

MSE 340-2025

Procédés de mise en œuvre Partie I

veronique.michaud@epfl.ch

Laboratory for Processing of Advanced Composites (LPAC),
Institut des matériaux (IMX)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),
CH-1015 Lausanne

Mise en œuvre des composites

En général, le renfort est déjà sous sa forme définitive: fibre, poudre de composition donnée, et potentiellement tissé ou assemblé.

-> C' est la matrice qui est transformée lors de la mise en œuvre

-> L' interface est aussi créée lors de la mise en œuvre

La mise en œuvre doit assurer:

- de préserver l' intégrité du renfort et son orientation si nécessaire
- de fournir une matrice qui entre en contact intime avec le renfort, développe les propriétés mécaniques désirées, et présente peu de défauts.
- d' être la moins chère possible, et la plus rapide possible pour un cahier des charges donné.

Plan des 3 cours sur la mise en oeuvre

- 1- Exemples des différents procédés de mise en œuvre qui existent, comment les classer et les sélectionner pour quelle application?
- 2- Phénomènes physiques lors de la mise en œuvre, comment modéliser la cinétique de mise en œuvre?
- 3- Exemples et exercices d'application, quelques mots sur le recyclage des composites

Comment choisir quel procédé?

Un procédé? Les conditions de mise en œuvre? La nature de la matrice, la nature et la forme du renfort, etc...?

1 - cahier des charges de la pièce: forme, propriétés mécaniques, environnement: humidité, température, UV

2- choix des matériaux, et de plusieurs possibilités de design de la pièce.

3- mise en œuvre? Dépend du choix des matériaux et du design, mais aussi des contraintes de fabrication: nbre de pièces par an, cout des équipements, capacité des fours, etc..

Comment choisir?

4 - Mise en œuvre choisie...comment garantir que la qualité des pièces sera bonne (orientation des fibres, adhésion fibre-matrice, taux de porosité, respect des propriétés utilisées lors de la phase de design...)?

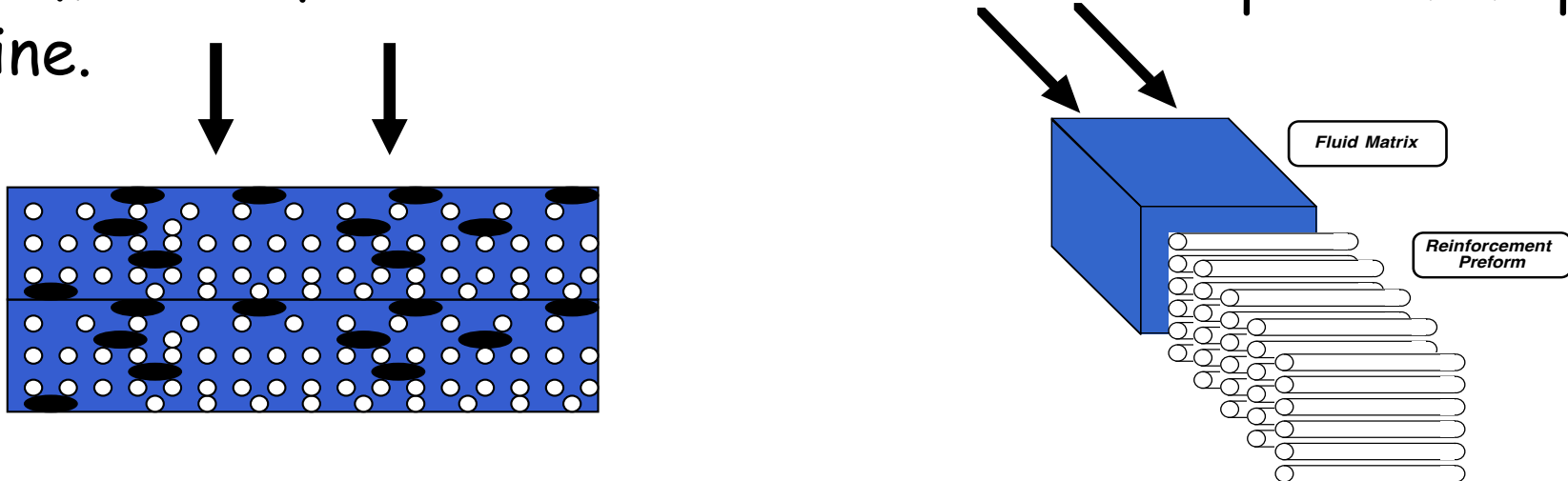
5- Comment être sûr que l'on a optimisé la production en termes de coût, cadence, qualité, choix des consommables (moule, bêche, démoulant, etc) ? Impact économique et environnemental de la pièce au cours de sa vie?

-> Connaître et maîtriser les phénomènes physiques, mécaniques, etc...

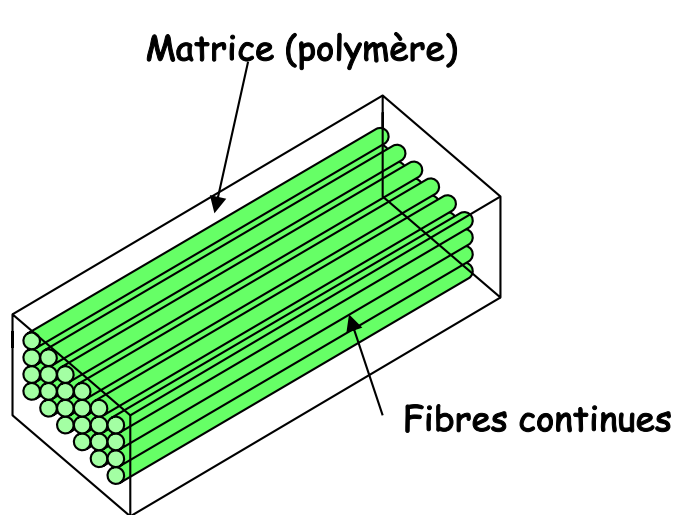
Panorama des méthodes de mise en œuvre des composites

Comment classer les méthodes?

- Classement en fonction du type de résine, thermodurcissable ou thermoplastique (traditionnel, lié à la viscosité du fluide)
- Classement en fonction du facteur de forme du renfort, L/d , et de l'orientation (aléatoire versus fibres alignées)
- Classement en fonction de la distance relative parcourue par la résine.

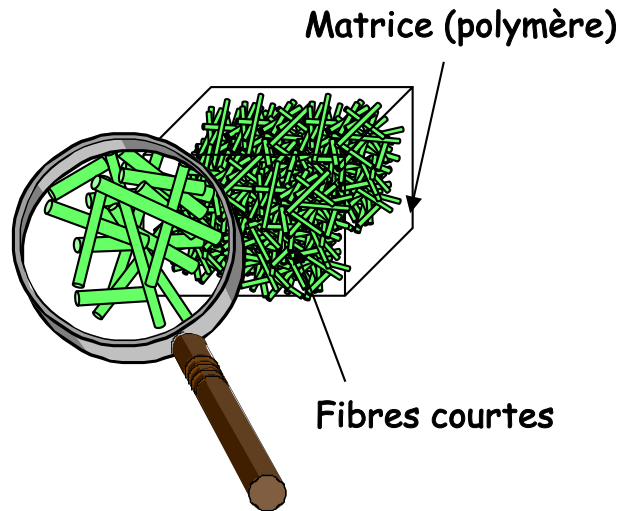


Facteur de forme des renforts



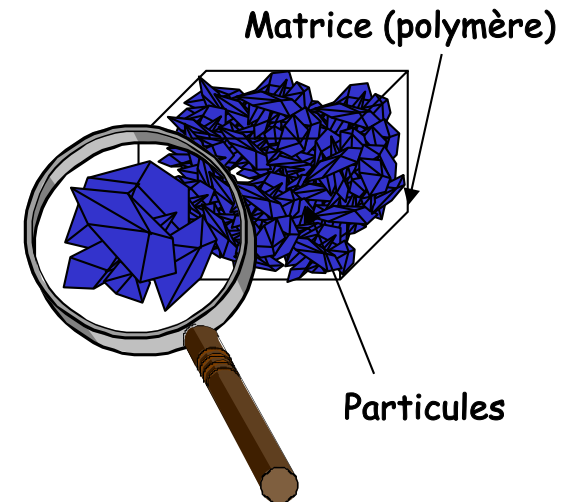
- Fibres orientées
- Composites unidirectionnels (UD)
- Thermodurcis, thermoplastiques

$L/d > 1000$
Méthodes
adaptées aux
fibres longues



- Distribution de fibres courtes ($< 3\text{mm}$)
- Surtout des matrices thermoplastiques

L/d entre
100 et 1000

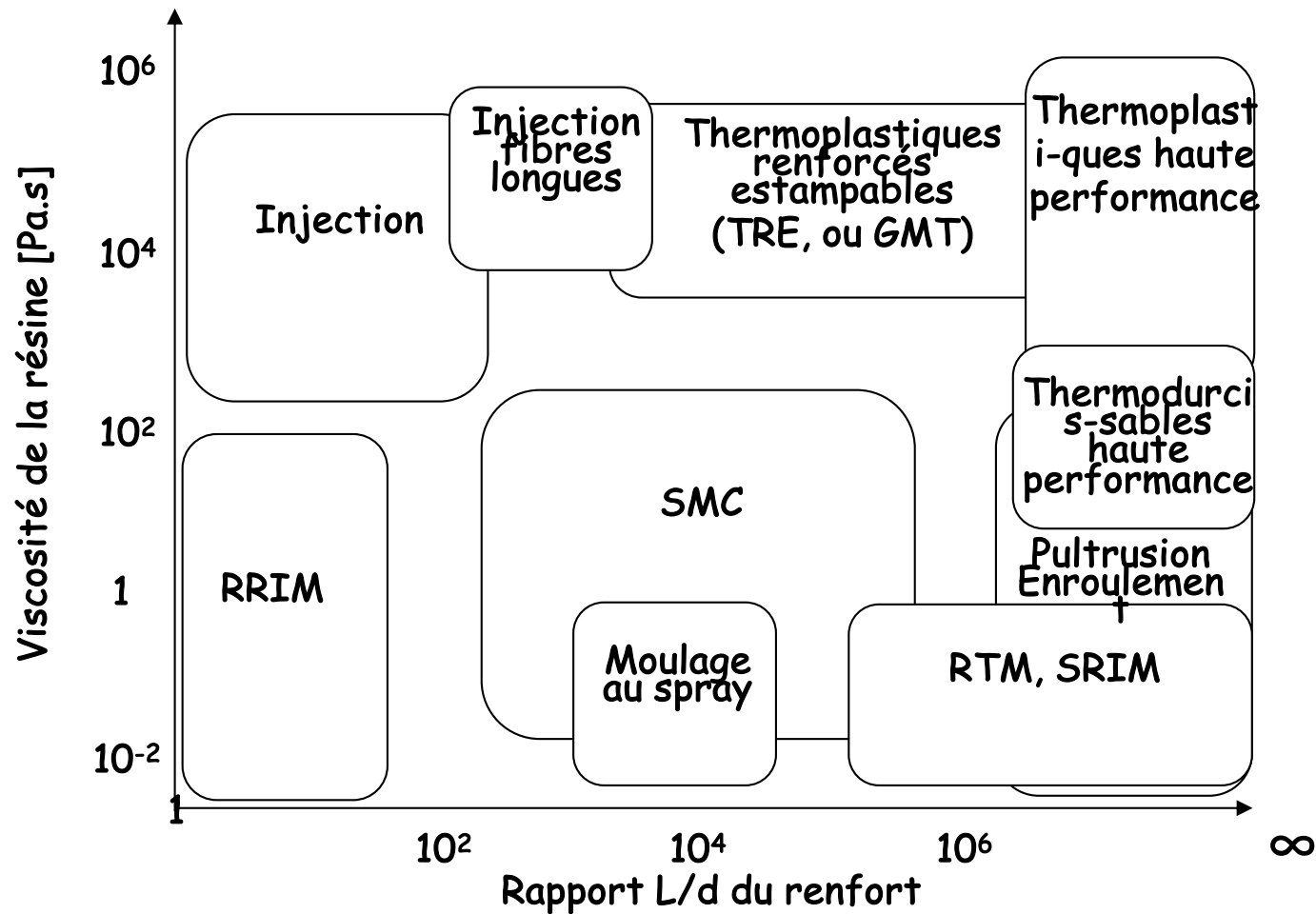


- Particules ($1-400\mu\text{m}$), silice, argile...
- Thermodurs et thermoplastiques

