

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 A.HADDOUT

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

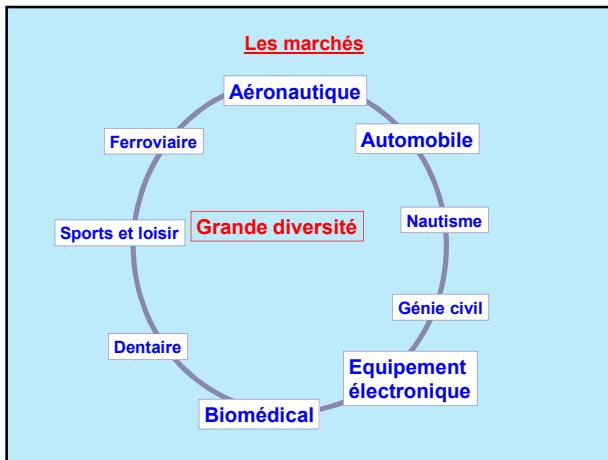
Propriétés mécanique optimisées

Légèreté

Résistance à la fatigue

Tenue à la corrosion

→ Remplacement des matériaux traditionnels



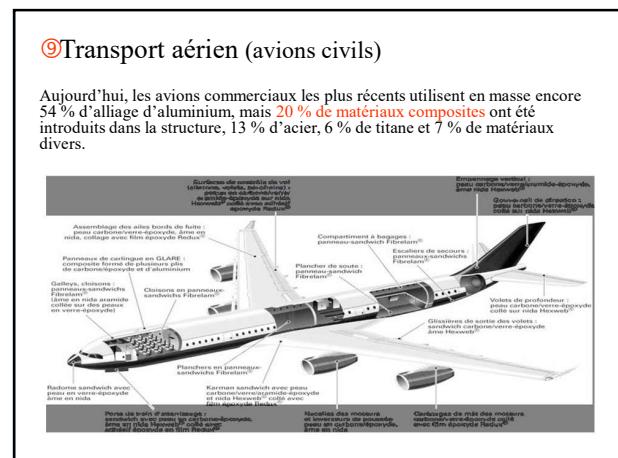
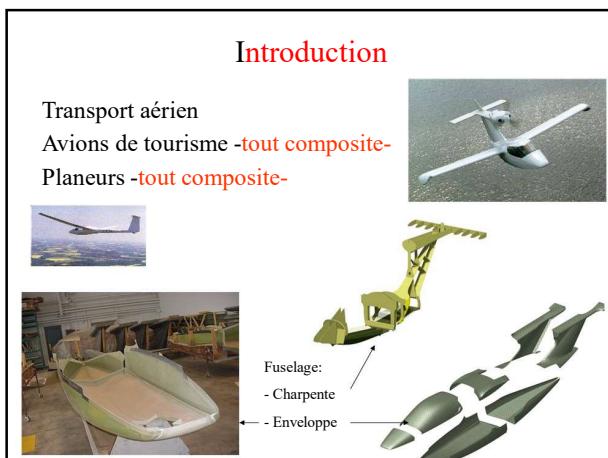
Introduction

Fonctions spécifiques de chaque secteur d'applications

Principales fonctions apportées par les composites aux applications

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

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

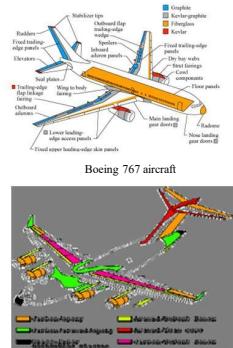


Introduction

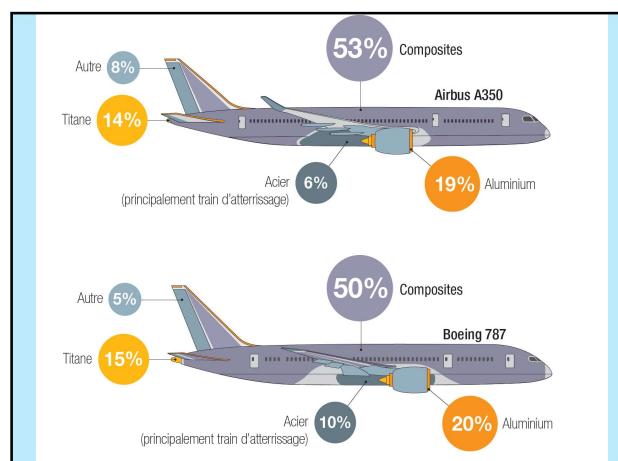
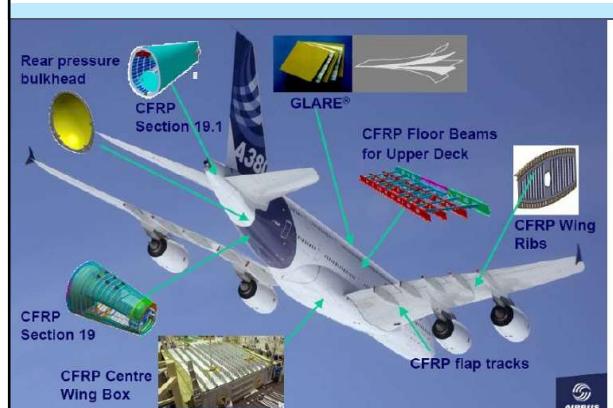
Transport aérien

Augmentation de la performance et diminution des coûts

- ⑤ Gain de masse :
 - économie de carburant
 - accroissement de la charge utile
- ⑥ Bonne tenue à la fatigue
 - durée de vie augmentée
- ⑦ Absence de corrosion
 - moins d'inspection
 - économie de la maintenance



Applications

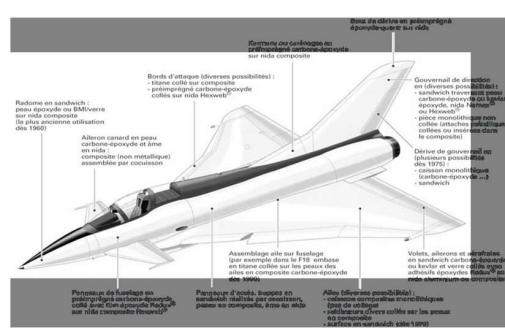




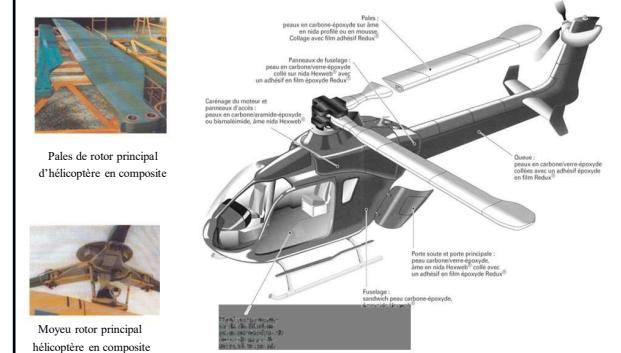
Avions militaires

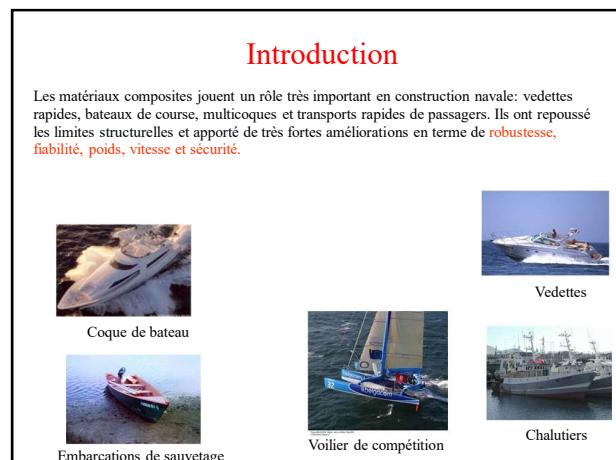
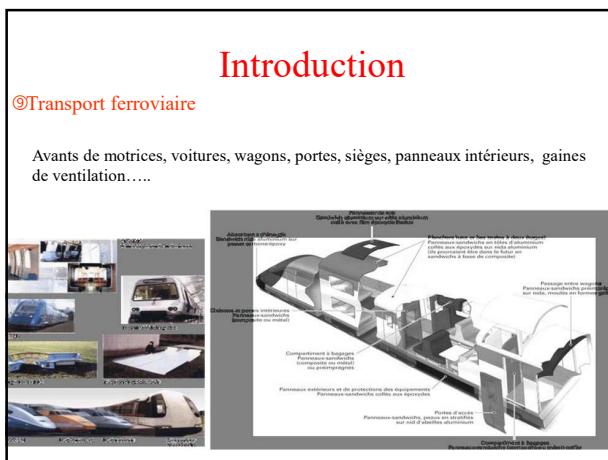
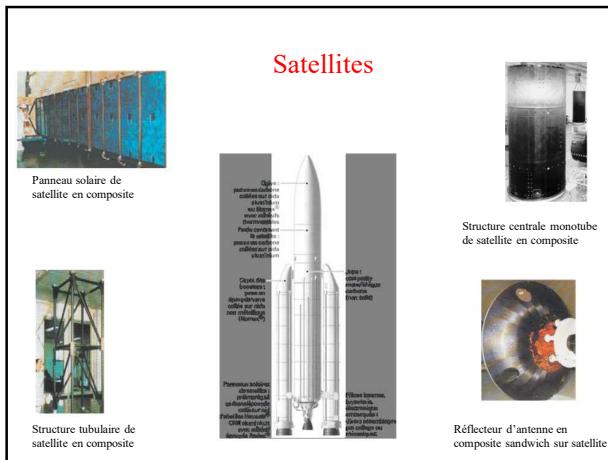
Appareil	Élément	Matériau	Date	Gain de masse (%)
F111	Déflecteur d'air	Bacélaine	1966	24
F14	Empennage horizontal	Bacélaine	1970	19
F15	Empennage vertical	Bacélaine	1971	25
F15	Empennage horizontal	Bacélaine	1971	22
Mirage III	Governail de direction	Carbone/vésicule	1975	20
Mirage F1	Empennage horizontal	Bacélaine	1976	15
Mirage F1	Ailes	Carbone/vésicule	1976	26
F16	Empennage horizontal	Carbone/vésicule	1976	≈ 20
Mirage 2000	Elevons	Carbone/vésicule	1977	≈ 20
Mirage 2000	Empennage vertical	Carbone/vésicule	1978	≈ 20
III	Empennages	Bacé-carbone/vésicule	1978	19
Mirage 4000	Empennage vertical	Carbone/vésicule	1978	≈ 20
F18	Revêtement voilure	Carbone/vésicule	1978	≈ 20
AV8B	Voilure	Carbone/vésicule	1978	≈ 20
Alpha jet	Empennage horizontal	Carbone/vésicule	1980	≈ 20
Rafale	Voilure et zone fuselage	Carbone/vésicule	1994	≈ 20
Eurofighter	Voilure et zone fuselage	Carbone/vésicule	1995	≈ 20

Avions militaires



Hélicoptères





Introduction

Structure monolithique raide

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

Habilage de portière de voiture en lin/polypropylène

Bloc avant composite

Plancher composite

Introduction

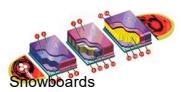
Sports et loisirs



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 confondues	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 confondues

