

Matériaux Composites (B)

- 1) Semi-produits (TD, TP)
- 2) Technologies de transformations

Composites: Semi-Produits

Les procédés de transformation des composites

→ des semi-produits élaborés séparément ou réaliser simultanément matériau et produit.

Les technologies de transformation des composites :

- la **méthode humide** consiste à imprégner les renforts au moyen de la résine liquide (**TD**) : produit et matériau composites sont réalisés simultanément.

Le préimprégné est pré-catalysé ; avant utilisation, il doit être conservé en chambre froide (-5°C).

Composites: Semi-Produits

- la **méthode sèche** consiste à mettre en forme des renforts préimprégnés avec une matrice **TD** ou **TP** et l'on dispose alors d'un semi-produit prêt à l'emploi.

La difficulté → l'accrochage de la matrice sur le renfort.

La réalisation se déroule en deux étapes :

- fabrication et stockage du semi-produit ;
- mise en forme du semi produit et polymérisation.

Composites: Semi-Produits

Résines thermodurcissables

1. Prémix, dit **BMC** (« Bulk Molding Compound ») : il se compose de renfort, de résine et de charges mélangés dans un malaxeur à pales. On l'appelle « choucroute » :

- renfort : fibres de verre coupées (longueur de 6 à 12 mm), taux de 15 à 20% ;
- matrice : résine polyester chargée de carbonate de calcium.
- le produit est livré sous forme de boudin prêt à l'emploi ; la durée de stockage est limitée.

Composites: Semi-Produits

Résines thermodurcissables

2. Mat préimprégné, dit **SMC** (« Sheet Molding Compound ») ; il est produit à partir de renfort, sous forme de **mat**, imprégné de résine, par calandrage sur un film support :

- mat de verre à fibres coupées (longueur de 25 à 50 mm), taux d'environ 30%.
- matrice : résine polyester chargée de carbonate de calcium.
- le produit est prêt à l'emploi, la durée de stockage est limitée.

Composites: Semi-Produits

Résines thermodurcissables

Caractéristiques moyennes des BMC et SMC (d'après Maurice Reyne)

Semi-produits TD	Taux de renfort (%)	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Module de flexion (Gpa)
<u>BMC</u>	25	1,8-1,9	40-70	7,5
<u>SMC</u>	30	1,7-1,8	130	14

Composites: Semi-Produits

Résines thermoplastiques

- **granulé**, dit **TPR** (« thermoplastique renforcé »), existe sous les formes :
 - *à fibres courtes* : polymères techno-plastiques ou PP, renforcés de fibres de verre (taux de l'ordre de 30%) ;
 - *à fibres longues* : fibre continue enrobée de polymère ; la fibre a la même longueur que le granulé après découpe.

Composites: Semi-Produits

Résines thermoplastiques

- **plaque**, dite **TRE** (« thermoplastique renforcé estampable ») : composée de
 - 2 feuilles de TP extrudées
 - entre lesquelles on insère 1 ou 2 mats de renforts
 - l'ensemble est repris par calandrage à chaud, puis refroidi et découpé à la demande.
 - Le renfort est constitué de mat de fibre de verre avec un taux d'environ 30%.

Composites: Semi-Produits

Résines thermoplastiques

Semi-produits utilisés dans la fabrication des composites

Type de semi-produit	Type de résine	Renfort	Structure du renfort	Mise en oeuvre
BMC	Thermodurcissable	Verre	Fibres courtes (12 mm)	Compression
SMC			Mats fibres longues (50 mm)	
Granulé TPR	Thermoplastique	Verre ou carbone	Fibres courtes ou longues (0,1 à 10 mm)	Injection
Plaque TRE			Mats de fibres courtes ou continues	Estampage
Préimprégné thermoplastique combinaison ou comélange de fils renforts/matrices (Twintex, Schappe)	Thermoplastique (PET , PP , PE)	Verre ou carbone	Mats de fibres continues ou tissu	Enroulement, pultrusion, estampage, compression

Technologie de transformations

Trois opérations sont indispensables :

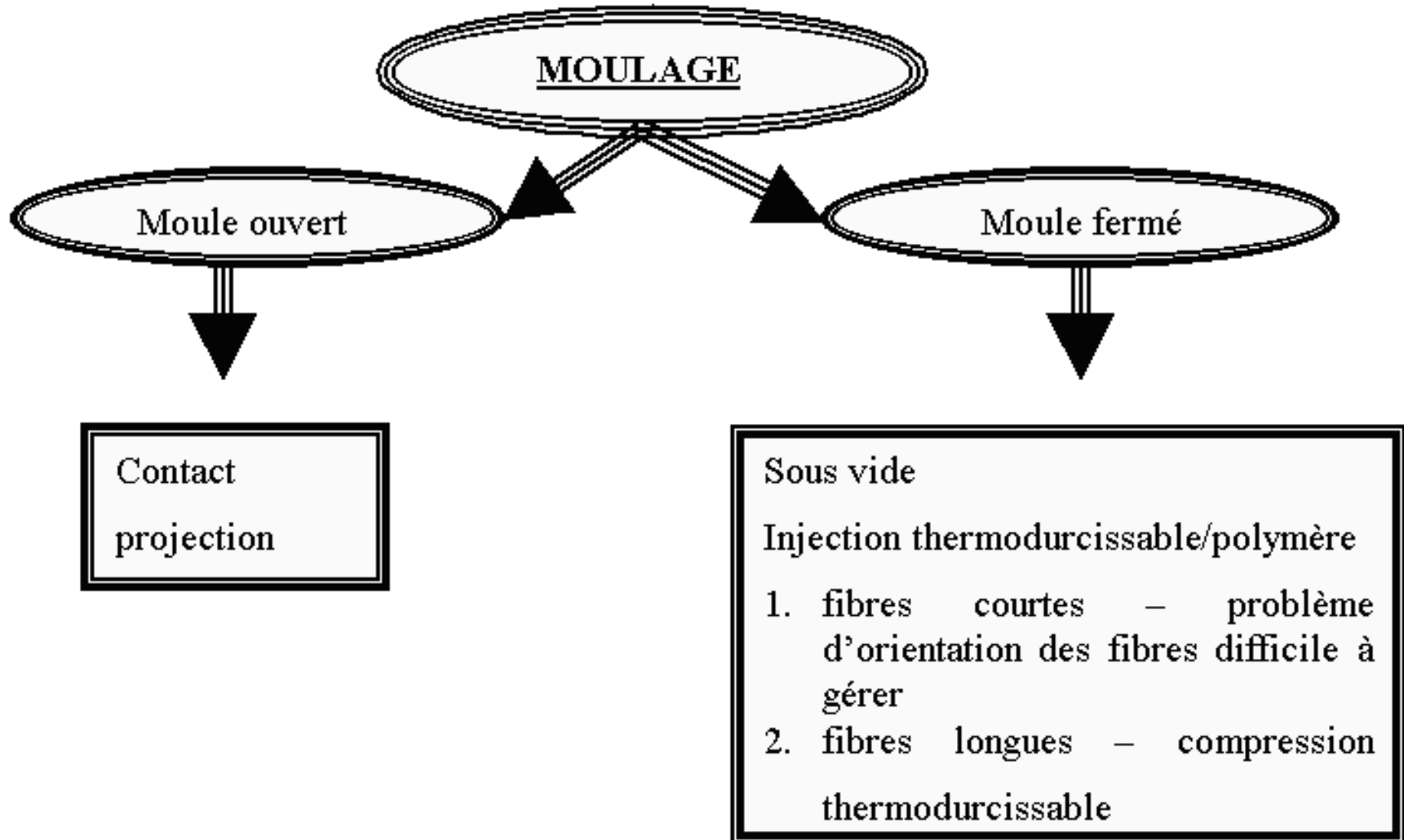
1. Imprégnation du renfort par le système résineux.
2. Mise en forme à la géométrie de la pièce.
3. Durcissement du système
 - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Technologie de transformations