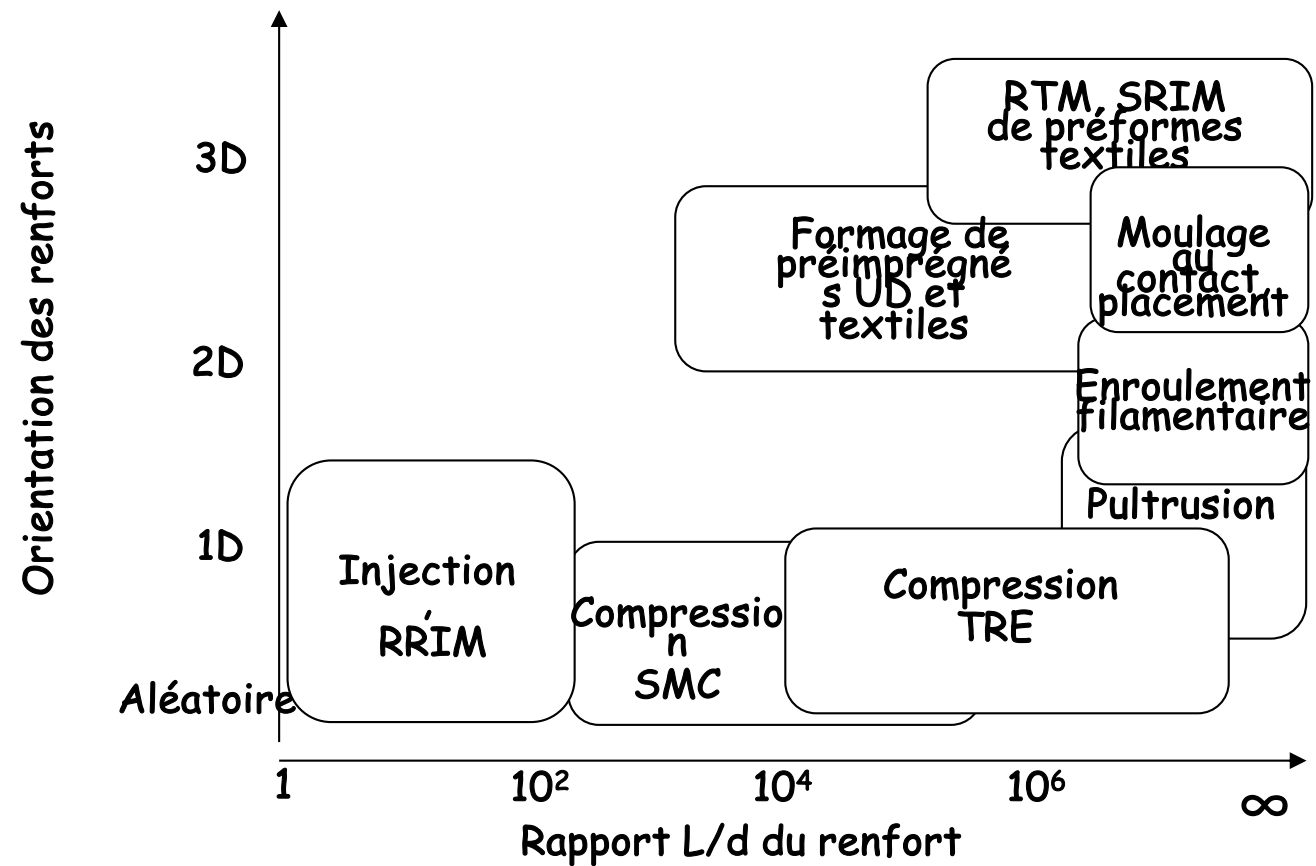
$L/d < 100$ (et
nanorenforts de large
 L/d)

Méthodes héritées de la plasturgie,
mise en oeuvre de polymères chargés

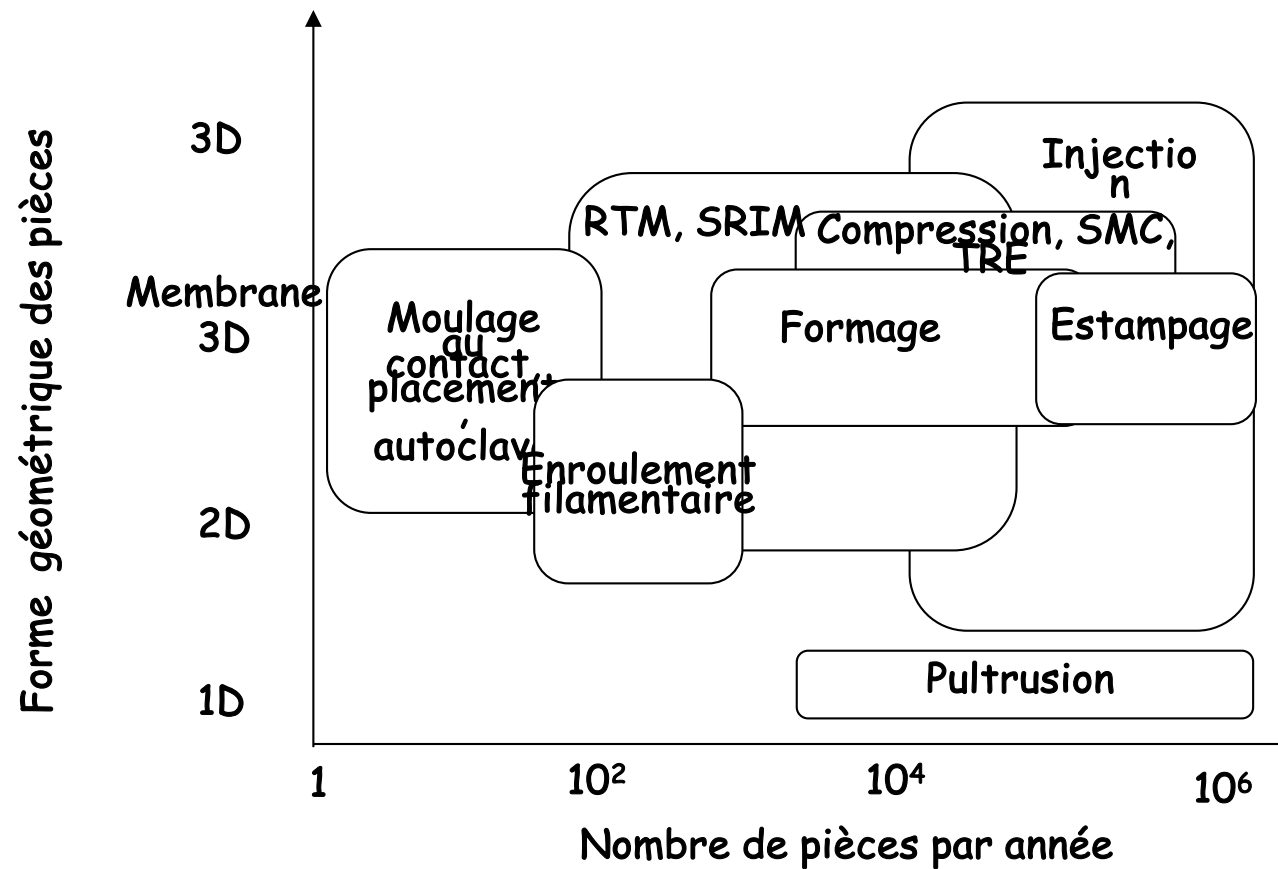
Sélection



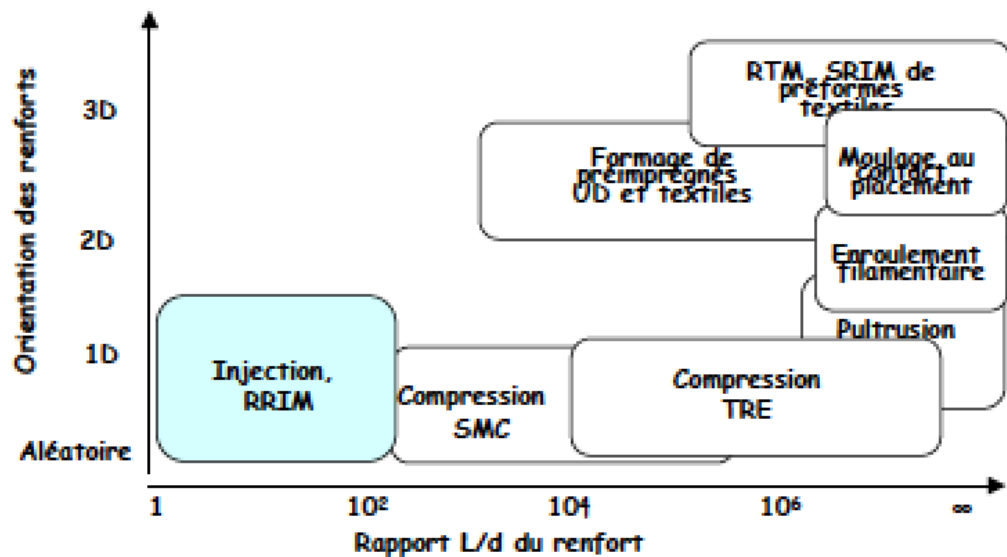
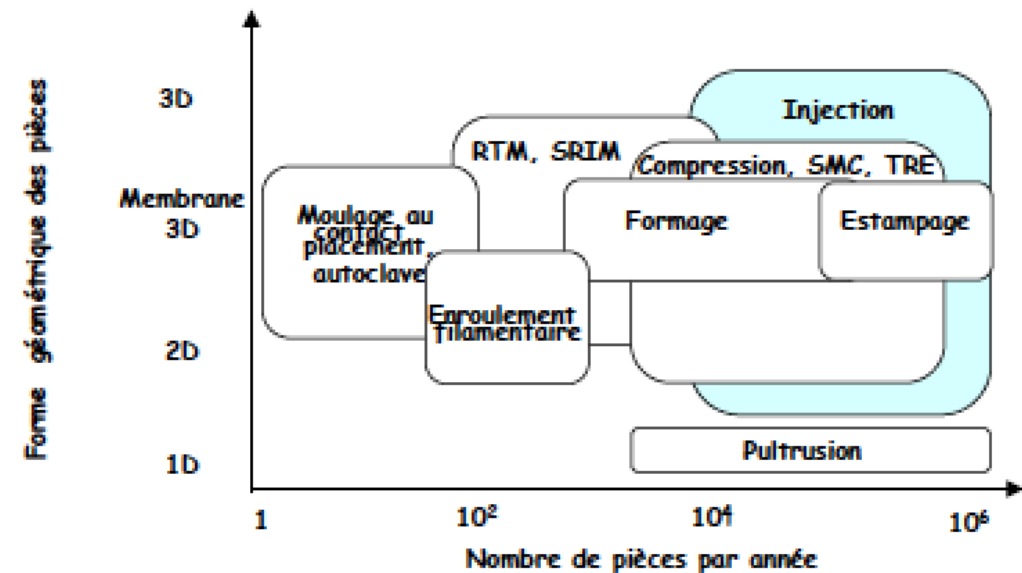
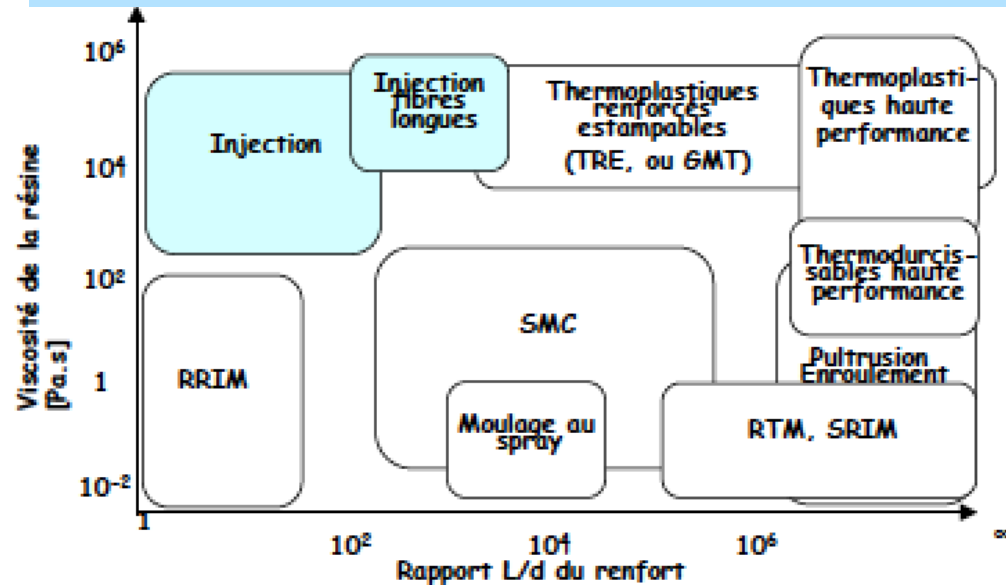
Sélection