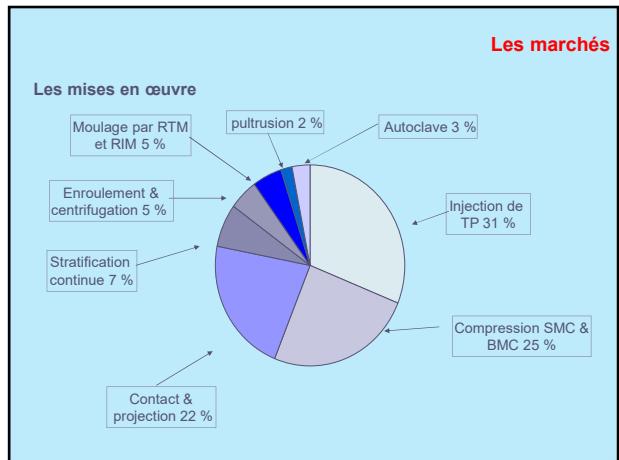
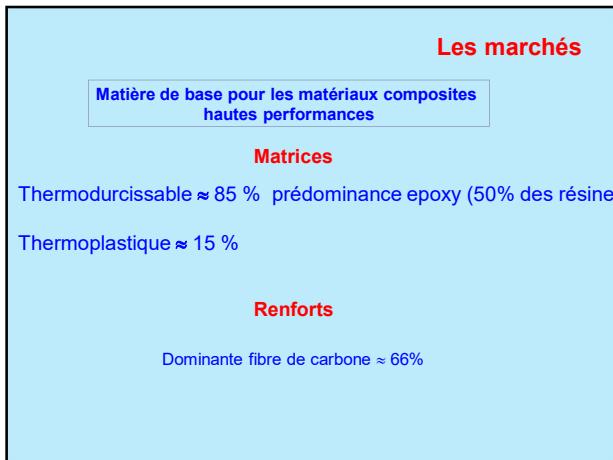
Matrices

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

Thermoplastique ≈ 40 %

Renforts

Dominante fibre de verre > 90 %



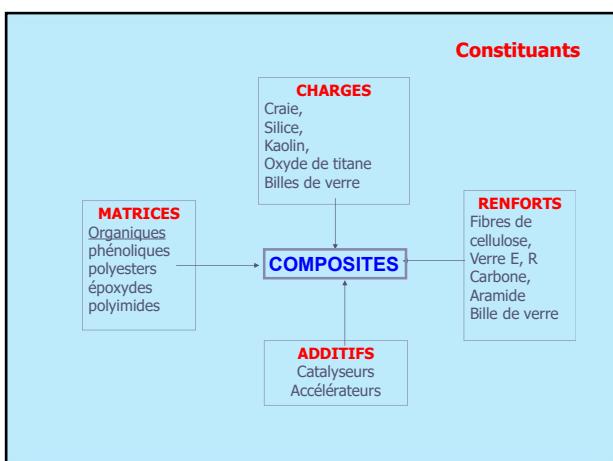
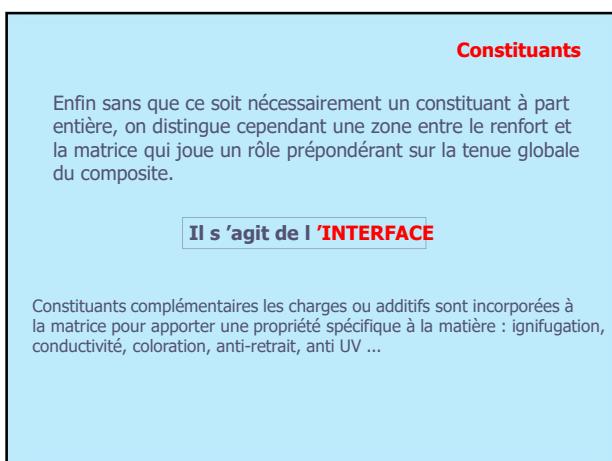
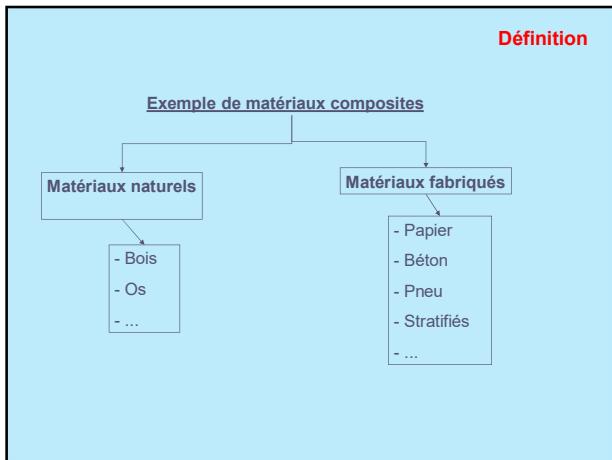
2 – DEFINITIONS

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 mat composite



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*
- Polyoxyde de phénol (PPE ou PPO) : *résistance à l'hydrolyse*
- Polyoxyméthylène (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	ρ (kg/m³)	E (MPa)	v	R (MPa)	α ($\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	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>Côte</i>	Cout	Long (X2)
<i>Tenue au choc</i>	Assez bonne	limitée
<i>Tenue thermique</i>	Réduite	Meilleure
<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.

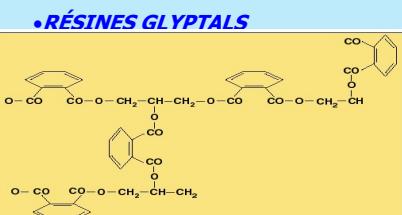
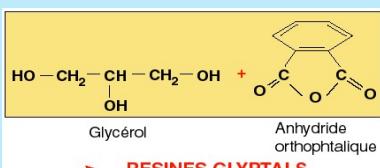
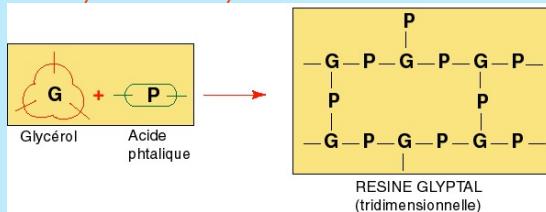
A partir des résines issues de cette réaction de condensation, la réticulation (c'est à dire la liaison entre chaînes pour en faire un réseau tridimensionnel) est assurée par différents monomères.

- **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

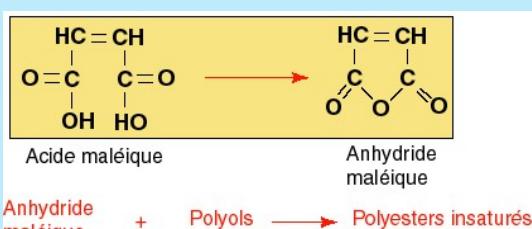
LES RÉSINES GLYPHTALS



POLYESTERS LINÉAIRES INSATURÉS

ACIDES INSATURÉS

ACIDE MALÉIQUE



•RÉSINES GLYPHTALS

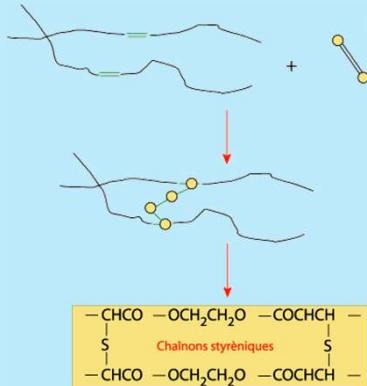
RESINES GLYPTALS

ACIDES INSATURÉS

ACIDE MALÉIQUE

Polyesters insaturés

POLYESTER INSATURÉ + STYRÈNE

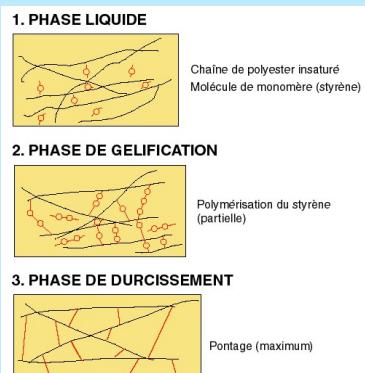


AGENTS RÉTICULANTS

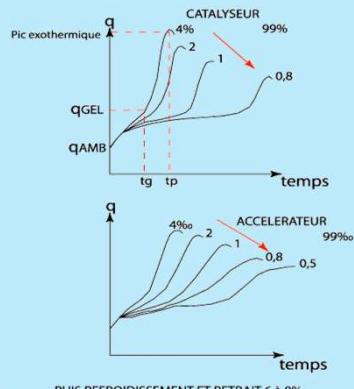
STYRÈNE (Eb = 145°C)	<chem>CH=CH2</chem>
MONOCHLOROSTYRÈNE	
α MÉTHYLSTYRÈNE (Eb = 165°C)	<chem>CC(=CH2)c1ccccc1</chem>
DIVINYLBENZÈNE (Eb = 200°C)	<chem>CH=CH2c1ccccc1CH=CH2</chem>
MÉTACRYLATE DE MÉTHYLE (Eb = 100°C)	<chem>CC(=O)C(C)(C)=CH2</chem>
ACRYL AMIDE (Eb = 84,5°C)	<chem>NC(=O)C=C</chem>

RÉTICULATION DES POLYESTERS INSATURÉS

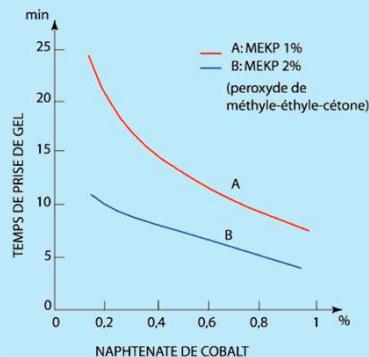
en progression dans le temps



RÉACTIVITÉ DES POLYESTERS



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



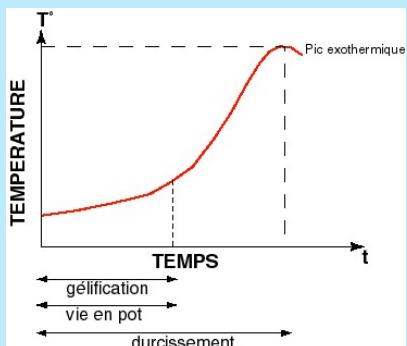
RÉACTIVITÉ DES RÉSINES POLYESTERS

➤ COMPOSITION DES MÉLANGES :

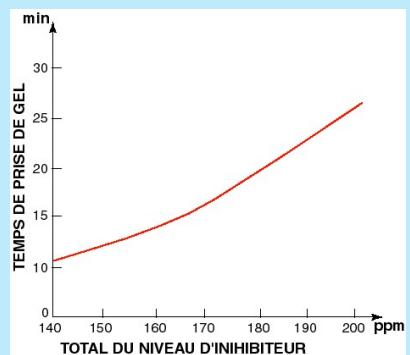
- Résine : 50g
- Accélérateur : 1% environ
- Catalyseur : 0,1% environ

