

Université Internationale de Casablanca

Cours  
Les Matériaux composites  
à matrices polymériques

Prof: Abdellah HADDOUT

Année Universitaire 2019/2020

Le Formateur

- ❖ Abdellah HADDOUT
- ❖ Ingénieur : Mécanique Industrielle CNAM Paris
- ❖ Doctorat en Mécanique Industrielle CNAM Paris
- ❖ Titulaire de Doctorat d'Etat : en TMPC
- ❖ Prof titulaire au CNAM Paris : 7ans
- ❖ Professeur d'Université l'ENSEM: 25 ans
- ❖ Directeur du Laboratoire: Mangement Industrielle et Technologie des Matières Plastiques et Composites
- ❖ Responsable de filière Ingénieur: PIP : 8 ans
- ❖ Expert Consultant agréé : MCI , FMP, ANPME, CNAM,

PR.AHADDOUT

**Le plan**

- Chap. I-** Introduction – définitions
- Chap. II** - les matrices pour composites:
  - 1- les résines thermoplastiques
  - 2- les résines thermodurcissables
- Chap. III** : Les renforts
- Chap. IV** : Les composites thermoplastiques
- Chap. V** : La mise en œuvre des composites thermoplastiques
- Chap. VI**: La mise en œuvre des composites Thermodurcissables
- Chap. VII**: Les composites à fibres végétales
- Chap. VIII**: Les Nanocomposites
- Chap. IX**: Techniques de Caractérisation de composites

**INTRODUCTION**

## Introduction

Qu'est-ce qu'un composite?

- ❖ Composite: formé d'éléments très différents, souvent disparates
- ❖ Dans le domaine des matériaux, un matériau composite peut être défini comme étant une combinaison de deux ou plusieurs matériaux distincts ayant des interfaces reconnaissables.

## Introduction

- ❖ Développés par les plasturgistes
- ❖ Création de nouveaux matériaux
- ❖ Association matrice + renfort fibreux
- ❖ Orientation en fonction des sollicitations

## Introduction

Matériaux composites = matériaux anisotropes



Forte résistance dans le sens des fibres



Drapage avec différentes orientations permettant d'obtenir un matériau quasi isotrope

Obtention d'un matériau unique adapté au besoin

## Introduction

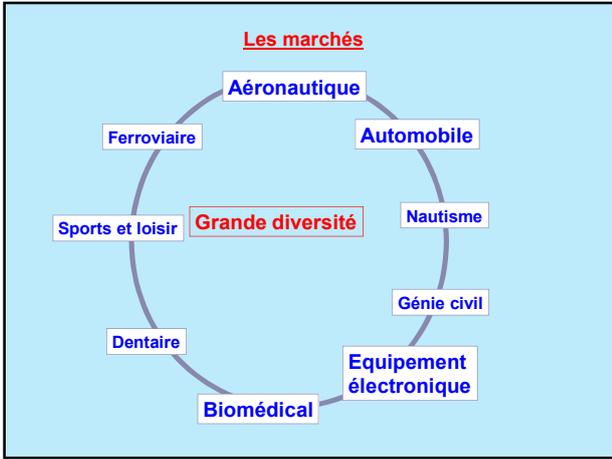
Propriétés mécanique optimisées

Légèreté

Résistance à la fatigue Tenue à la corrosion



Remplacement des matériaux traditionnels



## Introduction

### Fonctions spécifiques de chaque secteur d'applications

Principales fonctions apportées par les composites aux applications

	Aéronautique	Automobile	Ferroviaire	Bâtiment	Construction industrielle	Industrie navale	Médical	Électrique	Blocs & Joints
<b>Durée de vie</b>									
Rigidité				X	X	X	X	X	X
Tenue à la fatigue	X			X	X	X	X	X	X
Résistance à la corrosion	X	X		X	X	X	X	X	X
Étanchéité	X	X		X	X	X	X	X	X
<b>Sécurité</b>									
Tenue aux chocs	X	X		X	X	X	X	X	X
Tenue au feu	X	X		X	X	X	X	X	X
Isolation thermique	X	X		X	X	X	X	X	X
Isolation électrique	X	X		X	X	X	X	X	X
Amortissement vibrations	X	X		X	X	X	X	X	X
<b>Conception</b>									
Intégration de fonctions	X	X		X	X	X	X	X	X
Formes complexes	X	X		X	X	X	X	X	X
Transparence OEM	X	X		X	X	X	X	X	X
Allègement de structure	X	X		X	X	X	X	X	X

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

## Introduction

Transport aérien  
Avions de tourisme -tout composite-  
Planeurs -tout composite-

Fuselage:  
- Charpente  
- Enveloppe

## ⑨Transport aérien (avions civils)

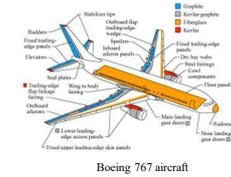
Aujourd'hui, les avions commerciaux les plus récents utilisent en masse encore 54 % d'alliage d'aluminium, mais 20 % de matériaux composites ont été introduits dans la structure, 13 % d'acier, 6 % de titane et 7 % de matériaux divers.

## Introduction

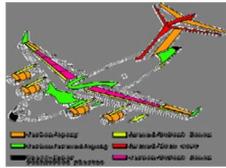
### Transport aérien

Augmentation de la performance et diminution des coûts

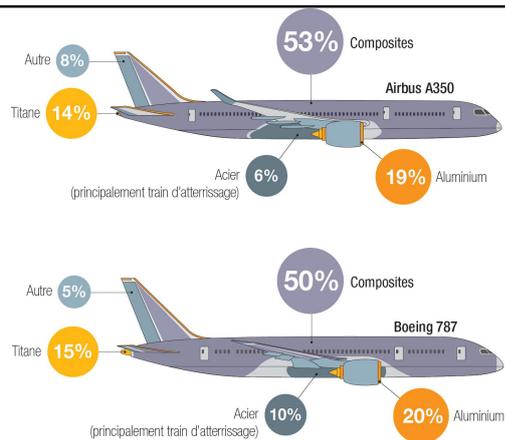
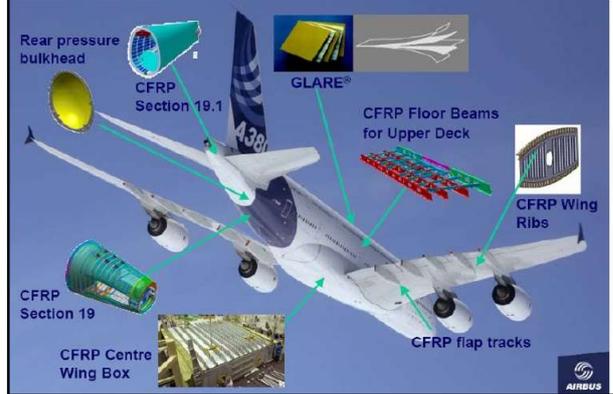
- ② Gain de masse :
  - économie de carburant
  - accroissement de la charge utile
- ② Bonne tenue à la fatigue
  - durée de vie augmentée
- ② Absence de corrosion
  - moins d'inspection
  - économie de la maintenance



Boeing 767 aircraft



## Applications





Bord d'attaque de voilure sur Airbus A340-500/600.  
Pièce en composite monolithique avec tissus en fibres de verre dans une résine thermoplastique PPS



Fond arrière étanche de fuselage Airbus A340-500/600.  
Pièce en composite sandwich et monolithique tissu en fibres de carbone dans une résine époxyde

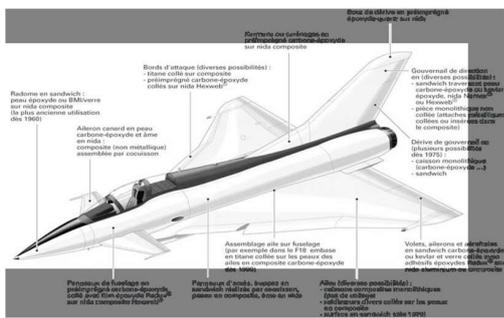


Entrée d'air et nacelle du moteur pour Airbus A340-500/600 en composite

## Avions militaires

Principales pièces composites introduites sur les avions militaires				
Appareil	Élément	Matériau	Date	Gain de masse (%)
F111	Diffuseur d'air	Bacite/époxy	1966	24
F14	Empennage horizontal	Bacite/époxy	1970	19
F15	Empennage vertical	Bacite/époxy	1971	25
F15	Empennage horizontal	Bacite/époxy	1971	22
Mirage III	Gouvernail de direction	Carbon/époxy	1975	20
Mirage F1	Empennage horizontal	Bacite/époxy	1976	15
Mirage F1	Ailettes	Carbon/époxy	1976	26
F16	Empennage horizontal	Carbon/époxy	1976	≈ 20
F16	Empennage vertical	Carbon/époxy	1976	≈ 20
Mirage 2000	Élevons	Carbon/époxy	1977	≈ 20
Mirage 2000	Empennage vertical	Carbon/époxy	1978	≈ 20
BI	Empennage	Bacite-carbon/époxy	1978	19
Mirage 4000	Empennage vertical	Carbon/époxy	1978	≈ 20
F18	Revêtement voilure	Carbon/époxy	1978	≈ 20
AV18	Voilure	Carbon/époxy	1978	≈ 20
Alpha jet	Empennage horizontal	Carbon/époxy	1980	≈ 20
Rafale	Voilure et aile fixe	Carbon/époxy	1994	≈ 20
Eurofighter	Voilure et aile fixe	Carbon/époxy	1995	≈ 20

## Avions militaires



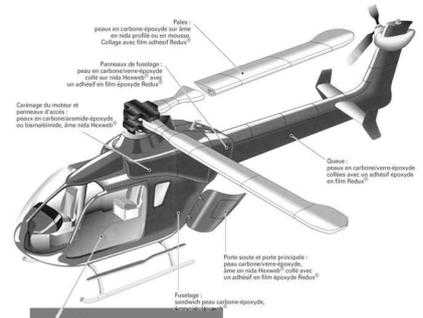
## Hélicoptères



Pales de rotor principal d'hélicoptère en composite



Moyeu rotor principal d'hélicoptère en composite



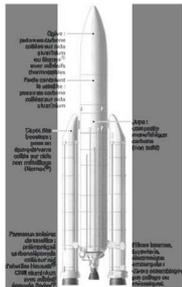
## Satellites



Panneau solaire de satellite en composite



Structure centrale monotube de satellite en composite





Structure tubulaire de satellite en composite



Réflecteur d'antenne en composite sandwich sur satellite

## Missiles



Radôme de missile en composite

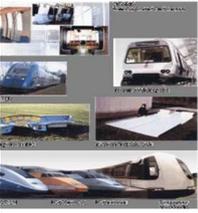


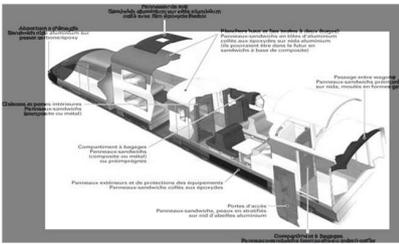
Corps de propulseur de missile avec divergent intégré bobiné en fibres de verre dans une résine époxyde

## Introduction

©Transport ferroviaire

Avants de motrices, voitures, wagons, portes, sièges, panneaux intérieurs, gaines de ventilation.....





## Introduction

Les matériaux composites jouent un rôle très important en construction navale: vedettes rapides, bateaux de course, multicoques et transports rapides de passagers. Ils ont repoussé les limites structurelles et apporté de très fortes améliorations en terme de **robustesse, fiabilité, poids, vitesse et sécurité.**



Coque de bateau



Vedettes



Embarcations de sauvetage



Voilier de compétition



Chalutiers

## Introduction



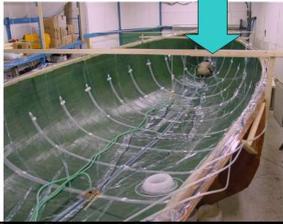
Structure monolithique raidie



Exemples d'une structure de grande dimension



Stratification d'un bordé de coque



Mise en place d'une cloison étanche

## Introduction



Coque de chasseur de mines- Moulage au contact en voie humide (120-150 t de composites)



Démoulage de la coque du BAMO (Bâtiment Anti-Mine Océanique)



Démoulage d'un dôme de sous-marin, drapage de préimprégnés, polymérisés sous vide

## Introduction

### ⑨Transport routier



Pièce de carrosseries carrosseries complètes

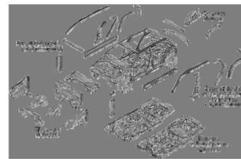


Sports cars



- Caravanes
- Camion isotherme
- Arbre de transmission, Ressort de suspension
- Poutre de châssis

## Introduction



Vue éclatée de la structure



Habillage de portière de voiture en lin/polypropylène



Bloc avant composite



Plancher composite

## Introduction

Sports et loisirs



Clubs de golf



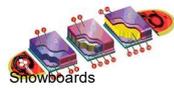
Cadres de bicyclette



Raquette de tennis et de squash



Canne à pêche



Snowboards



Skis

## Introduction



## Les marchés

➔ Production en constante évolution

Production de matériaux composites grande diffusion et hautes performances confondue

Production de matériaux composites hautes performances

Monde ≈ 6 000 000 t

Monde ≈ 60 000 t

Europe ≈ 2 400 000 t

Europe ≈ 15 000 t

Les composites hautes performances correspondent à 1 % des composites grande diffusion (GD) en pondéral, mais à 10 % approximativement en valeur

## Les marchés

Matière de base pour les matériaux composites grande diffusion et hautes performances confondue

### Matrices

Thermodurcissable ≈ 60 % prédominance polyester (2/3 des résines)

Thermoplastique ≈ 40 %

### Renforts

Dominante fibre de verre > 90 %

## Les marchés

Matière de base pour les matériaux composites hautes performances

### Matrices

Thermodurcissable ≈ 85 % prédominance epoxy (50% des résines)

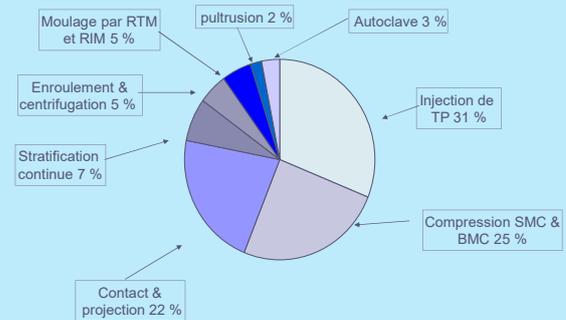
Thermoplastique ≈ 15 %

### Renforts

Dominante fibre de carbone ≈ 66%

## Les marchés

### Les mises en œuvre



## 2 – DEFINITIONS

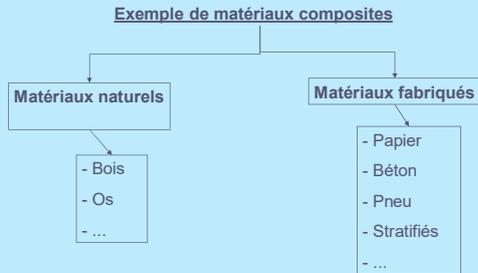
### Définition

Un **matériau composite** est un matériau formé de plusieurs composants élémentaires **non miscibles**.  
Contrairement aux alliages qui sont le résultat d'un mélange.