Sélection



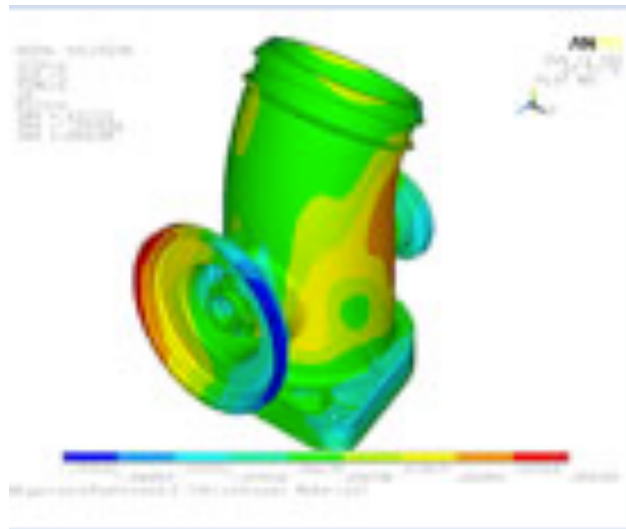
Fibres courtes/résines thermoplastiques



(a) Préimprégnés → moule → mise en forme

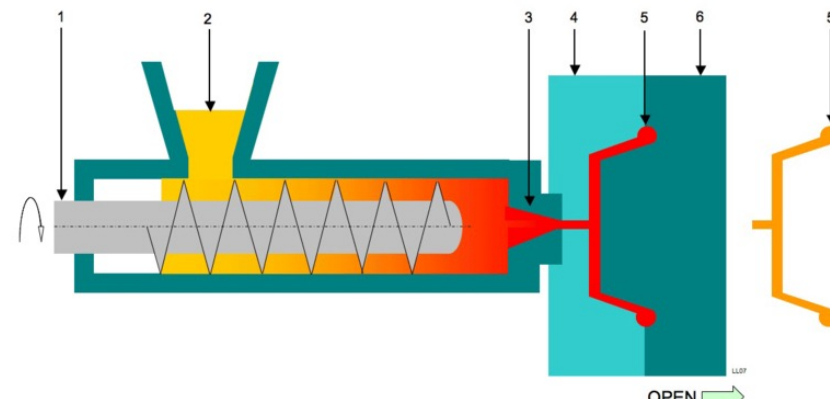
(b) Fibres → renfort textile
 Résine → moule → imprégnation par moulage

Moulage par injection



Thermoplastiques
Fibres courtes

Pièces complexes



www.plasticmould.net

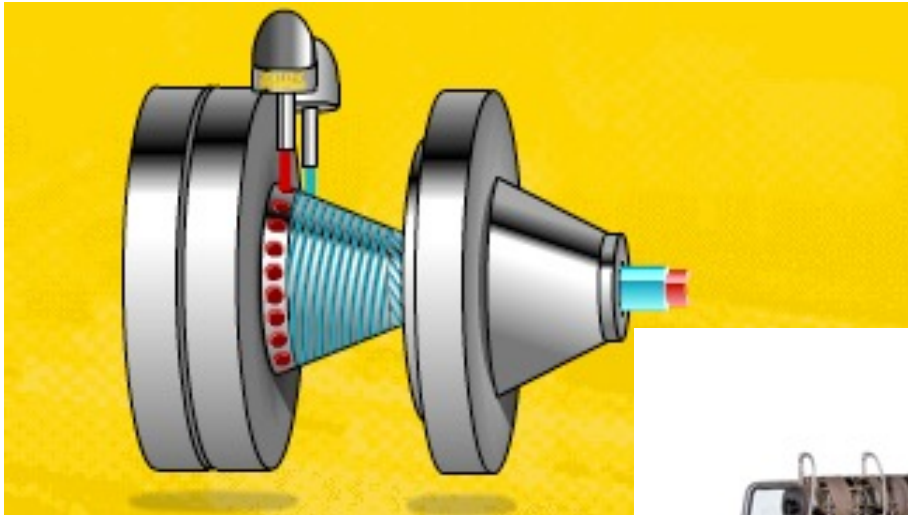
Avantages :

Pièces complexes
Qualité des pièces
Cadences élevées

Inconvénients :

Coût de l'outillage
Limité aux fibres courtes
Orientation des fibres
Limité aux petites pièces

Moulage par extrusion



Conical extruder

Thermoplastiques
Fibres courtes
Profilés, plusieurs couches possibles



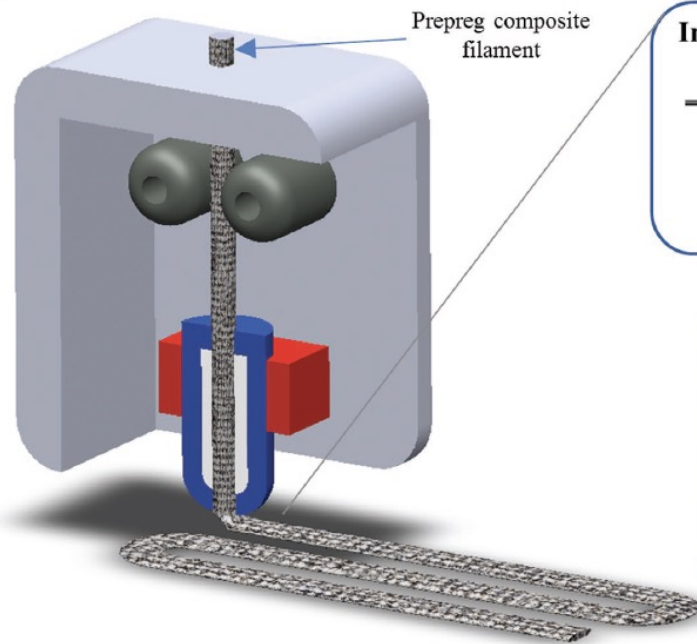
Twin screw extruder



Avantages :	Inconvénients :
Coût Qualité des pièces Cadences élevées	Coût de l'outillage Limité aux fibres courtes Orientation des fibres Limité aux profilés

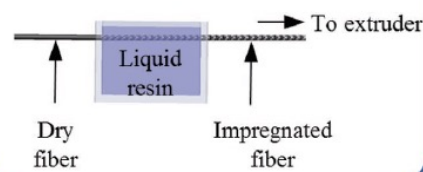
Fabrication additive: Fused Deposition Modelling

(a) Fused Filament Fabrication

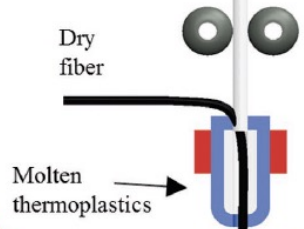


Other Approaches

In-situ coating with liquid resin



In-situ fusion with molten thermoplastic



Thermoplastiques
Fibres courtes
Formes complexes



Arevo labs

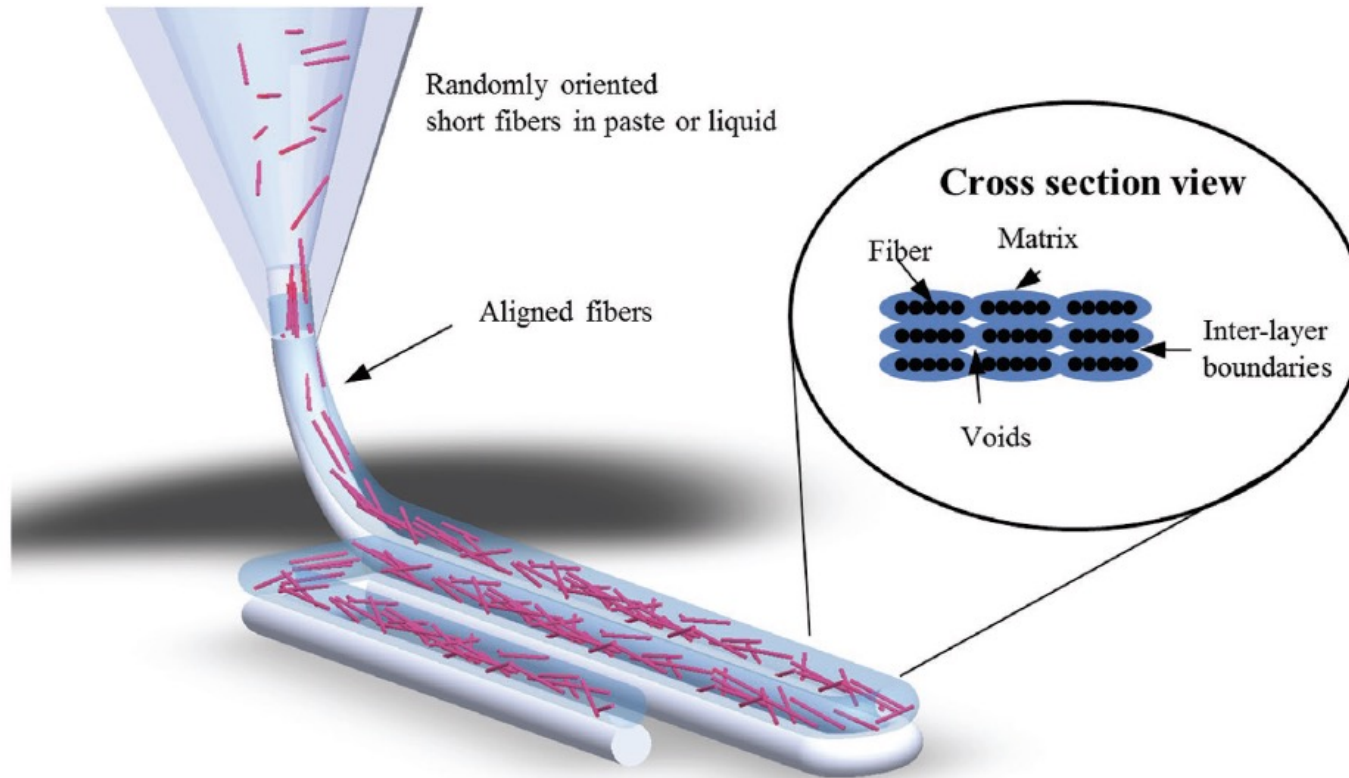


Mark Forged

Adv. Mater. Technol. 2019, 4, 1800271

Avantages :	Inconvénients :
Coût faible de l'équipement Réalisation de prototypes	Limité aux fibres courtes, tentatives avec des fibres longues en cours Qualité, propriétés mécaniques transverses

