

Composite et recyclable

LIVRE BLANC

L'EMERGENCE
D'UNE NOUVELLE
TECHNOLOGIE

C'EST L'EMERGENCE
DE NOUVEAUX
PRODUITS

Supermoulage®



Tube en fibres continues
avant Supermoulage®



Tube à moitié supermoulé



Tube assemblé par
Supermoulage®

SUPERMOULAGE® : consiste à assembler une-des partie-s thermoplastiques et une-des parties en composite à fibres continues, dont les polymères sont compatibles, garantissant un assemblage cohésif et recyclable.

On distingue le **Supermoulage® de tubes** et le **Supermoulage® d'inserts TFP** qui diffèrent uniquement par le type de composant surmoulé (cf Pages 24 et suivantes)

Editorial

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés (allègement, résistance, durabilité). Les **composites thermoplastiques** ont une part croissante dans les secteurs aéronautique, automobile et des sports et loisirs car ils présentent une meilleure recyclabilité et durabilité que les thermodurcissables et sont plus adaptés à des **cycles de production rapides**. Ils ont des **propriétés mécaniques élevées** grâce aux fibres continues.

Le **Supermoulage® de composites thermoplastiques à fibres continues** est une innovation technologique aussi peu connue qu'avantageuse.

Le consortium 111

Inventé et breveté par le consortium « 111 », représenté par les sociétés Nobrak, Ollow et Protoform Bourgogne, le **Supermoulage®** consiste à assembler, par surmoulage de polymère thermoplastique, une ou plusieurs parties en composite à fibres continues.

Les thermoplastiques mis en œuvre sont compatibles, ce qui garantit un assemblage **cohésif et recyclable**.

Convertir des pièces métalliques en pièces composites recyclables

Comment penser de telles pièces, recyclables et armées de fibres continues ?

C'est la question à laquelle ce guide ambitionne de répondre. Ce guide se limite aux composites mis en œuvre par les technologies de surmoulage, de TFP pour les empiècements et d'enroulement pour les corps creux. Il partage le savoir du consortium 111 sur les composites thermoplastiques, le plus simplement possible. Il s'appuie sur nos lectures, nos connaissances et notre expérience.

Il a pour but d'aider les B.E.tiens - et les béotiens curieux - à comprendre, choisir, et appliquer le composite thermoplastique pour optimiser leur conception. Il contribue à la conversion de pièces métalliques en pièces composites recyclables dont le **bilan carbone est meilleur**.



Cyclisme

Cadre avec fibre de verre ou de carbone, fourche, potence + cintre, cockpit, accessoires, pédales, roue cargo...



Sports de voile

Pièces anti-corrosion, rames, supports de moteur, coques, attaches, gouvernes...



Sports d'hiver

Skis, planches, bâtons, raquettes, fixations...



Sports de raquette

Raquette de padel, raquette de tennis, raquette de badmington



Aéronautique

Cockpit, plancher, porte, drone...



Industrie

Capotage, pipe, casing, poussettes, châssis...



Automobile

Carénages, intérieurs, pièces sous capot moteur...



Equipement de sécurité

Coques de casques, protections...



Equipement médical

Cadres de chaises roulantes, béquilles, prothèses...



Transport ferroviaire

Composants légers en cabine

Sommaire

1 / Introduction aux composites thermoplastiques	06	4 / Le Supermoulage®	24
1.1. Les constituants des composites thermoplastiques	06	4.1. Technologie	24
Les polymères	06	Critères de choix	24
Les renforts	07	Liaison cohésive entre les parties	30
Le renfort, dans quelles proportions ?	09	Quasi-isotropie et anisotropie contrôlée	32
Pourquoi aller vers des composites recyclables ?	10	Une solution au fluage	34
1.2. Comparaison avec les composites thermodurcissables	11	Une solution à la faiblesse des lignes de soudure	35
		Notion d'embuvage	35
2 / Propriétés des matériaux composites armés	12	4.2. Procédés	36
2.1. Les vertus mécaniques des composites	12	4.3. Types d'assemblages proposés par le Consortium 111	37
Module de Young et limite élastique	12		
Aperçu des avantages / inconvénients	13	5 / Quelques principes de base de conception	38
Contrainte à la rupture	13	5.1. Notion de comportement équivalent	38
Fatigue	13	5.2. Orientation des fibres et quasi-isotropie	39
Gain de poids	14	5.3. Proportion et loi des mélanges	40
Performance spécifiques	14	5.4. Effet de la température	41
2.2. Performances environnementales et recyclage	16	5.5. Mécanique de rupture (ou d'endommagement)	42
Potentiel de réchauffement global	16	5.6. Orientation et contrainte maximale admissible	45
Performances	16	5.7. Flambage	46
Cycle de recyclage	17	5.8. Cisaillement plan	46
		5.9. Quel coefficient de sécurité utiliser ?	47
3 / Sollicitations	18	5.10. Les singularités qui méritent l'attention du concepteur	47
3.1. Compression	18	Trous	47
Contraintes admissibles en compression	18	Attaches	48
Flambage	19	Intégration d'inserts métalliques, de fils résistifs, etc...	49
3.2. Flexion	20	Distance au bord	49
3.3. Torsion	20	Épaisseur, forme et variation brutale de moments d'inertie	49
3.4. Résistance aux chocs	21	6 / Quelques ordres de grandeur	50
3.5. Fléchissement sous charges	21		
3.6. Fatigue	22	7 / Perspectives d'évolution et opportunités	52
Vieillessement	22		
Fluage	22	Bibliographie	53
		Glossaire	54

01

Introduction aux composites thermoplastiques

1.1. LES CONSTITUANTS DES COMPOSITES THERMOPLASTIQUES

Les polymères

Les polymères sont de grandes molécules formées de petites unités répétées. Ils se divisent en deux types principaux : les polymères amorphes, où les molécules sont disposées de manière désordonnée, et les polymères cristallins, qui possèdent des zones organisées appelées cristallites. Ces cristallites renforcent la structure, **comme une corde est plus résistante qu'une touffe d'herbe**. Les propriétés des polymères (physiques, mécaniques, électriques, etc.) sont décrites dans des documents spécialisés, et le choix d'un polymère dépend de son usage final.

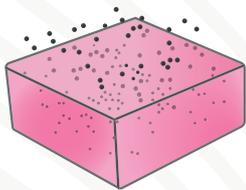
En **Supermoulage**[®], on utilise aisément le polypropylène (PP) et le polyamide (PA). Il est possible de créer des pièces composites avec des thermoplastiques moins utilisés, comme le PC ou le PEEK, bien que cela affecte les coûts et la mise en œuvre.

Les PA sont courants dans l'automobile (ex. pièces sous capot) et dans les engrenages, cames, roulements. Ils sont solides, résistants aux chocs et aux produits chimiques, même à chaleur modérée. Certains, notamment les nylons, absorbent l'humidité. La plupart des PA utilisés sont des nylons, mais ce n'est pas le cas par exemple du PA11 et du PA12.

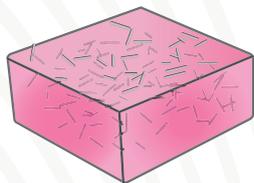
Bonnes propriétés mécaniques sur une large plage de températures (-40°C à 100°C)

Le PA11 et le PA10.10 méritent l'attention du lecteur car ils font partie des thermoplastiques fabriqués à partir d'une **matière première renouvelable**, l'huile de ricin. Ils sont bio sourcés et contribuent ainsi à la réduction de l'empreinte carbone.

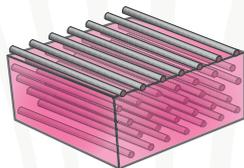
Le PA11 présente plusieurs avantages : haute résistance chimique, excellente résistance à l'usure, à la fatigue mécanique et aux chocs, faible absorption d'humidité ce qui lui confère une bonne stabilité dimensionnelle. De plus, sa bonne tenue dans des environnements extérieurs exposés aux UV et aux intempéries ainsi que le maintien de bonnes propriétés mécaniques sur une large plage de températures (-40 °C à 100 °C) en font un bon choix pour les équipements sportifs comme le vélo, et pour nos applications de **Supermoulage**[®].



Chargé



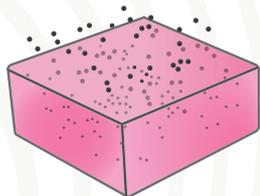
Renforcé



Armé

Les renforts

Distinction des types de composites thermoplastiques en fonction des renforts



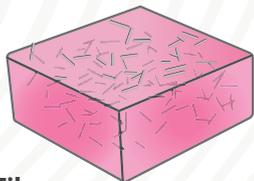
Charges

(microbilles, poudres, particules)

Tout d'abord, il faut distinguer **charges** et **renforts**. Les charges sont des éléments fragmentaires, poudres, ou liquides, ajoutés aux matières plastiques pour améliorer une propriété de la matière (ex. tenue en température, pigments pour coloration dans la masse, stabilisation aux UV...) ou réduire le prix.

On parlera de **thermoplastique chargé**.

L'impact de ces charges sur la réutilisation des broyats (fragments pour réinjection), à des taux élevés, doit être étudié et garanti.



Fibres

discontinues

Les renforts, quant à eux, se présentent sous forme filamenteuse, allant de la particule allongée, discontinue, à la fibre continue. Ils contribuent essentiellement à améliorer la résistance et la rigidité du matériau.

Des fibres courtes peuvent significativement augmenter la rigidité du polymère de base

Lorsque les fibres sont discontinues (d'environ 1 à 15mm), on parle de **thermoplastique renforcé**.

Comme l'illustre le schéma ci-après, des **fibres courtes** (environ 1 mm) peuvent significativement augmenter la rigidité du polymère de base. La résistance s'améliore encore avec des fibres plus longues (3 à 7 mm). Des fibres de 40 mm, difficiles à injecter sans se casser, augmenteraient considérablement la résistance aux chocs.

Efficacité

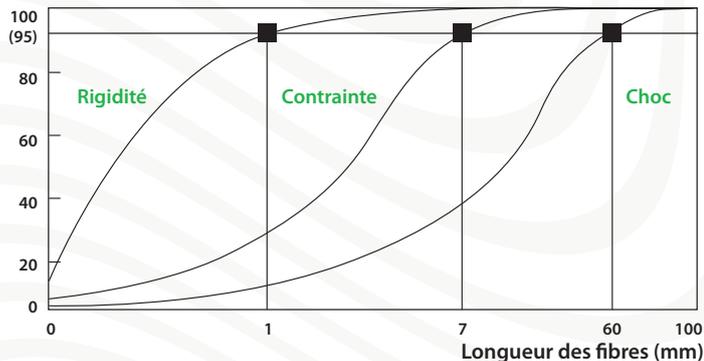


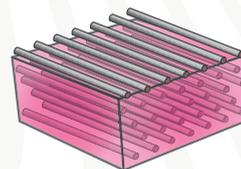
Illustration de l'amélioration des performances mécaniques selon la longueur des fibres.

Source : JEC – solution composite – Thomason et Vlug.

	Module d'élasticité (ou module de Young) (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Granulé vierge	3	40 à 80
Fibre courte	6 à 10	80 à 120
Fibre longue	8 à 15	100 à 200

Exemple base PA, avec renfort verre env. 30% – données illustratives

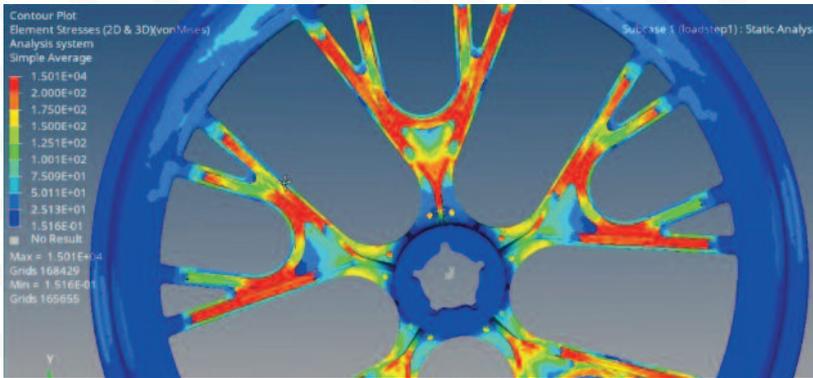
Lorsque les renforts sont des fibres continues, on parle de thermoplastique « armé » (comme le béton l'est d'acier)



Imaginez maintenant
les bénéfices des fibres continues...