L'association confère des propriétés qu'aucun des composants pris séparément ne possède.

Dans le cas des composites chaque constituant garde **ses propriétés et sa forme** (ex : fibre) au sein du matériau composite.

### Définition



### Constituants

En général un des constituant se présente sous forme de fibres ou granules. Il assure la tenue mécanique (résistance en traction, rigidité)

**Il s'agit du RENFORT**

Le constituant le plus faible sert de lien ou de liant au renfort et repartit les efforts (résistance à la compression, flexion). Il assure une protection des renforts au milieu extérieur.

**Il s'agit de la MATRICE**

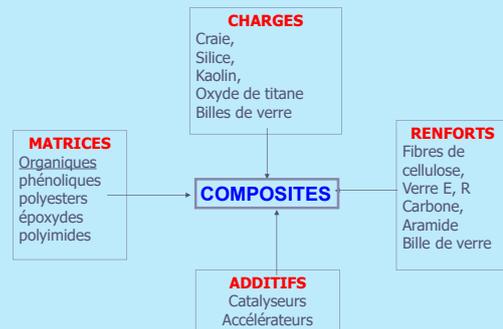
### Constituants

Enfin sans que ce soit nécessairement un constituant à part entière, on distingue cependant une zone entre le renfort et la matrice qui joue un rôle prépondérant sur la tenue globale du composite.

**Il s'agit de l'INTERFACE**

Constituants complémentaires les charges ou additifs sont incorporées à la matrice pour apporter une propriété spécifique à la matière : ignifugation, conductivité, coloration, anti-retrait, anti UV ...

### Constituants



### Classification

#### Deux grandes familles :

Les composites de grande diffusion (95% des composites utilisés) :

- taux de renfort : environ 30%
- renfort et matrice : même coût

Les composites hautes performances

- taux de renfort : environ 50%
- coût renfort > coût matrice

### Avantages / inconvénients

#### AVANTAGES :

- Gain de masse
- Bonne tenue en fatigue
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité ou la chaleur
- Insensibilité aux produits chimiques courants
- Très forte anisotropie
- facilité de mise en forme

#### INCONVENIENTS :

« chaque renfort communique à ses composites des défauts qui leur sont spécifiques »

- tenue au feu
- difficulté d'usinage
- problème de recyclage
- coût selon le type de renfort élevé
- limitation d'utilisation en température
- mauvaise tenue à l'impact

## LES MATRICES

### La matrice

#### ROLES :

- lier les fibres renforts
- répartir les contraintes
- apporter la tenue chimique
- donner la forme désirée au produit réalisé

### Les familles de résines

- ❖ Les résines thermodurcissables (TD)
- ❖ Les résines thermoplastiques (TP)
- ❖ Les résines thermostables
- ❖ Les élastomères thermoplastiques

### Les résines thermoplastiques

#### Les résines thermoplastiques

Polymère pouvant être alternativement ramolli par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique.

Structure sous forme de chaînes linéaires. Mobilité.

**TRANSFORMATION REVERSIBLE**

### Les résines thermoplastiques

#### Tenue en température > 100°C :

- Polyamide (PA) : *tenue au choc, fatigue et hydrocarbures*
- Polytéréphthalates éthylénique ou butylenique (PET ou PBT) : *rigidité et ténacité*
- Polycarbonate (PC) : *tenue au choc*
- Polyoxide de phénylène (PPE ou PPO) : *résistance à l'hydrolyse*
- Polyoxyéthylène (POM) : *tenue à la fatigue*
- Polysulfurés (PSU et PPS) : *stabilité chimique et hydrolyse, peu de fluage, tenue à chaud*
- Polypropylène (PP) : *peu onéreux, assez stable en température mais combustible*

### Les résines thermoplastiques

Polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue.

#### Quelques thermostables :

- Polyamide - imide (PAI)
- Polyéther - imide (PEI)
- Polyéther 6 sulfone (PES)
- Polyéther - éther - cétone (PEEK)
- Polymères cristaux liquides (PCL)

### Caractéristiques des différentes résines

Résines	nom	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$\nu$	R (MPa)	$\alpha$ ( $\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ )	Prix (€/kg)
TD	Polyester	1300	3800	0.37	88	100	2.3
	Vinylester	1200	3500	0.35	81	65	2.8
	Epoxyde	1220	5200	0.38	121	40	16
	Silicone	1550	1000	0.45	3	30	32
	Polyimide	1217	3450	0.35	80	36	75
	Phénolique	1350	3000	0.36	70	80	2
TP	Polyamide	1130	1900	0.33	70	85	3.8
	Polycarbonate	1100	2300	0.33	60	70	6
	Polyester saturé	1310	2800	0.33	55	90	
Métaux	Aluminium	2630	69000	0.33	358	23	2
	Acier XC10	7850	210000	0.29	1000	10	1.5
	Cuivre	8940	119000	0.30	350	17	1.7
	Magnésium	1660	42000	0.30	280	25	4.2

### Différences entre matrices TP et TD

Matrices	Thermoplastique	Thermodurcissable
<i>Etat de base</i>	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux
<i>Stockage</i>	Illimité	Réduit
<i>Mouillabilité des renforts</i>	Difficile	Aisée
<i>Moulage</i>	Chauffage + refroidissement	Chauffage continu
<i>Cycle</i>	Court	Long (X2)
<i>Tenue au choc</i>	Assez bonne	limitée
<i>Tenue thermique</i>	Réduite	Méilleure
<i>Chutes et déchets</i>	Recyclables	Perdus ou utilisés en charges

### Les résines thermodurcissables

#### Les résines thermodurcissables

Polymère transformé en un produit à structure en forme de réseau tridimensionnel après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physico-chimique (catalyse, durcisseur).

Mobilité des molécules limitée, caractère quasi infusible et insoluble

**TRANSFORMATION IRREVERSIBLE**

### Les résines thermodurcissables

#### Paramètres importants :

- la viscosité qui caractérise l'aptitude à la mouillabilité
- la durée de vie du produit
- la durée de polymérisation
- l'allongement à la rupture de la résine
- le point de transition vitreuse

### LES POLYESTERS THERMODURCISSABLES

Le symbole UP pour les polyesters insaturés vient de l'anglais Unsaturated Polyester.

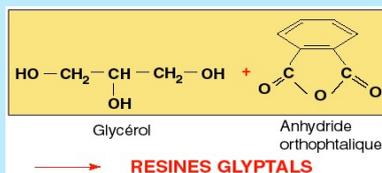
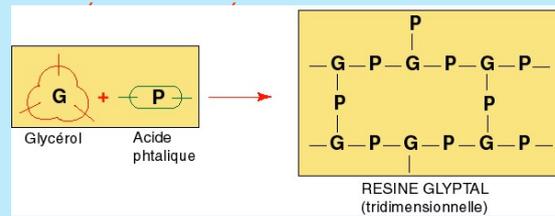
A partir des résines issues de cette réaction de condensation, la réticulation (c'est à dire la liaison entre chaînes pour en faire un réseau tridimensionnel) est assurée par différents monomères.

- Le **styrène** le plus utilisé
- Le **méthacrylate de méthyle** qui donne une meilleure tenue transmission lumineuse.
- le **cyanure de tri allyle** pour une meilleure tenue thermique.

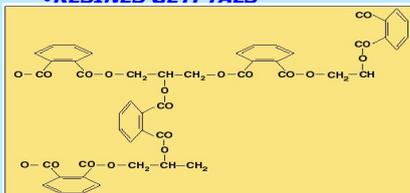
L'agent de réticulation est livré mélangé à la résine de base, la **réaction débutera grâce** à l'adjonction d'un **catalyseur** et à un **chauffage** lors de la mise en oeuvre, **ou** à froid, à l'aide d'un **catalyseur** et d'un **accélérateur**.

## POLYESTERS THERMODURCISSABLES

### LES RÉSINES GLYPTALS



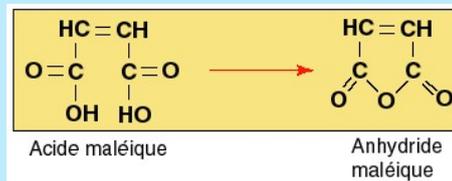
### •RÉSINES GLYPTALS



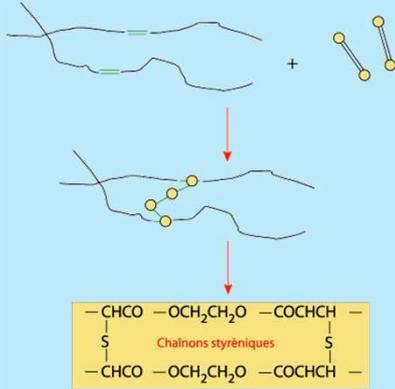
## POLYESTERS LINÉAIRES INSATURÉS

### ACIDES INSATURÉS

#### ACIDE MALÉIQUE



## POLYESTER INSATURÉ + STYRÈNE



## AGENTS RÉTICULANTS

STYRÈNE (Eb = 145°C)	
MONOCHLOROSTYRÈNE	
α MÉTHYLSTYRÈNE (Eb = 165°C)	
DIVINYL BENZÈNE (Eb = 200°C)	
MÉTACRYLATE DE MÉTHYLE (Eb = 100°C)	
ACRYLAMIDE (Eb = 84,5°C)	

## RÉTICULATION DES POLYESTERS INSATURÉS

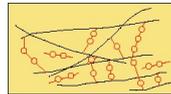
en progression dans le temps

### 1. PHASE LIQUIDE



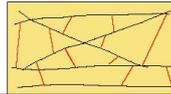
Chaîne de polyester insaturé  
Molécule de monomère (styrène)

### 2. PHASE DE GELIFICATION



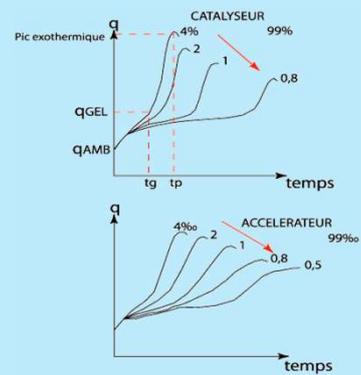
Polymérisation du styrène  
(partielle)

### 3. PHASE DE DURCISSEMENT



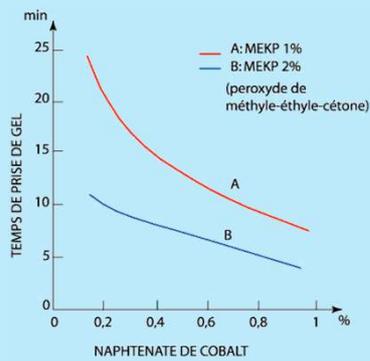
Pontage (maximum)

## RÉACTIVITÉ DES POLYESTERS



PUIS REFROIDISSEMENT ET RETRAIT 6 à 8%

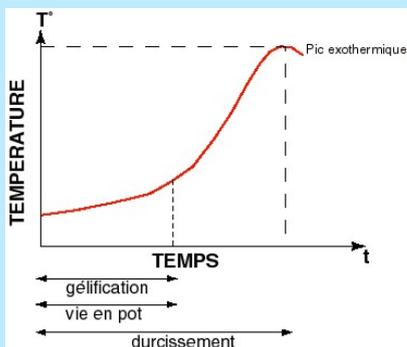
### TEMPS DE PRISE EN GEL EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE L'INITIATEUR



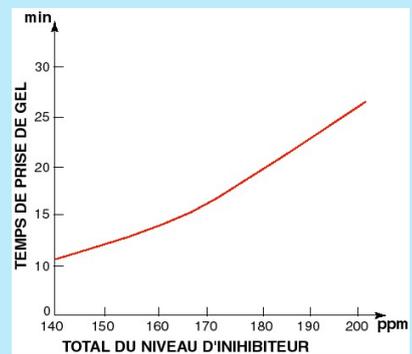
### RÉACTIVITÉ DES RÉSINES POLYESTERS

- COMPOSITION DES MÉLANGES :
  - Résine : 50g
  - Accélérateur : 1% environ
  - Catalyseur : 0,1% environ
- Influence du taux d'accélérateur
- Influence du taux de catalyseur (initiateur)
- Influence du taux de charges

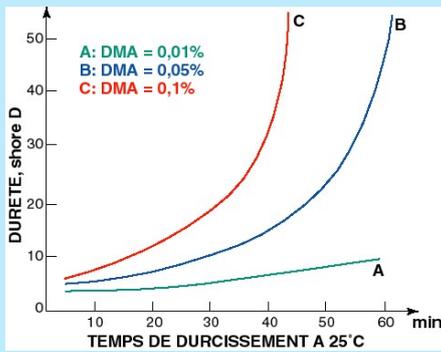
### • COURBE DE RÉACTIVITÉ :



### TEMPS DE PRISE EN GEL EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE L'INHIBITEUR



**EFFET DE LA CONCENTRATION EN DIMÉTHYLANILINE (DMA) SUR LE DURCISSEMENT D'UNE RÉSINE POLYESTER DE COULÉE ET SA DURETÉ**



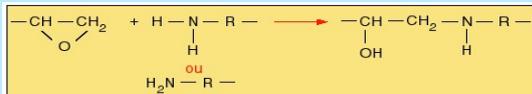
**Les résines thermodurcissables**

*Époxydes* : proviennent de la réaction entre l'épichlorhydrine et le Bisphénol A. Nécessité d'un agent de réaction ou durcisseur.

Deux classes de résines en fonction :  
du durcissement à chaud ou à froid  
de la tenue en température (120°C-130°C ou 180°C-200°C)

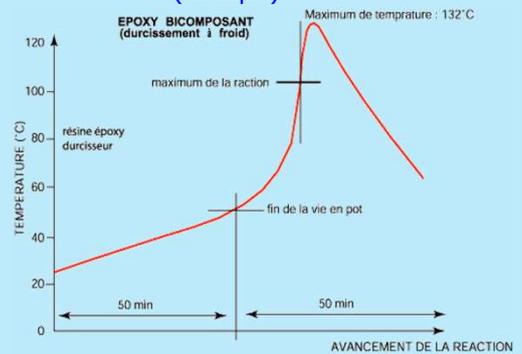
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tenue mécanique, thermique et à la fatigue</li> <li>• Faible retrait</li> <li>• Stabilité dimensionnelle</li> <li>• Auto-extinguibilité</li> <li>• Bon comportement chimique</li> <li>• Excellente adhérence sur fibres et métaux</li> <li>• Mise en œuvre sans solvant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilité au choc</li> <li>• Vieillesse sous température</li> <li>• Temps de polymérisation plus élevé que pour polyester</li> <li>• Prix élevé</li> </ul>

**LES RÉSINES ÉPOXYDIQUES**  
RÉACTION TYPE



RÉACTION D'ADDITION  
SYSTÈME BICOMPOSANT : RÉSINE + DURCISSEUR ADHÉSIF ÉPOXY / DURCISSEMENT À FROID  
SYSTÈME MONOCOMPOSANT : RÉSINE + DURCISSEUR ADHÉSIF ÉPOXY / DURCISSEMENT À CHAUD  
DURCISSEMENT À TEMPÉRATURE AMBIANTE  
AGENT DE DURCISSEMENT : amines aliphatiques  
DURCISSEMENT À HAUTE TEMPÉRATURE  
AGENT DE DURCISSEMENT :  
Amine aromatique  
Diaminodiphénylméthane  
Diaminodiphénylsulphone

**RÉACTION EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE**  
(exemple)



### Les résines thermodurcissables

*Vinylesters* : produites à partir d'acides acryliques et métacryliques, bonne tenue à la corrosion

*Phénoliques* : résultent de la polycondensation du phénol et du formol

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tenue au feu et sous température</li> <li>• Tenue au fluage</li> <li>• Prix réduit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résistance mécanique réduite</li> <li>• Sensibilité à l'humidité</li> <li>• Dégagement d'eau lors du durcissement</li> <li>• Coloration difficile</li> </ul>

### Les résines thermodurcissables

*Polyuréthanes et polyuréés* : les constituants sont livrés à l'état de prepolymeres liquides :

polyols + polyisocyanates = polyuréthanes  
polyethers + polyamines = polyuréés.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résistance à l'abrasion</li> <li>• Facilité de moulage</li> <li>• Tenue chimique</li> <li>• Bon vieillissement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résistance mécanique réduite</li> <li>• Combustibilité</li> <li>• Coloration difficile</li> </ul>

### Les résines thermodurcissables

*Polyimides (ou bismaleimides) et polystyrylpyridines* : excellente tenue en température (> 250°C). Deux formes de livraison : liquide d'imprégnation ou en poudre à mouler renforcée de fibres.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résistance mécanique sans fluage</li> <li>• Faible coefficient de friction</li> <li>• Pratiquement incombustible</li> <li>• Adhésivité</li> <li>• Bon comportement à l'oxydation et radiations</li> <li>• Excellente tenue en température même en présence de solvants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilité à l'hydrolyse</li> <li>• Transformation difficile</li> <li>• Prix élevé</li> </ul>

*Silicone* : résine présentant de bonnes qualités chimiques, thermiques, électriques à l'hydrolyse et au feu, mais faible adhésivité et durée de polymérisation assez longue.