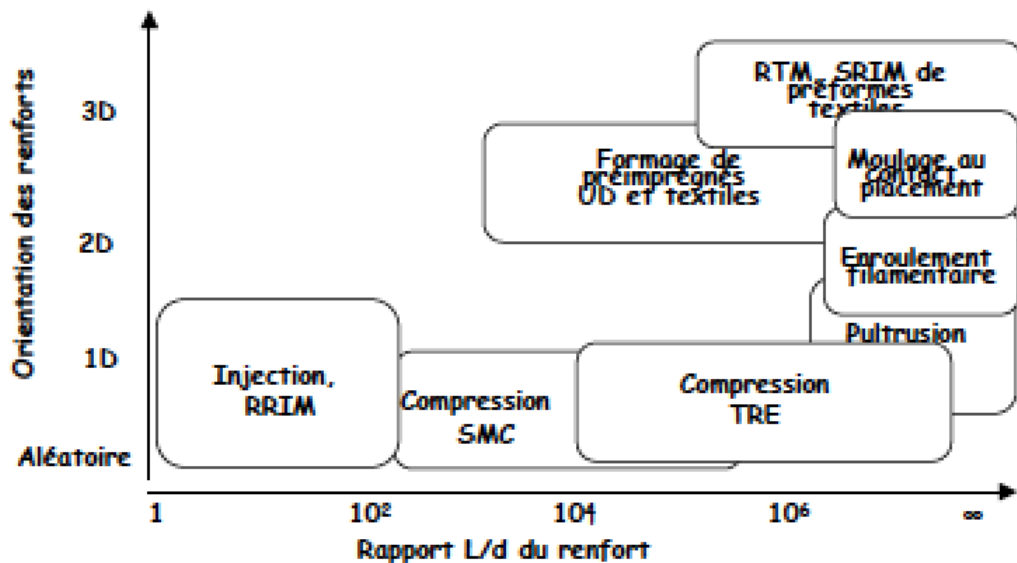
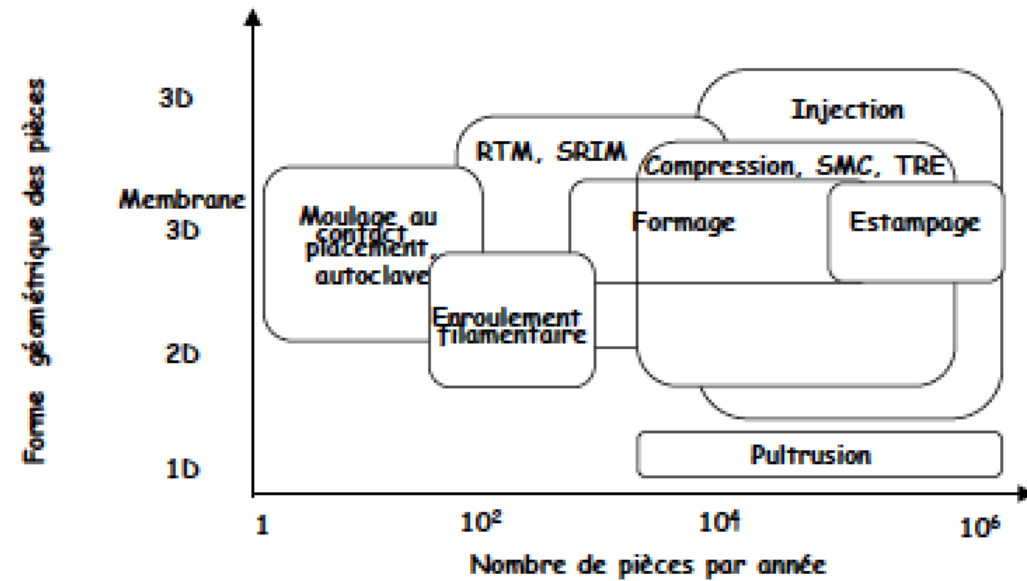
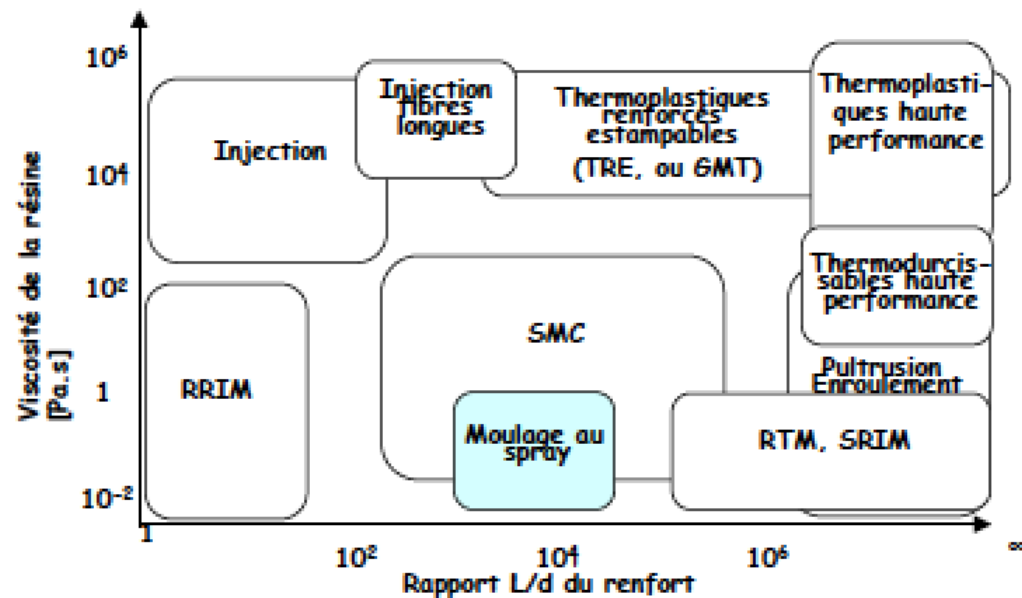
Fabrication additive: Liquid deposition modeling



Adv. Mater. Technol. 2019, 4, 1800271

Résine thermodurcissable, orientation des fibres pendant l'écoulement.

Fibres un peu moins courtes



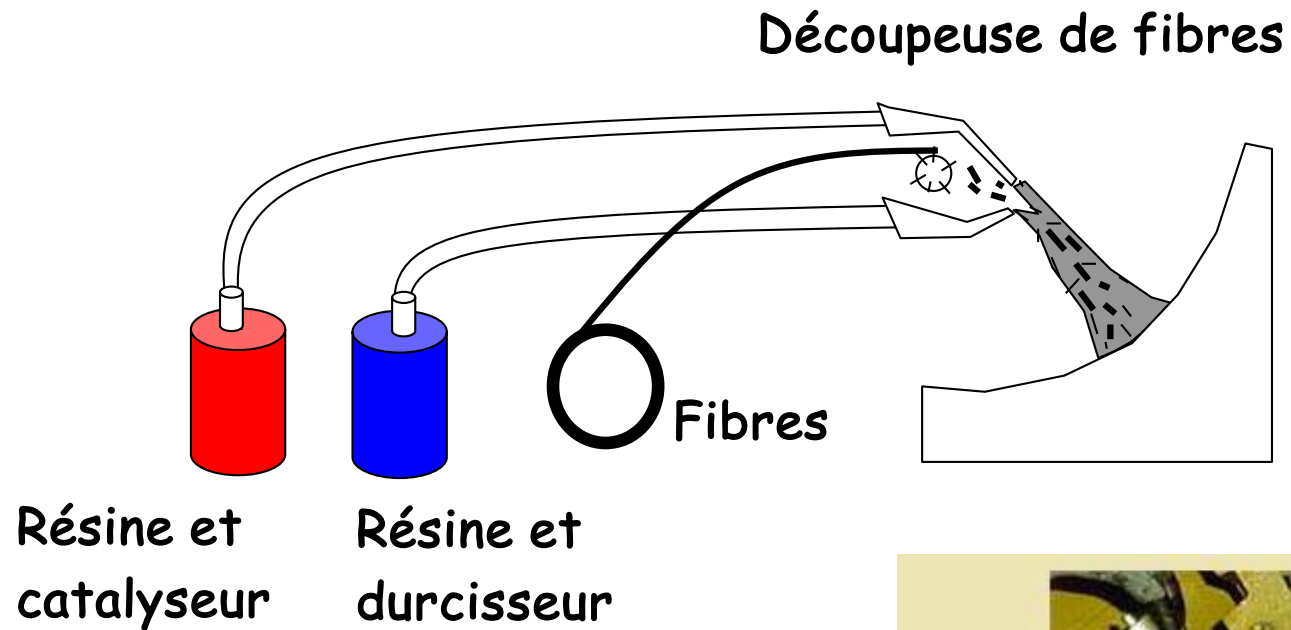
(a) Préimprégnés \rightarrow moule \rightarrow mise en forme

(b) Fibres \rightarrow renfort textile \rightarrow moule \rightarrow imprégnation par moulage

