L'avantage d'un tel système est qu'il est aisé de placer un réservoir supplémentaire, seul de l'air étant nécessaire pour apporter ou expulser l'eau.

L'accroissement des dimensions des éoliennes (off-shore pour la plupart) a par ailleurs différentes conséquences directes.

- Le nombre d'entreprises qui peuvent encore construire des éoliennes off-shore se réduit de plus en plus. Le marché européen de l'énergie éolienne off-shore est à ce jour dominé par Vestas Wind Systems et Siemens Wind Power, qui ont réalisé à elles deux près de 90% de la puissance installée. D'autres acteurs européens sont REpower, Bard et Areva.



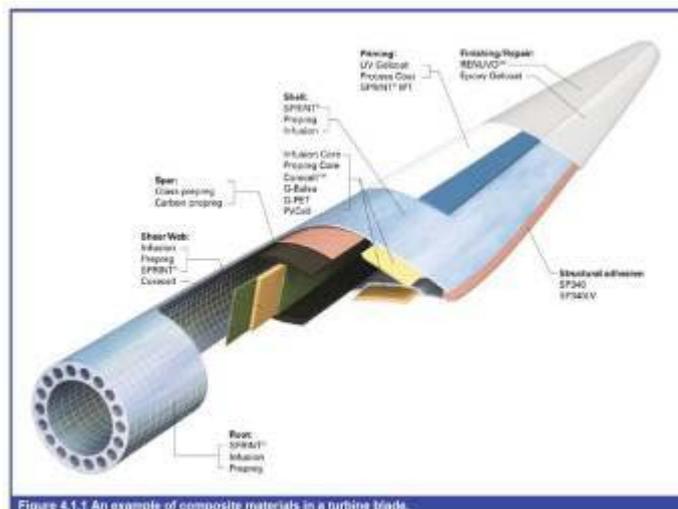
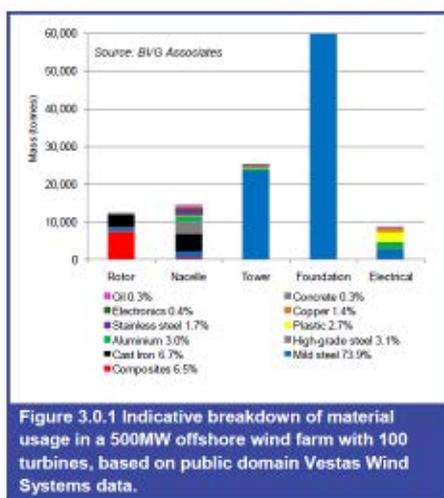
- Une autre conséquence de l'évolution des dimensions des pales d'éoliennes est que le renfort en fibre de verre doit être complété par des renforts en fibre de carbone et en fibre d'aramide, ainsi que par des matériaux d'âme plus performants.
- Les techniques de production (surtout la technologie par infusion et la technologie des prépregs) et l'infrastructure doivent elles aussi être réétudiées, afin de produire des pales d'éoliennes très longues (plus de 60 m de longueur) de manière économiquement et

écologiquement réfléchi. La minimalisation des « voids » au sein ces très grandes surfaces, l'homogénéisation et le durcissement rapide des résines de thermoset constituent dans ce cadre d'importants défis.

- Le transport et le montage de pales d'une telle longueur exigent également d'autres procédures et méthodes de travail.

Si le marché off-shore continue à s'étendre, il deviendra nécessaire d'assurer la production au sein d'entreprises situées sur les côtes. Une grande partie des dégâts subis est en effet occasionnée par le transport par route de ces très longues pales. On peut se demander si la réalisation de produits off-shore très volumineux ne devrait pas le cas échéant avoir lieu sur des navires qui seraient équipés à cet effet.

Ci-dessous sont illustrés les besoins en matériaux des différents composants d'une turbine éolienne, ainsi que la structure d'une pale contenant un grand nombre de composants FRP.



Dans les futurs développements des rotors et des pales (« blades ») principalement, le recours à différents matériaux FRP et d'âme s'avère essentiel.

Les améliorations de matériau souhaitées pour les éléments d'éoliennes se situent, selon une étude de BVG Associates réalisée en juin 2011, sur les plans suivants :

1. Protection de la structure de la pale et de ses propriétés mécaniques contre les coups de foudre, et ce en intégrant des conducteurs électriques dans les pales d'éoliennes. Les dégâts de la foudre sont une cause importante de mise hors service d'installations, ou de rendement trop faible. Certaines installations disposent d'un système de surveillance pour comptabiliser le nombre de coups de foudre.



2. Intégration de dispositifs de mesure dans le matériau composite, rendant possible la surveillance en ligne de la tension et des impacts. Les éoliennes ont en principe une durée de vie minimale de 20 ans. Durant ce cycle de vie, on attend le rendement souhaité et des frais d'entretien minimum.
3. Systèmes de détection permettant de déceler plus rapidement d'éventuels dommages subis au niveau des composants, et intégration possible de systèmes « auto-healing » permettant une réparation automatique des dégradations (ci-dessous un exemple de résine époxy auto-réparatrice).



4. Invisibilité aux ondes radar. Des parcs éoliens peuvent perturber les communications d'avions (civils et militaires) qui les survolent. Rendre les éoliennes invisibles aux ondes radar, d'une manière économiquement réfléchie, constitue dès lors un défi.

(2) FRP dans les systèmes d'énergie solaire

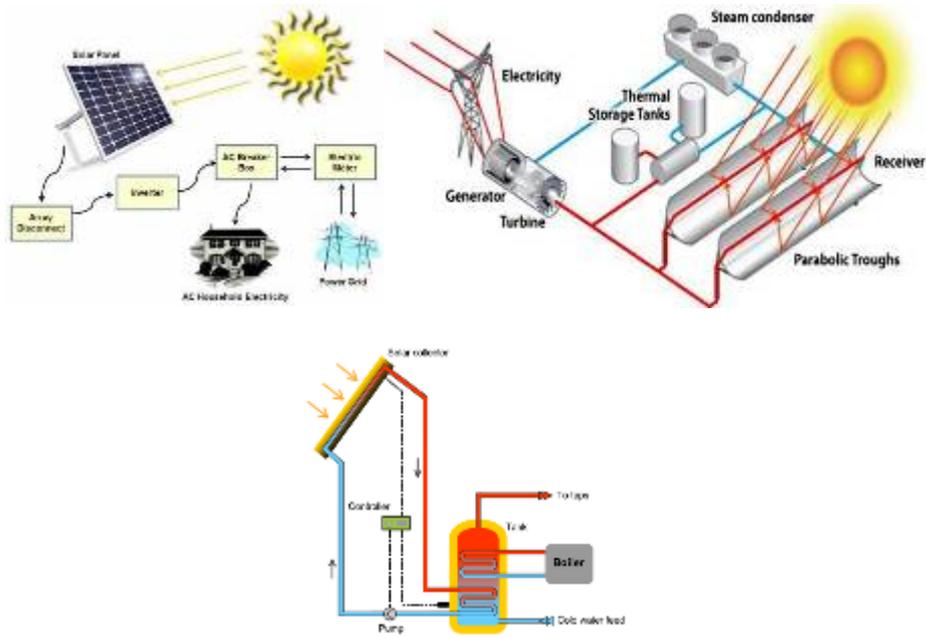
Dans la plupart des pays, les investissements (subsidés) dans l'énergie solaire ont été ou sont plus importants que pour l'énergie éolienne.

Les systèmes de production d'énergie solaire peuvent être en principe subdivisés en :

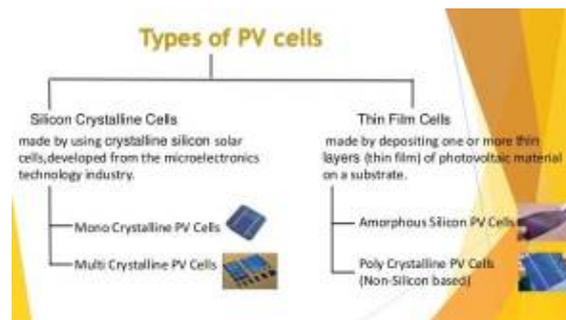
- Panneaux solaires : des panneaux PV (PhotoVoltaïques) et PVT (PhotoVoltaïques Thermiques) qui font appel à ces cellules solaires pour transformer en électricité l'énergie solaire (le rayonnement). Contrairement à un panneau PV, un panneau PVT fournit également de la chaleur.
- Centrales électriques thermosolaires : de la chaleur est générée par la focalisation ou la concentration de la lumière du soleil. Cette chaleur est transférée à un liquide (eau ou huile thermique), produisant ainsi de la vapeur. Cette vapeur entraîne une turbine à vapeur, qui produit elle de l'électricité. De tels systèmes sont (ou seront) surtout présents dans le sud de l'Europe et dans le nord de l'Afrique.

- Toiture thermique (chauffe-eau solaires) : les rayons du soleil sont captés et servent à chauffer de l'eau. Cette eau circule via un échangeur de chaleur et une pompe.

Ces différents systèmes peuvent être présentés schématiquement comme décrit ci-après.

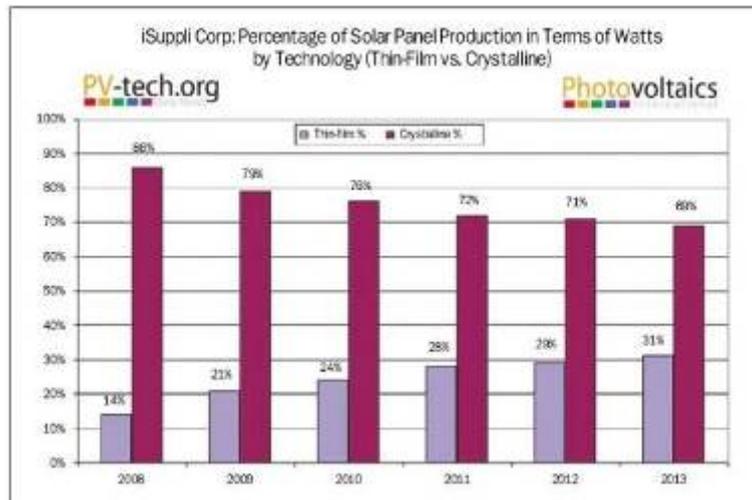


Les panneaux solaires sont les systèmes les plus connus et mis en œuvre. Les systèmes PV qui transforment en électricité les rayons du soleil peuvent être à leur tour subdivisés selon la technologie des cellules cristallines au silicium et de celle de la couche mince (plusieurs possibilités existent au sein de chaque type, avec certains avantages et désavantages).



	Bulk type / Water-based (Crystalline)		
	Mono-crystalline Si	Poly-crystalline Si	Poly-crystalline band
Pros	• High efficiency	• High efficiency with respect to price	
Cons	• increased manufacturing cost caused by the supply shortage silicon		
Thin-film type			
	Amorphous Si	CdS	CdTe
			Polymer organic
Pros		• Low price	• Low manufacturing
Cons	• Low price	• Able to automate a lot manufacturing process	• Can be more efficient (still in research)
	• Low efficiency		• Low efficiency

Les systèmes de technologie à couche mince sont moins performants mais bien moins coûteux, et se répandent dès lors beaucoup plus. Ces systèmes à couche mince (pellicule souple) peuvent aisément être combinés et intégrés dans d'autres matériaux.



Des composites renforcés de fibres peuvent être mis en œuvre dans la plupart des systèmes d'énergie solaire existants à ce jour.

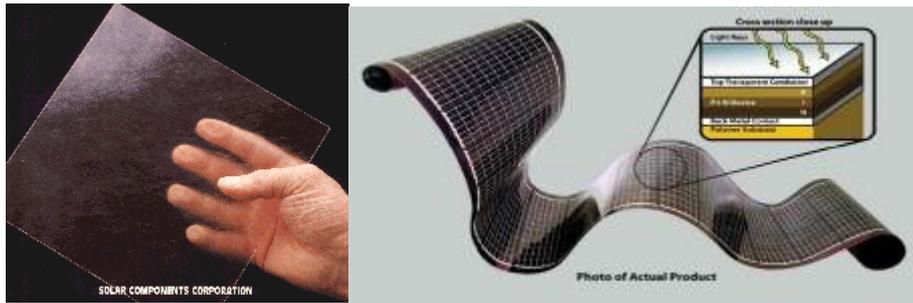
Les panneaux PV et PVT ainsi que les chauffe-eau solaires peuvent être incorporés à des profilés légers en FRP (voir photo ci-dessous), ce qui permet de réduire la charge sur la toiture.



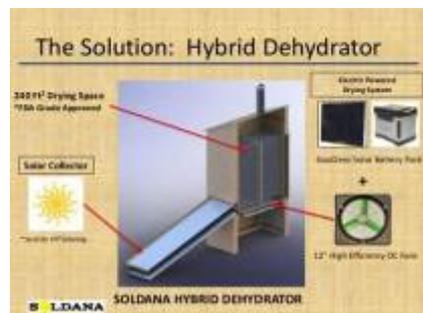
Dans les structures porteuses en composite peuvent également être aisément intégrés des éléments de mousse à isolation thermique (des matériaux d'âme qui sont également utilisés pour augmenter la résistance à la flexion des FRP), ce qui permet aux systèmes d'énergie solaire de fonctionner avec un rendement encore plus élevé.

Les composites GRP, résistants à la corrosion, conviennent très bien pour des chauffe-eau solaires. Les tubes et les cuves de stockage réalisés en matériau composite sont en plus résistants à l'eau (très chaude et souvent corrosive).

Il existe également des panneaux en GRP légers, robustes, résistants aux rayures, flexibles et transparents (par ex. Sun-lite®HP), qui peuvent être utilisés dans des systèmes de panneaux solaires assez bon marché, combinés avec une fine pellicule imprimée de cellules solaires.