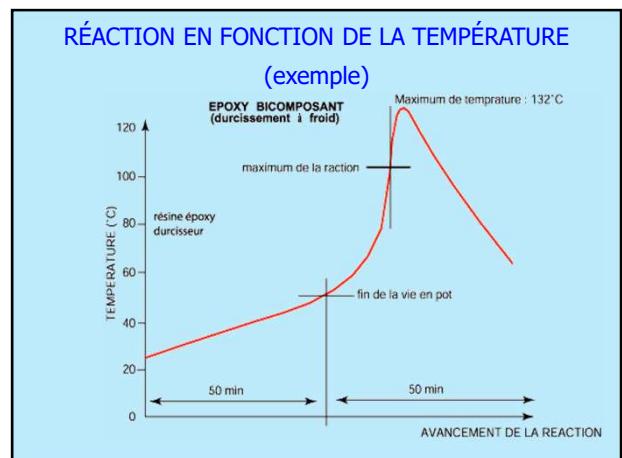
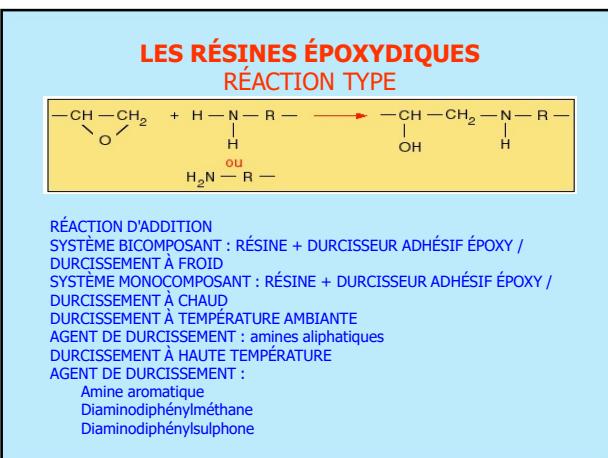
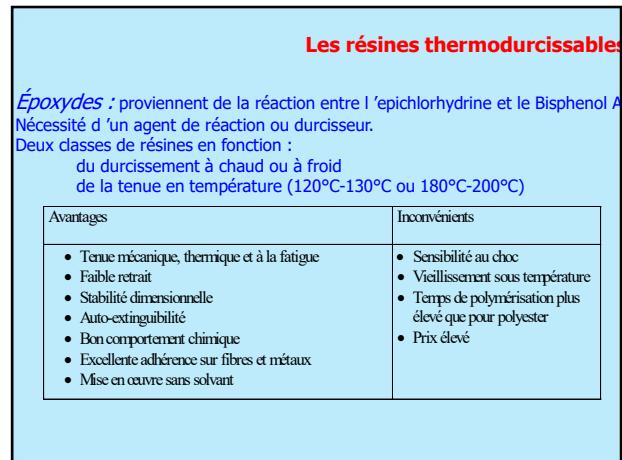
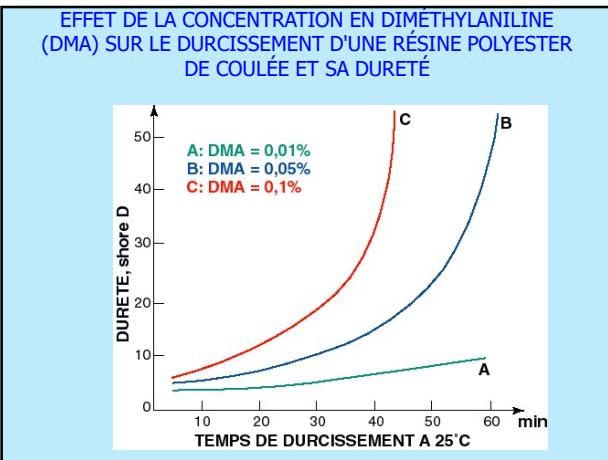
- Influence du taux d'accélérateur
- Influence du taux de catalyseur (initiateur)
- Influence du taux de charges

• COURBE DE RÉACTIVITÉ :



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





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 formaldehyde.

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

Les résines thermodurcissables

Polyuréthanes et polyurées : les constituants sont livrés à l'état de prepolymères liquides :

polyols + polyisocyanates = polyuréthanes
polyethers + polyamines = polyurées.

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

Les résines thermodurcissables

Polyimides (ou bismaleimides) et polystyrylpiridines : 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"> Résistance mécanique sans fluage Faible coefficient de friction Pratiquement incombustible Adhésivité Bon comportement à l'oxydation et radiations Excellent tenue en température même en présence de solvants 	<ul style="list-style-type: none"> Sensibilité à l'hydrolyse Transformation difficile Prix élevé

Silicone : résine présentant de bonne 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 extingubles 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 polyépoxydés 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 (Aramid)
- 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 serviront, 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:

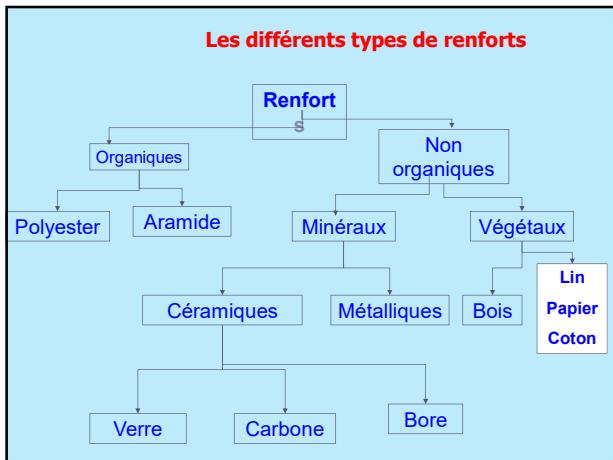
Les charges ajoutées aux polyesters ont les buts suivants:

- 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_3) : 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



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 $(CH_2-CHCM)n-(CH_2-CXY)n'$ (acrylonitrile + comonomère) par la voie classique du solvant, dite **ex-Pan**. On opère par carbonisation de la fibre de polyacrylonitrile (**PAN**) sous atmosphèreneutre d'azote dans des fours à pyrolyse de façons à ne conserver que la chaîne carbonée.

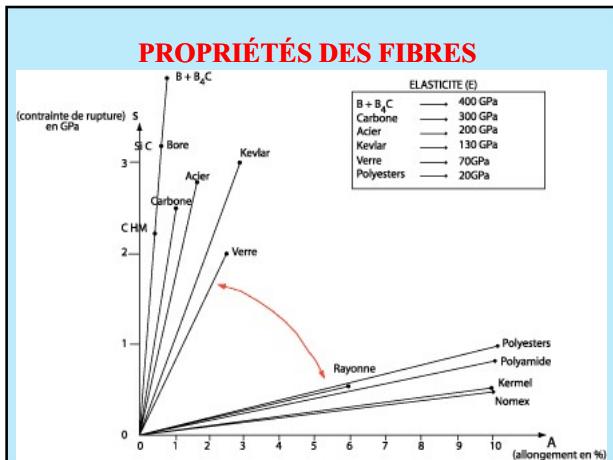
Consommation mondiale

Consommation mondiale en tonne

	Europe	USA	Japon
Verre	460 000	620 000	210 000
Aramidé	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 (Aramidé)
 - Bore
 - Cellulose (Organique)
 - Lin
 - Céramique



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) suivie 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 Sillionne.

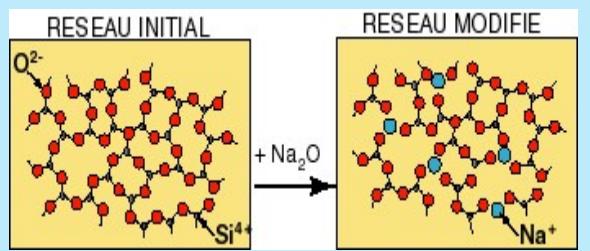
l'**étirage pneumatique** qui produit une mèche de fibres discontinues (longueur 5 à 80 cm) qu'on appelle verranne.

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

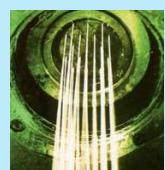
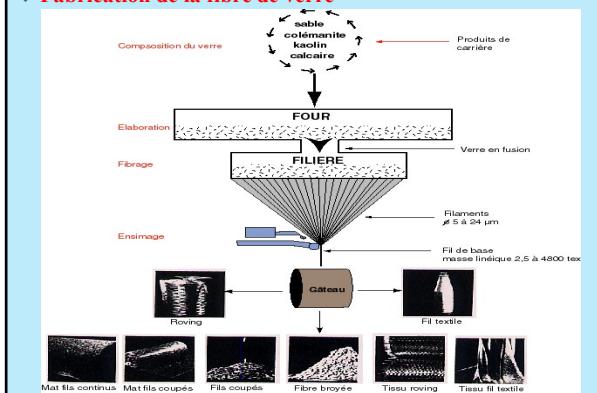
- ✓ Economique environ dix fois moins cher que le carbone
- ✓ Résistance en tension
- ✓ Bonne élongation
- ✓ Bonne stabilité dimensionnelle
- ✓ Isolation électrique
- ✓ Bonne adhérence aux résines
- ✓ Propriétés mécaniques limitées
- ✓ Vieillissement accéléré au contact de l'eau, UV Et t°

Les fibres de verre

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

❖ Fabrication de la fibre de verre



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



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

La fibre de verre

Principaux producteurs

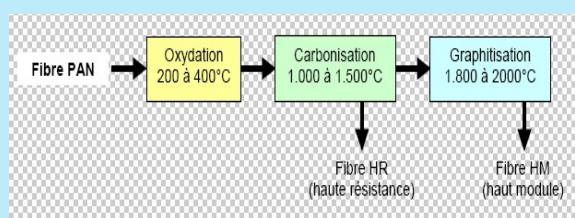
- Owens Corning Fiberglass (USA)
- Vetrotex Saint Gobain (France)
- Ahlström
- PPG industries international inc (USA)

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 linéaire 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

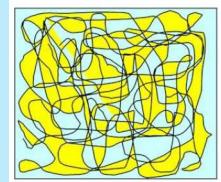


Les non tissés

- 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/m²) 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



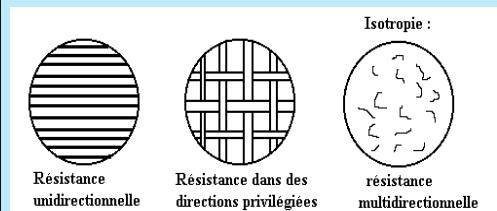
Le Mat



Propriétés du Mat

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



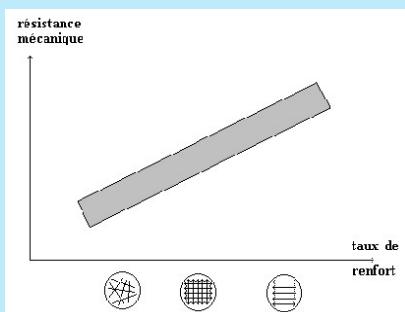


PR A.HADDOUT

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



PR A.HADDOUT

Les tissus

Il existe 3 familles de tissus dont l'unité de référence est le gr / m². Plus le Grammage sera petit plus le tissu sera fin. Ces familles sont :

Les tissés

Les non tissés

Les mixtes



PR AHADDOUT



PR AHADDOUT

Les différents tissus en fibres

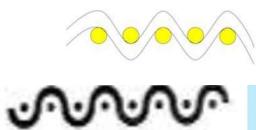


PR AHADDOUT

La Toile



Toile ou taffetas (1/1)

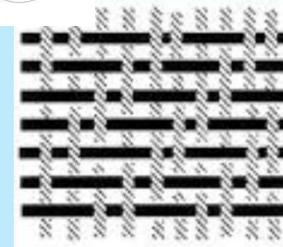


La toile

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

Les sergés

4 HARNESS
(2/2)



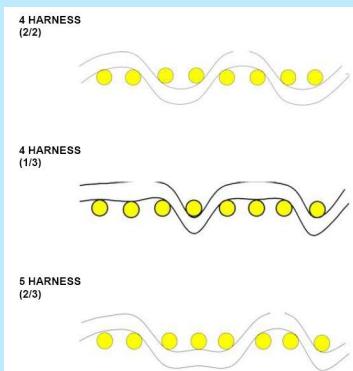
Les sergés



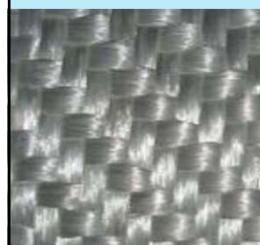
Les sergés

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

Les satins



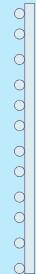
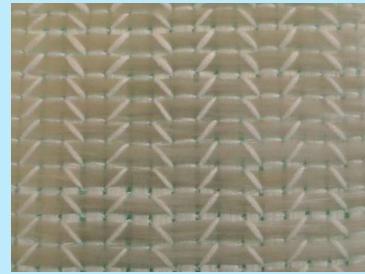
Les satins



Les satins

- ✓ Très déformable
- ✓ Bon mouillage
- ✓ Bien adapté pour les pièces géométriques difficiles
- ✗ Cher
- ✗ Difficile à réaliser

