

→ Les matériaux composites sont largement utilisés depuis plus de 40 ans dans tous les domaines de l'industrie : automobile, aéronautique, construction, ferroviaire, loisir...

→ Evolution avec l'émergence de nouveaux matériaux mais aussi avec la mise au point de nouveaux procédés de fabrication.

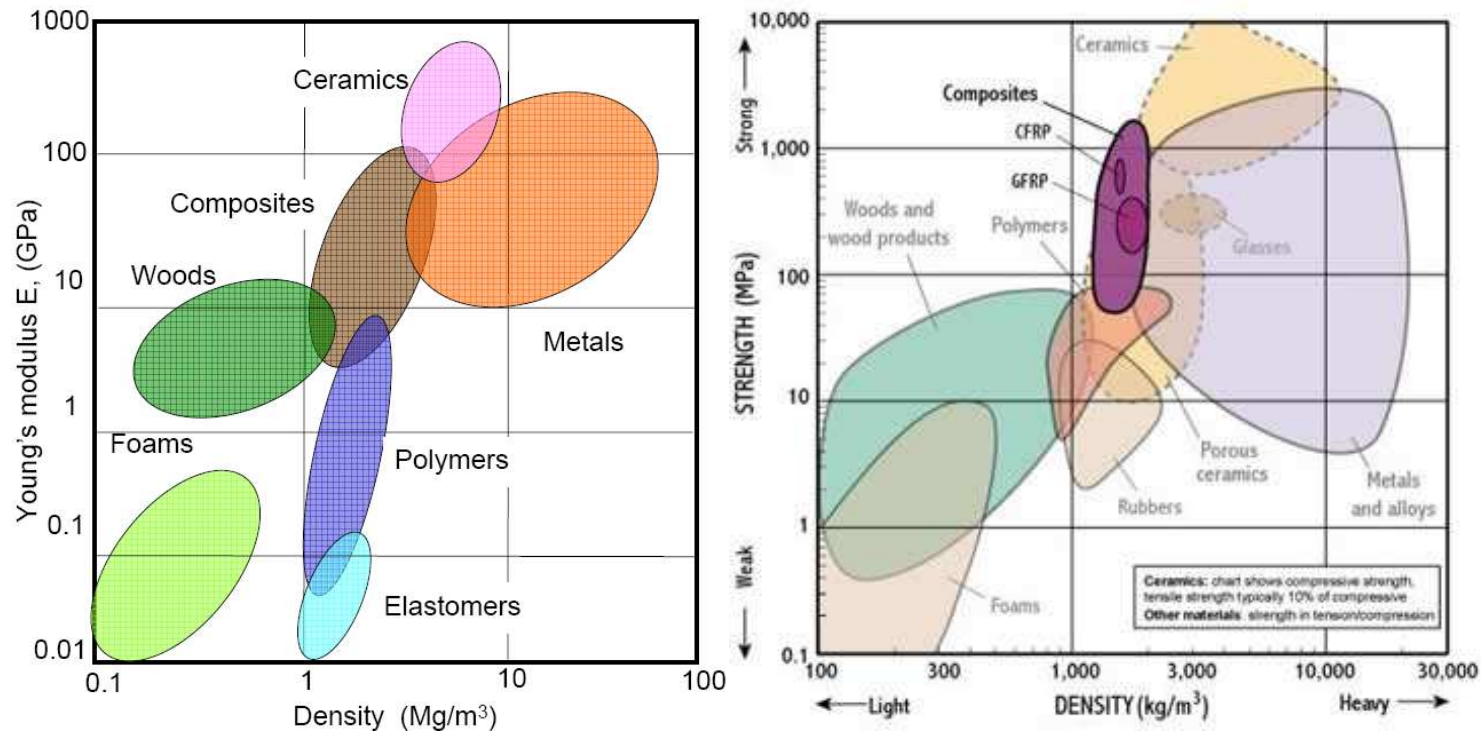
→ Propriétés mécaniques spécifiques (rapportées à leur densité) meilleures que celles de n'importe quel matériau conventionnel.

→ Pour répondre aux nouvelles exigences, des matériaux composites innovants (advanced composites en anglais) ont été développés récemment.

→ Combinaison de plusieurs propriétés essentielles :

- résistance et rigidité élevées,
- faible densité,
- tenue mécanique en température,
- résistance à la corrosion et dans certains cas des propriétés électriques spéciales.

Cette combinaison les destine à des applications de pointe notamment en aéronautique et aérospatiale.



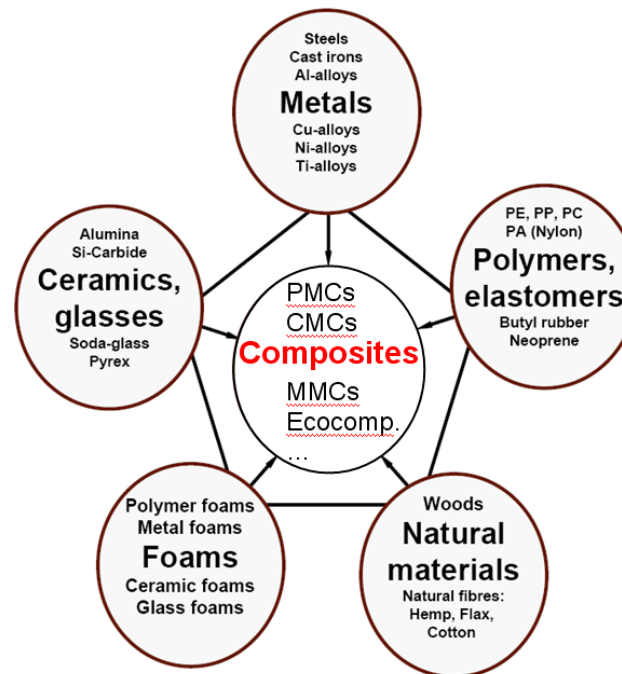
Comparaison du module d'Young (a) et de la résistance (b) en fonction de la densité des composites avec les principaux matériaux [CEB][CBD]

3.1 Les composites, des « multi-matériaux »

→ Matériau composite = matériau multi-phases constitué d'une (ou plusieurs) phase(s), appelée renfort, assurant la tenue mécanique, et d'une phase cohésive continue, appelée matrice, assurant la cohésion du matériau et le transfert des efforts entre les renforts.

→ L'association de ces phases donne un matériau dont les propriétés sont différentes des matériaux constitutifs et dépendent fortement de la proportion de chaque phase.

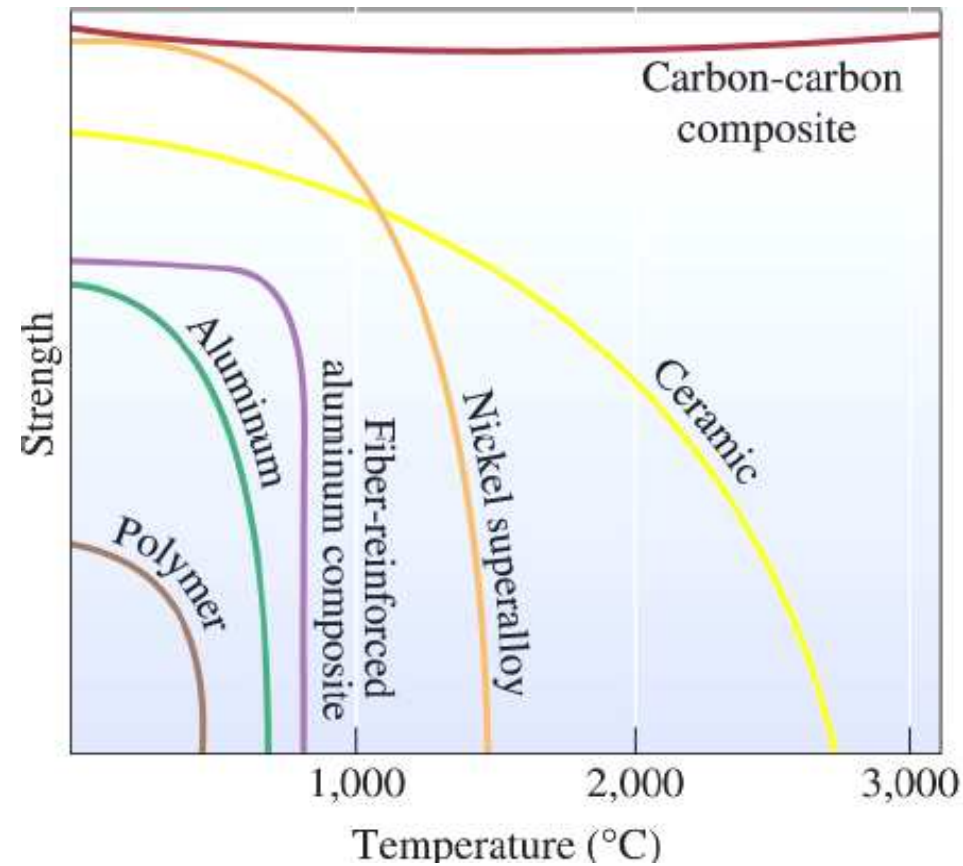
→ Possibilité de réaliser des matériaux « sur-mesure » pour une application donnée, aspect essentiel de la fonctionnalisation des matériaux.



Les matériaux composites : des matériaux multi-phases [CEB]

→ Critères de choix multiples pour les composites qui correspondent à des applications ciblées :

- tenue mécanique,
- utilisation en température,
- résistance aux agents chimiques,
- propriétés électriques, thermiques...



Tenue mécanique à hautes températures pour différents matériaux [CEB]

On peut classifier les matériaux composites selon la nature de la matrice ou selon le type de renfort (structure du matériau).

3.1.1 Classification selon la matrice :

Considérant la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés en trois catégories :

■ Les composites à matrice polymère (PMCs – Polymer Matrix Composites) :

Egalement appelés composites à matrice organique, ils représentent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle.

Il existe une grande diversité de matrices polymères appelées résines. On distingue deux types de résine : **thermodurcissable** (TD – thermosetting en anglais) et **thermoplastique** (TP – thermoplastic en anglais).

Avantage : les PMCs à résine TD ont été très largement utilisés principalement en raison de leur coût.

Inconvénient : les matériaux polymères présentent des propriétés mécaniques qui se dégradent à hautes températures, c'est pourquoi l'utilisation des PMCs est limitée aux structures dont le fonctionnement en service est inférieur à 300°C.

■ Les **composites à matrice métallique** (MMCs – Metal Matrix Composites) :

De nombreuses combinaisons de métaux et renforts depuis la naissance des MMCs à la fin des années 1950.

60 ans plus tard, la technologie des MMCs est encore à ses balbutiements

Ces matériaux sont amenés à se développer car : matrice plus ductile que le renfort dont le rôle est d'améliorer la résistance à l'abrasion, au fluage, la conductivité thermique et la stabilité dimensionnelle.

Avantage : température en service très élevée ainsi que très bonne tolérance aux fluides organiques (par rapport aux PMCs).

Inconvénient : coût et densité.

■ Les **composites à matrice céramique** (CMCs – Ceramic Matrix Composites) :

Réservés aux applications de très haute technicité nécessitant une excellente résistance dans un environnement à haute température comme le spatial (turbine de propulsion et cockpit de la navette Columbia), le nucléaire, le militaire ainsi que le freinage (freins carbone).

Avantage : grande rigidité et très bonne résistance, légèreté.

Inconvénient : fragilité due à la nature de la matrice.

Un **cermet** est composé de céramique (cer) et de métal (met)

→ matériau possédant à la fois une excellente résistance en température et une dureté élevée (caractéristiques des céramiques) mais aussi une bonne ténacité (aptitude du matériau à subir des déformations plastiques, caractéristique des métaux).

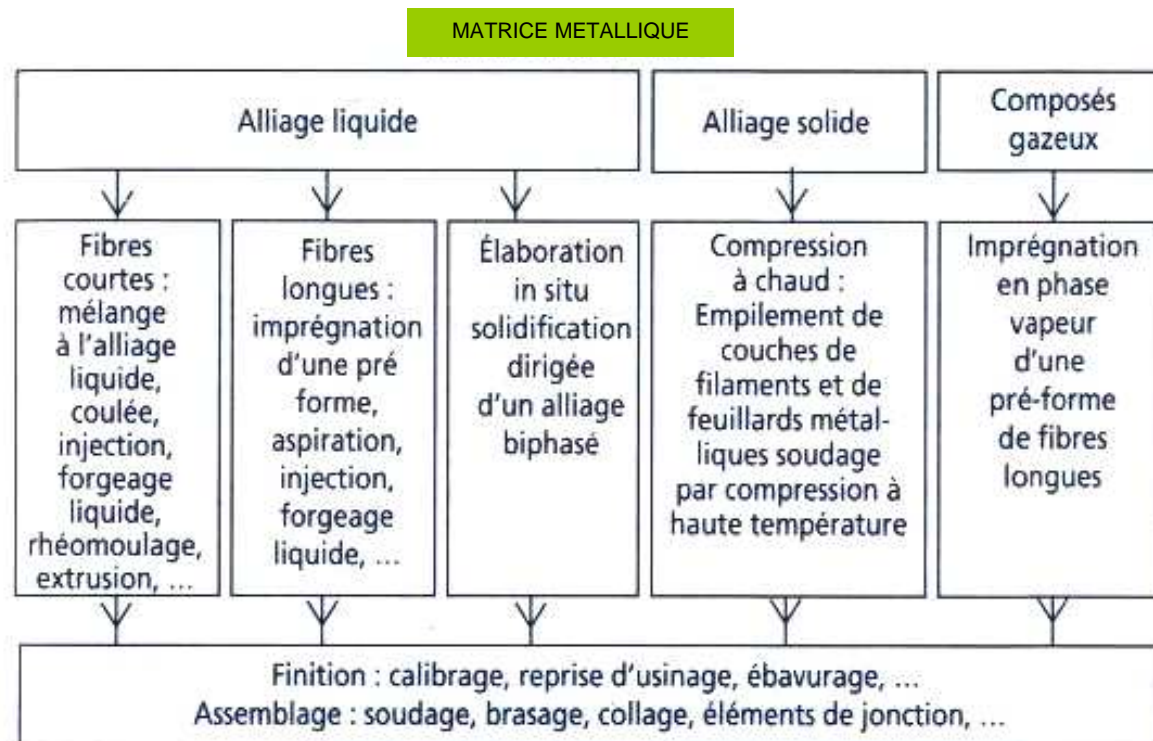
Composites		Examples of Application
Polymer Matrix	Thermoplastic Matrix	Mechanical components, protection screens
	Thermoset Matrix	Aerospace, sporting equipment
	Elastomer Matrix	Tires
Metal Matrix	Aluminum Matrix	Aerospace, sporting equipment, electronic packaging
	Titanium Matrix	Aerospace turbines
	Copper Matrix	High strength electrical conductors
Ceramic Matrix	Alumina Matrix	High temperature mechanical applications
	Cermets	Cutting tools, polishing materials

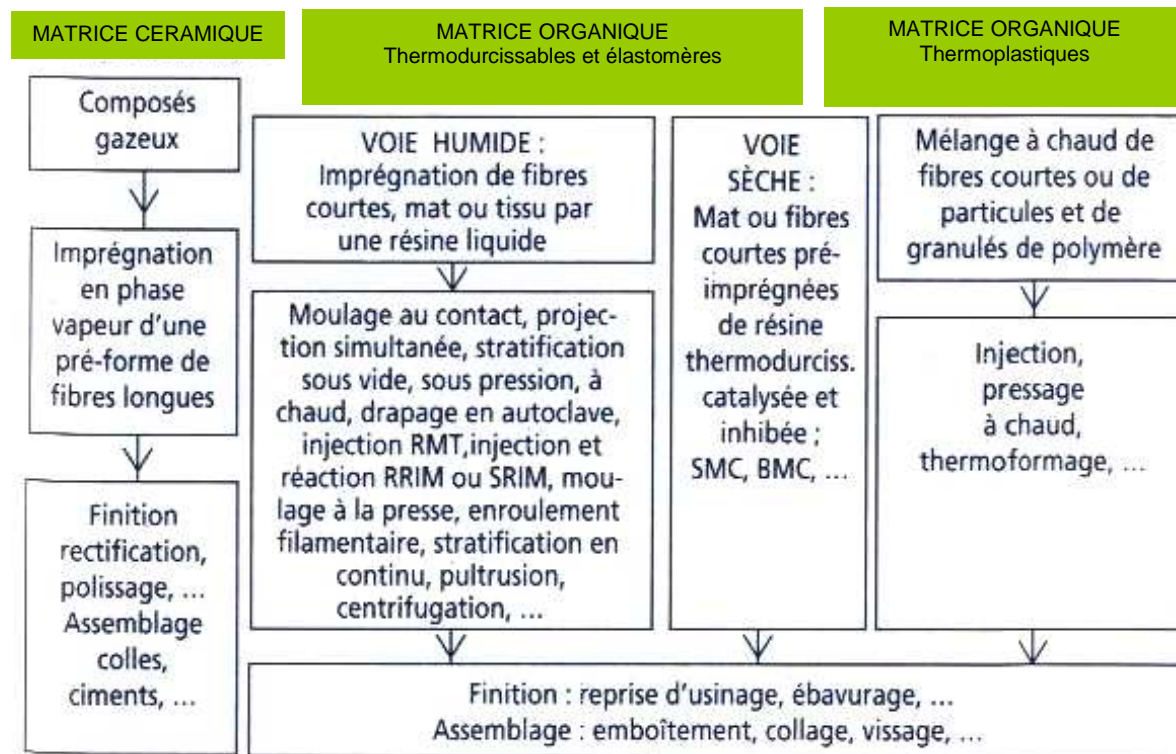
Classification des matériaux composites selon la nature de la matrice – Applications courantes [UBC]

→ Pour répondre aux exigences de l'innovation, nécessité d'intégrer les problématiques liées à la mise en œuvre.

→ Les techniques de mise en œuvre varient selon la nature de la matrice.

→ Les difficultés de mise en œuvre caractéristiques des composites → coût élevé

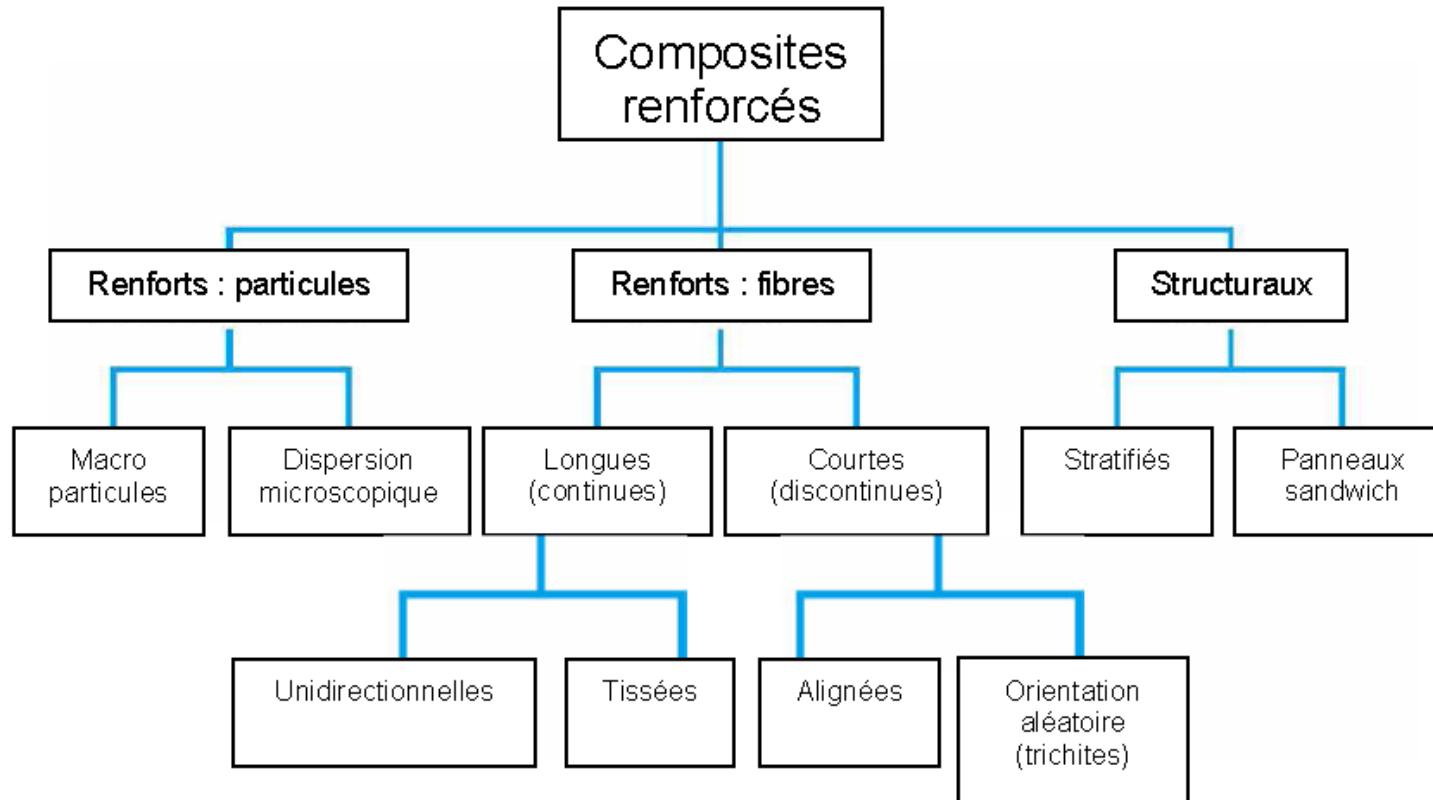




Principales techniques de mise en œuvre des composites selon la nature de la matrice [AMS]

3.1.2 Classification selon le renfort :

Deuxième mode de classification des composites : particules, fibres ou assemblages de composites renforcés.

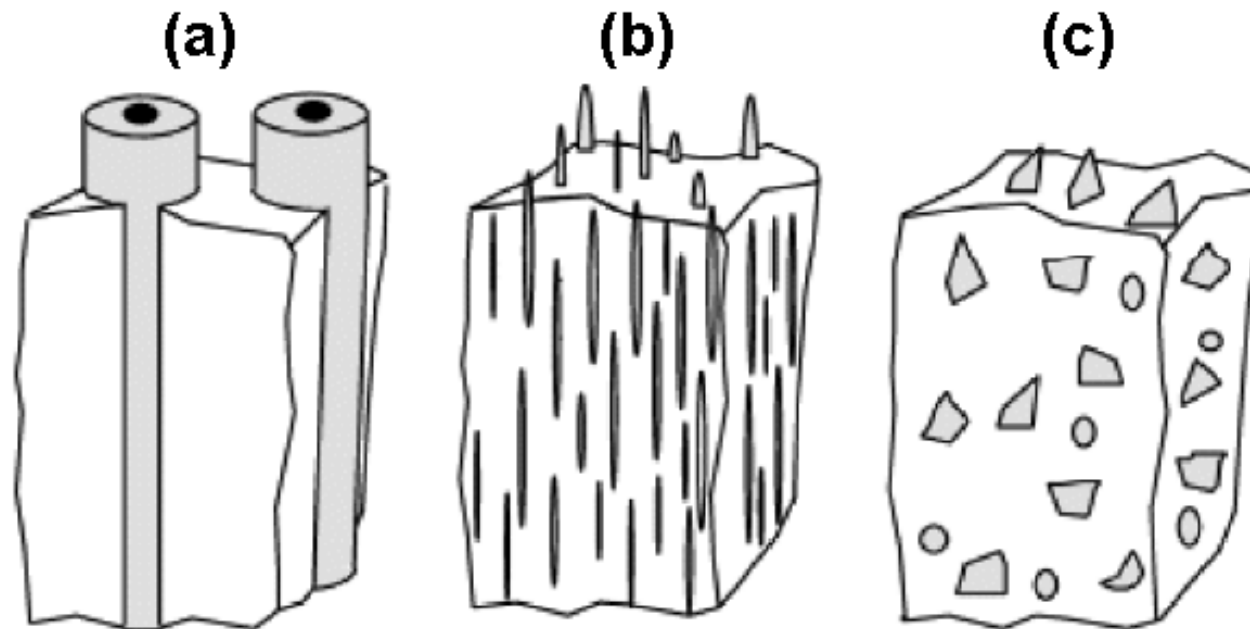


Architecture du renfort dans les composites renforcés [JAN]

→ La trichite (whisker en anglais) est un filament monocristallin sans défaut : graphite, alumine, fer ou silice.

→ **Avantage** : résistance à la rupture en traction très élevée (de l'ordre de 10 à 20 GPa). Elles peuvent être considérées comme les précurseurs des nanotubes de carbone.

→ **Inconvénient** : la fabrication de structure composites de grandes dimensions intégrant des trichites est difficile du point de vue du contrôle des défauts.



Composites renforcés : (a) fibres longues unidirectionnelles – (b) fibres courtes ou trichites – (c) particules

→ Composites à matrice innovante :

- composites à matrice thermoplastique hautes performances renforcée par des fibres de carbone,
- composites à matrice métallique renforcée,
- composites à matrice céramique renforcée par des fibres longues (carbone-carbone).

→ Composites à renfort innovant :

- les nanocomposites,
- les polymères renforcés par des fibres de carbone, de bore ou de tungstène,
- les composites renforcés par des fibres naturelles,
- les stratifiés hybrides métal-fibre (ARALL et GLARE),
- les structures sandwich métal.

3.2 Les composites à matrice innovante

3.2.1 Les composites à matrice thermoplastique hautes performances renforcés par des fibres de carbone :

→ Aéronautique significatif de l'évolution du choix des matériaux composites.

→ Mise au point de nouveaux matériaux composites pour :

- facilité de mise en œuvre,
- améliorer les propriétés mécaniques,
- recyclabilité et économie d'énergie,
- coût

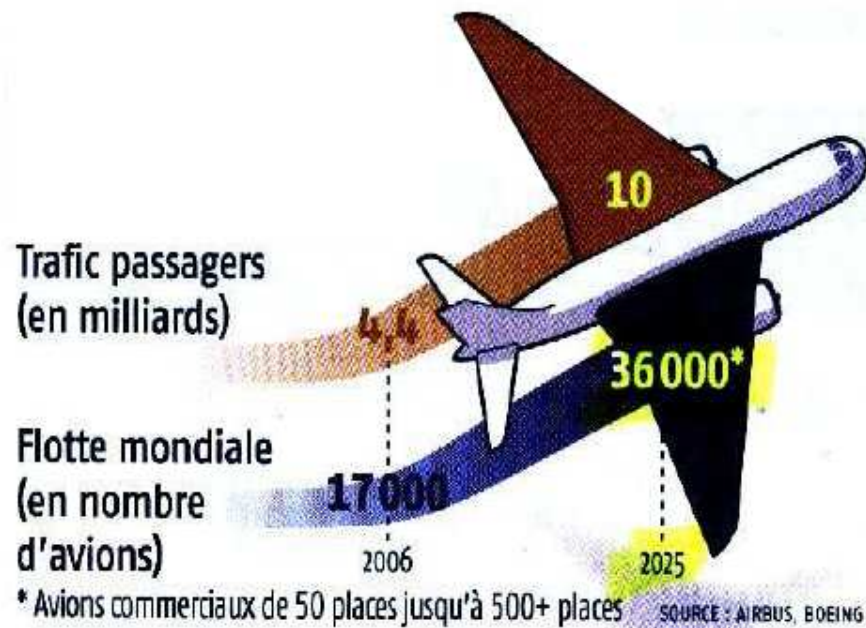
→ **Constat** : raréfaction des énergies fossiles et augmentation du trafic aérien,

→ **Challenge pour l'industrie du transport** : réduction combinée de la consommation en kérosène et de l'émission de particules polluantes.

→ **La clé** : allègement des avions, simplification de la mise en œuvre, moins d'éléments à assembler.

→ **Par quel moyen ?**

- Plus de matériaux composites dans les avions de demain.
- Réaliser de grandes pièces de structure complexes : placement et tissage en 3D des fibres, polymérisation en autoclave géant, injection de résine.



Part des composites dans les aérostructures



Perspectives d'avenir en aéronautique [USI][PTP]

Quelques chiffres

→ Début 2007, les avions sont constitués environ de 20% de matériaux composites (en masse, cas de l'A380) et de 80% d'alliages d'aluminium (35% plus lourds).

→ **Prévisions à l'horizon 2020** : inversion de cette proportion. L'Airbus A350 développé actuellement par la société E.A.D.S. sera constitué à 52 % de matériaux composites tandis que Boeing se lance dès maintenant dans la réalisation d'un fuselage entièrement en composites.

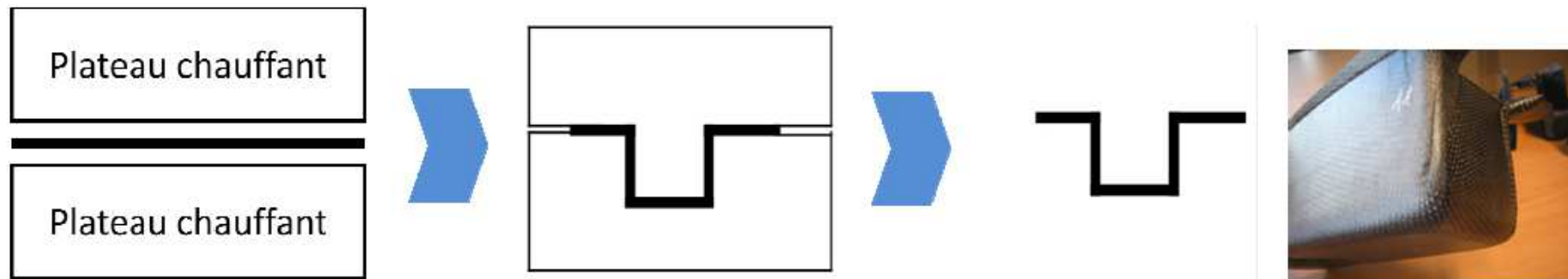
→ La généralisation des matériaux composites dans les structures aéronautiques pose problème à différents niveaux : conception, fabrication, assemblage et maîtrise de la fiabilité en service.

→ L'exploitation croissante des composites a mis en évidence les limites des matériaux à résine thermodurcissable (TD) utilisés majoritairement depuis plus de 30 ans [AIR] :

- Durée limite d'utilisation avant mise en œuvre nécessitant un stockage à base température pour les pré-imprégnés,
- Problématique de réticulation entraînant de nombreux défauts potentiels irréversibles et nécessitant une parfaite maîtrise et contrôle des cycles thermiques et de pression durant la réticulation,
- Procédé de mise en forme nécessitant beaucoup de produit consommables de préparation et des temps de cuisson variant de 6 à 11 heures avec les post-cuissons,
- Opérations manuelles de drapages qui sont chronophage et génératrice de la majorité des défauts de fabrication non réversibles,
- Problème de recyclabilité.

→ Emergence de nouveaux matériaux composites à fibres de carbone et résine thermoplastique (TP) hautes performances présentant un meilleur compromis :

- Pas de durée de vie limitée avant mise en œuvre et pas de stockage à base température car la résine n'évolue pas chimiquement en fonction de la température,
- Les cycles de mise en œuvre correspondent à une transformation physique réversible de la résine et peuvent par conséquent être repris en cas de problème,
- La mise en œuvre peut se faire par thermoformage à la presse permettant de supprimer les opérations et produits intermédiaires tels que le marouflage et les mastics,



Thermoformage des composites à matrice TP

- Le drapage manuel et les défauts engendrés peuvent être supprimés en utilisant des procédés de thermoformage,
- Assemblage de pièces par soudage et collage (suppression de l'opération de perçage et de la concentration de contraintes résultante).