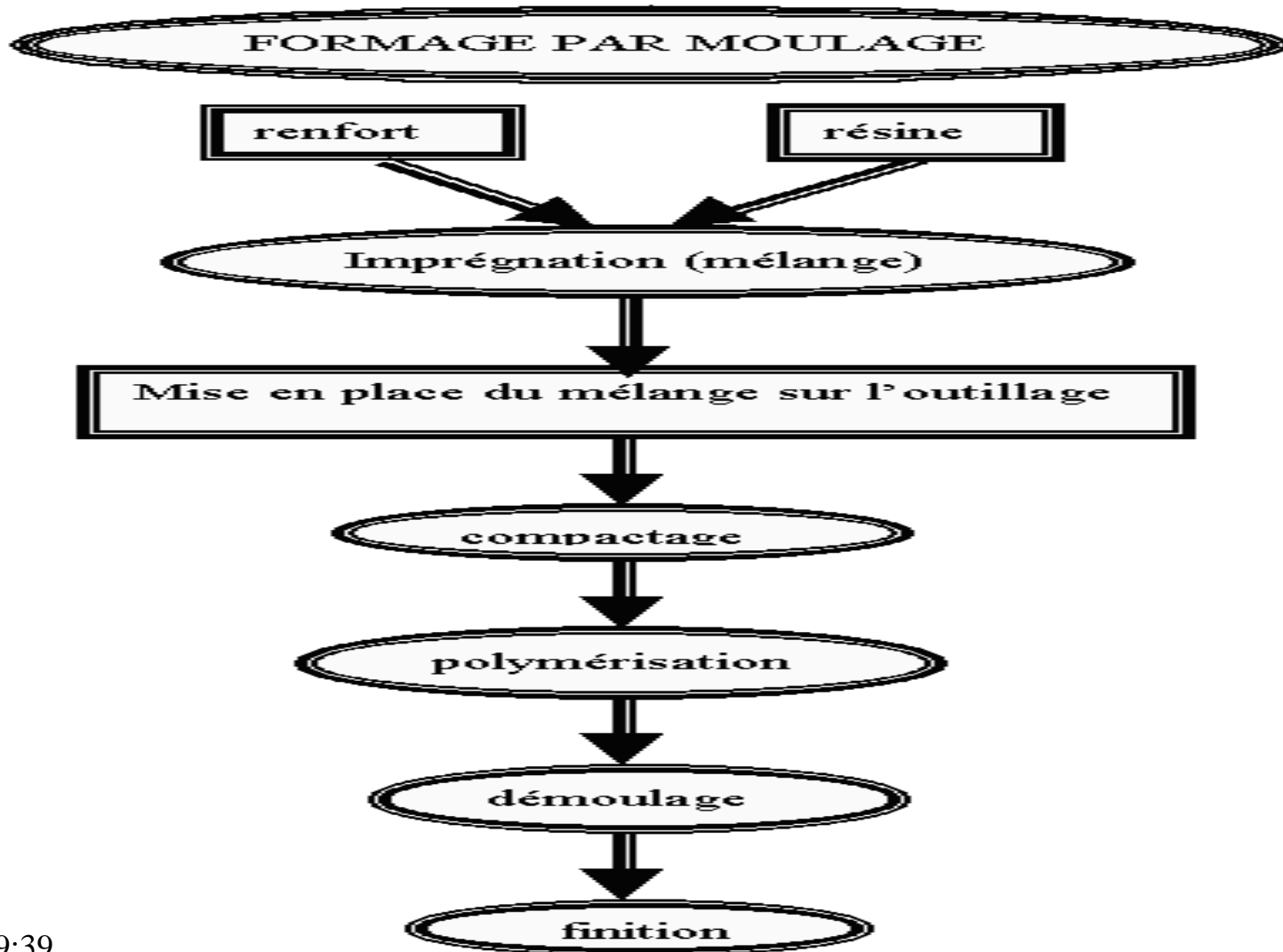
les techniques de mise en oeuvre :

- formes 3D moulées sans presse avec un seul moule (moule ouvert);
- formes 3D moulées avec presse avec deux moules (moule fermé);
- formes profilées ou produits longs ;
- formes de révolution.

Technologie de transformations



Technologie de transformations



Technologie de transformations

Les procédés les plus importants sont :

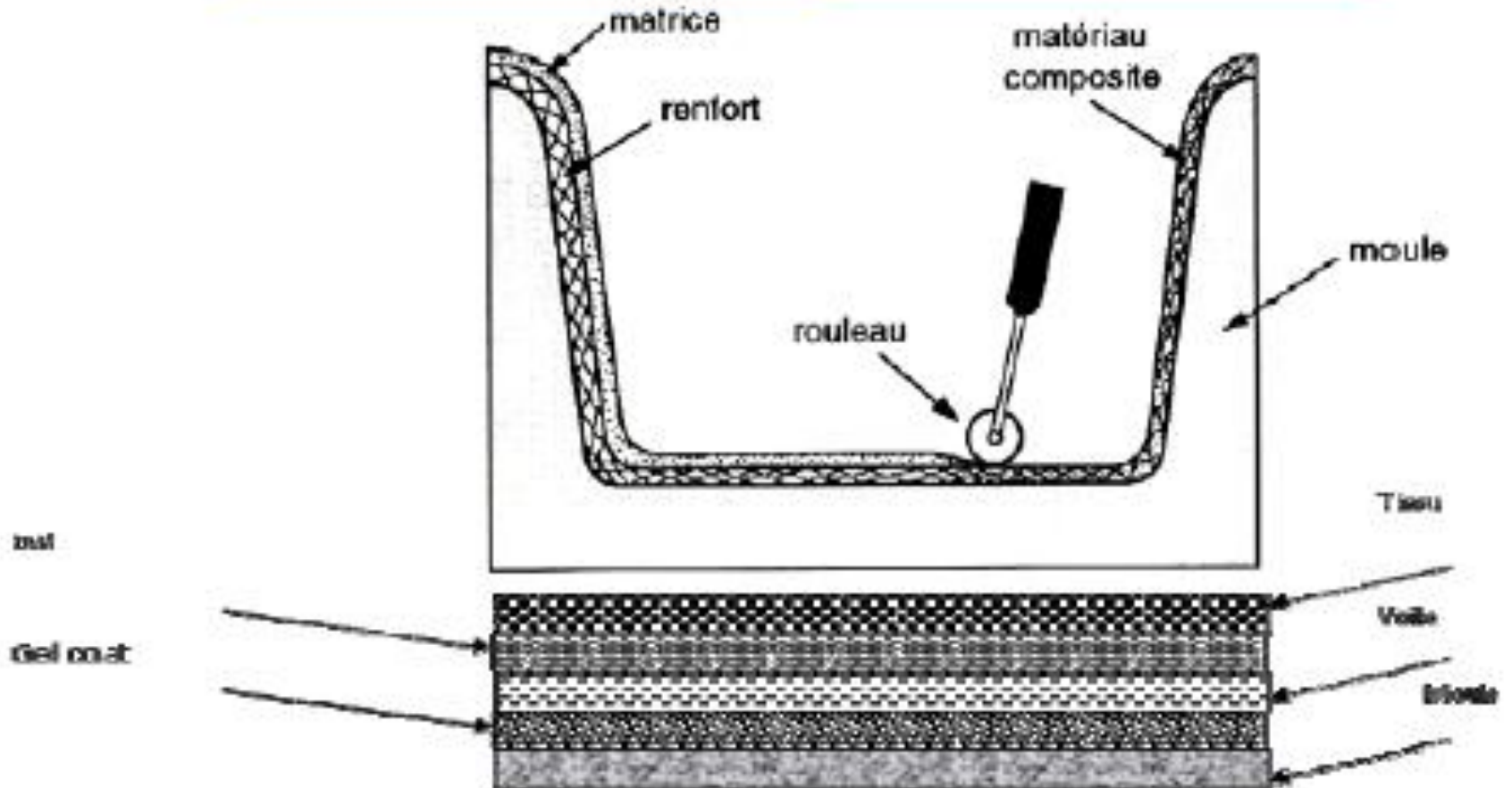
1. Moulage au contact : technologie de réalisation de pièces prototypes ou de simulation.

Le principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule.

C'est peu onéreux et des pièces de formes quelconques peuvent être réalisées mais cadence très faible.

Technologie de transformations

Renfort (30 à 40%)	Matrice
mat ou tissu de Fibre de Verre	polyester, vinylester, phénoliques



Technologie de transformations

pour la fabrication de **pièces de grandes dimensions avec moules ouverts**

- de l'aéronautique (voilure, empennage, mobilier) ;
- du ferroviaire (panneaux et aménagement de voitures) ;
- de la construction nautique (coques).