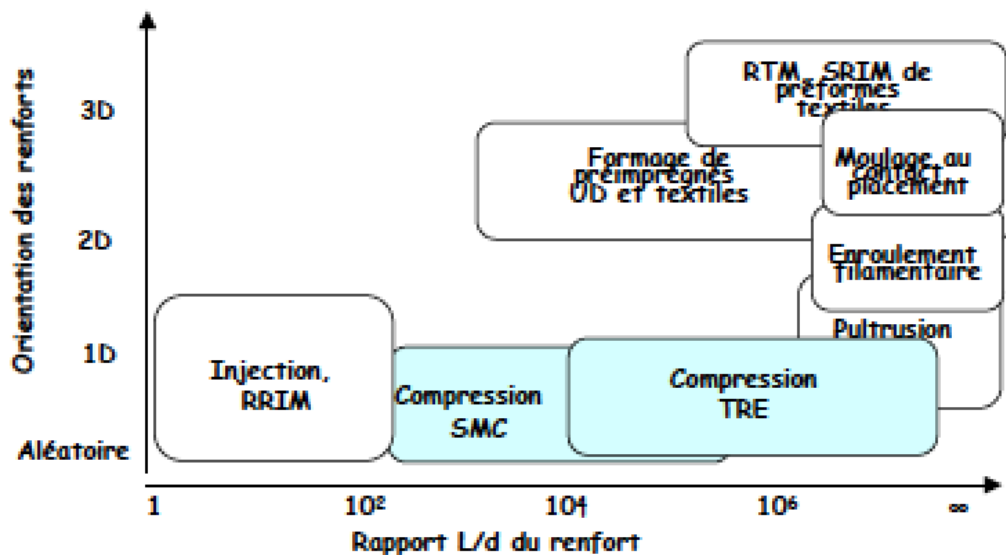
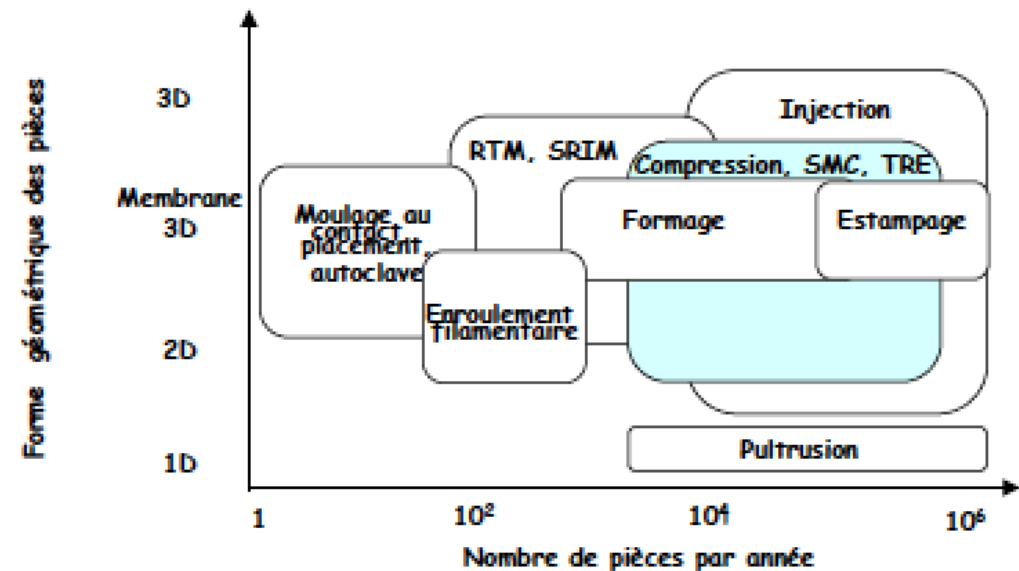
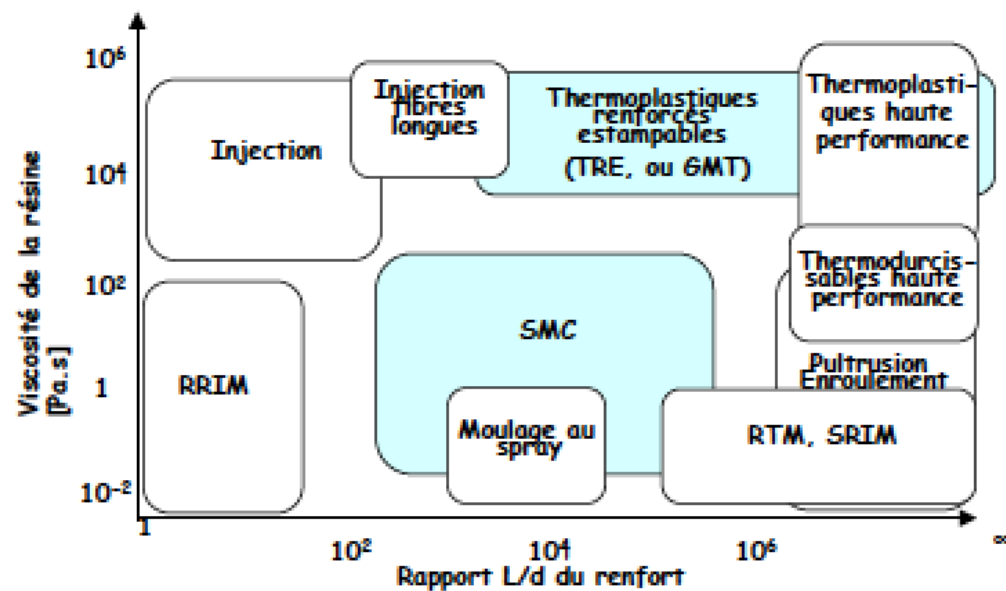
Résine \rightarrow moule \rightarrow imprégnation par moulage

Moulage au spray

Avantages :	Inconvénients :
Cadence plus rapide que le moulage au contact Sans limitation de dimensions Equipements pas trop importants	Main d'oeuvre importante et qualifiée Peu de constance dans l'épaisseur Propriétés mécaniques pas très élevées



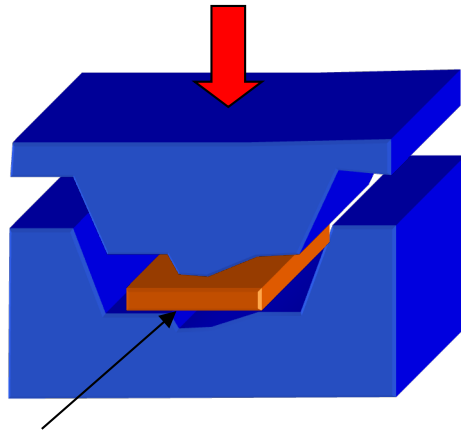
Fibres moins courtes/estampage



(a) Préimprégnés → moule → mise en forme

(b) Fibres → renfort textile
 Résine → moule → imprégnation par moulage

Moulage par compression



matrice + renfort



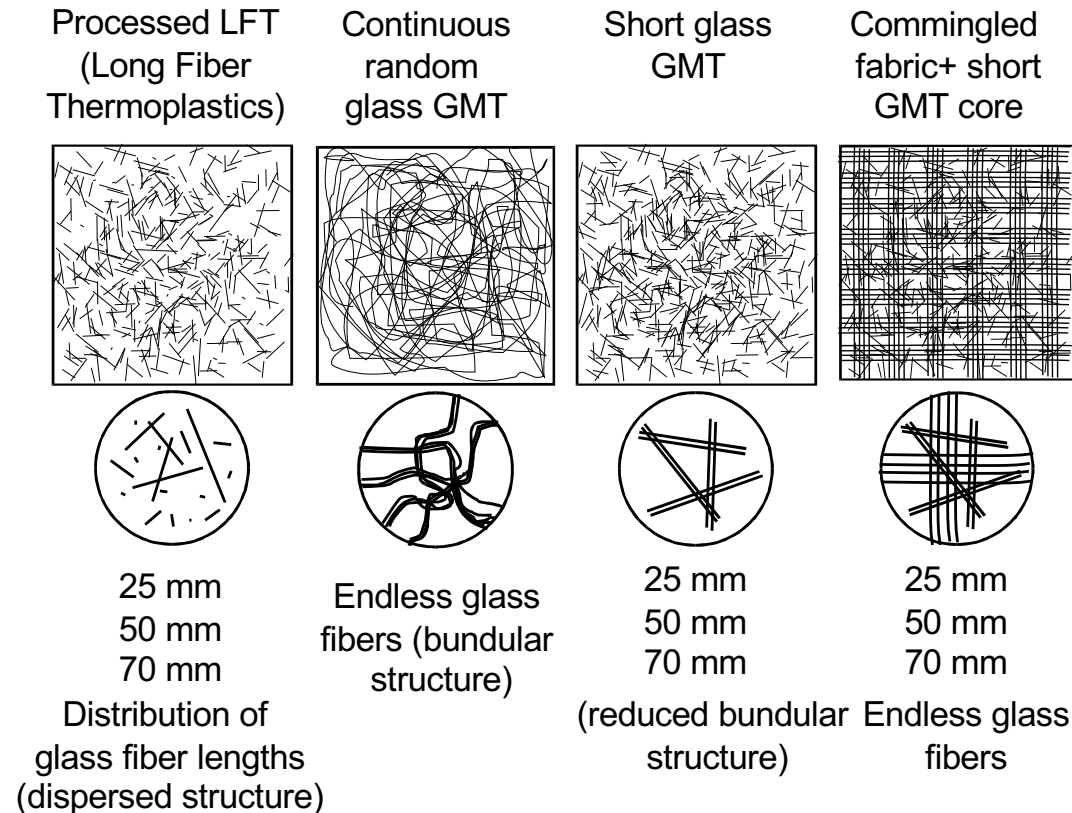
Thermodurcissables et surtout thermoplastiques
SMC: sheet moulding compound, verre+ polyester
GMT, TRE: glass mat thermoplastiques, verre + PP

Avec écoulement de matière

Capots, carrosserie de voiture, camion, plaques semi-finies....

Avantages :	Inconvénients :
Moulages de pièces de grandes dimensions Qualité des pièces Cadences élevées	Coût de l'outillage Bavures importantes Dosage préalable nécessaire pour chaque empreinte

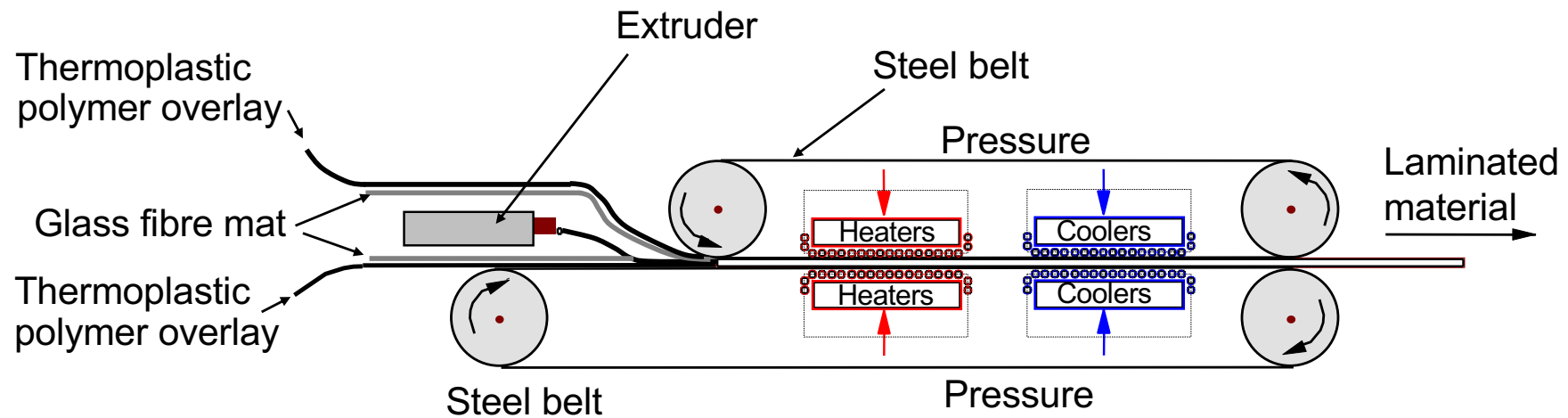
Moulage par Compression de Thermoplastiques Renforcés Estampables (GMT)



Arrangement des fibres

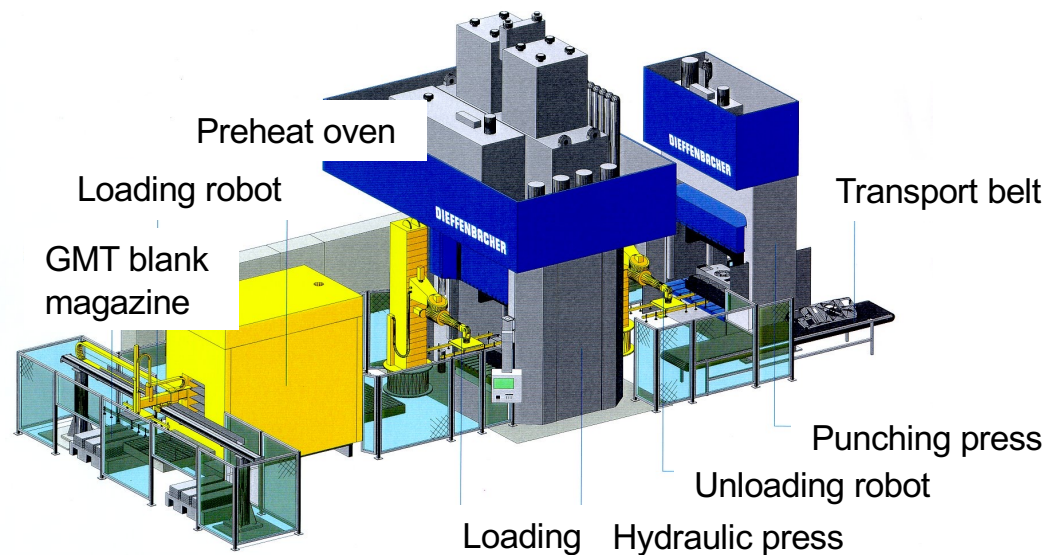
Moulage par Compression de Thermoplastiques Renforcés Estampables (GMT)