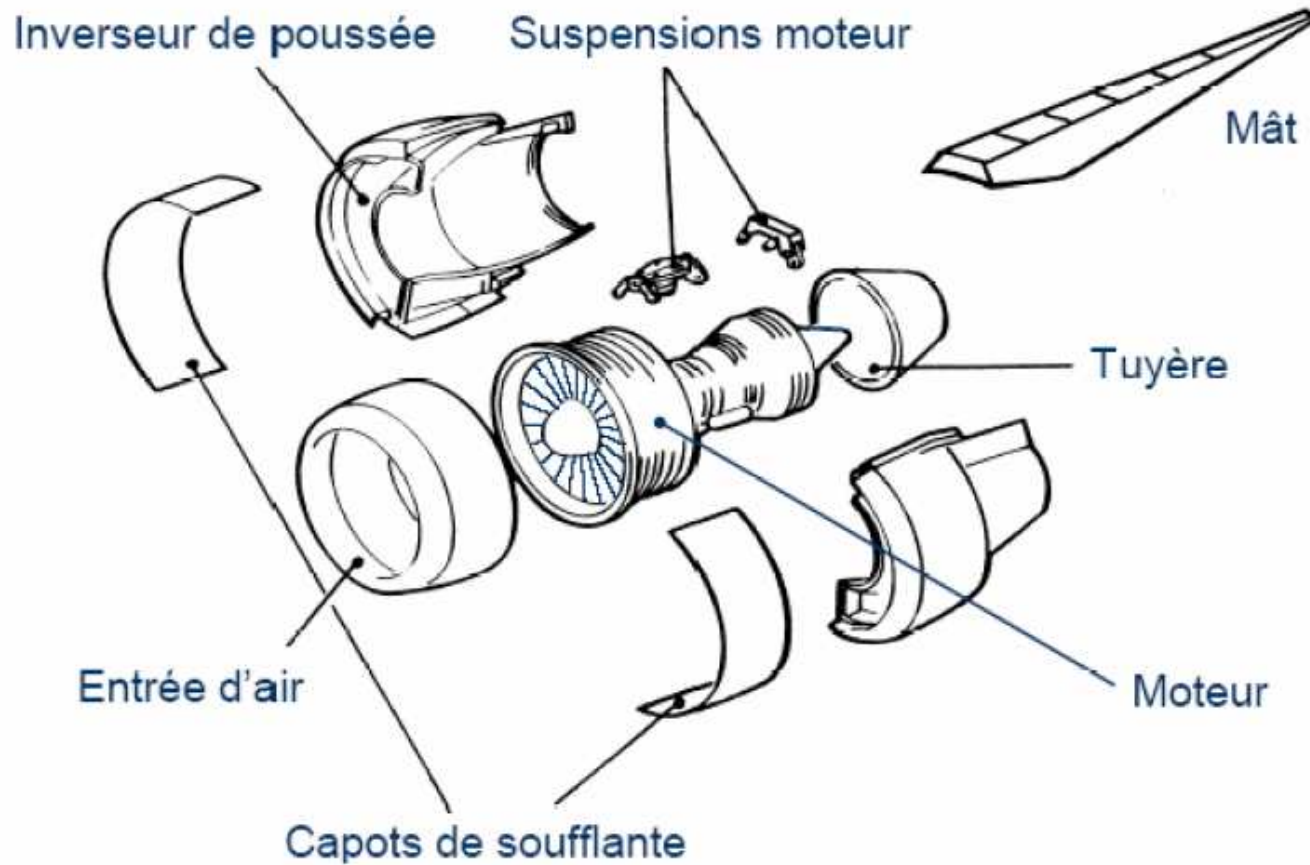
→ La qualification de ces composites innovants pour des applications futures réside principalement dans le respect de quatre critères :

- performances mécaniques et physiques,
- masse,
- coût,
- certification.

→ Toutes les pièces d'un avion ne sont pas soumises aux mêmes contraintes thermomécaniques.

→ Choix des matériaux en fonction des propriétés physicochimiques et mécaniques.

→ Dans les nacelles de moteurs d'avions : certaines pièces subissent des températures en service importantes (environ 120°C).



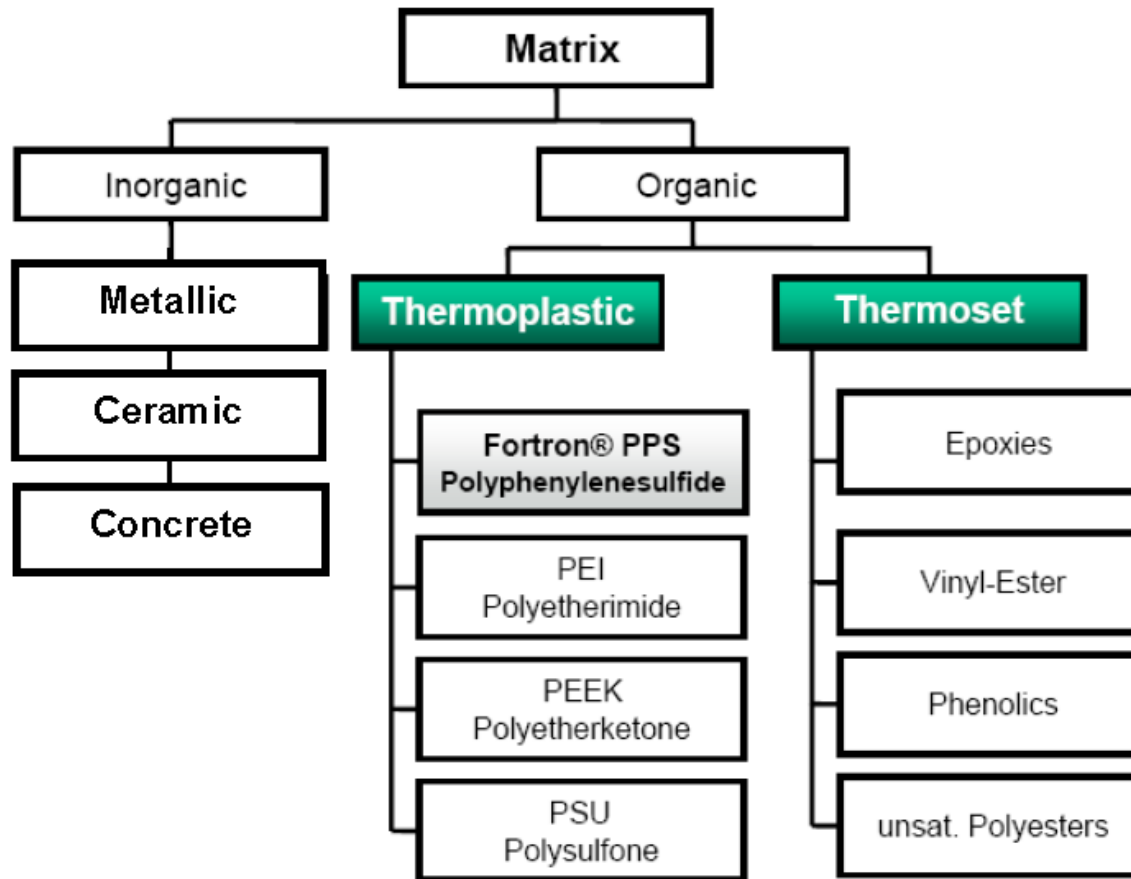
Nacelle de moteur d'avion en vue éclatée

A ces niveaux de température, deux résines TP se distinguent par leurs excellentes propriétés mécaniques :

- PEEK (Poly Ether Ether Keton),
- PPS (Poly Phenylene Sulfide).

→ Critère coût (du produit fini):

- Plaque (7 plis isotropes) carbone PPS : 105€/Kg
- Plaque (7 plis isotropes) carbone PEEK : 145€/Kg
- Plaque (7 plis isotropes) en carbone époxyde : 200€/Kg
- Chaudronnerie aluminium : 18€/Kg



Matrices thermoplastiques pour composites innovants [MAR]

Propriétés mécaniques pour des sollicitations monotones

→ Comparaison des caractéristiques mécaniques des stratifiés à matrice TP (PEEK ou PPS) ou à matrice TD (époxy) :

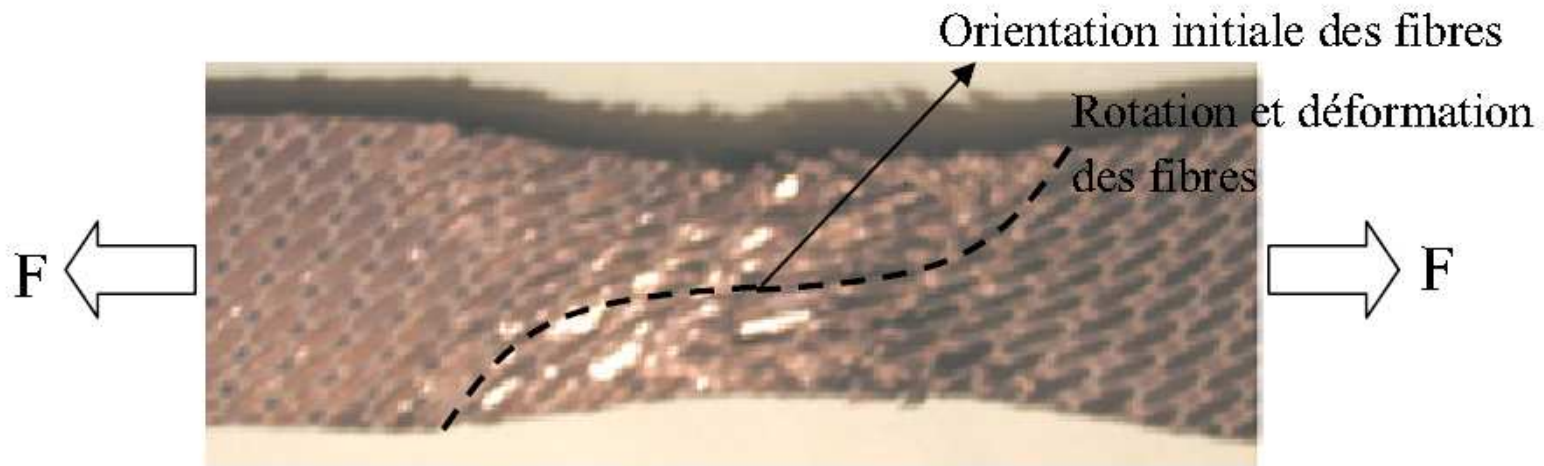
	Stratifiés tissés Carbone/époxy	Stratifiés tissés Carbone/PPS	Stratifiés tissés Carbone/PEEK
Fournisseur	Hexcel	Tencate	Porcher
Masse volumique (kg/dm ³)	1,55	1,6	1,4
Température transition vitreuse (°C)	Aucune	90	143
Température maximale d'utilisation (°C)	110	100	260
Conditions de validité (taux volumique de fibres)	23°C 60% fibres	23°C 50% fibres	23°C 60% fibres

Sollicitation		Propriétés mécaniques					
		E (GPa)	σ_R (MPa)	E (GPa)	σ_R (MPa)	E (GPa)	σ_R (MPa)
Traction	Chaîne	72	662	56	758	59,4	716
	Trame	69	592	54	755	-	-
Compression	Chaîne	64	576	51	644	-	716
	Trame	63	616	51	637	-	-
Cisaillement		5	109	4	119	-	147
Flexion	Chaîne	62	853	60	1027	54,9	862
	Trame	59	882	45	831	-	-
CIL	Chaîne		74,4		-		73,7
	Trame		75		-		-
Traction trouée			326		278		
Compression trouée			345		256		
Traction habitée (Matage)			459		844		

Tab. 1 - Propriétés physiques et mécaniques des stratifiés tissés à matrice TD et TP [PTP]

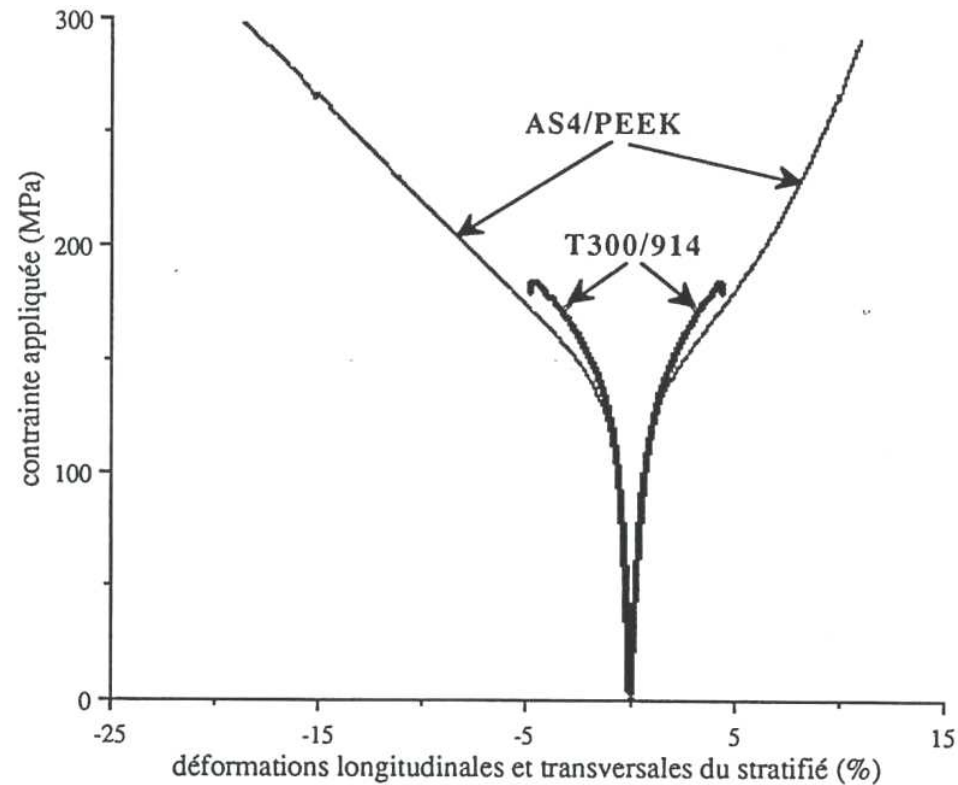
→ Le cisaillement plan (traction hors axes à 45°) est une configuration d'essai permettant d'observer la réponse mécanique du stratifié lorsque son comportement est dominé par celui de la matrice

→ Les fibres orientées à $\pm 45^\circ$ tendent à s'orienter selon l'axe de sollicitation (direction à 0°) entraînant une friction des couches en contact et par conséquent un délaminage important.



Observation de la striction associée à la rotation des fibres lors d'une sollicitation en traction de stratifiés $[\pm 45]$

→ Mise en évidence de la nature ductile de la matrice TP par rapport à un stratifié à matrice TD
On peut également observer l'évolution différente des déformations longitudinales (Direction 0°) et transversales (Direction 90°).



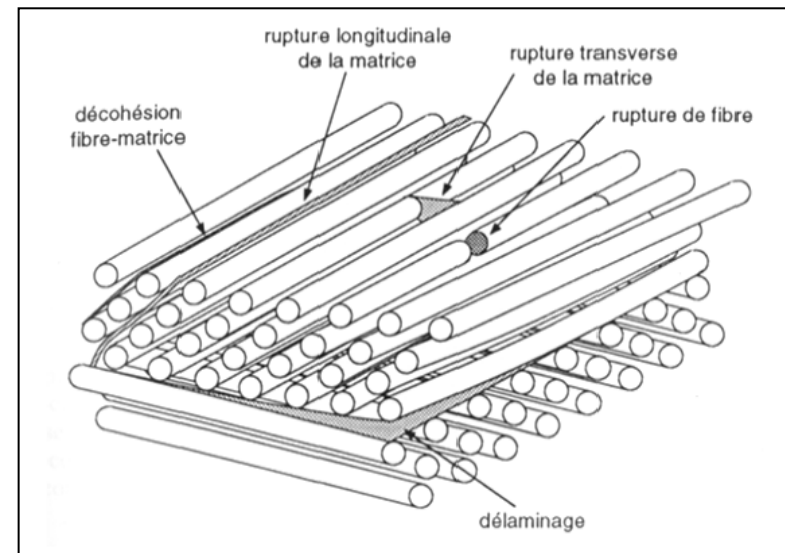
*Essai de cisaillement plan sur stratifiés [+/-45°] C/PEEK (AS4/PEEK) et C/époxy (T300/914)
[TOU]*

Comportement en fatigue

→ Ruine sous chargement cyclique des matériaux métalliques : initiation et propagation de défauts dominants (macrofissures).

→ Ruine sous chargement cyclique des composites renforcés par des fibres longues : développement et l'accumulation de divers types de défauts :

- rupture des fibres,
- fissuration transversale et longitudinale de la matrice,
- décohésion de l'interface fibre-matrice,
- délaminage entre les plis adjacents



→ Les dommages ne sont pas isolés dans les matériaux composites mais interconnectés rendant l'identification des chemins de fissure grandement complexe.

→ L'essentiel de l'endommagement du matériau s'initie et se développe bien avant sa ruine.

Comportement au fluage

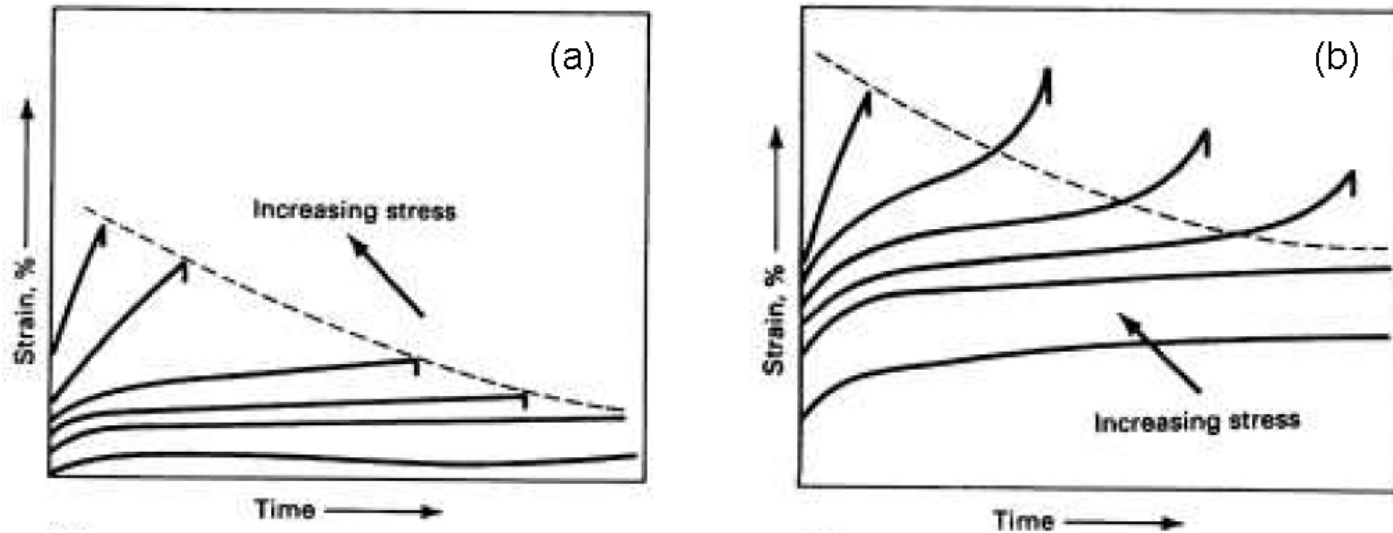
Si comportement dominant de la matrice :

→ Comportement en fatigue conditionné principalement par le comportement de la matrice polymère.

→ Initiation de fissure = étape critique de la vie en fatigue des polymères.

→ Egalement deux autres modes de ruine absents chez les métaux : faillite thermique et fluage pour certaines combinaisons des conditions de chargement.

- Le fluage s'opère dans un contexte de charges suffisamment élevées et de fréquences faibles.
- La faillite thermique s'opère pour des fréquences élevées où la perte d'énergie, due à l'amortissement inhérent important dans le polymère, ne peut se dissiper.
 - Augmentation significative de la température = ramollissement d'origine thermique et dégradation des propriétés mécaniques.



Courbes de fluage caractéristiques pour les matériaux polymères : (a) fragiles – (b) ductiles

→ Pour les composites à matrice TD :

En général, les pontages liés à la réticulation bloquent le mouvement de glissement des macromolécules les unes par rapport aux autres : pas de fluage.

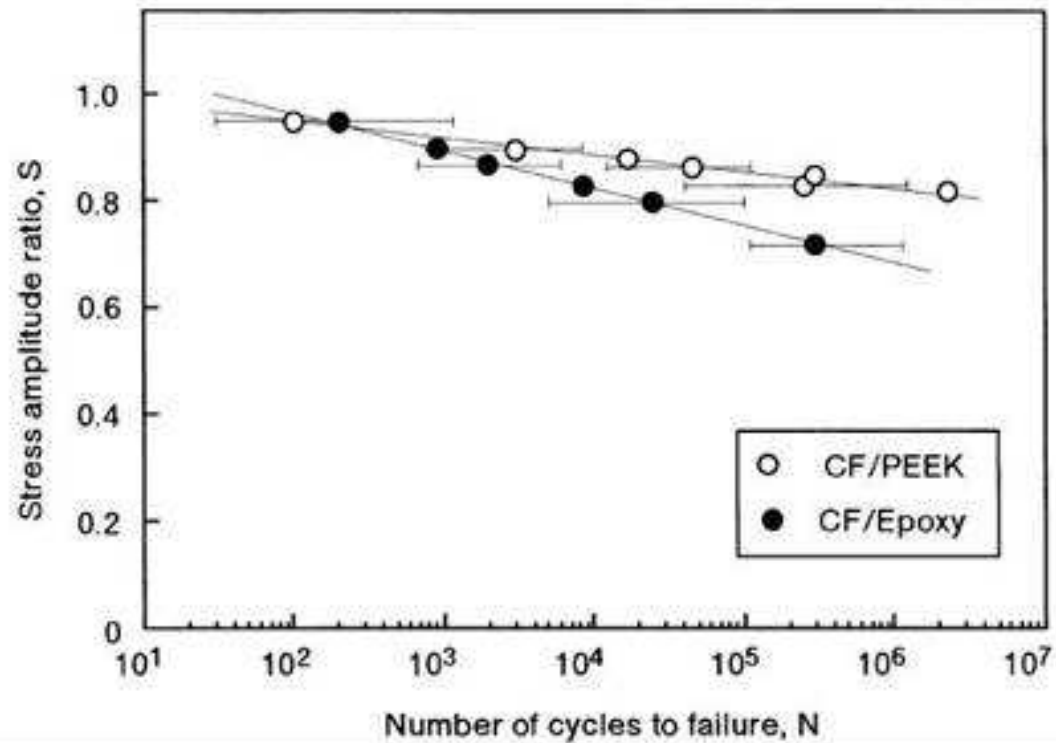
→ Pour les composites à matrice TP :

En l'absence de pontages, le mouvement de glissement des molécules est possible et accélère avec une température croissante.

- Pour les CFR TP amorphes (assimilables à de longs fils enchevêtrés) grande sensibilité au phénomène de fluage.
- Pour les CFR TP semi-cristallins, caractérisés par une phase cristalline, les sphérolites vont bloquer le mouvement de glissement des molécules.
 - Fluage des CFR TP semi-cristallins fonction du taux de cristallinité.

Comportement sous chargement cyclique des stratifiés non troués

- Globalement : la tenue en fatigue des stratifiés CF/PEEK (CF : Carbon Fibers) est plus longue que celle des stratifiés CF/Epoxy.
- Pas valable pour un niveau élevé de contrainte appliquée car la rupture des fibres très contraintes est suivie d'une décohésion interfaciale s'opérant dans les stratifiés carbone/époxy.
- Ce délaminage entraîne une relaxation des contraintes à l'extrémité des fibres cassées d'où une durée de vie accrue.
- Pour les stratifiés CF/PEEK : pas de relaxation car le délaminage ne se produit pas en raison d'une déformation plastique de la résine.
- Pour de faibles niveaux de contraintes : endommagement en fatigue conditionné par le comportement ductile de la matrice (allongement à rupture plus important) d'où une meilleure tenue en fatigue des stratifiés C/PEEK.

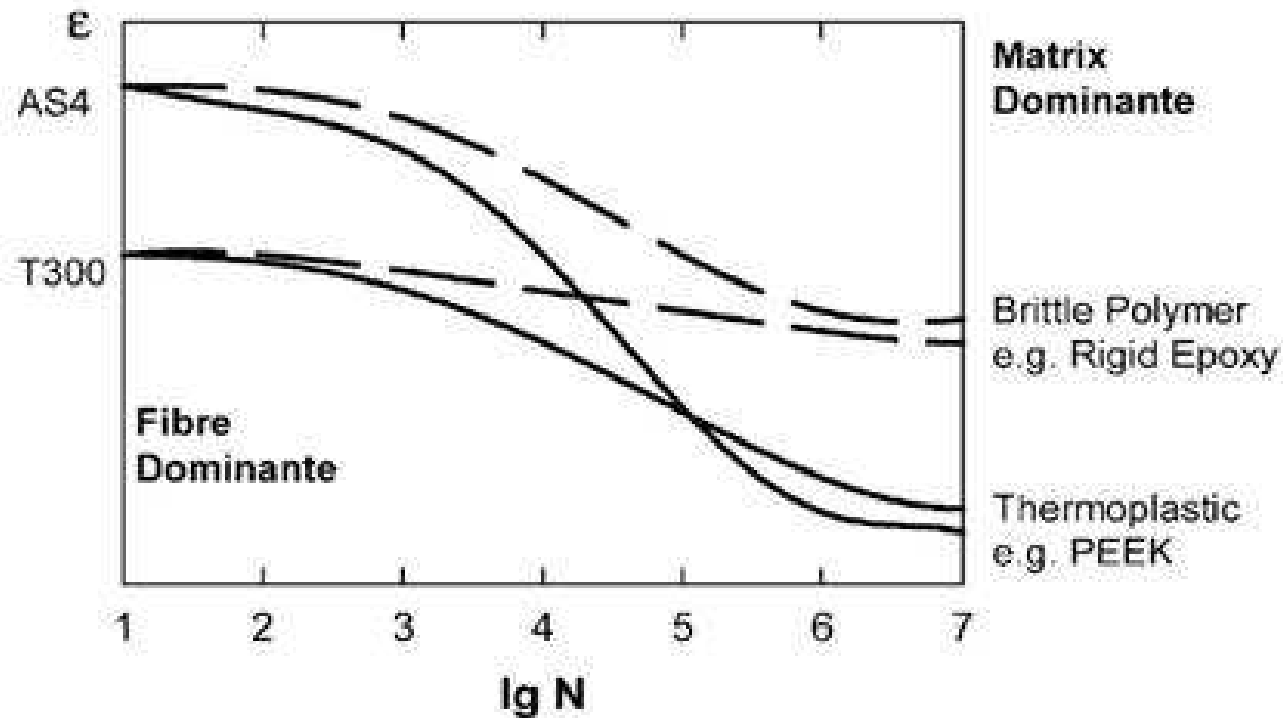


Courbes S-N pour des stratifiés à matrice époxy et PEEK renforcés par un tissu satin de fibres de carbone [SON]

→ Les propriétés en fatigue des stratifiés dépendent également de la séquence d'empilement et du type de renfort.

→ Influence de la nature de la matrice sur la tenue en fatigue :

Celle des stratifiés à matrice époxy fragile (« brittle ») est meilleure que celle des stratifiés à matrice thermoplastique ductile, pour un renfort identique (fibres AS4 : haut module - fibres T300 : haute résistance).



Représentation schématique du comportement en fatigue de stratifiés UD à fibres de carbone (T300 et AS4) à matrice TD (époxy) ou TP (PEEK) [ZHA]

→ Explication ?

Formation et croissance de microfissures au sein de la matrice fragile, phénomène contribuant à dissiper l'énergie apportée par la sollicitation cyclique : redistribution des contraintes sur des bouts de fissure multiples (absente dans les matrice ductiles)

Comportement sous chargement cyclique des stratifiés troués

→ Critère prépondérant pour l'exploitation industrielle des composites à matrice TP

→ Assemblage d'éléments structuraux généralement réalisé au moyen de techniques d'assemblages mécaniques telles que le boulonnage ou le rivetage.

→ Ces techniques impliquent le perçage : affaiblissement de la tenue mécanique en raison des concentrations de contraintes autour des trous.

→ Selon le composite choisi, cet abattement peut être plus ou moins important : information essentielle pour le B.E.

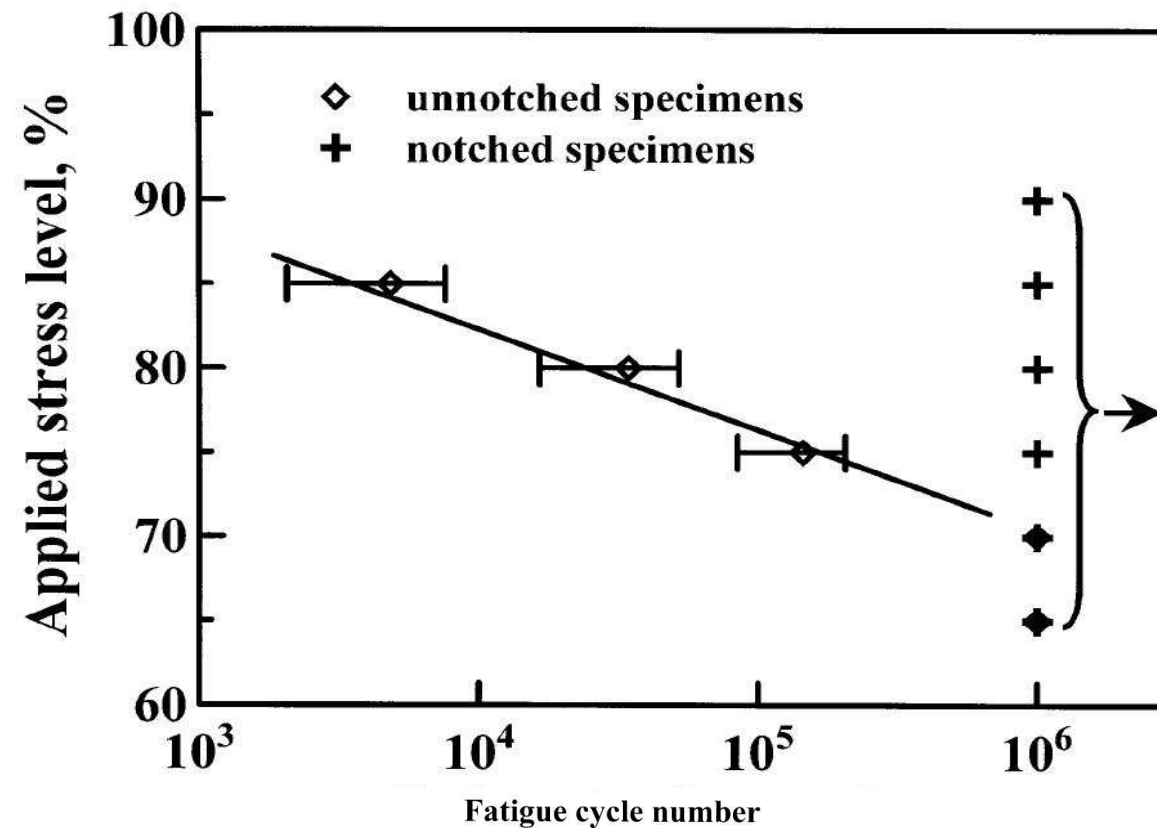
→ Différents modes endommagement en fatigue des stratifiés troués : fissuration de la matrice, décohésion fibres/matrice, délaminage et rupture des fibres.

→ Ces mécanismes dit de "wear-out" (usure) s'accroissent, se propagent et conduisent à la ruine du stratifié troué.

→ D'autre part, ces endommagements participent à une redistribution des contraintes au bord du trou plus uniforme : mécanisme dit de "wear-in".

→ Augmentation de la résistance résiduelle et allongement de la vie en fatigue du stratifié.

→ La résistance résiduelle instantanée peut être considérée comme une superposition des mécanismes de "wear-in" et de "wear-out".



Courbe S-N de stratifiés [0/90]_{4S} AS4/PEEK troués et non-troués [WAN]

→ Comparaison de la tenue en fatigue pour un niveau de chargement de 85% d'un stratifié non-troué (unnotched) et troué (notched).

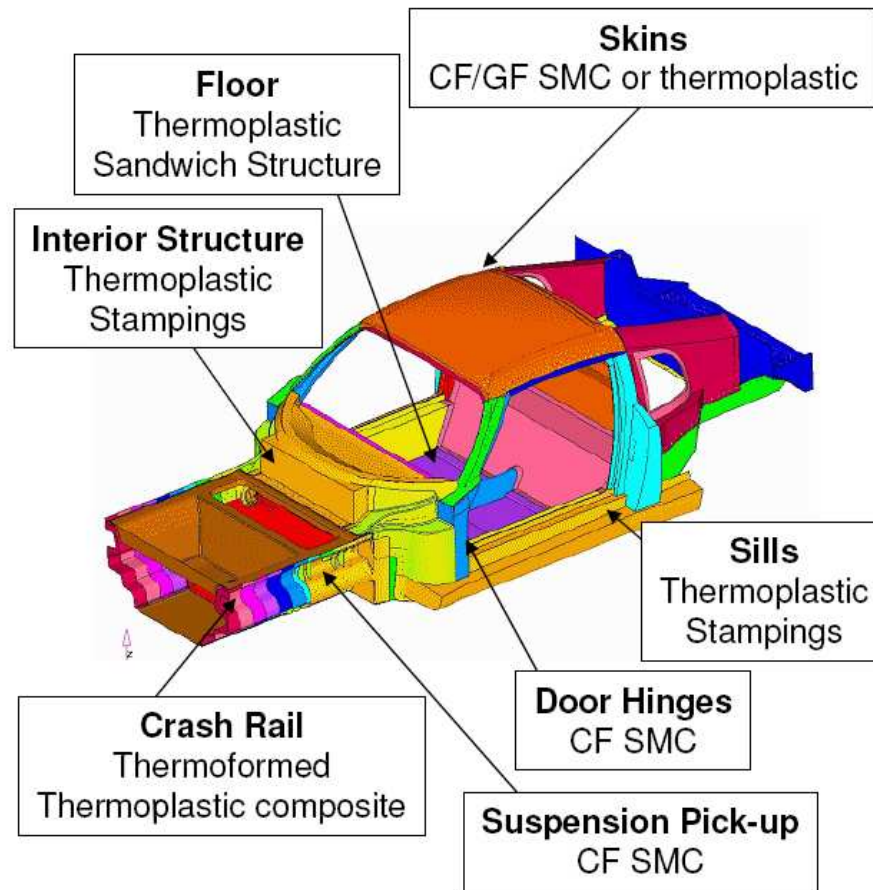
→ Résultat surprenant : le stratifié troué présente une meilleure tenue en fatigue que le stratifié non troué.