Les cellules solaires flexibles peuvent également être intégrées dans différentes couvertures de toit réalisées à base de composites (par ex. des panneaux de toiture) ou dans d'autres systèmes (par ex. dans un système Hybrid Dehydrator permettant notamment de sécher des fruits et qui pourrait être utilisé dans des pays en voie de développement).



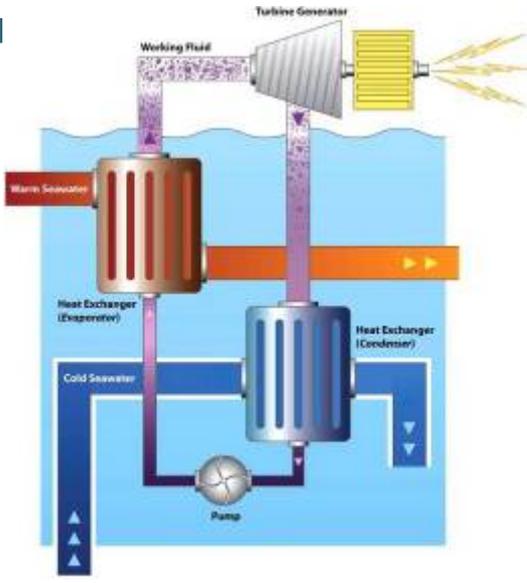
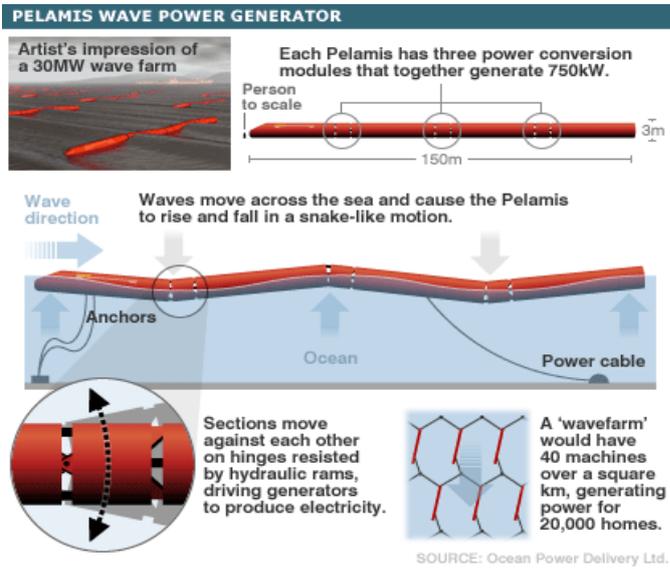
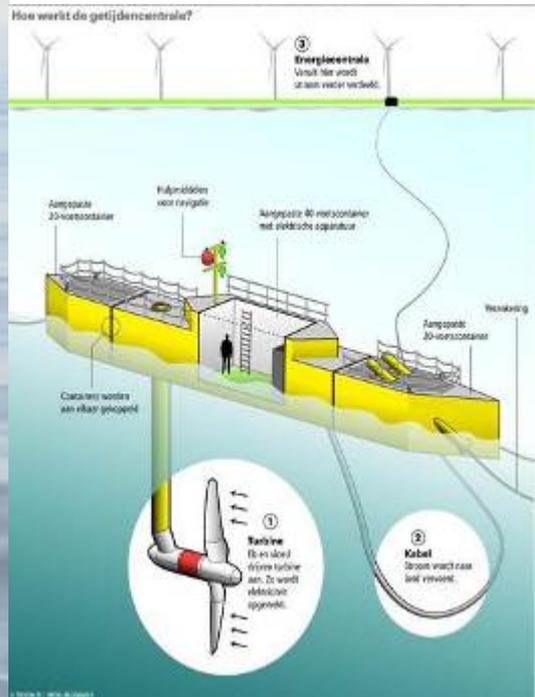
(3) FRP et exploitation de l'énergie maritime

Les mers et les océans contiennent également une grande quantité d'énergie intrinsèque, qui peut être exploitée à l'aide d'installations spécifiques.

Citons comme exemples

- les centrales marémotrices : l'énergie potentielle associée à la différence de niveau de la mer entre flux et reflux est transformée en électricité ; plus cette différence est grande, plus la centrale est économique
- les centrales houlomotrices : transformation en électricité du mouvement de va-et-vient des vagues

- Les centrales océanographiques (OTEC) : exploitation des écarts de température de l'eau de mer à différentes profondeurs



En raison des forces importantes qui règnent en mer (tempêtes) et de l'influence de l'eau de mer, les systèmes flottants (off-shore) peuvent être endommagés.

Les composites polymères renforcés de fibres, qui sont plus robustes que l'acier et qui résistent mieux à la corrosion, sont donc des matériaux très adaptés pour une application dans de telles centrales, canalisations, etc.

4.4. FRP dans les ouvrages de génie civil, les matériaux et produits de construction

Les ouvrages de génie civil n'ont pas seulement trait aux bâtiments privés ou publics, mais également à divers travaux d'infrastructure : viaducs, autoroutes, ponts, parkings, ports, canalisations, etc.

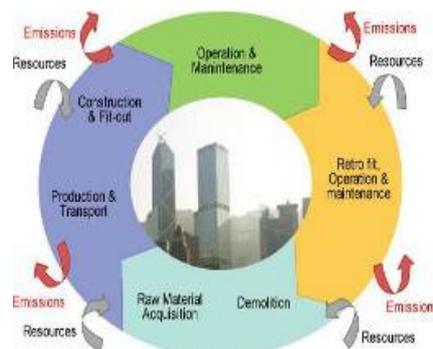
Le marché de la construction, dans son sens large, constitue depuis des années un débouché important pour les plastiques renforcés de fibres, mais du fait d'une connaissance insuffisante de l'univers des composites, leur utilisation reste encore relativement limitée en comparaison d'autres matériaux, tant en volume et en chiffre d'affaires que pour l'application de certains types de composites (GRP, CRP, WPC, ...).

Pour énumérer les applications possibles des composites polymères renforcés de fibres dans la construction, nous vous renvoyons aux sites web suivants :

- <http://compositebuild.com/inform/> : ce site web a été spécialement développé pour apprendre aux architectes, auteurs de projet et entreprises de construction les différents domaines d'application et possibilités des composites dans le secteur de la construction, ainsi que pour indiquer une série d'acteurs qui possèdent une expertise dans ces domaines, peuvent fournir des produits spécifiques ou prendre en charge certaines activités de construction. Des composites sont utilisés dans des applications aussi bien intérieures qu'extérieures.
- <http://compositesandarchitecture.com/> : ce site web constitue une source d'inspiration pour les architectes et auteurs de projet qui souhaitent réaliser des constructions, produits de construction ou mobilier à base de composites.

Il est important que l'on présente comme des atouts les propriétés spécifiques des matériaux ainsi que les aspects durables des produits FRP dans des applications de construction.

Dans ce contexte, la durabilité ne peut cependant pas concerner uniquement la production d'un produit de construction ou d'un ouvrage de génie civil ; elle doit certainement aussi être considérée vis-à-vis des différentes activités (voir le graphique ci-dessous) qui interviennent pendant toute la durée de vie d'un produit ou d'une construction.



Il est évident que des matériaux composites plus légers induiront beaucoup moins d'émissions lors de leur transport et exigeront de l'équipement beaucoup moins lourd (grues, chariots élévateurs, ...) pour les assembler en toute sécurité. Mais ce sont surtout la résistance à la corrosion des composites polymères et les économies d'énergie possibles qu'ils permettent de réaliser qui méritent une attention particulière.

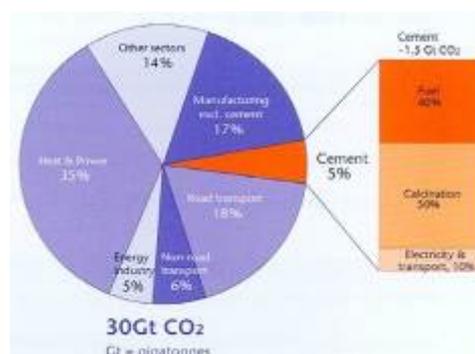
Nous ne voulons certes pas affirmer que des matériaux polymères renforcés de fibres pourraient partout et toujours remplacer le matériau de construction le plus répandu, notamment le béton (armé) de manière économiquement raisonnée ; par contre, en se focalisant sur une série d'opportunités de marché, nous voulons illustrer et/ou expliquer plus en détail un éventail d'éléments spécifiques ou de thèmes.

(1) Érosion et corrosion du béton

Matériau de construction intéressant, le béton est depuis très longtemps utilisé. Tous ensemble (= la population mondiale totale), nous utilisons annuellement +/- 3 tonnes de béton par individu (enfants compris).

Les principaux atouts du béton sont sa grande résistance à la pression et son faible coût. Certains aspects doivent toutefois aussi être pris en compte :

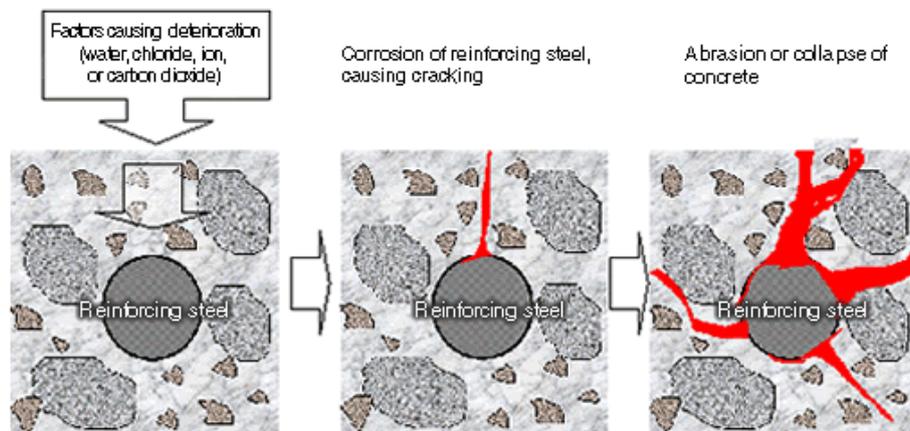
- a. La production de ciment (le liant du béton) génère énormément d'émissions de CO₂. 5% des émissions de CO₂ au niveau mondial sont directement liés à la production de ciment. Par tonne de ciment est émise +/- 1 tonne de CO₂ (40% pour le chauffage nécessaire, 50% suite à la réaction chimique libérant du CO₂ et 10% pour les besoins de transport).



- b. Au cours de sa vie, le béton se charge à nouveau de CO₂, ce qui l'amènera finalement à perdre ses propriétés de résistance. Les normes et exigences de construction, applicables lors de la conception de constructions en béton, se basent sur une durée de vie estimée (période de référence) de 50 ans, à condition que les travaux d'entretien courant soient réalisés. Après environ 100 ans, 86% du béton aura été carbonaté, le réduisant en poudre (cimentage). L'application d'une membrane de plastique CPF (Controlled Permeable

Formwork – chemises) sur les flancs intérieurs du coffrage vertical du béton permet d'allonger cette durée de vie. De telles chemises, ralentissant la dégradation, sont surtout utilisées dans les constructions en béton des centrales nucléaires.

- c. En raison de cette faiblesse ou fragilité et de sa faible résistance à la traction, le béton doit très souvent être renforcé. Pour l'armature du béton est principalement utilisé de l'acier, un matériau fonctionnel et relativement bon marché. Mais cette armature en acier est sensible à la corrosion. Les sels, les produits chimiques mordants et l'humidité accélèrent l'oxydation de l'acier, ce qui aboutit finalement à la démolition totale de l'ouvrage de construction.



Les revêtements et l'utilisation de types d'acier spéciaux peuvent ralentir le processus de corrosion des armatures métalliques, mais pas l'éviter totalement. De plus, les armatures revêtues et les types d'acier spéciaux sont assez chers (une armature métallique enduite d'époxy coûte +/- 25% de plus, l'acier galvanisé +/- 50% et une armature en inox +/- 700% de plus qu'un acier d'armature normal).

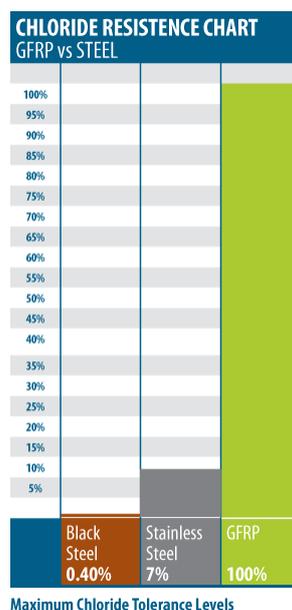
- d. 40% de l'érosion du béton est causée par la corrosion de l'armature métallique. Mais des substances chimiques (pluies acides, sels, l'ammonium et sels de magnésium, ...) peuvent également attaquer le béton. Le béton est en effet un matériau alcalin, très sensible dès lors à l'effet des acides (acide sulfurique, acide azoteux, acide phosphorique, acide acétique, acide lactique, ...). L'acide réagit avec les liaisons de calcium présentes dans le béton, ce qui provoque la formation de sels de calcium. Si l'acide reste suffisamment en mouvement, de sorte que les sels soient continuellement évacués, l'agression sera toujours repoussée. L'acide sulfurique est connu pour être une des principales sources de dégradation. Les constructions enterrées en béton peuvent ainsi être attaquées par les eaux souterraines qui contiennent naturellement ces substances (suite à l'oxydation de minéraux tels que la pyrite) ou par le dépôt de déchets chimiques industriels. Dans les égouts également, il faut faire face à des phénomènes complexes de dégradation, l'eau résiduaire contenant notamment des liaisons de soufre et des bactéries dissociant les sulfates, qui transforment ces liaisons en

sulfure d'hydrogène (H₂S). Celui-ci est libéré de l'eau résiduaire sous forme de gaz, et peut ensuite être oxydé par d'autres bactéries et transformé en acide sulfurique (H₂SO₄) qui attaque le béton. Ce phénomène est désigné sous le nom de « dégradation bactérienne par les acides ». Il se produit sur la partie supérieure des égouts. La profondeur de la dégradation peut atteindre 6 à 12 mm par an.