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

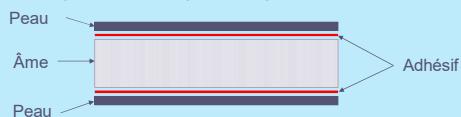
Définition

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

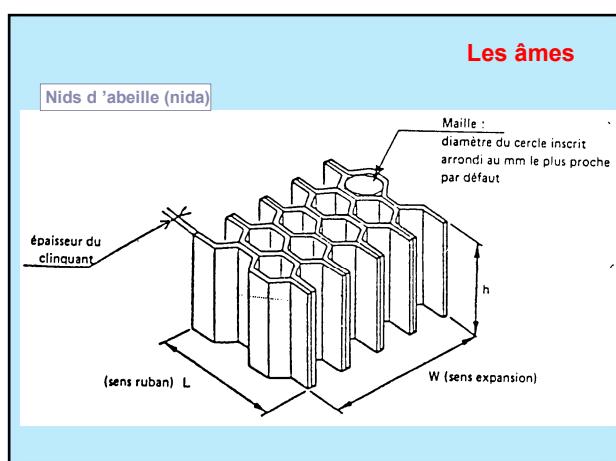
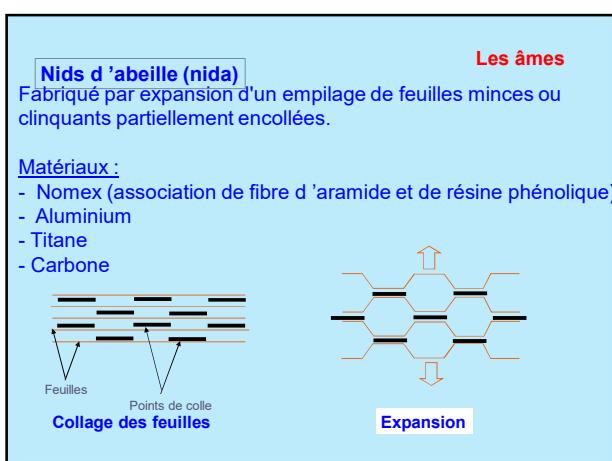
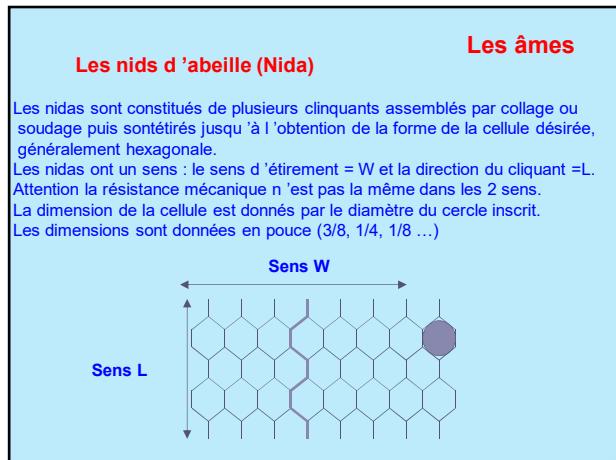
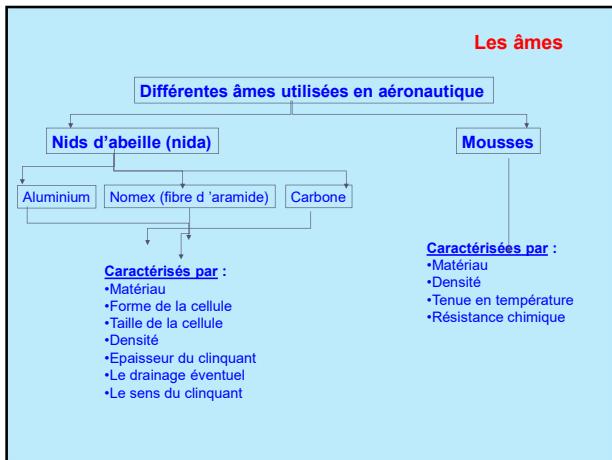
Les âmes pleines :

- 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.

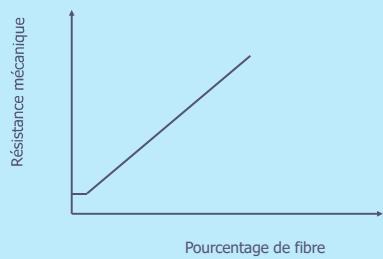
L'assemblage des peaux et des âmes est réalisé par collage :

- 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)

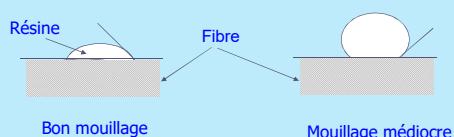
PR AHADDOUT

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

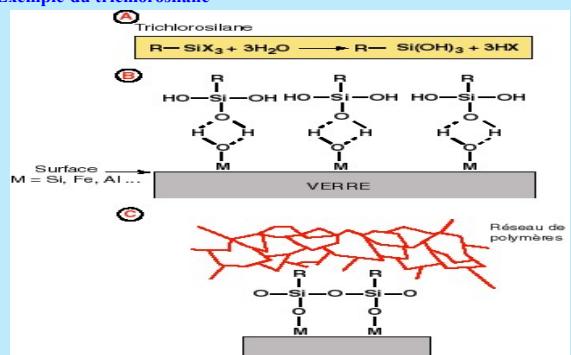
Traitement de Surface

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

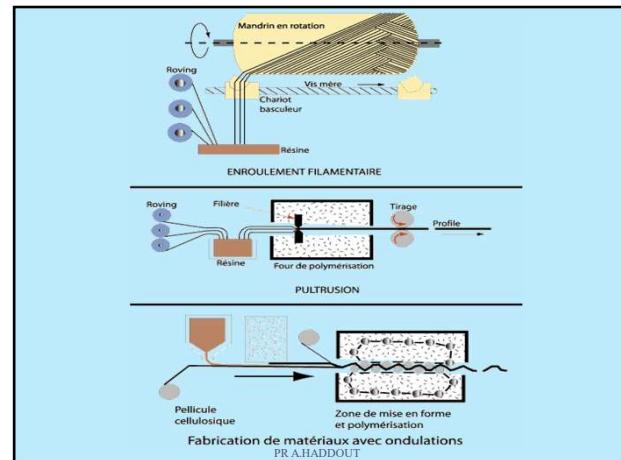
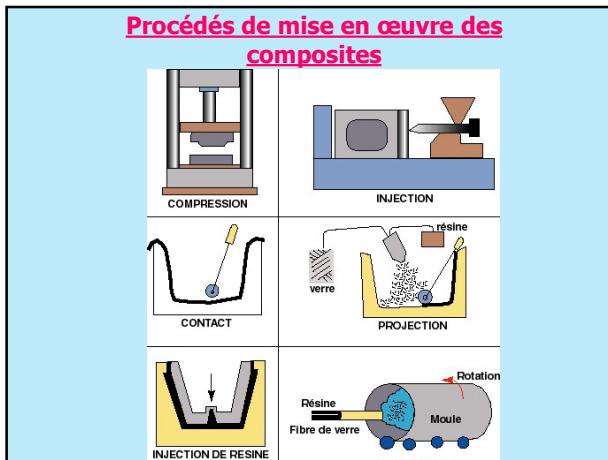


PROCEDES DE MISE EN FORME DE COMPOSITES THERMODURCISSABLES

PR A.HADDOUT

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

PR A.HADDOUT



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.

Mais 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 doits ;
- ✓ 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

- ✓ Gélfication 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 série,
- Bel aspect de surface côté gel-coat ;
- Possibilité de réaliser des structures de très grandes dimensions.

Limites :

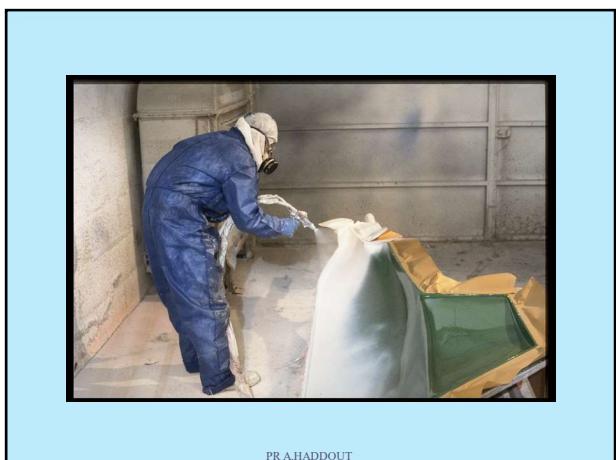
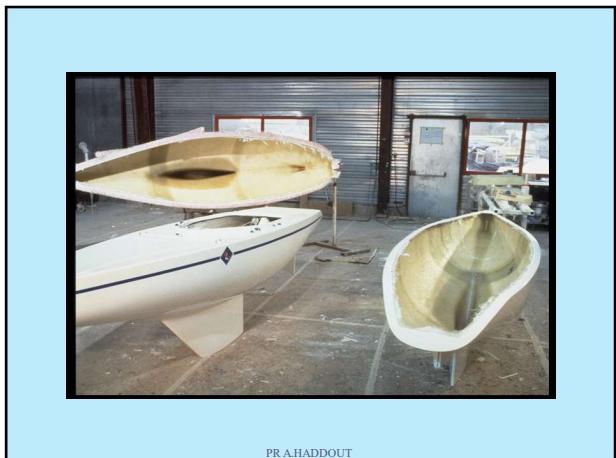
- coût main-d'œuvre élevé (cadence réduite et faible productivité) ;
- Prépondérance du facteur humain sur la qualité,
- Epaisseurs par uniformes et caractéristiques peu reproductibles,
- Nécessité d'ébarbage.
- Conditions de travail difficiles (dégagement de styrène, nécessité de ventilation),

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





PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT

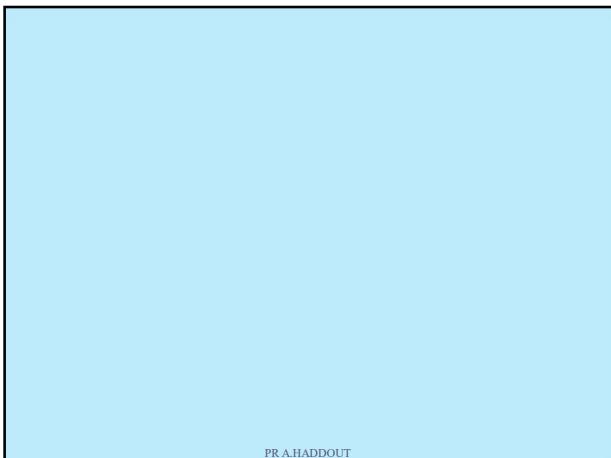


PR A.HADDOUT

PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT

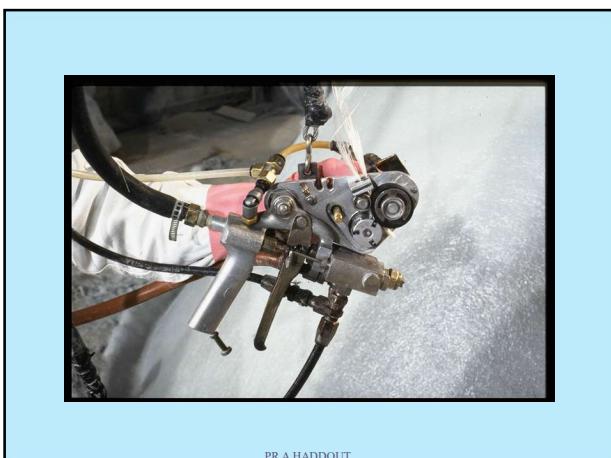


PR A.HADDOUT

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 ébuler au rouleau en tassant les fibres contre le moule.

PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



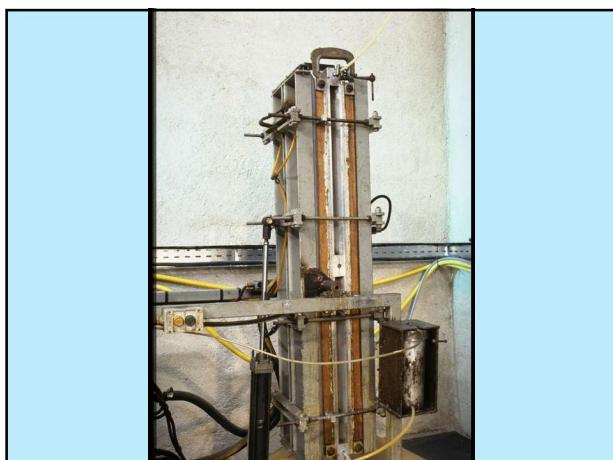
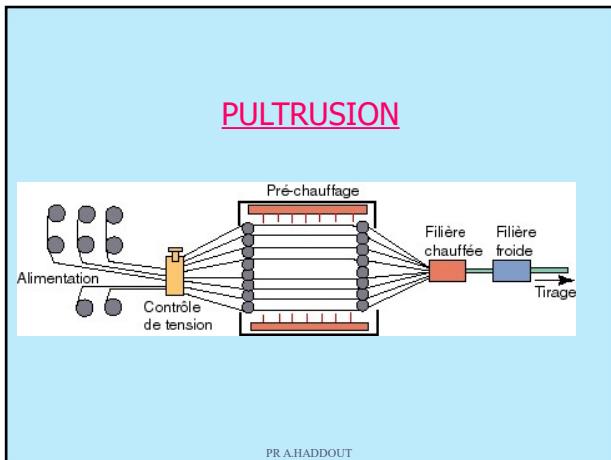
PR A.HADDOUT



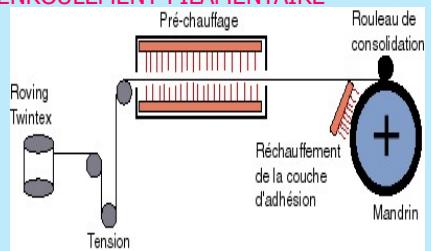
PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



ENROULEMENT FILAMENTAIRE

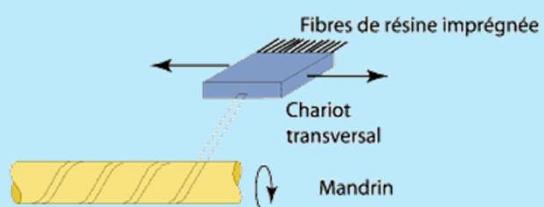


PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT

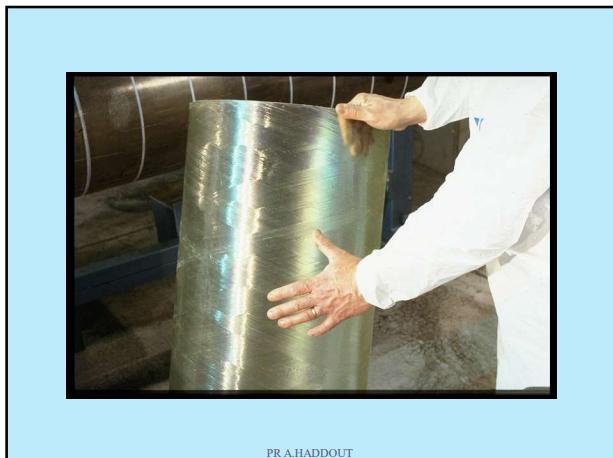
MÉTHODE D'UN ENROULEMENT FILAMENTAIRE



PR A.HADDOUT



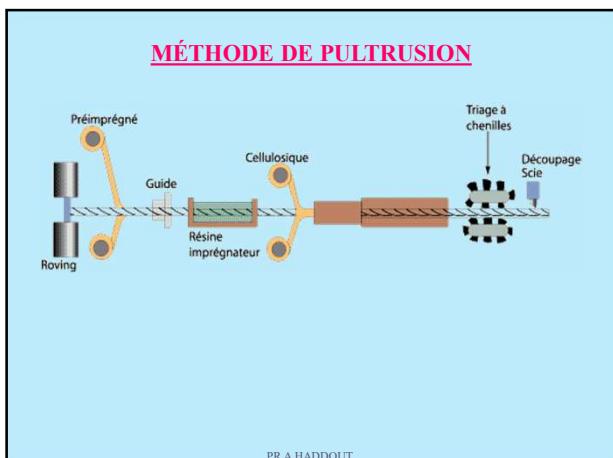
PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



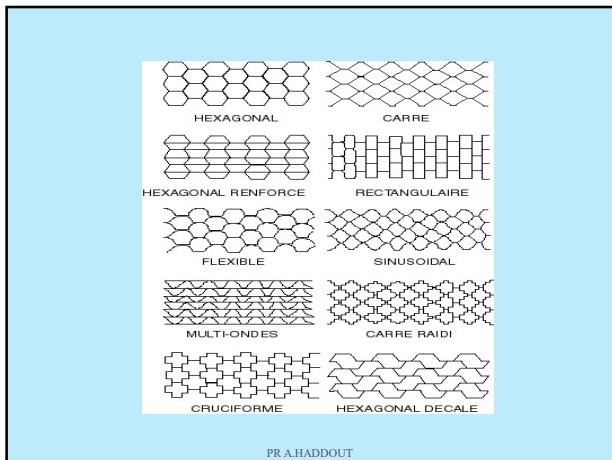
PR A.HADDOUT



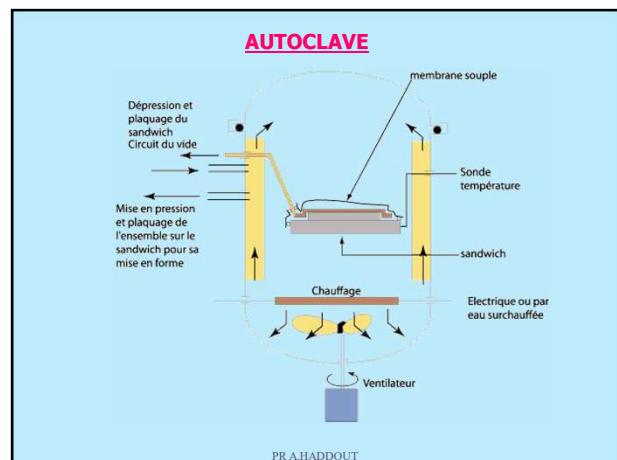
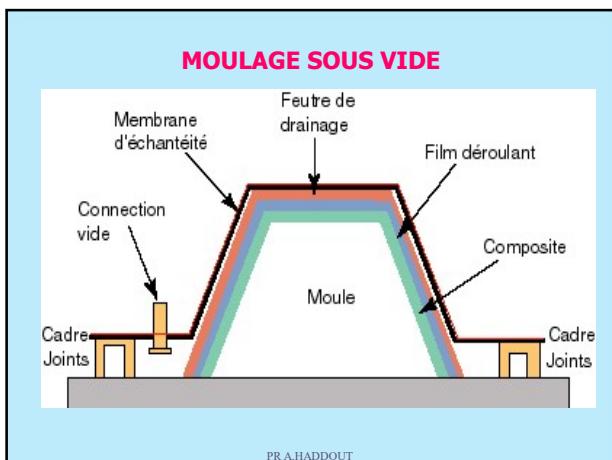
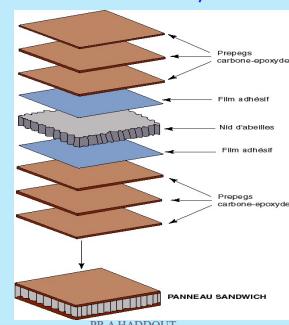
PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



EXEMPLE DE CONSTITUTION D'UN PANNEAU SANDWICH AVEC ÂME EN "NIDS d'ABEILLES" ET PEAUX EN STRATIFIÉ CARBONE/EPOXYDE



R.T.M. : RESIN TRANSFER MOLDING

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

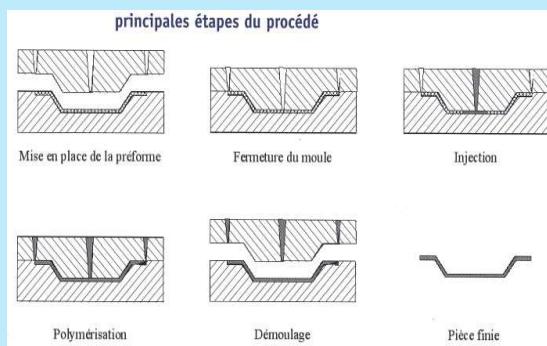
PR A.HADDOUT

Moulage par Transfert de Résine (RTM) :

- Le moulage par transfert de résine set 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:

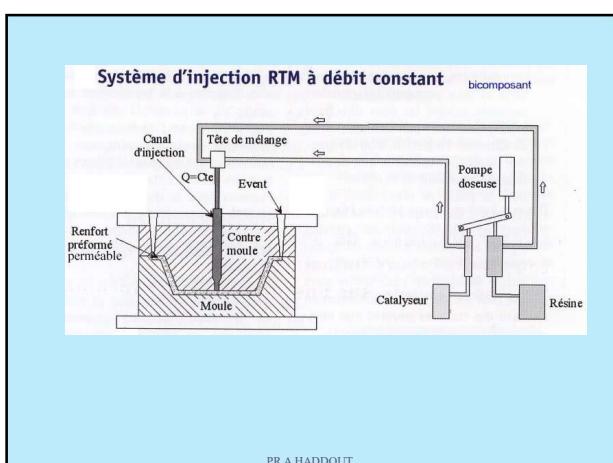
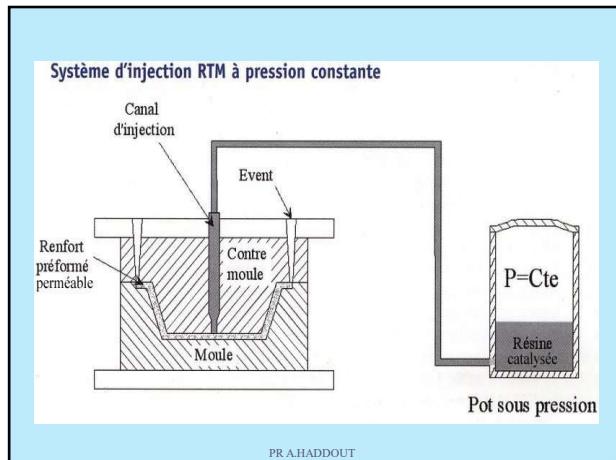
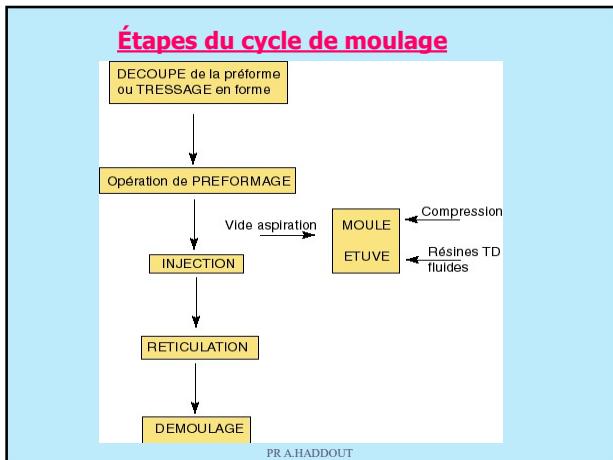


PR A.HADDOUT

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 4m²de surface.
- ✓ L'épaisseur recommandée est entre 2mm et 15.
- ✓ L'angle de démolage 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



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

α = taux de réticulation (0 à 1)

γ = taux de cisaillement (s-1)

Le premier terme η_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 RENFORCÉ

Cas unidirectionnel :

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

K_χ = perméabilité (m^2 ou Darcy)

Q = débit volumique (m^3 / s)

A = aire de la section du flux (m^2)

η = 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.