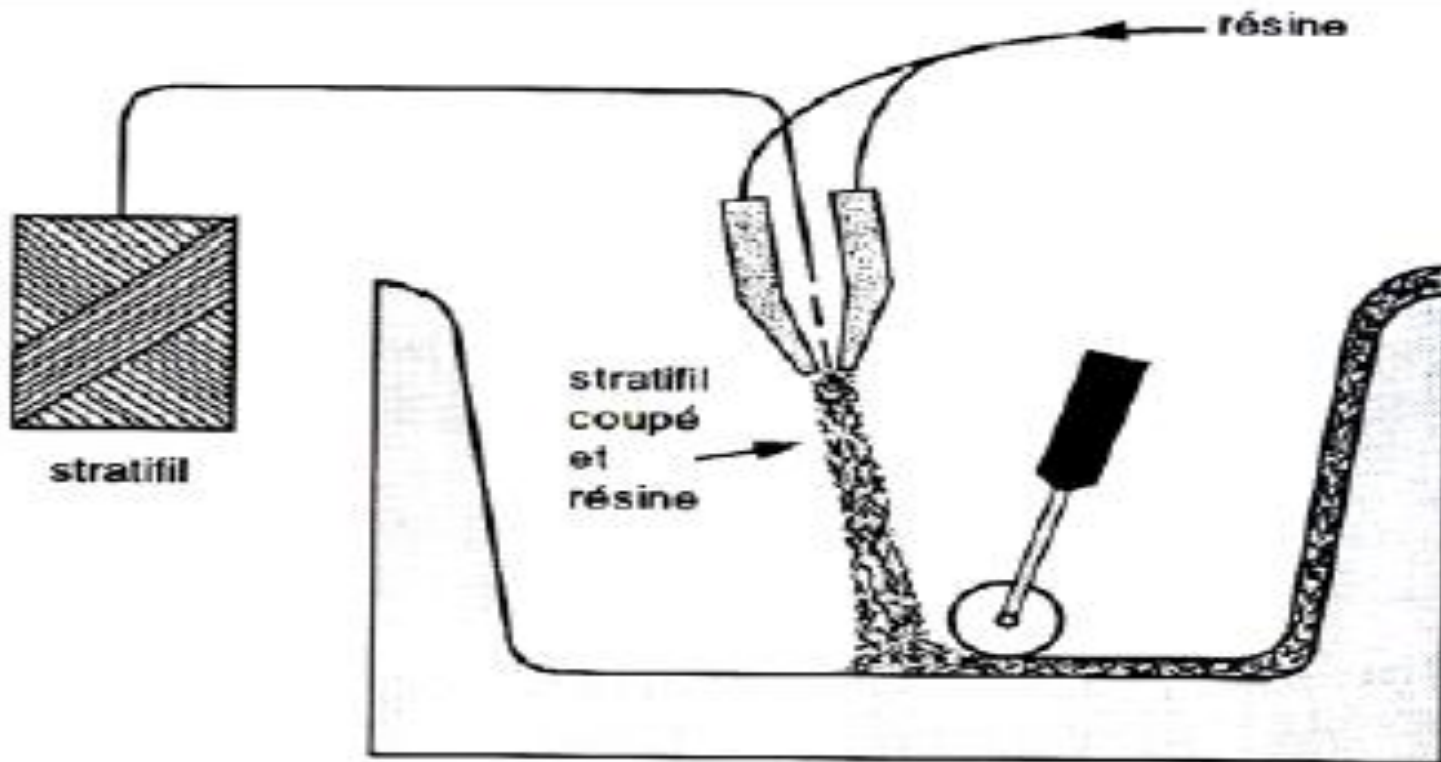
21% des composites transformés, dont 7% pour la projection simultanée :

- les émissions toxiques (COV), tel le **styrène contenu dans les polyesters insaturés**, sont limitées d'une exposition moyenne de 20 ppm depuis 2004 ;
- des **cadences sont faibles**, de l'ordre d'une **pièce par journée**, incompatibles avec la productivité des secteurs de l'automobile, des sports et loisirs.

Technologie de transformations

2. Moulage par projection simultanée :

Renfort (25 à 30%)	Matrice
Fibre de Verre coupée (longueur = 5 cm)	Polyester essentiellement



Technologie de transformations

3. Injection thermodurcissable BMC (Bulk Molding Compound ou préimprégné en vrac).

Procédé discontinu haute pression (100 bars) :

Alimentation et dosage du Compound, Injection-pression, maintien et polymérisation, puis éjection.

Les avantages sont : réalisation de grande série, faible coût matière, peu de finition, temps de cycle.

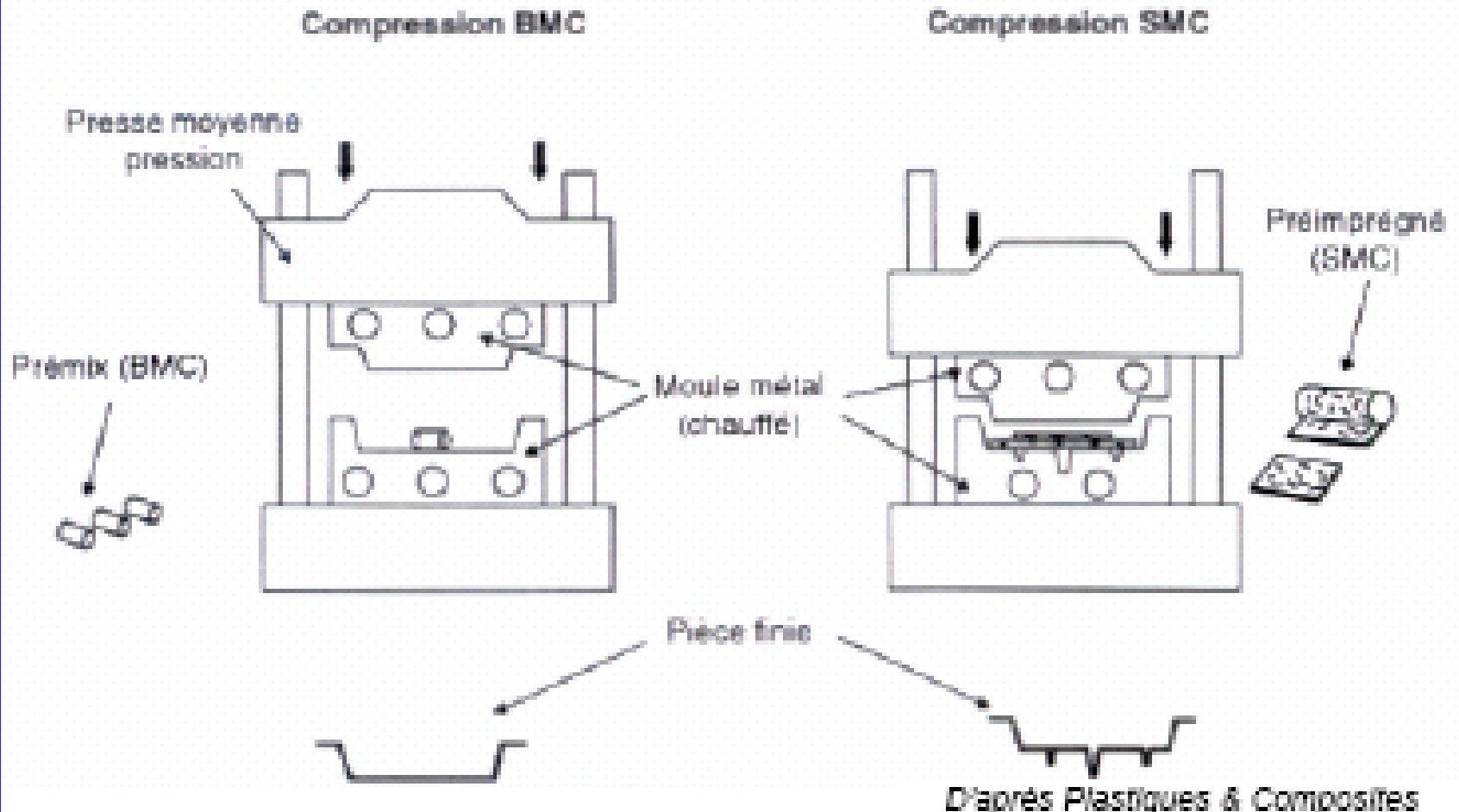
Les limites sont : le taux et la longueur des renforts et les propriétés mécaniques du composite obtenu.

Technologie de transformations

4. Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding Compound ou préimprégnés en feuilles).
Le principe consiste à déposer des feuilles de préimprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce.
Avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques.
Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition.