- e. Mais une simple infiltration d'eau peut elle aussi attaquer le béton. Lorsque de l'eau infiltrée gèle, la dilatation de la glace formée agrandira les micro-crevasses qui vont saper la robustesse de la construction en béton.
- f. La corrosion induit des coûts répétitifs et assez élevés. Une récente étude de la US Federal Highway Administration indique que 2,5% du PNB (+/- 300 milliards USD/an) doit être considéré comme le « coût de la corrosion » du métal et des armatures métalliques du béton. Les coûts directs annuels de la réparation de problèmes de corrosion des ponts autoroutiers s'élèveraient à 8,3 milliards USD, dont 3,8 milliards pour le remplacement de ponts devenus dangereux, 4 milliards pour l'entretien des ponts en béton et revêtements, et 0,5 milliard pour la peinture et l'entretien des ponts métalliques. Les coûts indirects résultant des embouteillages provoqués par les activités de remplacement et de réparation ci-dessus et par la perte de productivité associée seraient 10x plus élevés.

Les problèmes de corrosion liés aux armatures métalliques peuvent être évités en remplaçant ces armatures par des matériaux de renfort en polymères renforcés de fibres, qui ne connaissent pas ce problème de corrosion.

À titre d'illustration, ci-dessous la capacité de résistance de divers systèmes d'armature du béton vis-à-vis de sels de chlorure.



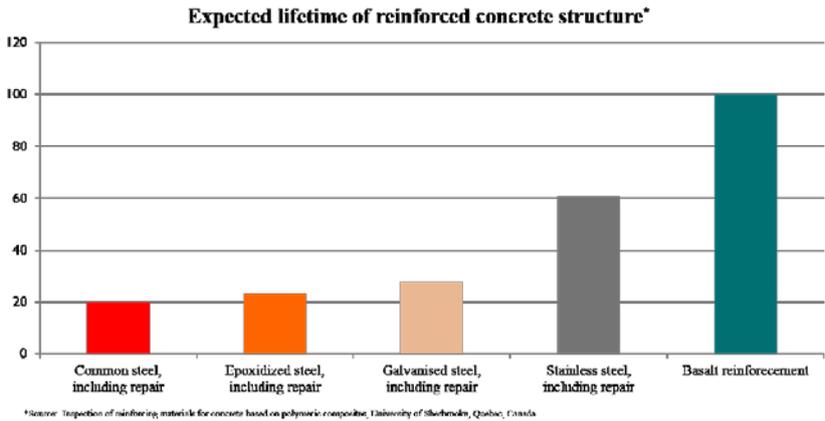
Les tiges de renfort du béton à base de verre (verre E et S), fibres de basalte, d'aramide et de carbone, ne sont pas seulement résistantes à la corrosion, elles sont également beaucoup plus résistantes que les armatures classiques en acier.



Completed in 2010, the 18th Street Bridge over the Assiniboine River in Brandon, Manitoba, Canada,

GFRP rebar was the choice for the Miami-Dade MetroRail project, a 4-km elevated "heavy" rail people mover that carries passengers (and luggage) from the Miami International Airport (Miami, Fla.) to the city's intermodal center.

En outre, les tiges d'armature en FRP pèsent à peine 1/3 à 1/5e d'une tige analogue en acier du même diamètre (ce qui permet par ailleurs d'économiser beaucoup de carburant lors du transport) et ont une durée de vie supérieure à 100 ans, ce qui est clairement plus longue que celle des armatures à base d'acier.

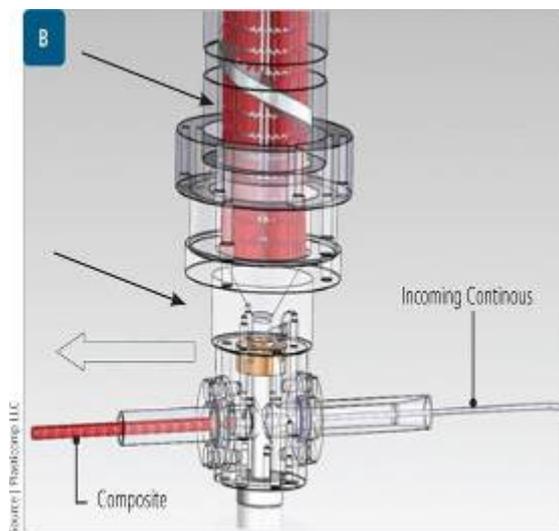
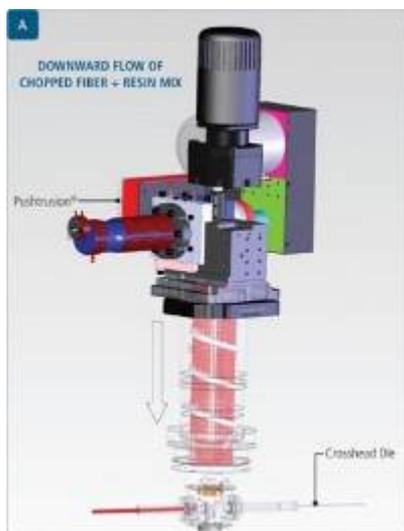


De tels systèmes d'armature renforcés de fibres sont essentiellement réalisés par des techniques de pultrusion. Les systèmes FRP d'armature du béton peuvent, par cette technique de production, recevoir également une âme creuse (voir photo ci-dessous), ce qui permet encore de faire passer des câbles électriques à travers ce type d'armature.



Certains producteurs ont mis au point de nouvelles méthodes de production afin de combiner le processus de pultrusion (au départ de fibres continues) avec un système d'injection dans lequel des fibres courtes et de la résine sont injectées autour de la tige ou du tube pultrudé. Ci-dessous une illustration de cette technologie de « push-trusion » mise au point par Plasticomp LLC's (Winona, Minn.).

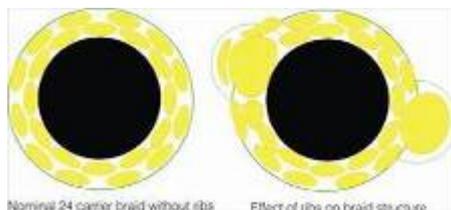
Certains producteurs ont mis au point de nouvelles méthodes de production afin de combiner le processus de pultrusion (au départ de fibres continues) avec un système d'injection dans lequel des fibres courtes et de la résine sont injectées autour de la tige ou du tube pultrudé. Ci-dessous une illustration de cette technologie de « push-trusion » mise au point par Plasticomp LLC's (Winona, Minn.).



En Italie, on promeut la fibre de basalte comme matériau d'armature pour les constructions en béton. L'absence de corrosion, le pouvoir isolant thermique et acoustique et la stabilité élevée lors de secousses sismiques constituent des atouts importants d'une armature en basalte, tout comme l'économie d'énergie pouvant résulter du remplacement de tiges métalliques de renfort du béton par des tiges d'armature pultrudées en basalte/époxy, qui ne pèsent que 1/3 de celles en métal.

L'économie d'énergie pourrait atteindre, selon une étude de l'ENEA, 9,12 kWh au kg. Si l'on remplaçait en Italie 5% par du basalte le métal présent dans les constructions en béton armé, on épargnerait 4 millions de MWh par an au niveau énergétique, ce qui correspond à une réduction de CO2 de 775 000 tonnes par an.

Outre les produits GFRP et BFRP classiques, il existe également des systèmes d'armature hybrides à base d'aramide et de fibres de carbone. Dans ces systèmes, des fibres de carbone rigides et résistantes sont incorporées comme matériau d'âme dans une structure de gaine non élastique mais déformable, à base de fils d'aramide ultrarésistants. De tels systèmes de renforts hybrides « ductiles » (D-H-FRP) peuvent supporter une déformation plus grande à leur capacité de charge maximale ; les constructions en béton armées de telle façon ne s'écrouleront dès lors pas immédiatement en cas de sollicitation extrême.

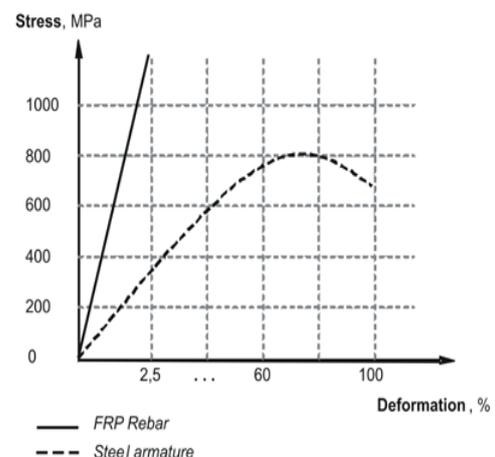


Les systèmes à armature en FRP et en acier possèdent également des propriétés de résistance thermique et mécanique très différentes ; le passage d'une armature acier à une armature FRP autorise dès lors des constructions en béton qui se déformeront moins en cas de sollicitations tant thermiques que mécaniques.

Coefficient of Thermal Expansion

Material	CTE (10^{-6} °F)	
	Longitudinal Direction	Transverse
Concrete	4 - 6	4 - 6
Steel	6.5	6.5
GFRP	3.5 - 5.6	12
CFRP	-4 ~ 0	41 - 58
AFRP	-3.3 ~ -1.1	33 - 44

* Values of CTE differ between FRP materials and concrete.



Les composites polymères renforcés de fibres ne sont pas seulement adaptés à l'armement de béton neuf, ils peuvent également être utilisés pour la réparation de canalisations d'égout et de constructions en béton érodées (cheminées industrielles, viaducs, caves d'immeubles, etc.).



Les systèmes de réparation à base de composites, destinés à des canalisations d'égouts, évitent de devoir ouvrir des rues. Cela se produit surtout dans de grandes villes, où l'ouverture de rues ne provoque pas uniquement de gros problèmes d'embouteillage mais peut également endommager d'autres systèmes d'infrastructure (conduits pour câbles, conduites de gaz, ...).

Pour pouvoir réaliser cela aisément, il existe des tubes en textile à base de fibre de verre souple, qui sont imprégnés de résines réactives, peuvent être tirés à travers les canalisations d'égout existantes présentant des fuites, et peuvent alors durcir après placement via une injection de vapeur en s'adaptant autant que possible aux canalisations en béton existantes mais dégradées. Il existe également des structures textiles spéciales et compartimentées, qui constituent après durcissement des conduites de « tubes encastrés » (voir photo ci-dessus) ; ceci permet non seulement un écoulement des eaux usées, mais crée également un conduit pour y tirer des gaines ou câbles supplémentaires.

(2) Aspects durables de bâtiments et d'activités de construction

Bien que le thème « construction durable » ne puisse pas être limité à sa dimension écologique, on ne peut nier que l'activité constructive a un impact important sur l'environnement :

- a. Le secteur de la construction (en ce compris la production des matériaux constructifs) est en effet responsable d'environ 50% de la consommation mondiale de matières premières. Au Royaume-Uni, la construction est le plus gros consommateur de matières premières naturelles, avec une consommation annuelle de matériaux de 400 000 tonnes, et est responsable de 10% des émissions de CO₂ en Grande-Bretagne (source : Invest 2010).
- b. En Belgique, le chauffage et l'éclairage des bâtiments représentent 42% de la consommation énergétique totale. Une étude suédoise de 2002 relative à la consommation énergétique de bâtiments basse énergie indique que l'énergie intrinsèque initiale présente dans un logement familial correspond à 40% de la consommation énergétique totale sur 50 ans. Rawlinson & Weight (2007) estiment que l'énergie intrinsèque d'un bâtiment commercial au Royaume-Uni est 30 fois supérieure à la consommation énergétique annuelle. Sturgis & Roberts (2010) ont

suggéré que l'énergie intrinsèque dans un espace commercial est égale à 45% du contenu carbone total de la structure constructive, calculée sur toute la durée de vie de cette structure.

- c. Le secteur de la construction est un gros producteur de déchets (de construction et de démolition). Au Royaume-Uni en 2009, la construction a été responsable de 120 millions de tonnes de déchets, soit à peu près 1/3 du volume total de déchets. Ces déchets de construction représentent 22% de l'énergie intrinsèque (« embodied energy ») et 19% du carbone intrinsèque.

La consommation très importante de matières premières, l'intensité énergétique utilisée et le volume de déchets qui sont directement liés aux activités de construction, aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil, indiquent clairement que les considérations de développement durable des matériaux et produits utilisés dans ce cadre doivent recevoir une attention suffisante.

Le remplacement complet ou partiel de matériaux et produits de construction bien connus dans des bâtiments ou constructions ayant une très grande durée de vie, par des matériaux ou produits FRP généralement plus chers et inconnus, sera un processus de longue haleine et ira de pair avec de très nombreuses réticences, opinions erronées et frustrations.

Dans ce contexte, il est dès lors primordial de documenter du mieux possible les aspects de durabilité, de les étayer scientifiquement et de passer plus rapidement à de nouveaux développements (voir plus loin) dans lesquels les exceptionnelles propriétés des FRP peuvent être mieux exploitées.

L'explication des aspects énergétiques dans les considérations de développement durable est assez évidente. La consommation énergétique et les coûts y associés sont en effet des éléments importants qui détermineront le choix des matériaux et produits.

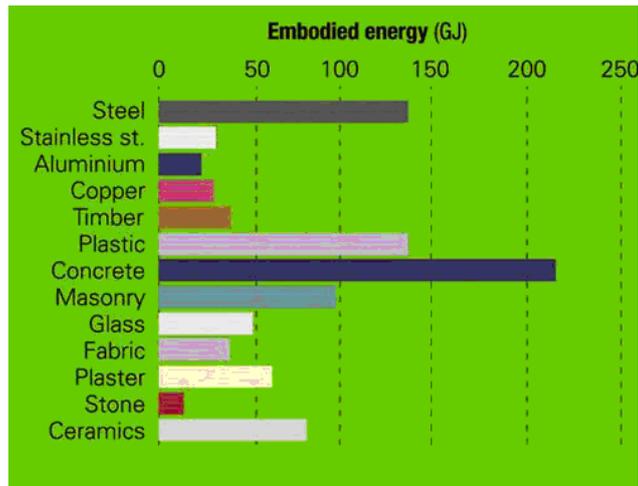
Concernant l'énergie intrinsèque, nous devons rappeler que des définitions différentes peuvent être confondues. Il faut dès lors toujours vérifier à quoi se rapporte concrètement cette énergie intrinsèque.