### Rôle de l'accélérateur:

L'accélérateur permet une polymérisation à température ambiante et permet de faire varier la durée de vie de la résine (temps pendant lequel on peut mettre la résine en oeuvre avant sa gélification) Parmi les accélérateurs, on peut citer: l'octoate de cobalt, la diéthylaniline, le lauryl mercaptan.

### ATTENTION:

- \* **L'accélérateur est mélangé en premier à la résine, puis le catalyseur.**
- \* **Ne pas mélanger directement accélérateur et catalyseur, la réaction pourrait être explosive.**
- \* **Travailler sans fumer dans un local aéré ces produits étant facilement inflammables**

## 2. PROPRIETES PHYSIQUES

Les résines (seules) sont transparentes. Les renforts ou charges diminuent la transmission lumineuse de l'objet fini. La densité de la résine est : 1,10 à 1,40.

## 3. PROPRIETES MECANIQUES

- La résine polyester, rarement utilisée seule (sauf pour inclusion) est le plus souvent associée à des charges (carbonate de calcium, mica, silice...) ou à des renforts (fibres de verre...). Les propriétés mécaniques seront donc totalement tributaires de l'agent de renforcement.
- On prendra soin que l'humidité et la température ambiante, lors de la mise en oeuvre, n'affectent pas les propriétés mécaniques du produit final (température supérieure à 15 °C et pas de mise en oeuvre par forte humidité).
- La technique elle-même affectera les propriétés suivant qu'elle permet d'utiliser des fibres orientées, des tissus ou des mats

## 4. PROPRIETES CHIMIQUES

- La résistance chimique concerne la résine seule.
- Les polyesters résistent bien aux acides non oxydants, aux solutions salines aux solvants tels que alcools, hydrocarbures, mais sont attaqués par les solvants chlorés, cétones esters
- **Certaines résines sont homologuées pour un contact avec les aliments**

## 5 PROPRIETES THERMIQUES:

Les polyesters sont inflammables mais sont disponibles en qualité auto extingtibles et présentent une bonne tenue à température (jusqu'à 130°C en service continu).

## 6 PROPRIETES ELECTRIQUES

Les résines et stratifiés polyesters et verre ont d'excellentes propriétés d'isolation.

## 7 PROPRIETES DIMENSIONNELLES

Un gros handicap des polyesters par rapport aux polyépoxydes reste le retrait plus important au moulage; ce retrait peut être réduit par l'adjonction de charges ou de thermoplastiques.

## Le renfort

- Le renfort permet d'apporter les propriétés structurales pour lesquelles le matériau composite est utilisé.
- Plusieurs types de renforts peuvent être utilisés simultanément.
- Principaux types de renforts
  - Verre
  - Carbone
  - Kevlar (Aramide)
  - Bore
  - Cellulose (Organique)
  - Lin
  - Céramique

## Les charges

- Le rôle des charges est varié. Elles peuvent être utilisées pour modifier les propriétés mécaniques, électriques, thermiques, esthétiques ou pour diminuer le coût des matières premières.

## Exemples de charges

- Craie
- Silice
- Oxyde de titane
- Verre
- Fibres courtes
- Poudres métalliques
- Quartz
- Mica

## Les additifs

- Les additifs sont des éléments chimiques qui sont ajoutés à des proportions de l'ordre de 2%. Leur rôle est multiple. Ils servent, entre autres, à durcir, à protéger, à colorer et à augmenter la stabilité dimensionnelle de la matrice.

## Les types d'additifs

- Catalyseur
- Accélérateur
- Agent de démoulage
- Ignifugeant
- Anti U.V
- Fongicide
- ....

## **8 CHARGES RENFORTS COLORANTS:**

### **a) Les colorants:**

Les résines polyesters peuvent être facilement colorées et pigmentées soit dans la masse, soit en surface (gel coat)

Les pigments ou colorants peuvent jouer sur la réaction de polymérisation (accélérer ou retarder) ou même se décolorer sous l'action de catalyseurs. De ce fait il convient de faire des essais.

### **2°) Les charges:**

Les charges ajoutées aux polyesters ont les buts suivants:

- Augmenter le viscosité pour des applications en surfaces verticales.
- Diminuer le retrait: mica
- Opacifier la résine.
- Améliorer certaines propriétés: abrasion, dureté.
- Diminuer le prix (mica, kaolin)
- Augmenter la conductibilité électrique (graphite) ou thermique (poudre d'aluminium).
- Augmenter la résistance à la combustion (cires chlorées).

## **2°) Les charges:**

Les charges ajoutées aux polyesters ont les buts suivants:

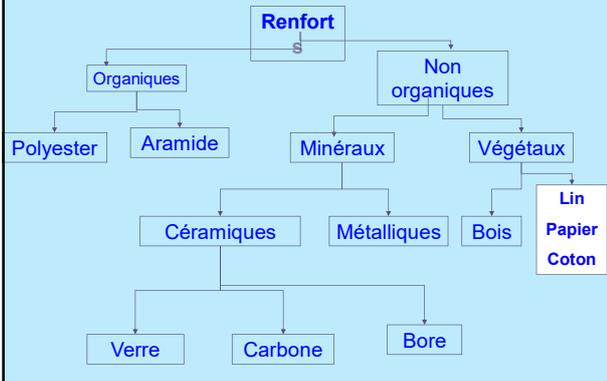
- Augmenter le viscosité pour des applications en surfaces verticales.
- Diminuer le retrait: mica
- Opacifier la résine.
- Améliorer certaines propriétés: abrasion, dureté.
- Diminuer le prix (mica, kaolin)
- Augmenter la conductibilité électrique (graphite) ou thermique (poudre d'aluminium).
- Augmenter la résistance à la combustion (cires chlorées).

## **Le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) : Craie**

Il est très utilisé comme charge dans l'industrie plastique pour permettre la réduction des coûts en réduisant le contenu en polymère par pièce. Il permet aussi de réduire les retraits et le vieillissement UV.

## **4 – LES RENFORTS**

### Les différents types de renforts



### Le Carbone

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

### Consommation mondiale

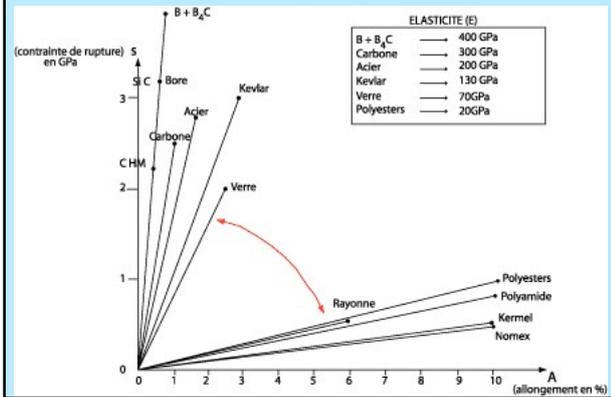
Consommation mondiale en tonne

	Europe	USA	Japon
Verre	460 000	620 000	210 000
Aramide	2500	6 200	1200
Carbone	6500	13 000	10000

### Le renfort

- Le renfort permet d'apporter les propriétés structurales pour lesquelles le matériau composite est utilisé.
- Plusieurs types de renforts peuvent être utilisés simultanément.
- Principaux types de renforts
  - Verre
  - Carbone
  - Kevlar (Aramide)
  - Bore
  - Cellulose (Organique)
  - Lin
  - Céramique

## PROPRIÉTÉS DES FIBRES



## Le verre

C'est un mélange de Silice, d'Alumine et de chaux fondu à 1250°C puis passé dans une filière en platine. Les filaments sont ensuite étirés à un diamètre de 5 à 13 Micron. Les monofilaments sont ensuite utilisés pour obtenir n'importe quel type de renfort (mèche, mat, toile, satin, sérgé....)

## fibre de verre (suite)

Elle est obtenue par coulée du verre en fusion (1250°C) au travers de filières en Pt-Rh (diamètre 5-24 microns) suivi d'étirages successifs.

Il existe deux procédés de filage du verre:

# l'étirage mécanique par filage à grande vitesse (50-60 m/s) qui donne un fil de base continu, constitué de 50 à 1500 filaments plus ou moins fins (diamètre 5 à 24 microns) et qu'on appelle Silionne.

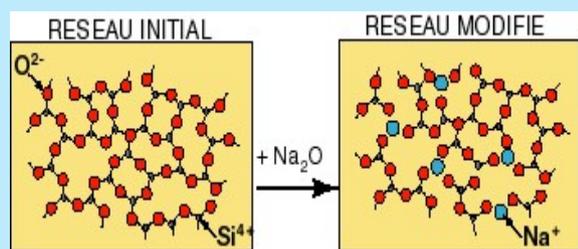
# l'étirage pneumatique qui produit une mèche de fibres discontinues (longueur 5 à 80 cm) qu'on appelle verranne.

## Principe de fabrication de la fibre de verre



## Composition et fabrication des fibres de verre

❖ Structure Amorphe Du Verre



## Types de verre

- ☞ Verre E : Grande diffusion
- ☞ Verre D : Construction électrique
- ☞ Verre R : Utilisation structurelle, Haute performance

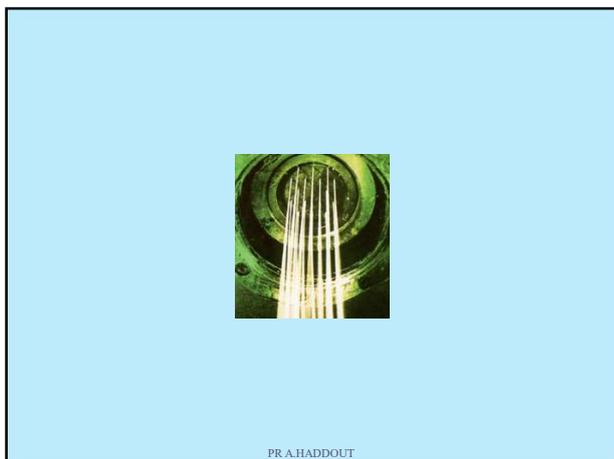
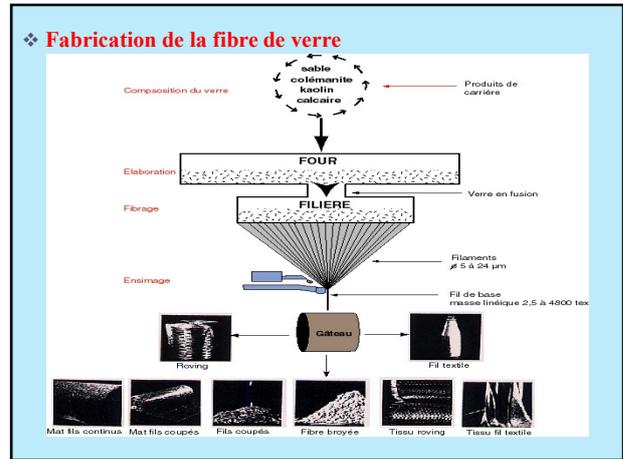
## Propriétés du verre

- ☞ Economique environ dix fois moins cher que le carbone
- ☞ Résistance en tension
- ☞ Bonne élongation
- ☞ Bonne stabilité dimensionnelle
- ☞ Isolation électrique
- ☞ Bonne adhérence aux résines
- ☞ Propriétés mécaniques limitées
- ☞ Vieillessement accéléré au contact de l'eau, UV Et t°

## Les fibres de verre

principaux constituants (%)	type de verre		
	E	D	R
Silice SiO <sub>2</sub>	53-54	73-74	60
Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14-15		25
Chaux CaO + Magnésie MgO	20-24	0,5-0,6	9
Oxyde de Bore B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6-9	22-23	6

<i>Types de verre</i>	<i>Caractéristiques</i>
Verre E	Fibres les plus utilisées tant dans l'industrie textile que dans les composites dont elle représente aujourd'hui plus de 90% des renforts, ils ont de bonnes propriétés électriques.
Verre R ou S	Fibres à hautes performances mécaniques.
Verre D	Fibres à hautes propriétés diélectriques
Verre C	Fibres résistantes aux acides et utilisées sous forme de voile de surface, mais aussi de fils
Principales variétés de Fibres utilisées.	