Technologie de transformations

Principe du moulage par compression des semi-produits



Technologie de transformations

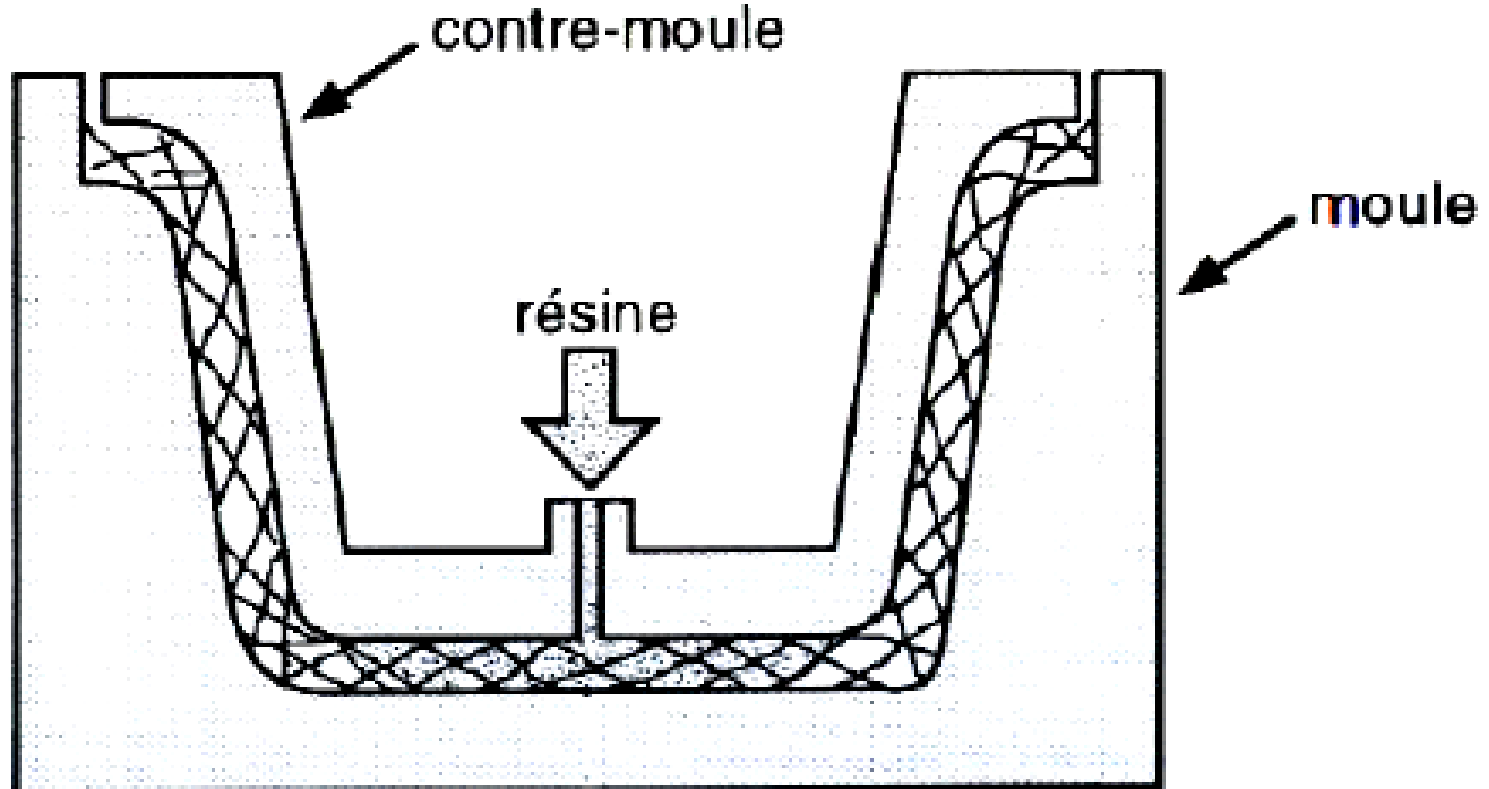
Avantages et inconvénients des semi-produits

Procédés	Atouts	Handicaps
<u>BMC</u>	Technologie compatible avec des cadences élevées (jusqu'à 600 pièces/jour) Travail en moule fermé (pas d'émission)	Durée de stockage des semi-produits Conditions de stockage (température $\leq -5^{\circ}\text{C}$) Propriétés mécaniques moyennes
<u>SMC</u>	Cadences élevées (jusqu'à 1000 pièces/jour) Résistance à des procédés haute température (cataphorèse) avec un revêtement approprié	Durée de stockage des semi-produits Conditions de stockage (température $\leq -5^{\circ}\text{C}$)

Technologie de transformations

Moulage par Injection de la résine : RTM

Possibilité d'utiliser un taux de renfort élevé qui permettra d'obtenir de pièces de hautes caractéristiques mécaniques. Fabrication de pièces profondes et de formes complexes. Possibilité d'automatiser la fabrication



Technologie de transformations

5. Pultrusion : Utilisation pour les composites hautes performances industrielles.

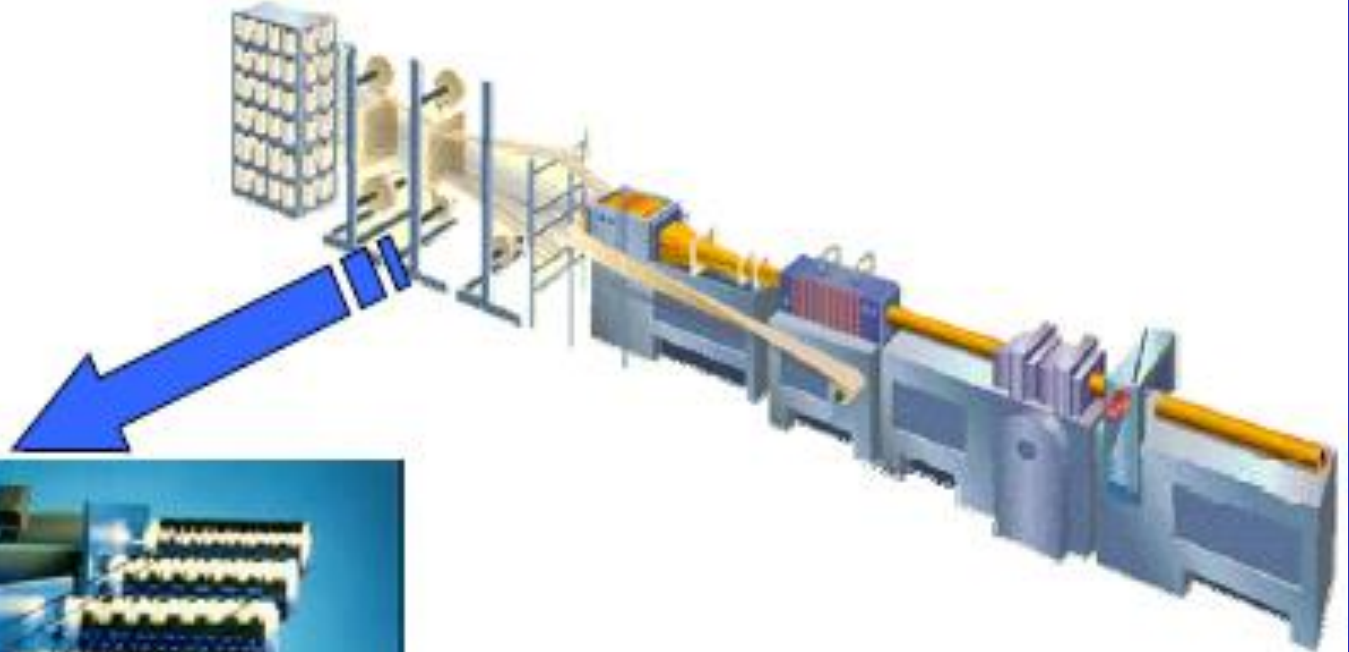
Le principe est : tirage, mise en forme et polymérisation de fibres continues imprégnées.

Les avantages sont la production en continue, possibilité de réaliser des sections très complexes, et d'avoir un taux de renfort élevé.

Les limites sont la lenteur du procédé, uniquement des profilés droits à section constante.

Technologie de transformations

Pultrusion

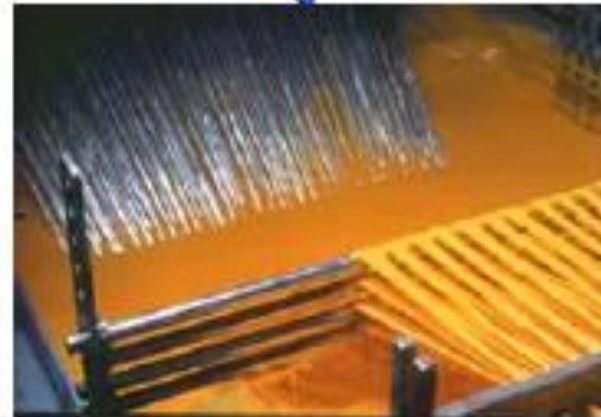
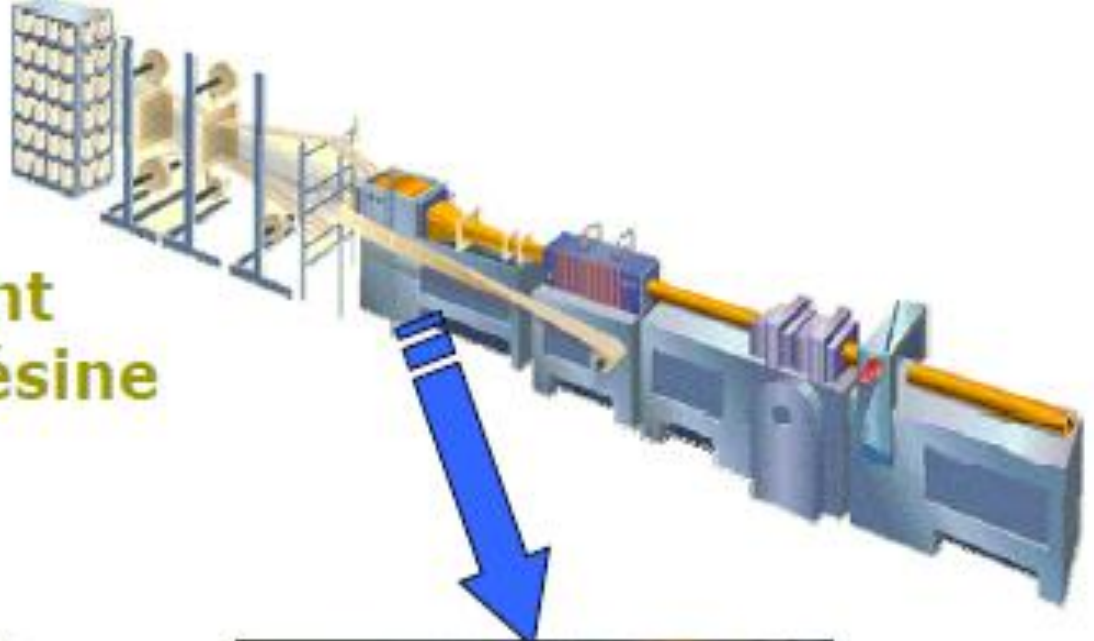