→ La présence du trou améliore la durée de vie en fatigue !

Applications

Intérêt des composites à matrice TP pour l'aéronautique mais leurs qualités intrinsèques de tolérance au dommage notamment offrent un large champ d'applications potentielles.

→ On peut citer le génie civil (poutres, barres d'armatures), l'automobile, l'industrie ferroviaire, l'aérospatiale mais également des biens de consommation divers (casques, équipements sportifs, prothèses externes) ou encore des conduites (huile, gaz) ainsi que des éoliennes et des écrans de protection.



Utilisation de composites à matrice TP dans une voiture [LOT]

→ Dans une voiture : réduction de poids de 20%, excellent état de surface, possibilité de souder/coller les différentes pièces.

→ Le procédé SMC (Sheet Molding Compound) est la technologie de mise en œuvre des polymères renforcés la plus utilisée.

→ Application d'un cycle thermique sur de plaques semi-finies puis une étape de compression dans un moule : formes complexes avec un très bon état de surface.

→ La plaque semi-finie est généralement un pré-imprégné fibres (verre ou carbone) associées à une résine TD.

→ Le thermoformage (ou estampage) est une technologie similaire pour les pré-imprégnés fibreux à matrice TP.

→ Quelques exemples de pièces aéronautiques TP. Le bord d'attaque de l'aile de l'A380 constitué d'un assemblage de 8 pièces faisant 26m et permet un gain de poids de 400 kg.



Pièces en composites à matrice TP :

(a) A340 – (b) Bord d'attaque de l'aile (pièce jaune) de l'A380 [MAR]

3.2.2 Les composites à matrice métallique renforcée :

→ Les MMCs associent une matrice métallique avec un renfort continu ou discontinu non-métallique (souvent céramique).

→ En comparaison avec les CMO, les procédés de mise en œuvre sont très différents et beaucoup plus complexes : métallurgie des poudres, moulage-forgeage, frittage en phase liquide, infiltration par compactage et le soudage par fusion.

→ Complexité des procédés : problématique liée à la cohésion à l'interface fibres/matrice.

→ Cohésion obtenue à partir d'une matrice en phase liquide ou semi-liquide. La température de fusion ne doit pas être trop élevée afin de pas détériorer le renfort.

→ Pour les applications nécessitant de bonnes propriétés spécifiques, l'aluminium et ses alliages sont de bons candidats pour la matrice.

CMAI (Composites à Matrice Aluminium) très largement développés mais il existe également des CMMg (Composites à Matrice Magnésium), les CMTi (Composites à Matrice Titane), les CMC (Composites à Matrice Cuivre) et enfin les CMR (Composites à Matrice Réfractaire à base de superalliages).

Historiquement :

→ MMCs développés à partir des années 1960 avec l'utilisation d'une fibre monofilament de bore pour des applications confidentielles dans l'aéronautique et dans l'aérospatiale (en raison du coût très élevé de cette fibre).

→ Dans les années 1980 : mise au point des fibres céramiques = nouvel élan pour les MMCs avec des applications notamment dans l'automobile.

→ Plusieurs catégories de MMCs selon la nature du renfort :

■ Métaux renforcés par des particules céramiques (SiC, Al₂O₃,...) :

Selon l'application, la fraction volumique de renfort peut varier de 25% (applications structurales) à 80% (électronique).

→ Comportement quasi isotrope.

→ Avantages : propriétés mécaniques significativement meilleures par rapport aux métaux non renforcés pour un coût modéré.

→ Inconvénients :

- propriétés mécaniques inférieures à celles des MMCs à fibres continues
- Les particules pénalisent la ductilité et la ténacité de la matrice.

■ Métaux renforcés par des fibres courtes ou des trichites :

Selon les applications, la fraction volumique en fibres courtes varie de 5 à 25% et celle des trichites de 15 à 25%.

→ Leurs propriétés dépendent de l'orientation des renforts :

- Pour une orientation aléatoire, le comportement du composite est isotrope.
- L'extrusion tend à orienter les renforts d'où un comportement anisotrope.

→ Ces renforts altèrent la ductilité et la ténacité de la matrice. Ils sont couramment utilisés dans les moteurs des voitures.

■ Métaux renforcés par des fibres continues (UD ou tissées) :

→ Comportement anisotrope

→ Avantages : résistance et rigidité transversales relativement importantes comparativement aux PMCs.

La matrice métallique possède des propriétés mécaniques non négligeables par rapport à la plupart des renforts et contribue de manière importante au comportement du composite.

→ Inconvénient : comportement fragile.

Problématique pour l'assemblage puisque les trous de fixation sont le siège de concentration de contraintes qu'il n'est pas possible d'atténuer.

■ Métaux renforcés par des monofilaments :

Le renfort possède un diamètre relativement important (une centaine de μm) lui procurant une certaine rigidité en flexion.

→ Fibres de bore et de carbure de silicium élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un monofilament de tungstène ou de carbone.

→ Difficilement tissables.

■ Métaux renforcés par des mèches multifilamentaires :

Renfort = mèche de 300 à 10000 filaments qu'il est possible de tisser ou d'enrouler.

■ Métaux à renforts hybrides :

Association de mèches multifilamentaires avec une fine dispersion de particules entre les fibres.

→ Les particules écartent les filaments et facilitent l'imprégnation des fibres par la matrice.

■ MMCs à phase inter-pénétrante :

Métaux renforcés par une mousse céramique.

■ Métaux frittés en phase liquide :

Lors du frittage, association d'une poudre métallique (de cobalt ou de tungstène) et de particules de carbure pour obtenir un composite de carbure cimenté.

→ Catégorisation des MMCs selon que le renfort est continu ou discontinu :

(a)

Type	Nature chimique	Densité à 20 °C	Diamètre (µm)	Module d'Young (GPa)	Résistance à la rupture (GPa)
Particules	SiC	3,2	5 à 50	480	
	TiC	4,7	5 à 10	310 à 380	
	B ₄ C	2,5	5	390	
	Al ₂ O ₃	3,9	3 à 30	390	
Trichites	SiC	3,2	0,1 à 0,5	400 à 700	3 à 14
	K ₂ O _n (TiO ₂)	3,3	0,2 à 0,5	280	17
Fibres courtes	Al ₂ O ₃	3,3	3	300	2
	Al ₂ O ₃ + SiO ₂	2,7	3	158	2,5

(b)

Type	Nature chimique	Densité	Diamètre (µm)	Module d'Young (GPa)	Résistance à la rupture (GPa)
Mèche multi-filamentaire	PCS-SiC	2,55	15	196	2,75
	PTCS-SiC	2,4	8 à 12	200	2,8
	Al ₂ O _{3α}	3,9	20	379	1,4
	Al ₂ O ₃ -SiO ₂	3,2	17	200	1,5
	Carbone - HR(1)	1,76	7	230	3,53
	Carbone - HM(2)	1,81	6	392	2,74
	Acier	7,74	13	196	4,12
Mono-filament	Bore	2,49	140	392	3,5
	SiC	3	140	427	3,5
	Acier	7,8	150	200	2,2

(1) HR haute résistance.
(2) HM haut module.

Caractéristiques des renforts utilisés dans les MMCs : (a) discontinues – (b) continues [TIM]

Principaux MMCs à renforts continus selon l'application visée :

- Matrice aluminium et fibres de bore, carbure de silicium, alumine, ou graphite,
- Matrice magnésium et fibres de d'alumine ou de graphite,
- Matrice titane et fibres de carbure de silicium ou de bore revêtu,
- Matrice cuivre et fibres de graphite ou de carbure de silicium. On peut aussi associer à cette matrice des monofilaments de niobium-titane,
- Matrice superalliage (à haute température de fusion telle qu'une matrice à base de fer, de nickel ou de cobalt) et monofilaments de tungstène.

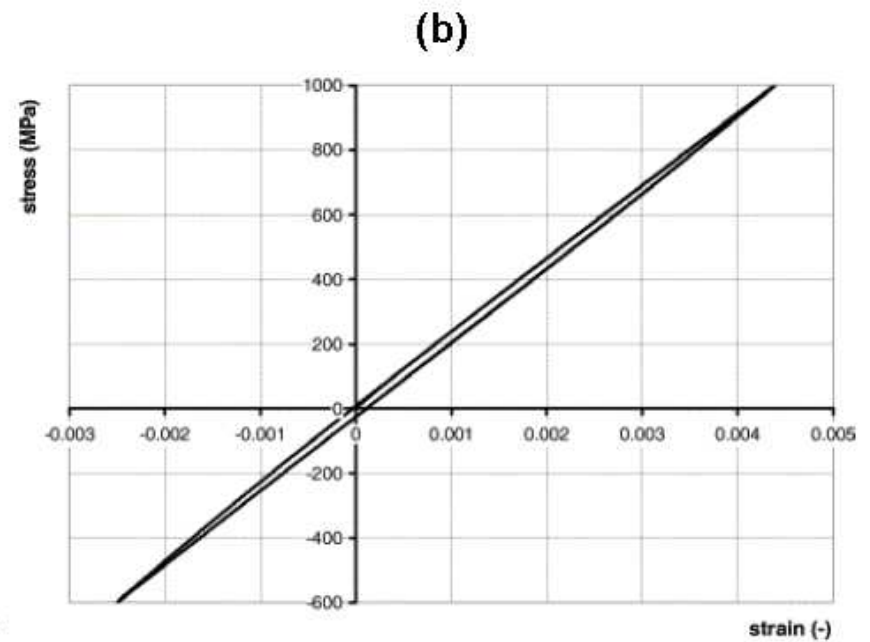
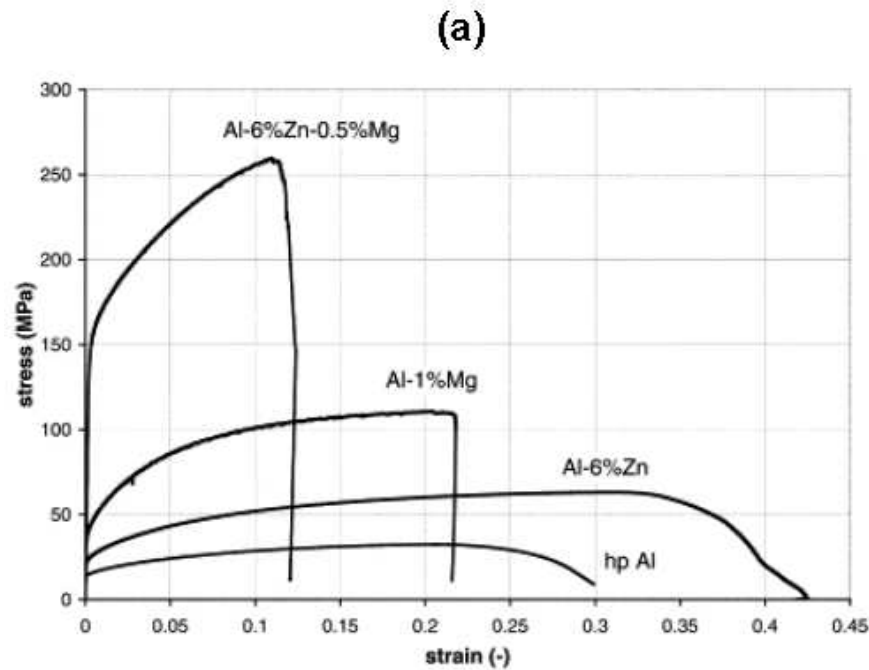
Propriétés des MMCs à renforts continus

Exemple : MMC à matrice aluminium renforcée par des fibres de céramique Nextel® (Société 3M) → illustration du potentiel des MMCs

→ La résistance en traction longitudinale est de 1GPa tandis que la résistance en compression longitudinale est de 600 MPa.

→ Résistance transverse en traction de l'ordre de 200 MPa.

→ Densité du matériau : légèrement supérieure à 3 g.cm⁻³.



Réponse contrainte-déformation : (a) matrices métalliques à base d'aluminium non-renforcées moulées – (b) matrice aluminium renforcée par des fibres de céramique Nextel™ avec un taux volumique de fibres de 60% [NEX]

→ Comparaison des propriétés de MMCs renforcés couramment utilisés :

- alliage d'aluminium 359 renforcé par 20% de particules de SiC
- aluminium pur renforcé par 60% de fibres longues de Al₂O₃
- aluminium pur renforcé par 60% de fibres longues de carbone
- manganèse renforcé par 60% de fibres longues de carbone
- titane TA6V renforcé par 35% de monofilaments de SiC.

	Al 359/SiC	Al/Al ₂ O ₃	Al/C	Mg/C	TA6V/SiC
Densité (g.cm ⁻³)	2,85	3,4	2,2	1,9	4,5
Module d'Young longitudinal (GPa)	98,6	240	550	450	220
Module d'Young transversal (GPa)		130	200	160	138
Résistance en traction (MPa)	359	1600	1300	1500	1450
Allongement à rupture (%)	0,4				
Résistance en compression (MPa)		1700	1000	1000	414
Contrainte d'écoulement (MPa)	338				
Dureté (HRB)	77				
Dilatation thermique à 20 °C (°C ⁻¹)	20,7.10 ⁻⁶				
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	144			400	

MMCs vs métaux monolithiques - MMCs vs PMCs – MMCs vs CMCs

→ Avantages des MMCs sur les métaux monolithiques :

- Rigidité et résistance spécifiques plus élevées,
- Meilleur comportement en fatigue,
- Meilleures propriétés à hautes températures (meilleure résistance et sensibilité moindre au fluage),
- Coefficients de dilatation thermique plus faibles,
- Meilleure résistance à l'usure.

→ Avantages des MMCs sur les PMCs :

- Température de service plus élevée,
- Résistance au feu,
- Résistance et rigidité transverses plus élevées,
- Insensible à l'humidité,
- Conductivité thermique et électrique plus élevée,
- Meilleure résistance aux radiations

→ Inconvénients majeurs :

- Prix plus élevé de certains matériaux constitutifs,
- Technologie relativement immature,
- Recul sur l'utilisation limitée à certaines conditions de vie en service,
- Mise en œuvre complexe pour les MMCs à renforts fibreux,
- Les MMCs à renforts fibreux sont caractérisés par des matériaux constitutifs aux coefficients de dilatation thermique très différents. Il en résulte d'importantes contraintes résiduelles quand le composite est soumis à des gradients de température élevés.

→ Comparaison des MMCs et CMCs :

- Les MMCs sont destinés à des environnements en température moins sévères.
- Densité plus importante
- Comportement moins fragile.
- Mise en œuvre est également complexe.

Quelques applications des MMCs

→ Rotors de freins du train à grande vitesse allemand ICE : réalisés à partir d'une matrice en alliage d'aluminium et de particules de SiC.

→ Comparativement aux matériaux conventionnels tels que le fer moulé (120 kg/pièce), la même pièce en MMC pèse seulement 76 kg, soit un gain de 63% !

(a)



(b)



(c)



(d)



Quelques applications des MMCs : (a) rotors de freins ferroviaires – (b) éléments de freins automobiles – (c) manivelle de moteur de course – (d) culasse de moteur diesel [CAY][TIM]

→ De nombreuses pièces automobiles visant à améliorer la résistance à l'usure des pièces de frottement (pistons, chemises, pièces de freinage...).

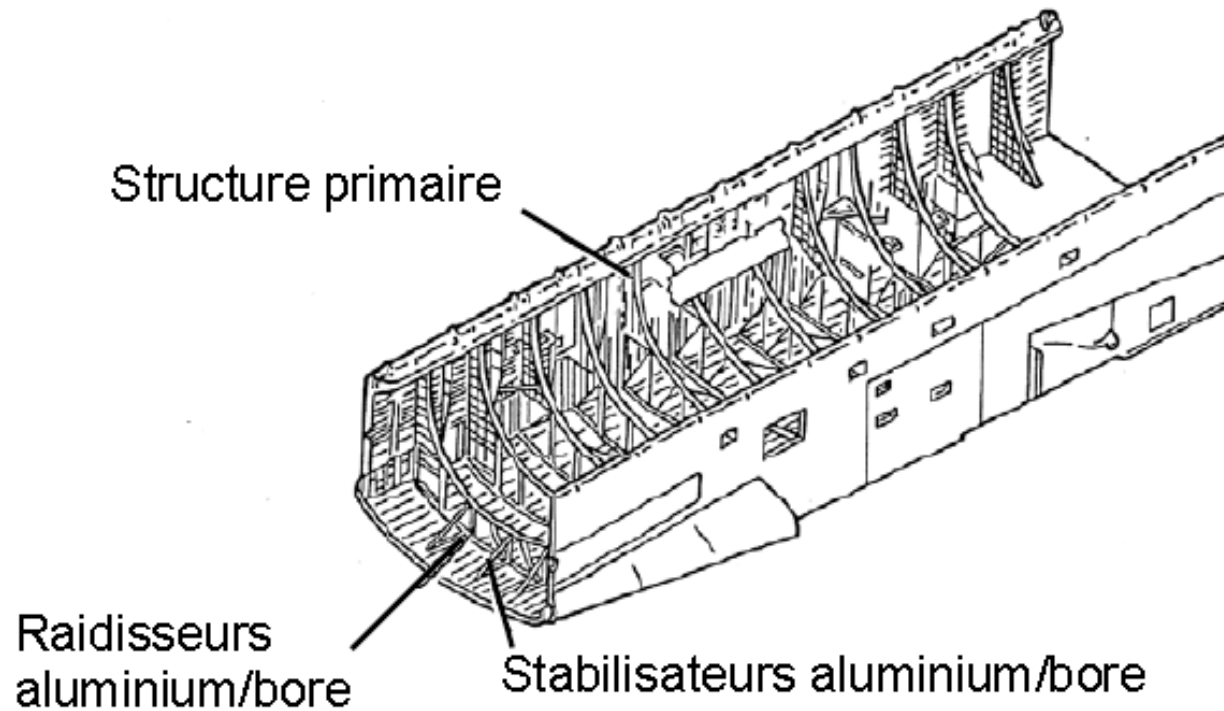
→ Emploi des MMcs pour améliorer les propriétés mécaniques spécifiques des pièces moteurs mobiles (axe de transmission, bielle, axe de piston...).

→ Manivelles de moteur de voiture de course réalisées en aluminium renforcé par des fibres continues : gain de 40% par rapport à des manivelles en acier, plus résistantes, plus rigides et amortissent mieux les vibrations.

→ Application dans des culasses de moteur diesel en raison d'une amélioration de la tenue à la fatigue thermique.

→ En aéronautique et aérospatiale :

Utilisation pour leurs propriétés mécaniques à des températures moyennement élevées tels que stabilisateurs ou raidisseurs en aluminium renforcé par des fibres continues de bore.



Structure intermédiaire de fuselage de navette spatiale [JAN]

Perspectives d'avenir des MMCs

→ MMCs = matériaux de pointe qui, par définition, sont chers.

→ Outre leur prix lié à des modes d'élaboration complexes, leur généralisation est également freinée par un manque de données de références sur ces matériaux.

→ Par rapport aux alliages métalliques monolithiques correspondant, les MMCs présentent un comportement ductile moindre quand ils sont renforcés par des fibres céramiques.

→ Utilisation des MMCs pour des applications de « niches » industrielles où la combinaison de leurs propriétés mécaniques spécifiques, physiques (faible dilatation thermique, grande conductivité thermique) et techniques (bonne soudabilité, bonne résistance à l'usure) est particulièrement adaptée.

→ Matériaux en pleine évolution dont le potentiel d'association matrices métalliques/fibres n'a été que partiellement exploré.

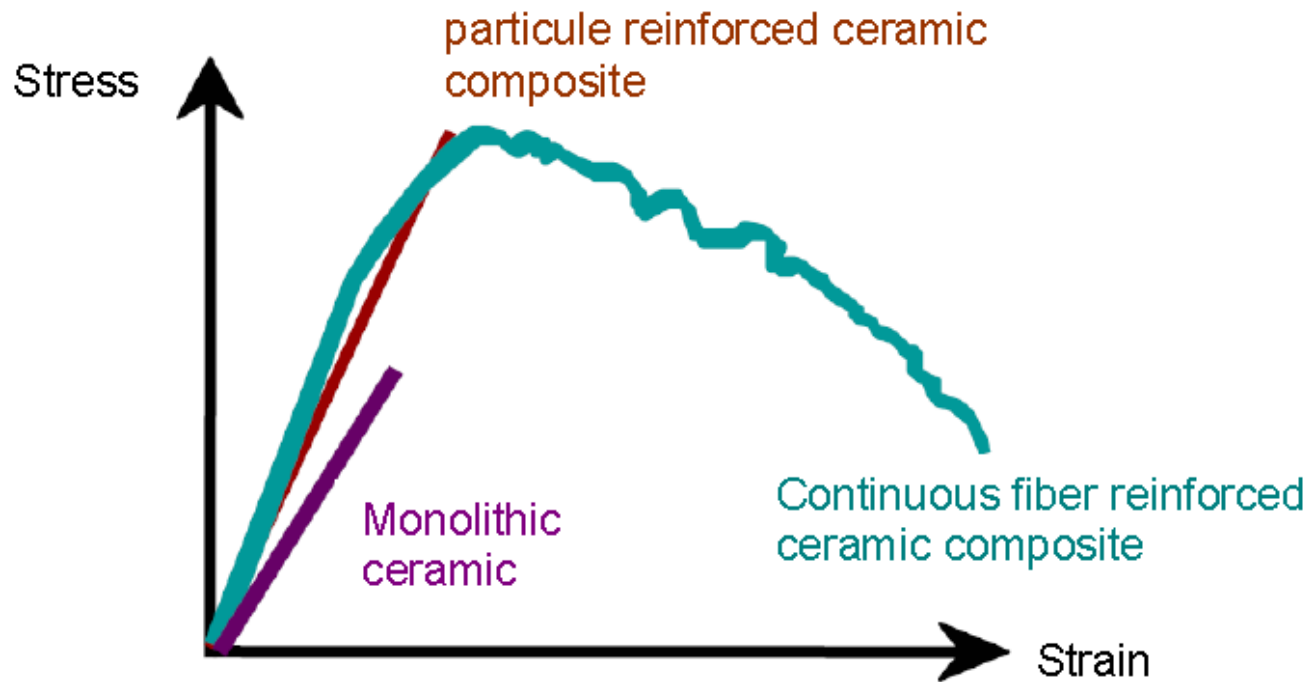
3.2.3 Les composites à matrice céramique renforcée par des fibres longues :

CMCs développés pour surmonter fragilité et manque de fiabilité intrinsèques de céramiques monolithiques,

→ Perspective d'utilisation des céramiques pour des pièces structurales soumises à des environnements sévères.

Quelques exemples caractéristiques d'application :

Moteurs de fusée ou d'avion, turbines à gaz pour les centrales électriques, boucliers thermiques pour navette spatiale, mur primaire des réacteurs de fusion, freins d'avions, fours pour traitement thermique...



Comportement à rupture des céramiques monolithiques et de composites à matrice céramique renforcée par des particules ou des fibres continues [UBC]

→ Utilisation des CMCs dans les moteurs de pointe

→ Intérêt : élever la température à laquelle le moteur peut fonctionner voire supprimer les fluides de refroidissement pour améliorer le rendement.

→ Utilisation de CMCs légers à la place des superalliages ou des métaux réfractaires (lourds)

→ Intérêt : gain de masse significatif.

→ Nombreuses propriétés intéressantes des CMCs :

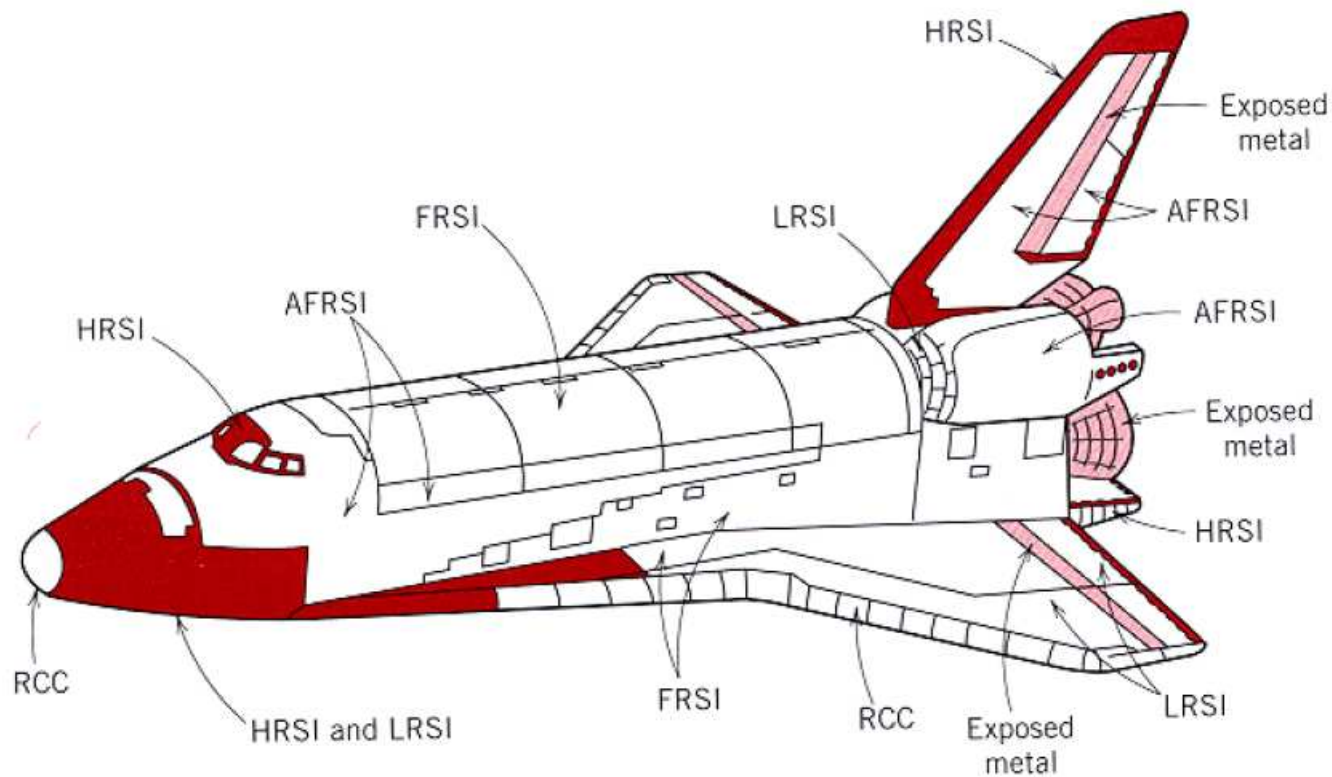
- stabilité à haute température,
- grande résistance aux chocs thermiques,
- dureté élevée,
- grande résistance à la corrosion,
- faible densité,
- propriétés insensibles au magnétisme et à la conduction électrique
- souplesse dans la conception en ingénierie.

→ CMCs = matériaux thermostructuraux prometteurs.

→ Principales limites :

- manque de renforts adéquats,
- difficultés de mise en œuvre,
- durée de vie médiocre,
- coût élevé.

→ En conclusion : utilisation confinée à des applications de pointe.



- LRSI : Low-temperature Reusable Surface Insulation
- HRSI : High-temperature Reusable Surface Insulation
- FRSI : Flexible Reusable Surface Insulation
- AFRSI : Advanced Flexible Reusable Surface Insulation
- RCC : Reusable Carbon-Carbon

Fig. – Pièces CMCs dans la navette spatiale Columbia [JAN]

CMCs oxydes et non-oxydes

CMCs dépendent de la composition chimique de la matrice et du renfort. Deux catégories :

■ CMCs oxydes :

Adaptés pour des applications à long terme dans des atmosphères oxydantes.

→ Matrices oxydes : alumine (Al_2O_3), silice, mullite, aluminosilicate de baryum, de lithium ou de calcium.

→ Alumine et mullite largement utilisées en raison de leur stabilité thermique et chimique en service ainsi que leur compatibilité avec les renforts courants.

→ Fibres oxydes (alumine, silice) subissent une croissance des grains à hautes températures dont résulte une dégradation de la résistance de la fibre.

→ Faible résistance au fluage et densité deux fois plus élevée que celle des fibres de carbone.

■ CMCs non-oxydes :

De loin les plus utilisés même en atmosphère oxydante car plus matures et plus stables.

→ Possèdent des propriétés structurelles supérieures, une meilleure dureté et dans certains environnements une résistance à la corrosion plus élevée.

→ Exemples de CMCs non-oxydes : carbure de silicium (SiC – le plus utilisé) ou de bore (BC), le nitrure de silicium (Si₃N₄ – applications nécessitant une résistance élevée), de bore (BN) ou d'aluminium (AlN – applications nécessitant une conductivité thermique importante).

→ Fibres non-oxydes les plus performantes : carbone et carbure de silicium en raison de leurs propriétés en termes de rigidité, résistance à la rupture, réfractairité et densité.

→ Problèmes de compatibilité matrice/renfort à hautes températures : association de fibres non-oxydes avec des matrices non-oxydes.

→ Premiers CMCs non-oxydes : pièces en composites carbone/carbone (matrice/fibres) intégrées dans des structures soumises à des conditions en service extrêmement sévères (moteur de fusée ou bouclier thermique) et avec une durée de vie courte.

→ Composites carbone/carbure de silicium et carbure de silicium/ carbure de silicium développés afin d'augmenter la résistance à l'oxydation des CMCs et donc leur durée de vie en atmosphère oxydante.

Composites à matrice céramique renforcée

→ Rôle du renfort : modifier le comportement fragile des céramiques monolithiques.

→ Matrice céramique renforcée soit par des renforts discontinus (particules, trichite ou encore fragments de fibres) soit par des fibres continues.

→ Premiers CMCs : renforts discontinus dans une matrice céramique.

→ Mise en œuvre (celle des céramiques monolithiques) peu coûteuse (15 à 110 \$ par kg) .

→ Renforts discontinus :

- carbure de silicium (le plus couramment utilisé en raison de sa compatibilité avec une large gamme de matrices oxydes et non-oxydes).
Application typique : outils d'usinage (composites SiC/Si₃N₄).
- trichite (whiskers) : la plus intéressante pour les propriétés mécaniques du CMC mais nocif pour la santé.

→ Plus récemment : CMCs à renfort fibreux continu pour optimiser les propriétés structurales.

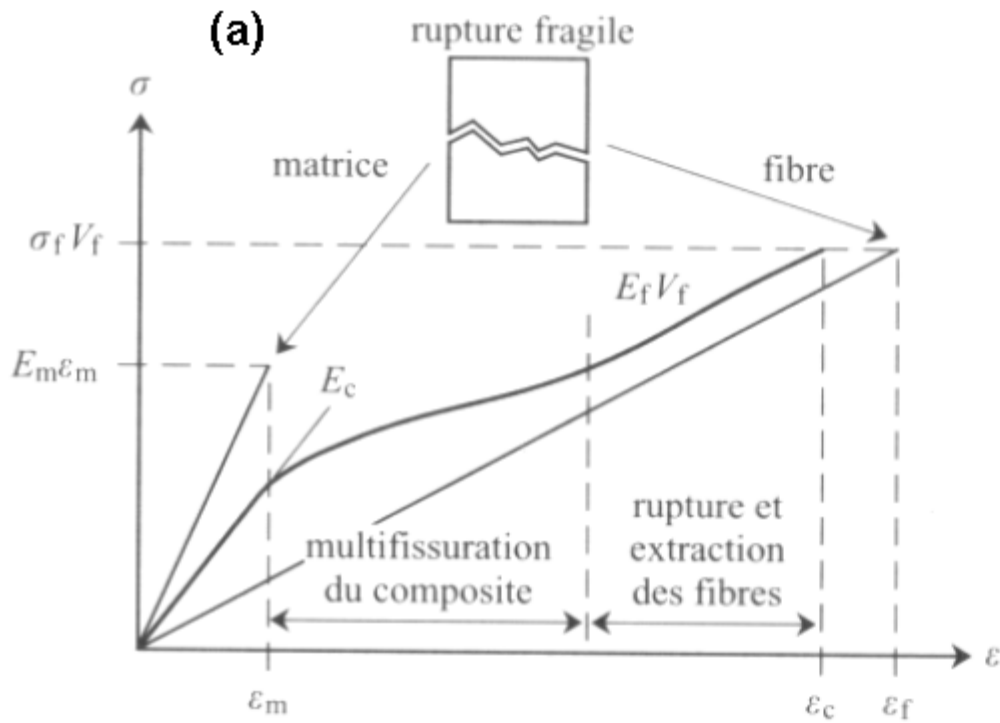
→ Mise en œuvre et le design spécifiques et coûteux (Actuellement de 1100 à 11000 \$ par kg !).

→ Fibres continues sous la forme de mono-filament ou de mèches multi-filaments.