Lorsque les renforts sont des **fibres continues**, on parle de **thermoplastique « armé »** (comme le béton l'est d'acier), ou encore de **composite à fibres continues**.

En effet, les **thermoplastiques chargés ou renforcés**, même techniques, ne peuvent donner plus que ce qu'ils ont.



Restitution d'un résultat de calcul en résistance des matériaux.

L'image « s'allume » au-delà d'un seuil de contrainte admissible choisi par le concepteur : il faut alors changer de matériau pour éviter la rupture.

C'est là qu'intervient la **fibre continue** : « là où cela s'allume ».

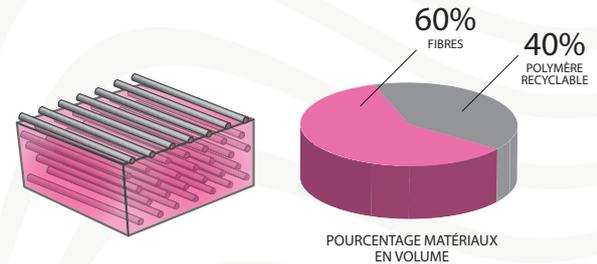
Le renfort, dans quelles proportions ?

Le taux de renfort pour des thermoplastiques **renforcés** est voisin de 30% en masse et peut varier de 10 à 60% en volume.

Teneur en masse de renfort = $\text{masse renfort} / \text{masse totale}$

Le taux de renfort pour des thermoplastiques **armés** varie de 40 à 60% en volume.

Teneur en volume de renfort = $\text{volume renfort} / \text{volume total}$



Rappelons que la **matrice**, le polymère qui enrobe les fibres, est recyclable. On parle donc de **composite recyclable**.

On peut calculer la masse volumique du composite en utilisant les masses volumiques de ses composants (matrice et renfort), ou en calculant $\text{masse totale} / \text{volume total}$.

Pourquoi aller vers des composites recyclables ?

Un composite est un assemblage d'au moins deux matériaux aux propriétés mécaniques complémentaires visant à obtenir des **caractéristiques spécifiques supérieures** à celles des matériaux standards (aluminium, acier).

Cela permet de convertir des pièces métalliques en composites recyclables, particulièrement lorsque la **réduction de poids** est nécessaire pour des applications équivalentes aux structures métalliques.

Cela permet également de remplacer les composites non recyclables par **des solutions 100 % recyclables**, même si les filières ne sont pas encore pleinement établies. Ne faut-il pas commencer quelque part ?

Pourquoi ne pas y aller ?

Un autre argument en faveur de cette transition est la **production locale** en France, qui offre un meilleur bilan carbone et une supply chain courte. Cela réduit également le "**time to market**", améliore la réactivité en phase de développement et **diminue les stocks** clients grâce à des tailles de lot réduites.

Qui dit mieux !

1.2. Comparaison avec les composites thermodurcissables

Les pièces composites dans les sports et loisirs, les avions (ailerons, portes, planchers, spoilers, etc.) et dans le secteur nautique sont nombreuses et leur pertinence est indiscutable. **Les bonnes raisons pour qu'elles soient principalement à matrice thermodurcissable sont-elles toujours pertinentes ?**

Les polymères thermoplastiques présentent des propriétés mécaniques comparables à celles des résines thermodurcissables :

- Masse volumique : 0,8 à 1,35 g/cm³
- Module de Young : 2 à 5 GPa sans renfort, plus de 30 GPa selon le renfort
- Module de flexion : 1 à 6 GPa
- Coefficient de Poisson : 0,3 à 0,5
- Contrainte à la rupture en traction : 30 à 200 MPa
- Résistance à la chaleur : 90 °C à 200 °C pour les plus techniques
- Allongement élastique : 1 à 4 % (hors élastomères).

Notons que :

- Les thermoplastiques de grande diffusion (GD) sont utilisés en sous-capot moteur depuis des années (couvre-culasse, répartiteurs, etc.),
- La T_g, température de transition vitreuse n'est pas la limite d'utilisation pour les semi-cristallins.
- Les thermoplastiques haute performance (HP), comme le PEEK et le PEKK, sont employés dans l'aéronautique.

Les thermoplastiques sont prisés pour leur thermoformabilité, leurs cycles de transformation rapides et **leurs coûts réduits**

Ils offrent également une meilleure capacité d'amortissement et une **résistance accrue à la fatigue** par rapport aux thermodurcissables non recyclables. Enfin, leur utilisation industrielle génère **peu de déchets** (fibres, poussières, résines) et n'engendre ni réactions chimiques ni émanations de solvants.

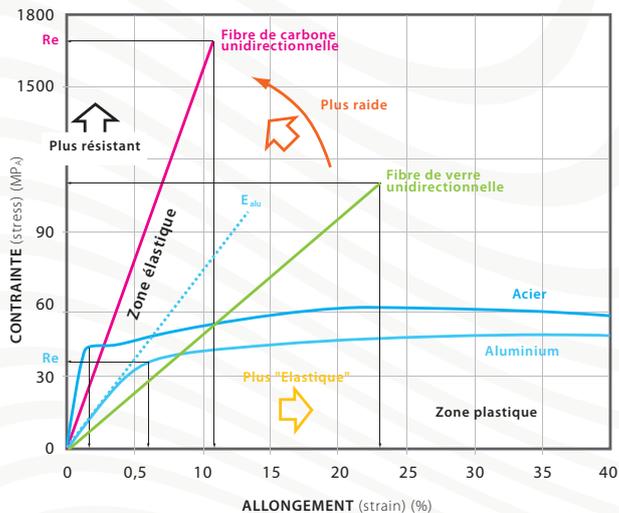
Nous nous concentrons dans ce guide sur les **composites à matrice thermoplastique**, qui sont recyclables.

Les concepteurs, soucieux de l'environnement, privilégieront ces matériaux, avec des renforts en fibres continues de verre, carbone, aramide ou fibres naturelles (lin, chanvre, etc.).

Les technologies mises en œuvre sont nouvelles, **opérées en France et compétitives.**

02

Propriétés des matériaux composites armés



Source : inspiré de « The efficient engineer »

2.1. LES VERTUS MÉCANIQUES DES COMPOSITES

Module de Young (E) et Limite élastique

Le lecteur comprendra la notion de contrainte et d'allongement. Il dissociera la **résistance** de la **rigidité** (ou la **raideur**), la **zone élastique** de la **zone plastique**.

Limite élastique (Re) – « la résistance » : combien on va pouvoir tirer sur la fibre avant qu'elle ne se déforme définitivement.

Module de Young (ou Module d'élasticité en traction ou E) –

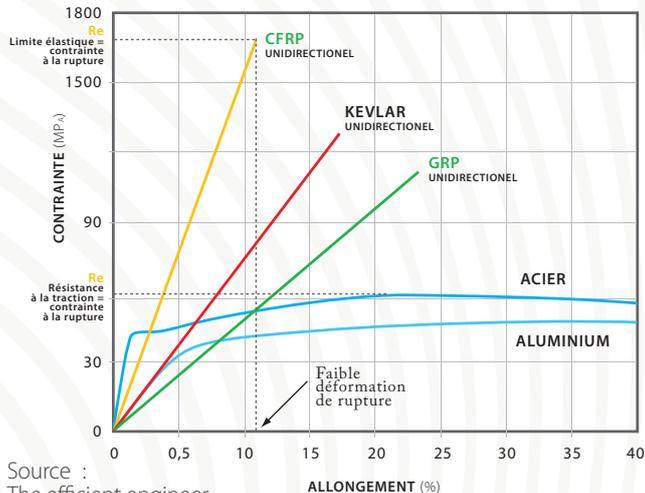
« la **rigidité** ou la **raideur** » : combien la matière va refuser de s'allonger quand on exerce sur elle une tension. C'est la pente de la courbe de la zone élastique. Plus la pente est raide, plus le matériau est raide et permettra des géométries rigides.

Les propriétés du composite vont dépendre de la nature de la fibre :

Verre, d'origine minérale, **Aramide** (Kevlar®), plus légère, quand on recherche la résistance maximum à l'impact ou l'amortissement des vibrations, **Carbone**, à haut module d'élasticité ou à haute résistance en traction, quand on recherche la rigidité maximum

Concernant les **fibres végétales** (lin, chanvre), leur usage est appelé à se développer (Cf tableau page 51)

Aperçu des avantages / inconvénients



Contrainte à la rupture

L'avantage des fibres est de disposer d'une **contrainte à rupture élevée dans le sens de la fibre**, et pour certaines d'entre elles, d'un module d'élasticité plus élevé que celui des alliages d'aluminium.

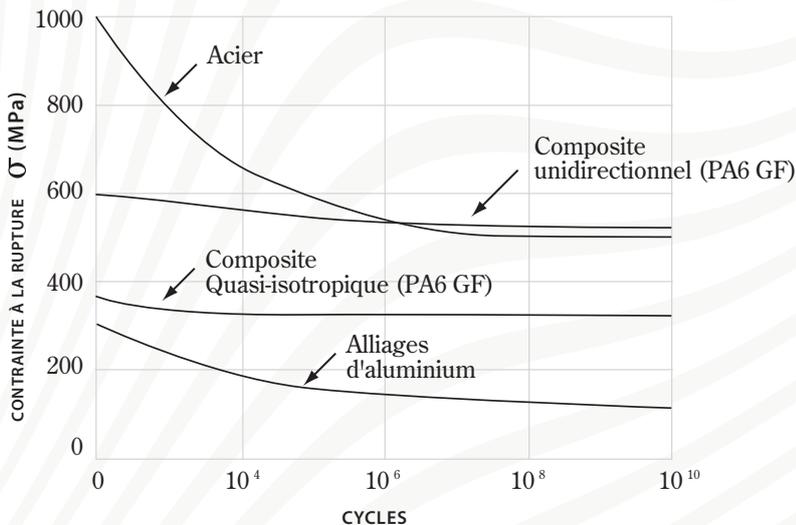
Un inconvénient des composites est que le comportement des fibres est élastique, sans véritable déformation plastique, ce qui implique une rupture dite fragile, contrairement aux métaux, qui présentent d'abord un comportement élastique, suivi d'une déformation plastique, puis d'une rupture dite ductile.

Par simplification, on peut dire que pour une fibre unidirectionnelle, limite d'élasticité = résistance à la traction = contrainte à la rupture.

Fatigue

La fatigue d'un matériau est un phénomène de dégradation progressive qui se produit lorsqu'un matériau est soumis à des cycles de charges mécaniques, même si celles-ci sont inférieures à sa limite de résistance maximale.

Les matériaux composites présentent une **excellente endurance à la fatigue**. Un composite à matrice thermoplastique peut avoir une **résistance à la fatigue plus de deux fois supérieure** à celle des alliages d'aluminium, car sa résistance en fatigue atteint **90 %** de la résistance à la rupture statique. En comparaison, **ce rapport est de 35 % pour les alliages d'aluminium** et de 50 % pour les aciers.



Gain de poids

Dans le domaine du transport, la masse et la consommation sont liées. Pour une automobile, une augmentation de **10 % de la masse entraîne une hausse de consommation d'environ 5 %**, sans prendre en compte les émissions de CO₂ associées.

Dans le cyclisme ou d'autres sports, la réduction de poids influence la performance (ex. : Tour de France, tennis) et le confort (ex. : casques).

Dans certains secteurs, le gain de masse peut également se traduire par une valeur marchande, comme l'augmentation des marchandises transportées ou du nombre de passagers.

Performances spécifiques

La performance spécifique d'un matériau est une manière d'évaluer son efficacité par rapport à sa masse, donc ramenée à sa densité. Elle permet de comparer différents matériaux en fonction de leur aptitude à répondre à des exigences spécifiques dans des applications où la légèreté est un facteur clé.

Les matériaux composites présentent une excellente endurance à la fatigue

1/ Plaçons les métaux connus sur 2 axes, la limite élastique et le module d'élasticité en traction. Plaçons un composite recyclable ayant un croisement de fibres courant pour obtenir un **quasi-isotropique** (voir schéma 1 page suivante).

2/ Comparons maintenant les **propriétés spécifiques** des divers matériaux envisagés lors de la conception d'une structure, ceci afin d'intégrer la notion de gain de masse qui peut être attendu. On voit clairement que les solutions composites présentent des propriétés spécifiques tout à fait exceptionnelles, notamment lorsque des fibres de carbone sont mises en œuvre. Ce sont ces performances qui nous intéressent, parfois mais pas systématiquement aux dépens d'un coût plus élevé.