**1 - Bobines de roving
placées sur un cantre**

Technologie de transformations

Pultrusion

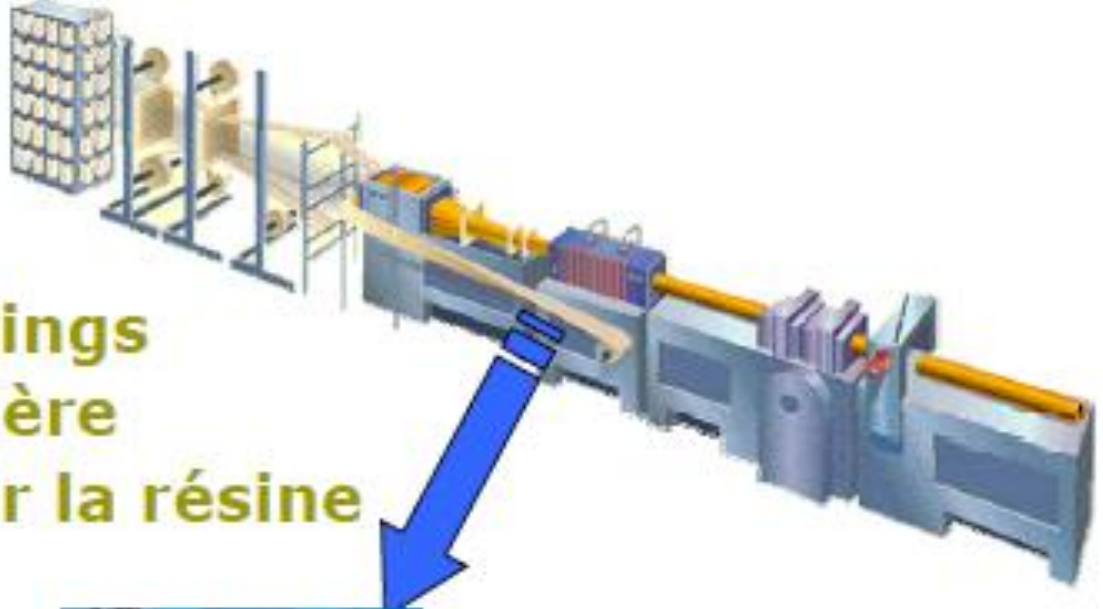
2 - Rovings passent dans un bain de résine



Technologie de transformations

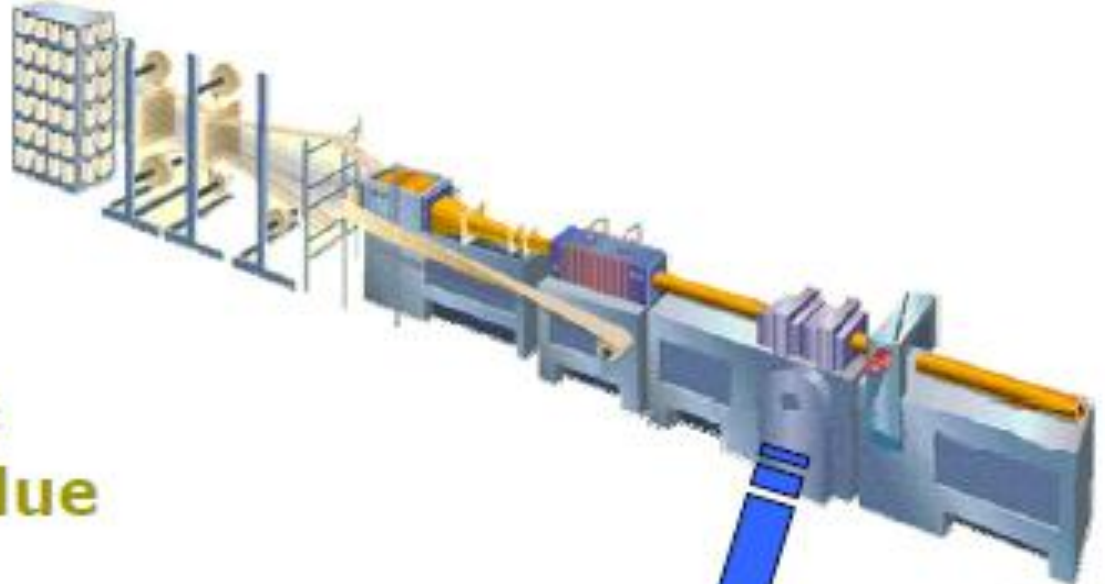
Pultrusion

**3 - Passage des roving
au travers d'une filière
chauffée pour durcir la résine**



Technologie de transformations

Pultrusion



4. Profilés coupés à la longueur voulue



Technologie de transformations

Applications	<ul style="list-style-type: none">□ Génie Civil : poutres, planchers,□ poteaux Industrial: tubes, tuyauteries
Matériaux	<ul style="list-style-type: none">□ Roving (glass, aramide)□ Renforts textiles□ Résines (UP, époxyde, thermoplastique)
Avantages	<ul style="list-style-type: none">□ Procédé continu□ Haute teneur en fibres□ Automatisé□ Pièces finies□ Matériaux bas coûts□ Vitesse jusqu'à 3 m/min
Limites	<ul style="list-style-type: none">□ Variation de section et profils□ Tolérances dimensionnelles□ Parois fines□ Investissement > 200k€

Technologie de transformations

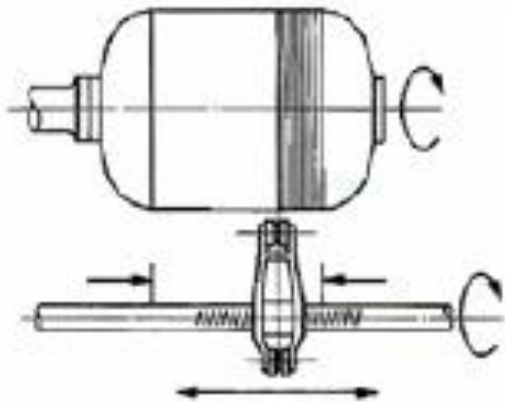
6. Enroulement filamentaire (ou bobinage):
technologie pour les HP.

Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant.

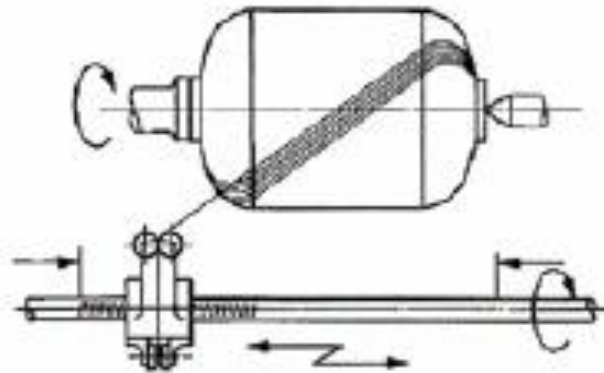
Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses.

Les limites sont que formes uniquement convexes et investissements importants.