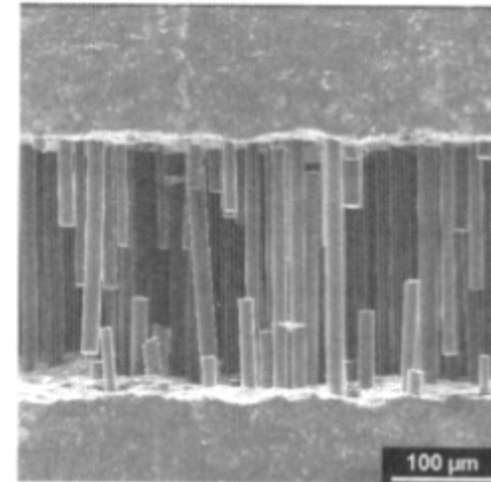
- Nature des fibres : verre, mullite, alumine, carbone et carbure de silicium.
- SiC : le plus utilisé en raison de sa grande résistance, de sa rigidité et de sa stabilité thermique.
- Pour $T < 100^\circ\text{C}$ et temps d'exposition limité : fibres de mullite largement utilisées (faible coût)

Propriétés mécaniques des CMCs

- Du point de vue mécanique, les fibres continues justifient tout leur intérêt car elles procurent un comportement pseudo-ductile à un matériau céramique au comportement fragile.
- Association fibres continues / matrice céramique : améliorer la résistance mécanique et d'augmenter l'allongement à rupture (0,3 à 2%).
- Comportement du CMC fibreux : endommagement progressif (multi-fissuration du composite puis rupture des fibres) se traduisant par une forte énergie dissipative à la rupture).



(b)



(a) Comportement en traction des CMCs et des constituants
 (b) Endommagement progressif d'un CMC [TM]

Comparaison des propriétés de CFCCs (Continuous Fiber Ceramic Composites) couramment utilisés :

→ Composites à matrice non-oxyde (SiC) et composites à matrice oxyde (Alumine ou Mullite).

	SiC/SiC	Al₂O₃ /SiC
Densité (g.cm⁻³)	2,1	2.82
Module d'Young(GPa)	96	124
Résistance en traction (MPa)	262	365
Allongement à rupture (%)	0,4	0,35
Résistance en compression (MPa)	450	270
Résistance en cisaillement (MPa)	34	15,2
Dilatation thermique à 20 °C (°C⁻¹)	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$
Conductivite thermique (W.m⁻¹.K⁻¹)	1,32	-

Exemples d'applications des CMCs à fibres continues :

→ **CFFCs à matrice non-oxyde SiC** - adaptés pour de nombreuses applications exigeant la combinaison des propriétés :

- excellente conductivité thermique,
- faible dilatation thermique, faible densité,
- bonne résistance à la corrosion et à l'usure.

→ Exemples d'application de CMCs à matrice SiC en fonction des conditions en service :

Application	Conditions en service	Avantages
Ventilateur de recirculation de gaz chauds	Contraintes mécaniques importantes Hautes températures	Durée de vie accrue Température de service plus élevée
Echangeur de chaleur	Hautes températures Contraintes thermiques importantes Corrosion à chaud Environnement érosif	Durée de vie accrue Température de service plus élevée
Ecran de brûleur à gaz radiant	Hautes températures Contraintes thermiques importantes	Durée de vie accrue Meilleur rendement thermique
Manchons de combustion de turbine de moteur à gaz	Hautes températures Corrosion à chaud	Diminution des émissions Meilleur rendement Température de service plus élevée
Filtre à gaz chaud	Environnement chimique agressif Hautes températures	Durée de vie accrue Température de service plus élevée
Coque de confinement de pompe de moteur scellée	Environnement chimique agressif	Meilleur rendement électrique
Tube de brûleur à gaz dans un milieu en fusion	Choc thermique important Environnement agressif du à un métal en fusion	Contamination réduite Meilleur rendement Amélioration de l'uniformité du chauffage
Suspension de conduite de four	Contraintes mécaniques importantes Hautes températures	Durée de vie accrue Température de service plus élevée

→ **CFFCs à matrice oxyde alumine ou mullite** - adaptés pour de nombreuses applications exigeant la combinaison des propriétés :

- ténacité élevée,
- faible densité,
- résistance aux chocs thermiques importants,
- tolérance élevée à la corrosion saline, à l'oxydation et au verre en fusion.

→ Association avec différentes fibres (SiC ou mullite) qui ne nécessite pas obligatoirement un revêtement d'interface.

→ Exemples d'application de CMCs à matrice SiC en fonction des conditions en service :

Application	Conditions en service	Avantages
Brûleur thermo-photo-voltaïque	Choc thermique important Hautes températures Combustion en surface	Durée de vie accrue Meilleur rendement
Echangeur de chaleur	Hautes températures Contraintes thermiques importantes Corrosion à chaud Environnement érosif	Durée de vie accrue Température de service plus élevée
Filtre à gaz chaud	Environnement chimique agressif Hautes températures	Durée de vie accrue Température de service plus élevée
Manchons de combustion de turbine de moteur à gaz	Hautes températures Corrosion à chaud	Diminution des émissions Meilleur rendement Température de service plus élevée
Stabilisateur de brûleur	Corrosion importante	Durée de vie accrue

Perspectives d'avenir des CMCs

→ L'avenir des CMCs passe par l'amélioration des performances des matériaux constitutifs (fibre, interphase et matrice).

→ Pour les renforts, deux avancées significatives sont attendues :

- (i) fabrication à bas coût d'une fibre non-oxyde pouvant être utilisée à des températures jusqu'à 1500°C,
- (ii) développement d'une fibre oxyde réfractaire résistante au fluage et à la croissance des grains.

→ Intérêt d'utiliser des NTC comme renforts dans des CMCs :

→ Composites dits « Mélange » = résultat d'un mélange de suspensions d'alumine et de NTC.

→ Composites dits « In-situ » = synthèse in situ de NTC.

→ Composites « Multicouches » = coulage en bande de suspensions d'alumine et NTC.

Familles de composites	% vol. de carbone	σ_r (MPa)	E (GPa)	K_{1c} (MPa.m ^{1/2})
Mélange (NTC/Al ₂ O ₃)	0	298	197	9,1
	1,89	185	151	7,4
	3,80	176	123	6,3
	5,74	124	95	5,2
	7,70	136	80	4,6
<i>In-situ</i> (NTC/Fe-Al ₂ O ₃)	14,26	438	229	5,0
	18,15	346	191	4,5
	19,40	360	189	5,0
	19,90	368	189	4,8
Multicouches (Al ₂ O ₃ / NTC/Fe-Al ₂ O ₃)	1,87	518	143	-

Evolution des propriétés mécaniques de CMCs renforcés par NTC pour une fraction volumique variable [VER]

→ Evolution des matrices céramiques :

Matrices multicouches auto-curatives qui autorisent la généralisation des matrices non-oxydes dans des atmosphères oxydantes.

→ Matrice céramique présentant deux couches : une première qui « stoppe » les fissures éventuelles - une seconde qui les vitrifie.

Couche
Vitrifiant
les fissures

Fibre



Couche
bloquant les
fissures

Matrice

Composite à matrice céramique multicouches auto-curative [EWB]

3.2.4 Les composites carbone-carbone :

→ Le carbone renforcé carbone (Reinforced Carbon Carbon) est un matériau composite constitué d'une matrice graphite renforcée par des fibres de carbone + revêtement de carbure de silicium pour empêcher l'oxydation.

→ Production d'une matrice de carbone selon un principe de fabrication identique à celui des fibres de carbone : carbonisation d'une matière organique à haute température.

→ Matrices de carbone sont constituées de grains de carbone pyrolytique qui se déposent à chaud sur les fibres, assurant ainsi une liaison mécanique entre ces dernières et colmatant les vides laissés entre elles.

→ Matériau composite dont la masse volumique est proche de celle du carbone massif.

→ Deux techniques d'imprégnation des fibres utilisées pour fabriquer cette matrice carbonée :

- la voie liquide également appelée imprégnation en phase liquide,
- la voie gazeuse où l'on distingue le Dépôt Chimique en Phase Vapeur (CVD - Chemical Vapor Deposition) et l'infiltration (ou imprégnation) en phase vapeur (CVI - Chemical Vapor Infiltration). Ces techniques sont plus rapides et plus économiques mais moins reproductibles que les techniques par voie liquide.

Globalement, ces matériaux restent très chers à produire : domaines de pointe.

Propriétés

- Densité faible : 1,6 à 2 g.cm⁻³,
- Applications structurales à haute température
- Applications où une bonne résistance au choc thermique et un faible coefficient de dilatation thermique sont nécessaires.
- Excellente conductivité thermique (environ 40 fois plus élevée que celle du cuivre).
- Bonne résistance au fluage et à la fatigue en général.
- Par rapport aux CMCs, ils sont moins fragiles mais souffrent d'un manque de résistance à l'impact.

Exemple :

Explosion de la navette Columbia en 1983, accident dû à la rupture d'un panneau composite carbone-carbone impacté par une pièce d'isolation en mousse provenant du réservoir externe de la navette lors de la phase de décollage.

Cause : conception des bords d'attaque sans considération de la probabilité d'impacts aussi violents.



Essai d'impact sur le bord d'attaque de la navette Discovery [NASA]

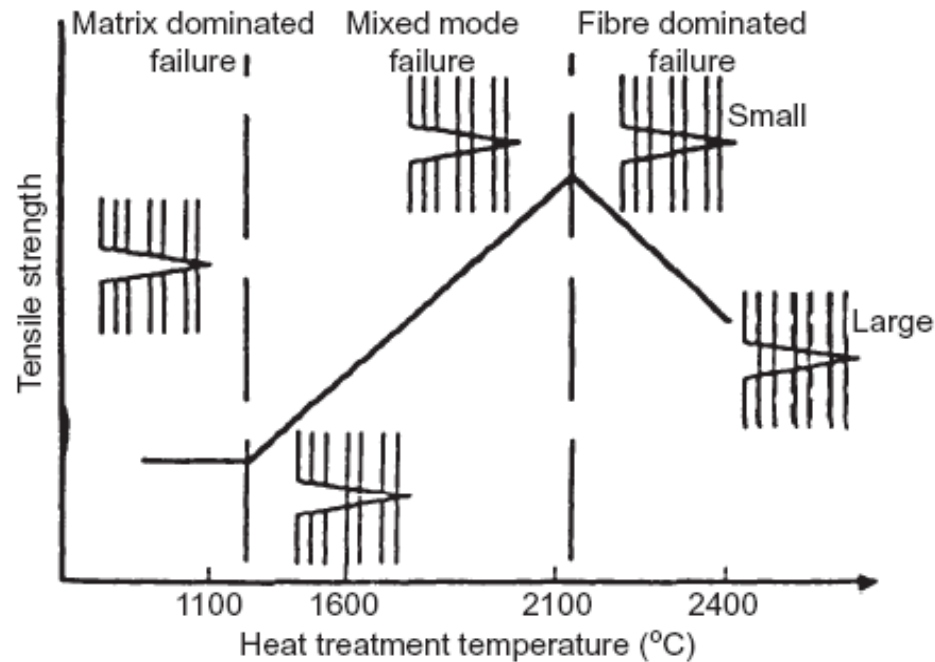
→ Les propriétés mécaniques se conservent pour des niveaux de température allant jusqu'à 3000°C selon le type de composite carbone-carbone.

Propriétés	Fibres courtes aléatoires	Fibres UD	Fibres 3D
Module d'Young (GPa)	10-15	120-150	40-100
Résistance en traction (MPa)	40-60	600-700	200-350
Résistance en compression (MPa)	110-200	500-800	150-200
Energie d'absorption à la rupture (kJm^{-2})	0.07-0.09	1.4-2.0	5-10
Resistance à l'oxydation	Très faible	Mauvaise	Meilleure que le graphite

Propriétés de différent types de composites carbone-carbone [CCC]

→ Importance du traitement thermique car il permet de définir la résistance en traction et prédispose le matériau à adopter certains modes de rupture.

→ Selon la température de traitement thermique, le comportement à rupture des composites carbone-carbone est conditionné soit par la matrice, soit par les fibres, soit par les deux.

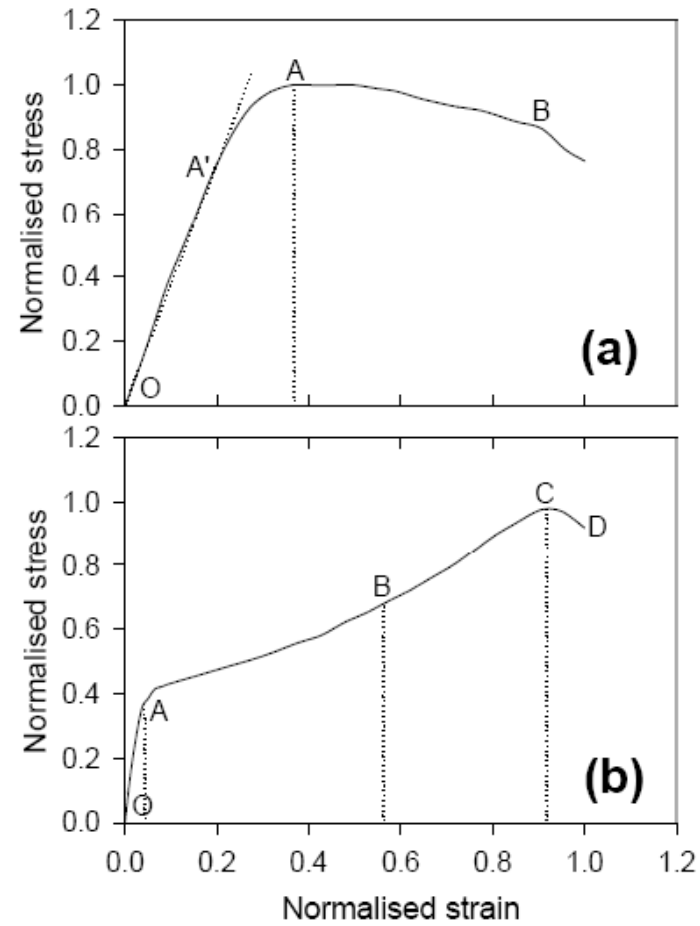


Effet du traitement thermique sur la résistance en traction et les modes de rupture des composites carbone-carbone [MAN]

→ Selon l'environnement d'utilisation, les propriétés mécaniques peuvent être améliorées de 10 à 20% sous atmosphère inerte à température élevée (2000°C) tandis qu'elles peuvent diminuer de 10 à 20% dans l'air en fonction de la température de service.

→ Comportement en compression d'un composite C-C, renforcé par des fibres courtes réparties aléatoirement dans le plan :

- Comportement initial linéaire pour une sollicitation dans les directions x et y du plan et dans la direction normale au plan (z),
- Dans le plan, la résistance en compression chute à déformation croissante dans la région AB (endommagement),
- Pour un même niveau de déformation, la résistance en compression augmente dans la région AC dans la direction normale au plan,
- Enfin, comportement non-linéaire.
La rupture en compression observée pour une sollicitation dans le plan correspond à une rupture interfaciale suivie par une propagation des fissures dans la zone interlaminaire et enfin un délaminage.



Courbes contrainte-déformation normalisées schématiques de composites carbone-carbone réalisé par CVI : (a) Directions x et y – (b) Direction z [DAV]

Applications

- Initialement, matériau développé pour les pointes de fusée des missiles intercontinentaux.
- Application étendue au cône avant et aux bords d'attaque de navettes spatiales de type Columbia.
- A la fin des années 1970 : freins de formule 1, application reprise plus récemment dans les voitures très haut de gamme.
- Le carbone étant un matériau stable à haute température, les composites C-C font également l'objet de recherche pour des applications dans l'industrie nucléaire.
 - > Sous irradiation de neutrons à de faibles densités de flux, ces composites démontrent une augmentation de la résistance et de la ténacité de 20 à 30% tandis que le module d'Young augmente d'environ 30%.

3.3 Les composites à renfort innovant

3.3.1 Nanoparticules et nanocomposites :

- Emergence des nanotechnologies.
- Les nanocomposites sont des matériaux multiphasés dont le renfort est une nanoparticule.
- Nanocomposites = composites chargés de nanoparticules
- Taux volumique de nanoparticules est très faible par rapport aux charges classiques seulement 3 à 10%.
- La matrice des nanocomposites peut être métallique, céramique ou polymère.

Que sont les nanoparticules ?

Les caractéristiques géométriques (forme et dimensions) des nanoparticules sont déterminantes pour les propriétés des nanocomposites.

- Classification des nanocomposites en fonction de la forme des nanoparticules : sphérique, fibrillaire, tubulaire ou lamellaire.
- Les nanoparticules lamellaires les plus utilisées : phyllosilicates ou silicates en feuillets (argile de montmorillonite) mais également les polysilicates (magadiite).

Type de renfort	Forme	Dimensions typiques
Particules de silice	Sphères	Diamètre : 30 à 150 nm
Whiskers de cellulose	Bâtonnets rigides	Diamètre : 15 nm ; longueur : 1 µm
Nanotubes de carbone	Tubes flexibles	Diamètre : 30 nm ; longueur : 10 à 50 µm
Silicates en feuillets	Disques flexibles	Diamètre : 50 à 500 nm ; épaisseur : 1 nm

Différents types de nanoparticules utilisées dans les nanocomposites [GLO]

- L'utilisation des nanotubes de carbone (CNT) vise à améliorer l'introduction de ces charges dans les polymères afin d'en maximiser l'effet et donc de diminuer les quantités nécessaires.
- La dispersion dans des polymères visqueux à l'état fondu est difficile
- Exfoliation compliquée des nanotubes monoparois (SWNT) du fait des fortes liaisons de Van Der Waals qui les maintiennent en faisceaux.
- Parmi les nanoparticules synthétiques couramment utilisées, on trouve également les nanofibres de carbone : diamètre entre 70 et 200 nm et épaisseur de paroi de 20 nm.

→ Les NTC monoparois ont des diamètres de l'ordre du nanomètre et les multiparois de l'ordre de 5 nm

→ Les nanofibres confèrent au composite des propriétés intermédiaires entre celles des nanotubes et celles des fibres de carbone.

→ Taux massique de fibres : 3-8% (faible).

Nanocomposites

Le changement d'échelle (micro → nano) pour les dimensions des particules renforçantes se traduit de deux manières :

- accroissement de la surface interfaciale (i.e. augmentation des interactions entre matrice et renforts) à l'origine de l'amélioration des performances globales du matériau,

Epaisseur des particules	Surface Spécifique (m ² /g)
Mica ~ 1μm	1
Kaolin ~ 0.1μm	10
Smectite exfoliée ~ 0.001μm	800

Surface interfaciale spécifique : microparticules vs nanoparticules [LEC]

- pour des taux de charge faibles, les nanocomposites sont plus légers tout en conservant des propriétés équivalentes.

> Gain en masse similaire au remplacement des métaux par du plastique dans l'industrie automobile.

Avantage des nanocomposites du point de vue mise en œuvre :

→ Facilité de mise en œuvre puisque les procédés actuels (malaxage, extrusion, injection, moulage...) sont opérationnels.

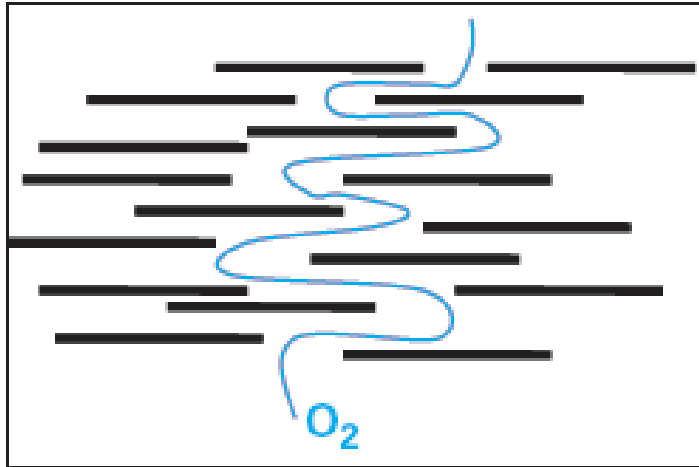
→ La faible proportion de nanoparticules n'affecte pas la viscosité de la résine.

→ Simplification des procédés de fabrication avec notamment le remplacement des techniques de dépôts multicouches par une couche de nanocomposites [ECP].

Propriétés des nanocomposites

Les propriétés physiques et mécaniques des nanocomposites dépendent des matériaux constitutifs (matrice+nanoparticules) :

- Durabilité (augmentation de la résistance),
- Rigidité accrue (en fonction du taux de charge),
- Tenue en température et résistance au feu : amélioration des propriétés thermomécaniques telles que la température de déflexion sous charge (HDT – Heat Distorsion Temperature),
- Propriétés barrières (oxygène, dioxyde de carbone, essence,...) améliorées de 30 à 50% par rapport aux polymères vierges. La propriété barrière est liée au principe de tortuosité. Les nanoparticules dispersées dans le matériau contraignent les gaz ou les fluides à les contourner diminuant ainsi la perméabilité du matériau [NNL]. Cette propriété est très utile pour les emballages,



Principe d'augmentation de la tortuosité par introduction de nanoparticules lamellaires [NNL]

- Propriétés optiques : la très faible taille des renforts combinée à un taux de charge également faible permet aux résines utilisées en optique de conserver leurs propriétés,
- Recyclabilité sous forme de résine de base déjà chargée.

Inconvénients liés à l'utilisation des nanocomposites :

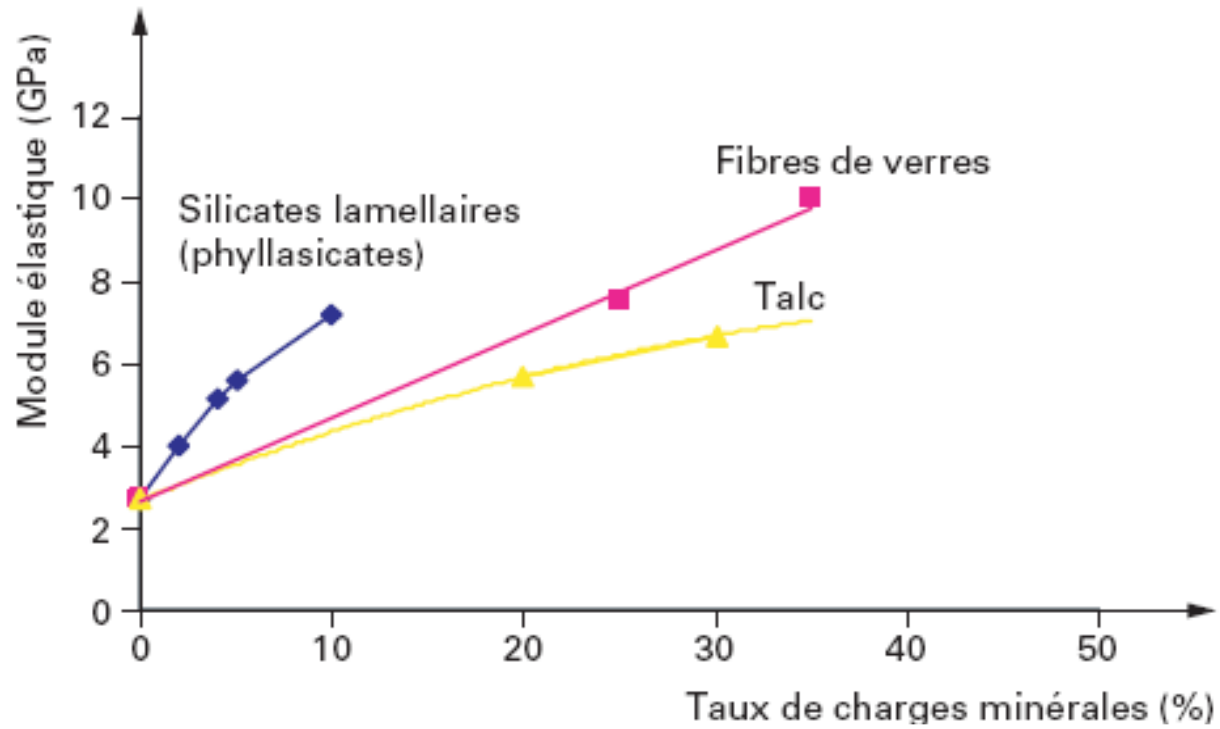
- La résistance à l'impact diminue après addition de nanoparticules (en fonction du taux de charge),
- Les nanoparticules d'origine naturelle présentent des qualités variables d'où le recours à des nanoparticules synthétiques telles que les nanotubes de carbone,
- Coût très élevé en comparaison avec les composites conventionnels.

Exemple d'application :

En automobile, utilisation des polyamides en raison de leur tenue en température.

→ Renforts : fibre de verre, talc ou d'autres matériaux inorganiques.

→ L'utilisation de nanoparticules dans de faibles proportions permet de produire des pièces injectées aux propriétés mécaniques équivalentes voire supérieures, plus légères et avec un meilleur état de surface [NNL].



Evolution du module d'Young en fonction du taux de charges minérales dans un polyamide PA6 : nanocomposite vs composites [NNL]

→ Comparaison des propriétés d'un nanocomposite polyamide PA6 avec 5% de nanoparticules lamellaires (argile montmorillonite) par rapport à une résine vierge polyamide PA6 à l'ambiante et à 120°C :

Propriété	PA 6-argile		PA 6 pur	
	À 23 °C	À 120 °C	À 23 °C	À 120 °C
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	97	32	69	27
Module d'élasticité en traction..... (GPa)	1,9	0,6	1,1	0,2
Contrainte à la rupture en flexion..... (MPa)	143	33	89	12
Module d'élasticité en flexion (GPa)	4,3	1,2	2,0	0,3
Résistance au choc Izod (J/m)	18		21	
Résistance au choc Charpy(kJ/m ²)	6,1		6,2	
Température de fléchissement sous charge (1,82 MPa) (°C)	152		65	

Propriétés	Amélioration
Module élastique	+ 30 à 40 %
HDT (1,8 MPa)	+ 40 à 60 °C
Résistance à l'impact	0 à - 40 %
Densité	+ 2 %

*Propriétés de nanocomposites PA6 avec 5% de nanoparticules lamellaires vs résine pure PA6
[GLO][NNL]*

→ Nanocomposites lamellaires à matrice époxyde :

L'amélioration des propriétés mécaniques dépend fortement de l'état de dispersion (exfoliation) des nanoparticules.

> Plus cette surface augmente, plus la rigidité du matériau croit.

→ Les nanoparticules minérales présentent des propriétés variables selon leur origine.

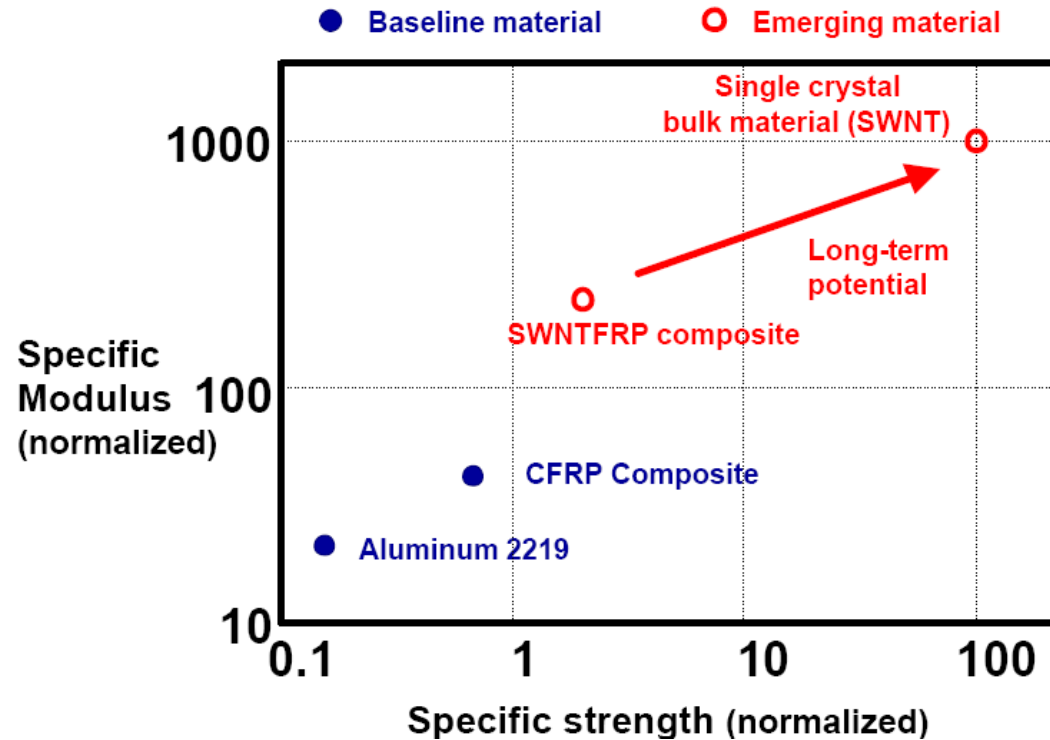
Solution : utiliser des nanoparticules synthétiques (NTC).

> Les NTC bruts se présentent le plus souvent sous la forme d'une poudre légère assimilable à de la suie.

> Développement de procédés spécifiques :

- dispersion homogène des nanoparticules,
- orientation selon une direction préférentielle,
- contrôle de l'interaction entre matrice et particules.

→ Les projections actuelles permettent de prévoir le potentiel à long terme de matériaux composites à base de SWNT massifs monocristaux (i.e. plus sous la forme de nanoparticules mais de fibres macroscopiques).



Comparaison des propriétés mécaniques spécifiques des composites à nanotubes de carbone vs composites renforcés par des fibres de carbone [NAS]

→ Influence de NTC sur le comportement en traction d'une résine époxy :

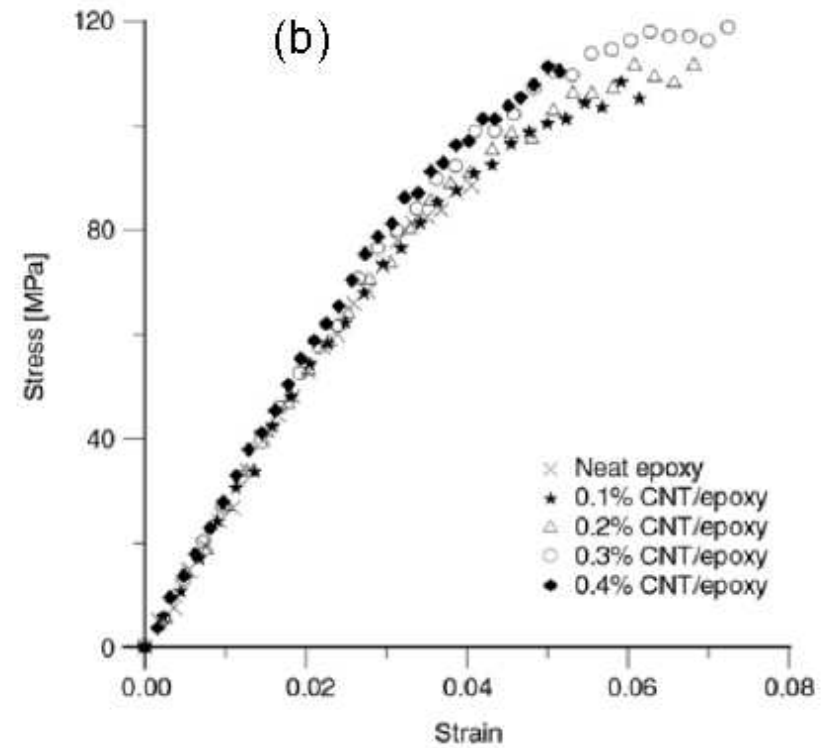
> La rigidité augmente de presque 12% avec un taux de charge massique de 0,4%.

> La résistance en traction est optimale (augmentation de 28% par rapport à la résine pure), pour un taux de charge égal à 0,3%.

(a)

	Modulus [GPa]	Strength [MPa]	Failure strain [%]
Neat epoxy	2.46	93.5	4.02
0.1% CNT	2.54	109	6.06
0.2% CNT	2.60	115	6.80
0.3% CNT	2.65	121	7.58
0.4% CNT	2.75	113	5.12

(b)



*Influence de NTC sur le comportement en traction d'une résine époxy :
(a) Propriétés mécaniques – (b) Courbes contrainte-déformation [ZHO]*

Exemple de développement récent :

→ Association de résine PEEK et de nanofibres de carbone.