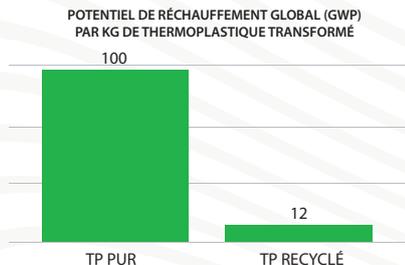
Nous développerons dans la suite du document que l'aspect fortement **anisotropique des matériaux composites est à l'avantage du concepteur** qui utilise cette anisotropie dans des directions anticipées.

2.2. PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE ET RECYCLAGE

Selon les données de l'analyse de cycle de vie réalisée pour le cadre de vélo OLLOW qui rassemble les trois technologies du consortium « 111 » (cf. infra page 36), l'utilisation de matériaux composites recyclables et nos process innovants permettent de réduire les émissions de CO₂ de **35%** par rapport aux cadres de vélo traditionnels en carbone et de **64% minimum** par rapport aux cadres de vélo à usage équivalent en aluminium.

Potentiel de réchauffement global

Recycler les thermoplastiques réduirait de près de 90% l'impact sur l'effet de serre.

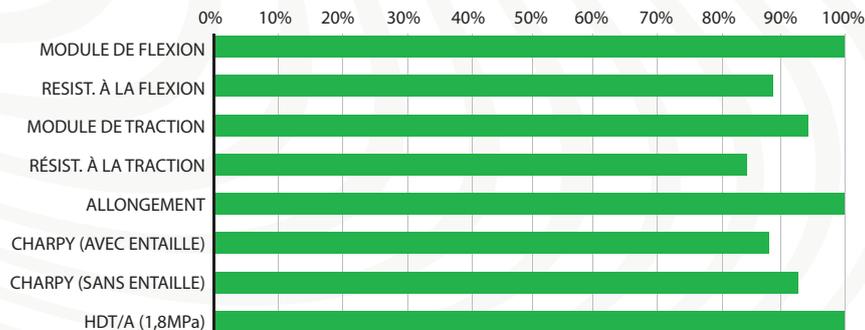


REF. MOCOM, PA6 GF30

L'utilisation de broyat, dans des proportions choisies, n'altère que légèrement les propriétés mécaniques du produit recyclé

Performances

L'utilisation de **broyat**, dans des proportions choisies (jusqu'à 30% pour des polyamides), n'altère que légèrement les propriétés mécaniques du produit recyclé.



REF. MOCOM, PA6 GF30

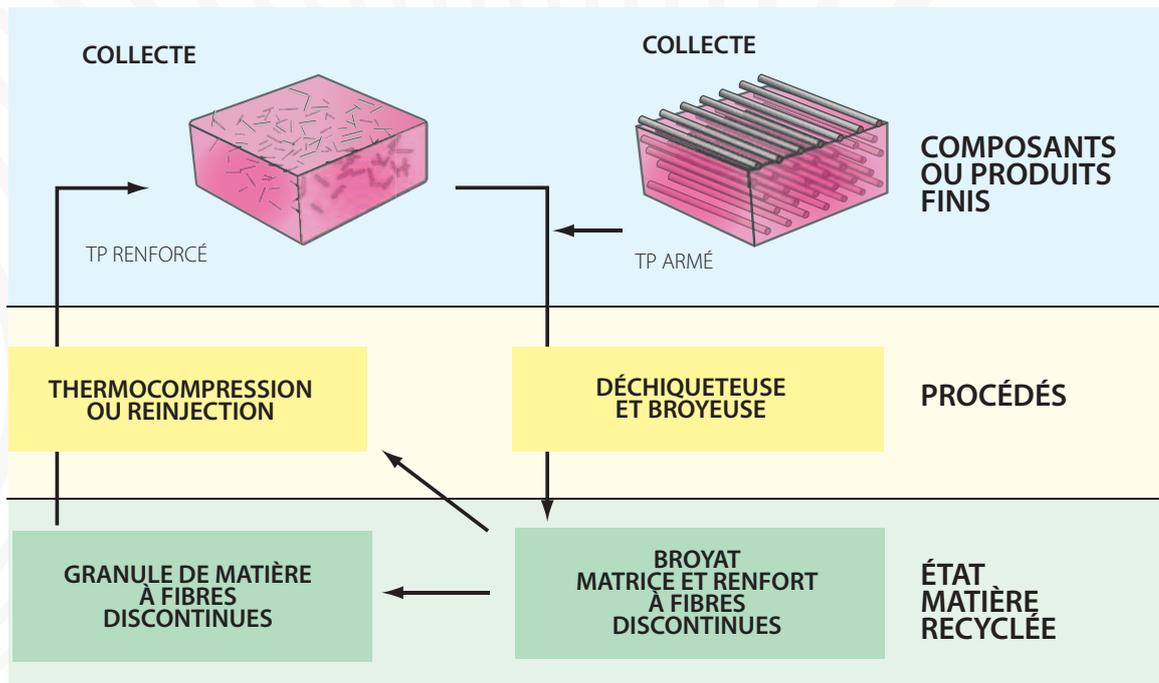
Cycle de recyclage

Le recyclage des composites thermoplastiques réduit l'impact environnemental :

- **Réduction des déchets industriels** : Les rebuts de production et les produits en fin de vie peuvent être réintégrés dans le cycle de fabrication.
- **Économie circulaire** : Les composites recyclés réduisent la dépendance aux matières premières vierges et à l'énergie nécessaire pour leur fabrication.

Mais il reste des défis à relever :

- **Contamination des matériaux** : les composites issus de produits en fin de vie peuvent contenir des impuretés ou des additifs rendant le recyclage complexe.
- **Organisation de la filière.**

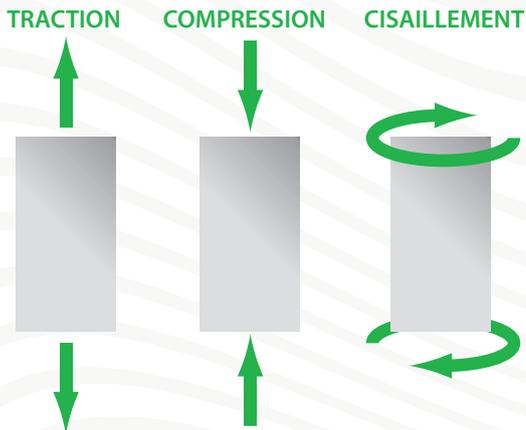


03

Sollicitations

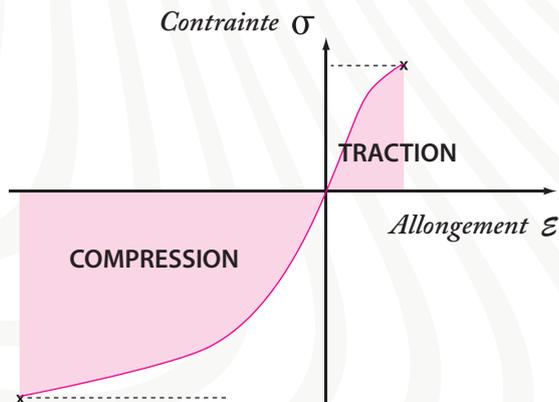
3.1. COMPRESSION

La résistance à la **compression** est la capacité d'un matériau à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par opposition à la résistance à la **traction**, qui est une résistance à l'allongement, et à la résistance au **cisaillement**, qui est une résistance à la torsion (vrille).



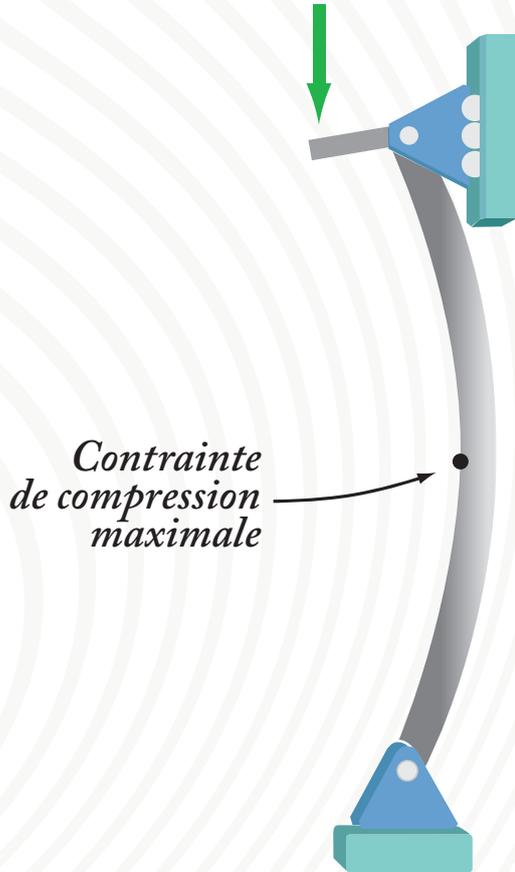
Contraintes admissibles en compression

Pour les matériaux classiques « cassants » (on dira plus justement « fragiles »), la résistance à la compression est supérieure à la résistance à la traction (ex. le verre).



Source :
The efficient
engineer

Curieusement, dans les matériaux composites, la **résistance à la compression a tendance à être plus faible que la résistance à la traction** alors que les matériaux constituants, pris indépendamment, démontreraient le contraire. Ceci serait dû à des phénomènes de micro-flambage des fibres de la matrice. Concernant les inserts creux, cette faiblesse est compensée par un enroulement spécifique.



Les matériaux à module d'élasticité élevé comme le carbone sont plus résistants au flambage

Flambage

Lorsqu'une force de compression est appliquée sur un élément élancé, une instabilité peut se produire au-delà d'une certaine charge critique, provoquant une **déformation latérale brusque**, c'est-à-dire une perte de résistance structurelle.

Le flambage dépend de la résistance du matériau, mais aussi de la rigidité géométrique. Un rapport longueur/dimension transverse élevé augmentera le flambage.

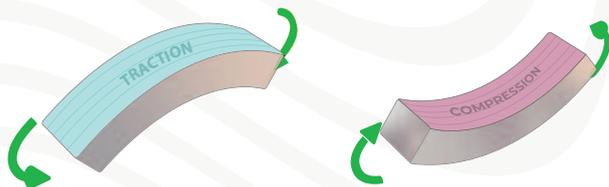
Les matériaux à module d'élasticité élevé comme le carbone sont plus résistants au flambage.

Enfin, le flambage est **sensible aux imperfections des matériaux** mis en œuvre et les effets de ces imperfections sont difficiles à prévoir...

En dimensionnement des objets, certains auteurs proposent de considérer un coefficient d'abattement qui tient compte de l'**embuvage**. Moins il y a d'embuvage (Cf infra page 35), mieux c'est.

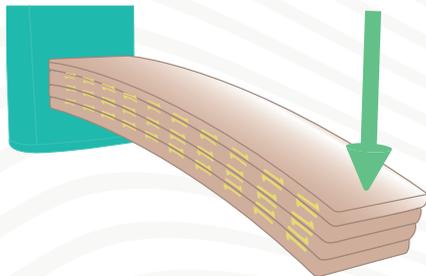
3.2. FLEXION

La flexion génère de la **traction**, de la **compression** et du **cisaillement**.



La contrainte de flexion dépend du **moment d'inertie** de la section et de la **raideur (module de Young)** du composite, qui est calculée à partir des raideurs des fibres et de la matrice.

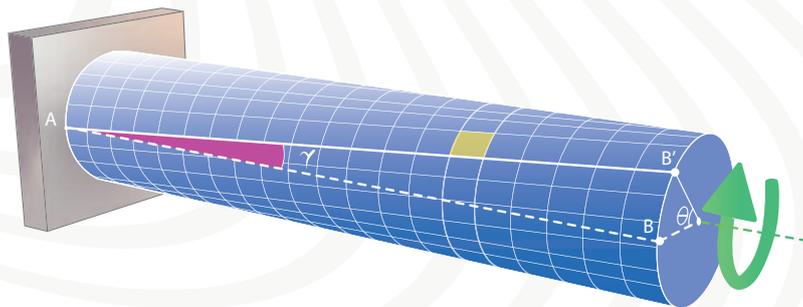
La plupart du temps, il n'est pas question de flexion pure car les efforts appliqués **comportent une force de cisaillement**.



On comprend alors que des strates pourraient glisser les unes sur les autres. Si on colle les strates entre elles, un cisaillement se crée, ce qui explique les craquements qu'on voit parfois sur les poutres en bois.