La définition « cradle-to-grave » est la plus complète et indique en principe la consommation énergétique d'un bâtiment ou d'une construction pendant toute sa durée de vie.

Celle-ci comprend :

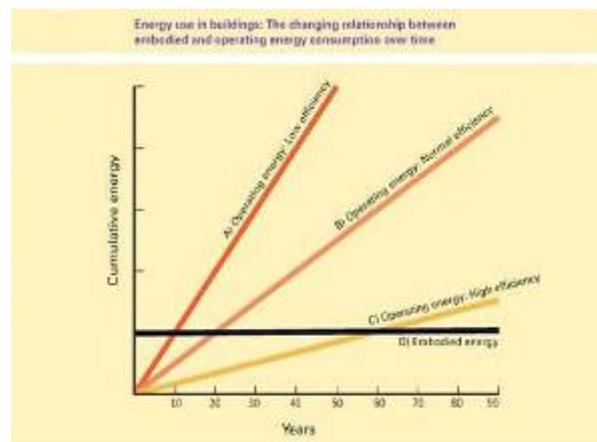
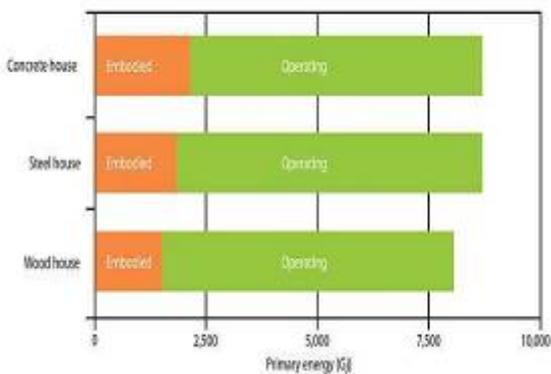
- l'énergie intrinsèque initiale (initial embodied energy) nécessaire pour réaliser la construction (en ce compris l'extraction des matières premières naturelles, la production des matériaux de construction, le transport et les activités de chantier).

Le graphique ci-dessous indique l'énergie intrinsèque des différentes quantités de matériaux présents dans un logement familial de taille moyenne en Australie.



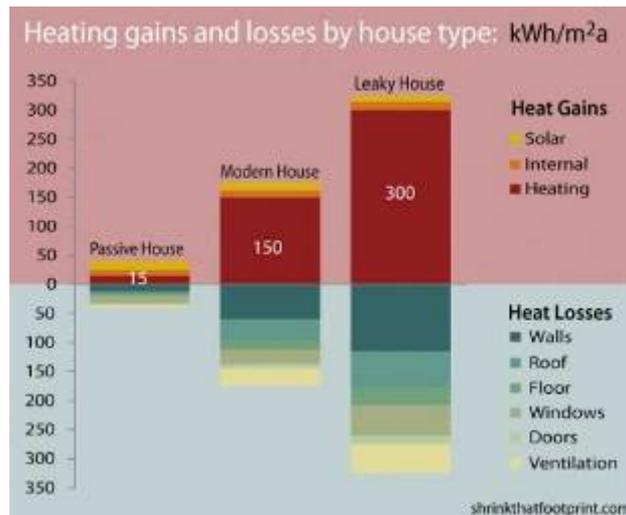
- et l'énergie opérationnelle (recurring embodied energy) nécessaire pour rafraîchir et entretenir le bâtiment.

Image courtesy of The Athena Sustainable Materials Institute



- et l'énergie de démolition (demolition energy) requise pour démolir la construction, évacuer les décombres et les mettre en décharge ou les recycler. Le type de bâtiment (logement, immeuble, bâtiment public, ...) et les matériaux produits par la démolition jouent dans ce cadre un rôle important, mais des différences assez importantes existent par région. On trouve très peu de données dans la littérature concernant l'intensité énergétique demandée par la démolition, l'évacuation et le recyclage ou la mise en décharge.

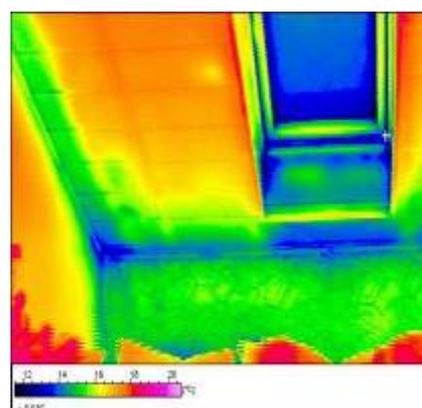
Les déperditions de chaleur dans les logements se déterminent par ailleurs en fonction du type de logement. Les matériaux utilisés, la structure de la construction et le soin accordé lors de la construction pour minimaliser ou prévenir les éventuelles déperditions de chaleur jouent un rôle important dans ce cadre.



Les déperditions de chaleur peuvent être liées à l'armature du béton et à d'autres produits de construction, comme les profilés de porte et de fenêtre.

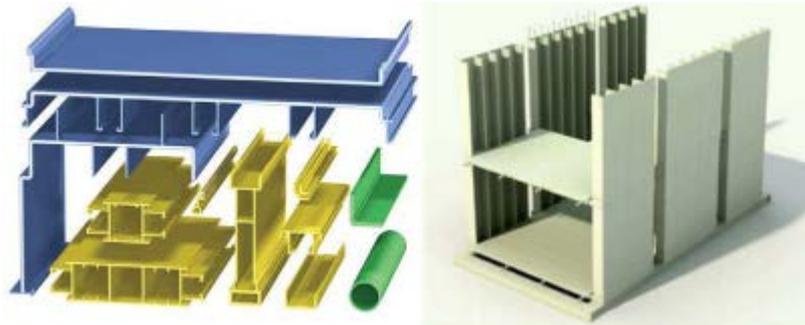
Contrairement aux systèmes d'armature en béton, la plupart des systèmes d'armature FRP à base de fibres de verre ou de basalte ne sont quasiment pas conducteurs de chaleur. La conductivité thermique est de 50 W/m°K pour l'acier, et de seulement 0,2 W/m°K pour des GRP.

Cette capacité d'isolation thermique d'une armature FRP peut empêcher la constitution de « ponts froids » (ou ponts chauds) dans des constructions (par ex., des terrasses d'immeubles comportent une armature importante, qui peut pénétrer jusque dans les pièces d'habitation) ou dans des profilés de fenêtre ou de porte.



Passer à des renforts en composite dans l'armature du béton ou dans des profilés de renfort permet non seulement d'économiser une grande quantité d'énergie, mais aussi de prévenir l'apparition de moisissure suite à la condensation.

Startlink Systems (Royaume-Uni) développe des systèmes constructifs modulaires à base de profilés FRP pultrudés et de panneaux isolants afin de construire des logements éco énergétiques à faible coût.



L'isolation ou non des sols, des murs et des plafonds déterminera dans une mesure importante la consommation énergétique d'un local ou d'un bâtiment.

Pour accroître la résistance à la flexion, des panneaux FRP sont souvent combinés avec différents matériaux d'âme tels que le PET ou PVC moussé, la mousse rigide PUR ou PIR, la mousse XPS.

De tels panneaux « sandwich », comportant des pellicules FRP sur les faces avant et arrière, sont également de très bons panneaux isolants. Les structures en mousse intégrées sont en effet composées d'alvéoles de mousse fermées, remplies de gaz ou d'air, qui ne conduisent pas la chaleur et procurent une très bonne valeur d'isolation. Les panneaux ultrarésistants sont également dénommés SIP (Structural Insulated Panel).

Comparés à des panneaux sandwich classiques à « facings » métalliques, les panneaux sandwich SIP présentent plusieurs avantages supplémentaires. Les pellicules FRP ne conduisent pas non plus la chaleur (contrairement aux « facings » métalliques) et résistent également à la corrosion.

Dans le commerce, on trouve divers panneaux constructifs SIP, comportant différents types de mousse (composition, densité et épaisseur).



Les panneaux SIP à base de mousse de polycyanurate (PIR) ont l'avantage qu'ils ont une bonne résistance au feu et sont également hydrophobes. Les pellicules FRP sont pour la plupart finies à l'aide d'un revêtement gel coloré dans la masse, qui présente par ailleurs une résistance élevée aux UV. De

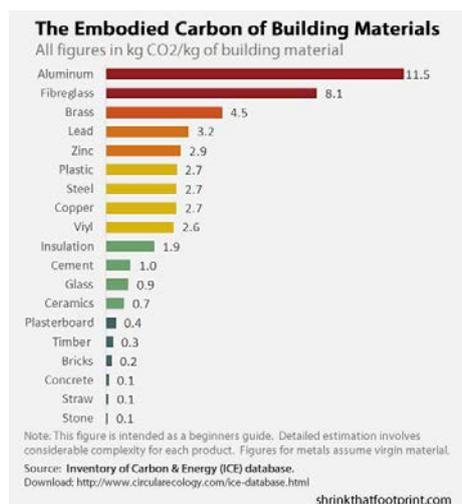
tels panneaux peuvent dès lors être utilisés pour des applications tant intérieures qu'extérieures. Ce revêtement en gel peut être mat ou brillant, mais également adopter une structure nervurée.

Dans des panneaux sandwich, les pellicules FRP peuvent être non seulement laminées (collées) sur l'âme en mousse, mais également faire partie intégrante du panneau sandwich à l'occasion du processus de durcissement. Dans des panneaux constructifs où le matériau mousse de l'âme et les pellicules FRP sont agrafés l'une à l'autre, une délamination lors de l'utilisation est tout bonnement exclue.

La grande longévité des éléments FRP d'extérieur est illustrée par la Mondil House à Londres, qui date de 1974 et est entièrement recouverte de FRP. Après 40 ans, le « cladding » FRP ne montre encore aucun signe de dégradation.



Ce qui s'applique à l'énergie vaut également pour le carbone intrinsèque. Ci-dessous le taux de CO₂/kg de matériaux de construction régulièrement utilisés (base de données d'ICE, Inventory of Carbon & Energy).

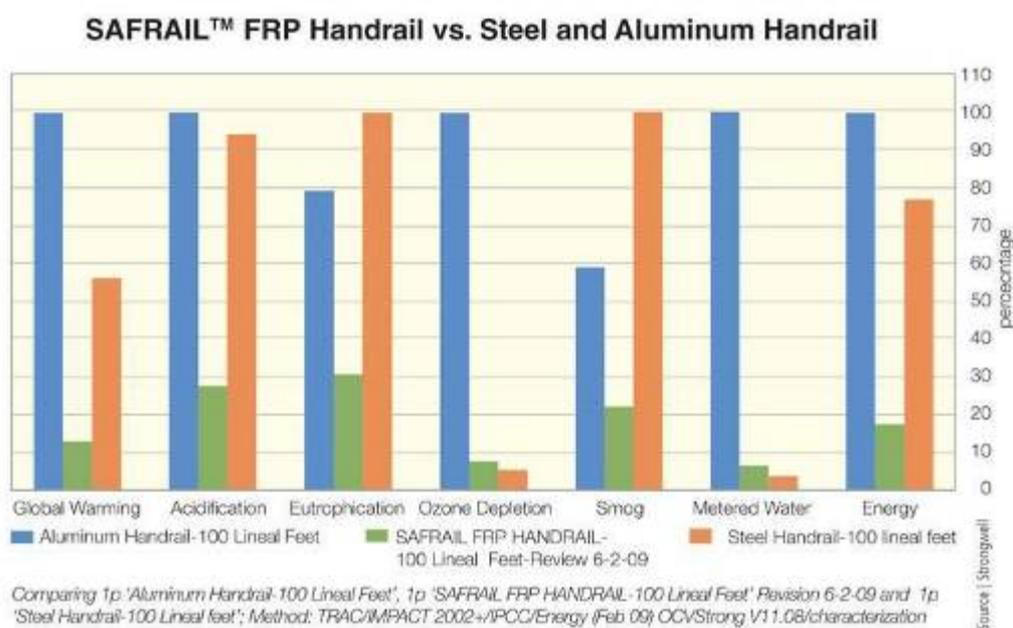


volumique (densité) des Attention, les données ci-dessus se rapportent à la masse (kg). Si l'on veut transposer ces données à un matériau de construction ou à un bâtiment complet, il faut dans ce cas tenir également compte du poids matériaux qui y sont utilisés.

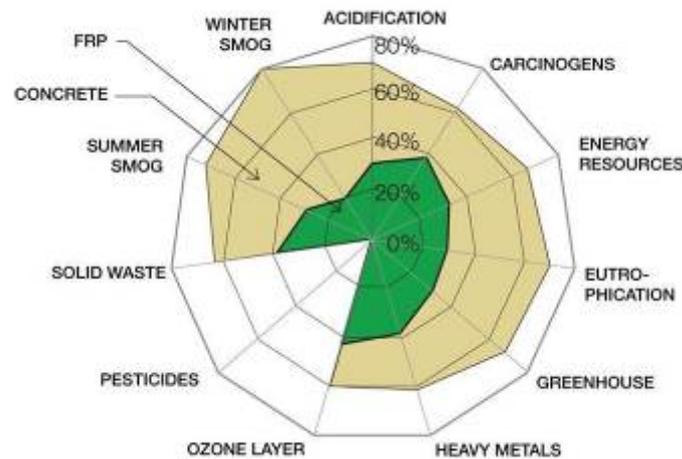
matériau	densité
béton	1,5 - 2,3
acier	7,7
FRP	1,5 – 2
verre	3,14

Outre l'aspect énergétique et du CO2 des matériaux, produits et bâtiments, on peut aussi considérer somme toute d'autres aspects environnementaux pour mettre l'accent sur des caractéristiques spécifiques de durabilité de matériaux et de produits FRP.