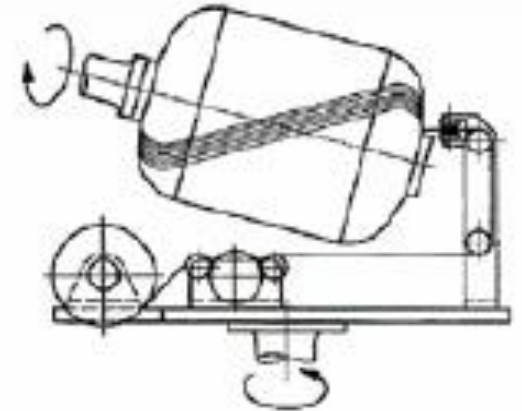
Technologie de transformations



(a) enroulement circonférentiel



(b) enroulement hélicoïdal



(c) enroulement satellite



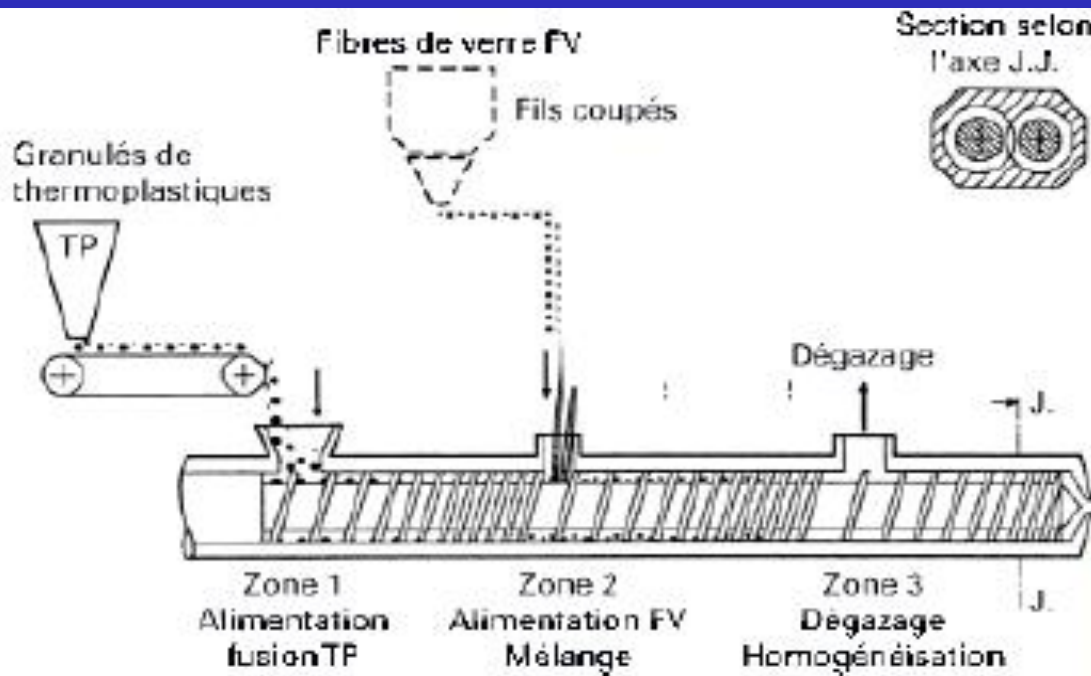
Technologie de transformations

- Fabrication de structures tubulaires ouvertes et fermées
- Procédé mécanisé
- Taux de fibre élevé
- Tout type de résine



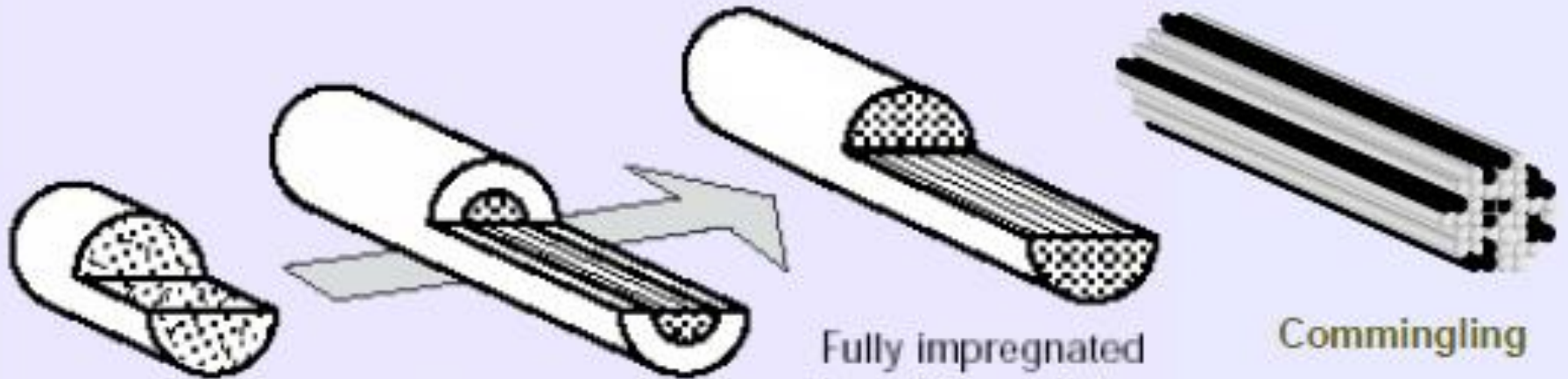
Technologie de transformations

7. Injection des TP renforcés



Technologie de transformations

Injection des TP renforcés – semi-produits



Short-fibre pellet
fibre length - 0.2 to 0.4 mm

Wire coating

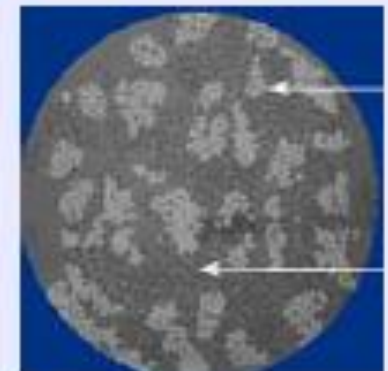
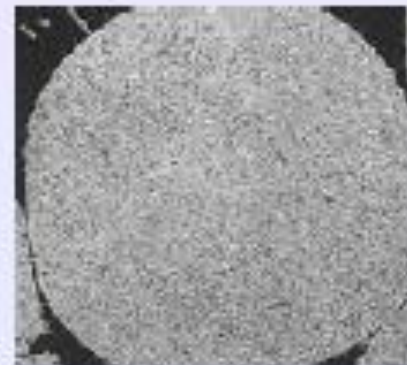
Fully impregnated
long-fibre pellet
fibre length - 10 mm

Commingling

**Fibres
courtes**
100 μm

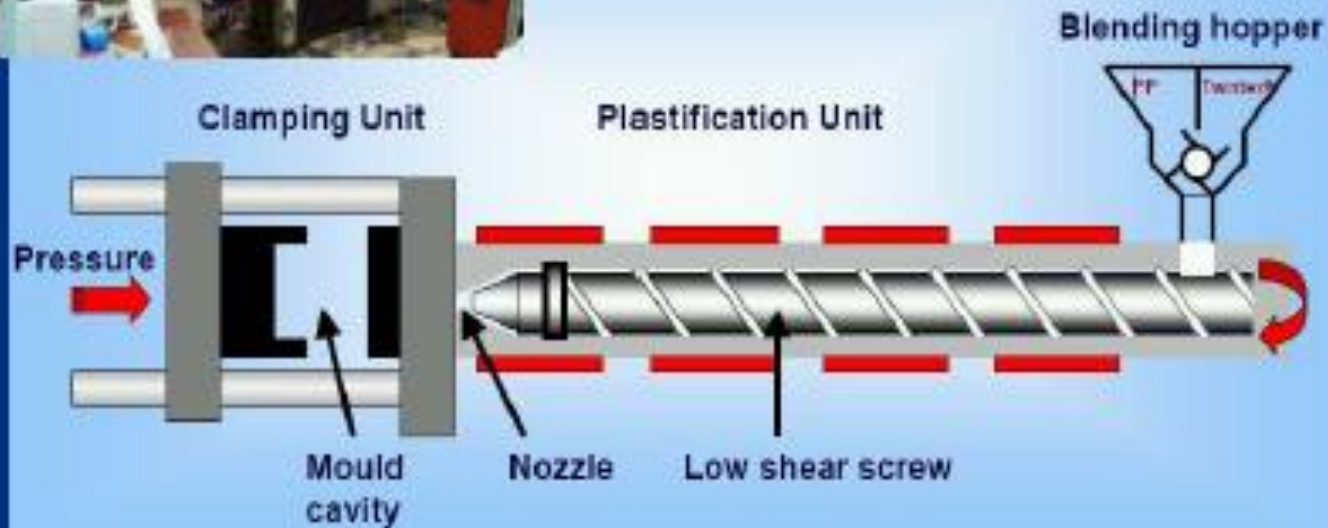
**Fibres
longues >**
1 mm - 35 mm

(Longueur initiale)