**La fibre de verre**

**Propriétés Mécaniques**

Type	Ø (µm)	densité	Propriétés en traction			Dilatation $10^{-6} K^{-1}$	Résistivité $\Omega cm$
			Résistance MPa	Module GPa	A%		
E	3 à 30	2,54	3 400	73	4,8	5	$10^{12}$ à $10^{19}$
R ou S	3 à 30	2,48	4 400	86	5,4	4	$10^{12}$ à $10^{19}$
D	3 à 30	2,14	2 500	55	4,8	3,5	$10^{12}$ à $10^{19}$
C	3 à 30	2,5	2 800	70	4	8,5	$10^{12}$ à $10^{19}$
silice	3 à 30	2,2	3 500	68	1,5	0,55	$2 \cdot 10^7$

**La fibre de verre**

**Principaux producteurs**

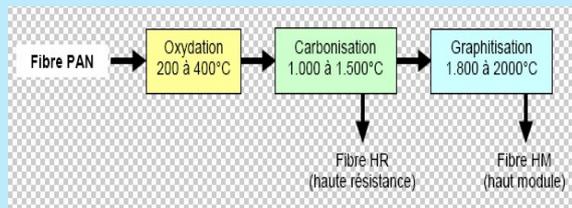
- Owens Corning Fiberglass (USA)
- Vetrotex Saint Gobain (France)
- Ahlström
- PPG industries international inc (USA)

**La fibre de carbone**

Orientation préférentielle de la structure cristalline parallèle à l'axe des fibres = remarquables propriétés mécaniques

une rigidité et résistance très élevées dans la direction longitudinale associées à un très faible coefficient de dilatation linéique dans la même direction

## Principe de la fabrication de la fibre de carbone



## BOBINE DE FIBRES DE CARBONE



## Propriétés du carbone

- ✓ Tenue excellente en compression
- ✓ Tenue en température ( 2000°C)
- ✓ Bonne tenue en fatigue
- ✓ Inertie à la corrosion
- ✓ Facilité d'usinage

## Propriétés du carbone

- ✓ Prix élevé
- ✓ Mauvais contact avec le métal
- ✓ Tenue aux chocs médiocre
- ✓ Faible allongement 2/4 pour le verre
- ✓ Faible rayon de courbure

## Aramide

- ✓ Procédé : Matière organique réalisée à partir de thermoplastiques polyamides ou polyaramides.
- ✓ Types d'aramides : KEVLAR 29, AREMA D900, KEVLAR 980



## Propriétés du Kevlar

- ✓ Résistance spécifique à la traction
- ✓ Résistance à la fatigue
- ✓ Chocs et impacts
- ✓ Auto-extinguible
- ✓ Isolant thermique et électrique
- ✓ Amortissement des vibrations

## Propriétés du Kevlar

- ✓ Prix élevé (Carbone \*2)
- ✓ Mise en oeuvre difficile
- ✓ Usinage difficile
- ✓ Mauvaise résistance chimique (acides et bases fortes)
- ✓ Forte reprise d'humidité
- ✓ Sensibilité aux rayons UV

## Le Bore

Fabrication : Dépôt chimique en phase vapeur  
sur un fil de tungstène ou de carbone  
d'une  
couche de Bore, Bore + Carbure de bore  
ou  
de Bore et carbure de Silicium

## Propriétés du Bore

- ✓ Excellent en compression et en flambage
- ✓ Module très élevé
- ✓ Réparation des matrices métalliques et d'époxydes
- ✓ Bonne tenue à la fatigue et au vieillissement

## Propriétés du Bore

- ✓ Prix très élevé
- ✓ Haute densité
- ✓ Usinage difficile
- ✓ Faible rayon de courbure
- ✓ Tissus ou fils unidirectionnels

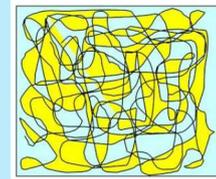
## Les fibres naturelles Le Lin



### Les non tissés

- Ils sont appelés MAT
- C'est un enchevêtrement de fils coupés 5 à 10 cm
- Il est utilisé:
  - En moulage et en grammage fin (200 à 300gr/m<sup>2</sup> comme première couche après le gel coat,
  - Entre les couches de tissu tissés ils assurent la liaison entre les couches
  - En plusieurs couches dans la construction de moules

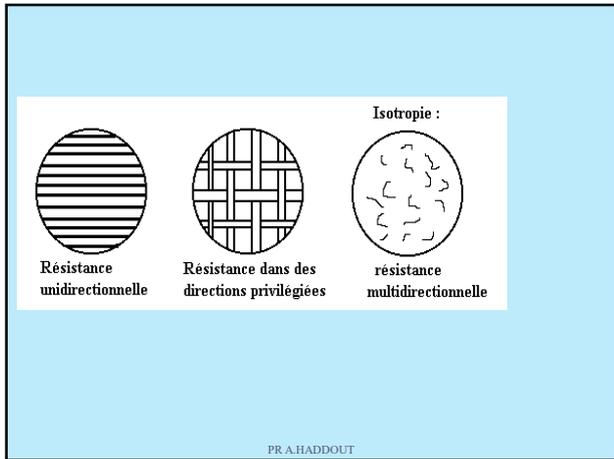
### Le Mat



### Propriétés du Mat

- Distribution des mèches aléatoires
- Isotropie
- Bas taux de renfort dans le composite
- Bonne déformabilité
- Bonne mouillabilité

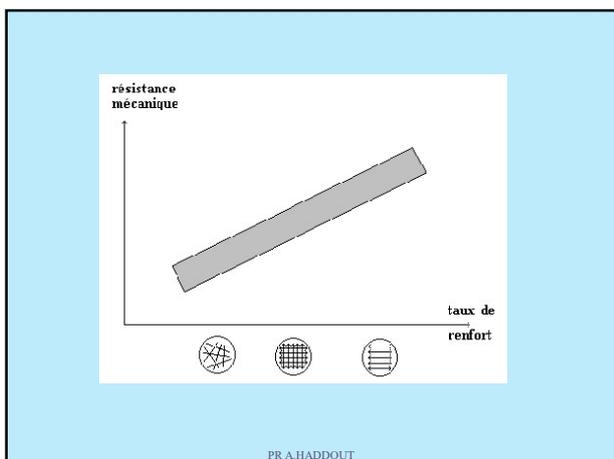




Le rôle principal des renforts est d'augmenter la résistance mécanique du matériau.

La présence de renforts diminue également le fluage de la matière et son retrait.

PR A.HADDOUT



### Les tissus

Il existe 3 familles de tissus dont l'unité de référence est le gr / m<sup>2</sup>. Plus le Grammage sera petit plus le tissu sera fin. Ces familles sont :

- Les tissés
- Les non tissés
- Les mixtes



PR A.HADDOUT



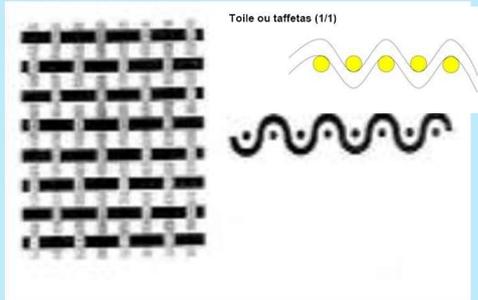
PR A.HADDOUT

### Les différents tissus en fibres



PR A.HADDOUT

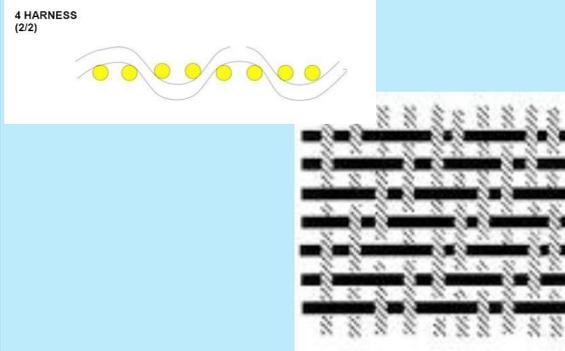
## La Toile



## La toile

- ❖ Bon mouillage
- ❖ Facile à débuller
- ❖ Donne une résistance équivalente en trame et en chaîne
- ❖ Peu déformable
- ❖ Peu adapté au drapage
- ❖ Effet de cisaillement plus prononcé

## Les sergés



## Les sergés



## Les sergés

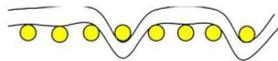
- Très déformable
- Excellent mouillage
- Souple
- Dense
- cher

## Les satins

4 HARNESS  
(2/2)



4 HARNESS  
(1/3)



5 HARNESS  
(2/3)



## Les satins



## Les satins

- Très déformable
- Bon mouillage
- Bien adapté pour les pièces géométriques difficiles
- Cher

## Armure haut module



## Armure haut module

- Très bon mouillage
- Supprime les effets de cisaillement
- Présente des trames et des chaînes unidirectionnelles
- Tissu T.haute performance
- Cher
- difficile à réaliser

## 6 - MULTIMATERIAUX

### Définition

#### Composition d'un sandwich :

Deux feuilles ou *peaux*, denses minces et résistantes (traction) situées de part et d'autre d'une *âme*, matériau ou structure légère présentant de bonnes propriétés en compression.

Ces peaux peuvent être en composites ou métalliques.

L'assemblage est réalisé par collage



**Structure conciliant légèreté et rigidité**

### Les âmes

#### Deux grandes familles :

Sandwichs à âme pleine : utilisés dans les applications des composites à grande diffusion

Sandwichs à âme creuse : utilisés surtout en aéronautique

### Les âmes

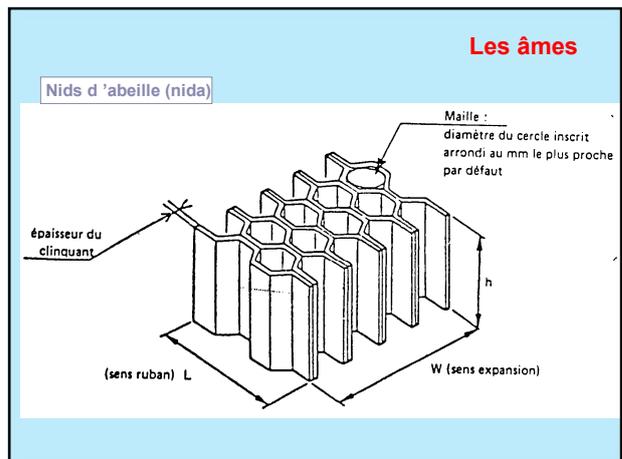
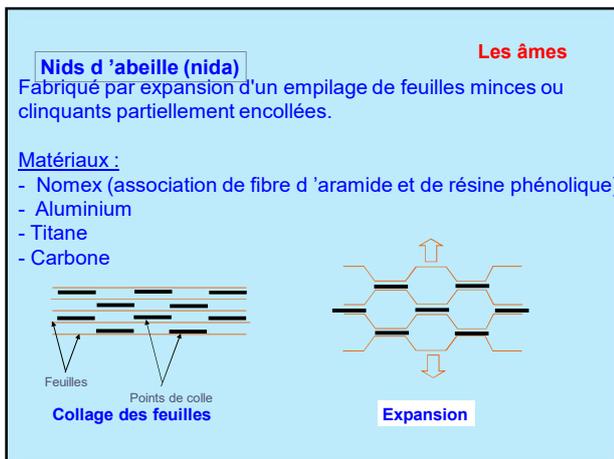
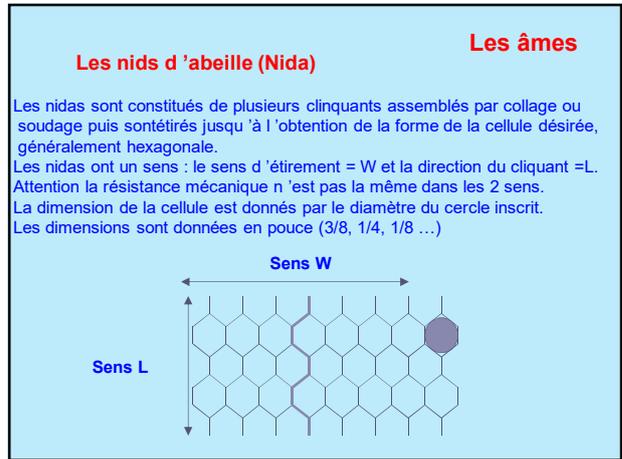
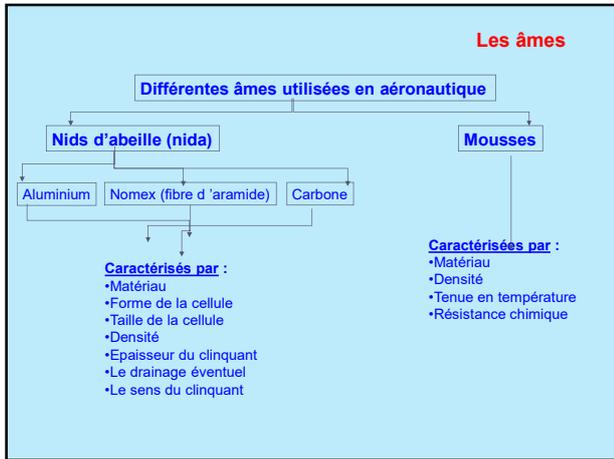
#### Les âmes pleines :

- le balsa ou bois cellulaire (fibres perpendiculaires à la surface)
- diverses mousses cellulaires (PSE, PUR)
- résines chargées de microsphères creuses de verre appelées mousses syntactiques

### Les âmes

#### Les âmes creuses : essentiellement nids d'abeilles et profilés

- métalliques en alliages légers (aluminium ou titane)
- du papier Kraft (enduit ou non de résine)
- du papier polyamide type papier Nomex
- polyester renforcé verre
- Époxy renforcé carbone



### Les peaux / L'assemblage

Pour les composites de moyennes et hautes performances, les peaux sont constituées de stratifiés à matrice thermodurcissables et d'un renfort fibreux.

Dans certains cas les peaux sont constituées de tôles métalliques.

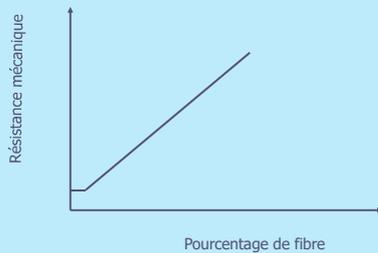
L'assemblage des peaux et des âmes est réalisé par collage :

- soit par film de colle (époxy)
- soit par imprégnation directe à la mise en œuvre

### Armatures et renforcements 2D où 3D



### Influence du renfort



### Ensimage



Les fibres destinées aux composites reçoivent un ensimage (dispersion aqueuse) qui assure plusieurs fonctions:

- protection du fil contre l'abrasion en fabrication (lubrifiant)
- liaison entre filaments (liant)
- -compatibilité verre - résine (agent d'accrochage)

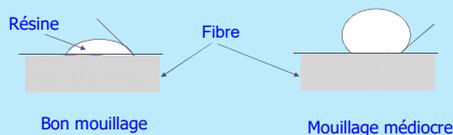
PR.A.HADDOUT

## Role de l'Ensimage

- Coller les filaments
- Lubrifier les filaments pour faciliter le tissage
- Augmenter la résistance à l'eau
- Eliminer les charges électrostatiques
- Améliorer l'adhérence à l'interface fibre résine, physico-chimique et mécanique

### Interface

Bien que nécessaire, un bon mouillage n'est parfois pas suffisant, on utilise alors des traitements de surface promoteurs d'adhésion



### Interface

#### Dépôt d'ensimage sur les filaments avant leur assemblage

Ensimage = solution aqueuse

Il assure plusieurs fonctions :

- la cohésion interfilamentaire
- la protection contre l'abrasion
- l'élimination des charges électrostatiques
- la facilité à l'imprégnation de la résine ou mouillabilité
- liaison fibre / matrice : création d'une interphase (pontage)

Sa composition :

- agent de couplage
- agent collant
- agents lubrifiants

## Interface

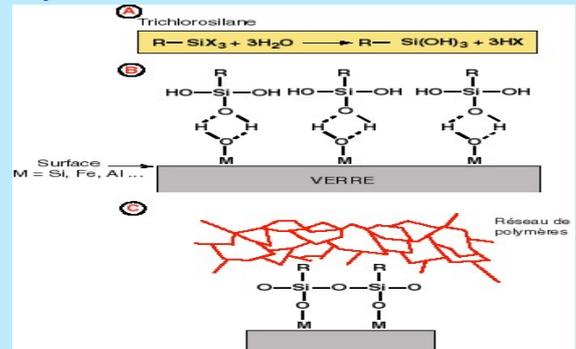
### Traitement de Surface

Les traitements de surface des fibres de carbone ont pour objectif de créer des sites actifs. Ils sont de 2 types :