À titre d'illustration, la comparaison d'une série d'aspects environnementaux (approche « cradle-to-grave ») de différentes mains courantes réalisées en matériaux divers (aluminium, acier et FRP pultrudé - Strongwell). Dans quasi tous les aspects environnementaux, les FRP se comportent clairement mieux que les autres matériaux.



Le graphique ci-dessous compare les aspects environnementaux d'un aquarium industriel réalisé en béton ou en FRP. (aquarium de Monterey Bay Aquarium - source : Kreysler & Assoc.)



(3) Possibilités d'innovation de matériaux et produits FRP dans des applications de construction

De nouveaux domaines d'application à base de FRP présentent le grand avantage qu'ils ne font pas nécessairement appel à des matériaux de construction traditionnels.

Le développement de nouveaux matériaux ou produits de construction se basant sur les propriétés spécifiques de FRP crée de nouvelles opportunités.

Quelques possibilités à titre d'illustration.

- a. Les véhicules électriques prennent une importance croissante dans le cadre d'une société durable, mais de tels véhicules doivent également pouvoir être rechargés. Le chargement convivial des batteries peut recourir au transfert de l'énergie par induction. Le sol sous lequel se trouve le système de chargement par induction ne peut en effet pas perturber le transfert énergétique, et ne peut dès lors pas contenir aucun élément conducteur. Les sols ou zones de revêtement routier renforcés de fibres de verre ou de basalte constituent de réelles opportunités pour les producteurs de systèmes d'armature FRP destinés à ce type de systèmes de sol. L'étude de Mikael Cederlöf, « Inductive charging of electrical vehicles », de 2012 (XR-EE-ETK 2012:001), indique qu'un renfort du béton à l'aide de fibres de basalte convient à merveille pour de telles zones de charge.
- b. Le transfert d'énergie par induction permet également de mettre au point des systèmes de transport AGV sans batterie (voir photo ci-dessous), ce qui rend superflues les stations de charge de batterie dans les entreprises. L'énergie nécessaire pour le déplacement de ces systèmes de transport est fournie par des systèmes à induction incorporés au revêtement de sol renforcé de FRP.

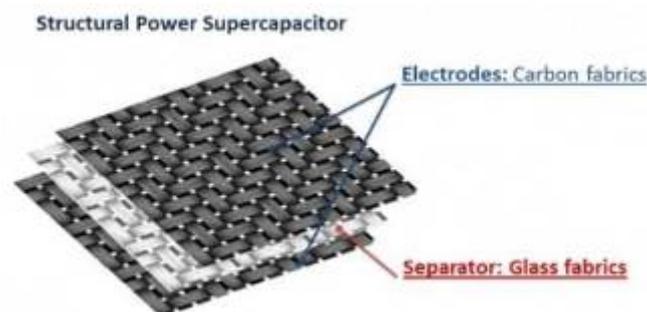


Battery-free AGV in use at an off-highway vehicle assembly line. (RedViking - SAE technical paper 2014-01-0782)

- c. Nous pouvons mettre en lumière non seulement le pouvoir électriquement isolant de certains FRP (plastiques renforcés de fibre de verre, de basalte et d'aramide), mais également mettre à profit les matériaux FRP à base de fibres de carbone, conducteurs électriques et thermiques. Des systèmes de protection électromagnétiques (blindage IEM) peuvent être réalisés en intégrant des panneaux FRP (à base de fibre de carbone) ultrafins, électriquement conducteurs, dans des éléments de construction (parois, plafonds et sols).

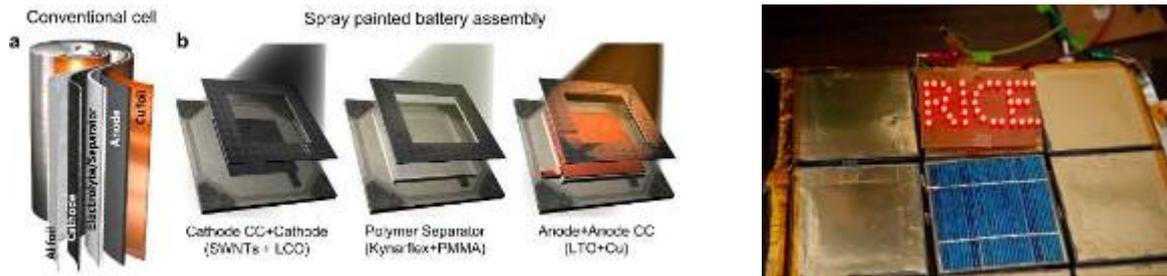


- d. La combinaison de FRP conducteurs et isolants permet de réaliser des matériaux spécifiques, pouvant par ex. emmagasiner l'électricité.



Comme déjà mentionné, un tel système est exploité par Volvo pour utiliser la carrosserie d'un véhicule comme une batterie. Ce système pourrait toutefois aussi être utilisé pour emmagasiner l'électricité provenant de panneaux solaires dans des panneaux de mur ou de plafond.

Le principe de la batterie peinte a été mis au point par l'université de RICE.

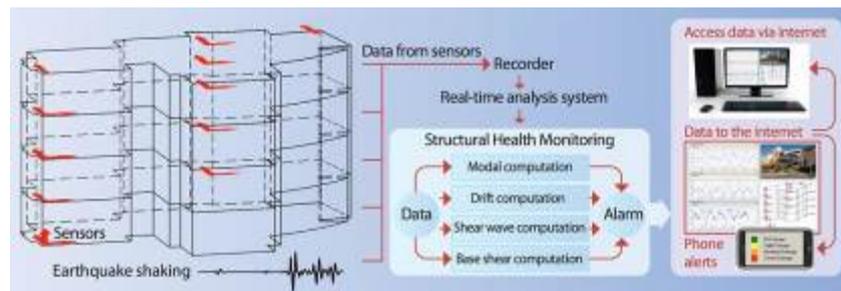


Ce récent développement pourrait être intégré dans des panneaux muraux à base de matériaux FRP.

e. Un autre nouveau domaine possible d'application des FRP thermoplastiques est celui des profilés muraux ou de plafond coextrudés, à base de plastiques renforcés de fibres électriquement conductrices (sur la face intérieure) et de plastiques électriquement isolants (sur la face extérieure). Ce profilé permettrait d'insérer divers éléments électriques (lampes LED, systèmes d'alarme, etc.) et de les raccorder sur le profilé lui-même.



f. Grâce à leur stabilité thermique et mécanique, les profilés FRP constituent des supports adéquats pour l'insertion de capteurs pouvant détecter des tremblements de terre ou d'inventorier les dégâts des immeubles.



Enfin, nous voudrions mentionner les thèmes de recherche majoritairement abordés aux USA en matière de FRP et d'applications constructives (source : Constructed Facilities Center, West Virginia University 2011).

Ces thèmes bénéficient également d'une grande attention au sein des programmes de recherche européens.

1. « Green building » : essentiellement axée sur l'amélioration de la performance énergétique.

2. Réparation et amélioration de systèmes d'infrastructure existants (ponts, viaducs, voies ferrées, ...), ce qui pourrait faire baisser les coûts de l'entretien nécessaire. La technologie d'enveloppement par FRP à base de fibres de carbone et de combinaisons de fibres est un thème important dans ce cadre.
3. Amélioration de la résistance au feu de certains éléments constructifs structurels (« retrofitting »), pour laquelle une grande attention est accordée à la densité et à la toxicité des fumées en cas d'incendie, et à de nouveaux polymères présentant une grande résistance au feu.
4. Intégration de matériaux « intelligents » dans des produits FRP. Attention particulière portée aux
 - PCM : matériaux à transition de phase, qui peuvent emmagasiner puis restituer l'énergie,
 - polymères conducteurs : surtout orientés vers les applications dans les panneaux solaires,
 - revêtements autonettoyants et dépolluants,
 - FRP auto-dégivrants,
 - FRP à autodiagnostic et auto-réparants,
 - revêtements FRP assurant une fonction de capteur.

4.5. Applications FRP dans le secteur des soins de santé

Comme déjà mentionné au chapitre 3, des composites polymères renforcés de fibres sont également appliqués dans un grand nombre d'autres domaines tels que les loisirs, le sport et les loisirs, les meubles design, ... pour lesquels le prix ne constitue pas toujours le critère majeur pour l'achat de certains produits à base de FRP.

Le succès de nombreux produits FRP dans ces domaines d'application spécifique s'appuie sur :

- le caractère exclusif de composites polymères à base de fibre de carbone,
- les possibilités très étendues en matière de design et de mise en forme, propres aux plastiques,
- le faible poids des composites, surtout des composites renforcés de fibre de carbone.

Si le prix de la fibre de carbone continuait à baisser (par exemple suite à son utilisation massive dans l'automobile ou par le recours à des fibres de carbone recyclées), nous pensons que des matériaux CFRP, qui sont à ce jour utilisés dans un très grand nombre d'articles de sport (coûteux), soient aussi davantage utilisés dans le secteur des soins de santé. Nous pensons tout spécialement aux « moyens d'assistance » destinés aux personnes souffrant d'un handicap et aux personnes âgées.

La résistance, le faible poids et la mise en forme adéquate de matériaux FRP représentent des atouts importants pour le développement et la production de tels moyens d'assistance.

La croissance potentielle au sein de ce domaine d'application spécifique repose sur le vieillissement de la société occidentale. Pour garder sous contrôle les coûts des soins de santé, il importe que les personnes âgées habitent le plus longtemps possible chez eux. Ceci suppose cependant de disposer d'aides adaptées sur le plan de la mobilité, de la communication, des soins, ...



walk assist robot

Grâce à l'utilisation de composites renforcés de fibre de carbone au lieu de pièces métalliques, il est possible de réduire le poids des aides tant simples (montures de lunette, rampe repliable, cannes, ...) que complexes (fauteuils roulants, rollators, robot de marche, etc.). L'allègement de ces équipements (tout en conservant leur nécessaire solidité), facilite leur usage, déplacement, pliage, rangement, etc.



La mise en forme des aides, surtout celles utilisées dans les soins, constitue un thème important. Par une mise en forme adaptée, il est possible de répondre à des besoins spécifiques tels que le confort en position assise ou couchée, l'ergonomie, etc.



Le coût des aides dans le secteur des soins de santé reste momentanément un défi majeur. Les prix, tant des matrices que des fibres de renfort, devront baisser et beaucoup de ces aides devront être agréées par des autorités qui pourront supporter une partie des coûts.

5. Recyclage et valorisation de composites renforcés de fibres

Avant de s'attarder sur une série de technologies de recyclage et de pistes de valorisations des matériaux recyclés, faisons notamment quelques remarques et réflexions générales concernant le flux de déchets FRP et leur recyclage/valorisation.

Les FRP sont des matériaux composés dont les différents composants (fibres d'une part et matrice d'autre part) ne peuvent pas, ou très difficilement, être dissociés l'un de l'autre sans destruction (totale) d'un des composants. Du fait que la valeur des fibres et de la matrice diffère fortement, de nombreuses techniques de recyclage pour les thermosets sont orientées sur la valorisation, soit de la fraction de fibres, soit de la matrice (ou d'une partie de celle-ci).

Les flux de déchets FRP consistent d'une part en déchets de « post-production » (matériaux et produits résultant des processus de production, d'assemblage ou de montage) et en déchets « EOL » (End Of Life) ou « post-consumer » d'autre part (produits, constructions et matériaux déclassés, défectueux ou endommagés).

Du fait que les produits ou constructions FRP ont une durée de vie relativement longue (la durée de vie d'éoliennes est estimée à +/- 25 années, celle des constructions à plus de 50 ans, celle des avions à plus de 30 ans) et ce quoiqu'il existe également des exceptions pour des avions (+/- 10 ans), des articles de sport (+/- 5 ans) ou des E+E (moins de 5 ans), de très grandes quantités de déchets FRP EOL ne sont pas générées aussi rapidement pour leur recyclage et leur valorisation. Même si l'on pouvait collecter de manière sélective tous les produits FRP déclassés, le volume actuel de déchets EOL resterait assez limité. Du fait aussi que de nombreux produits FRP sont montés ou traités dans des avions, appareils, installations, constructions, etc., le regroupement sélectif de produits FRP n'est pas si

évident. De plus, de nombreux produits FRP ne peuvent pas être distingués visuellement des plastiques non renforcés de fibres. Les entreprises de recyclage actuelles ne sont en outre pas équipées pour démonter et trier des produits FRP dans des véhicules, appareils, installations, etc., en vue d'un recyclage ultérieur.

C'est essentiellement la législation européenne qui incitera au recyclage de déchets FRP tant PP que PC. Les principales directives de l'UE définissant le secteur du recyclage concernent :

- l'interdiction de mise en décharge (« landfill »),
- les véhicules déclassés (« EOL Vehicles »),
- les rebuts électriques et électroniques (déchets DEEE),
- les déchets de construction et de démolition (« Construction and Demolition waste »).

Transformer le flux de déchets en matières premières pour la production, en combustibles ou en énergie nécessite des processus industriels dont les considérations économiques sont très contraignantes.

- Si la transformation de déchets en matières premières est très coûteuse ou ne peut atteindre le niveau de qualité souhaité par rapport aux matières premières vierges, les entreprises de recyclage auront tendance à transformer ces flux en combustibles moins critiques ou à les brûler immédiatement (comme source d'énergie pouvant générer également de l'électricité).
- Si des matériaux recyclés (recyclats) n'ont pas ou trop peu de valeur pour les utilisateurs industriels, ils ne seront pas non plus mis en œuvre dans des processus de production.