3.3. TORSION

La torsion génère des **contraintes** et des **allongements**.

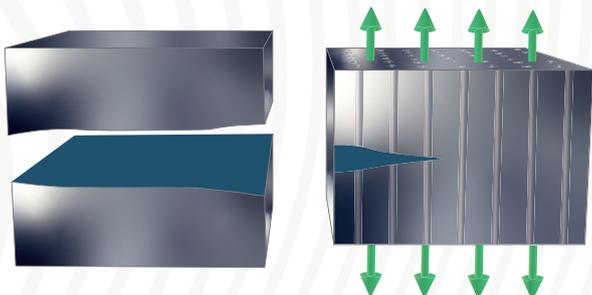


Les notions de base pour déterminer les propriétés mécaniques propres aux composites recyclables, selon leurs constituants, leur proportion, leur épaisseur et l'orientation des fibres sont exposées au chapitre 5.

3.4. RÉSISTANCE AUX CHOCS

La résistance aux chocs fait référence à la capacité du matériau à répondre à de brusques impacts. Un matériau de haute **robustesse**, comme les polycarbonates ou le nylon, peut absorber de l'énergie et se déformer plastiquement avant de se rompre. En d'autres termes, un objet en matériau très résistant aux chocs peut tomber sur le sol sans se casser.

La **robustesse** (ou ténacité ou résistance aux chocs) n'est pas identique à la rigidité. Les matériaux plus souples peuvent présenter des valeurs élevées d'absorption des chocs brutaux.



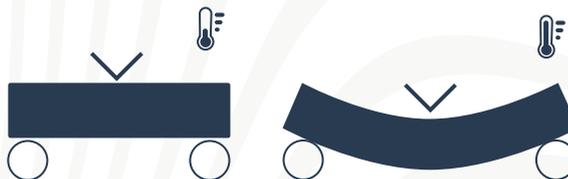
Les fibres bloquent la propagation des ruptures.*

* Dans ce cas, l'interface entre la fibre et la matrice est un élément capital. Trop «forte», elle entraînerait la rupture des fibres ; trop «faible», elle entraînerait une décohésion fibre-matrice trop rapide.

Les fibres bloquent la propagation des ruptures

3.5. FLÉCHISSEMENT SOUS CHARGES

Il s'agit de connaître la température (mesurée en °C) à laquelle un échantillon se déforme lorsqu'il est soumis à une charge donnée (mesurée en MPa).



Degré Celsius	Thermoplastique (sans renfort)			
HDT	PA 6	PA 11	PA 6-10	PA 4-6
1,8 MPa	60	55	60	160
0,45 MPa	180	150	200	285

HDT : Heat Deflection temperature / température de déflexion sous charge

3.6. FATIGUE

Vieillessement

Cette propriété des composites dépend de l'interface entre les fibres et la matrice et de la liaison entre la matrice et le polymère injecté.

La rupture peut se produire dans la matrice, entre les plis, ou par décohésion entre les fibres et la matrice. Après avoir sélectionné la matrice et les fibres, l'optimisation des interfaces fibres/matrice est une étape essentielle dans l'élaboration d'un composite, prenant en compte les compatibilités chimiques.

Il est également rappelé que la résistance à la fatigue d'un composite à matrice thermoplastique est plus de deux fois supérieure à celle des alliages d'aluminium, deux fois celle de l'acier.

Fluage

Le fluage est la tendance d'un matériau à se déformer lentement sous **contrainte prolongée**. Un matériau ayant un fluage élevé se déformera davantage qu'un matériau à fluage faible. Contrairement à d'autres propriétés, le fluage

La résistance à la fatigue d'un composite à matrice thermoplastique est plus de deux fois supérieure à celle des alliages d'aluminium

est mesuré sur une période prolongée et dépend de la durée, de la contrainte et de la température, étant d'autant plus marqué que la température est élevée. Les polyamides ont une bonne résistance au fluage à température ambiante.

Le fluage peut également se produire dans les assemblages, notamment au niveau des joints ou des zones de contact, et est **inversement proportionnel au taux de fibres**. Le placement choisi des fibres permis avec la technologie **HV-TFP** propose des solutions pour traiter la faiblesse en fluage des thermoplastiques (voir page 34)

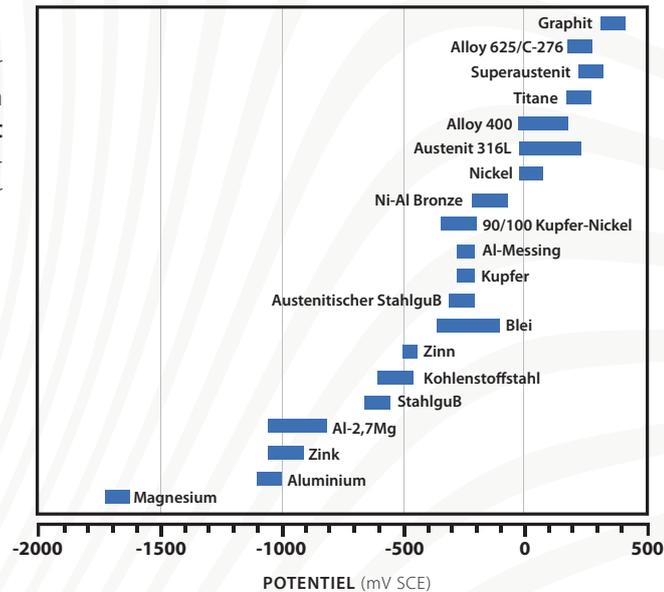


Insert en verre
avec fonction anti-fluage
Source : Nobrak - 2024

Le fluage est inversement proportionnel
au taux de fibres

3.7. CORROSION

Les composites peuvent être soumis aux intempéries car ils **ne sont pas sensibles à la corrosion**, à l'exception de la corrosion galvanique, notamment **entre l'aluminium et le carbone**. Dans ce cas, l'utilisation de produits d'interposition est nécessaire pour éviter le contact direct et prévenir la corrosion galvanique.



Source : WOMag 2013, Risiko der Kontaktkorrosion
bei CFK-Bauteilen

04

Le Supermoulage®

4.1. TECHNOLOGIE

Le **Supermoulage®** est un **assemblage par surmoulage** d'une ou plusieurs parties en composite à fibres continues.

La matrice est compatible avec le polymère injecté, ce qui garantit **cohésion de la liaison** et recyclabilité du produit.

Tous les facteurs augmentant l'adhérence et l'accroche mécanique sont utilisés pour assurer un assemblage intime (Cf page 30).

Les anglais pourront traduire **Supermoulage®** par « **wondermolding** » !

Tube en fibres continues de carbone



Embout fonctionnel obtenu par **Supermoulage®**



Source Ollow – Protoform - 2024

Cadre en tubes carbone à sections variables réalisés par enroulement (fibres continues de carbone) assemblé par **Supermoulage®** de thermoplastique renforcé carbone

Critères de choix (+ signifie mieux)

Paramètres	Matrice PP	Matrice PA6	Matrice PA11	Fibre carbone	Fibre de verre	Fibre de lin
Prix	++	+	-	-	++	-
Propriétés mécaniques	-	++	++	++	+	-
Empreinte carbone	-	-	++	-	+	++

Source : Embout fonctionnel Ollow / Protoform 2023

- Les fibres peuvent être végétales, en verre, en carbone ou en aramide
- Il est aussi possible de combiner des fibres de différente nature.
- Les matrices et polymères sont à base de PA, voire de PP.
- Les inserts composites à fibres continues peuvent être des tubes - **@Ollow** ou des empiècements (Patch) - **@Nobrak**
- Les empiècements, c'est à dire les préformes en **HV-TFP**, peuvent apporter des fonctionnalités, par exemple en intégrant des inserts métalliques ou plastiques, des fils résistifs, etc. . .
- La technologie OLOW ouvre de nouvelles possibilités, elle offre aux designers **la liberté de créer des formes** audacieuses et réalisables.

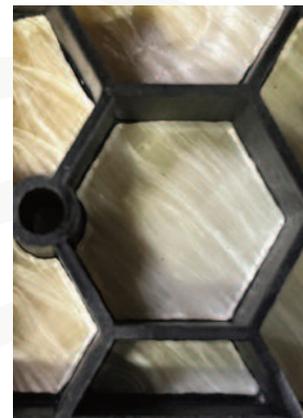
Le Supermoulage®, un assemblage par surmoulage



Cintre creux en composite thermoplastique à sections variables. A partir d'un cintre, on peut faire un cockpit supermoulé
Source : Ollow 2024

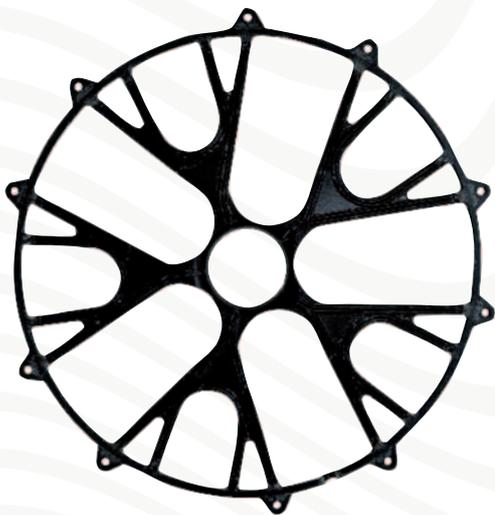


Will - Jante cargo 20 pouces en fibres continues de verre supermoulées
Source : Nobrak - Protoform 2024



Supermoulage® de fibres de lin
Source : Protoform 2020

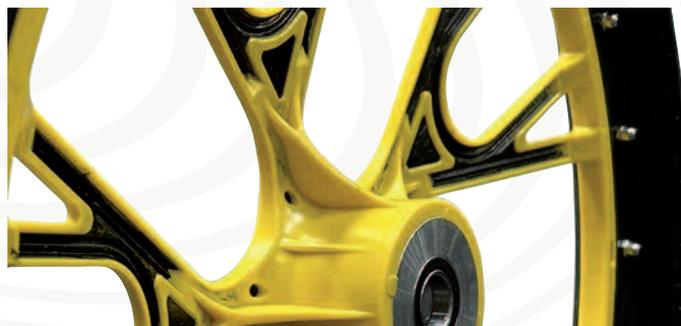
LE SUPERMOULAGE®

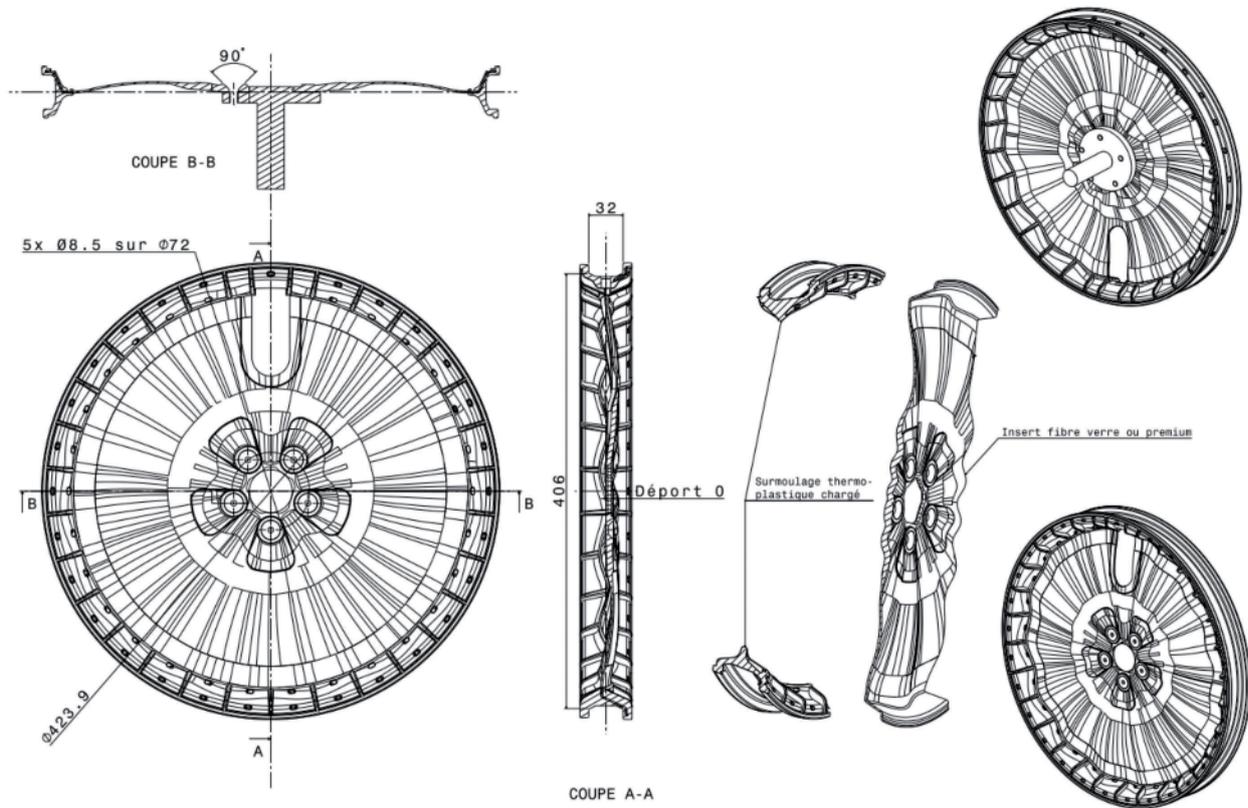


Source : Nobrak – Protoform - 2023

A gauche, l'insert en composite recyclable à fibres continues.