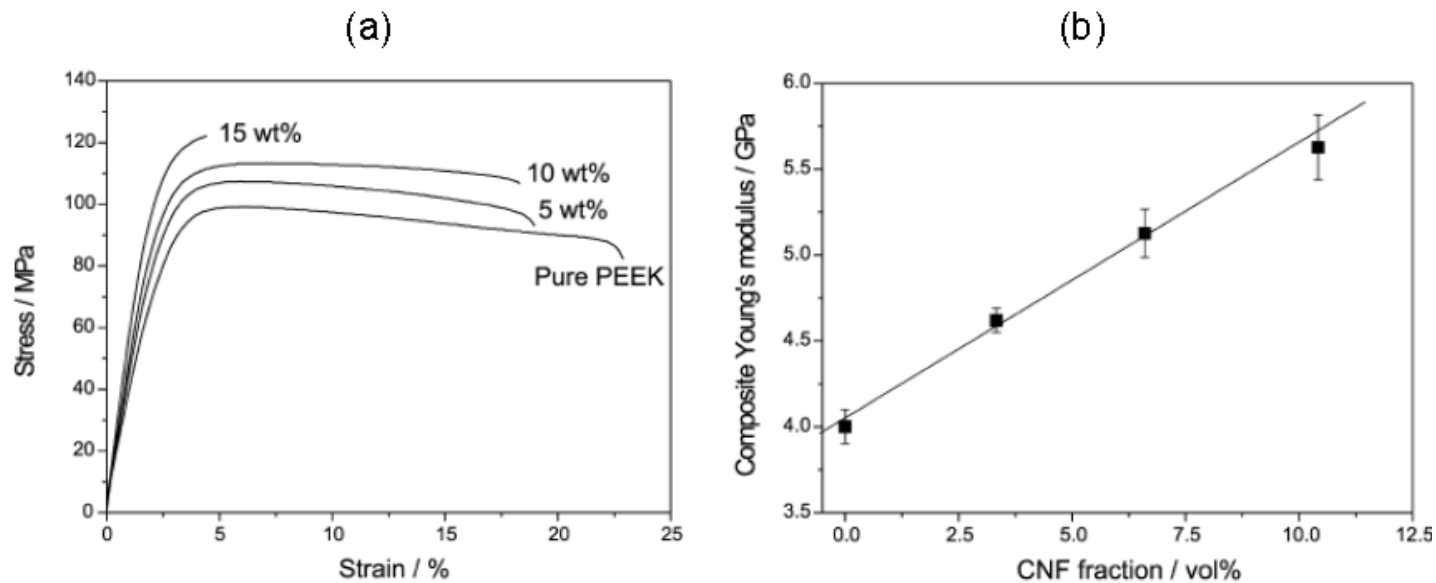
→ Influence du taux de fibres sur les propriétés mécaniques de cette matrice.

→ L'augmentation du taux volumique de nanofibres tend à augmenter la limite d'élasticité et la rigidité du composite :

> Comportement quasi-fragile à 15%.

> Le module d'Young passe de 4 GPa pour la résine pure à 5,6 GPa pour le composite chargé de 15% de nanofibres (+40%).

> La résistance passe de 80 MPa à 120 MPa soit un accroissement de 50 % (cf. figure).



Influence du taux de charge en nanofibres de carbone dans une résine PEEK : (a) Courbes contrainte-déformation– (b) Evolution du module d'Young [SAN]

Applications

→ Limitées en raison du coût important de fabrication des nanoparticules synthétiques (NTC notamment) et de la complexité des procédés de mise en œuvre.

→ Propriétés des nanocomposites à NTC : bonnes conductivités électrique et thermique

→ Applications structures dans l'aérospatiale, l'aéronautique, l'automobile ou le domaine de l'équipement sportif (cadres de vélo), revêtements de tubes métalliques pour l'industrie pétrolière, gaines d'étanchéité de flexibles, réservoirs automobiles ou joints élastomères.

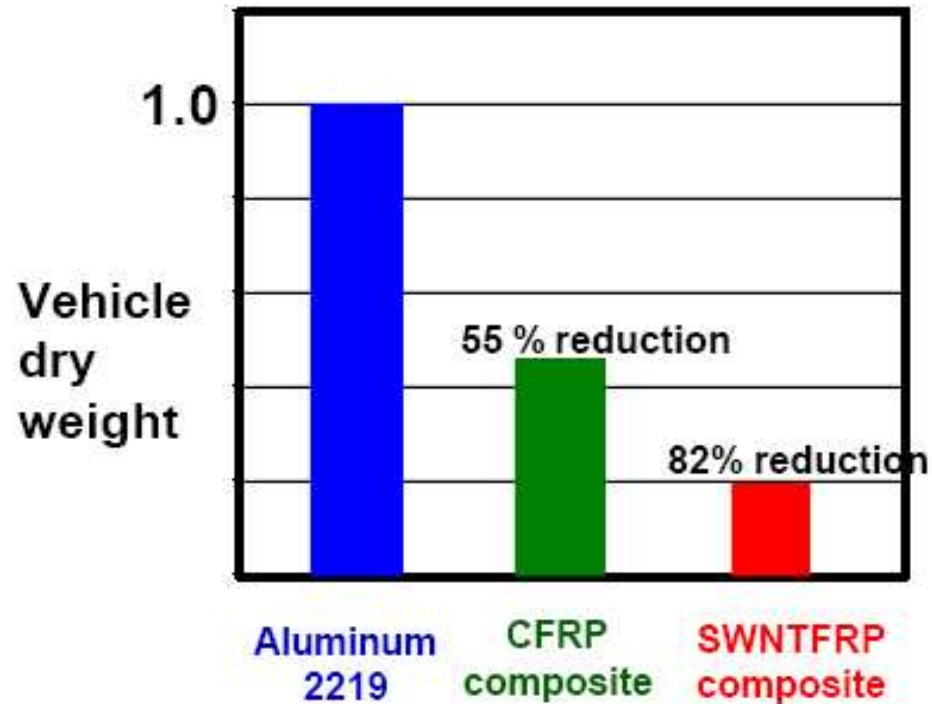


Exemples d'applications de composites à nanoparticules :

(a) Revêtement de tubes métallique [LEC] – (b) Cadre de vélo composite renforcé par NTC [BMC]

→ Exemple de la navette spatiale :

> Réduction de masse de 82 % par rapport à une structure constituée d'alliages d'aluminium pour des propriétés mécaniques incomparables.



Gain de poids lié à l'utilisation de composites renforcés par des nanotubes de carbone pour une navette spatiale [NAS]

3.3.2 Composites renforcés par des fibres de carbone :

Les plastiques renforcés par des fibres de carbone (Carbon Fiber Reinforced Plastic) sont des matériaux composites destinés à des applications structures en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques spécifiques : rigidité, résistance, tenue en fatigue.

→ Généralement : matrice époxyde + renfort de fibres de carbone sous la forme de nappes unidirectionnelles ou de tissus pré-imprégnés.

→ Association possible avec d'autres résines : polyester, vinyle ester, nylon (TD) ou PEEK, PPS (TP).

→ Possible de combiner des fibres de nature différente avec la fibre de carbone : aramide (kevlar), verre, aluminium, bore, tungstène, céramique (SiC).

Les fibres de carbone

→ Obtenues à partir d'un traitement thermique de carbonisation-graphitisation (sous gaz inerte entre 1500-2000°C) d'un précurseur de polyacrylonitrile (**PAN**) ou d'un précurseur de **brai** (Pitch en anglais) de mésophase lequel doit subir préalablement un traitement d'oxydation.

→ Mèches de PAN fabriquées selon la technologie de polymérisation et de filage des fibres acryliques à usage textile par voie solvant et coagulation en milieu solvant / non-solvant.

→ Le brai est issu de résidus de houille ou de pétrole (mélange d'hydrocarbures aromatiques). Les fibres de brai sont très fragiles et difficiles à manipuler par rapport aux fibres de PAN mais elles présentent un module d'Young très élevé.

Principaux avantages des fibres de carbone :

- densité très faible,
- excellentes propriétés mécaniques,
- très bonne tenue en température sans détérioration des propriétés (jusqu'à 1500°C en atmosphère non-oxydante),
- bonne inertie à la corrosion et aux agents chimiques
- coefficient de dilatation longitudinale très faible.
- bons conducteurs thermiques et électriques.

Principales limitations des fibres de carbone :

- coût relativement élevé,
- comportement fragile,
- faible résistance à l'impact
- mise en forme par courbure ou pliage peu aisée [AMS].

Propriétés mécaniques des fibres de carbone

→ Selon l'application visée, nécessité de trouver un compromis entre rigidité et résistance.

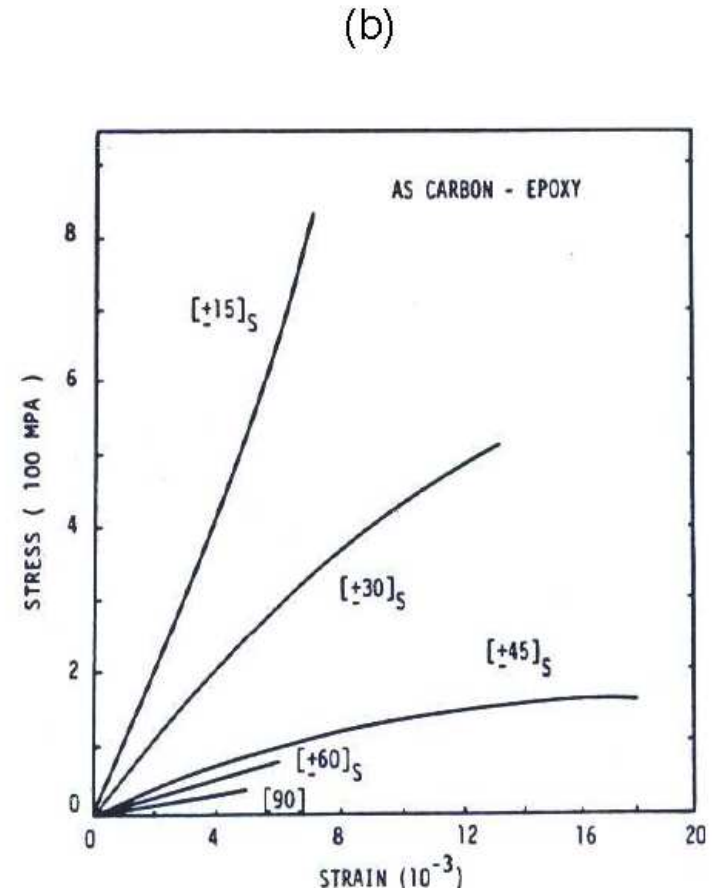
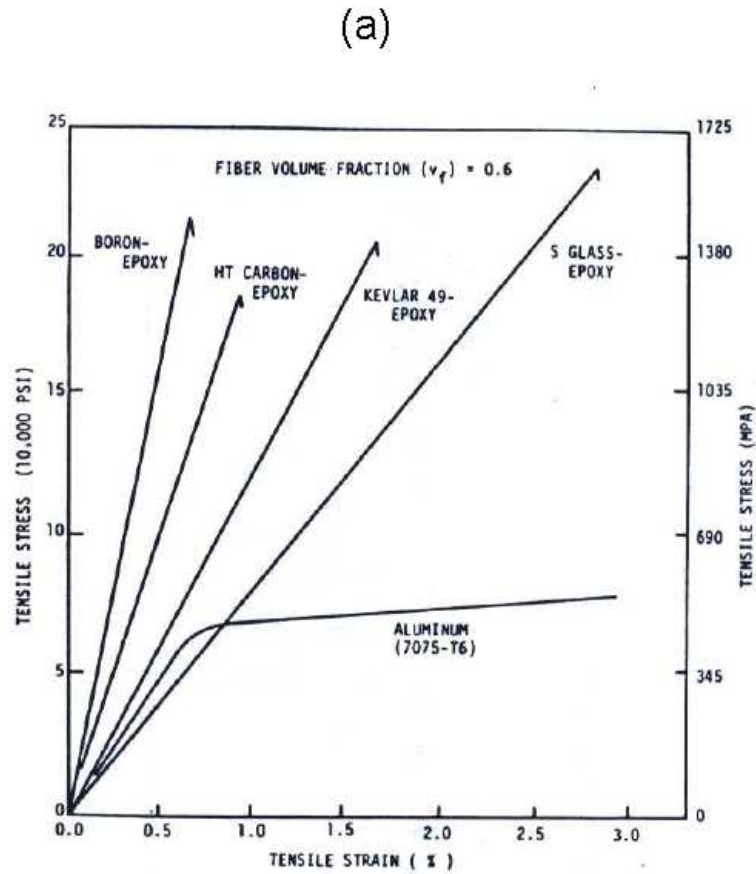
Fibres	Carbone à haute résistance HR	Carbone à bas module BM	Carbone à haut module HM	Carbone à très haut module THM
Masse volumique (Mg/m ³)	1,85	1,70	1,90	1,95
Résistance à la traction R_m (MPa)	3 500 à 4 900	1 800	2 800 à 4 400	2 300
Module de Young E (GPa)	200 à 250	180	400 à 600	750 à 820
Allongement à la rupture A (%)	1,3 à 2,1	2	0,7 à 1,2	0,3

Propriétés mécaniques de différents types de fibres de carbone [AMS]

Comparaison des propriétés d'une résine époxyde renforcée par différents types de fibres dans une configuration de nappe UD avec un taux volumique de fibres de 60%.

Fibre	Masse volumique (g/cm ³)	Traction 0° (2)		Compression 0° (2)	Résistance au cisaillement interlaminaire (MPa)
		Résistance (MPa)	Module (GPa)	Résistance (MPa)	
Carbone (3)					
T 300	1,53	1 760	125	1 370	100
T 300 J	1,54	2 050	125	1 370	100
T 400 H	1,56	2 450	135	1 470	100
T 800 H	1,56	2 840	150	1 570	100
M 40	1,57	1 180	215	930	80
M 40 J	1,54	2 250	215	1 130	90
M 60 J	1,64	1 860	340	780	70
Verre					
E	2,04	1 400	46	910	70
R	2,01	1 900	52	970	70
Aramide (4)					
KEV 49	1,38	1 380	72	276	60
Bore	2,01	1 700	220	2 400	100

Propriétés mécaniques de composites UD à résine époxyde renforcée par différentes fibres [DUP]



Courbes contrainte/déformation en traction :
 (a) Sollicitation à 0° pour différents types de matériaux
 (b) Sollicitation hors axes sur des stratifiés carbone/époxy [PRF]

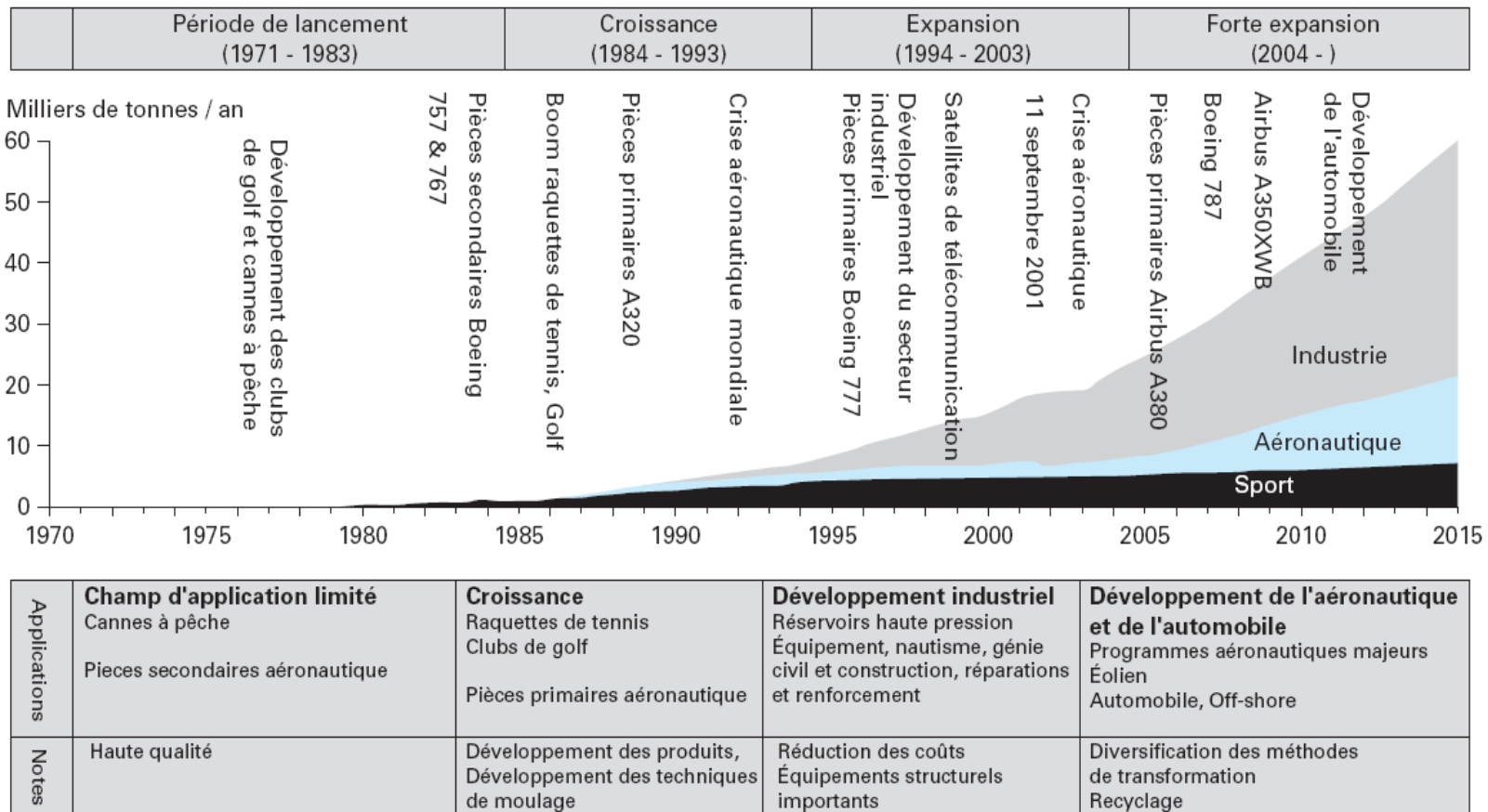
→ influence de l'orientation des fibres, dans un stratifié carbone/époxy, par rapport à la direction de sollicitation

Applications

Amélioration des procédés de fabrication → réduction des coûts et délais de fabrication des fibres de carbone.

→ Utilisation courante sous la forme de matériaux composites dans de nombreux domaines : industrie du transport, aérospatiale, génie civil, industrie mécanique, équipements sportifs...

Evolution de la demande mondiale de fibres de carbone dans divers domaines, demande qui devrait atteindre les 60 millions de tonnes par an selon les estimations faites par Toray/Soficar !



Evolution de la demande mondiale de fibres de carbone [DUP]

→ Prédominance des composites à fibres de carbone sous forme de stratifiés ou sandwichs dans le Boeing 787 Dreamliner qui est composé de 50% (en masse) de matériaux composites.

→ Le fuselage est constitué de quelques tronçons réalisés par enroulement filamentaire de fibres de carbone pré-imprégnées.

→ Remplacement des 1500 panneaux d'aluminium assemblés par 40 à 50000 rivets : gain de poids (carburant) soit 20% d'économie par rapport à un avion de taille identique.

→ Diminution significative des opérations de maintenance.



Répartition des composites à fibres de carbone dans le Boeing 787 Dreamliner [BOE]

3.3.3 Composites renforcés par des fibres de bore :

Les fibres de bore sont en réalité de gros filaments (diamètre jusqu'à à 100 μm) formés d'une âme (cœur) en tungstène ou en carbone de 10 μm de diamètre recouverte d'une couche de bore d'épaisseur 40 μm ou de deux couches : bore et carbure de silicium (BORSIC) ou bore et carbure de bore.

→ Dépôt chimique en phase vapeur (CVD : Chemical Vapor Deposition) sur un fil support

→ Très coûteuses MAIS des propriétés mécaniques exceptionnelles y compris à très haute température (1000 $^{\circ}\text{C}$).

→ Densité plus élevée que les fibres de carbone (2 à 3,5 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

→ Moins souples en raison de leur diamètre (parfois important).

Propriétés mécaniques

→ Excellentes propriétés mécaniques en traction et en compression :

- Résistance en traction et en compression supérieures à 2 GPa,
- Rigidité très élevée : 400 GPa,
- Bonne tenue en fatigue,
- Résistance au vieillissement.

Autres avantages :

- Peuvent être noyées facilement dans des matrices métalliques, céramiques ou organiques,
- Permettent une très bonne adhérence avec les résines époxydes,
- Insensibles à l'humidité.

Laminate	Carbon-epoxy		Boron-epoxy	
	Strength, MPa (ksi)	Modulus, GPa (Msi)	Strength, MPa (ksi)	Modulus, GPa (Msi)
[0]	1219.5 (177)	110.9 (16.1)	2101.4 (305)	215.6 (31.3)
[±15]	799.2 (116)	95.8 (13.9)	943.9 (137)	162.9 (23.65)
[±45]	259.7 (37.7)	15.6 (2.27)	235.6 (34.2)	17.4 (2.53)
[90]	194.3 (28.2)	13.1 (1.91)	211.5 (30.7)	20.5 (2.98)
[0/90]	778.6 (113)	60.6 (8.79)	1412.4 (205)	118.3 (17.17)
[0/±45/90]	642.8 (93.3)	46.4 (6.74)	1054.2 (153)	79.0 (11.47)

Propriétés mécaniques en compression de stratifiés UD carbone/époxy et bore/époxy pour différents empilements [PRF]

Applications

→ Sous différentes formes : rubans pré-impregnés de résine époxyde pour l'enroulement filamentaire, nappes UD pré-impregnées, tissus UD avec chaîne bore et trame polyamide.

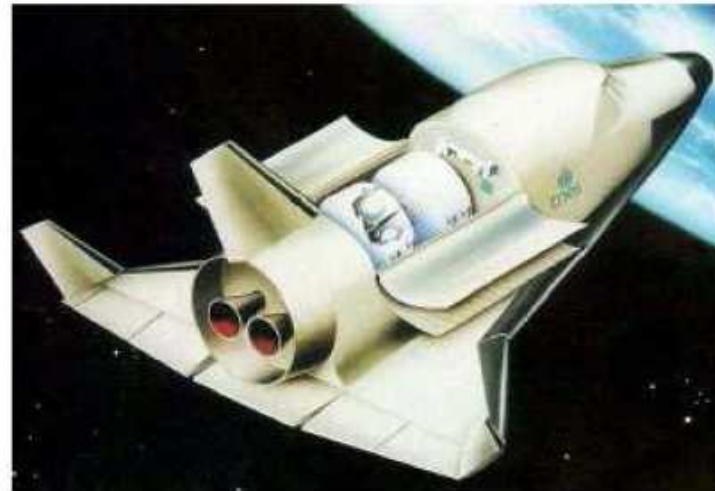
→ Utilisation pour répondre au critère de résistance à température élevée. D'où une association à des matrices céramiques ou métalliques.

→ Prix prohibitif : usage pour certaines pièces de l'industrie militaire et de l'aérospatiale.

(a)



(b)



(a) Avion de chasse mirage 4000 – (b) Navette spatiale Hermès [Dassault]

3.3.4 Composites renforcés par des fibres de Zylon[®]:

Découverte dans les années 1980, la fibre Zylon[®] était présentée comme la fibre la plus résistante au monde.

Avantages :

- Le Zylon[®] s'obtient par passage forcé dans une machine à filer d'un polymère polyuréthane (TD) connue sous le sigle PBO (para-phénylène benzobisoxazole).
- Sa résistance à la traction est à peu près dix fois celle de l'acier i.e. qu'un fil de Zylon[®] d'un millimètre de section peut supporter un objet de 450 kg !
- Excellente résistance au feu puisque ses propriétés ne s'altèrent qu'à partir de températures dépassant 650°C.
- Très bonne résistance à l'impact

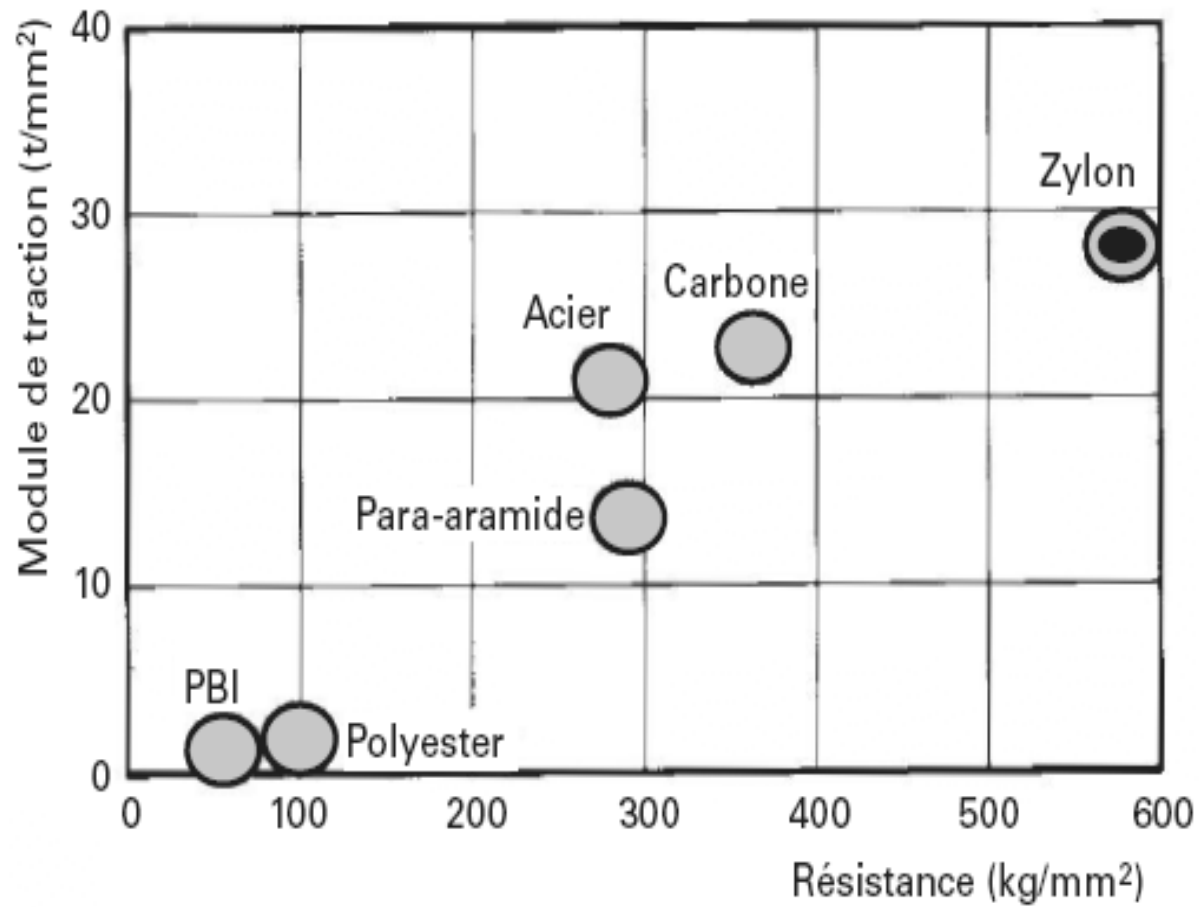
Inconvénients :

- Faible résistance au vieillissement reste
- Faible résistance en compression et en cisaillement
- Mauvaise résistance aux UV.

Propriétés mécaniques des composites à fibres de Zylon®

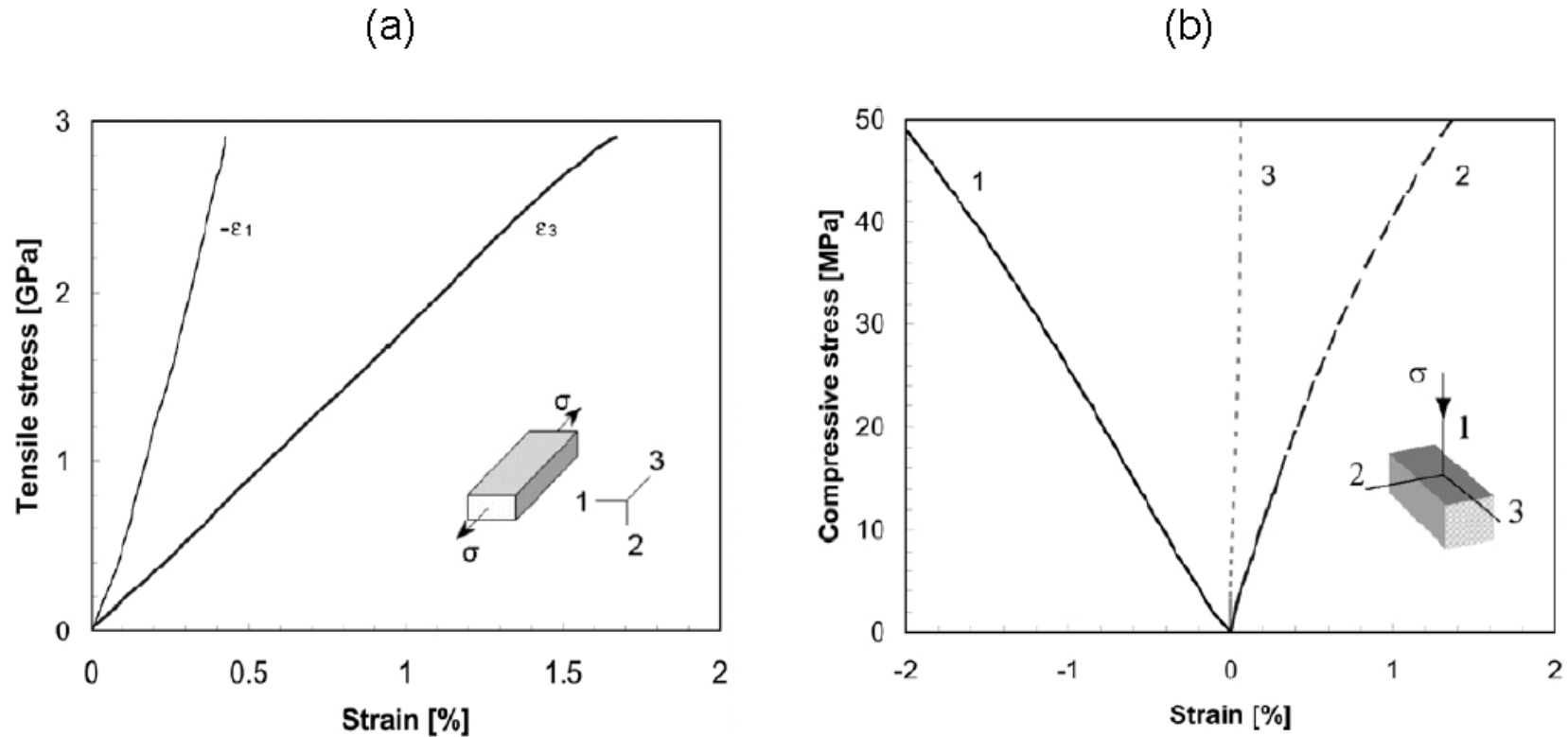
Nature	Module d'élasticité (GPa)	Résistance en traction (GPa)	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance en compression (GPa)
PBO	360	5,7	1,58	0,2 à 0,4
Para-aramide	185	3,4	1,47	0,32 à 0,46
Polyéthylène HT	170	3	0,97	0,17
Verre S (1)	90	4,5	2,46	1,1
Verre E (1)	75	3,5	2,58	0,81
Bore	415	3,5	2,55	5,87
Carbure de silicium	200	2,8	2,8	3,1
Carbone HR	235	3,2	1,76	2,88

Propriétés mécaniques des fibres de Zylon® (PBO) comparée à d'autres fibres hautes performances [CAR]



Propriétés mécaniques en traction du Zylon[®] [CAR]

→ Pour une sollicitation dans le sens des fibres (direction 3), le comportement en traction d'un composite Zylon[®] /époxy (67 % de fibres) est élastique fragile de même que le comportement en compression (77 % de fibres) dans la direction transverse.



*Courbe contrainte-déformation d'un composite Zylon[®] /époxy [HUA] :
 (a) Traction longitudinale (67% fibres) – (b) Compression transverse (77%)*

Fiber Volume %	Temp K	Young's Modulus GPa	Tensile Strength GPa
85	295	240	4.22
90	295	255	4.47
95	295	269	4.71
85	77	n/a	4.85
90	77	n/a	5.07
95	77	n/a	5.29

Propriétés mécaniques en traction de composites Zylon[®] /époxy à deux niveaux de température pour différentes fractions volumiques de fibres [WAL]

Applications

- Vêtements de protection thermorésistants (sapeurs-pompiers).
- Tentatives d'utilisation comme gilets pare-balles ont été faites mais abandonnées en raison de la mauvaise tenue dans le temps des fibres.
- En 2001, la NASA a utilisé cette fibre comme renfort pour un ballon d'observation spatiale.



Fig. – Ballon d'observation spatiale dont la voile est réalisée en Zylon[®] [NASA]

- Depuis 2007, des composites renforcés par ces fibres sont utilisés dans les cockpits des formule 1 pour la combinaison résistance à l'impact / feu.

3.3.5 Composites renforcés par des fibres naturelles :

→ Production industrielle de composites renforcés de fibres végétales, pour des applications ciblées : quelques dizaines de milliers de tonnes de fibres végétales dans les composites vs 2 millions de tonnes de fibres de synthèse / an [LUC].