La valeur d'un flux spécifique de déchets peut être définie en grande partie par son « énergie intrinsèque » (embodied energy) ; c'est l'énergie qui était nécessaire pour produire les matériaux qui y sont présents (comme matériau vierge) ainsi que la consommation d'énergie des processus de production associés.

- Le tableau ci-dessous indique l'énergie intrinsèque de quelques composants FRP et une comparaison avec quelques autres matériaux fréquemment rencontrés.

Matériau	Énergie intrinsèque (MJ/kg)
Fibre de verre	13 à 32
Fibre de carbone	183 à 286
Résine UP	63 à 78
Résine époxy	76 à 80
Thermoplastique (moyen)	90
Mousse d'isolation PUR	101
Matériau pour panneau MDF	11
Acier	20
Aluminium	170
Béton	1,5

- L'intensité énergétique des processus les plus fréquents de production de FRP est mentionnée dans le tableau ci-dessous (réf. Song et al. 2009). Comparativement à l'énergie nécessaire pour réaliser par exemple des fibres de carbone neuves, tout cela ne représente que des consommations relativement limitées.

processus	Consommation énergétique MJ/kg.
Autoclave	22
Moulage par injection	18
Spray-up	15
RTM	13
Vacuum ass. Injection de résine	10
Pultrusion	3 à 4
Filament winding	3

Une énergie intrinsèque élevée des matériaux justifie le recyclage mécanique (voir plus loin) de produits EOL en recyclats, à condition que la qualité des matières premières ainsi récupérées réponde aux normes imposées pour un usage industriel. Lors du recyclage mécanique, les composants ne sont pas dissociés chimiquement et ils conservent leurs propriétés.

- De nombreux produits FRP possèdent une énergie intrinsèque assez élevée, mais ont aussi contribué à générer une grande quantité d'énergie tout au long de leur vie (les éoliennes par ex.), ou ont contribué à limiter la consommation d'énergie dans des véhicules, des logements, etc. Les éoliennes auront ainsi généré au minimum 50 fois plus d'énergie que leur valeur d'énergie intrinsèque (source : Siemens Windpower). Même s'ils n'étaient pas (entièrement) recyclés, ce type de produits FRP peut toujours être considéré comme des produits durables.
- L'intensité énergétique de nombreux processus de recyclage de composites n'est pas encore si bien connue. Les données de la littérature renvoient rarement à des installations industrielles, et sont également peu étayées. Le tableau ci-dessous, reprenant l'intensité énergétique d'un certain nombre de techniques de recyclage, n'a donc qu'une valeur indicative.

Procédé de recyclage	Consommation énergétique	Référence
Mechanical grinding	6 à 7	Srivastava et al. 2012
Milling	0,5 à 2,1	Howarth et al. 2014
Pyrolyse	30	Witik et al. 2013

Outre les considérations énergétiques ci-dessus, d'autres facteurs jouent également un rôle lors du recyclage, comme les volumes disponibles de déchets, l'état de la technologie, le marché des recyclats, les conditions du marché à ce moment et ses évolutions possibles, les permis environnementaux pour pouvoir exécuter certains processus de recyclage, les coûts d'investissement, ...

Les activités de recyclage ne sont économiquement intéressantes avec les techniques actuelles que si les volumes du matériau à recycler sont également suffisamment importants.

Réexaminons d'abord les points de vue actuels et aspects économiques du recyclage, en nous concentrant sur le recyclage et la valorisation de composites polymères renforcés de fibre de verre.

- Selon Steve Pickering (Université van Nottingham, Royaume-Uni - 2013), une installation industrielle orientée vers le recyclage de fibre de verre au départ de thermoset GFRP ne serait rentable qu'à partir de 10 000 tonnes/an.
- La valeur actuelle du marché de la fibre de verre recyclée est toutefois si faible que la collecte sélective de GFRP pour le recyclage ciblé des fibres n'a pas lieu d'être.
- Les grands objets GFRP (tels que pales d'éoliennes, yachts, piscines, baignoires, etc.), contenant une très grande quantité de fibre de verre et de charges minérales, sont en principe faciles à collecter sélectivement et sont intéressants sur le plan de leur composition minérale (silicates, calcium et aluminium) pour être traités, après réduction, comme RDF (Refuse Derived Fuel) ou SRF (Solid Recovered Fuel) dans des fours à ciment. Pour l'industrie du ciment, ce type de matières premières et de combustibles est assez intéressant. Le matériau SRF/RDF peut en effet réduire la consommation d'énergie fossile dans les fours à ciment, de 15 à 30% (voir plus loin).
- EuCIA (l'association européenne des composites) et EUPR (la fédération européenne des entreprises de recyclage de plastiques) déclarent, dans un « Position paper on recycling of thermosetting composite parts in the Automotive Industry » de juin 2009, que l'utilisation de RDF ou de SRF issus de produits FRP est totalement conforme aux directives européennes 2000/53/EC (EOL-V) et 2008/98/EC (Waste Framework Directive). 2/3 des produits GFRP constituent de plus des matières premières pour la production du ciment, et 1/3 (la fraction de plastiques) génère l'énergie pour la production du ciment.
- La transformation de produits GFRP très volumineux (pales d'éoliennes) est réalisée par Zajons Zerkleinerungs GMBH (Malbeck) notamment, qui a fondé « COMPOCYCLE » avec le producteur de ciment Holcim. Compocycle est considéré comme un système agréé de récupération de FRP.
- Holcim a fondé en 2015 sa filiale « GEOCYCLE », afin de recycler en ciment des produits FRP. Le réseau de Geocycle comporte diverses entreprises de recyclage en Allemagne et aux Pays-Bas, ainsi que différents gros producteurs de fibres de verre et de composites (Exel, Fiberline Composites, Polynt, Vitrulan, ...)

- Le démontage d'anciennes (pales d')éoliennes devrait générer en 2020 environ 50 000 tonnes de déchets FRP. En 2035, ce flux spécifique de déchets atteindrait +/- 225 000 tonnes en Europe.
- Le recyclage de béton renforcé de fibre de verre ou d'une armature en fibre de basalte peut également s'avérer très intéressant. En raison de leur composition chimique spécifique, ces systèmes d'armature conviennent très bien pour la production de ciment.

Le cas des composites polymères renforcés de fibre de carbone (CF) est tout autre. À l'aide des technologies existantes, des fibres de carbone (RCF - fibres de carbone recyclées) de qualité peuvent être extraites à partir de produits CFRP, qui seraient d'une qualité suffisante pour pouvoir être utilisées par les équipementiers en construction automobile pour la production de thermosets et de thermoplastiques renforcés de fibres (voir plus loin).

- La demande de fibres de carbone moins chères (par rapport aux fibres vierges) destinées au renfort par fibres et à la conductivité thermique et électrique de thermoplastiques est réelle et croissante.
- La valeur relativement élevée de RCF est par ailleurs liée aux prix de vente très élevés de fibres CF vierges et aux volumes relativement importants de déchets de post-production disponibles en provenance de l'industrie aéronautique, pour la production de RCF.
- Les quantités de CFRP sont à l'heure actuelle encore relativement faibles (certainement par rapport aux GFRP), mais les activités de recyclage actuelles des fibres CF peuvent s'appuyer intégralement sur la valorisation des fibres de carbone recyclées à partir de déchets de production et de post-production (PP) d'entreprises qui produisent des pièces assez coûteuses à base de CFRP (e.a. pour des avions, de l'équipement militaire, des voitures de sport exclusives, des éoliennes, etc.). Les déchets CFRP EOL ne sont pour l'instant pas (encore) recyclés, ce qui implique qu'une grande partie des produits EOL-CFRP est encore mise en décharge.
- Les entreprises de recyclage qui ont déjà actuellement d'assez bonnes relations avec ces producteurs, ou qui ont été fondées par eux (comme CFK Valley Recycling, par Airbus) ont en effet pas mal d'avantages.
- Les quantités disponibles de déchets CFRP de « post-production » sont très importantes dans certains secteurs. Des pourcentages de rebuts et de déchets supérieurs à 30% (dans l'industrie aéronautique notamment) ne sont certainement pas une exception.
 - Du fait que ces déchets de PP sont relativement purs et de composition bien connue, et qu'ils peuvent être collectés de manière sélective, ils constituent des flux intéressants pour le recyclage et la valorisation.

- Ces flux de déchets de production, disponibles de nos jours, sont de plus suffisamment importants pour répondre complètement aux besoins actuels en fibres de carbone recyclées.
 - Moins de 10% des déchets de production CRP disponibles actuellement à partir de l'industrie aéronautique est maintenant transformée en RCF, ce qui permet de satisfaire une demande de fibres de carbone recyclées même en forte croissance.
- CFK Valley Stade Recycling (près de Hambourg, Allemagne), une succursale d'Airbus axée sur le recyclage de fibres de carbone provenant de produits aéronautiques, produirait annuellement +/- 1 000 tonnes de fibres de carbone recyclées au départ de leurs flux de déchets et de rebuts de production spécifiques. Leurs fibres de carbone recyclées sont commercialisées par CarboNXT GmbH comme RCF « chopped » et « milled ».
 - ELG Carbon Fiber (Duisburg, Allemagne et Coseley, Royaume-Uni) produiraient elles aussi annuellement +/- 1 000 tonnes de fibre de carbone recyclée. Cette entreprise dispose d'un four à pyrolyse équipé d'une bande transporteuse longue de 21 mètres.

Ceci permet de recycler des produits CRP assez volumineux, et de produire également de longues fibres de carbone. Ils ne mettent pas seulement des fibres de carbone « milled » et « chopped » sur le marché, mais aussi des composites thermoplastiques (différents polymères sont envisageables).



- Outre ces entreprises de recyclage prépondérantes, explicitement tournées vers le recyclage industriel des fibres de carbone, il existe aussi d'autres fournisseurs de RCF. L'entreprise belge de recyclage textile PROCOTEX a repris la société de recyclage française « Apply Carbon », et peut elle aussi proposer à présent diverses fibres techniques dont des fibres CF recyclées « milled », « chopped » et « precision cut » (0,25, 6 et 12 mm), ainsi que des fibres d'aramide, de verre et de métal.
- Toutes les entreprises spécialisées dans le recyclage considèrent que des fibres de carbone recyclées ne peuvent pas être de nouveau utilisées par les entreprises qui génèrent

actuellement des flux de déchets CRP importants, et dont les critères de qualité sont très stricts.

- Les applications possibles des fibres de carbone recyclées (souvent très courtes) se trouvent souvent dans des entreprises pratiquant l'extrusion et le moulage par injection.
 - Dans ce cadre, on ne veut pas uniquement exploiter les propriétés mécaniques, mais également la bonne conductivité thermique et électrique des RCF, dans par exemple des produits antistatiques, du blindage IEM, des profilés conducteurs, ...
- Tous les produits CFRP ne contiennent pas autant de matériau fibreux CF. Les produits CFRP contenant la plus grande fraction de fibres (les composites UD contiennent généralement 70 à 80% de matériau fibreux) sont en effet les plus intéressants à transformer en produits RCF.

Les composites qui contiennent des fibres longues ou des fils continus conviennent bien, après récupération du matériau fibreux, pour être coupés en longueur à dimension.

Pour les 20 années à venir, on s'attend à ce que +/- 12 000 avions soient retirés du service. Une partie de ces avions seront des Boeing 787 et des Airbus 350, qui sont constitués des pièces en CRP pour plus de 50%.

Si l'industrie automobile venait à utiliser dans les prochaines années de plus en plus de composites à base de carbone pour la production de nouveaux véhicules, la quantité disponible de déchets FRP EOL pourrait augmenter/augmentera très rapidement.

- Annuellement, +/- 11 millions de voitures sont recyclées en Europe. Si à terme toutes les voitures contenaient 10 kg de CRP, cela impliquerait que l'on puisse recycler annuellement plus de 50 000 tonnes de RCF (ce qui est bien plus que la quantité de fibre de carbone vierge produite actuellement).

Par ailleurs, la forte augmentation de la consommation de fibre de carbone dans les voitures nécessite que les fibres CF deviennent bien moins coûteuses et que les processus de production puissent être également notablement accélérés.

Pour rester conforme à la directive EOL-V, il ne faudra pas uniquement recycler les flux de déchets de « post-production », mais également les EOL eux-mêmes. Comment ceci peut et devra s'effectuer n'est pas encore bien défini.

Certaines études indiquent que le recyclage de produits CFRP et de véhicules EOL, riches en composants CFRP, s'effectuera probablement par l'intermédiaire de garages et de firmes de recyclage spécialisées, qui démonteront les éléments intéressants en CFRP en vue d'un recyclage ciblé des fibres

(par analogie avec la dépollution de vieux véhicules et de l'élimination des pots catalytiques selon l'EOL-V). Lors de l'éventuel découpage ou démontage de matériau FRP sur des épaves de voitures, il faut tenir compte du fait que les engins traditionnels ne sont pour la plupart pas adaptés pour cet enlèvement de matériau CFRP abrasif. L'utilisation d'appareils à jet d'eau ou laser sera probablement nécessaire à cet effet.

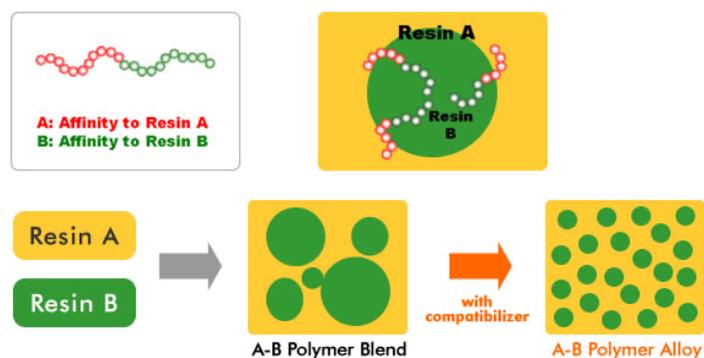
Dans ce chapitre, nous voulons également exposer l'état actuel de la technologie permettant le recyclage et la valorisation de ces flux de déchets FRP spécifiques, que ce soit sous forme de nouvelles matières premières ou excipients, de combustibles et/ou d'énergie. Dans la mesure du possible, nous voulons aussi expliquer des techniques nouvelles mais pas encore mises en œuvre, qui peuvent être éventuellement utilisées dans les activités de recyclage et de valorisation de ces matériaux composés.