A droite son surmoulage. En jaune, le thermoplastique supermoulé est non renforcé.





Plan de la jante PROTOFORM – NOBRAK « pleine », surmoulage d'un insert en fibres continues de verre ou de carbone



Source Ollow – Protoform - 2024



A gauche, visuel 3D mettant en évidence les zones d'assemblage par Supermoulding®

Au milieu, le cadre en tube composite recyclable supermoulé. Les zones d'assemblage sont en thermoplastique renforcé

À droite, le vélo, démonstrateur de la technologie de Supermoulding®



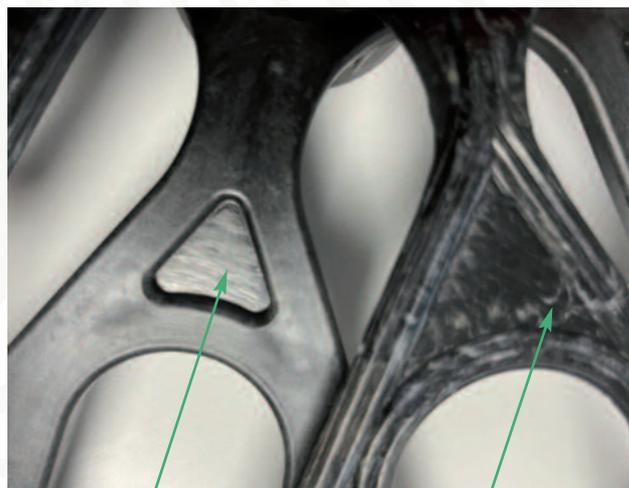
*Preuve que l'émergence d'une nouvelle technologie,
C'est l'émergence de nouveaux produits*

Liaison cohésive entre les parties



Source : Ollow - Protoform - 2024

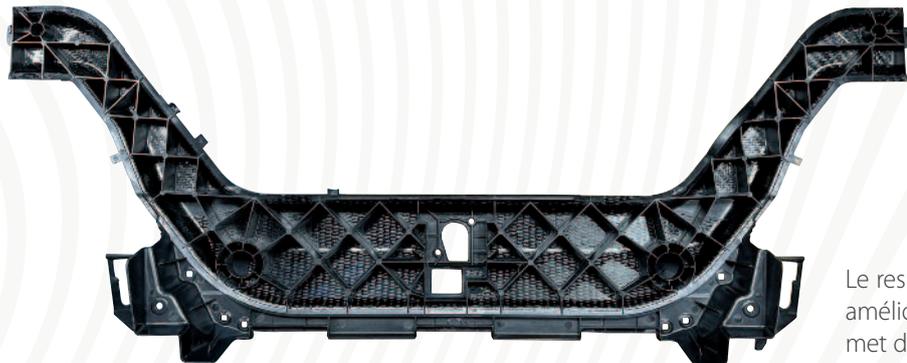
La cohésion peut aller jusqu'au « healing », c'est-à-dire à l'interdiffusion des chaînes de polymère à l'interface polymère surmoulé - matrice de l'insert



Source : Nobrak - Protoform - 2024

De nombreuses études issues de l'industrie automobile donnent **les conditions d'une liaison cohésive** entre le polymère surmoulé et la matrice polymère de l'insert à fibres continues. La cohésion peut aller jusqu'au « **healing** », c'est-à-dire jusqu'à l'interdiffusion des chaînes de polymère à l'interface polymère surmoulé / matrice de l'insert.

En plus de l'accroche mécanique prévue entre les parties, les conditions industrielles de cette liaison cohésive sont maîtrisées et mises en œuvre pendant le **Supermoulage®**.



Light bolster (pièce de structure automobile anti-choc)
Source : Protoform – 2015

Le **Supermoulage®** est l'alliance maîtrisée de la structure et de la forme, de la fibre et du polymère, de la performance et du coût



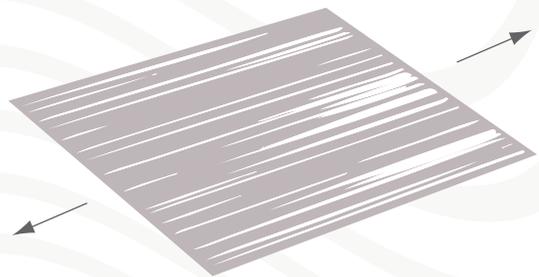
Carter d'huile
(**étanche**)
Source :
Protoform – 2017

Le respect des conditions nécessaires à une bonne liaison améliore la performance mécanique des interfaces et permet de bien transmettre les efforts de la forme vers la fibre (cf. chapitre 5.8. Cisaillement).

Le **Supermoulage®** est l'**alliance maîtrisée** de la **structure** et de la **forme**, de la **fibre** et du **polymère**, de la **performance** et du **coût**.

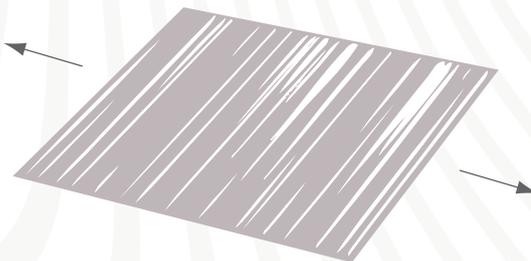
Quasi-isotropie et anisotropie contrôlée

Les qualités et caractéristiques des composites armés, à fibres continues, **sont directionnelles**.



MODULE	OUNG	70GPa
RÉSISTANCE À LA TRACTION		1500MPa

CONTRAINTÉ ALIGNÉE AVEC L'AXE DE LA FIBRE



MODULE DE YOUNG	2GPa
RÉSISTANCE À LA TRACTION	80MPa

CONTRAINTÉ PERPENDICULAIRE AVEC L'AXE DE LA FIBRE

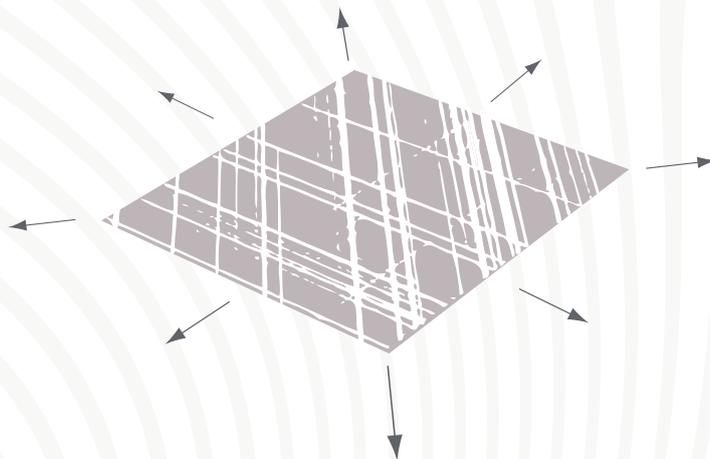
Source : The Efficient engineer

Les valeurs admissibles de contrainte transversale pour des fibres unidirectionnelles sont généralement inférieures à la contrainte de rupture en traction de la matrice qui se situe autour de 80 MPa selon le polymère choisi et la plage de température d'utilisation.

Pour pallier cette faiblesse de contrainte à la rupture transversale dans le composite, le procédé TFP permet de **placer dans des directions choisies les fibres continues** des inserts supermoulés à partir de bobines, tout en minimisant la rupture des fibres.



Source : Nobrak - 2024



MODULE DE YOUNG **45GPa**
RÉSISTANCE À LA TRACTION **350MPa**

QUASI-ISOTROPIQUE

Il est essentiel d'investir dans les zones les plus sollicitées, ce que l'on appelle **l'anisotropie contrôlée**

Puis, le composite devra s'adapter aux exigences de conception. Un concepteur avisé ne recherchera pas un équivalent quasi-isotropique aux métaux, ce qui ne serait probablement pas optimal. Il visera plutôt un objet « au plus juste », avec des fibres performantes alignées selon les directions de sollicitation, évitant ainsi une répartition uniforme inutile et coûteuse.

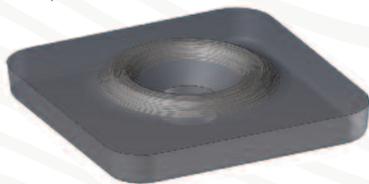
Il est essentiel d'investir dans les zones les plus sollicitées, ce que l'on appelle **l'anisotropie contrôlée**.

Par commodité et en première approche, le concepteur pourra s'intéresser au **comportement équivalent** d'un produit composite quasi-isotropique.

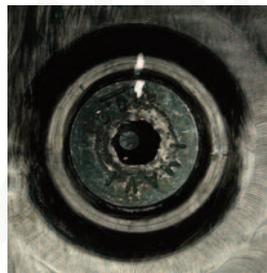
Une solution au fluage

Nous nous sommes intéressés au cas de fluage par serrage. L'idée est de contrarier, par un enroulement pertinent, un fluage de la matière qui entraînerait un desserrage de la vis au cours du temps.

Nous utilisons la technologie **HV-TFP** pour produire des pièces avec des **fibres circonférentielles** autour de la fraisure. Dans le but de mesurer le fluage de la matière au cours du temps nous avons serré deux pièces test à un couple donné de 15N.m sur des supports en aluminium (vis M8). Une pièce a été laissée à température ambiante, l'autre a été étuvée à 45°C tout le long de l'expérience. Pour quantifier le fluage nous mesurons l'angle ϑ de rotation nécessaire à la vis pour retrouver un couple de serrage de 15N.m grâce à une clé dynamométrique électronique.



Le même essai a été poussé à 33 N.m avec des supports en acier (les filets d'un taraudage trop court du support en alu s'étant arrachés). Sur la photo, le résultat en reprise de serrage



après un cycle de plusieurs jours et avec une température plutôt élevée, sachant que la **Tg est d'environ 50°C pour le thermoplastique utilisé**, ce qui appuie le fait que la Tg n'est pas la limite d'utilisation pour les semi-cristallins.

Echantillon n°2

Couple de serrage : 33,4 N.m

DATE	TEMPERATURE	ANGLE ϑ
09/10/2024	22°C	0°
10/10/2024	45°C	0°
14/10/2024	61°C	0°
15/10/2024	51°C	0°
16/10/2024	47°C	0°
17/10/2024	70°C	0°
17/10/2024	61°C	0°

Une solution à la faiblesse des lignes de soudure

Dans les zones où deux fronts de matière fondue se rencontrent et se soudent pendant l'injection, le matériau est souvent plus faible mécaniquement.

Ces zones sont appelées **lignes de soudure** ou **lignes de recollement**.

Le **Supermoulage**[®] d'insert en fibres continues, orientées perpendiculairement à la ligne de soudure, pallie le problème en renforçant cette zone.

Il augmente la résistance à la traction, la rigidité, la solidité et la tenue à l'usure et réduit les risques de déformation ou de fissuration sous contrainte.

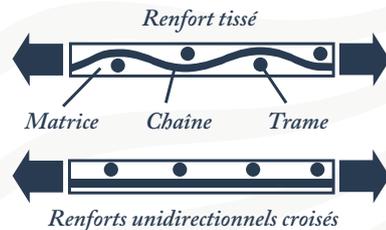


Notion d'embuage

Une particularité des technologies de production des inserts Ollow (tube) et Nobrak (empiècement/demi-coquille/patch) est que les inserts à matrice thermoplastique présentent un embuage quasi nul.

L'embuage désigne l'ondulation des fibres, fréquente dans certains procédés de fabrication des composites.