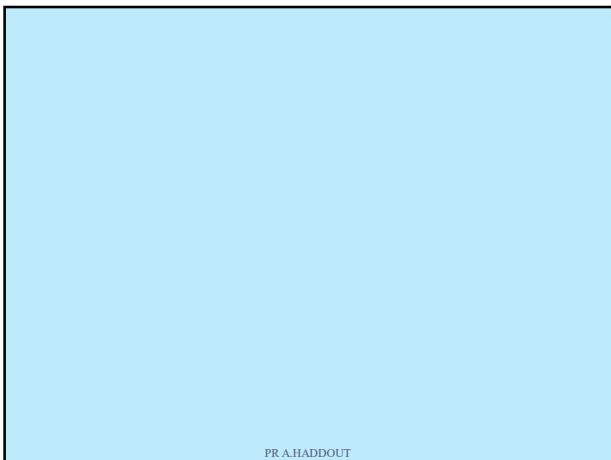
PR A.HADDOUT

Limite de procédé RTM

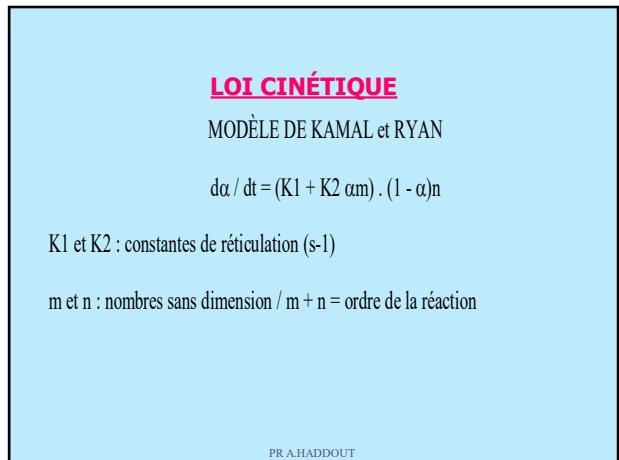
- ✓ La majorité des limitations du RTM proviennent du fait que les versions du procédé, utilisées pour des productions à grandes vitesses, ne sont pas complètement développées.
- ✓ Pendant que les résines utilisées continuent d'être améliorées, il y a encore des problèmes lorsqu'il s'agit du remplissage 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 parties (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



PR A.HADDOUT



LOI CINÉTIQUE

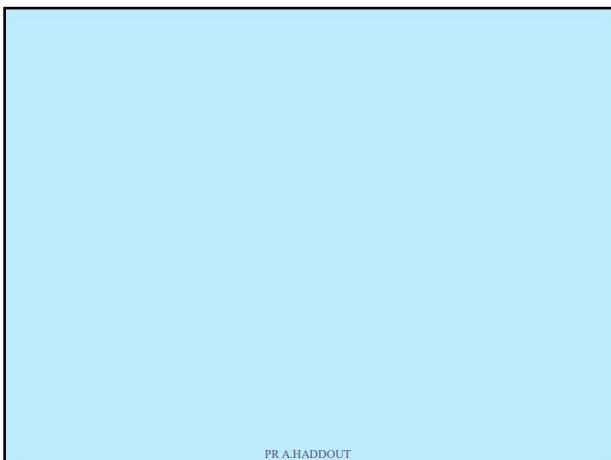
MODÈLE DE KAMAL et RYAN

$$d\alpha / dt = (K_1 + K_2 \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n$$

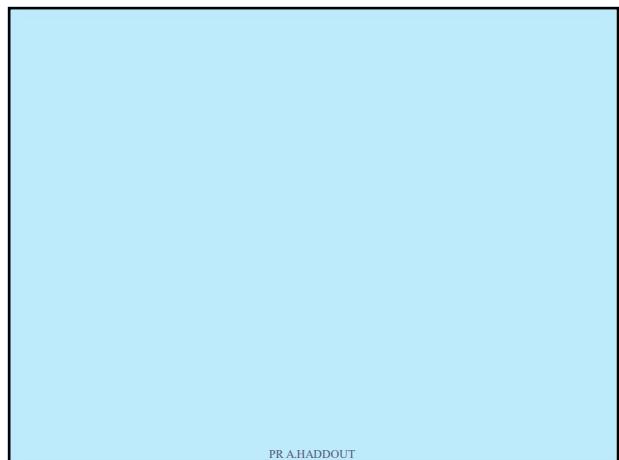
K₁ et K₂ : constantes de réticulation (s-1)

m et n : nombres sans dimension / m + n = ordre de la réaction

PR A.HADDOUT



PR A.HADDOUT



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 LAIAISON	ÉNERGIE (kJ)	TYPE DE COMPOSÉ
C -- C	aliphaticque	330 - 350	
→ C -- C	aromatique	500	
C -- C	éthyénique	320	
→ C -- H	aliphaticque	390 - 426	
C -- H	aromatique	426	
C -- O	divers	360	 ou 
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

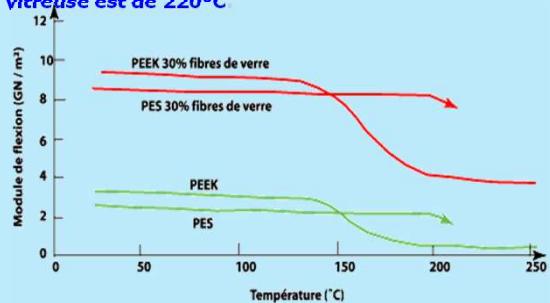
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

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
T _f (°C)	334	334	334
T _g (°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/m ²	83	96	85

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



INTERFACE RENFORT / MATRICE

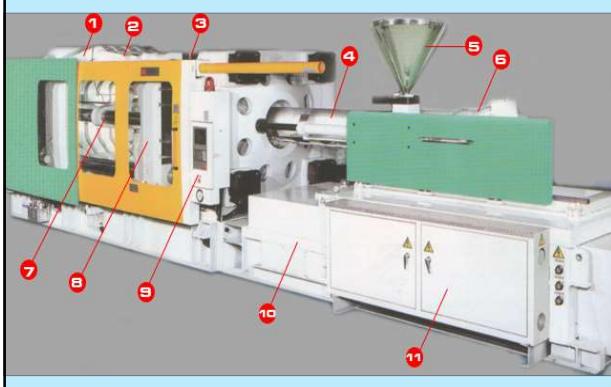
Interface

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 ...

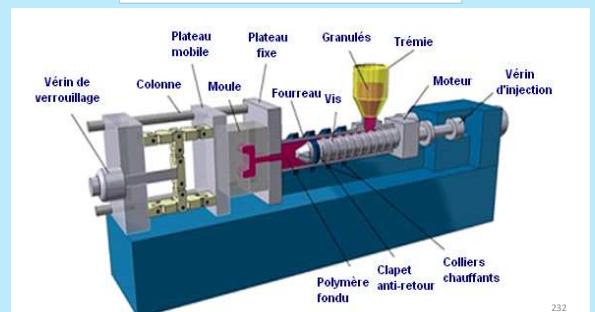
Pour qu'il y ait une bonne adhésion entre le renfort et la résine, il faut qu'il y ait une bonne mouillabilité.

PRESSE D'INJECTION



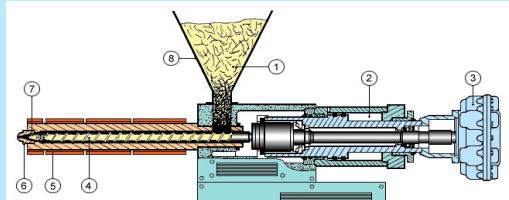
Procédé de transformation: Moulage

Composition d'une presse d'injection



232

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

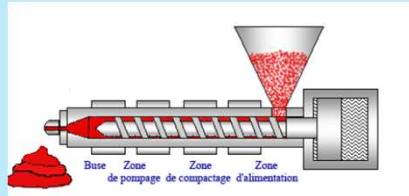


- 1- Matière première
- 2- Vérin d'injection
- 3- Moteur de plastification
- 4- Vis sans fin
- 5- Éléments chauffants
- 6- Buse d'injection
- 7- Clapet
- 8- Trémie

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

Techniques de mesures

Méthode 1 : Mode purge

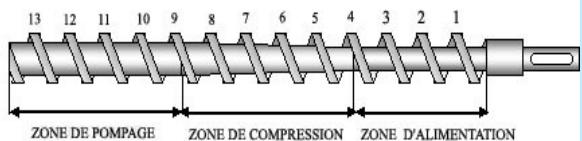


234

Unité d'injection



Evolution de la longueur des fibres le long de la vis

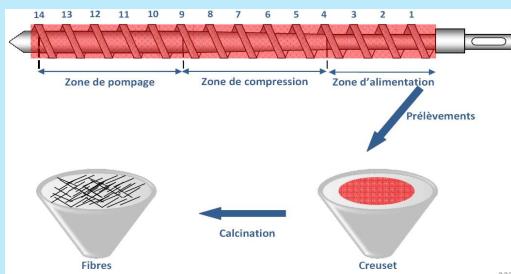


- Réduction de la longueur au niveau de la zone de compression
- Taux de casse le plus élevé au niveau des filets 6 et 7
- Évolution du taux de casse en fonction de la vitesse de rotation vis

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

Techniques de mesures

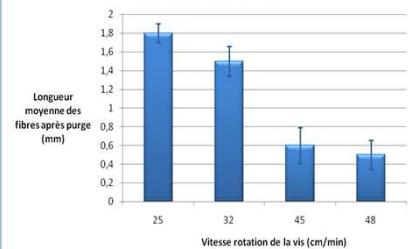
Méthode 2 : Extraction de vis



237

Impact de la vitesse d'injection sur la longueur des fibres

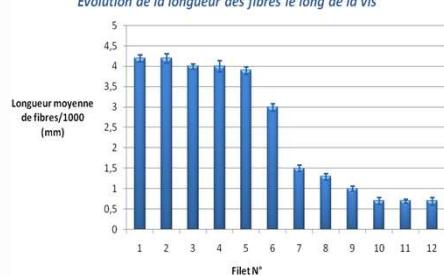
Evolution de la longueur des fibres en fonction de la vitesse d'injection



238

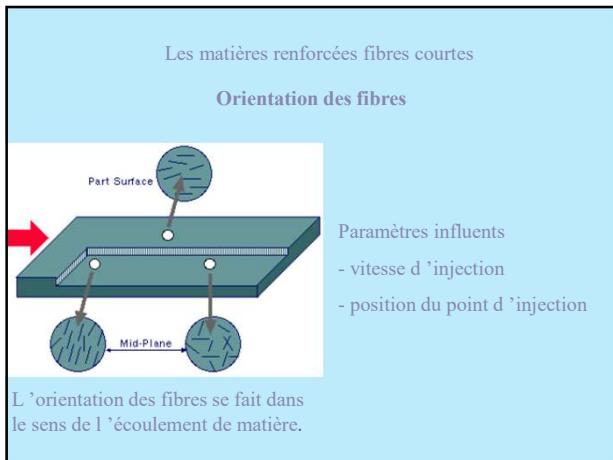
Distribution de la longueur des fibres le long