Dans la présentation des différentes technologies de recyclage, nous ne ferons pas de distinction entre les déchets de post-production (PP), de post-consommation (PC) ou d'EOL, tant il est évident que des matériaux ou produits souillés peuvent contenir des impuretés pouvant être éliminées plus ou moins facilement et complexifier le processus de recyclage. Les matériaux souillés ou pollués peuvent le cas échéant être partiellement ou totalement épurés avant ou pendant le recyclage.

Comme déjà mentionné, des FRP sont très souvent combinés avec le matériau d'âme (ce matériau d'âme peut comporter aussi bien en thermoplastique qu'un thermoset, mais il est rarement renforcé de matériau fibreux), sont pour la plupart revêtus et/ou contiennent des inserts (en métal) pour faciliter leur montage. Lors du recyclage, il faut par ailleurs tenir compte du fait que ces « matériaux non FRP » détermineront les propriétés et la qualité du recyclat FRP.

- Au niveau du volume (et parfois aussi du poids), il se peut que la fraction « core » soit beaucoup plus importante que la fraction de FRP proprement dite.
 - Les FRP et le matériau d'âme sont généralement si intimement liés dans les produits à recycler (par ex. pales d'éoliennes, cladding de façade en GRP, ...) qu'ils ne peuvent être dissociés au préalable.
 - Pendant ou après la réduction des produits FRP, ces différents matériaux restent généralement mélangés, sauf s'il est possible de les différencier aisément par leur densité.
 - Lors de la réduction d'objets en FRP intégrant un matériau d'âme, il faut tenir compte du fait que les âmes en mousse peuvent le cas échéant contenir des agents gonflants et d'autres additifs non conformes à la directive REACH. Dans ces cas, le recyclage doit s'effectuer dans une infrastructure adaptée (aspiration d'agents gonflants fluorés et combustion ultérieure à haute température).

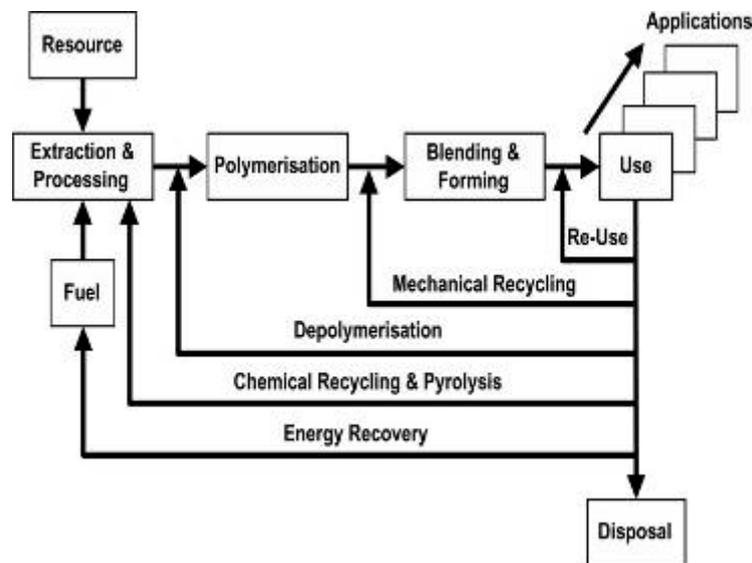
- Les différents composants (polymères, fibres, charges et éventuellement autres additifs tels que stabilisants, produits retardateurs de feu, ...) présents dans les déchets mixtes peuvent être chimiquement compatibles, ou non.
 - Si l'on souhaite malgré cela utiliser le mélange complet, par exemple comme charge dans des thermoplastiques ou des thermosets, il faudra y ajouter des agents de compatibilité.
 - Les agents de compatibilité ont un caractère hybride : une partie de ce type de produits est compatible avec la substance A, l'autre est compatible avec la substance B. Ces substances sont rendues compatibles en utilisant les réactions physico-chimiques de ces substances avec le matériau hybride.



Ce qui précède n'est pas seulement applicable aux FRP et au matériau d'âme, mais également sur les revêtements en gel qui sont appliqués sur les FRP (les FRP enduits contiennent 10 à 15 % de revêtement en gel). Du fait que de nombreux revêtements en gel ont la même composition que la résine de la matrice, ils ne sont pas ou très difficilement dissociables.

- Les inserts métalliques dans des produits FRP EOL peuvent être éliminés assez facilement après réduction, en recourant à des systèmes de séparation magnétiques ou électromagnétiques adaptés.

Le schéma ci-dessous illustre les différentes pistes de recyclage et de valorisation pour les plastiques. Plus loin sera exposé si toutes ces pistes sont applicables sur des thermosets et des thermoplastiques renforcés de fibres.



Le choix de suivre une piste donnée de recyclage/valorisation est déterminé par divers facteurs tels que :

- la quantité de matériau FRP pouvant être collectée, triée et/ou regroupée afin d'être traitée de manière économique et écologique,
- la capacité de traitement de certaines installations de recyclage,
- la situation actuelle du marché en fonction des prix du matériau vierge, des coûts (logistique, énergie, contrôle de qualité, ...) associés à une piste de recyclage ou de valorisation donnée, la valeur des matières premières ou excipients obtenus, l'intérêt manifesté par des entreprises de production pour utiliser des recyclats ou d'autres matières premières ou excipients obtenus,
- la législation qui est ou sera en vigueur.

Tous les processus de recyclage commencent par la réduction de produits FRP en plus petites parties ou en particules plus brutes. Cette réduction permet de mieux traiter le matériau et de manière plus ciblée.

- Les matériaux réduits peuvent éventuellement être encore affinés via des installations de concassage, des broyeurs ou d'autres processus, puis être le cas échéant compressés en granules, granulats, poudres, etc. (macroscopiques ou microscopiques).
- Pour la réduction de produits GFRP, il est en principe possible d'utiliser des shredders classiques, fréquemment utilisés pour la réduction de EOL-V et d'autres rebuts métalliques.

- D'autres technologies peuvent être utilisées le cas échéant. Une technologie nouvelle, mais pas encore appliquée à l'échelle industrielle, est la destruction de produits FRP à l'aide de décharges électriques (également appelée fragmentation électrodynamique).
 - Un matériau FRP rigide est placé dans un bain d'eau entre deux électrodes à travers lesquelles est envoyé un courant électrique de 100 à 200 kV pendant un très court laps de temps (moins de 5 microsecondes). Ceci déclenche un arc électrique (une sorte de coup de foudre), qui pénètre le matériau et génère des ondes de choc dans le matériau. Ces ondes d'énergie (pressions et températures élevées) se propagent, surtout le long des surfaces de jonction « fibre/matrice » (matériaux hétérogènes possédant différentes constantes diélectriques), ce qui fait éclater le matériau en fragments. Par cette simple fragmentation sélective, les matériaux fibre et matrice sont relativement bien dissociés.
 - Cette nouvelle technologie est pour l'instant testée dans divers instituts de recherche (notamment le Fraunhofer Institut et le CTP à Tournai). On espère, via cette technologie, récupérer des fibres RCF sans contrainte chimique ou thermique supplémentaire (voir la pyrolyse).

La transformation de déchets FRP en SRF (Solid Recovered Fuel) et RDF (Refuse Derived Fuel) destinés à l'industrie du ciment est mise en avant par l'EUCIA et l'EUPR, comme la piste la plus recommandée pour le recyclage de plastiques renforcés de fibre de basalte et de fibre de verre.



SRF - GFFP



RDF mixed plastics

- La fraction de fibre (60 à 70%) des GFRP et BFRP comporte en effet des « minéraux-ciments » qui constituent les matières premières de la production du ciment.
- La matrice organique SRF/FRP (30% à 40% généralement) représente le combustible nécessaire pour maintenir le four à ciment opérationnel.

- Ce combustible RDF/SRF peut réduire le recours aux combustibles fossiles (gaz, pétrole, charbon), générant une économie de +/- 25 à 30 euros par tonne de GFRP. La teneur en bore du verre E détermine toutefois la quantité de GFRP qui peut y être incluse.
la transformation de déchets FRP en RDF ou en SRF est un procédé de recyclage maîtrisé.
- Pour obtenir la proportion souhaitée matière première/combustible, les déchets RFD/SRF de produits GFRP peuvent être mélangés à d'autres flux de déchets plastiques (mêlés) provenant d'emballages plastiques, de textiles EOL, de morceaux de tapis, ...
- L'industrie européenne du ciment est en principe à même d'utiliser jusqu'à 7 millions de tonnes de SRF/RDF par an, ce qui est largement suffisant pour traiter tous les produits EOL à base de GFRP (verre) et BFRP (basalte).

L'incinération de matériaux FRP collectés est une autre piste qui est encore très exploitée.

- L'incinération de tels déchets ne nécessite pas un triage préalable spécifique.
- La valeur calorifique moyenne des déchets FRP (10 à 30 MJ/kg en fonction du contenu en matières anorganiques telles que fibre de verre, chaux, ...) détermine s'ils seront incinérés comme tels, ou mélangés le cas échéant à d'autres flux de déchets tels que des déchets ménagers mixtes, des boues provenant d'installations d'épuration de l'eau, etc.
- L'incinération conjointe de déchets FRP avec du charbon dans une centrale au charbon est également possible, et peut réduire les émissions de CO₂ d'une centrale classique au charbon.
- L'incinération de ce type de flux de déchets va de pair avec une récupération d'énergie.
- L'incinération de déchets FRP libère une quantité et un volume de cendres assez importants.

La technique de recyclage « mécanique », qui ne rompt quasiment pas la structure polymère des déchets FRP, est la plus répandue pour la valorisation des FRP thermoplastiques.

- Les fibres de renfort présentes ne perturbent pas en effet le processus de fusion lors de l'extrusion, le moulage par injection, la rotation et le « Compression molding » des polymères thermoplastiques classiques.
- Lors de la réduction et du broyage fin de déchets FRP, la longueur des fibres ainsi que leur possible orientation peut être modifiée, ce qui altérera les propriétés (mécaniques) du matériau refondu.
- Pour des SRPC (self reinforced plastics) composés des mêmes polymères, le recyclage mécanique ne pose en effet aucun problème. A cause de la refusion de SRPC au-delà de la température de fusion du type de polymère renforcé de fibres, la cristallinité supérieure du renfort de fibres est elle aussi perdue, et l'ensemble se comporte comme un plastique non renforcé. Si l'on n'atteint pas la température de fusion supérieure du polymère renforcé de fibres, ce renfort de fibres peut être préservé au sein de la matrice polymère refondue.

Du fait que les réseaux polymères des thermosets ne fondent pas du tout, ou de façon très limitée, des thermosets FRP finement broyés ne peuvent être utilisés que comme charge ou comme matériau de renfort dans des thermoplastiques ou dans de nouveaux thermosets, ou aussi le cas échéant dans d'autres matériaux comme le béton et l'asphalte. Si la structure de fibre peut être conservée dans une proportion importante lors du broyage fin (la plupart du temps avec un broyeur à marteaux), les déchets FRP peuvent également remplacer partiellement ou totalement les fibres de bois dans des WPC. Les déchets CFRP finement broyés peuvent aussi être utilisés dans des molding compounds en vrac ou en feuille (BMC et SMC), et ce principalement pour exploiter les propriétés antistatiques ou conductrices des fibres de carbone présentes. Le broyage (très) fin des FRP est un procédé de recyclage que l'on évite généralement, en raison du caractère abrasif de la plupart des produits FRP. Le broyage fin est de plus un procédé énergivore qui use en outre les pièces métalliques des machines.

Les procédés « chimico-thermiques », qui cassent la structure polymère, produisent des combustibles gazeux ou liquides, des huiles, du goudron, des produits solides, ... Ces procédés, également appelés « feedstock-recyclage », peuvent être subdivisés en :

- Dépolymerisation chimique, aussi dénommée chimiolyse, fait usage de réactifs chimiques pour casser des polymères ou des réseaux polymères. En fonction du réactif utilisé, on parlera de glycolyse, d'hydrolyse, ...
 - Cette technique est surtout utilisée sur des polymères thermoplastiques de condensation tels que PET, PEN, PA, ... mais également sur des thermosets comme les PUR.
 - Une forme particulière d'une telle dégradation chimique est l'utilisation de liquides supercritiques tels que le propanol pour dissoudre la résine époxy des CFRP et en récupérer les fibres de carbone (réf. Hernanz 2008).
 - Les réactions chimiques peuvent être accélérées par des catalyseurs et des températures plus élevées. Le propanol par exemple peut dissoudre en moins de 15 min. 95% de la résine époxy, en présence d'alcalins et à une température se situant entre 200 et 450°C.
- Hydrogénation : il s'agit généralement d'une réaction de catalyse (notamment par le Pt, Ni, Mo, et Fe sur l'Al, des Zéolites ou des liaisons Si-Al amorphes) qui casse thermiquement et hydrogène les chaînes polymères sous l'effet de l'hydrogène, ce qui crée la plupart du temps des liaisons fortement saturées. De ce fait, la valeur comme combustible des produits ainsi formés augmente, sans traitement complémentaire.

- Par hydrogénation, des hétéroatomes (Cl, N, S) peuvent être éliminés sous la forme de substances volatiles puis traités.
 - En raison de la teneur élevée en matériaux inertes, cette piste est moins adaptée pour les GFRP.
- Gazéification : il s'agit d'un procédé d'oxydation ou de carbonatation partielle, par de l'air ou de l'oxygène, de déchets plastiques généralement mélangés, et qui libère un mélange gazeux. Ce procédé peut être catalysé par des liaisons métalliques dans une solution aqueuse. Le gaz de synthèse ou syngas peut être mis en œuvre dans une quantité de procédés de synthèse chimique (synthèse du méthanol, de l'ammoniac, de l'acide acétique, ...).
- Procédés thermiques : ensemble de procédés HT mis en œuvre dans un environnement inerte. On peut y faire une distinction entre thermolyse, pyrolyse, cracking,
- Ces procédés peuvent être accélérés par la mise en œuvre de la technologie de catalyseurs à micro-ondes.
 - La pyrolyse est une technologie convenant très bien pour extraire des fibres de carbone de flux de déchets CFRP (voir plus loin).