Cette ondulation réduit la rigidité, tant en traction qu'en compression (effet ressort).



4.2. PROCÉDÉS

EMPIÈCEMENTS / DEMI-COUILLE / PATCH



Demi coquille



High Volume - Tailored Fiber Placement (HV-TFP)



Thermo compression

CORPS CREUX, TUBES EN FORME



Tube



Production préformes creuses



Thermo Consolidation

MOULISTE ET INJECTEUR



Partie injectée



Conception – réalisation outillage



Injection

4.3. TYPES D'ASSEMBLAGES PROPOSÉS PAR LE CONSORTIUM 111

EMPIÈCEMENTS, PATCH

NOBRAK



100
CENT

CORPS CREUX, TUBES EN FORME

ollow
SPIN THE ORDINARY



010
DIX



PATCH SURMOULÉ



CO-CONSOLIDATION



TUBE SURMOULÉ



SOLUTION HYBRIDE

INJECTION

ProtoForm
BOURGOGNE



001
UN

101
CENT UN

110
CENT DIX

011
ONZE

111
CENT ONZE

05

Quelques principes de base de conception

Nous retiendrons que le **polymère renforcé ou armé** permet d'améliorer les performances mécaniques grâce à des choix de conception judicieux :

- **Composants** : Sélection précise du polymère et des fibres renforçantes.
- **Longueur des fibres** : Adaptation pour obtenir le comportement souhaité (rigidité, résistance à la traction, aux chocs).
- **Proportions** : Équilibre entre fibres - renfort et **matrice** - polymère.
- **Épaisseurs** : Variabilité locale des épaisseurs.
- **Orientations des fibres** : Alignement avec les sollicitations ; l'orientation est cruciale, surtout pour des fibres continues.
- **Procédés de fabrication** qui influencent les propriétés mécaniques.
- **Formes** : Conception pour répondre aux fonctions d'usage et optimiser les caractéristiques mécaniques (inertie de forme).

Dans une démarche de conception, il est essentiel de disposer de critères de dimensionnement pour garantir l'intégrité des ensembles. Nous allons ici exposer des **notions de base**, enrichies à l'aide d'amis, d'experts et de littérature.

5.1. NOTION DE COMPORTEMENT ÉQUIVALENT

Comment travaille un composite constitué de matière relativement souple (le thermoplastique) et relativement raide (les fibres) ?



Dans cette illustration, quel ressort absorbe **l'énergie de déformation** ?

Le matériau le plus raide (la fibre) est sollicité en premier, limitant ainsi la déformation de l'ensemble et les contraintes sur le matériau le moins raide (la matrice).

La fibre définit la déformation globale, tandis que **la matrice transfère les charges entre les fibres** (répartissant les efforts entre celles qui ne sont pas parfaitement orientées) et subit la déformation imposée par celles-ci. Étant moins rigide, **la contrainte dans la matrice reste faible**, ce qui est avantageux, car sa contrainte maximale est bien inférieure à celle des fibres.

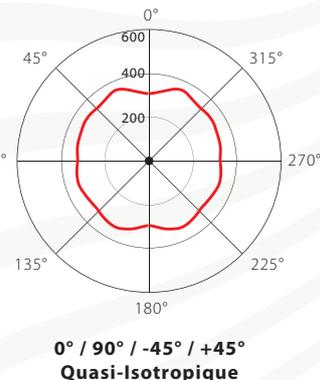
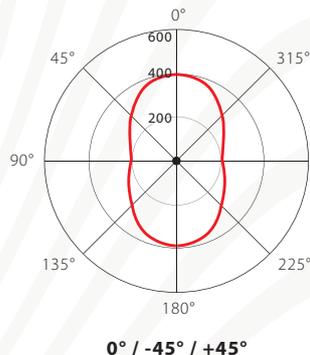
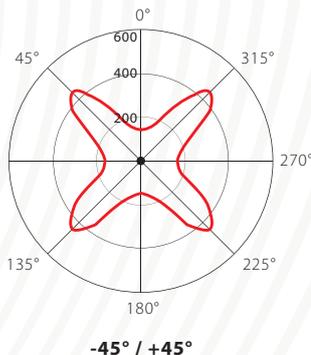
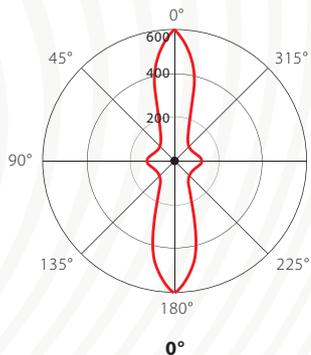
Dans notre étude des pièces composites surmoulées, nous utiliserons deux notions clés :

- **L'interface fibre-matrice**, qui concerne le polymère imprégnant les fibres,
- Les **liaisons matrice-polymère**, qui relie la matrice de l'insert à fibres continues et le polymère de surmoulage.

Ces liaisons sont essentielles pour les propriétés mécaniques du composite. Les propriétés effectives du composite peuvent être déduites des caractéristiques des constituants. À partir de diverses approches, l'objectif est de déterminer les meilleures approximations, celles qui donnent des résultats les plus proches de la réalité, que l'on appellera **comportement équivalent**.

5.2. ORIENTATION DES FIBRES ET QUASI-ISOTROPIE

Si on veut un produit présentant des caractéristiques plus équilibrées, il faut croiser les sens de résistance.



Strength of a glass-fiber-reinforced PA6 as a function of the angle, displayed as a polar graph incl. the relevant laminate structures / Quality performs

Source : Lanxess

5.3. PROPORTION ET LOI DES MÉLANGES

Il est tenu compte, pour les calculs, de la proportion de thermoplastique dans le composite. Avec quelques hypothèses simplificatrices, on obtient une variation du module linéaire entre le module de la matrice et le module de la fibre lorsque la fraction volumique varie de 0 à 1.

Le matériau le plus raide (la fibre) est sollicité en premier, limitant ainsi les contraintes sur le matériau le moins raide (la matrice)

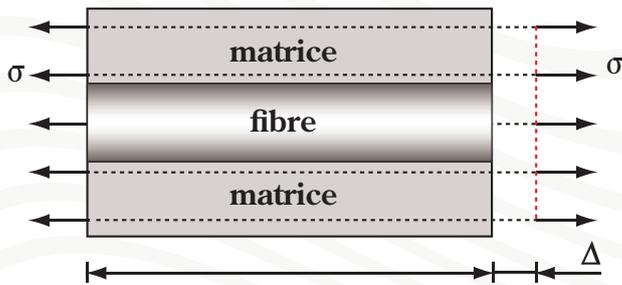
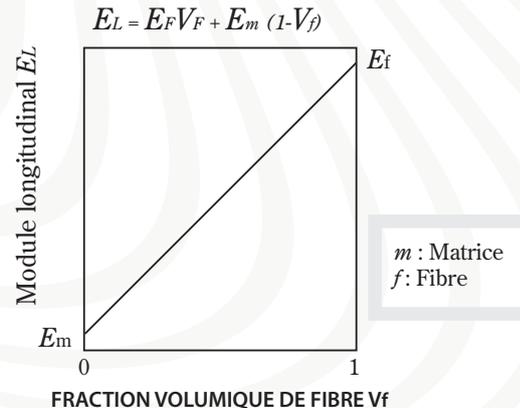


SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'UNE TRACTION LONGITUDINALE



Source : Matériaux composites – Berthelot - 2012

5.4. EFFET DE LA TEMPÉRATURE

La température est un paramètre important qui limite le domaine d'utilisation des thermoplastiques.

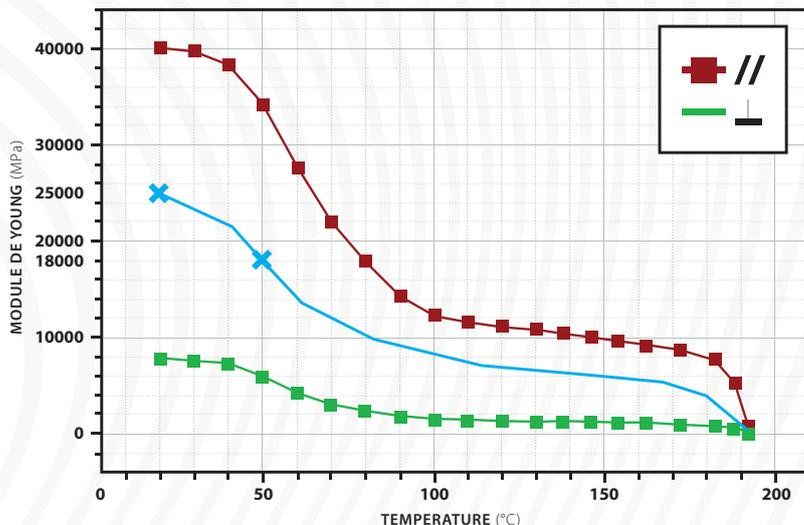


Illustration pour un thermoplastique renforcé.

Précisons que le propos à venir porte sur un thermoplastique **non armé de fibres continues**.

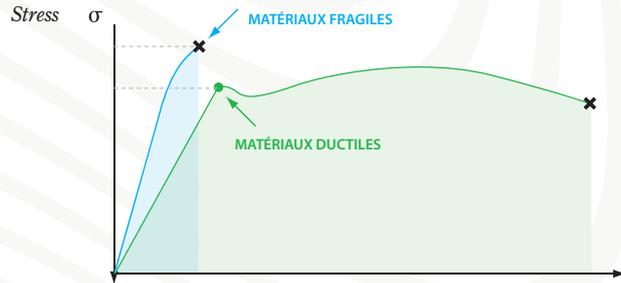
Les propriétés mécaniques d'un TP renforcé commencent à baisser lorsqu'on atteint la température de transition vitreuse.

Pendant l'injection des composites renforcés de fibres, les fibres vont s'orienter selon l'écoulement du polymère, avec des zones ordonnées et des zones non ordonnées.

Dans le cas en exemple, et en première approche, on considèrera un **module équivalent** de l'ordre de **25 GPa à 20°C** avec un abattement de **0.7% par degré** soit **20% à 25°C** d'abattement pour un usage à **50°C (18 GPa)**, proche de sa Tg.

En comparaison, le module d'élasticité de l'aluminium à 20°C est de l'ordre de 70 GPa et il diminue d'environ **0.5% par degré** soit moins **10- 12%** en passage de 20 à 50°C (60 GPa).

5.5. MÉCANIQUE DE RUPTURE (OU D'ENDOMMAGEMENT)

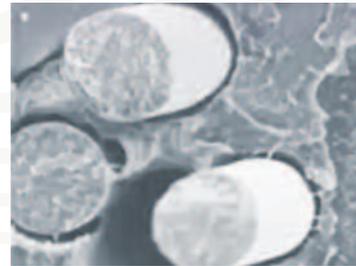


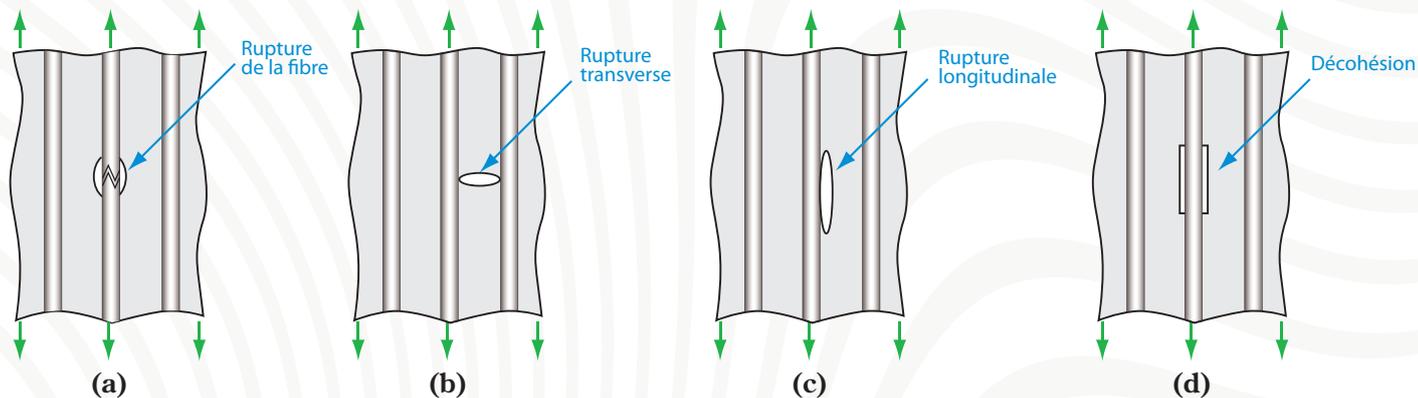
Matériaux ductiles → La rupture se produit à la fin de la déformation plastique

Matériaux fragiles → La rupture se produit rapidement après la fin de la déformation élastique

La limite élastique indique jusqu'où un matériau peut être étiré sans se rompre ni se craqueler. Les matériaux rigides, comme les plastiques durs et cassants, ont généralement un faible allongement avant rupture, tandis que les matériaux élastiques peuvent s'étirer jusqu'à plusieurs fois leur longueur (voir chap. 6).