Technologie de transformations

Injection



Technologie de transformations

Injection des TP renforcés

Procédés de transformation

Avantages



- Pièces complexes
- Grandes cadences
- Possibilité d'utiliser les mêmes machines que l'injection TP classique

Inconvénients



- Coût des outillages
- Dégradation des fibres longues (fibres de longueur nominale 12 – 25 mm)



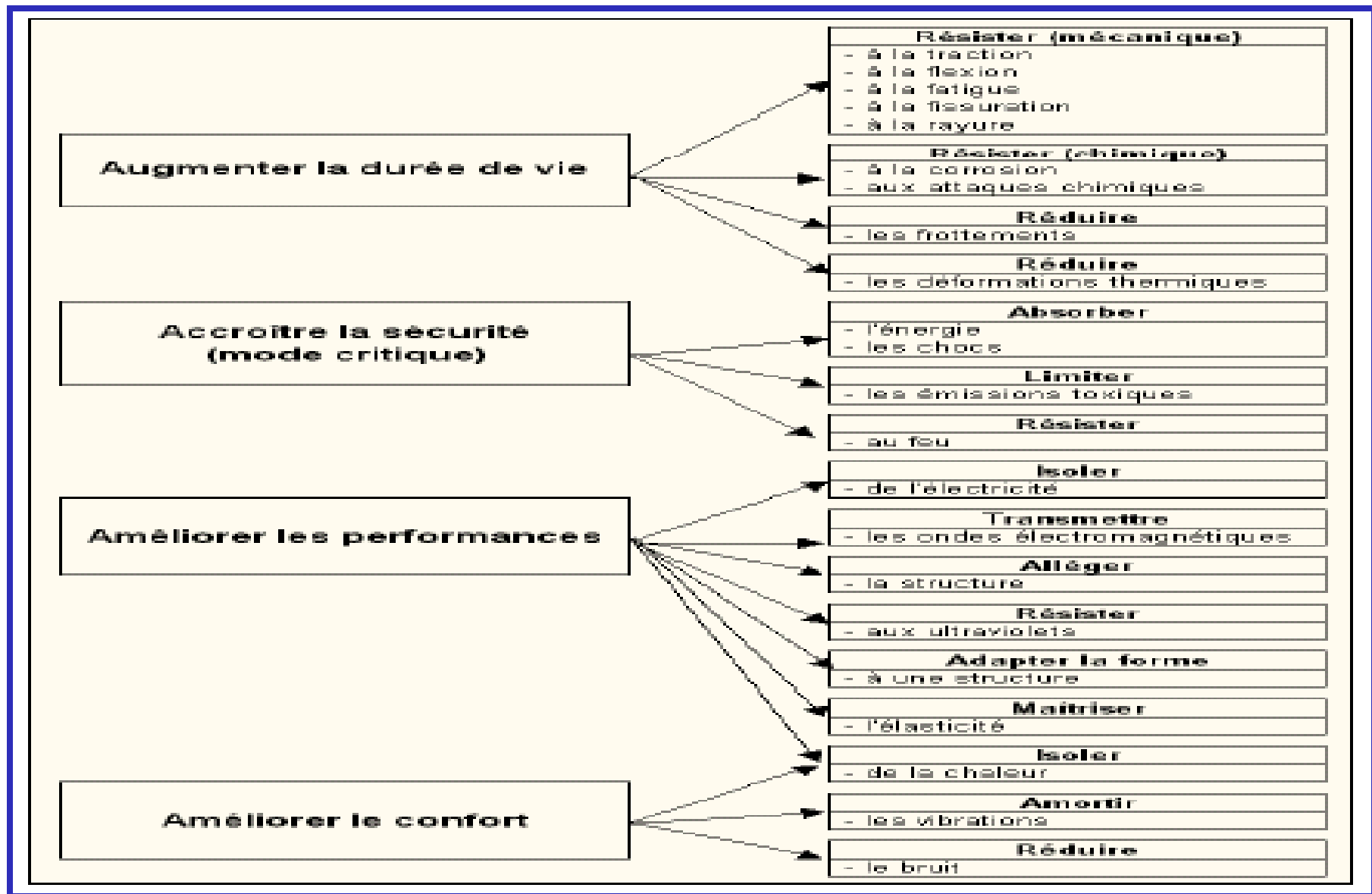
Injection-Compression
Extrusion-Compression

Répartition des procédés de transformation

(en milliers de tonnes de produits transformés)

Procédés	France	Europe	Japon	Etats Unis	Brésil	Monde
Compression SMC/BMC	105	280	136	340	3	830
Injection TPR	75	740	680	850	76	2 503
Moulage contact & projection	54	360	578	1 530	73	1 645
Enroulement filamentaire	6	200	119	0	0	358
Pultrusion	6	40	17	340	2	787
Imprégnation continu	12	60	102	68	7	286
RTM	15	60	17	102	5	215
Drapage	9	180	17	34	2	143
RIM	9	20	17	34	0	72
Estampage TRE	9	60	17	102	2	215
Total	300	2 000	1 700	3 400	169	7 150