- traitements oxydants : oxydation sèche, oxydation humide, oxydation par plasma froid
- traitements non oxydants : par création de cristaux SiC sur la fibre

### ❖ Composite à matrice polymère : formules

#### Exemple du trichlorosilane



## PROCEDES DE MISE EN FORME DE COMPOSITES THERMODURCISSABLES

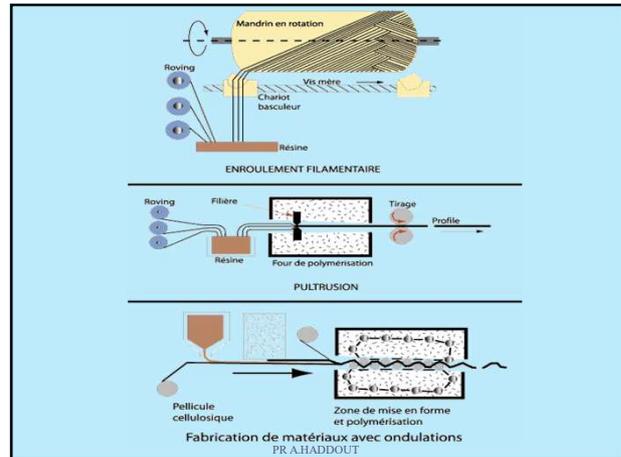
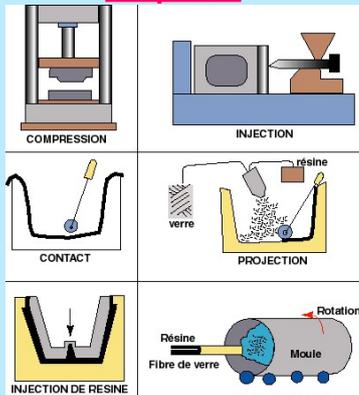
PR.A.HADDOUT

- **Pièces** ➔ moulage au contact  
compression  
injection
- **Tubes** ➔ enroulement  
filamentaire
- **Profils** ➔ pultrusion
- **Corps creux** ➔ enroulement  
filamentaire

**Objets / procédés**

PR.A.HADDOUT

## Procédés de mise en œuvre des composites



## Moulage au contact

### matériaux constitutifs :

Renfort : mat ou tissu de verre taux de renforcement=30% jusqu'à 40% maximum.

Matrice : polyester (résine catalysée et accélérée) essentiellement.

Maïs avec une résine époxyde, ce procédé permet de réaliser des outils très performants et de haute qualité.

Ce type de moulages des stratifiées est le plus ancien et le plus simple.

On utilise un moule soit positif (convexe), soit négatif (concave). Les moules négatifs ou femelles, sont utilisées pour obtenir un bel aspect extérieur (cas des coques de bateaux).

PR.A.HADDOUT

### Cycle de moulage avec des tissus secs

La réalisation d'une pièce exige un certain nombre d'opération :

- ✓ dépôt d'un agent de démoulage (cire) et lustrage ;
- ✓ dépôt du gel-coat et polymérisation (= 2 heures), jusqu'à coller légèrement aux doigts ;
- ✓ Préparation des armatures (mats, tissus,...), en prévoyant des recouvrements des différentes parties ;
- ✓ Enduction, avec de la résine catalysée, au pinceau ou au rouleau, du moule ;
- ✓ Application de la première couche d'armature et ébullage au rouleau ;

PR.A.HADDOUT

- ✓ Gélification de la première couche (pendant une demie heure) ;
- ✓ Application des couches suivantes en adoptant la même technique ;
- ✓ Des inserts peuvent être logées entre ces couches (armatures, tubes, vis, écrous, etc ...)
- ✓ Démoulage après séjour de huit heures à 25°C ;
- ✓ Polymérisation lente complète à l'air ambiant (trois semaines) ; elle peut être accélérée par étuvage à 80°C, 5 à 10 heures ;
- ✓ Ebarbage et finition (ponçage, peinture éventuellement

PR A.HADDOUT

## **Remarques :**

- Les premières couches du stratifié sont toujours constituées par de «s tissus légers (voile de surface, puis roving léger). Les rovings lourds forment les couches internes.
- Il ne faut pas trop charger de résine les angles, afin d'éviter un trop grand dégagement de chaleur de polymérisation qui peut être la cause de tensions et de fissures. Ces zones seront chargées de fils coupés ou de mats.
- La qualité de la main-d'œuvre conditionne la résistance de la pièce finale.

PR A.HADDOUT

## **Intérêt de procédé :**

- Facilité de mise en œuvre ;
- Investissements en matériel réduits, permettant des fabrications unitaires ou des petites séries,
- Bel aspect de surface côté gel-coat ;
- Possibilité de réaliser des structures de très grandes dimensions.

### **Limites :**

- coût main-d'œuvre élevé (cadence réduite et faible productivité) ;
- Prépondérance du facteur humain sur la qualité,
- Epaisseurs par uniformes et caractéristiques peu reproductibles,
- Nécessité d'ébarbage.
- Conditions de travail difficiles (dégagement de styrène, nécessité de ventilation),

PR A.HADDOUT

## **Applications :**

- Bacs pour l'industrie chimique et alimentaire.
- Cabines et carrosseries de camion et autocars.
- Bateaux de plaisance et de pêche.
- Pare-chocs, capotages de traceurs et de machines
- Piscines.

PR A.HADDOUT

- Transformation des stratifiés



Moulage  
au  
contact

Matières thermodurcissables



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



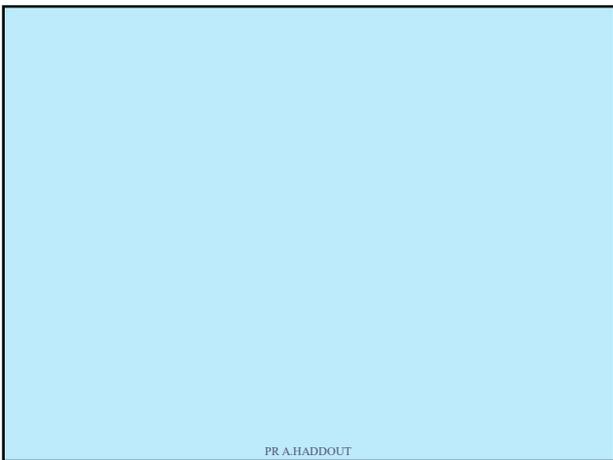
PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



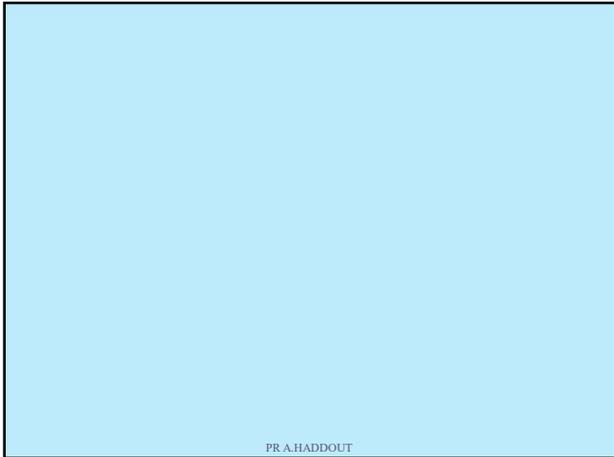
PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT

### Moulage par projection simultanée

- Le moulage par projection permet d'obtenir, à bas prix, de grandes séries de pièces .
- Malheureusement, l'emploi de tissu est exclu, et l'armature n'est constituée que d'un feutre de fibre coupées, de roving.
- En conséquence, les caractéristiques mécaniques obtenues sont très moyenne, analogues à celles obtenues à l'aide de mats.
- Fibres coupées et résine catalysée sont projetées simultanément à angle droit sur un moule, à l'aide d'un pistolet.
- Il faut ébuller au rouleau en tassant les fibres contre le moule.

PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT

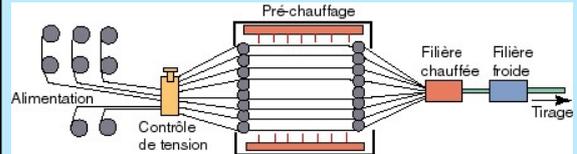


PR A.HADDOUT

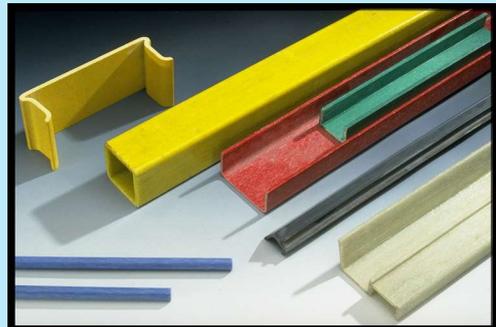


PR A.HADDOUT

## PULTRUSION

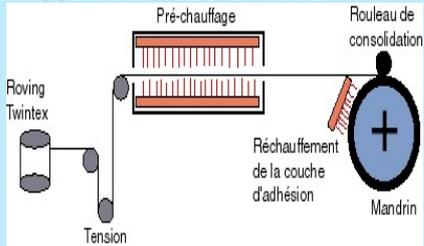


PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT

### ENROULEMENT FILAMENTAIRE

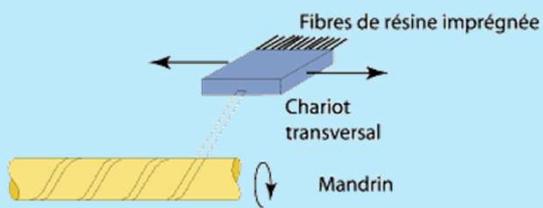


PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT

### MÉTHODE D'UN ENROULEMENT FILAMENTAIRE



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT

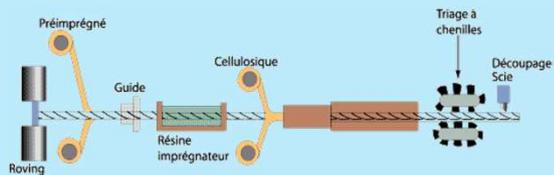


PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT

### MÉTHODE DE PULTRUSION



PR A.HADDOUT

### FABRICATION D'UN PANNEAU SANDWICH EN AUTOCLAVE

#### ✓ TYPES D'ÂMES "NIDS D'ABEILLES"

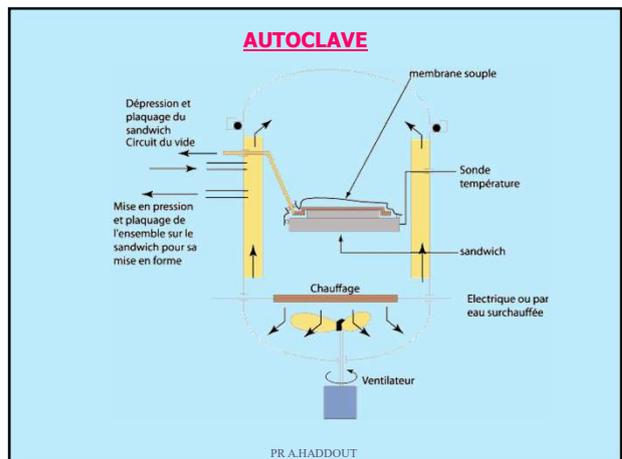
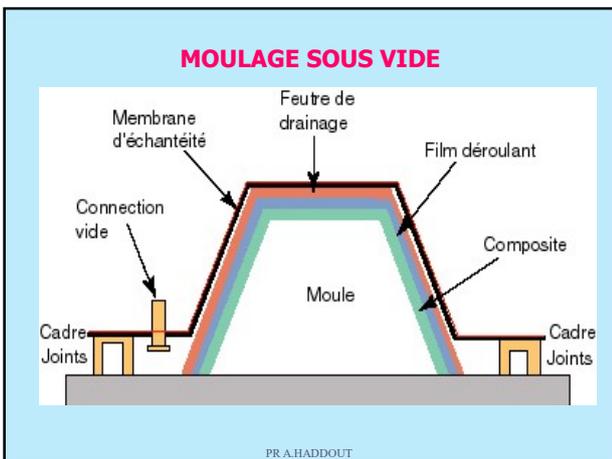
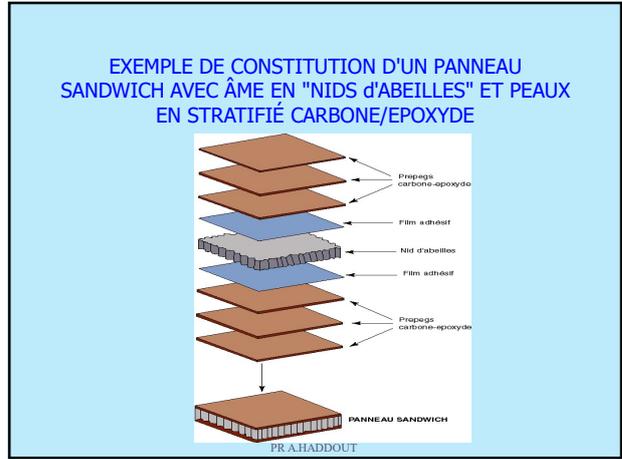
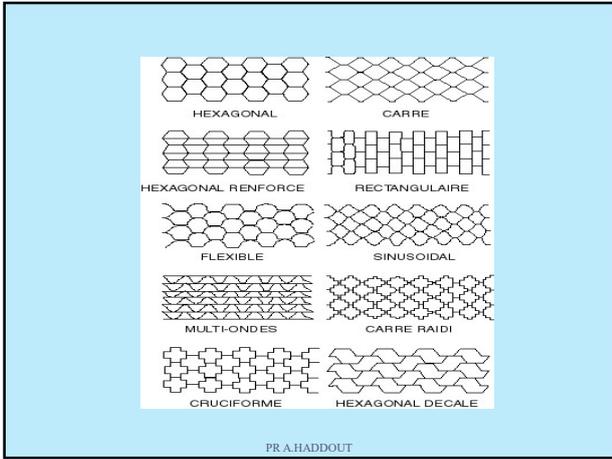
#### ✓ LES ÂMES PLEINES :

- Bois de balsa
- Contreplaqués
- Mousses rigides et souples

#### ✓ LES ÂMES "NIDS D'ABEILLES" : Le plus souvent à section hexagonale ou carrée organique ou métallique

- Organique : papier kraft imprégné de résine, papier nomex (aramide), polyester renforcé verre
- Métallique : alliages d'aluminium ou de titane

PR A.HADDOUT



## **R.T.M. : RESIN TRANSFER MOLDING**

- (MOULAGE DE MATÉRIAUX COMPOSITES PAR INJECTION)
- SIMULATION INJECTION:
- DONNÉES MATIÈRES :
  - Thermiques
    - Rhéocinétique
    - Caractéristiques du renfort perméabilité - cinétique

PR A.HADDOUT

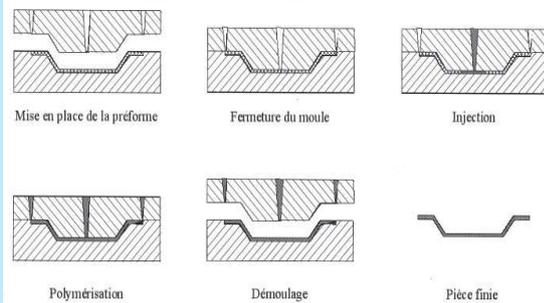
## **Moulage par Transfert de Résine (RTM) :**

- Le moulage par transfert de résine est un procédé à moule fermé employé pour la fabrication des pièces composites en résine thermodurcissables utilisant des moules mâle et femelle.
- Le renfort sous forme de mat ou de préforme est placé dans le moule.
- Celui-ci est formé à l'aide du système de fermeture choisi, la résine pré-catalysée est injectée sous pression à travers un ou plusieurs points d'injection et une fois que le temps de polymérisation est atteint la pièce est retirée du moule ébarbée et emmagasinée.