La résilience : capacité du matériau à encaisser l'énergie sans déformation permanente se mesure par l'aire (en vert) sur le graphique de droite, d'où l'intérêt des composites présentés.





Source : Matériaux composites – Berthelot - 2012

Dans les matériaux composites, la limite du domaine élastique est généralement liée à l'apparition de microfissurations selon 3 modes possibles :

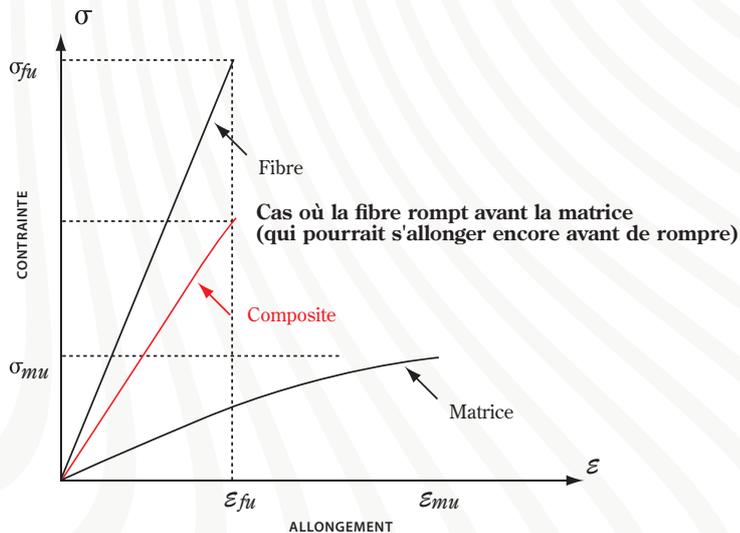
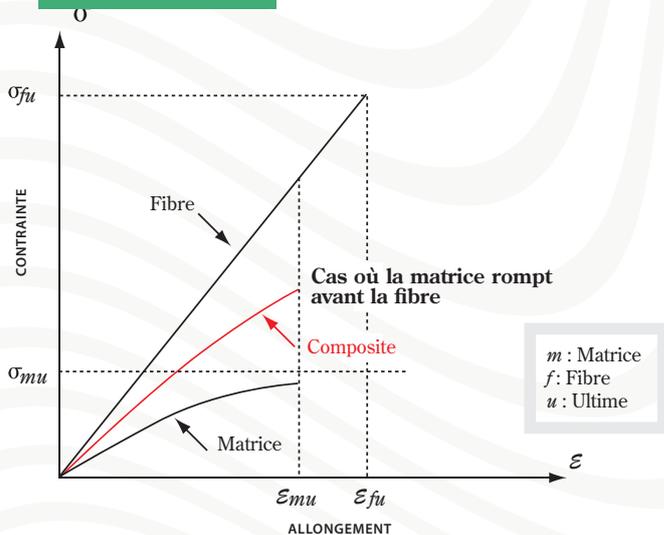
- Microfissuration de la matrice (b - c)
- Rupture des fibres (a)
- Décohésion fibres-matrice (d)

Dans un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, la rupture peut se produire par la rupture des fibres (lorsque leur allongement à la rupture est inférieure à celle de la matrice) ou par rupture transversale de la matrice.

Chocs - Ruptures

Le concepteur cherchera à appliquer la technique du « **fail safe** » qui prévoit qu'une rupture, si elle advient, n'entraîne pas la ruine de la pièce, le « sur accident ».

QUELQUES PRINCIPES DE BASE DE CONCEPTION



Source : Matériaux composites – Berthelot - 2012

Nous préférons que l'allongement à la rupture en traction de la matrice et du polymère injecté soit supérieur à celui de la fibre continue.

Bien qu'il n'existe pas de méthode universelle pour prédire les ruptures en cas de sollicitation complexe, plusieurs théories approchantes sont utilisées dans le calcul de résistance des matériaux.

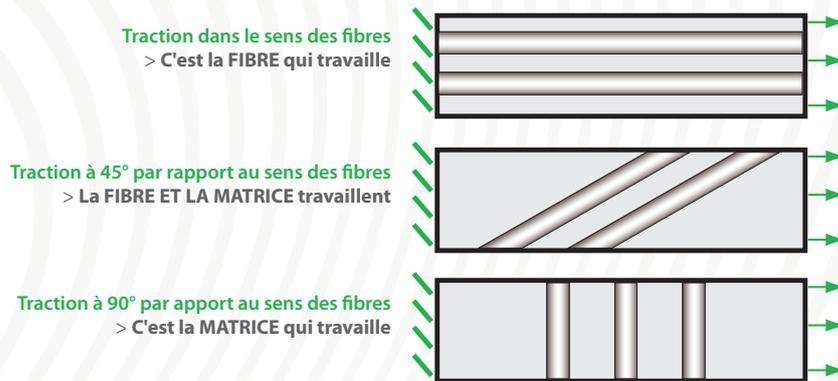
Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, l'initiation de la rupture se produit généralement soit par la rupture des fibres lorsque l'allongement à la rupture des fibres est plus faible que celui de la matrice, soit par rupture transverse de la matrice.

Dans la mécanique des ruptures, il est donc **primordial de comparer** l'aptitude à la déformation des constituants.

5.6. ORIENTATION ET CONTRAINTE MAXIMALE ADMISSIBLE

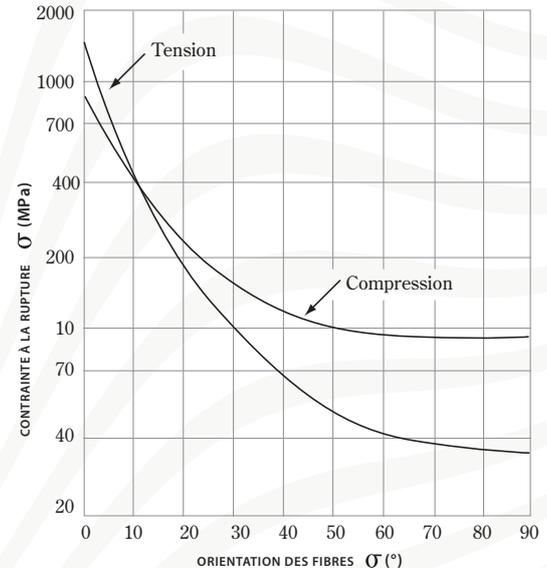
Lorsqu'une contrainte atteint la limite élastique d'un constituant, elle provoque un endommagement irréversible pouvant mener à la rupture. Les fibres sont sélectionnées pour leur résistance à la rupture en traction, des matériaux comme le carbone, le verre et l'acier offrant une haute résistance en traction.

Nous avons précédemment souligné l'importance de l'orientation des fibres, conformément au principe d'alignement avec les directions de sollicitation.



La contrainte à la rupture dépendra donc de l'orientation des fibres.

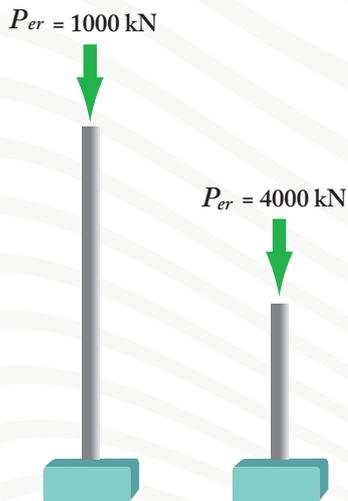
La contrainte à la rupture dépendra donc de l'orientation des fibres



Source : Matériaux composites – Berthelot - 2012

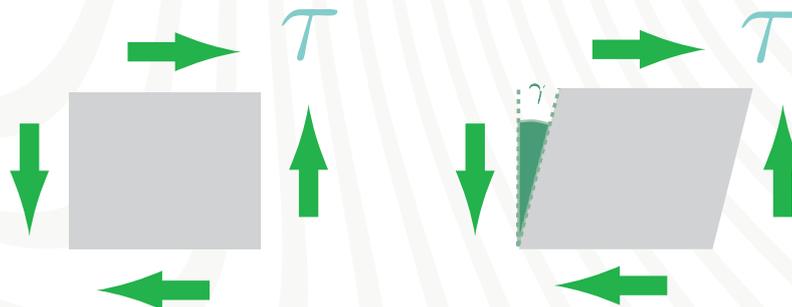
5.7. FLAMBAGE

La taille de la section compte et la longueur compte au carré dans le non-flambage.



Un Supermoulage® pourra permettre d'augmenter la section, et ainsi d'éviter le flambage à moindre coût.

5.8. CISAILLEMENT PLAN



Les contraintes de cisaillement agissent parallèlement à un plan et déforment le carré en losange. γ est ici l'équivalent angulaire de l'allongement (ϵ).

Le type de fibre, leur orientation ainsi que le type de polymère ont une influence sur le module de cisaillement (par exemple les fibres de carbone orientées dans la direction du cisaillement augmentent significativement le module).

Les valeurs expérimentales obtenues montrent que la contrainte à la rupture en cisaillement **ne dépend pratiquement pas de la proportion de fibres** et sont du même ordre de grandeur que la contrainte admissible en cisaillement de la matrice, de l'ordre de 40 à 80 MPa (valeur estimative).

Le concepteur notera que les résistances à la contrainte de cisaillement en jeu pour les composites recyclables sont supérieures à celles, par exemple, des adhésifs époxydes (10 MPa en collage à froid, 15 à 30 MPa en collage à chaud).

5.9. QUEL COEFFICIENT DE SÉCURITÉ UTILISER ?

Sur la charge considérée lors de l'étude RDM

On peut retenir un coefficient d'augmentation de la charge d'environ 1,5 en tenant compte de sollicitations connues et documentées, ce qui est rarement le cas.

Pour un usage incertain, les coefficients doivent être plus élevés : environ **4** pour un chargement statique de longue durée ou intermittent, **5** pour un chargement cyclique, et jusqu'à **10** pour des charges avec chocs ou des mésusages touchant à la sécurité.

Sur l'abattement des performances

Hors singularités, on tiendra compte de :

→ La **répétabilité** des processus mis en œuvre : abattement de **20%** quand l'ondulation des fibres volontairement orientées est maîtrisée, plus dans le cas contraire, jusqu'à considérer les limites du polymère et non les limites de la fibre.

Il faut préciser que, contrairement aux matières premières "classiques" dont on connaît les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication car on réalise, en même temps, le matériau et le produit.

Coefficients usuels tenant compte de l'incertitude : Acier 1.1 ; béton 1.5 ; Bois 2.

→ **La fatigue** (voir 3.6. p.22) : abattement de **10%**, voire **30%** en sur-amplitude ?

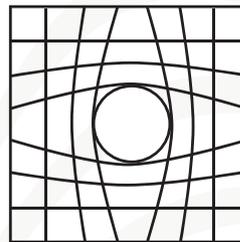
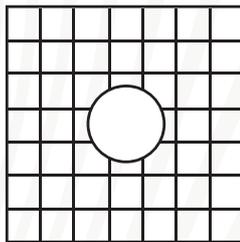
→ **La température et l'hygrométrie** :

- Là où la fibre travaille : pas d'abattement,
- Là où seul le polymère travaille : 25% voire 50% à hygrométrie à saturation au dessus de la Tg (conditions extrêmes),
- En comportement équivalent : **5 à 10%** arbitrairement.

Ces valeurs sont indicatives. **Elles seront contre-vérifiées** par l'expérience en usage réel et en mésusage, surtout pour des pièces règlementaires ou sécuritaires, **là où l'erreur n'est pas permise**. Voir aussi la notion de « fail safe » (p. 43).

5.10. LES SINGULARITÉS QUI MÉRITENT L'ATTENTION DU CONCEPTEUR

Trous



Le concepteur peut s'attendre à un affaiblissement **d'environ 50 %** en traction **si les fibres continues sont rompues** par un perçage.