Classification des applications par objectif

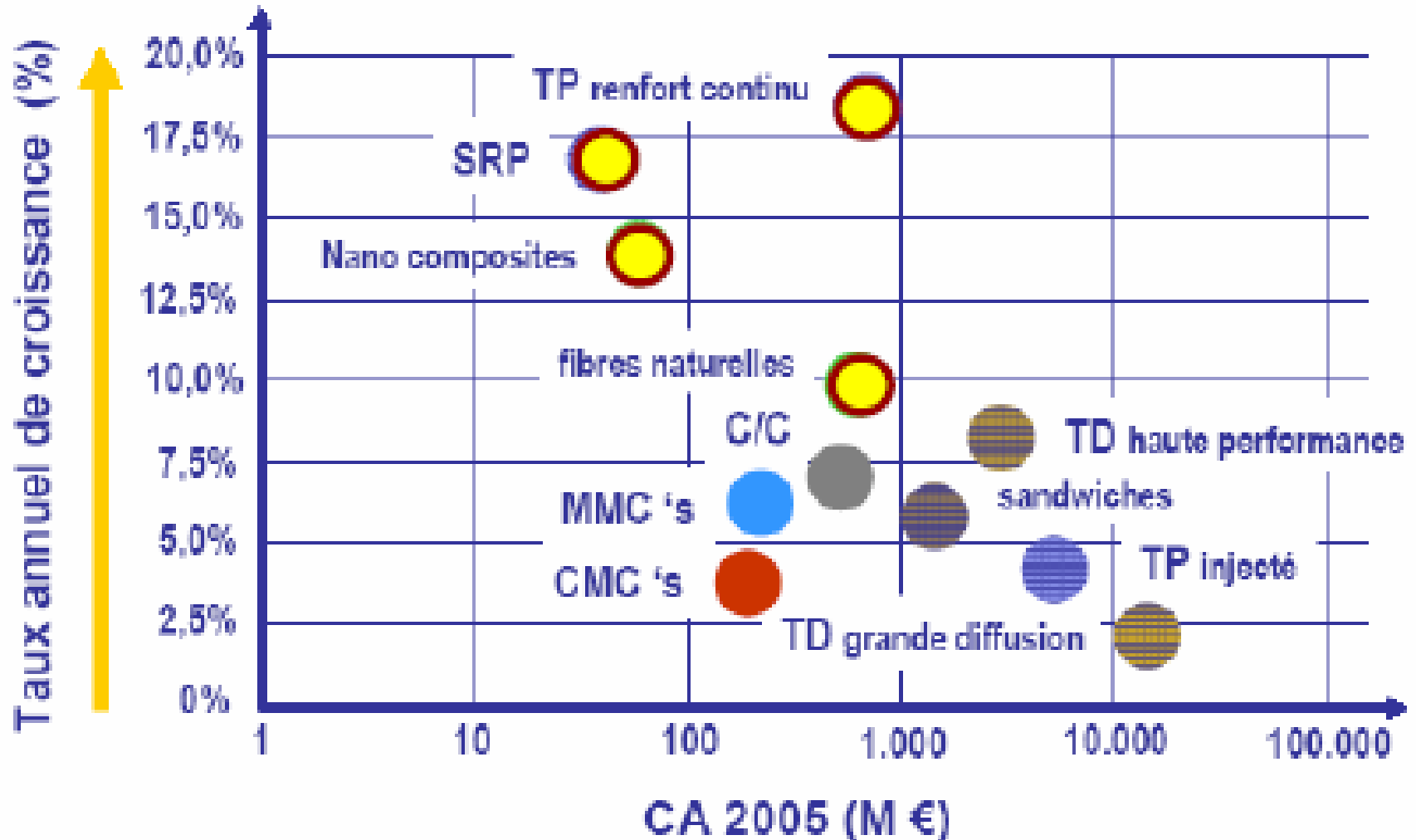


Fonctions apportées par les matériaux composites

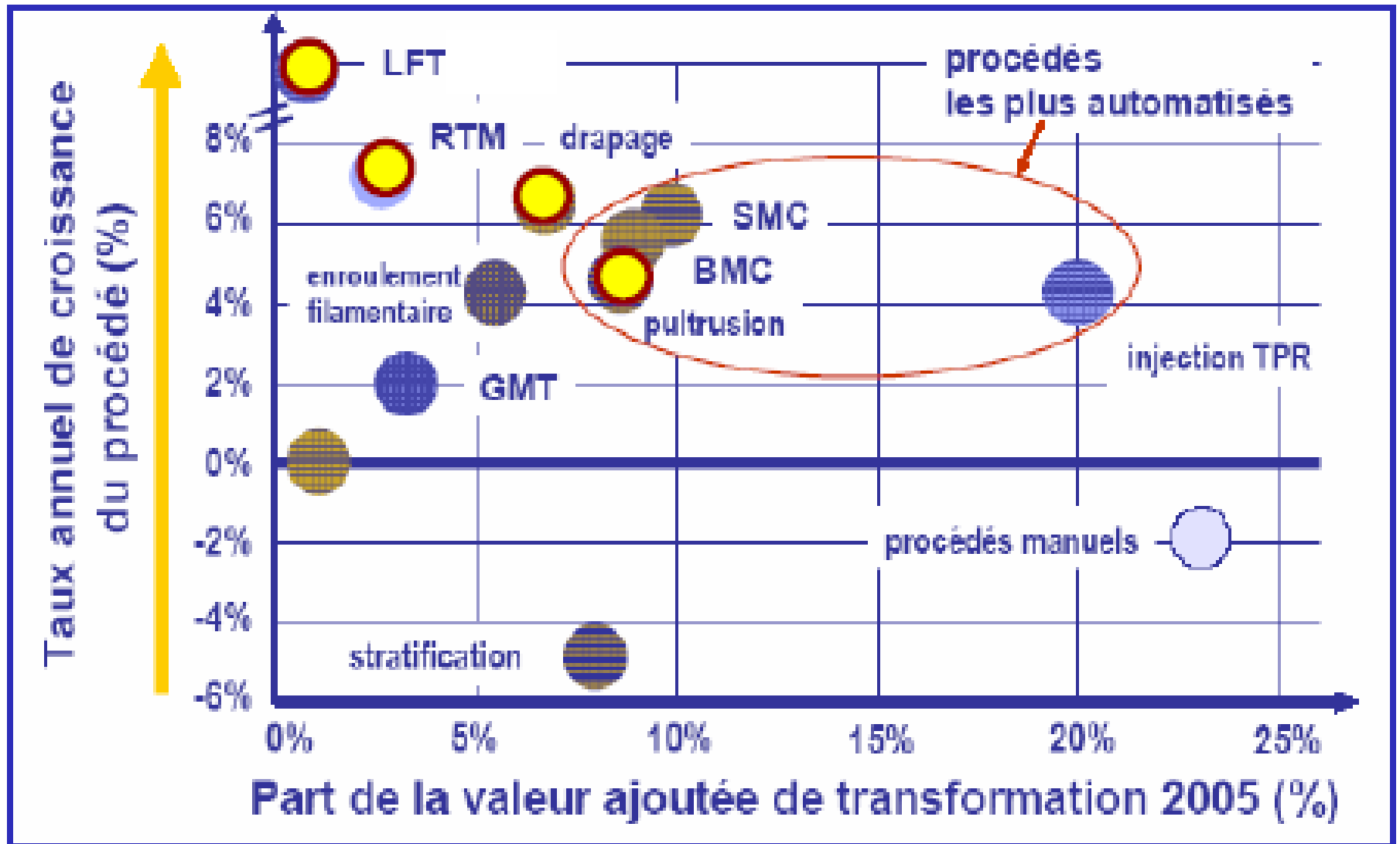
		Aéronautique	Automobile	Ferroviaire	Bâtiment	Construction industrielle	Industrie navale	Médical	Electricité	Sports & loisirs
Durée de vie	Rigidité				X		X	X	X	X
	Résistance mécanique				X	X	X	X		X
	Tenue à la fatigue	X					X			
	Résistance à la corrosion	X	X		X		X	X	X	
	Étanchéité				X	X				
Sécurité	Tenue aux chocs		X				X	X		X
	Tenue au feu	X		X	X	X			X	
	Isolation thermique				X	X			X	
	Isolation électrique								X	
	Amortissement vibrations					X				X
Conception	Intégration de fonctions	X	X						X	
	Formes complexes	X	X	X	X					X
	Transparence OEM								X	
	Allègement de structure	X	X					X		X

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

Le marché des matériaux composites

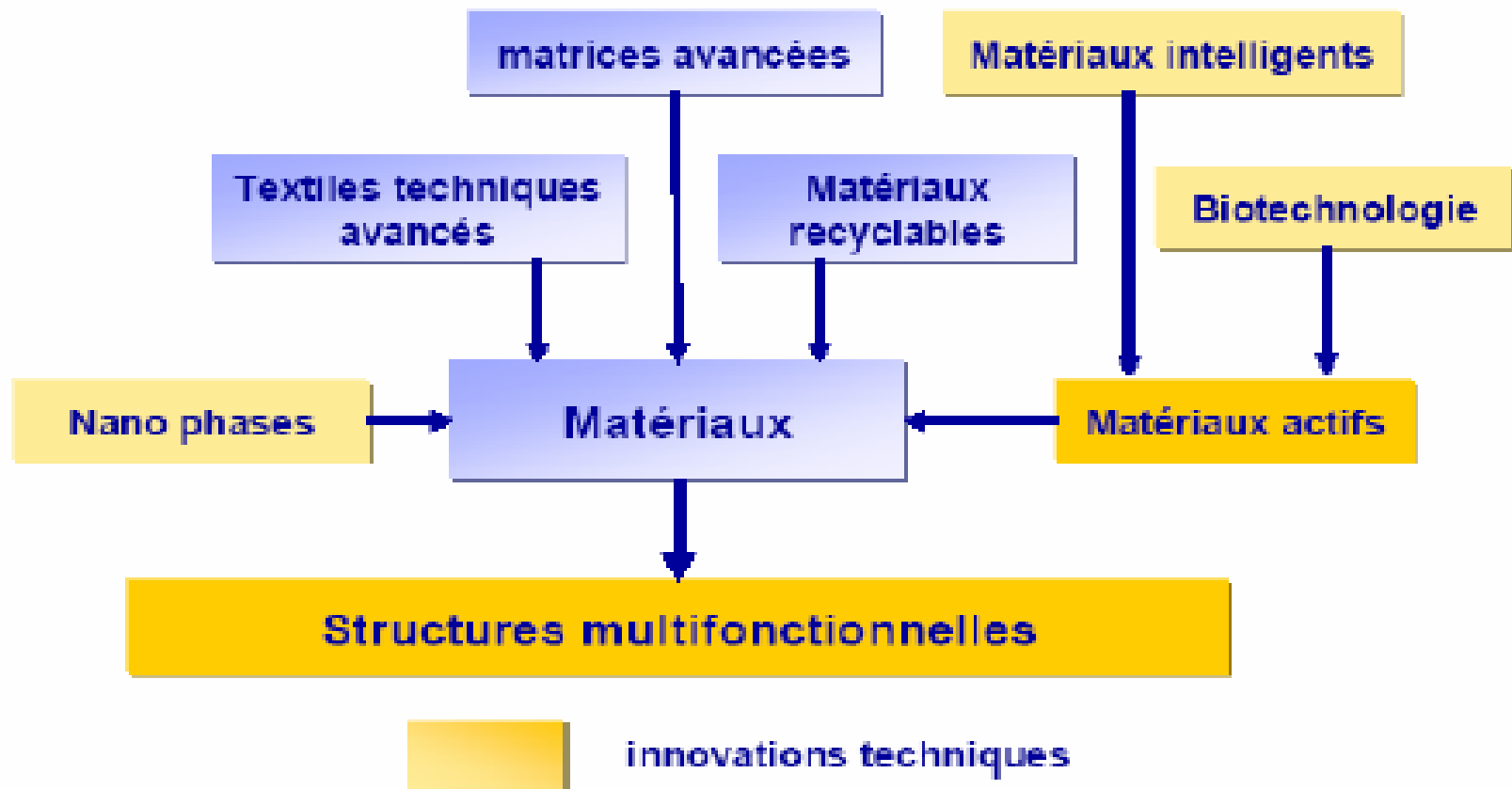


Le marché des matériaux composites



R&D en process

Nécessité d'une approche pluridisciplinaire



R&D en process