PR A.HADDOUT

## **PRINCIPE DU PROCÉDÉ RTM:**

principales étapes du procédé



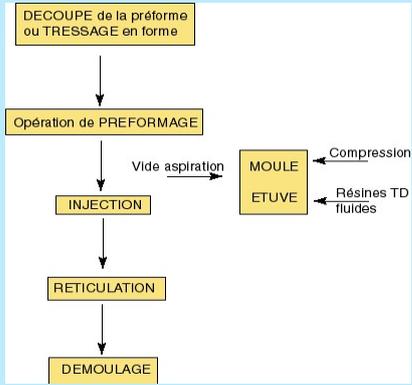
PR A.HADDOUT

## **Quelques paramètres de design**

- ✓ Avant de choisir le procédé RTM, pour une application donnée, il faut prendre en considération les caractéristiques suivantes :
- ✓ Généralement, la taille de la pièce ne dépasse pas 4m<sup>2</sup> de surface.
- ✓ L'épaisseur recommandée est entre 2mm et 15.
- ✓ L'angle de démoulage entre 3° et 5°.
- ✓ La pression que le moule doit supporter varie selon la surface ( grandeur de la pièce ) et les pressions d'injections ( varie de 10 à 80 psi ).
- ✓ Le cycle de moulage est de 20 à 40 min.
- ✓ Type de renforts : mats à fils continus.
- ✓ Durée de vie d'un moule laminé est de 500 à 1500 pièces ; et d'un moule de résine de coulée hautement chargés est de 3000 à 5000 pièces.

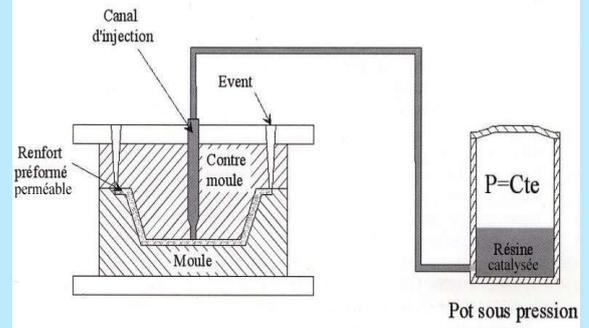
PR A.HADDOUT

### Étapes du cycle de moulage



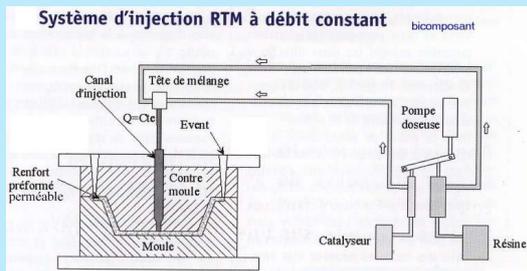
PR A.HADDOUT

### Système d'injection RTM à pression constante



PR A.HADDOUT

### Système d'injection RTM à débit constant



PR A.HADDOUT

Viscosité :  $\eta(\gamma, T, \alpha) = \eta_0(\gamma, T) \cdot g(\alpha)$

$\alpha$  = taux de réticulation (0 à 1)

$\gamma$  = taux de cisaillement (s-1)

- Le premier terme  $\eta_0$  traduit la viscosité initiale de la résine (avant réticulation) → MODÈLE DE CROSS
- Le second terme  $g(\alpha)$  dépend du degré d'avancement de la réaction de réticulation → MODÈLE DE CASTRO

PR A.HADDOUT

## LOI DE DARCY

ÉCOULEMENT DE LA RÉSINE EN MILIEU RENFORÇÉ

Cas unidirectionnel :

$$K\chi = Q \cdot \eta / (A \cdot (\Delta P / L))$$

$K\chi$  = perméabilité (m<sup>2</sup> ou Darcy)

Q = débit volumique (m<sup>3</sup> / s)

A = aire de la section du flux (m<sup>2</sup>)

$\eta$  = viscosité du polymère (Pa.s)

$\Delta P / L$  = perte de charge par unité de longueur (Pa/m)

PR A.HADDOUT

## Avantages du procédé RTM :

- ✓ Les principaux avantages du procédé RTM peuvent être résumés comme :
- ✓ La capacité de fabriquer rapidement des pièces de haute performance, de grandes dimensions et de formes complexes.
- ✓ L'injection basse pression est un procédé de moulage à moule fermé. Il présente des avantages par rapport aux autres procédés à moule ouvert, incluant le faible taux d'émission de styrène (1%), le fini de surface (côtés intérieur et de la pièce, la possibilité
- ✓ de contrôler l'épaisseur de la pièce. L'outillage utilisé pour le procédé RTM généralement
- ✓ moins onéreux que celui employé dans les autres procédés à moule fermé.
- ✓ L'utilisation des noyaux, nervures ou bosses, rend possibles la production des pièces en trois dimensions.
- ✓ L'utilisation de renfort et de la résine est bien contrôlée, ce qui réduit beaucoup les pertes de matière première.
- ✓ La pièce moulée nécessite un ébarbage minimum, et le procédé ne requiert pas un personnel spécialisé.
- ✓ Les deux faces de la pièces sont contrôlées par le fini du moule.

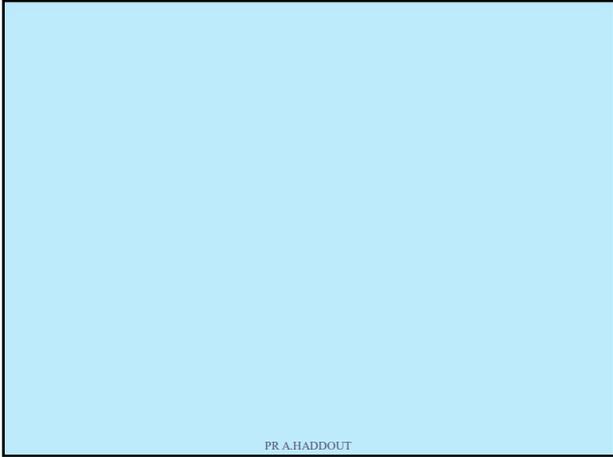
PR A.HADDOUT

## Limite de procédé RTM

- ✓ La majorité des limitation du RTM proviennent du fait que les versions du procédé, utilisées pour des productions à grandes vitesses, ne sont pas complètement développées.
- ✓ Pendant que les résines utilisées continuent d'être améliorées, il y a encore des problèmes lorsqu'il s'agit du remplissage de grandes pièces, avec des hautes pourcentages de verre, quand des faibles pressions d'injection sont souvent utilisées pour palier à ce genre de problèmes, ne seront pas la solution dans ce cas, car leur fabrication, pour des composantes de volume, présente actuellement des limitations.
- ✓ Lorsqu'on insère des partie (nervures, bosses ) dans la pièce il sera difficile de garder les renforts bien en place dans les coins et d'empêcher des zones riches en résine.
- ✓ Cette situation peut causer certaines restrictions lorsque des inserts sont prévus dans le
- ✓ design des pièces.
- ✓ La cadence de production est limitée. Un maximum de 10 pièces par heure, sur un moule, sont obtenues à ce jour, en utilisant le procédé à haute vitesse.

PR A.HADDOUT

PR A.HADDOUT

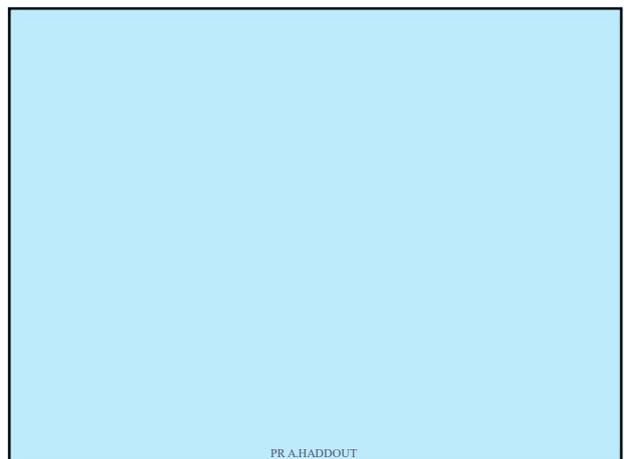
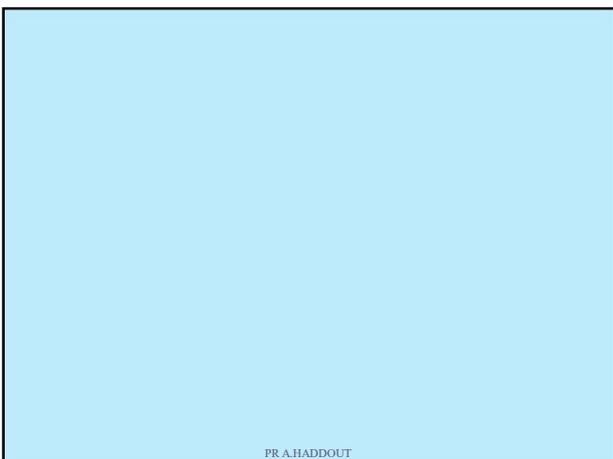


**LOI CINÉTIQUE**  
MODÈLE DE KAMAL et RYAN

$$d\alpha / dt = (K1 + K2 \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n$$

K1 et K2 : constantes de réticulation (s-1)  
m et n : nombres sans dimension / m + n = ordre de la réaction

PR.A.HADDOUT



## Mise en forme des composites thermoplastiques

PR.A.HADDOUT

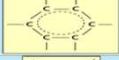
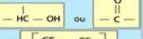
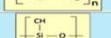
## THERMOPLASTIQUES

- Dégazage (moins de volatiles)
- Variations thermiques (moindres)
- Variations de pression (moindres)
- Durée de cycle (plus courte)
- Cycle de post-cuisson (inutile)
- Réparables (par refusion)
- Remise en forme (par refusion)

## LES POLYMÈRES ET COMPOSITES THERMOSTABLES

- La stabilité thermique d'un polymère est liée à la fois au temps et à la température
- Un polymère est thermostable s'il conserve ses propriétés mécaniques :
  - quelques minutes à 600°C
  - quelques heures à 400°C
  - plus de 1000 heures à 300°C
  - plus de 30 000 heures à 220°C
- les liaisons chimiques entre atomes présentent le maximum de résistance non seulement à l'oxydation mais aussi à la pyrolyse.
- Energie de dissociation de la liaison chimique

## ÉNERGIE DE DISSOCIATION DE DIFFÉRENTES LIAISONS CHIMIQUES

LIAISON	TYPE DE LIAISON	ÉNERGIE (kJ)	TYPE DE COMPOSÉ
C - C	aliphatique	330 - 350	
→ C - C	aromatique	500	
C - C	oléfinique	520	
→ C - H	aliphatique	390 - 426	
C - H	aromatique	426	
C - O	divers	360	
C - F	téflon	447	
Si - O	silicones	443	

**PRINCIPAUX DOMAINES D'APPLICATIONS :**

- l'aéronautique (voir le PEEK) et les transports
- l'électronique (circuits intégrés, assemblage ...)
- l'électrotechnique (enrobage du fil de cuivre utilisé pour les moteurs)
- l'armement

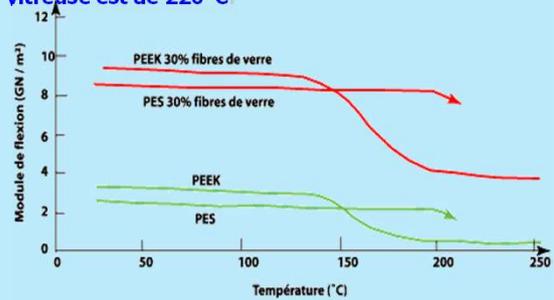
**PROPRIÉTÉS PHYSIQUES**

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	PEEK	PEEK	PEEK
RENFORT		30% FV	30% FC
COULEUR	gris	gris	noir
DENSITÉ	1,32	1,49	1,44
RETRAIT AU MOULAGE %	1,1	0,5	0,4
Tf(°C)	334	334	334
Tg(°C)	143	143	143
HDT (1,82 MPa)	140	315	315

**PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES :**

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	PEEK	PEEK 30% FV	PEEK 30% FC
R rupture (MPa) à 23°C	92	157	208
R rupture (MPa) à 250°C	12	34	43
A rupture %	49	4	3
E flexion (MPa) à 23°C	3660	10300	13000
E flexion (MPa) à 250°C	300	2300	3600
Tenue au choc YZOD (entaille) J/m²	83	96	85

- Evolution du module de flexion en fonction de la température : comparaison avec le polythérsulfone (PES), polymère thermoplastique amorphe dont la température de transition vitreuse est de 220°C



## INTERFACE RENFORT / MATRICE

### Interface

L'interface a un rôle primordial sur l'ensemble des propriétés du matériau composite :

- sur les propriétés mécaniques
- le vieillissement
- Le comportement thermique
- la résistance à la corrosion, à l'humidité ...

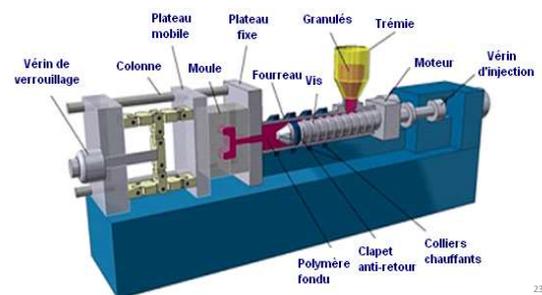
Pour qu'il y ait une bonne adhésion entre le renfort et la résine, il faut qu'il y ait une bonne mouillabilité.

## PRESSE D'INJECTION

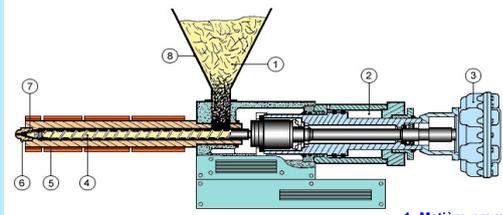


## Procédé de transformation: Moulage

Composition d'une presse d'injection



Le procédé d'injection permet de fabriquer des pièces de géométrie complexe en une seule opération.