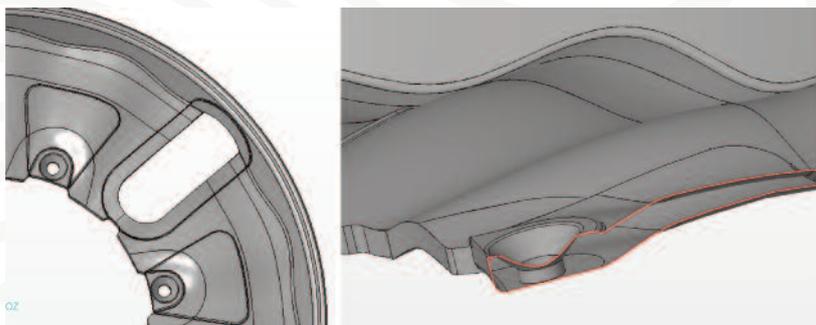
Avec le procédé **HV-TFP** utilisé en amont du **Supermoulage®**, cet affaiblissement local de la résistance à la rupture **est évité** grâce à un placement anticipé des fibres continues.

Enfin, il est recommandé que le pas de perçage entre des trous soit plusieurs fois supérieur au diamètre.

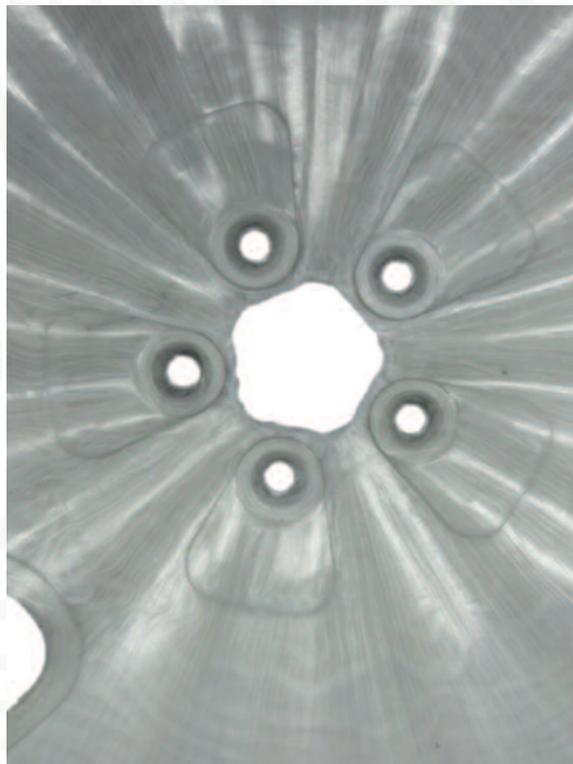
Attaches

La pression de matage exercée sur la zone de contact entre la fixation (comme un boulon ou un dispositif similaire) et la structure composite crée une zone de « sur contrainte » pouvant entraîner un « **déboutonnage** ». Le concepteur devra donc positionner les fibres continues en conséquence et **faire varier les épaisseurs localement**, à son avantage.

L'usage de la fibre est avantageux, du fait d'une pression de matage élevée : environ 500 MPa pour le carbone, 300 MPa pour le verre (cf. supra Une solution au fluage page 34).



Will, jante 20 pouces pour vélo cargo, version moyeu-moteur.

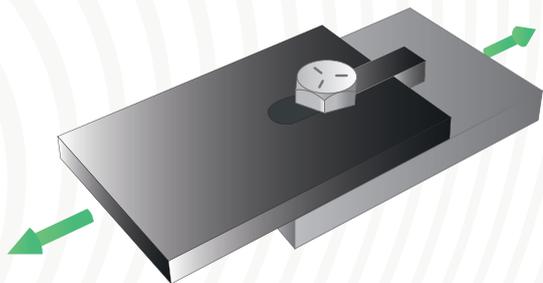


Intégration d'inserts métalliques, de fils résistifs, etc...



Pour réduire le nombre d'opérations d'assemblage et améliorer leur intégration dans la pièce finale, les inserts peuvent être mis en œuvre dès le placement des fibres, à l'étape du **HV-TFP** ou pendant le **Supermoulage**®.

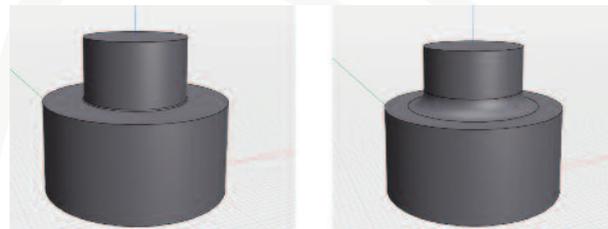
Distance au bord



ténacité, de leur meilleure résistance aux fissures et à la moindre propagation des délaminations par rapport aux thermodurcissables.

Il est recommandé que la distance au bord soit d'au moins **2 à 3 fois le diamètre** du trou, légèrement moins si les fibres ne sont pas rompues, d'où l'intérêt du TFP.

Epaisseur, forme et variation brutale de **moment d'inertie**



On sait que les petits rayons dans la forme doivent être évités, car ils concentrent les contraintes. En effet, les zones avec des changements brusques de moment d'inertie, en raison de variations géométriques **ou de changements de matériau**, sont sujettes à des concentrations de contraintes accrues.

Ces zones de discontinuité et donc de concentration de contraintes, sont plus vulnérables aux phénomènes de fatigue ou de rupture sous charge.

Dans des applications comme l'injection, ces points de concentration doivent être soigneusement gérés pour éviter des défauts mais aussi les déformations.

06

Quelques ordres de grandeur

		Métaux		Polymère thermodurcissable	Thermoplastique	Thermoplastique	Thermoplastique fortement renforcé
		Aciers	Alliage d'aluminium AL6061	Époxyde	Polyamide (PA) non chargé	Polypropylène (PP)	Base polyamide (PA)
Module d'élasticité longitudinale ou module de Young (GPa)	E GPa	200	70	4,5	2	1,2	14 - 30 (Cond.) 30 - 40 (Dry.)
Contrainte de rupture en traction (Mpa)	σ rupture Mpa	400 à 1 600	280	130	80	30	130 - 290 (Cond.) 220 - 340 (Dry.)
Température limite d'utilisation (°C)	T max °C	800	250	90 à 200	105	70 à 140	120 (20000 h) 160 (200 h)
Capacité thermique massique (J/kg x °C)	c J/kg x °C	400 à 800	900	1000	1200	330	
Conductivité thermique à 20°C (W/m x °C)	λ W/m x °C	20 à 100	167	0,2			0,4
Coefficient de dilatation thermique à 20°C (°C ⁻¹)	α °C ⁻¹	1,3 x 10 ⁻⁵	2,4 x 10 ⁻⁵	11 x 10 ⁻⁵	8 x 10 ⁻⁵	9 x 10 ⁻⁵	Parallel 2 x 10 ⁻⁵ /K Transverse 7 x 10 ⁻⁵ /K
Allongement à rupture (%)	A %	1,8 à 10	10	2 (100 °C) 6 (200 °C) 2,5	> 50	> 200	> 1,5 %
Coefficient de Poisson	ν	0,3	0,33	0,4	0,35	0,4	0,4
Module de cisaillement (GPa)	G GPa	79	26	1 à 4	0,4 à 1	0,3	5 à 10
Masse volumique (kg/m ³)	ρ kg/m ³	7800	2700	1200	1100	900	1340

Pour un composite à 60% de fibre continue, en volume.

Pression de matage :

500 Mpa pour le carbone, 300 Mpa pour le verre.

Renforts - Fibres							
Fibres de verre E pour un filament de diamètre 16 µm	Kevlar 49 pour un filament de diamètre 12 µm	Carbone H.R.	Carbone H.M. (haut module)	Lin	Chanvre		
74	130	230	390	12-85	30-70	Module d'élasticité longitudinale ou module de Young (GPa)	
2500	2900	3000 - 4000	2 100	600 - 2 000	380 - 900	Contrainte de rupture en traction (Mpa)	
700						Température limite d'utilisation (°C)	
800	1400					Capacité thermique massique (J/kg x °C)	
1	0,03					Conductivité thermique à 20°C (W/m x °C)	
0,5 x 10-5	-0,2 x 10-5					Coefficient de dilatation thermique à 20°C (°C ⁻¹)	
3,5	2,3	1	0,6	1 - 4	1,6 - 2,7	Allongement à rupture (%)	
0,25	0,4	0,3	0,35			Coefficient de Poisson	
300	12	50	20			Module de cisaillement (GPa)	
2600	1450	1750	1900	1 400 - 1 540	1 070 - 1 480	Masse volumique (kg/m ³)	

07

Perspectives d'évolution et opportunités

Les technologies proposées par le **consortium 111** (Protoform, Ollow et Nobrak), sont des procédés de fabrication économiquement pertinents.

Une fois que les demandeurs et les moyens industriels se seront adaptés à cette rupture technologique, **le marché devrait se retourner, du composite actuel vers le composite recyclable.**

Bibliographie

Suhas Kulkarni

Robust process development and scientific molding
2ième Ed.

Daniel Gay

Matériaux composites
6ième Ed. 2015,

Berthelot

5ième Ed. 2012
Matériaux composites - Comportement mécanique
et analyse des structures
version 3 – Fév 2019 – S Drapier

Maurice Reyne

Solutions composites thermodurcissables
et thermoplastiques
JEC 2006

Go.nebula.tv/the-efficient-engineer

The Incredible Properties of Composite Materials

Techniques de l'ingénieur

Vieillessement des composites
am5320 - Bruno Mortaigne

Drapier & Wisnom

1999a-1999b,
Composites Science and Technology

JL Thomason

Structure-Property Relationships in Glass-Reinforced
Polyamide: Effects of Fiber Content

Quality performs

Tepex manual – Lanxess

Glossaire

CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polymer ou Continuous Fiber Reinforced Polymer

GRP : Glass Reinforced Polymer (ou Fiber glass)

CTP : composite à matrice thermoplastique

CTD : composite à matrice thermodurcissable

Embuvage : le fait que les mèches ondulent

HDT (Heat deflection temperature) : La température de déflexion sous charge correspond à la température à laquelle un matériau déformable commence à se déformer sous une charge prédéfinie

HV-TFP : High Volume - Tailored Fiber Placement

Matrice : Polymère qui enrobe les fibres

Module équivalent : Valeur approximative du module de Young pour les prédimensionnements en RDM

Module de Young (ou module d'élasticité) (en MPa) : contrainte (MPa) / % d'allongement, dans la région élastique du matériau

Moment d'inertie : mesure de la difficulté qu'un objet a à tourner autour d'un axe. Plus un objet est lourd ou plus sa masse est éloignée de l'axe de rotation, plus son moment d'inertie est grand

Propriété spécifique : propriété rapportée à la densité (ex : limite élastique / densité)

RDM : Résistance des Matériaux

Résistance (strength) : est la mesure des contraintes qu'un matériau peut supporter / encaisser / tolérer

Résilience : Capacité d'un matériau à absorber l'énergie élastiquement

Rigidité (stiffness) : Voir raideur

Raideur : **Voir rigidité** : penser à un ressort, plus ou moins raide. Chaque matière est caractérisée par un ressort. On la mesure grâce au module de Young

Robustesse (Toughness ou ténacité) : Est la mesure de la capacité d'un matériau à absorber l'énergie jusqu'à la rupture

Supermoulage® : Le Supermoulage® consiste à assembler une partie thermoplastique et une partie composite à fibres continues, dont les polymères sont compatibles, garantissant un assemblage cohésif et recyclable

TD : Thermodurcissable

TP : Thermoplastique

Tg : Température de transition vitreuse. Température caractérisant un changement de comportement : de fragile à ductile... (non sans considérer des états intermédiaires)

Zone élastique : zone de déplacement réversible

Zone plastique : zone de déplacement irréversible, au-delà de la limite d'élasticité

Supermoulage®

Composite et recyclable

LIVRE BLANC

AUTEUR & CONTRIBUTEURS

Pierre BEDRY & Maxence GLENNE, Aurélie ANDRIOT,
Bertrand LAINE, Aymeric AZRAN, Romain FRE, Tony DE LA CORTE,
Alexandre BAZARD, Titouan PANNETIER, Sandrine NEY
et à tous ceux qui produisaient pendant qu'on écrivait ces lignes



PROTOFORM BOURGOGNE
14 rue Georges Eastman - ZI Sud
71100 CHALON-SUR-SAÛNE

contact@protoformbourgogne.fr