Fabrication des préformes



Moulage par Compression de Thermoplastiques Renforcés Estampables (GMT)

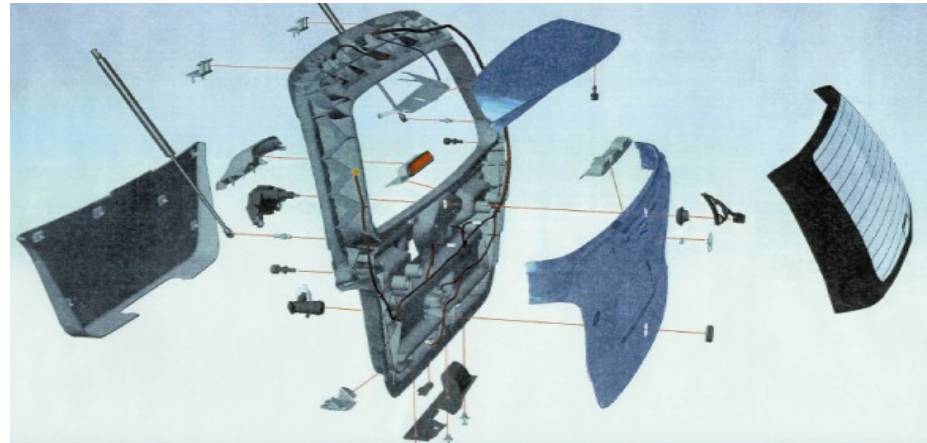
Moulage par compression



2000 t GMT press for DaimlerChrysler A-class tailgate

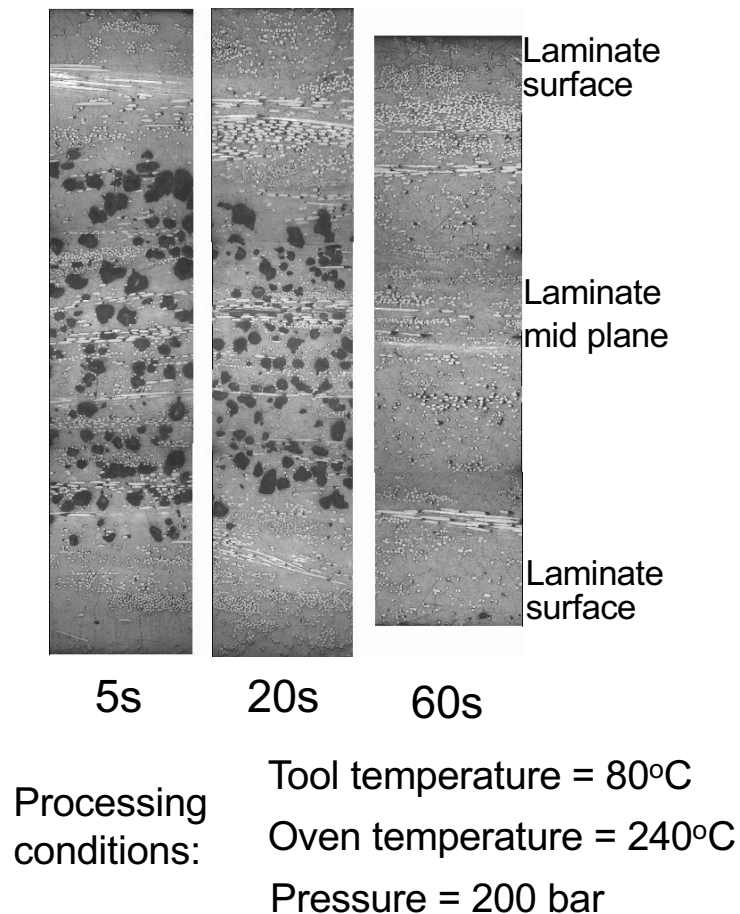
Moulage par Compression de Thermoplastiques Renforcés Estampables (GMT)

Géométrie des moules



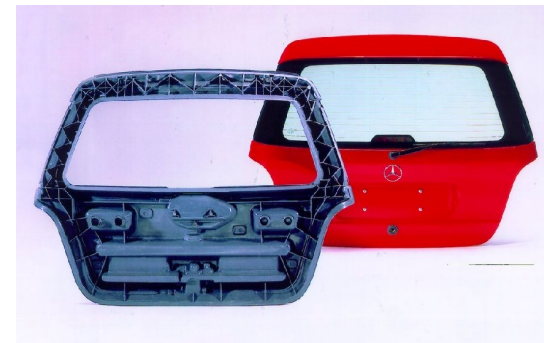
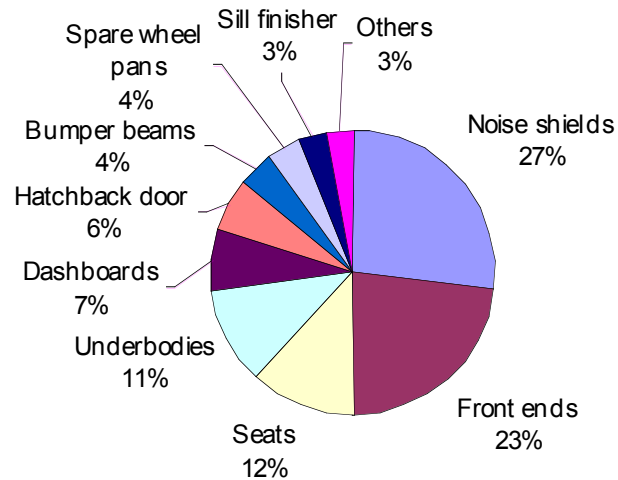
Moulage par Compression de Thermoplastiques Renforcés Estampables (GMT)

Exemple: Effet de la pression sur la microstructure



Moulage par Compression de Thermoplastiques Renforcés Estampables (GMT)

Applications



Sheet Moulding Compound (thermodurcissables)

Le SMC se compose de trois constituants principaux :

- Résine polyester insaturée 13% (% massique)
- Fibres de verre (renfort) 25 %
- Carbonate de calcium (charges) 48%

Caractéristiques :

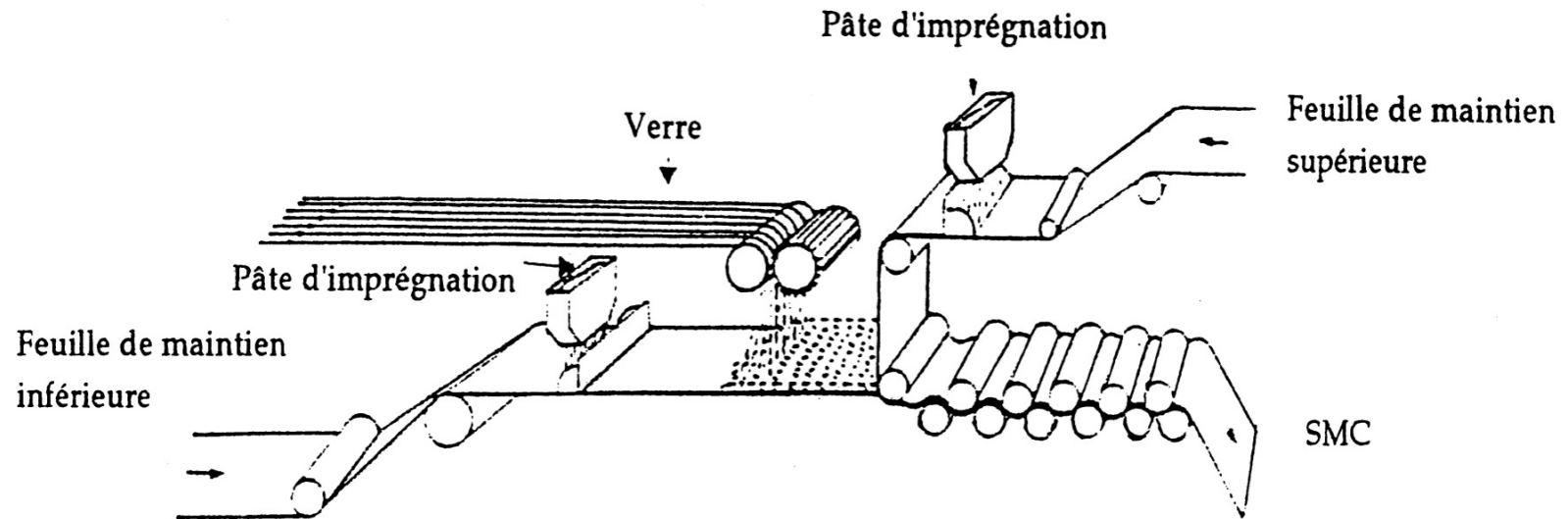
- Longueurs des fibres de verre coupées : 25 mm
- Grammage SMC : 4 kg/m²

Mise en œuvre :

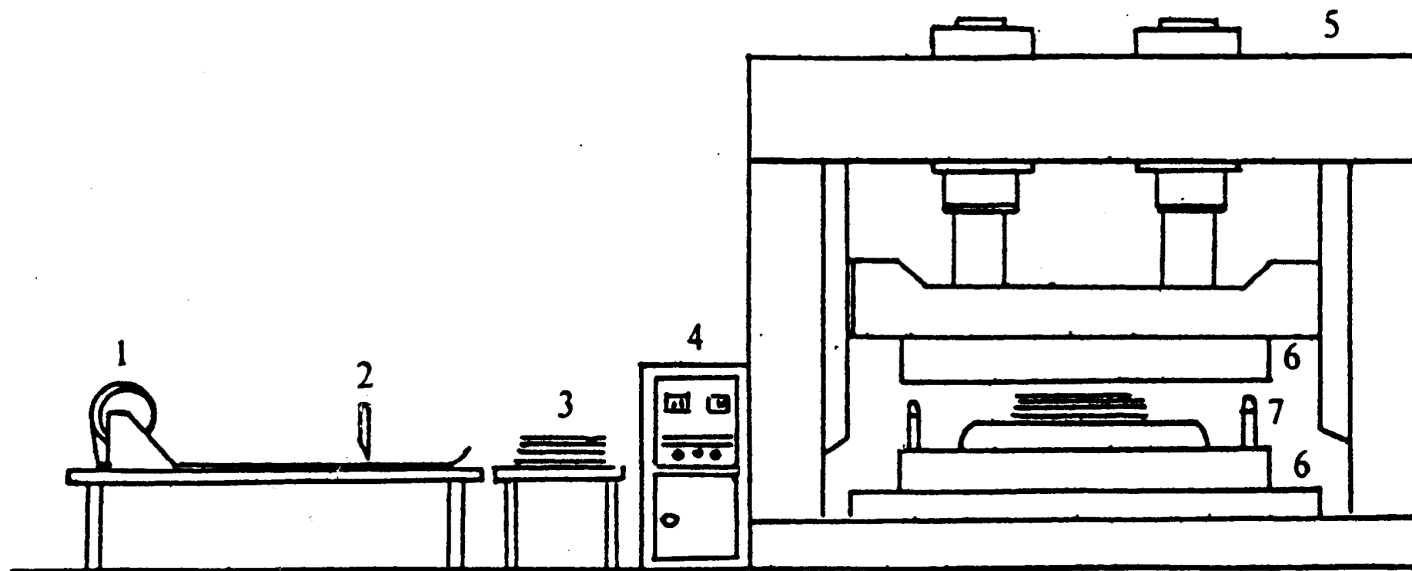
- Température : 140 - 150° C
- Pression : 70 - 100 bars