Evolution de la longueur des fibres le long de la vis



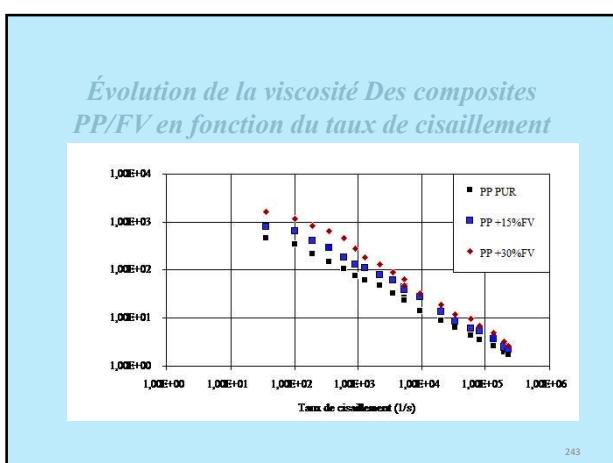
239

Étude de l'orientation des fibres dans des pièces injectées

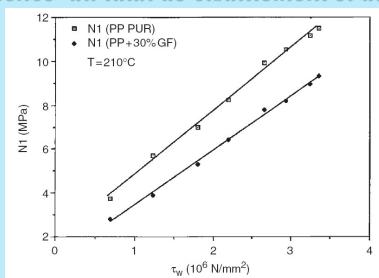


Principaux paramètres influençant l'orientation des fibres

- 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 matières
- Influence de la concentration de fibres



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)

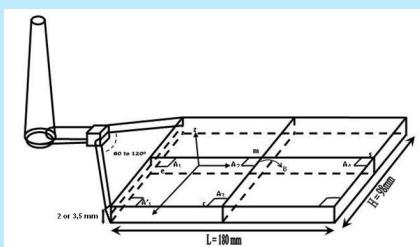
Les techniques d'observation de l'orientation des fibres dans les pièces injectées

- 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

Géométrie d'étude

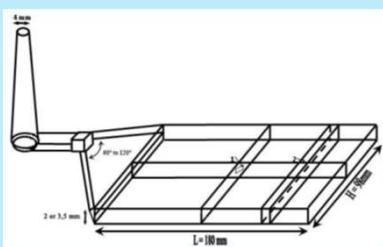


A1 : Zones d'observation microscopique

247

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

Géométrie d'étude



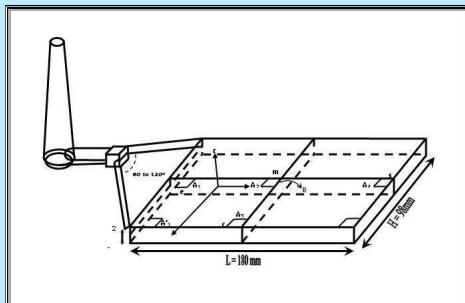
I, II : Zones d'observation microscopique

248

Préparation de l'échantillon

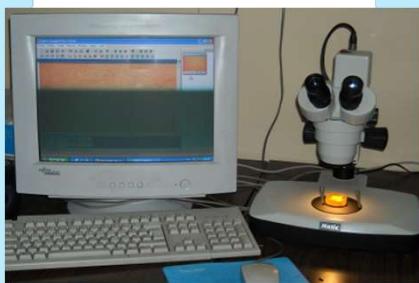
- Enrobage de l'échantillon dans la résine autopolymérisante
- Usure de l'échantillon au papier abrasif
- Polissage à l'alumine pendant 5 minutes
- Rinçage à l'eau courante
- Attaque chimique de l'échantillon poli
- Rinçage
- Séchage à l'air comprimé
- Imprégnation de la surface à observer avec une encre

Les zones d'observation microscopique



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

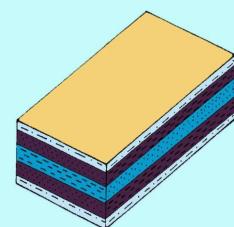
Géométrie d'étude



251

Analyse qualitative de l'orientation des fibres

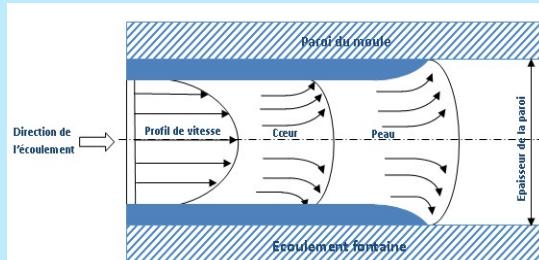
Observation l'orientation des fibres dans l'épaisseur de la pièce



252

Analyse qualitative de l'orientation des fibres dans les nids injectés

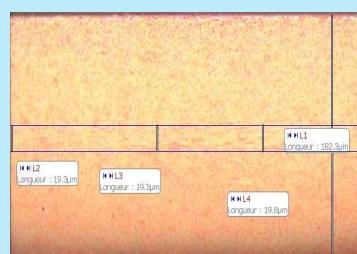
Effet fontaine



253

Analyse quantitative de l'orientation des fibres dans les nids injectés

Mesure de l'épaisseur de la couche à cœur



254

Analyse quantitative de l'orientation des fibres dans les nids injectés

Mesure de l'épaisseur de la couche à cœur

Incidence de la géométrie de l'empreinte

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

255

Analyse quantitative de l'orientation des fibres dans les nids injectés

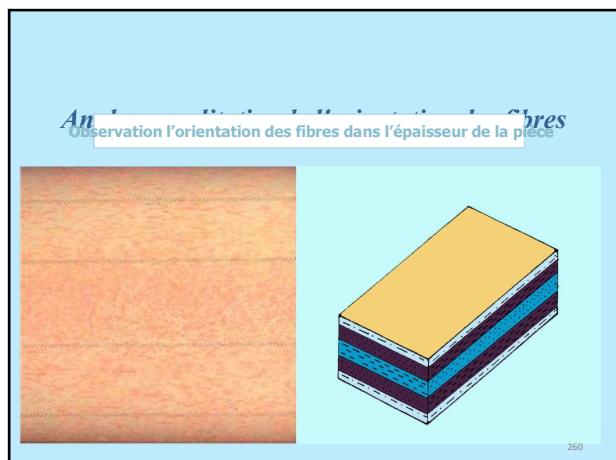
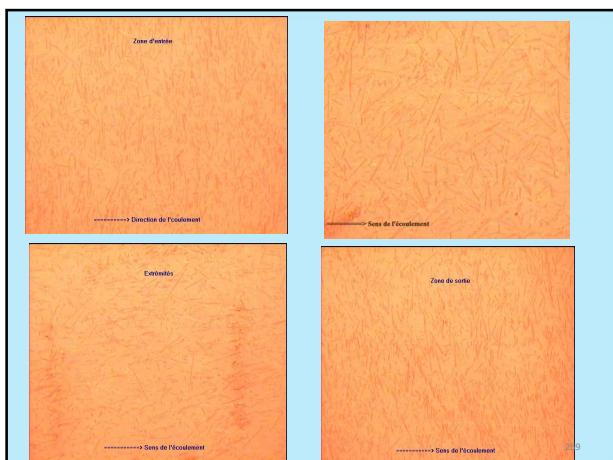
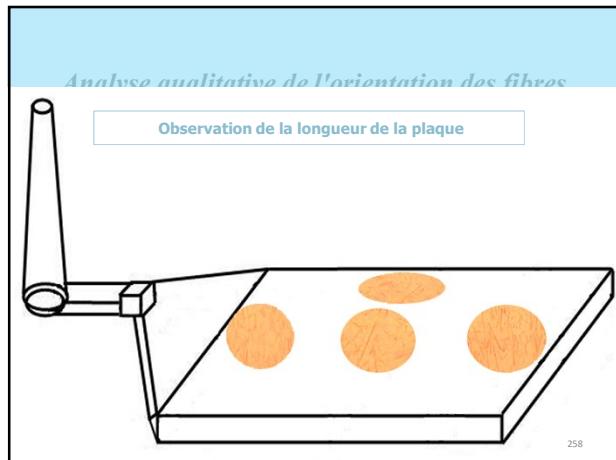
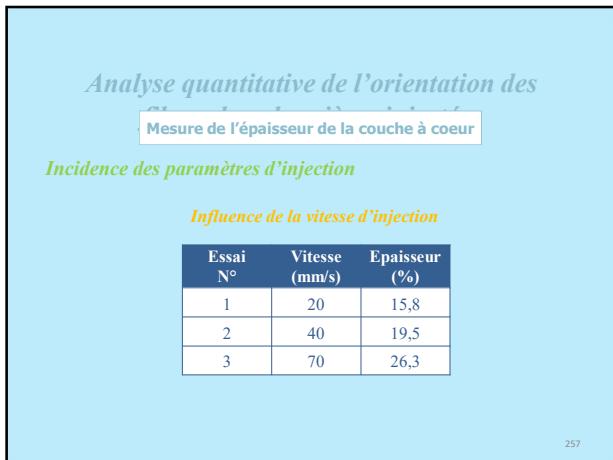
Mesure de l'épaisseur de la couche à cœur

Incidence des paramètres d'injection

Influence de la température moule

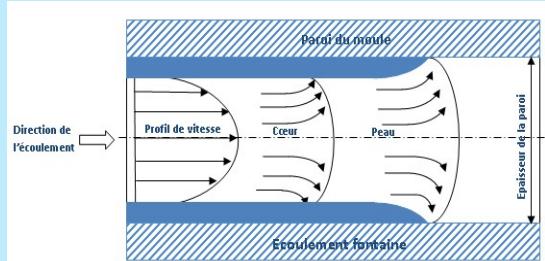
Essai N°	T moule (°C)	Epaisseur (%)
1	60	14,88
2	120	13,28

256



Analyse quantitative des fibres

Effet fontaine



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.

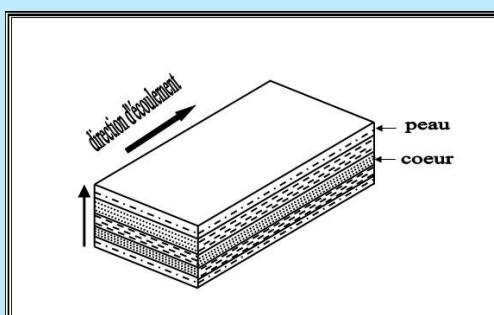
L'analyse qualitative de l'orientation des fibres permet de définir une approche globale de l'orientation des fibres en différents emplacements de la plaque.

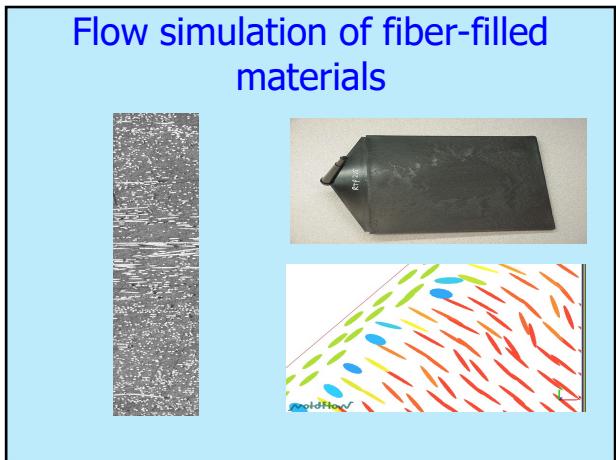
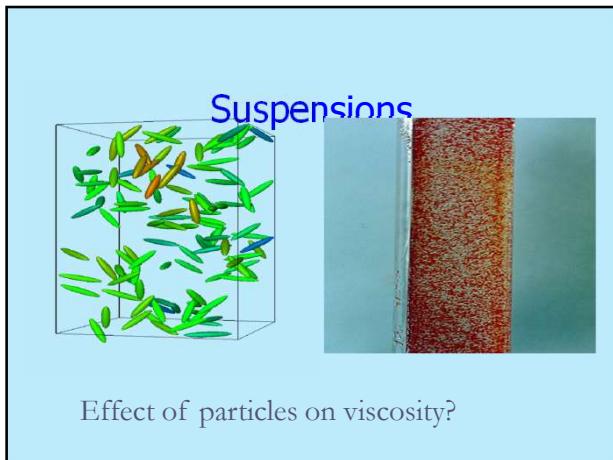
262