La littérature récente indique que presque toutes ces techniques peuvent être appliquées tant sur des thermoplastiques que sur des thermodurcisseurs, et généralement aussi sur des flux de déchets mixtes de différents polymères où pourraient le cas échéant aussi être ajoutés des flux de déchets non polymères tels que la lignite, de la biomasse, etc.

Les réacteurs utilisés (fours à tambour rotatif, fluidized bed, fixed hand reactor, etc.) et les paramètres de procédé (température, durée de séjour, présence de certains catalyseurs, dosage complémentaire ou non de gaz, réactifs, ...) qui y sont appliqués ont une très grande importance vis-à-vis de la composition du produit final.

Les procédés chimico-thermiques peuvent être appliqués pour réaliser des produits spéciaux très ciblés tels que fibres de carbone, noir de carbone, carbone actif, NCT, ...

Le schéma ci-dessous illustre la récupération de fibres de carbone et d'énergie au départ de CFRP à base d'époxy, par un procédé « Fluidized bed ».

Paramètres de procédé : température entre 450 et 550°C, débit d'air (à l'entrée) 1,3 m/s. Composition du Fluidized bed : sable silice de +/- 1 mm (réf. Steve Pickering – University of Nottingham 2013).

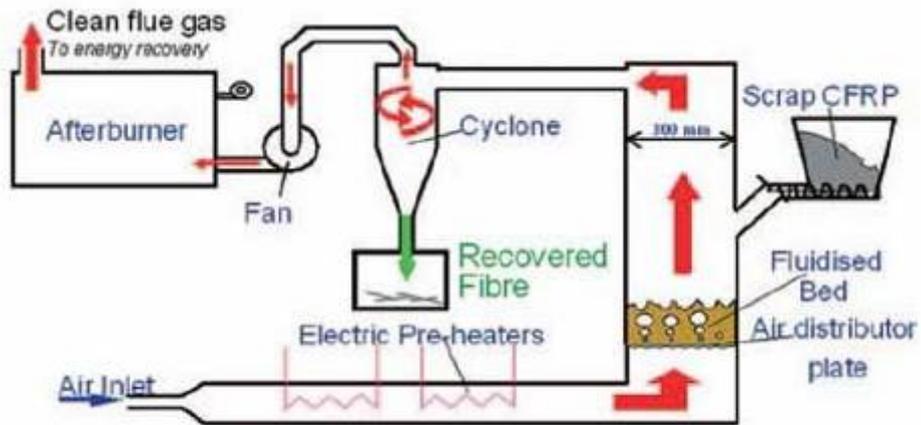
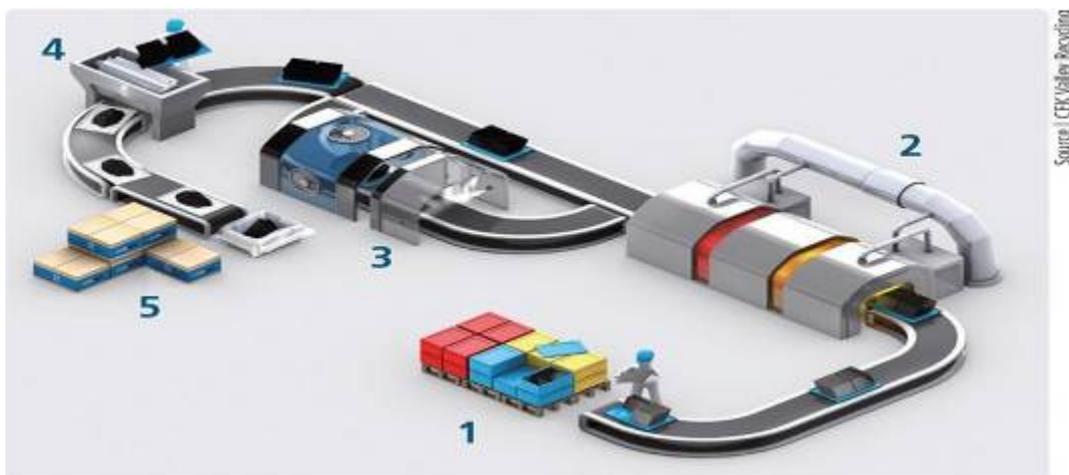


Fig.2: fluidised bed recycling process for composites.

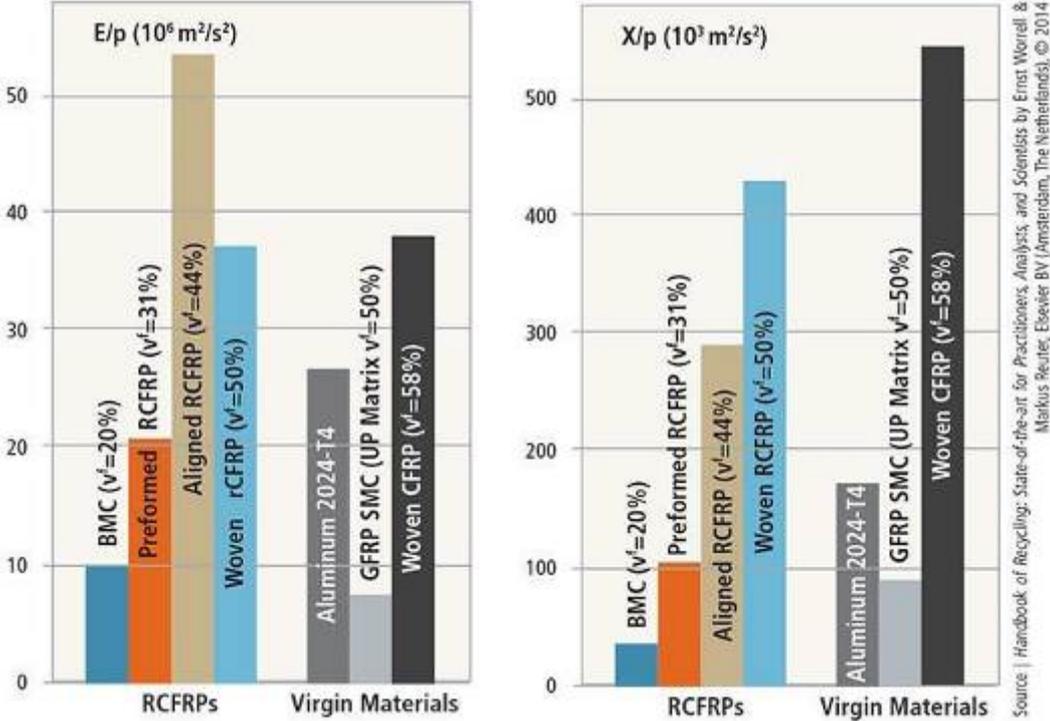
Les fibres de carbone ainsi récupérées sont assez pures, leur résistance à la traction est inférieure de +/- 25%, mais le module reste quasiment inchangé.

Pour la récupération de fibres de carbone relativement coûteuses au départ d'éléments composites d'avions, Airbus et Boeing ont mis au point des techniques spécifiques de pyrolyse. La matrice est pyrolysée et transformée la plupart du temps en combustibles, les fibres de carbone qui ne sont pas décomposées par le procédé de pyrolyse pouvant être récupérées de cette manière. Suite au procédé de pyrolyse, le « sizing » est quasiment entièrement éliminé, ce qui impose de traiter une nouvelle fois les fibres pour leur utilisation dans la production de nouveaux CFRP. Ci-dessous la représentation schématique de l'usine de recyclage de CFK Valley (Stade D). Process steps include: (1) sorting, (2) pyrolysis, (3) tailored surface treatment (4) cutting to tailored length and (5) distribution. Source : CFK Valley Recycling.



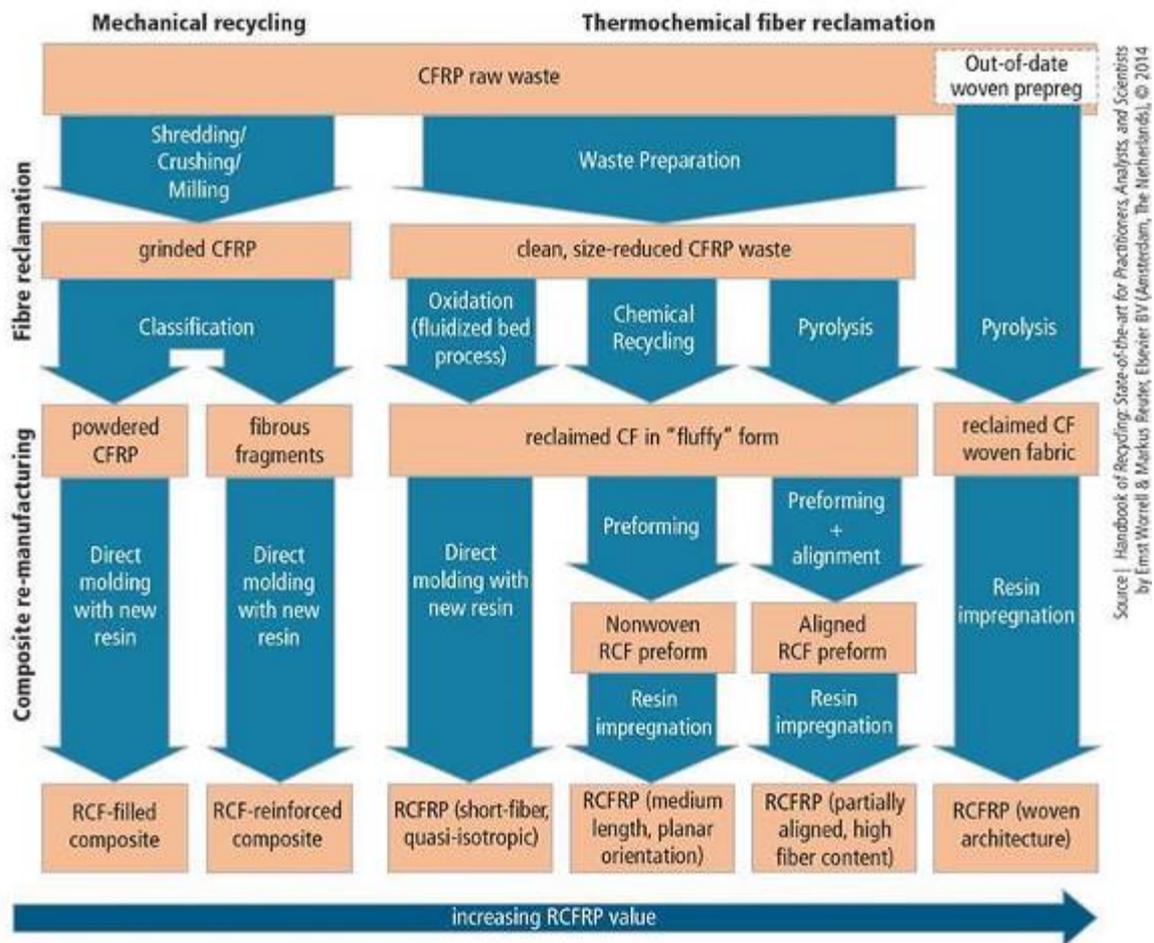
Pour la production de fibres de carbone recyclées, on travaille généralement avec des flux de déchets de production collectés sélectivement.

Les graphiques ci-dessous indiquent que les fibres de carbone recyclées (RCF) conservent en très grande partie leurs remarquables propriétés.



Specific mechanical properties (divided by density, (ρ) including tensile modulus (E) and tensile strength (X) of typical RCFRP vs. virgin structural materials. Source : Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists by Ernst Worrell & Markus Reuter, Elsevier BV (Amsterdam, Pays-Bas), © 2014

Le schéma ci-dessous donne un aperçu des différentes pistes de recyclage et de valorisation pour des fibres de carbone recyclées (RCF).



Il est possible d'accroître la valeur des RCF, soit en les traitant en nontissées (par une technologie d'aiguilletage, airlaid ou wetlaid), soit en orientant les fibres de telle façon qu'elles peuvent le cas échéant être aussi utilisées dans des applications UD.

L'orientation de fibres de carbone recyclées constitue un thème important dans divers programmes de recherche. A ce but, des systèmes pneumatiques et hydrauliques peuvent être mis en œuvre, ou des procédés assez traditionnels, utilisés pour le filage de fils textiles (hybrides).

Les fils RCF pourraient alors être entremêlés ou cousus l'un sur l'autre en tissus « non crimp ». Tout ceci n'est toutefois pas encore une réalité industrielle, et on peut se demander si cette amélioration sera suffisamment profitable pour supplanter partiellement ou totalement les fibres CF vierges dans des applications critiques. Tant que l'on dispose de suffisamment de déchets de production CFRP pour produire des fibres recyclées de manière économique, on continuera à utiliser, non pas des RCF mais bien des fibres CF vierges, dans des domaines d'application critiques de CFRP.

De manière générale, on peut conclure que le recyclage et la valorisation de produits FRP en fibres et/ou autres matières premières sont assez nouveaux, et devront encore être améliorés. Les différentes données environnementales et énergétiques relatives aux procédés de recyclage actuellement utilisés et axés sur la récupération de fibres sont encore peu étayées scientifiquement. De plus, cette piste de recyclage et de valorisation de fibres de carbone recyclées (RCF) ne repose que sur des flux de déchets « post production ». Pour la valorisation de fibres récupérées de produits FRP EOL, un important travail de recherche doit encore être réalisé.