SMC : préimprégnés



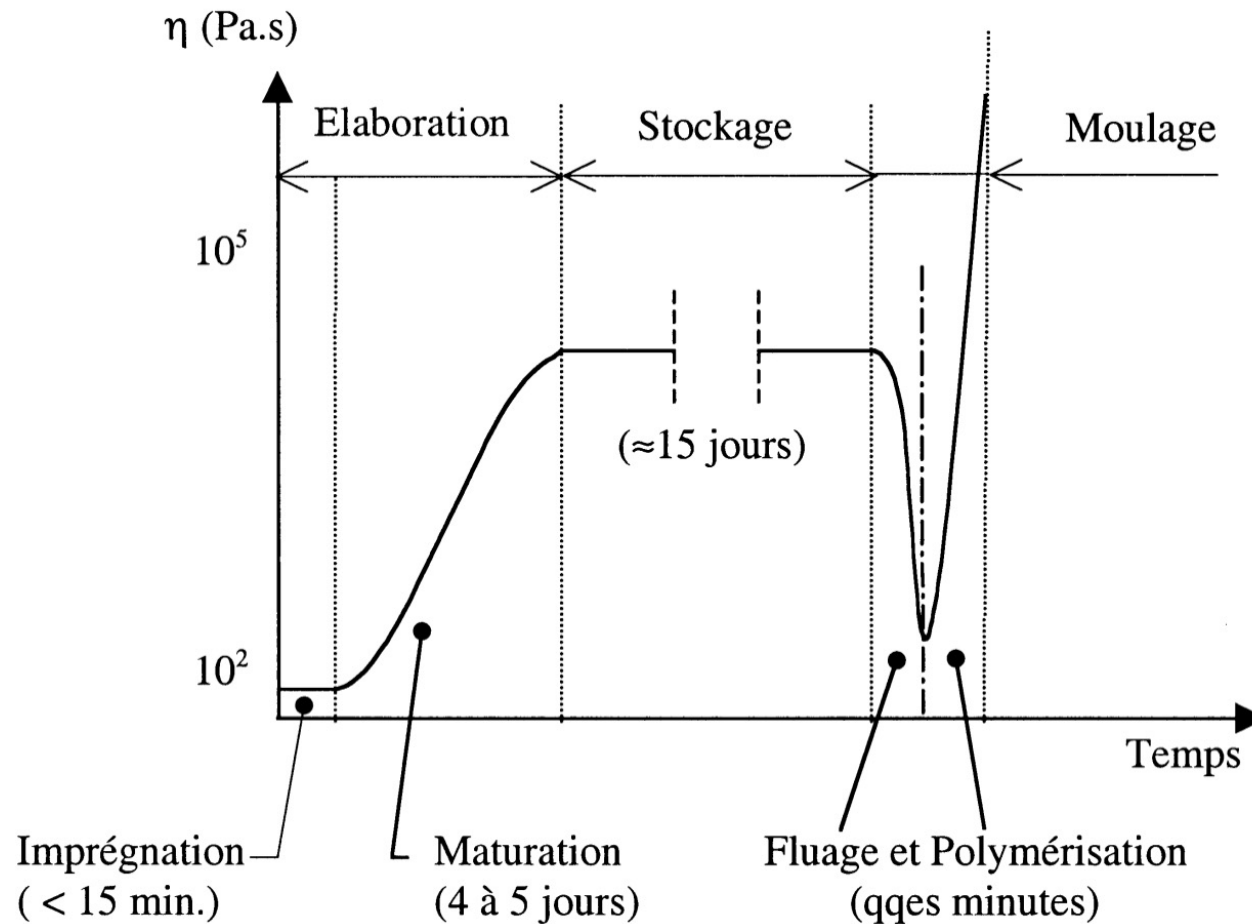
SMC: moulage



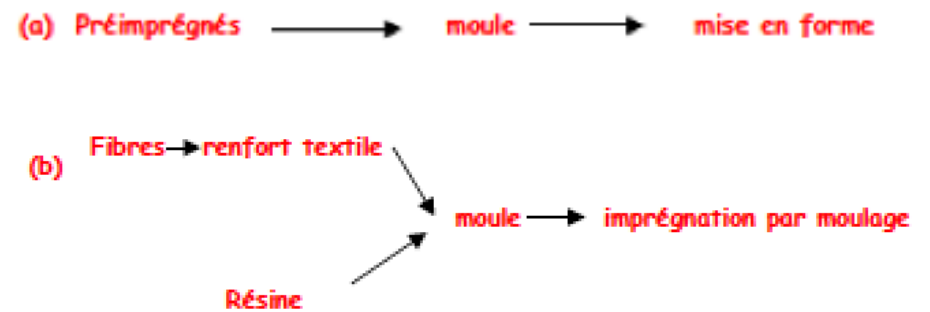
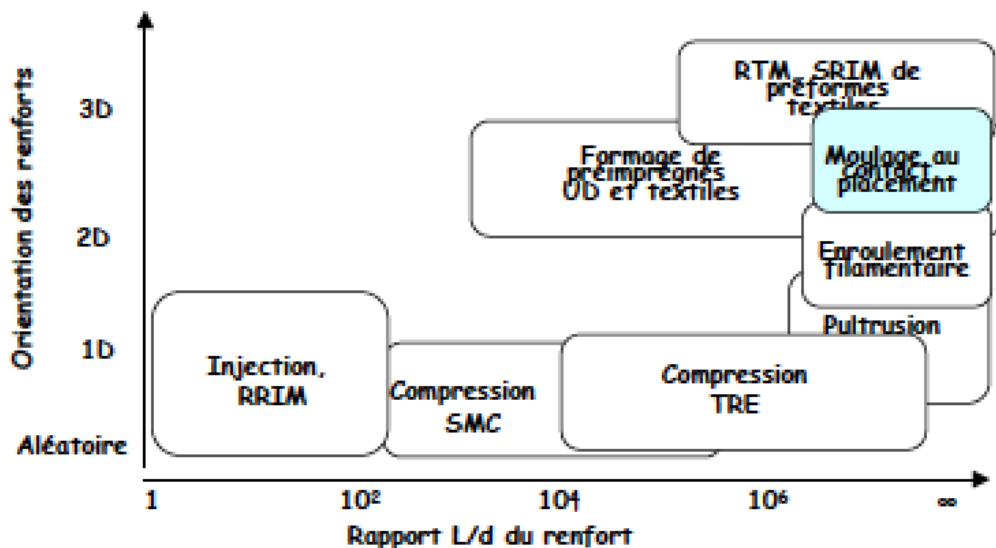
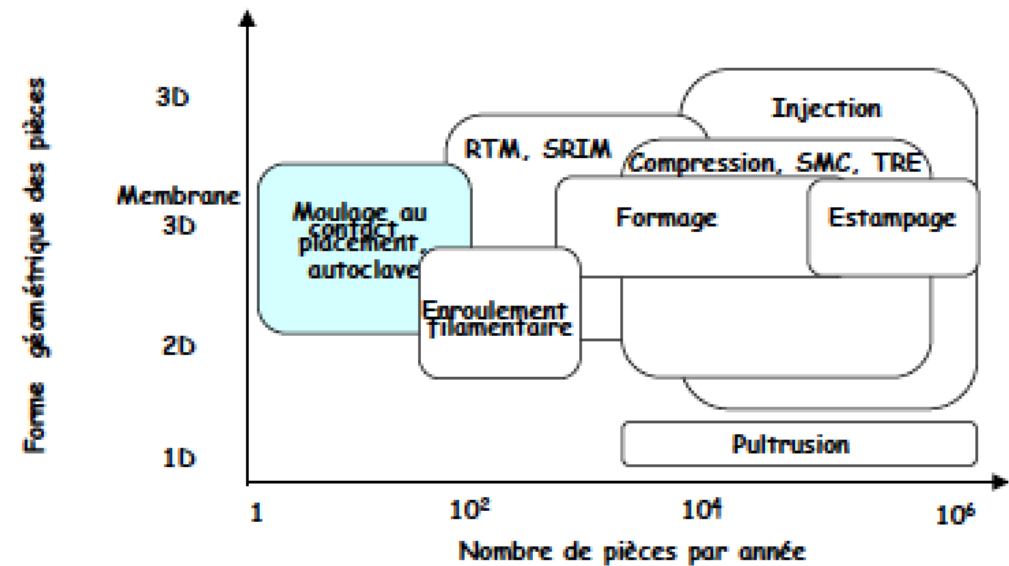
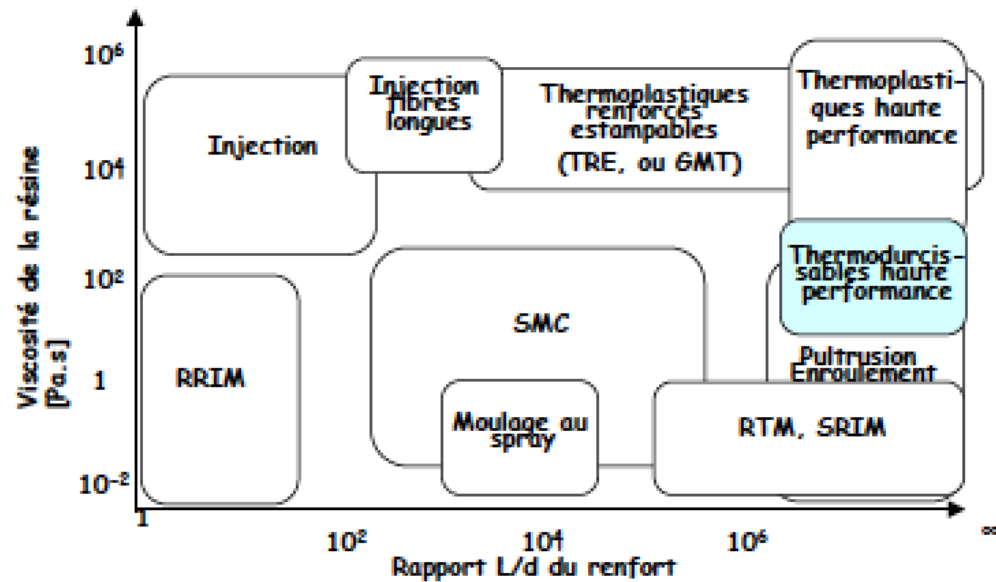
- 1 – Rouleau de SMC
- 2 – Coupe
- 3 – Préparation des « paquets »
- 4 – Armoire de pilotage de la presse