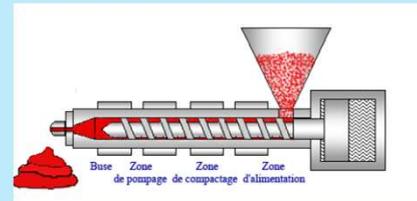


- 1- Matière première
- 2- Vérin d'injection
- 3- Moteur de plastification
- 4- Vis sans fin
- 5- Éléments chauffants
- 6- Buse d'injection
- 7- Clapet
- 8- Trémie

### Etude de la distribution des longueurs des fibres dans l'ensemble vis-fourreau

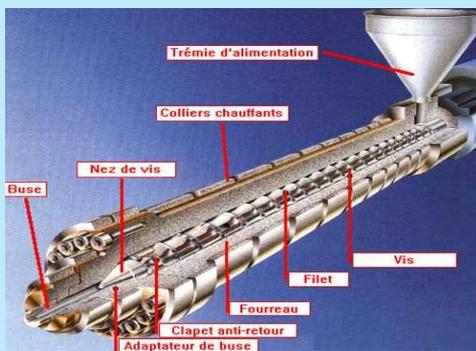
Techniques de mesures

Méthode 1 : Mode purge

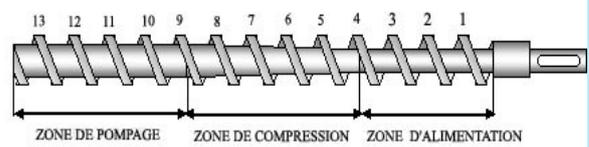


234

### Unité d'injection



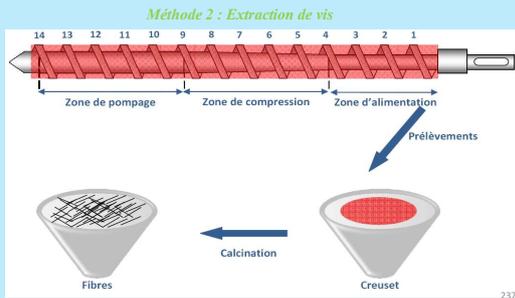
### Evolution de la longueur des fibres le long de la vis



- Réduction de la longueur au niveau de la zone de compression
- Taux de casse le plus élevé au niveau des filets 6 et 7
- Évolution du taux de casse en fonction de la vitesse de rotation vis

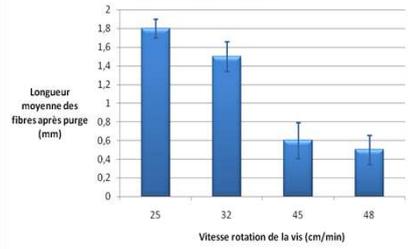
## Etude de la distribution des longueurs des fibres dans l'ensemble vis-fourreau

### Techniques de mesures

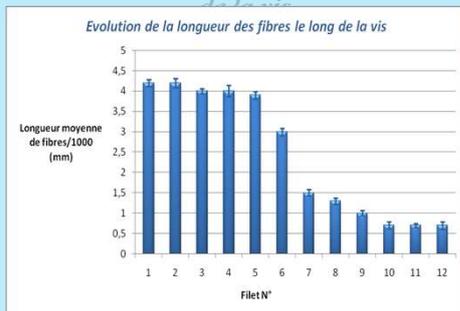


## Evolution de la longueur des fibres en fonction de la vitesse d'injection

Evolution de la longueur des fibres en fonction de la vitesse d'injection



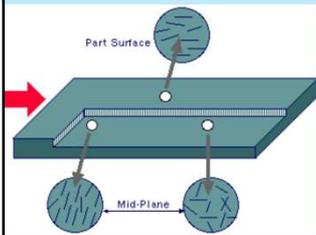
## Distribution de la longueur des fibres le long de la vis



Étude de l'orientation des fibres dans des pièces injectées

## Les matières renforcées fibres courtes

### Orientation des fibres



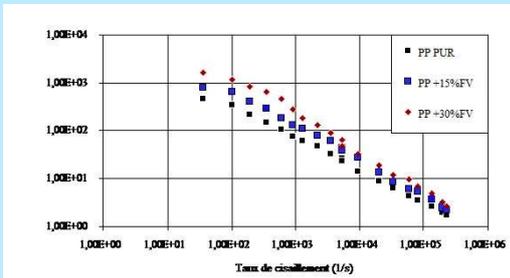
Paramètres influents  
- vitesse d'injection  
- position du point d'injection

L'orientation des fibres se fait dans le sens de l'écoulement de matière.

## Principaux paramètres influençant l'orientation des fibres

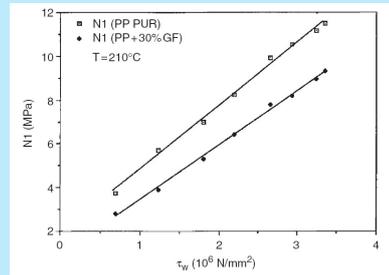
- Influence du seuil
- Influence de la vitesse d'injection
- Influence de l'épaisseur de la pièce
- Influence de la température du moule
- Influence de la viscosité de la matière
- Influence de la concentration de fibres

## Évolution de la viscosité Des composites PP/FV en fonction du taux de cisaillement



243

## Influence du taux de cisaillement et du taux



Evolution de la première différence des contraintes normales en fonction de la contrainte de cisaillement à la paroi

244

### Paramètres d'injection

Paramètre	Valeur
Température d'injection	240° C
Température de régulation du moule	60° C
Pression d'injection	60Mpa
Pression de maintien	55Mpa
Temps de maintien	8 s
Vitesse de rotation de la vis	156 tours/min
Vitesse d'injection	20-85 (mm/s)

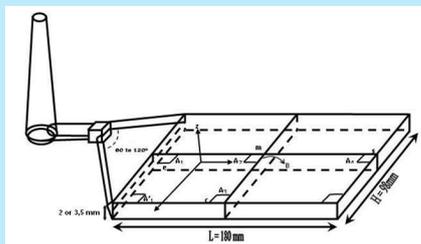
### Les techniques d'observation de l'orientation des fibres dans les pièces injectées

- La microscopie optique en réflexion
- La microscopie électronique à balayage
- La microscopie en transmission
- La microscopie acoustique
- La microradiographie de contact
- L'imagerie par tomographie X

246

### Etude de la distribution et de l'orientation des fibres dans les pièces injectées

#### Géométrie d'étude

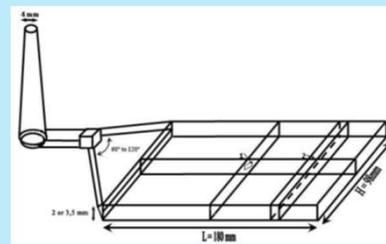


Ai : Zones d'observation microscopique

247

### Etude de la distribution et de l'orientation des fibres dans les pièces injectées

#### Géométrie d'étude



1, 2 : Zones d'observation microscopique

248

### Préparation de l'échantillon

Enrobage de l'échantillon dans la résine autopolymérisante

Usure de l'échantillon au papier abrasif

Polissage à l'alumine pendant 5 minutes

Rinçage à l'eau courante

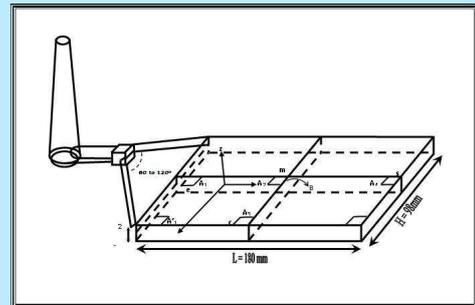
Attaque chimique de l'échantillon poli

Rinçage

Séchage à l'air comprimé

Imprégnation de la surface à observer avec une encre

### Les zones d'observation microscopique



### Etude de la distribution et de l'orientation des fibres dans les pièces injectées

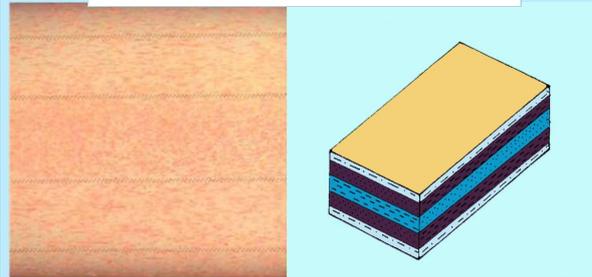
Géométrie d'étude



251

### Analyse qualitative de l'orientation des fibres

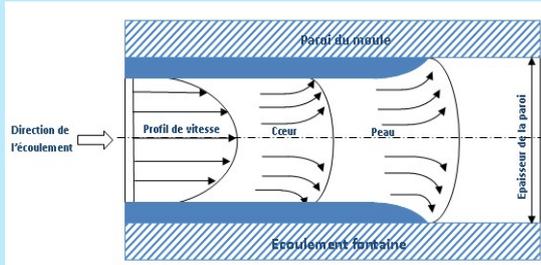
Observation l'orientation des fibres dans l'épaisseur de la pièce



252

## Analyse qualitative de l'orientation des

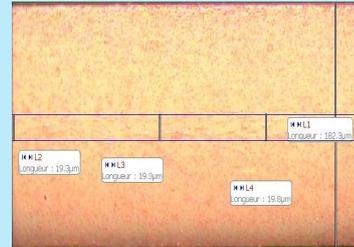
### Effet fontaine



253

## Analyse quantitative de l'orientation des

### Mesure de l'épaisseur de la couche à coeur



254

## Analyse quantitative de l'orientation des fibres dans les pièces injectées

### Mesure de l'épaisseur de la couche à coeur

#### Incidence de la géométrie de l'empreinte

Essai N°	Épaisseur (mm)	Épaisseur (%)
1	2	10,68
2	3,5	13,28

255

## Analyse quantitative de l'orientation des

### Mesure de l'épaisseur de la couche à coeur

#### Incidence des paramètres d'injection

#### Influence de la température moule

Essai N°	T moule (°C)	Épaisseur (%)
1	60	14,88
2	120	13,28

256

## Analyse quantitative de l'orientation des fibres

Mesure de l'épaisseur de la couche à coeur

### Incidence des paramètres d'injection

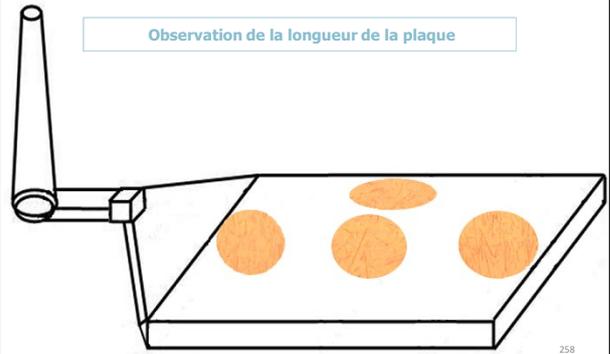
#### Influence de la vitesse d'injection

Essai N°	Vitesse (mm/s)	Epaisseur (%)
1	20	15,8
2	40	19,5
3	70	26,3

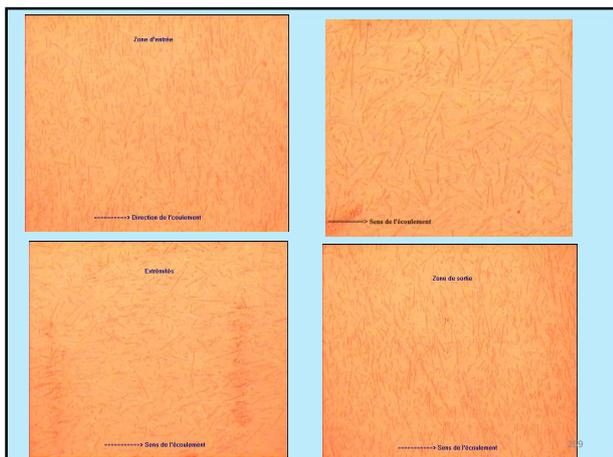
257

## Analyse qualitative de l'orientation des fibres

Observation de la longueur de la plaque



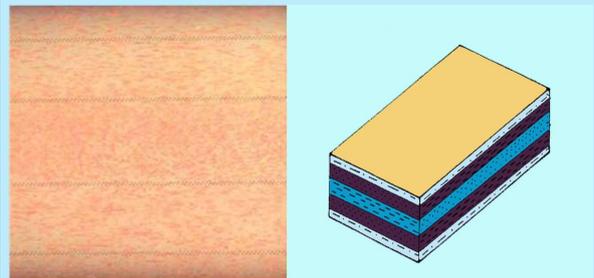
258



259

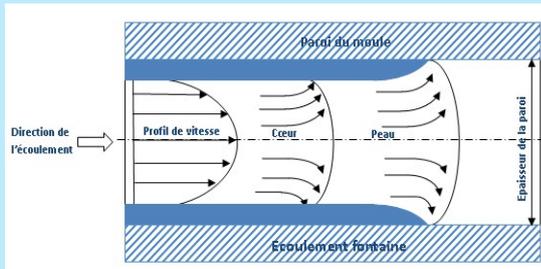
## Analyse qualitative de l'orientation des fibres

Observation l'orientation des fibres dans l'épaisseur de la pièce



260

### Analyse qualitative de l'effet fontaine des fibres



261

### Synthèse

Nous avons réalisé une étude expérimentale de l'orientation des fibres en fonction des conditions d'injection, de la composition du polymère et de la géométrie de la pièce.

L'observation des pièces injectées a montré l'influence des paramètres de transformation et de la géométrie de l'écoulement sur l'orientation des fibres, ce qui explique en partie la variation des propriétés mécaniques avec la direction de sollicitation.

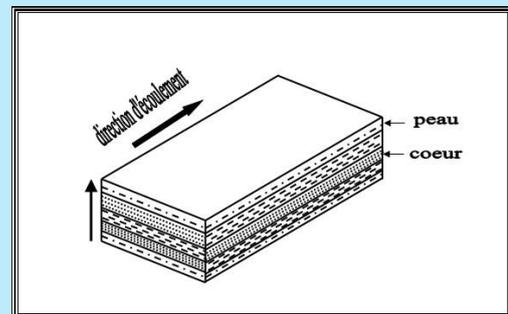
L'analyse qualitative de l'orientation des fibres permet de définir une approche globale de l'orientation des fibres en différents emplacements de la plaque.

262

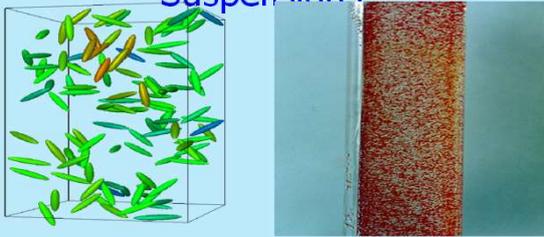
### Observation globale de l'orientation des fibres



### La section transversale de la plaque

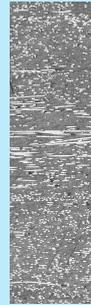


## Suspensions



Effect of particles on viscosity?

## Flow simulation of fiber-filled materials

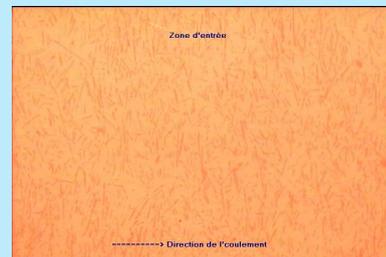


## Évolution de l'épaisseur à cœur en fonction de la vitesse d'injection

Essai N°	Vitesse (mm/s)	Épaisseur (‰)
1	20	15,8
2	40	19,5
3	70	26,3

## Etude qualitative des orientations des fibres

Micrographie: Zone d'entrée



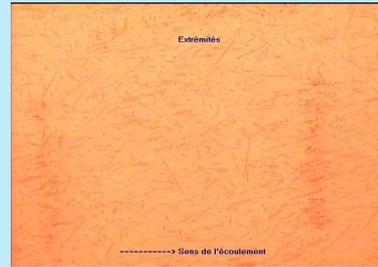
*Etude qualitative des orientation des fibres*

**Micrographie: Zone médiane**



*Etude qualitative des orientation des fibres*

**Micrographie: Extrémités**



*Etude qualitative des orientation des fibres*

**Récapitulation**

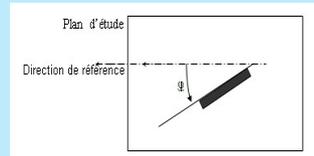
- La densité des fibres est beaucoup plus importante en position d'entrée et de sortie que dans les autres régions de la plaque injectée.
- Pour une coupe faite dans le plan (y,z) de la plaque, la densité des fibres est plus importantes à cœur que dans les autres régions.