→ Depuis quelques années, l'émergence des composites à fibres naturelles correspond à la satisfaction de plusieurs critères d'innovation [POU] :

- Du point de vue environnemental :

Les fibres naturelles constituent des ressources renouvelables par rapport aux fibres synthétiques issues de ressources fossiles telles que le pétrole
→ démarche d'éco-conception.

- Du point de vue économique :

La production des fibres naturelles ne dépend pas du coût du pétrole. Comparativement aux fibres de synthèse, la valeur ajoutée au produit de base est plus importante et permet d'obtenir un coût final moindre.

- Du point de vue technologique :

> Les techniques de mise en œuvre des composites à fibres naturelles s'inspirent largement des procédés de fabrication mis au point pour les composites conventionnels même si leur intégration implique certaines précautions et spécificités.
> Leurs propriétés mécaniques spécifiques sont suffisantes pour de nombreuses applications.

→ Selon leur origine, les fibres d'origine renouvelable peuvent être classées en trois catégories [GCR] :

■ Les fibres végétales :

> Fibres provenant des poils séminaux des graines (coton, kapok),

> Fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie...)

> Fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (kénaf, chanvre de manille, bambou) et d'enveloppes de fruits (noix de coco).

■ Les fibres animales provenant de la toison (laine) ou de sécrétions (soie d'araignée).

■ Les fibres minérales (basalte, amiante).

→ Selon les applications, ces fibres peuvent être utilisées comme renfort continu ou discontinu dans des matériaux composites.

→ Elles peuvent également être tissées.

→ Proviennent de différentes latitudes : possibilité de développer une production locale contribuant ainsi à limiter leur transport et à stimuler l'émergence des éco-composites.

(a)



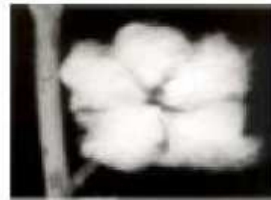
chanvre



jute



sisal



coton



coco



lin

(b)



chanvre



jute



sisal



coton



coco

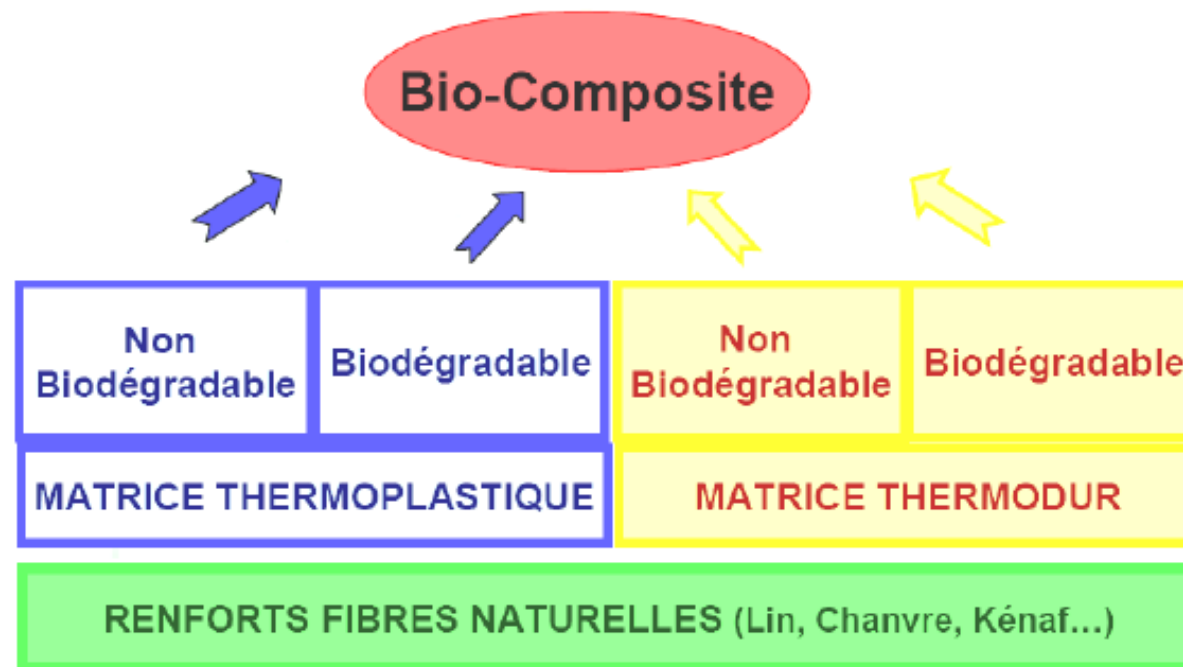


lin

Fibres naturelles végétales : (a) origine – (b) produit fini tissé [BIN][CAR]

→ L'incorporation de fibres naturelles dans les matériaux TP ou TD en remplacement des fibres de verre est un concept déjà industrialisé et commercialisé.

→ Nouvelle classe de matériaux composites : les bio-composites également appelés éco-composites [INR].



Composition des bio-composites

Principales caractéristiques des fibres végétales utilisées comme renforts dans les composites

Avantages	Inconvénients
Faible coût	Absorption d'eau
Biodégradabilité	Faible stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de CO ₂	Mauvaise tenue en vieillissement
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Faible tenue thermique (200 à 230 °C max)
Pas de résidus après incinération	Fibres anisotropes
Ressource renouvelable	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Renfort discontinu
Bonne isolation thermique et acoustique	
Non abrasif pour les outillages	

Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales [CAR]

→ Les fibres végétales les plus utilisées sont les fibres libériennes : **chanvre et lin** qui peuvent dans certains cas se substituer à la fibre de verre.

→ Plus légères d'environ 40%

→ Certaines de leurs propriétés mécaniques spécifiques (résistance en traction et résilience) sont proches de celles des fibres de verre.

→ Prix est environ 2,5 fois moins élevé.

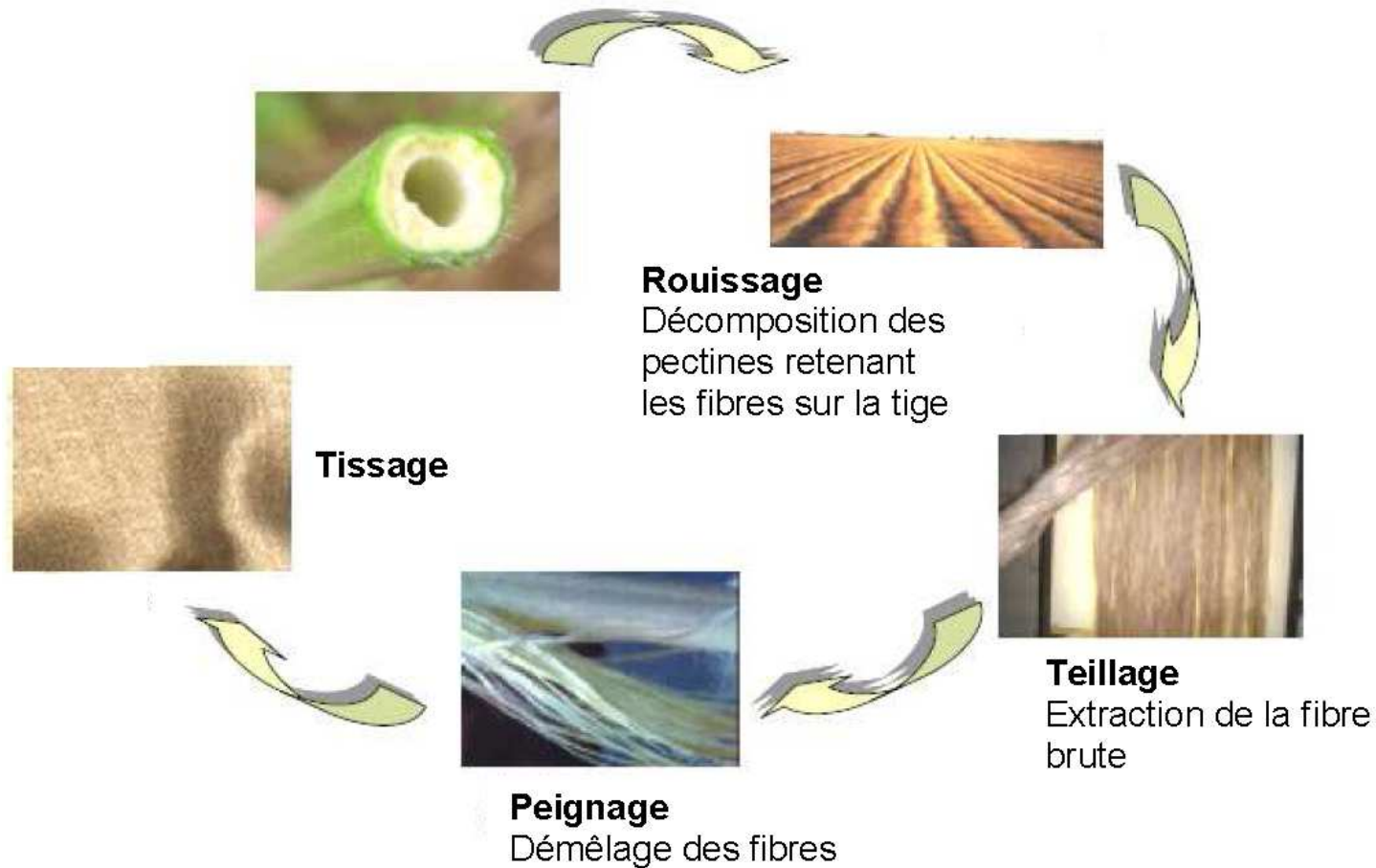
→ Les propriétés mécaniques des fibres végétales et minérales sont largement inférieures à celles des fibres synthétiques : ne conviennent donc pas pour des applications structurales.

Fibres	E (GPa)	A (%)	σ_r (MPa)	Densité	Prix (euro/Kg)
Fibres synthétiques					
Verre E (Filament vierge)	72 - 73	4,6 - 4,8	3200 - 3400	2,54	1,5
Carbone(Toray T300)	230	1,5	3530	1,7 - 1,9	30
Aramide	124	2,9	3620	1,44	
Fibres végétales					
Lin	13 - 85	1 - 4	600 - 2000	1,54	0,56 - 0,61
Ramie	61,4 - 128	1,2 - 3,8	400 - 938	1,56	
Chanvre	35	1,6	389	1,07	0,60 - 1,30
Jute	26,5	1,5 - 1,8	393 - 773	1,44	0,27
Sisal	9 - 21	3 - 7	350 - 700	1,45	0,31
Noix de coco	4 - 6	15 - 40	131 - 175	1,15	0,23 - 0,80
Coton	5,5 -12,6	7 - 8	287 - 597	1,5 - 1,6	
Fibres animales					
Ver à soie Attacus atlas	5	18	200		
Ver à soie Bombyx mori	16	15	650		
Araignée Argiope	7	30	600		

Propriétés mécaniques vs coût pour différentes fibres [CAR]

→ La matière première doit subir un certain nombre d'opérations permettant d'isoler les fibres végétales : rouissage, teillage, peignage et enfin tissage.

→ Ces différentes étapes sont essentielles car elles conditionnent en partie l'adhésion des fibres et de la matrice.



Transformation des fibres végétales [BIN]

→ Cellulose (principal constituant des fibres végétales) peu compatible avec les matrices TP (PP couramment utilisé en plasturgie).

→ Compoundage : procédé de mise en forme des composites à fibres naturelles.

> Mélange par fusion de matières plastiques et d'additifs.

> L'introduction de fibres végétales dans une matrice polymère fait appel à de nouvelles solutions techniques dérivées de ces technologies :

- Pour éviter de détériorer les fibres, il est possible de disperser les fibres les plus fragiles dans le polymère,
- Par greffage des fibres, on peut assurer l'adhésion fibres-matrice pour deux matériaux peu compatibles. En outre, le traitement thermique réduit la tendance des fibres à absorber de l'humidité,
- En choisissant un polymère transformable à basse température pour tenir compte de l'instabilité thermique des fibres au-delà de 200 °C.

→ Solutions envisageables pour les composites à matrice TP

→ Pour les composites à matrice TD : plus compliqué !

→ Les essais menés par la société Compositec ne sont pas concluants :

> Les pièces, réalisées par imprégnation (injection RTM et BMC) de résines époxy ou polyester dans un feutre non tissé de fibres végétales (chanvre, lin, jute, sisal/coco), ont des propriétés mécaniques très inférieures à celles des thermodurcissables renforcés de fibres de verre.

> La résistance au choc, entre autres, est réduite de 90 % !

> Principale cause : incompatibilité et mauvaise adhésion entre la fibre et la matrice [USN].

Principales caractéristiques des fibres minérales utilisées comme renforts dans les composites

→ Fibres de basalte aux propriétés singulières :

- résistantes au feu (comme les fibres de silice, céramique ou carbone)
- environ 3-4 fois moins chères.

→ Renforts pour matériaux composites en raison de qualités intéressantes en comparaison avec d'autres fibres :

- Température d'utilisation élevée (820°C),

- Contrainte et déformation à rupture supérieures à celles des fibres de verre (environ 20%),
- Module d'Young élevé (89 GPa),
- Très bonne résistance aux produits chimiques (acides, bases, solvants),
- Très bonne résistance à la corrosion et aux rayonnements UV,
- Matériau inerte, non toxique, non cancérigène,
- Insensibilité à l'humidité,
- Bonne mouillabilité
- Disponibles sous différentes formes : tissées, non-tissées, tissus 3D, tresses ou filaments coupés (cf. figure).

→ Applications :

Automobile, aéronautique, industrie ferroviaire, génie civil, équipements sportifs i.e. potentiellement tous les domaines utilisant les composites renforcés par des fibres de verre voire des fibres de carbone.

(a)



(b)



(a) Bobine de fibres de basalte – (b) Tissus de basalte [CAR]

Propriétés mécaniques des composites renforcés par des fibres naturelles

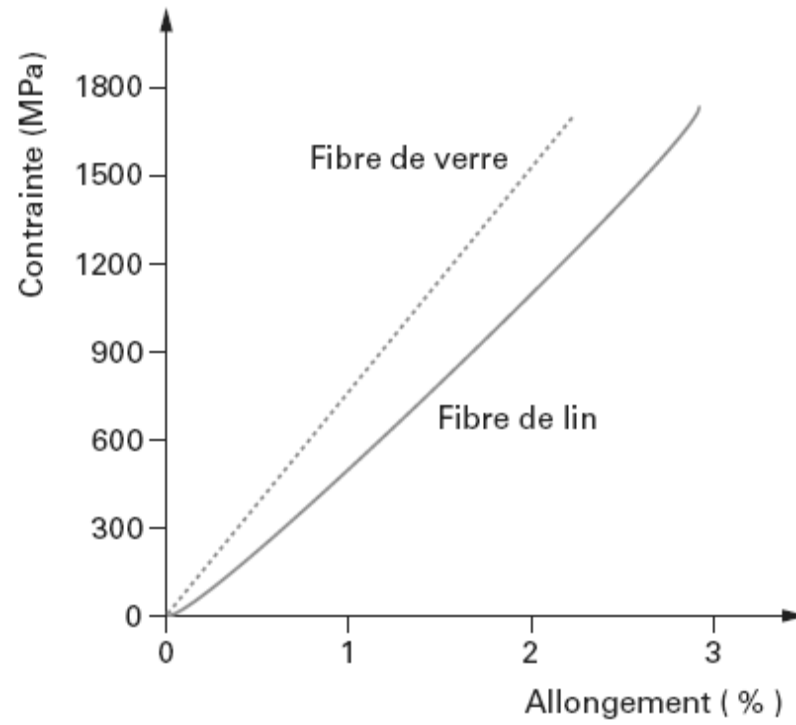
→ Une fibre végétale peut être assimilée à un empilement de plis renforcés par des fibrilles de cellulose (cf. chapitre 1 : le bois).

→ En traction, le comportement de la fibre est gouverné par deux paramètres :

- réorientation suivant l'axe de sollicitation des fibrilles
- glissement de ces dernières les unes par rapport aux autres.

→ Le comportement en traction n'est pas parfaitement élastique linéaire car la réorientation des fibrilles induit une augmentation de la rigidité au cours de l'essai.

→ Comparaison réponses en traction lin vs verre.



Courbe contrainte-déformation pour un essai de traction sur une fibre de verre et une fibre de lin [BAL]

→ Composites UD verre/époxy et lin/époxy réalisés par pultrusion (taux volumique de fibres de 50%).

→ Les propriétés spécifiques du composite lin/époxy sont globalement inférieures MAIS sont similaires en termes de module d'Young longitudinal et de résistance en traction transverse.

Caractéristiques	Matériau			
	Verre/époxy		Lin/époxy	
	Propriétés absolues	Propriétés spécifiques	Propriétés absolues	Propriétés spécifiques
Densité (g/cm ³)	1,87	1	1,35	1
Module d'Young longitudinal (GPa)	35	19	24	17,7
Résistance en traction longitudinale (MPa)	900	481	325	240
Résistance en traction transverse (MPa)	25	13	15	11
Résistance en compression longitudinale (MPa)	650	348	92	68
Résistance au cisaillement interlaminaire ILSS (MPa)	80	43	15	11
Tenue à l'impact Charpy (kJ/m ²)	280	150	60	44

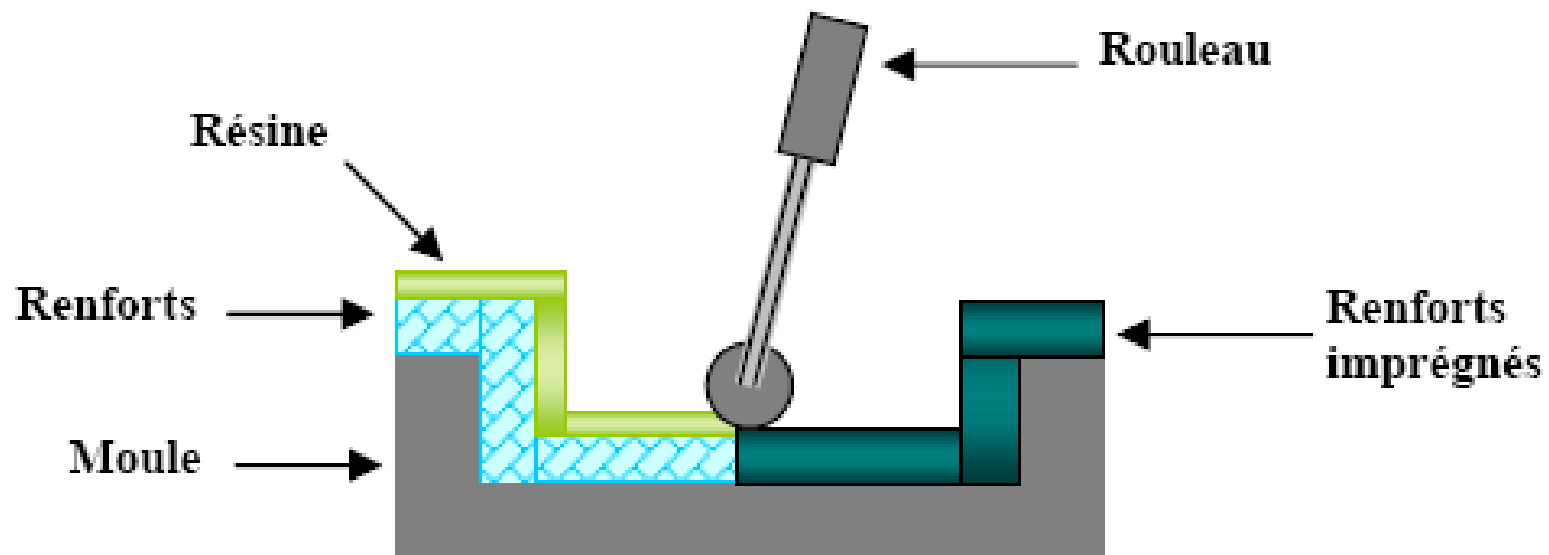
Comparaison des propriétés mécaniques de composites UD verre-époxy et lin/époxy [BAL]

→ Influence du procédé de mise en forme du composite sur ses propriétés mécaniques.

→ Deux techniques couramment employées : **moulage au contact et infusion**.

> Le moulage au contact : technologie de mise en œuvre des composites la plus utilisée.

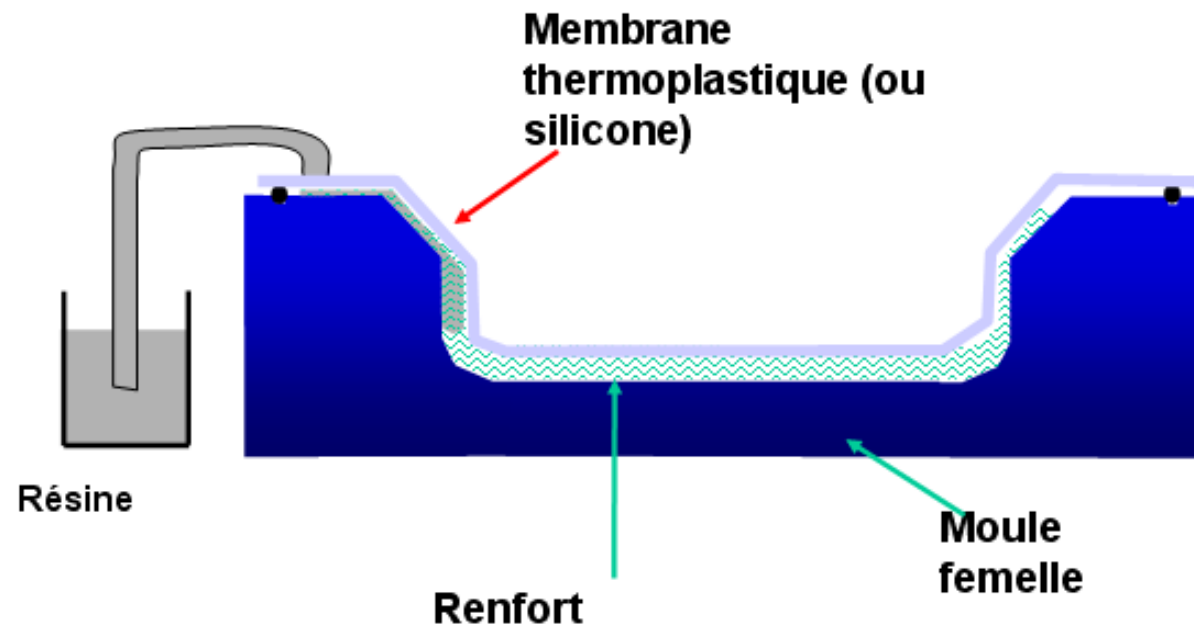
- Imprégnation des renforts secs, disposés dans un moule, d'une résine accélérée et catalysée.
- Implique opération de débublage afin d'éliminer les inclusions d'air entre la couche de résine et les fibres.



Mise en œuvre par moulage au contact [CAR]

> Procédé d'infusion VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)

- consiste à aspirer de la résine à travers un empilement de tissus (renforts structurels) placés entre un outillage (moule) et un film plastique.
- vide (0,6 à 0,95 bar) effectué à l'aide d'une pompe à vide. L'infusion permet d'obtenir des matériaux composites avec un taux de renfort important, lequel varie avec la dépression appliquée.



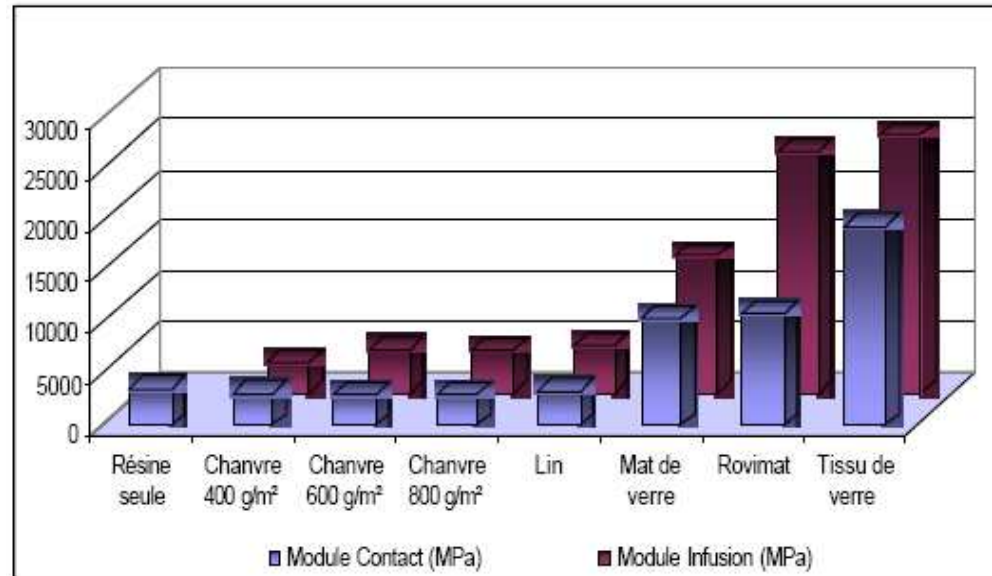
Principe du procédé d'infusion VARTM [CLE]

- procédé conseillé pour les grandes pièces
- moins nocif (pas de solvants dans l'air)
- le drapage permet la mise en place de procédures qualité (contrôle du nombre et du choix des renforts).

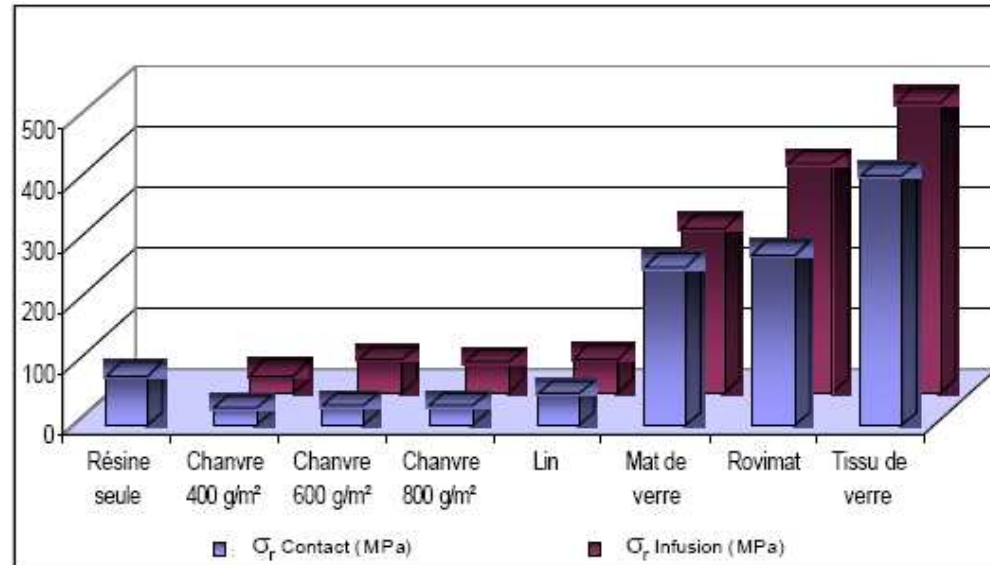
→ Evolution du module d'Young et de la résistance à rupture, en fonction du procédé de mise en œuvre, dans le cas d'un essai de flexion trois points :

Technologies	Moulage au contact			Infusion (0,5 bar)			Infusion (0,8 bar)		
	densité	Module (MPa)	E / d (MPa)	densité	Module (MPa)	E / d (MPa)	densité	Module (MPa)	E / d (MPa)
Chanvre 400 g / m ²	1,15	3108	2709	1,12	3050	2735	1,10	3313	3014
Chanvre 600 g / m ²	1,15	2935	2545	1,18	4321	3661	1,14	4395	3849
Chanvre 800 g / m ²	1,16	3017	2603	1,19	4242	3569	1,10	3213	2927
Lin	1,13	3329	2944	1,15	4804	4169	1,13	4237	3765
Fibre de bois	1,19	5073	4263						
Basalte	1,27	4694	3686	1,35	5177	3827	1,35	6243	4619
Tissu de verre équilibré	1,84	19555	10617	1,91	25444	13323	1,87	23803	12720
Mat de verre	1,62	10536	6503	1,72	13573	7876	1,72	15224	8843
Rovimat	1,63	11031	6775	1,73	23833	13763	1,82	21782	11937

Influence du procédé de mise en œuvre sur la rigidité spécifique de composites renforcés par différents types de fibres [CAR]



Influence du procédé de mise en œuvre sur le module d'Young de composites renforcés par différents types de fibres [BIN]



Influence du procédé de mise en œuvre sur la résistance à rupture de composites renforcés par différents types de fibres [BIN]

	σ_r (MPa)						
	Chanvre 400 g/m ² (mat)	Chanvre 600 g/m ² (mat)	Chanvre 800 g/m ² (mat)	Lin (mat)	Verre (mat)	Verre (Rovimat)	Verre (tissu)
Contact	29	32	29	51	261	282	408
Infusion	29	51	50	57	270	375	477

Comparaison des contraintes à rupture pour un essai de flexion 3 points [BIN]

→ En conclusion :

- le procédé d'infusion permet d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques (module d'Young et résistance) que le moulage au contact pour tous les types de renforts.
- la contrainte à rupture des composites renforcés par des fibres végétales est inférieure à celles de la résine seule pour les deux procédés.
- le module d'Young de la résine seule est équivalent à celui des composites renforcés par des fibres végétales obtenus par moulage contact et légèrement inférieur à celui des composites renforcés par des fibres végétales obtenus par infusion.

Applications des éco-composites

Principalement deux domaines d'applications :

- la construction (bardages, plinthes)
- l'automobile (pièces d'habillage intérieures).

Meubles de jardin et équipements sportifs (winch de bateau).



Exemples d'applications des éco-composites [POU]

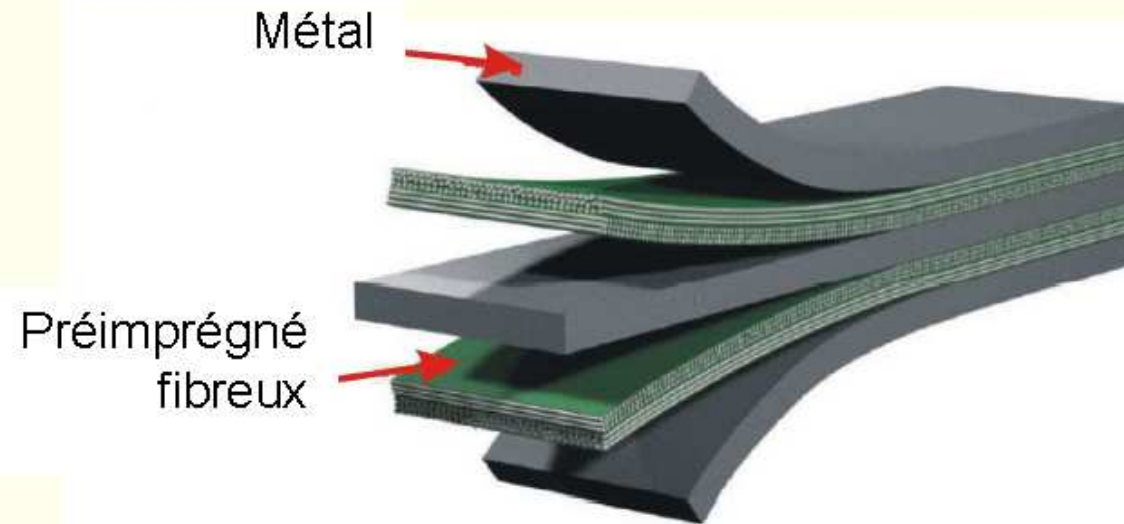
3.4 Les stratifiés hybrides métal-fibres

→ Fiber reinforced Metal Laminate issus des travaux de l'Université de Technologie de Delft (Pays Bas) dans les années 1970.

→ Objectif : mettre au point un matériau léger et possédant de bonnes propriétés en fatigue notamment en termes de propagation de fissure.

→ Résultats :

- stratifié **GLARE**[®] (GLAss REinforced aluminum laminate),
- stratifiés **ARALL**[®] (ARamid ALuminum Laminate)
- stratifiés **CARAL**[®] (CARbon Reinforced Aluminum Laminates) : les plus prometteurs notamment du point de vue des applications en aéronautique.