Observation globale de l'orientation des fibres



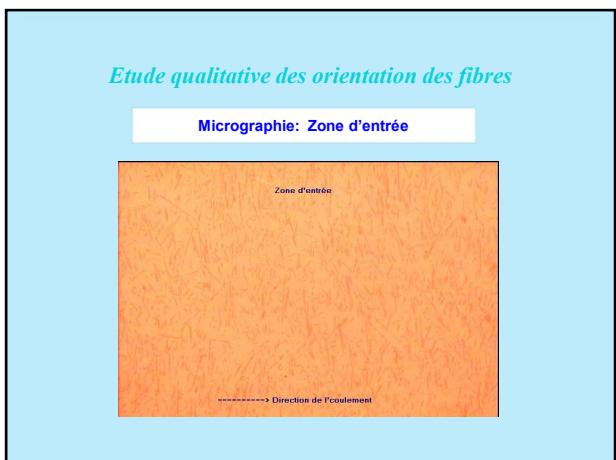
La section transversale de la plaque





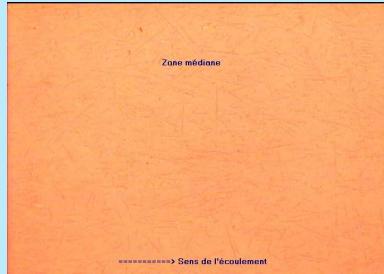
Évolution de l'épaisseur à cœur en fonction de la vitesse d'injection

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



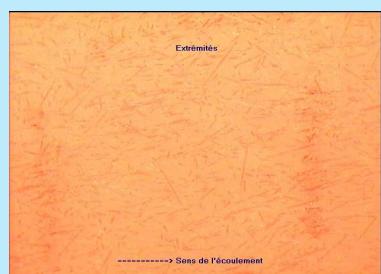
Etude qualitative des orientation des fibres

Micrographie: Zone médiane



Etude qualitative des orientation des fibres

Micrographie: Extrémités



Etude qualitative des orientation des fibres

Récapitulation

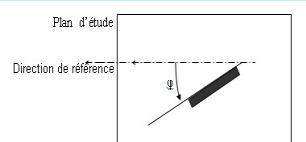
- La densité des fibres est beaucoup plus importante en position d'entrée et de sortie que dans les autres régions de la plaque injectée.
- Pour une coupe faite dans le plan (y,z) de la plaque, la densité des fibres est plus importante à cœur que dans les autres régions.

Etude quantitative des fibres

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

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

N_i représente le nombre de fibres faisant un angle ϕ_i avec une direction de référence



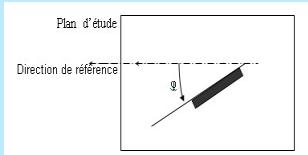
Représentation de l'orientation d'une fibre par rapport à une direction de référence

Etude quantitative des fibres

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

$$f = (2 < \cos^2 \phi > - 1) / 2 \quad \text{avec} \quad < \cos^2 \Phi_i > = \frac{\sum N_i \cos^2 \Phi_i}{\sum N_i}$$

N_i représente le nombre de fibres faisant un angle ϕ_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 température 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 :

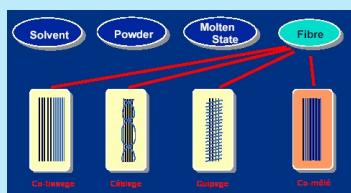
- leur rapport longueur / diamètre
- leur interface avec la résine
- leur orientation

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 comélées [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

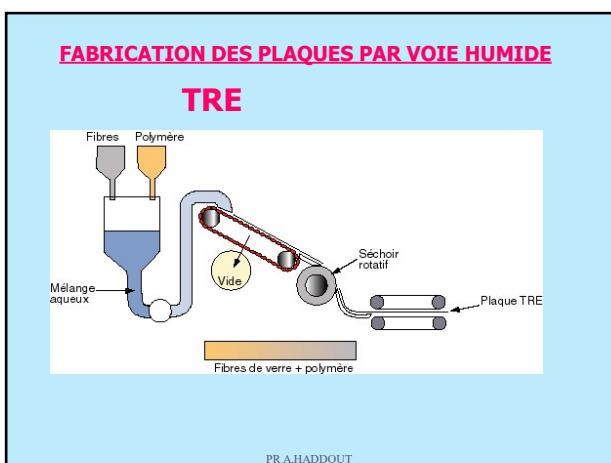
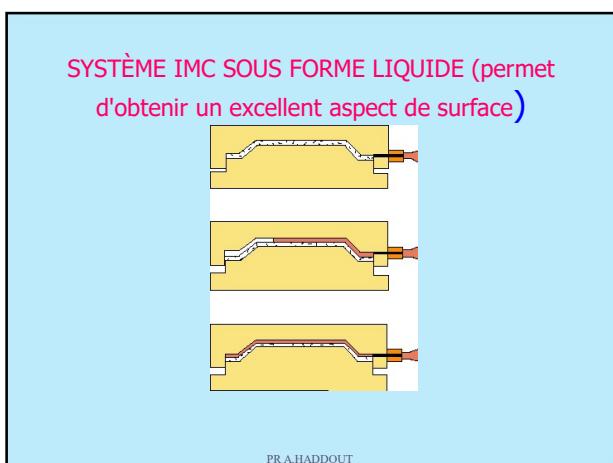
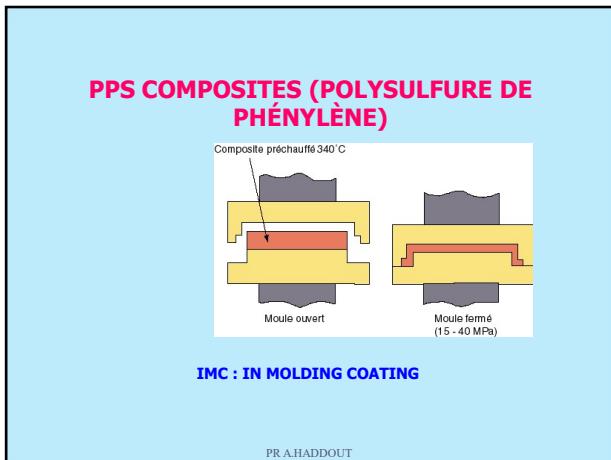
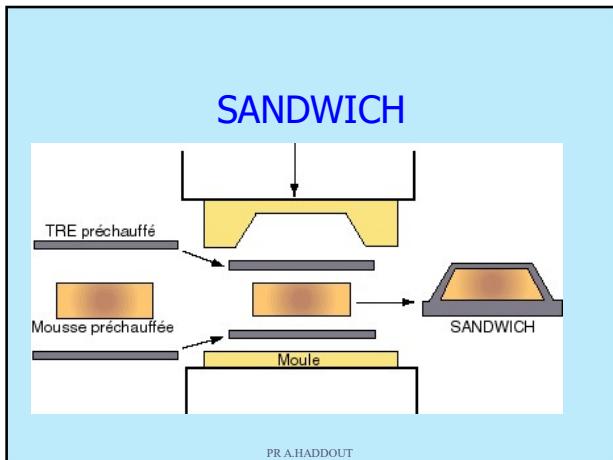


Support de ventilateurs moulé en SMC pour la peugeot 405

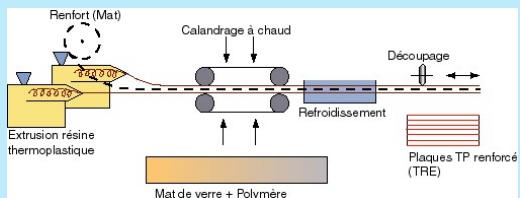
Les composites thermoplastiques armés (TPA) à fibres longues



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



FABRICATION DES PLAQUES PAR VOIE SÈCHE



PR A.HADDOUT

MOULAGE DES TRE

❖ MOULAGE AVEC FLUAGE DE MATIÈRE :

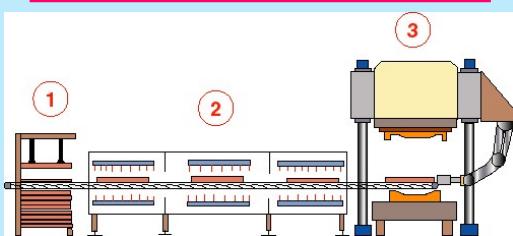
$P = 10 - 20 \text{ MPa}$, association de plusieurs flans
(variations d'épaisseur - nervures...)

❖ MOULAGE PAR ESTAMPAGE DIRECT :

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

PR A.HADDOUT

SCHÉMA DE MISE EN OEUVRE DES TRE



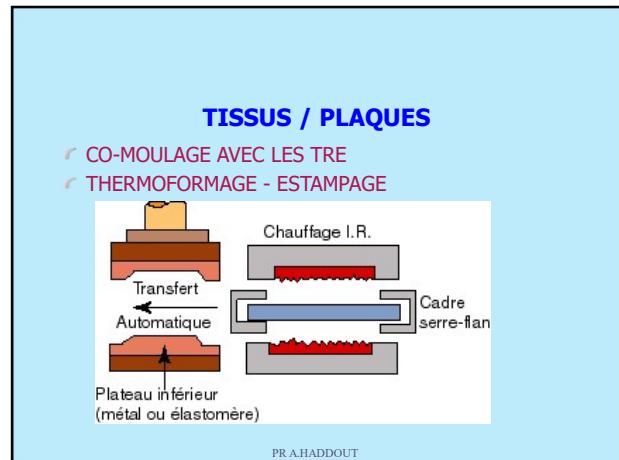
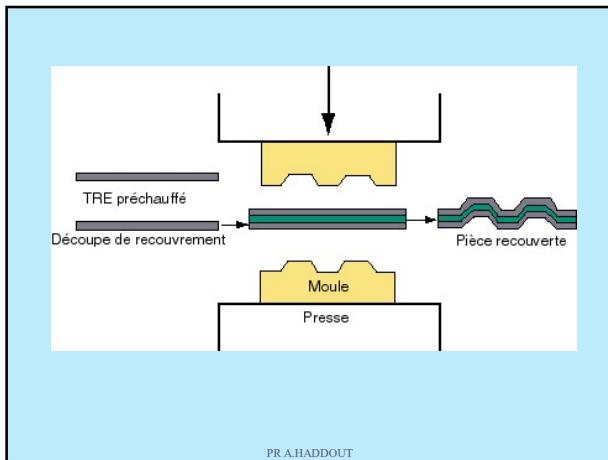
- LES DÉCOUPES SONT DÉPOSÉES SUR LA BANDE TRANSPORTEUSE
- PRÉCHAUFFAGE PAR PANNEAUX RADIANTS
- MOULAGE

PR A.HADDOUT

TRE	MOULAGE		
	AVEC FLUAGE	ESTAMPAGE PUR	
PP + mat de verre, CARACTÉRISTIQUES			
% de verre	30	35	30
Densité	1,12	1,17	1,12
λ LIN 10-6	35	30	35
σ (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

CARÈNAGES SOUS MOTEURS	STRUCTURES DE SIÈGES	SUPPORTS DE BATTERIES	DIVERS
AUDI		1	1
BMW	3		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)

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
Polymeres LES PLUS UTILISÉS	Polyépoxydes, polyesters, phénoliques, polyimides
APPLICATIONS	Composites hautes performances / aéronautique
MOULE	Outilages en acier ou alliages
TYPES DE PIÈCES caractéristiques	Fuselages et carénages d'avions, tuyères d'hélicoptères...

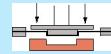
PROCÉDÉ DE MOULAGE

- Il allie les performances des composites tissus avec les cadences des thermoplastiques. C'est une plaque thermoplastique plane, à renfort tissu, chauffée, qui va épouser les formes d'un moulé, 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)

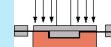
PR A.HADDOUT

DETAIL DU PROCEDE

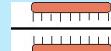
- ✓ Préchauffage de la plaque Twintex : chauffage par IR, contact ou air chaud au-delà de la température de fusion de la matrice



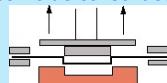
- ✓ Formage de la plaque : mise en forme par fermeture du poinçon



- ✓ 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	Saisie entaille (kJ/m²)	220	80	300	115
CHOC IZOD	Entaille (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