*Etude quantitative des fibres*

**Fonction d'orientation dans le cas d'une orientation plane**

$$f = (2 \langle \cos^2 \Phi \rangle - 1) / 2 \quad \text{avec} \quad \langle \cos^2 \Phi \rangle = \frac{\sum N_i \cos^2 \Phi_i}{\sum N_i}$$

Ni représente le nombre de fibres faisant un angle  $\Phi_i$  avec une direction de référence



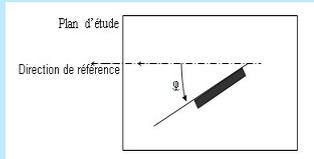
Représentation de l'orientation d'une fibre par rapport à une direction de référence

### Etude quantitative des fibres

#### Fonction d'orientation dans le cas d'une orientation plane

$$f = (2 \langle \cos^2 \phi \rangle - 1) / 2 \quad \text{avec} \quad \langle \cos^2 \phi \rangle = \frac{\sum N_i \cos^2 \phi_i}{\sum N_i}$$

Ni représente le nombre de fibres faisant un angle  $\phi_i$  avec une direction de référence



Représentation de l'orientation d'une fibre par rapport à une direction de référence

### Etude quantitative des fibres

#### Fonction d'orientation dans le cas d'une orientation plane

La fonction d'orientation est représentative d'une observation dans un plan.

Elle possède les propriétés suivantes :

- si toutes les fibres sont alignées dans la direction de l'écoulement:  
 $f(\phi) = +0,5$
- si toutes les fibres sont perpendiculaires à la direction de l'écoulement:  
 $f(\phi) = -0,5$
- si les fibres sont orientées au hasard dans le plan:  
 $f(\phi) = 0$ .

### Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues

Définition :

On appelle TPA à fibres longues tout thermoplastique renforcé d'un renfort fibreux dont la longueur de la fibre est supérieure ou égale à 1 mm.

### Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues

#### Avantages et inconvénients des TPA par rapport aux TDA :

La mise en œuvre apporte :

- Une automatisation proche de celle des TP
- De l'hygiène et de la propreté assurées ( produits volatils)
- Des cycles de moulage courts ( tps refroid. < tps polymérisation)
- Une excellente résistance au choc est apportée par la ductilité du TP
- Formes complexes plus faciles à réaliser

*Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues*

**Avantages et inconvénients des TPA par rapport aux TDA :**

Par contre :

- La viscosité du TP étant élevée, l'imprégnation est difficile :
- La tenue en température est plus faible.

*Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues*

**Les apports des fibres longues par rapport aux fibres courtes**

- Amélioration de la rigidité et de la résistance aux chocs
- Maintien d'une bonne résistance aux chocs à basses températures (-60°C)
- Meilleure rigidité aux températures élevées (110°/120°C)

*Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues*

**Les apports des fibres longues par rapport aux fibres courtes**

- Mode de rupture plus sûr
- Plus grande stabilité dimensionnelle (moins de distorsion)
- Amélioration de la résistance au fluage et à la fatigue particulièrement à température élevée (>100°C)
- Retassures minimisées

*Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues*

Les améliorations apportées sont liées à la qualité du renfort fibreux et en particulier à :

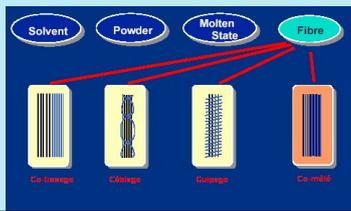
- leur rapport longueur / diamètre
- leur interface avec la résine
- leur orientation

*Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues*

**Les différentes familles**

Les produits dits « souples »

- \* Les tissus mixtes (renfort fibreux + fibre TP)
- \* Les mèches guipées ou cablées
- \* Les mèches comélangées ou comêlées [TWINTEX](#)



*Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues*

**Les différentes familles**

Les produits dits « rigides »

- \* Les plaques TRE ou GMT (réseaux fibreux continu ou non, imprégnés de TP fondu)
- \* Les granulés fibres longues: filaments continus imprégnés de 40 à 70% de TP fondu et coupés à des longueurs variables à 12 ou 25 mm de longueur
- \* Les joncs continus consolidés : mèches de fils continus imprégnées de TP fondu.
- \* Les superconcentrés : fils continus gainés par 20 à 30% de TP fondu et coupés à 12 ou 25 mm de longueur.

*Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues*



Cassette de portière JAGUAR en TWINTEX moulée sous vide



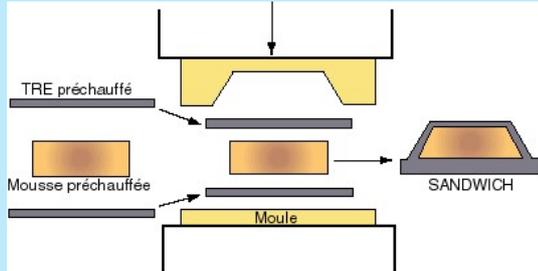
Support de ventilateurs moulé en SMC pour la peugeot 405

*Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues*



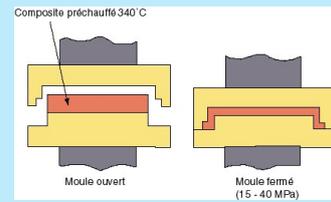
Support de ventilateurs en TWINTEX moulé par extrusion compression  
40% FV 25 mm PP grade 70

## SANDWICH



PR A.HADDOUT

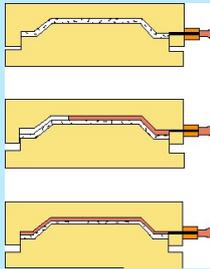
## PPS COMPOSITES (POLYSULFURE DE PHÉNYLÈNE)



IMC : IN MOLDING COATING

PR A.HADDOUT

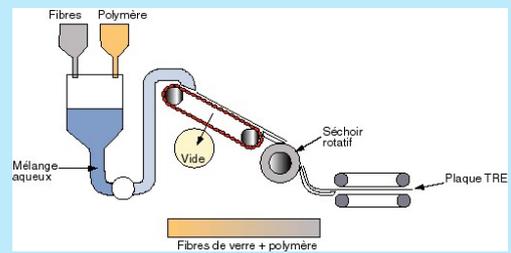
SYSTÈME IMC SOUS FORME LIQUIDE (permet d'obtenir un excellent aspect de surface)



PR A.HADDOUT

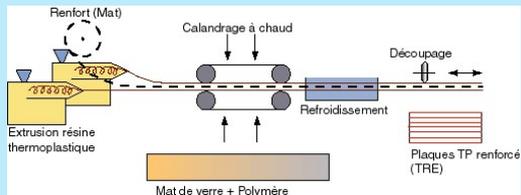
## FABRICATION DES PLAQUES PAR VOIE HUMIDE

### TRE



PR A.HADDOUT

## FABRICATION DES PLAQUES PAR VOIE SÈCHE



PR A.HADDOUT

## MOULAGE DES TRE

### ❖ MOULAGE AVEC FLUAGE DE MATIÈRE :

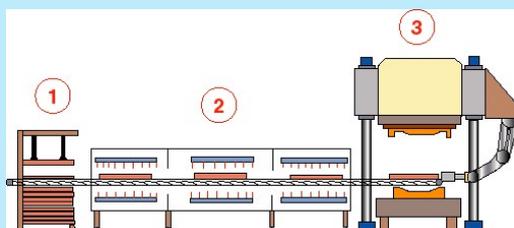
$P = 10 - 20 \text{ MPa}$ , association de plusieurs flans (variations d'épaisseur - nervures...)

### ❖ MOULAGE PAR ESTAMPAGE DIRECT :

$P = 6 \text{ à } 8 \text{ MPa}$ , découpe de surface équivalente (grandeur des dimensions - faible épaisseur...)

PR A.HADDOUT

## SCHEMA DE MISE EN OEUVRE DES TRE



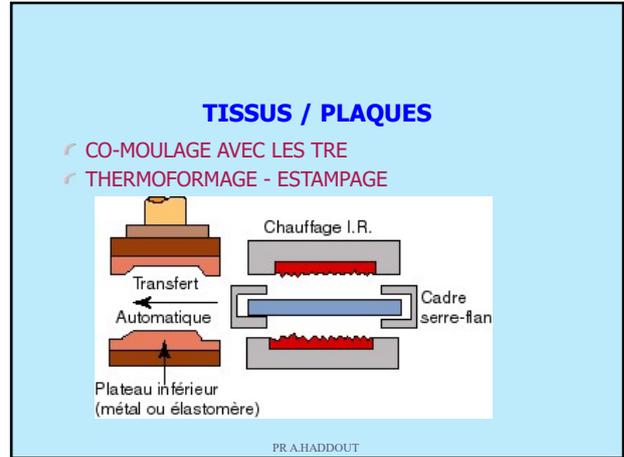
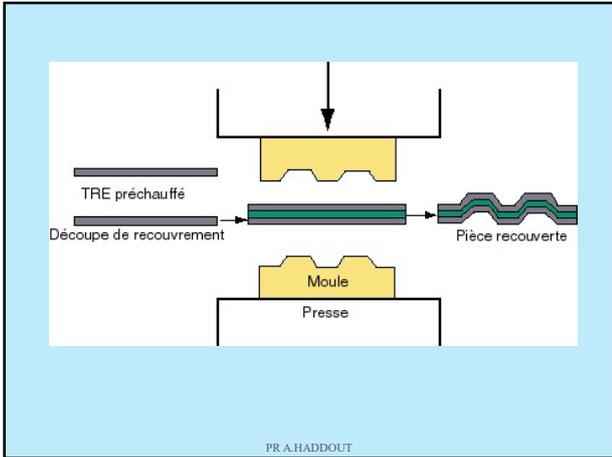
- > LES DÉCOUPES SONT DÉPOSÉES SUR LA BANDE TRANSPORTEUSE
- > PRÉCHAUFFAGE PAR PANNEAUX RADIANTS
- > MOULAGE

PR A.HADDOUT

TRE PP + mat de verre, CARACTÉRISTIQUES	MOULAGE		
	AVEC FLUAGE		ESTAMPAGE PUR
% de verre	30	35	30
Densité	1,12	1,17	1,12
$\lambda \text{ LIN } 10^{-6}$	35	30	35
$\sigma \text{ (MPa)}$	50	60	60
A %	2	2	1,8
E (MPa)	4200	4500	4400

temps de cycle < temps de cycle d'injection

PR A.HADDOUT



### APPLICATIONS DES TRE DANS L'INDUSTRIE

#### AUTOMOBILE LES PREMIÈRES ANNÉES

CARÉNAGES SOUS MOTEURS	STRUCTURES DE SIÈGES	SUPPORTS DE BATTERIES	DIVERS
AUDI	1		1
BMW	3	1	2
DAIMLER BENZ	3	2	4
OPEL	3		1
PEUGEOT			2
PORSCHE	1		
ROVER	1	1	
VOLVO	2	1	1
DIVERS			6

Aujourd'hui, nombreuses pièces (limite : aspect de surface)

PR A.HADDOUT

### DRAPAGE

DONNÉES TECHNIQUES	DRAPAGE AVEC CUISSON A L'AUTOCLAVE
MANUEL OU AUTOMATISÉ	Manuel
Série / CADENCE	Petites et moyennes séries
PARAMÈTRES DE TRANSFORMATION	Température à 350°C Pression de 3 à 7 MPa / Autoclave cycles des pressions et de températures
% DE RENFORT / Résine usuel	75 % renfort - 25% de résine
TYPE DE RENFORT	Tissus de verre, aramide, carbone, bore
Polymères LES PLUS UTILISÉS	Polyépoxydes, polyesters, phénoliques, polyimides
APPLICATIONS	Composites hautes performances / aéronautique
MOULE	Outillages en acier ou alliages
TYPES DE PIÈCES caractéristiques	Fuselages et carénages d'avions, tuyères d'hélicoptères...

PR A.HADDOUT

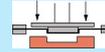
### PROCÉDÉ DE MOULAGE

- Il allie les performances des composites tissés avec les cadences des thermoplastiques. C'est une plaque thermoplastique plane, à renfort tissu, chauffée, qui va épouser les formes d'un moule, en compression entre moule et contremoule.
- Ce concept se rapproche du thermoformage avec poinçon et matrice.
- EXEMPLE D'APPLICATION : Casque de pompier
  - avec d'excellentes caractéristiques à température élevée
  - avec un gain de poids de - 60% par rapport aux matériaux habituels
  - avec une optimisation des temps de moulage (un casque toutes les 42 s)

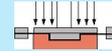
PR A.HADDOUT

### DETAIL DU PROCEDE

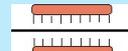
- ✓ Préchauffage de la plaque Twintex : chauffage par IR, contact ou air chaud au-delà de la température de fusion de la matrice



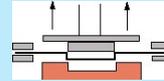
- ✓ Formage de la plaque : mise en forme par fermeture du poinçon



- ✓ Consolidation sous pression et refroidissement



- ✓ Démoulage : pièce froide consolidée



PR A.HADDOUT

### EXEMPLE DE TWINTEX

		Twintex PP équilibré	TRE/PP	Twintex PET équilibré	SMC
TRACTION	Contrainte (MPa)	350	95	440	160
TRACTION	Module (MPa)	15	6	25	14
FLEXION	Contrainte (MPa)	280	150	600	300
FLEXION	Module (MPa)	13	6	23	15
CHOC CHARPY	Sans entaille (kJ/m²)	220	80	300	115
CHOC IZOD	Entaillé (kJ/m²)	220	70		100
Taux de verre en poids	%	60	40	65	45
Taux de verre en volume	%	35	20	50	35

PR A.HADDOUT

### MATÉRIAUX PLASTIQUES / MATÉRIAUX COMPOSITES / TWINTEX

#### MATÉRIAUX PLASTIQUES :

- Facilité de mise en oeuvre
- Faible masse
- Résistance à l'environnement

#### Mais

- Limitation des propriétés mécaniques

PR A.HADDOUT

## LE PROCÉDÉ DE CO-MÊLAGE TWINTEX

- ❏ Pièces structurelles (exemples : plancher, poutre, traverse)
- ❏ COMPRESSION
- ❏ THERMOFORMAGE -ESTAMPAGE

PR.A.HADDOUT

## LES STRUCTURES SANDWICH NID D'ABEILLE OU MOUSSE / PP

		Twintex PP équilibré	Twintex UD PET	Twintex PET équilibré
TRACTION	Contrainte (MPa)	800	870	440
TRACTION	Module (GPa)	38	38	25
FLEXION	Contrainte (MPa)	600	1000	600
FLEXION	Module (GPa)	32	37	23
taux de verre en volume	%	50	50	50

PR.A.HADDOUT