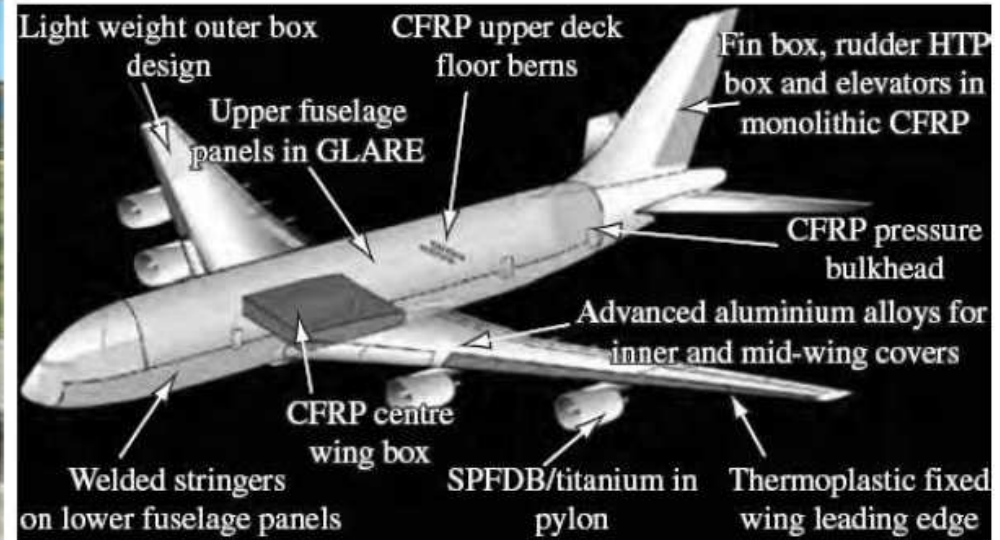
Stratifiés hybrides métal-fibres

- Les stratifiés hybrides métal-fibres sont 5 à 10 fois plus cher /kg que les alliages d'aluminium traditionnels utilisés dans l'aéronautique et l'aérospatiale.
- Gain en poids de l'ordre de 20%.
- Bonnes propriétés mécaniques (résistance à l'impact, comportement en fatigue, résistance au feu, simplicité de la fabrication et de la réparation...).

(a)



(b)



Utilisation des stratifiés hybrides métal-fibres dans l'Airbus A380 [BOT] :
(a) Utilisation du GLARE – (b) Applications diverses

→ Du point de vue conception, fabrication, inspection ou maintenance, les stratifiés hybrides métal-fibres utilisent davantage les techniques des matériaux métalliques

→ Pour répondre aux exigences d'une application donnée, ces stratifiés peuvent être façonnés sur mesure en jouant sur la combinaison résine-fibres (nature du pré-imprégné), le type d'alliage, l'épaisseur, la séquence d'empilement, la technique de préparation des surfaces, etc...

3.4.1 Stratifiés GLARE[®] (GLAss REinforced aluminum laminates) :

→ Développé dans les années 1980.

→ Composé de fines couches d'aluminium (de 0,3 à 0,5 mm d'épaisseur), de nappes unidirectionnelles ou de tissus de fibres de verres imprégnées de résine époxyde.

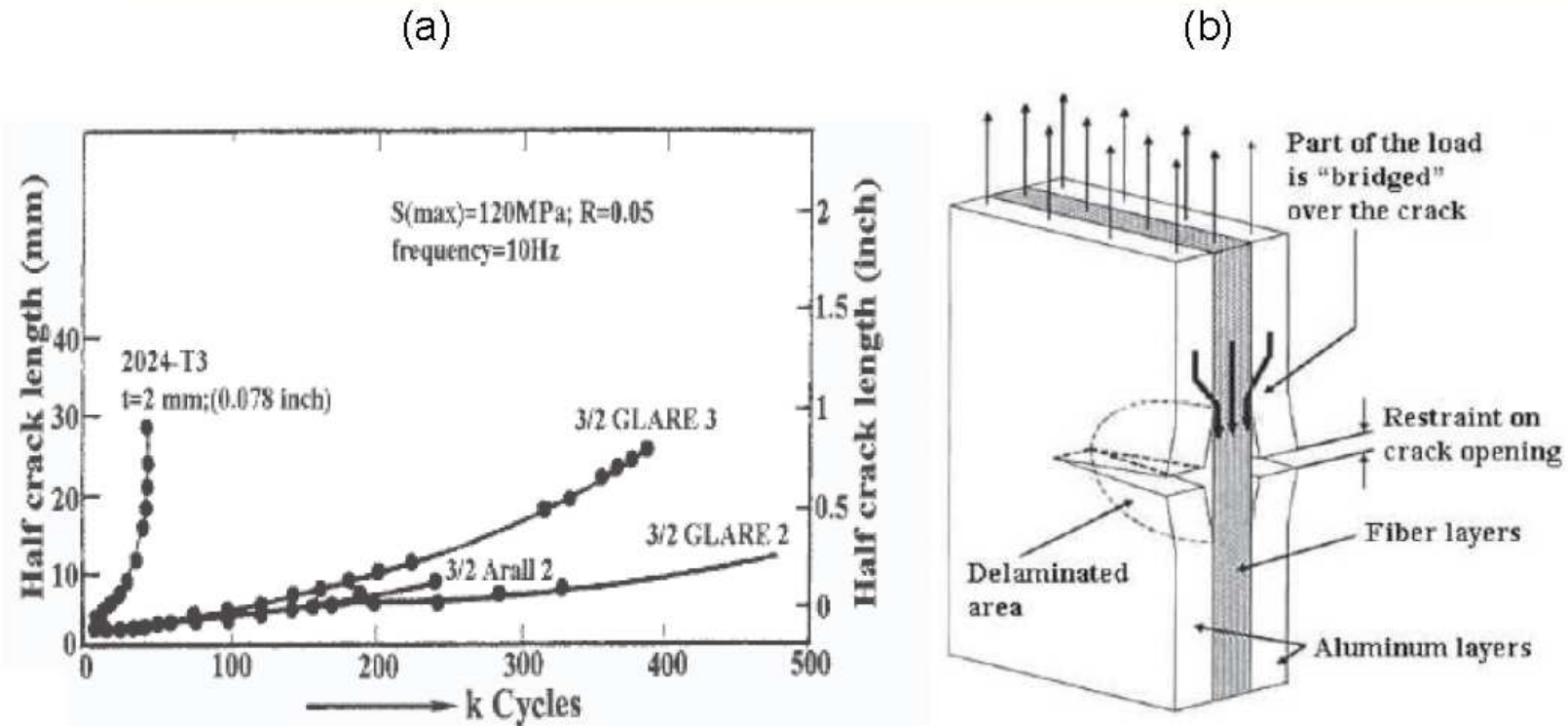
→ Pourquoi des stratifiés hybrides métal-fibres ?

- Les composites sont très résistants à la charge, mais possèdent une faible résistance à l'impact ainsi que de faibles propriétés statiques en cas de fissuration.
- Les alliages d'aluminium sont moins résistants à la charge, mais résistent mieux aux impacts notamment en raison d'un comportement élasto-plastique.

→ Avantages des stratifiés hybrides GLARE :

- meilleures caractéristiques mécaniques que les alliages d'aluminium précédemment utilisés,
- meilleure résistance à la corrosion,
- comportement moins sensible à l'humidité (grâce aux couches métalliques),
- meilleure résistance au feu (critère important en aéronautique),
- vitesse de fissuration quasiment constante et relativement faible,
- diminution de la concentration de contraintes en tête de fissure,
- meilleure résistance au niveau des jonctions d'assemblage,
- meilleure résistance aux impacts, comportement ductile,
- une densité moins élevée que des panneaux classiques en aluminium.

→ Exemple significatif du caractère innovant : partie du fuselage supérieur de l'A380 (environ 380m²).



Comportement en fatigue des stratifiés hybrides métal-fibres [WU] :
(a) Evolution de la taille de la fissure – (b) Mécanisme de fissuration

→ Comparaison des performances en fatigue dans des conditions de chargement caractéristiques d'un fuselage présentant une entaille centrale:

- deux variantes de GLARE
- alliage d'aluminium 2024-T3
- stratifié ARALL 2.

→ Les alliages d'aluminium présentent une augmentation rapide de la vitesse de croissance de la fissure.

→ Les stratifiés GLARE présentent une vitesse de croissance de fissure 10 à 100 fois inférieures. à celles des alliages d'aluminium.

→ Convient particulièrement pour toutes les situations de chargement critique en fatigue rencontrées en aéronautique.

→ Pourquoi ?

> Mécanisme de fissuration en fatigue spécifique.

> « pont » de charge au dessus de la fissure : la charge transite par les fibres intactes du stratifié ce qui permet de contenir l'ouverture de la fissure et de limiter fortement K_{IC} .

→ Propriétés mécaniques en traction et en compression en fonction de la température (RT : Room Temperature) et de l'angle d'orientation des fibres dans un stratifié GLARE [HAG].

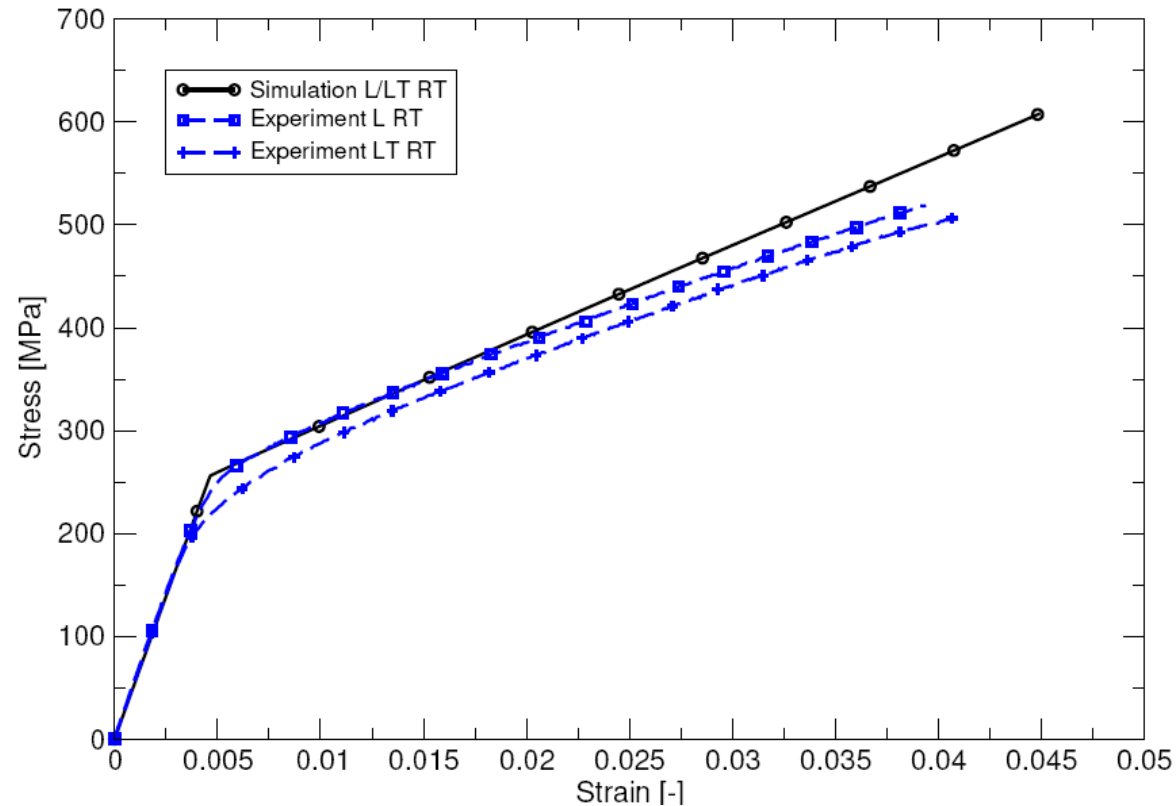
ϕ [°]	θ [°C]	E [GPa]	σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	E/E _{RT} [%]	σ_y/σ_{yRT} [%]	σ_u/σ_{uRT} [%]	ν_{12} [-]	ν_{21} [-]	ν_{13} [-]
0	RT	55.3	277.2	525.0	100.0	100.0	100.0	0.27	0.37	0.33
0	80	52.6	265.9	468.4	95.1	95.9	89.2	-	-	-
45	RT	55.2	251.4	547.4	100.0	100.0	100.0	0.39	0.34	0.32
45	80	50.8	245.4	470.9	92.0	97.6	86.0	-	-	-
67.5	RT	53.9	238.8	416.4	100.0	100.0	100.0	0.33	0.30	0.37
67.5	80	48.9	225.0	345.8	90.7	94.2	83.0	-	-	-
90	RT	55.5	252.5	515.0	100.0	100.0	100.0	0.27	0.36	0.32
90	80	52.9	241.4	446.2	95.2	95.6	86.7	-	-	-

ϕ [°]	θ [°C]	E [GPa]	σ_y [MPa]	σ_f [MPa]	ν_{12} [-]	ν_{21} [-]	ν_{13} [-]
0	RT	53.6	274.6	367.9	0.28	0.37	0.31
45	RT	54.2	281.5	374.7	0.32	0.37	0.26
67.5	RT	52.1	264.2	337.5	0.32	0.31	0.30
90	RT	54.6	281.5	362.6	0.28	0.37	0.28

Effet de la température θ et de l'orientation des fibres ϕ sur les propriétés mécaniques [HAG] :
 (a) Traction – (b) Compression

→ Globalement, les propriétés sont légèrement altérées lorsque la température augmente.

→ Comportement caractéristique en traction d'un stratifié GLARE pour une sollicitation dans la direction des fibres (L) ou dans la direction transverse (LT) :



Courbes contrainte-déformation en traction à température ambiante pour un stratifié GLARE [HAG]

3.4.2 Stratifiés ARALL® (ARamid ALuminum Laminates) :

→ Première génération des stratifiés hybrides apparus dans les années 1970.

→ Composé de fines couches d'aluminium (de 0,3 à 0,5 mm d'épaisseur), de nappes unidirectionnelles ou de tissus de fibres d'aramide (Kevlar) imprégnées de résine époxyde.

→ L'utilisation de polymères TD pour la matrice limite souvent la température d'utilisation en service des stratifiés. Leur comportement fragile induit faible ténacité et faible tolérance au dommage.

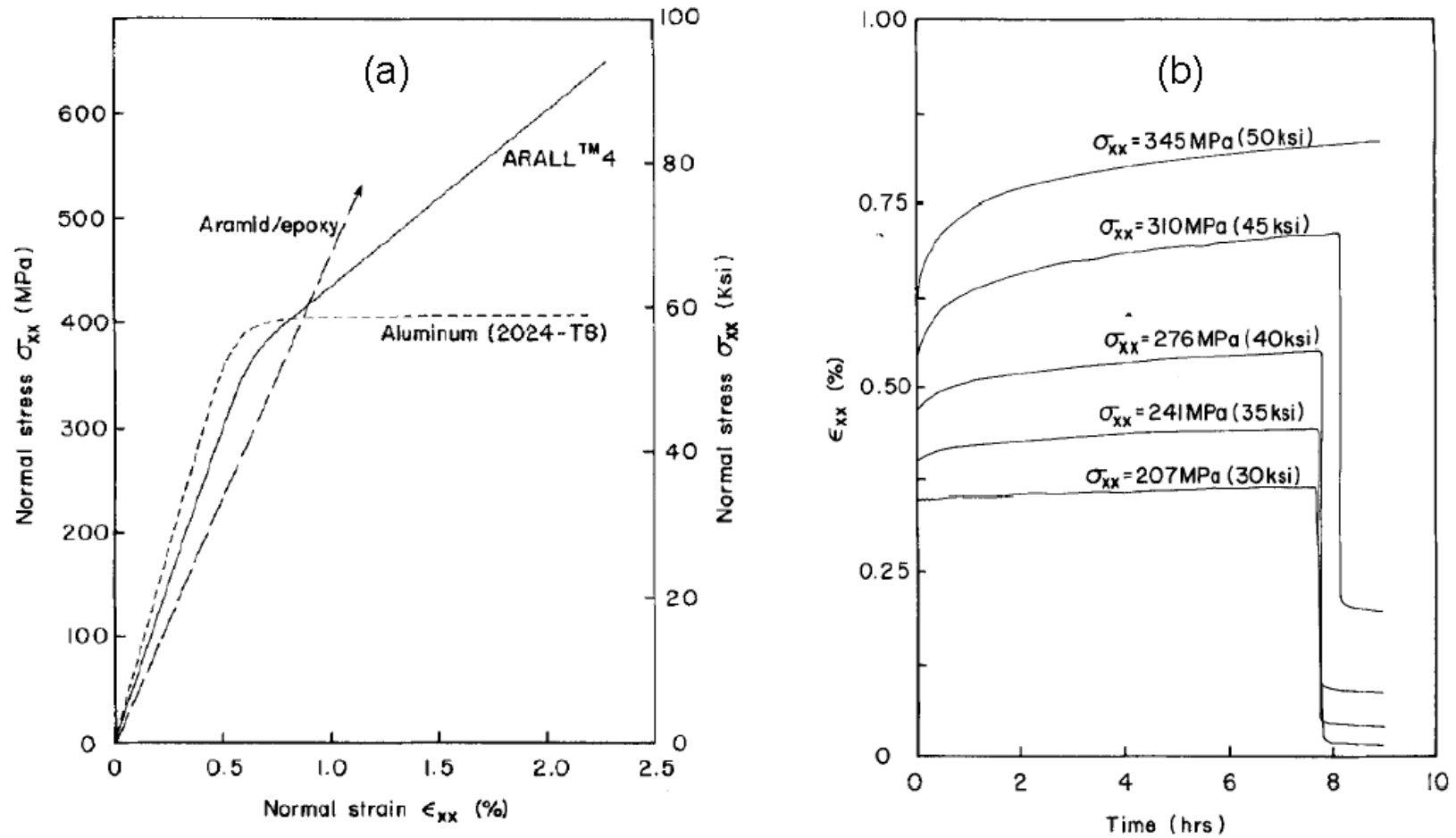
→ Les stratifiés ARALL tendent à s'affranchir de ces problèmes :

- excellente résistance à la croissance de la fissure en fatigue
- très bonnes propriétés sous chargement monotone.

→ Diverses variantes d'ARALL (nature de l'alliage d'aluminium et séquences d'empilement) ont été développées pour diverses applications.

→ Premières variantes d'ARALL (1-3) pour des applications où la température en service maximale n'excède pas 90°C.

→ Les effets du fluage dans chaque couche sont négligeables.



(a) Courbes contrainte-déformation en traction de l'ARALL 4 et de ses constituants à $T=121^{\circ}\text{C}$ et $\dot{\epsilon}=1\%.\text{min}^{-1}$
 (b) Réponses en fluage de l'ARALL 4 à $T=121^{\circ}\text{C}$ [PIN]

→ La variante ARALL-4 a été développée spécifiquement pour des environnements à température élevée (température en service maximale de 160°C).

→ A 121°C, le comportement viscoélastique des constituants de base (aluminium et pré-imprégné aramide-époxy) influe significativement la réponse du stratifié hybride.

→ La réponse au fluage est principalement contrôlée par la réponse au fluage à 121°C de la couche en aluminium.

→ L'amplitude des déformations de fluage dépend à la fois du niveau de contrainte appliquée et de l'état de contraintes résiduelles dans les différentes couches induites lors de la mise en œuvre du stratifié.

3.4.3 Stratifiés CARAL[®] (CARbon Reinforced Aluminum Laminates) :

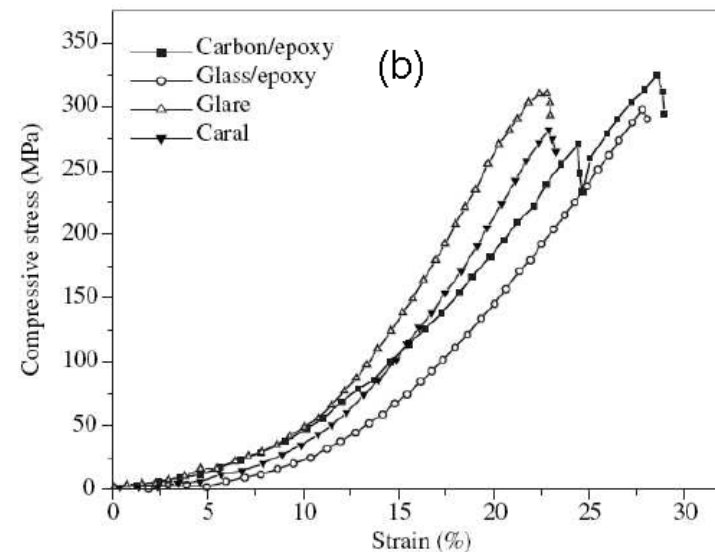
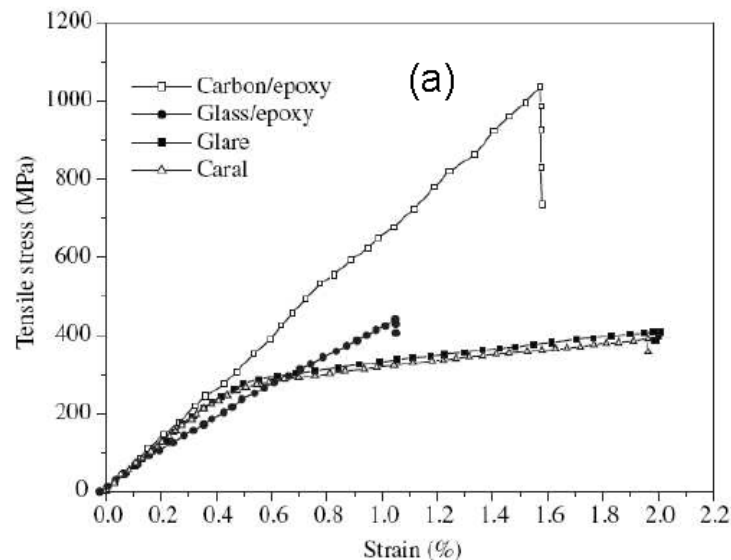
→ Les propriétés des stratifiés hybrides métal-fibres dépendent fortement des propriétés du renfort fibreux :

- les stratifiés aramide/époxy possèdent des bonnes propriétés mécaniques spécifiques (résistance en traction, module, résistance à l'impact) ainsi qu'un bon comportement en fatigue à faible nombre de cycles mais présentent une faible résistance en compression.
- Les stratifiés carbone/époxy et verre/époxy ont un module spécifique élevé mais, comparativement aux hybrides aramide/époxy, ils possèdent une résistance en traction,

un allongement à rupture, une résistance à l'impact et un comportement en fatigue (à faible nombre de cycles) moins bons.

→ Les stratifiés CARAL (CARbon Reinforced ALuminum Laminates) représentent une alternative à l'utilisation de l'ARALL dont le comportement en fatigue (à grand nombre de cycles) est largement moins bon que celui des stratifiés renforcés par des fibres de carbone.

→ La combinaison (grande rigidité - bonne résistance - bon comportement à l'impact) prédispose les stratifiés aluminium-carbone à des applications spatiales mais aussi comme absorbeurs d'impacts pour barre d'atterrissage d'hélicoptère.

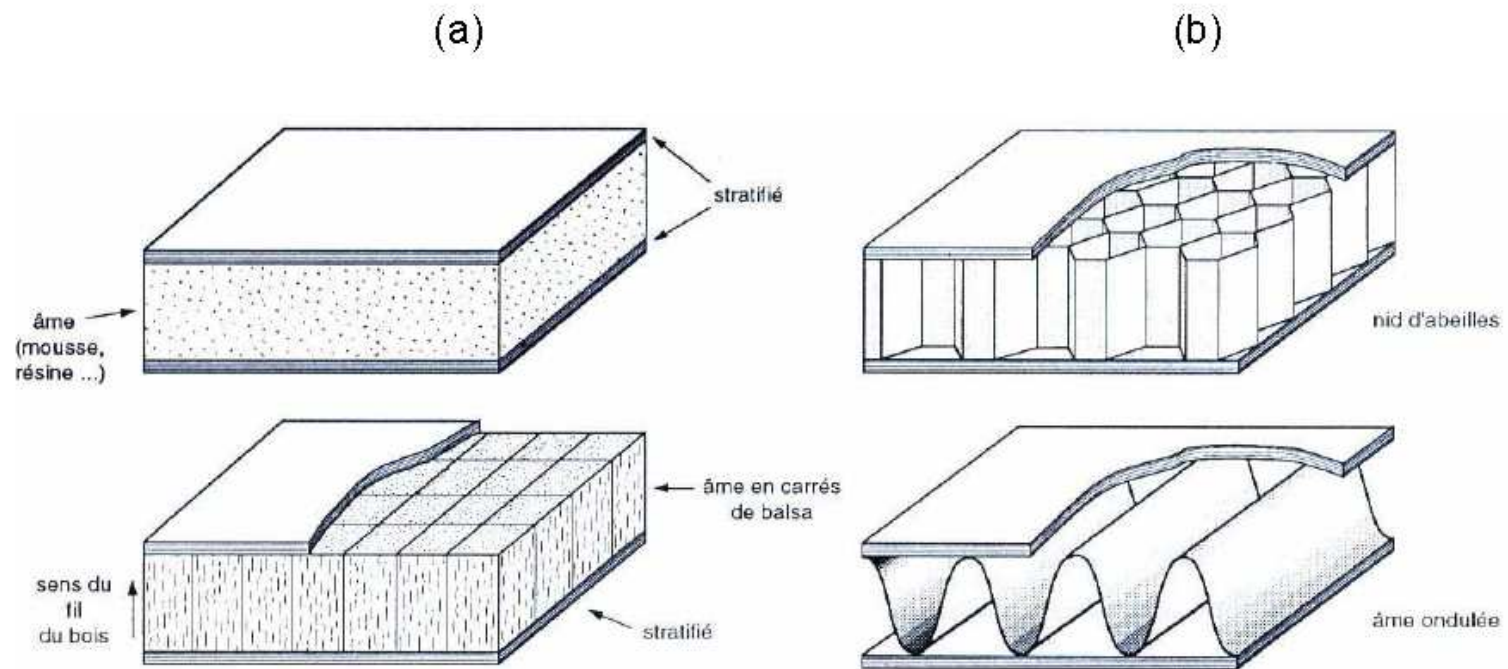


*Courbes contrainte-déformation des stratifiés GLARE et CARAL [BOT] :
(a) Traction – (b) Compression*

3.5 Les structures sandwich innovantes

Une structure composite sandwich est constituée de trois éléments de base [GAY] :

- L'**âme**, réalisée avec un matériau de faible densité, apporte une tenue en flexion.
 - > sandwiches d'isolation phonique et thermique : âme pleine (mousses, balsa ou mousses syntactiques)
 - > sandwiches de structure : âme creuse (nid d'abeilles ou âme ondulée), supportent efforts de compression et de cisaillement
- Deux **peaux**, réalisées au moyen d'un matériau ayant de très bonnes propriétés mécaniques.
 - > Généralement des structures planes qui reprennent les efforts de flexion
 - > Matériaux conventionnels (alliages légers, acier ou composites stratifiés fibreux)
- L'adhésif de surface (**interface**), permet de solidariser l'âme et les deux peaux et de transférer les efforts entre ces éléments.
 - > Assemblage par un collage



*Matériaux composites sandwich [BER] :
 (a) Ame pleine – (b) Ame creuse*

3.5.1 Les composites sandwiches classiques :

→ Les mousses plastiques ne sont pas utilisées pour des applications structures car elles possèdent des propriétés mécaniques limitées notamment en compression.

Polymère	Masse volumique (kg/m ³)	Résistance compression (MPa)	Intérêt
Polystyrène expansé (PSE)	16-40	0,1-0,2	Isolation thermique
Polyuréthane (PUR)	40-60	0,25-0,3	Isolation et moulage in situ
Polyvinyle	25-50	0,6	Tenue chimique
Polyéthylène	15-45	0,2-0,3	Amortissement
Polyacrylique	30-70	1-2,8	Comportement mécanique
Phénolique	50	0,6	Coupe feu

Différents types de mousses plastiques utilisables dans les composites sandwiches [GAY]

→ Les mousses syntactiques sont des résines chargées avec des charges de très faible densité telles que des microbilles creuses en polymère ou en verre (de 10 à 200 µm de diamètre).

→ Très bonnes propriétés en compression : les mousses syntactiques les plus performantes peuvent supporter des pressions de plusieurs centaines de bar pour une densité de l'ordre de 0,3 à 0,4 g.cm⁻³.

→ Applications sous-marines nombreuses.

→ Sandwiches à âme creuse : nid d'abeilles et l'âme ondulée.

> Le nida est constitué de cellules hexagonales géométriquement

> Les matériaux utilisés pour réaliser cette âme nida dépendent des applications visées :

■ **Les alliages d'aluminium** :

- Légers (masse surfacique : $5,8 \text{ kg.m}^{-2}$ pour 25 mm d'épaisseur), rigides, stables
- Mise en forme non plane et usinage difficile.
- Epaisseur de : 150 à 480 mm,

■ **Les aramides** (notamment polyamide-imide - TD) :

- Présentent de meilleures propriétés d'isolation thermique.
- A rigidité égale, plus légers (masse surfacique : $4,2 \text{ kg.m}^{-2}$ pour 25 mm d'épaisseur) que les alliages d'aluminium.
- Souples avant mise en forme du sandwich.
- L'âme aramide la plus connue : Nomex dont l'épaisseur peut atteindre 150 mm.

■ **Le polypropylène (TP)**

- Moins rigide que les âmes précédentes mais plus léger (masse surfacique : $1,7 \text{ kg.m}^{-2}$ pour 25 mm d'épaisseur)
- Moins cher.
- Epaisseur de : 10 à 90 mm

■ Ames nida à structure tubulaire en polycarbonate et en PVC.

Caractéristiques des structures composites sandwiches

→ Compromis entre rigidité, légèreté et stabilité dimensionnelle.

→ Pour une sollicitation en flexion, les structures sandwiches présentent une résistance et une rigidité relatives très importantes

→ Augmentation de 8% de la masse de la structure (en quadruplant l'épaisseur e de la plaque) par rapport à une plaque monolithique d'épaisseur e permet de multiplier par 37 la rigidité relative et par 9 la résistance

→ Excellentes propriétés en fatigue, une bonne résistance à la corrosion et une aptitude à absorber l'énergie.

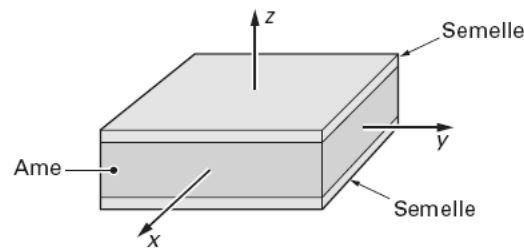


Schéma	Plaque monolithique	Plaques sandwiches	
Caractéristique			
Rigidité relative	100	700	3700
Résistance relative	100	350	925
Masse relative	100	104	108

Influence de l'épaisseur de la structure sur les propriétés mécaniques de plaques sandwiches [BAR]

→ **Inconvénients :**

- Pour certaines catégories d'âme : tenue au feu moyenne et risque de flambement plus élevé que d'autres structures.
- Problèmes de décollement peaux/âme en fonction la compatibilité des matériaux à l'interface.

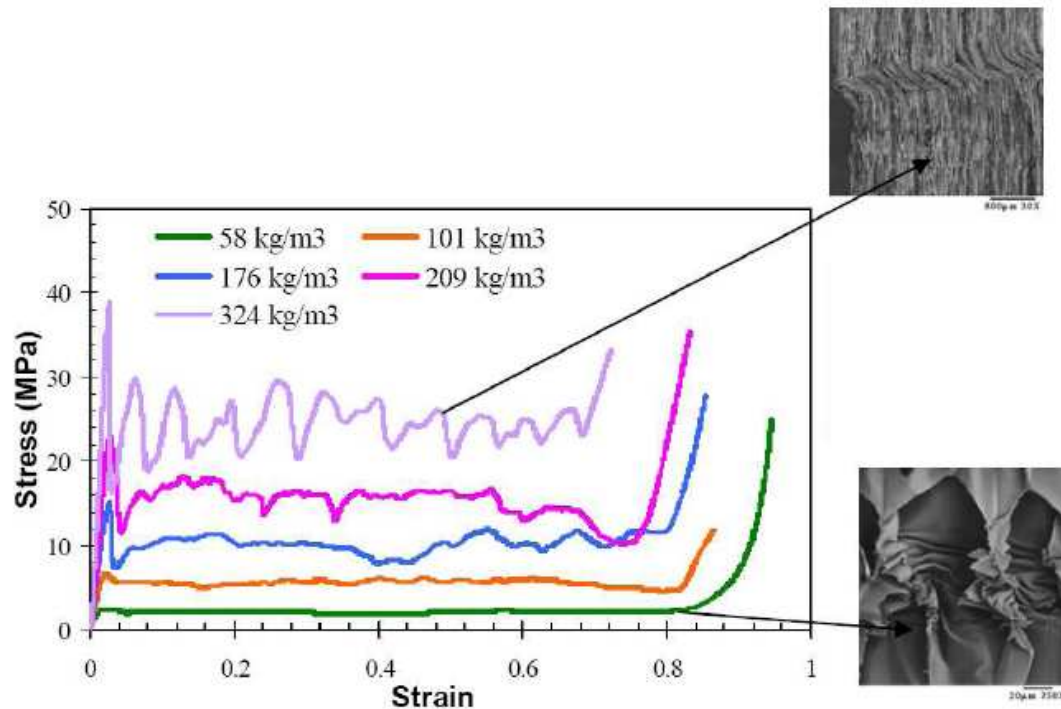
Propriétés mécaniques des composites sandwiches

Core Material		Density		Tensile Strength		Compressive Strength		Shear Strength		Shear Modulus	
		lbs/ft ³	g/cm ³	psi	Mpa	psi	Mpa	psi	Mpa	psi x 10 ³	Mpa
End Grain Balsa		7	112	1320	9.12	1190	8.19	314	2.17	17.4	120
		9	145	1790	12.3	1720	11.9	418	2.81	21.8	151
Cross-Linked PVC Foam	Termanto, C70.75	4.7	75	320	2.21	204	1.41	161	1.11	1.61	11
	Klegecell II	4.7	75	175	1.21	160	1.10			1.64	11
	Divinycell H-80	5.0	80	260	1.79	170	1.17	145	1.00	4.35	30
	Termanto C70.90	5.7	91	320	2.21	258	1.78	168	1.16	2.01	13
	Divinycell H-100	6.0	96	360	2.48	260	1.79	217	1.50	6.52	45
Linear Structural Foam	Core-Cell	3-4	55	118	0.81	58	0.40	81	0.56	1.81	12
		5-5.5	80	201	1.39	115	0.79	142	0.98	2.83	20
		8-9	210	329	2.27	210	1.45	253	1.75	5.10	35
Airex Linear PVC Foam		5-6	80-96	200	1.38	125	0.86	170	1.17	2.9	29
PMI Foam	Rohacell 71	4.7	75	398	2.74	213	1.47	185	1.28	4.3	30
	Rohacell 100	6.9	111	493	3.40	427	2.94	341	2.35	7.1	49
Phenolic Resin Honeycomb		6	96	n/a	n/a	1125	7.76	200	1.38	6.0	41
Polypropylene Honeycomb		4.8	77	n/a	n/a	218	1.50	160	1.10	n/a	n/a

Données comparatives des principaux matériaux constituant l'âme des composites sandwiches [MCO]

→ Structures sandwiches à cellules périodiques :

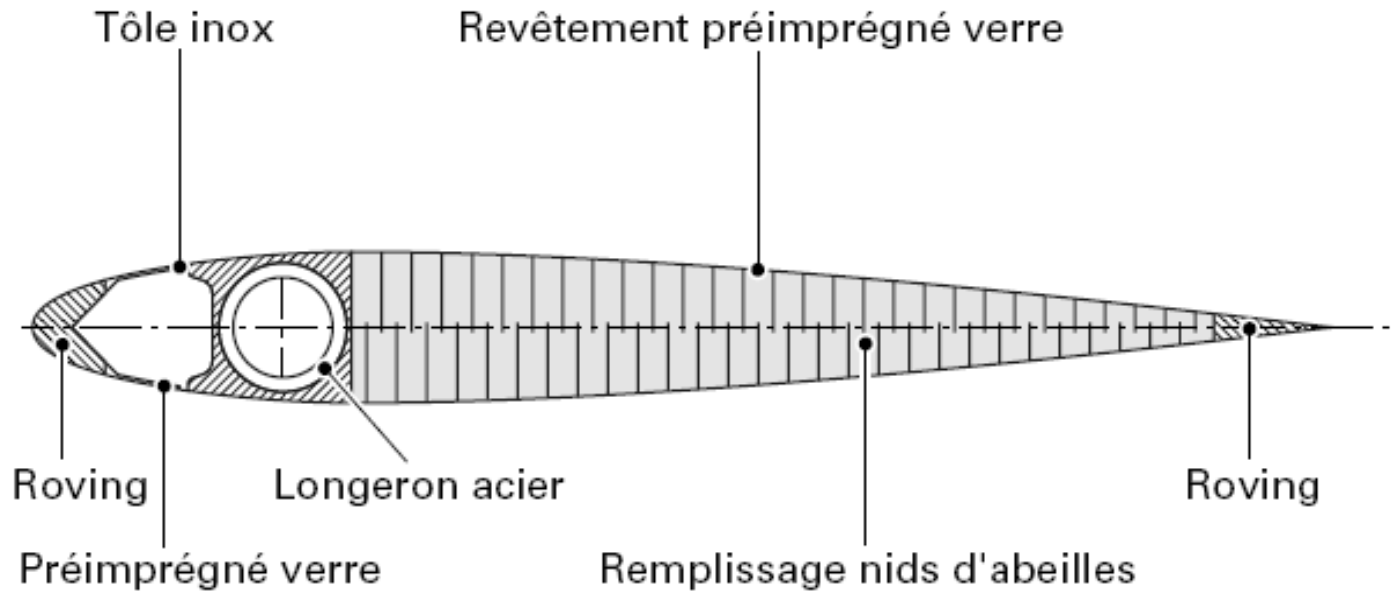
- A densité croissante (nombre de cellules croissant), la limite d'élasticité augmente tandis que la compression maximale diminue.
- Comportement global du matériau : évolution de ductile vers fragile au fur et à mesure que le flambement des cellules se généralise.



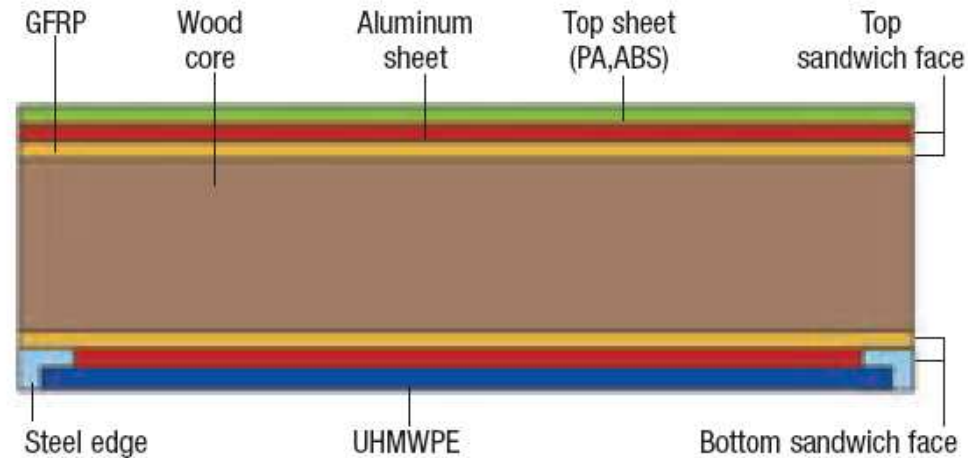
Influence de la densité des cellules sur le comportement en compression de composites sandwiches [RAV]

Applications courantes des composites sandwichs

Nombreuses et variées : construction navale, construction ferroviaire, automobile, aéronautique, aérospatiale, éoliennes.



Pâle d'hélicoptère basée sur une structure composite sandwich NIDA [CHA]



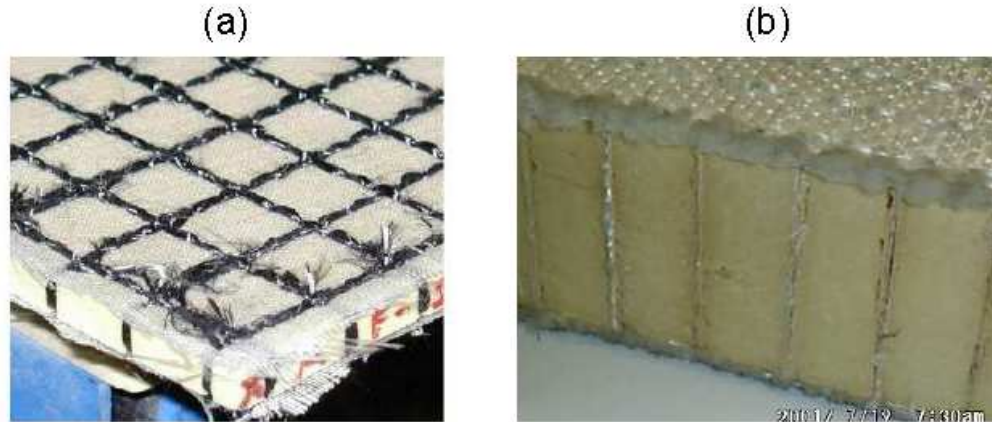
Représentation schématique de la section droite d'un ski [ANS]

3.5.2 Composites sandwichs à âme innovante :

→ La société Tycor produit des structures sandwich composites avec une âme en mousse renforcée par des fibres (carbone : Tycor A - verre : Tycor B).

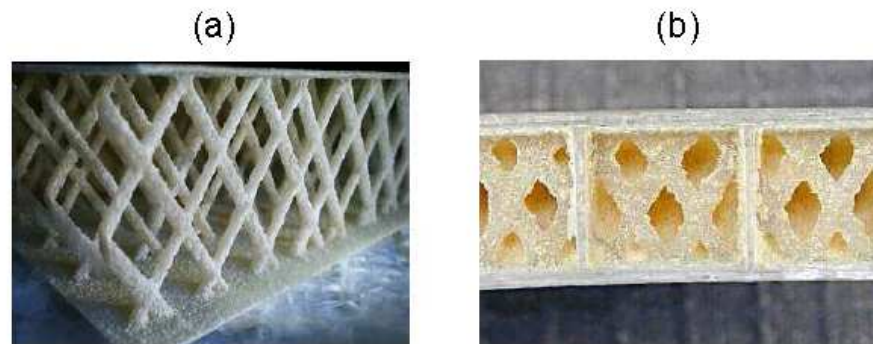
→ Amélioration des propriétés de mousses à bas coût avec des fibres peu chères.

→ Procédé d'infusion pour polymériser simultanément les panneaux sandwichs : très bonne adhésion entre les peaux et l'âme ce qui est l'un des points critiques des matériaux sandwichs.



(a) Sandwich avec âme piquée unidirectionnelle et tissu pré-assemblé
 (b) Sandwich hybride avec âme tissée et tissu pré-assemblé [STO]

→ Possibilité de soustraire la mousse lors de la phase de moulage pour obtenir une âme structurée en treillis.



(a) Sandwich avec âme renforcée bi-directionnelle -
 (b) Sandwich hybride avec âme tissée et renforcée bi-directionnelle [STO]

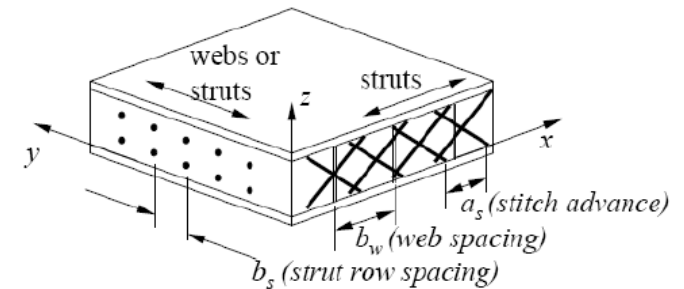
→ Unités : 1 psi ≈ 689 Pa et 1 lb.ft⁻³ ≈ 16 kg.m⁻³.

(a)

Core	Density (lb/ft ³)	Shear strength (psi)	Shear modulus (ksi)	Compressive strength Z (psi)	Tensile strength Z (psi)
TYCOR A12 ¹	13	330	27	1620	340
Rohacell 200WF ²	12.8	350	24	1090	820

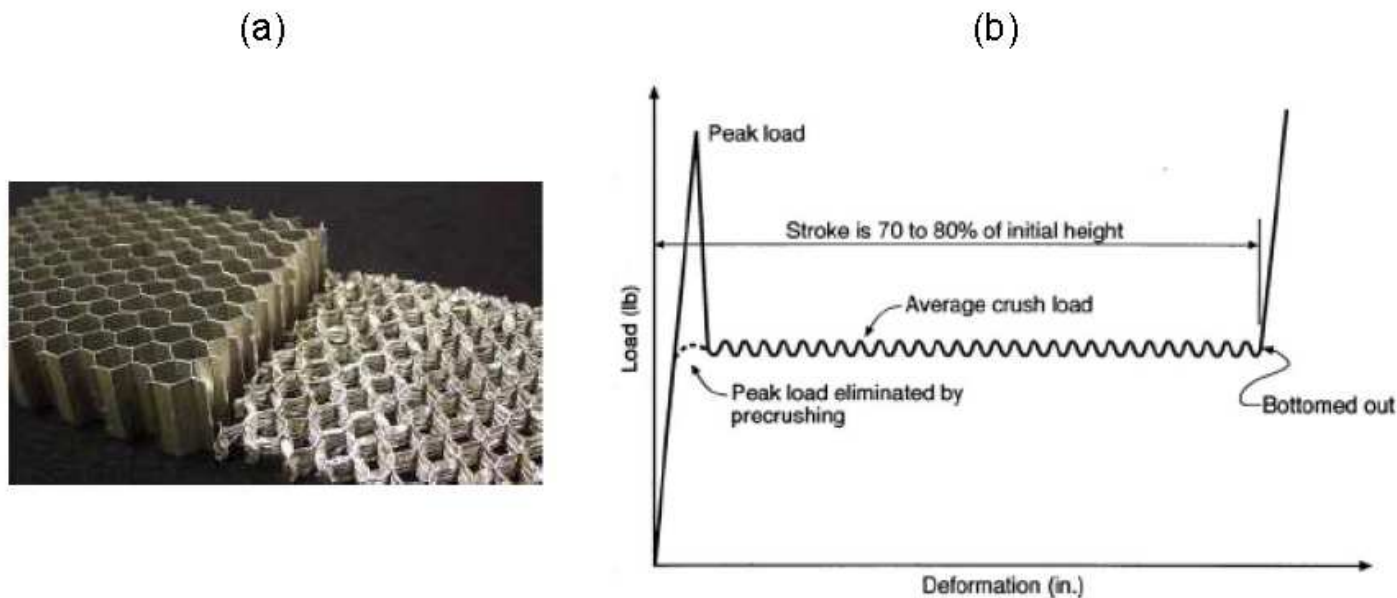
(b)

Core	Core Density (lb/ft ³) Nom./Effctv.	Shear strength YZ (psi)	Shear strength XZ (psi)	Compressive strength Z (psi)	Shear modulus YZ (ksi)	Shear modulus XZ (ksi)
TYCOR ³	12.6	440	390	1550	38	29
Balsa ^b	9.5/12.5 ^d	432		1870	23.1	



Propriétés mécaniques d'âmes renforcées par des fibres vs balsa : (a) Tycor A (fibres de carbone) – (b) Tycor B (fibres de verre) [STO]

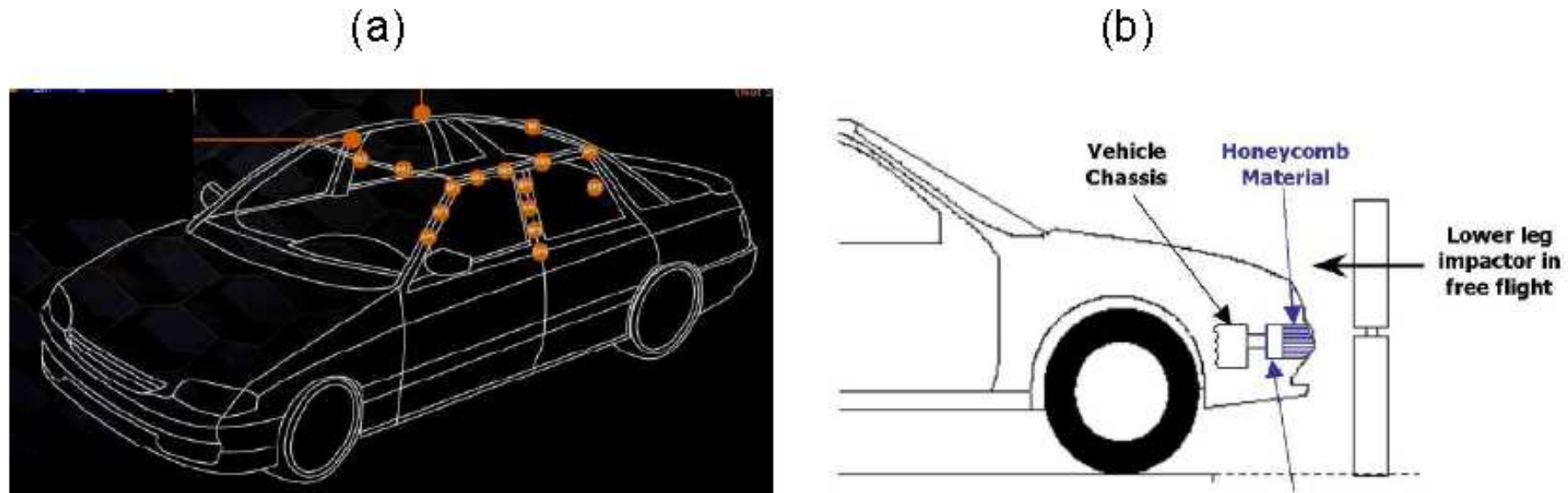
- Structures nida TP (appelées HexWebEM) : absorption efficace de l'énergie lors des chocs.
- Charge appliquée dans une direction parallèle aux parois des cellules hexagonales lesquelles vont absorber l'énergie de déformation
- L'âme se comprime de 70 à 80 % par rapport à son épaisseur initiale. La surcharge (peak load) est évitée par pré-flambement de la structure nida.
- Architecture intéressante du point de vue de l'encombrement.



(a) Compression de l'âme nida TP lors de la charge -
 (b) Courbe charge-déformation lors d'un essai de compression [HEX]

→ L'utilisation de matériaux TP pour le nida présente plusieurs avantages :

- bonne résistance à l'écrasement,
- possibilité de récupérer la forme initiale après impact (par réchauffage et redéploiement),
- recyclabilité,
- facilité de fabrication, de mise en œuvre et d'intégration.



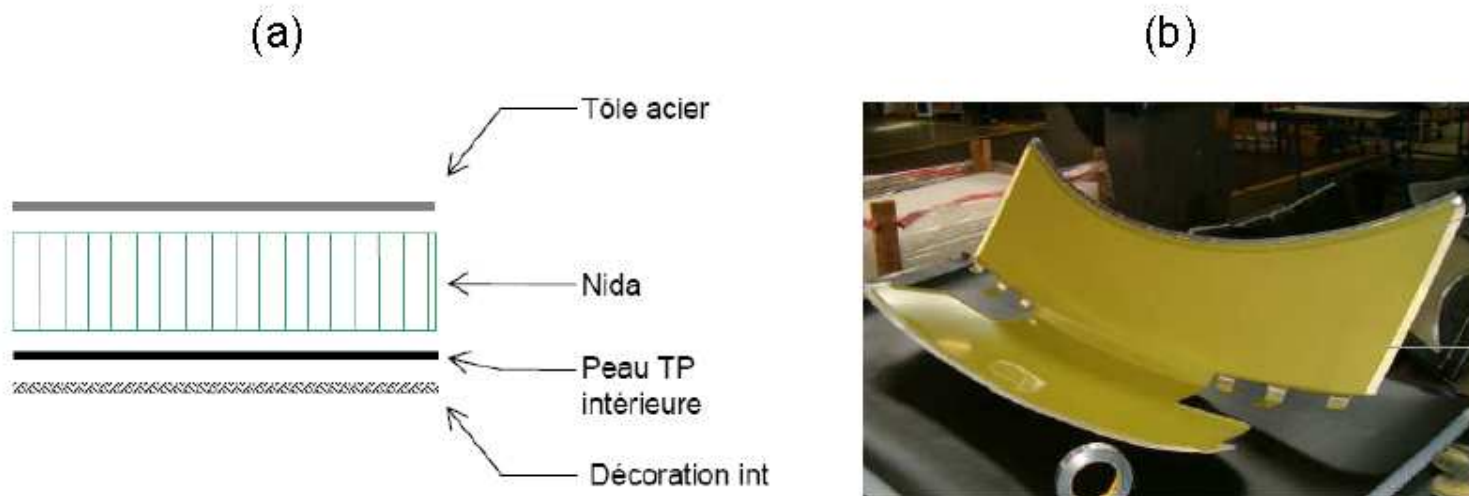
*Intégration potentielle de sandwichs nida TP dans une voiture [HEX] :
(a) Montants et calandre (b) Système de protection des piétons*

→ Autre exemple d'âme TP innovante : Sandwiform[®]

→ Constitué d'une âme nida TP (typiquement PP de 15 mm d'épaisseur), la peau extérieure est en acier tandis que la peau intérieure est en composite TP (de masse surfacique 1kg. m⁻²).

→ La tôle acier est recouverte d'un adhésif réactivable à 180°C.

→ Problème technique : pliage notamment pour la réalisation de pièces telles que la porte d'un coffre de voiture.

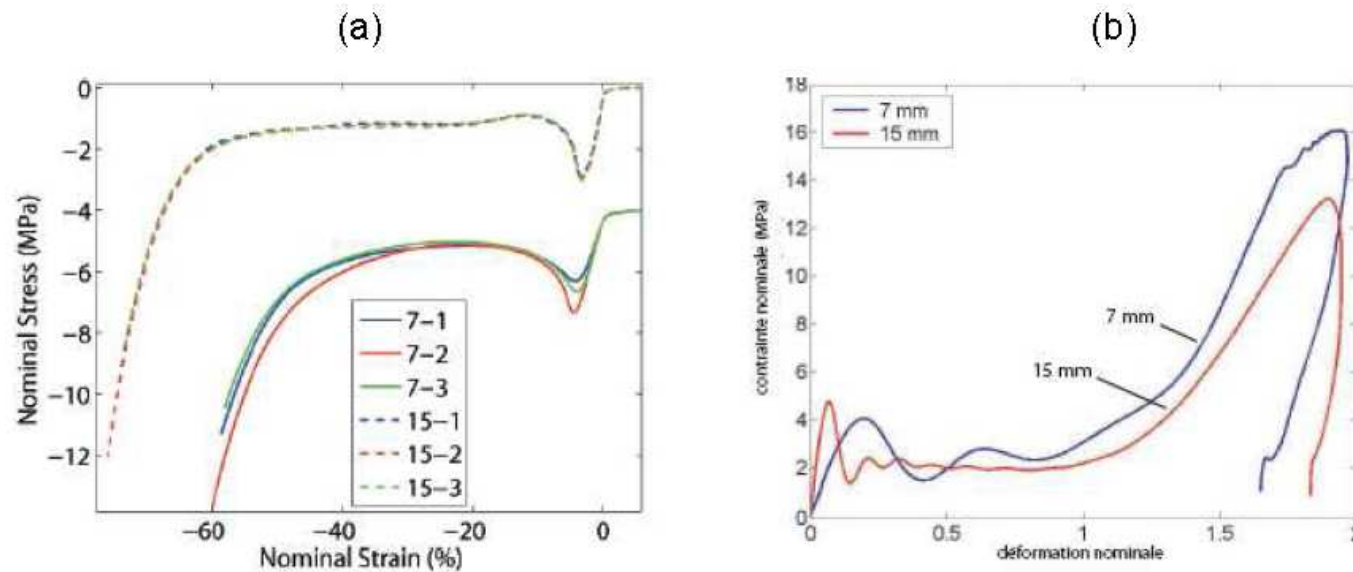


(a) Configuration du matériau Sandwiform[®] - (b) Application avec une porte de coffre de voiture [FAC]

→ **Avantages du matériau Sandwiform® :**

- Gain de rigidité, de poids, de volume, potentiel en termes de garnissage intérieur.
- Poids total du coffre = 6,3 kg (dont 3,7 kg de peau extérieure en acier) / 8kg environ pour une porte de coffre classique (20% de gain).
- Tenue au crash.

→ Pour des panneaux avec une âme de 7 et 15 mm d'épaisseur, essais de compression statiques et dynamiques :



*Essais de compression sur un panneau Sandwiform® :
(a) Statique - (b) Dynamique sur âme seule [TSI]*

→ La réponse d'un panneau à un **essai statique** se décompose en trois zones :

- comportement élastique linéaire ($E=120 \text{ MPa}$),
- plateau de contrainte correspondant au flambement de l'âme ($\sigma_{\text{seuil}} = 3 \text{ MPa}$),
- phase de consolidation lorsque l'âme est totalement écrasée ($\varepsilon_{\text{consolidation}} = 45\%$ pour une âme de 7 mm et $\varepsilon_{\text{consolidation}} = 60\%$ pour une âme de 15 mm).

→ Les **essais dynamiques** (vitesse de 15 m/s) :

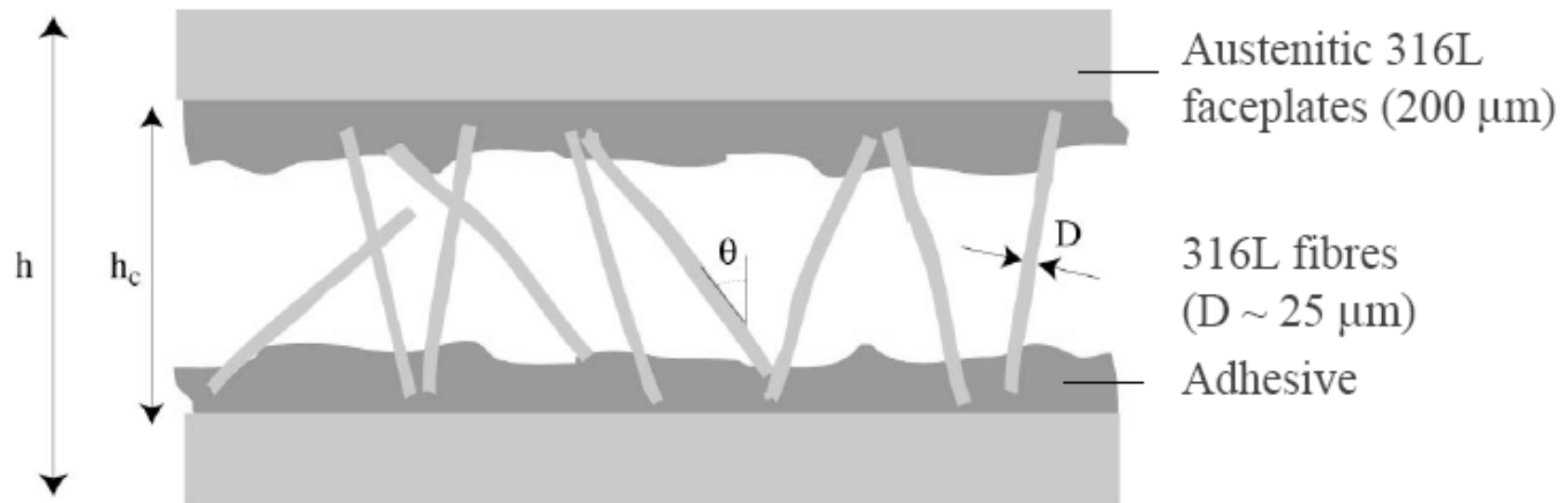
- Mise en évidence de l'effet de la vitesse de chargement : 50% d'augmentation du pic de flambement et 100% d'augmentation pour le plateau de contrainte.
- Cet effet peut être attribué à la fois au comportement viscoplastique de l'âme et à la géométrie des cellules.

→ Autre type de sandwichs innovants : métal/métal

- âme = fibres métalliques en acier austénitique 316L (de diamètre $25\ \mu\text{m}$)
- peaux = plaques en acier 316L de 200 microns d'épaisseur.

→ Epaisseur totale : de 1 à 2 mm.

→ Taux volumique de fibres = environ 8%.



Composite sandwich avec âme fibreuse et peaux métalliques [MAR]

→ Intérêt de ce type de sandwich :

- rigidité en flexion élevée
- aptitude à la mise en forme,
- soudabilité,
- capacités d'amortissement acoustique et vibratoires
- capacité d'absorption d'une grande quantité d'énergie lors d'un écrasement.

→ Choix du matériau acier austénitique 316L ?

- non-magnétique,
- très bonne ductilité (fortement écrouissable)
- excellente ténacité à toutes températures.

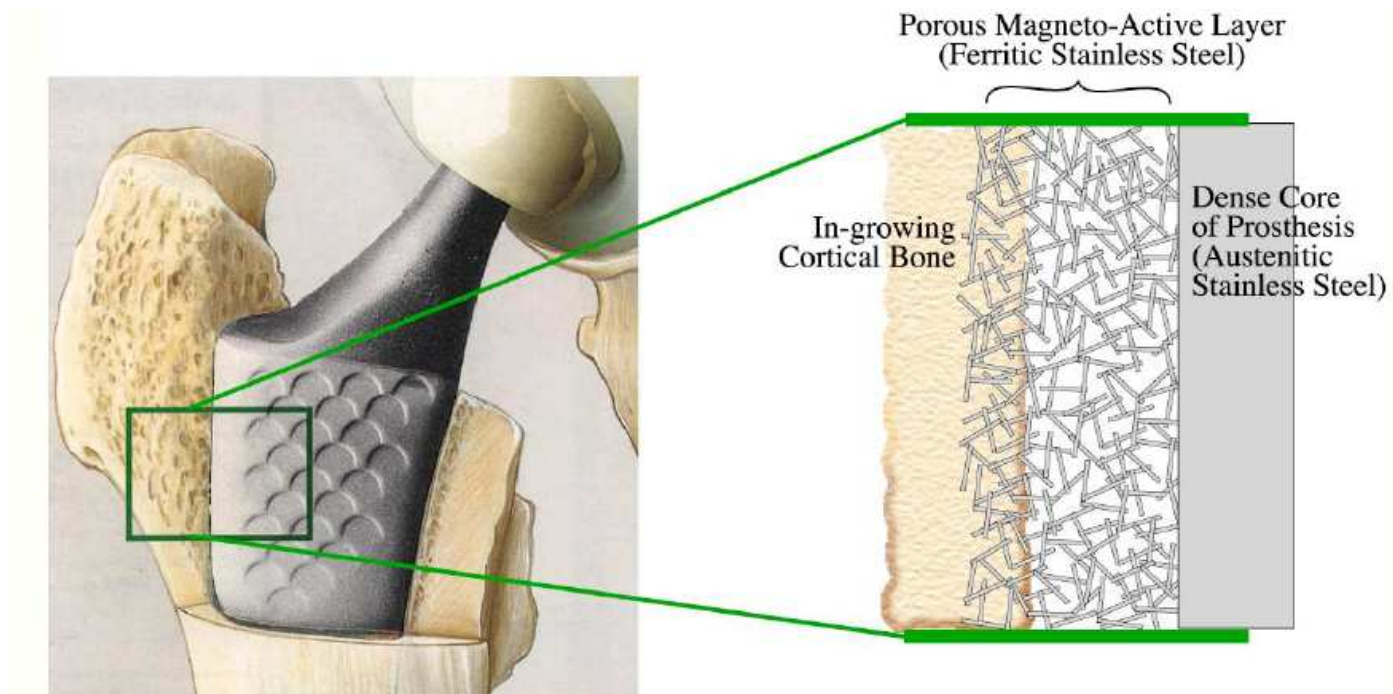
→ Exemple de la prothèse de la tête de col du fémur :

> Application biomédicale potentielle de ce type de matériau sandwich.

> Association de peaux austénitiques et d'une âme à fibres ferritiques.

> Propriétés des fibres : magnétiques, haute limite d'élasticité ainsi qu'une ténacité variable en fonction de la température.

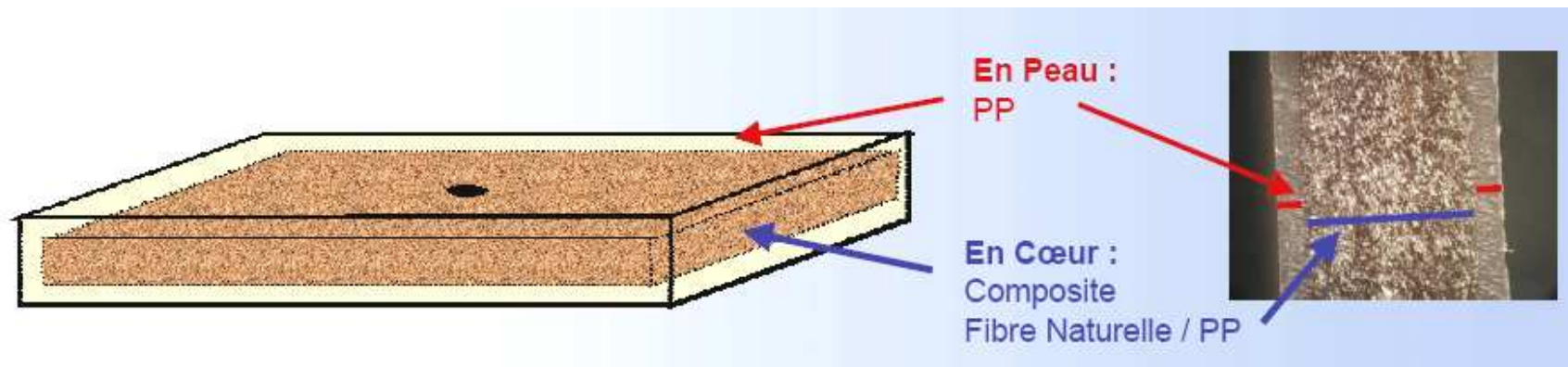
> L'âme fibreuse constitue une couche active pouvant se souder à l'os en phase de recalcification sous l'effet d'un champ magnétique.



Soudage magnéto-mécanique de la prothèse à l'os [MAR]

→ **Filière éco-composites** : tentatives de mise au point de structures sandwichs utilisant une âme hybride PP/ fibres naturelles.

→ Association permettant de circonscrire les problèmes liés à l'utilisation de fibres naturelles (tenue au choc et à l'humidité, odeurs...) par un procédé d'injection sandwich bi-matière [POU].



Eco-composite sandwich [POU]