- 5 – Presse hydraulique
- 6 – Moule
- 7 – Matière à mouler

SMC: Rhéologie lors de la mise en oeuvre

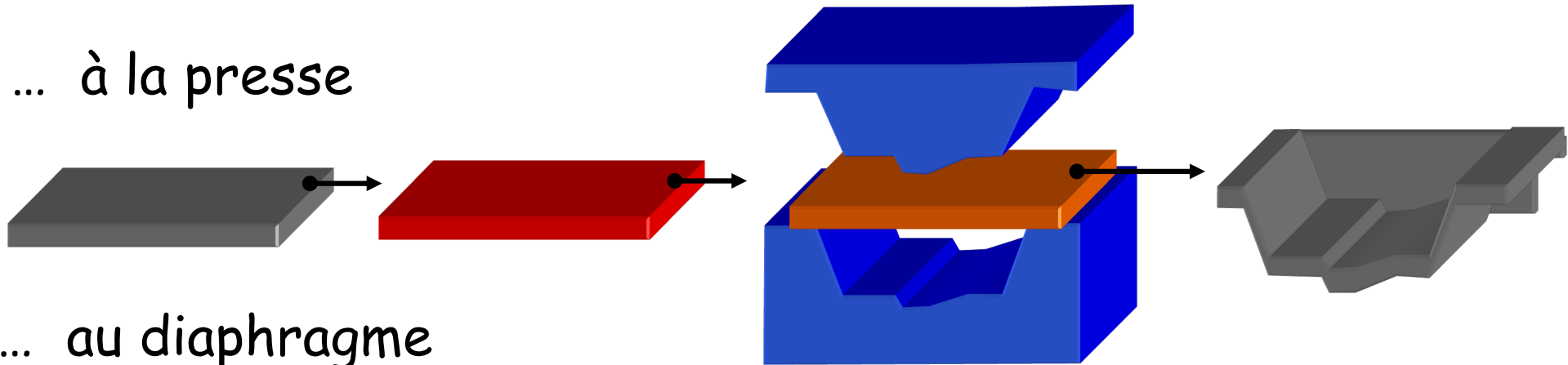


Fibres longues

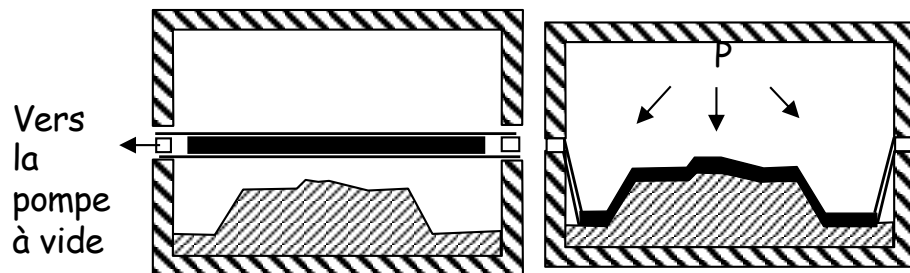


Thermoformage (thermoplastiques)

... à la presse

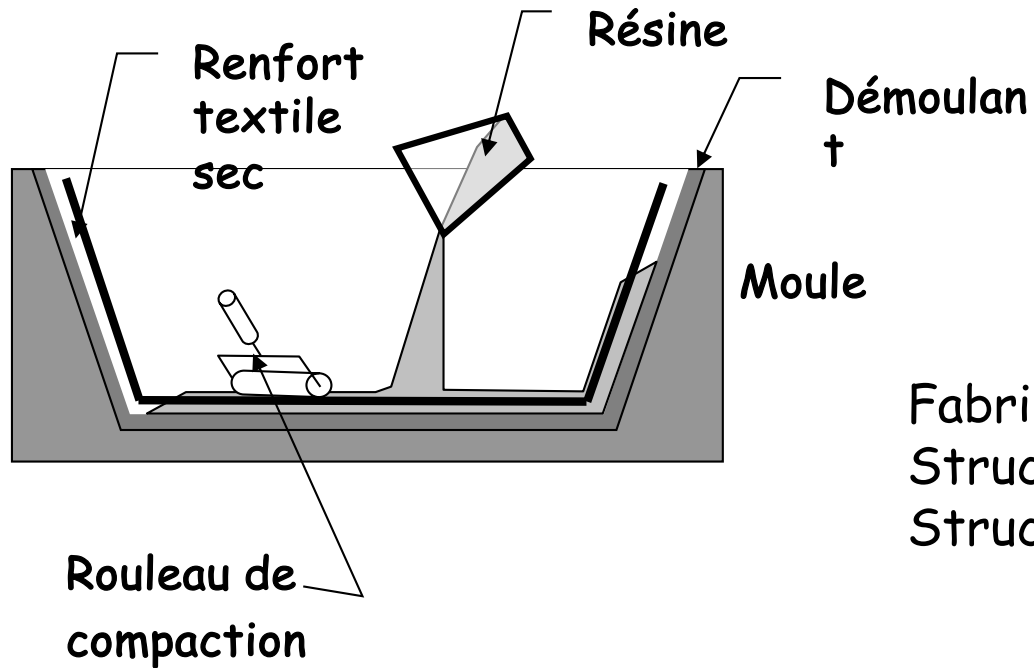


... au diaphragme



Avantages :	Inconvénients :
Formes complexes Cadences élevées Bonne qualité des pièces	Investissements importants Contrôle des transferts de chaleur

Fibres longues: Moulage au contact

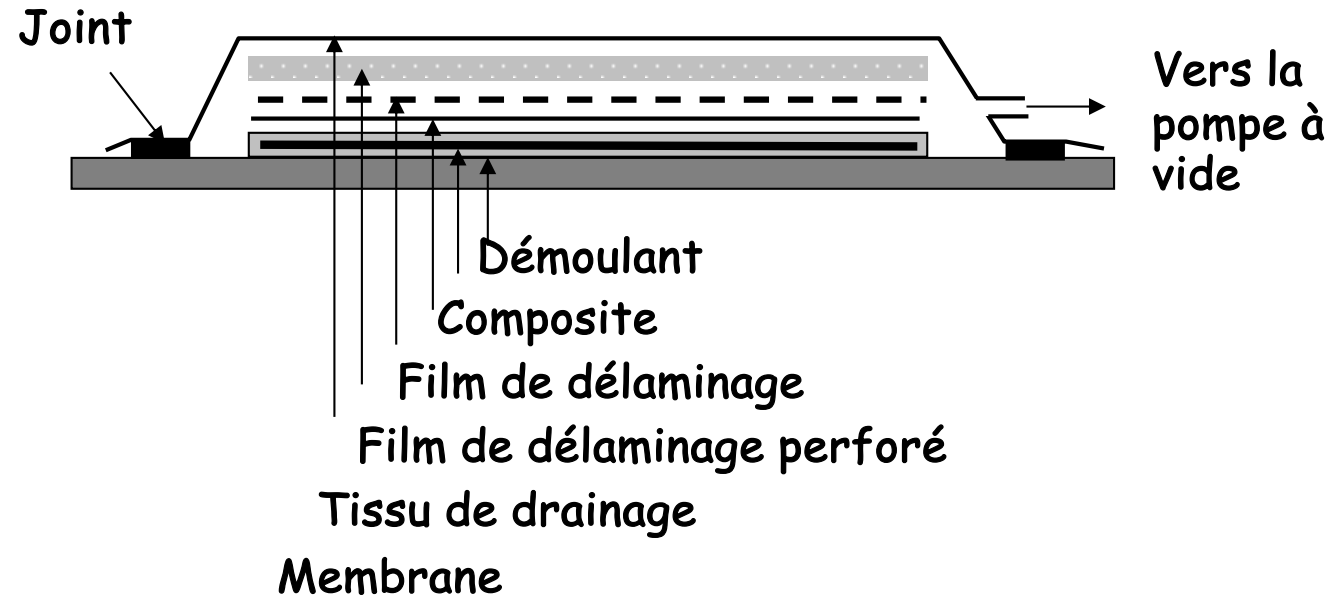


Fabrication de bateaux
Structures d'avions
Structure du génie civil



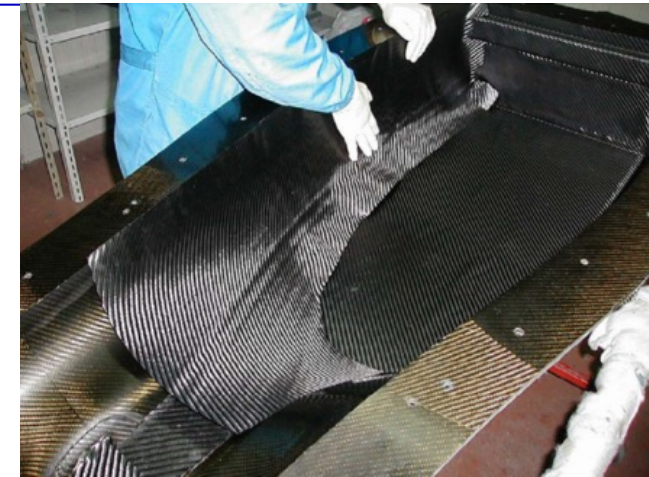
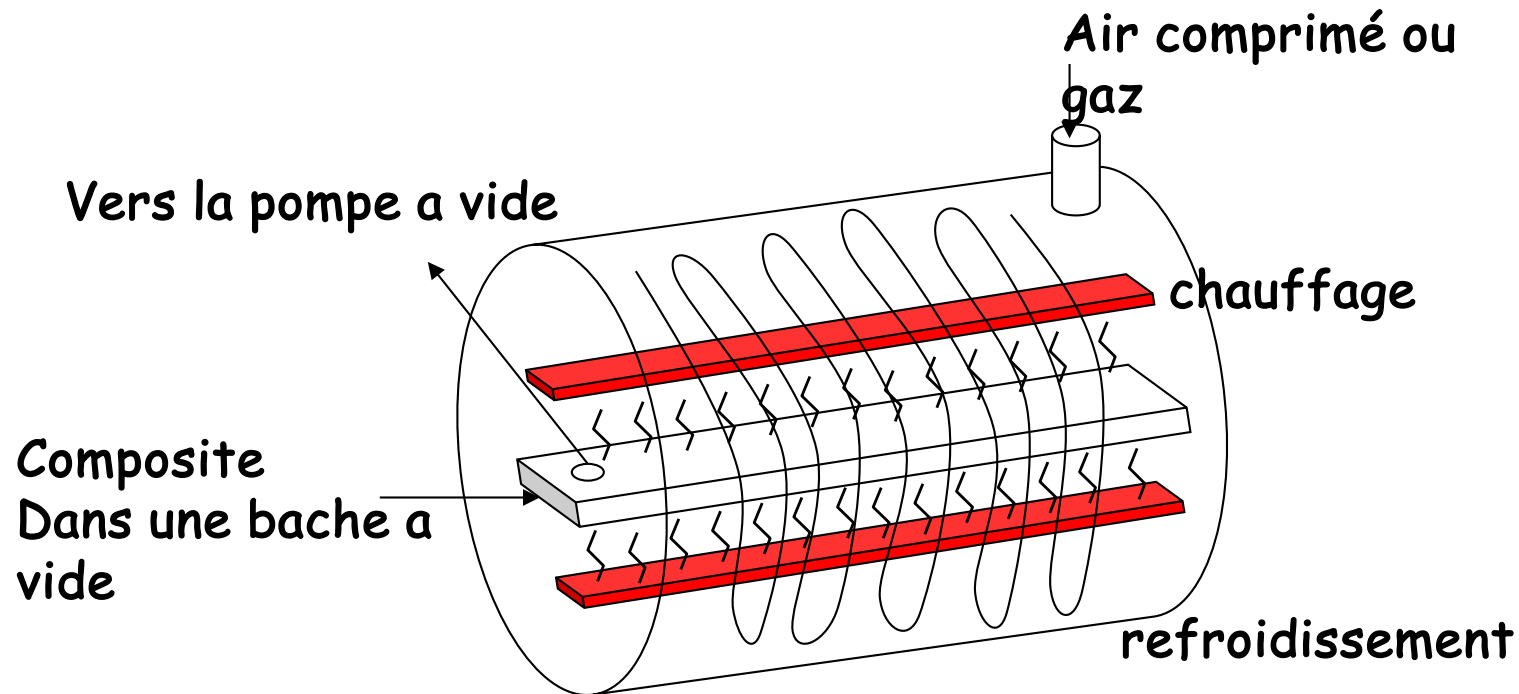
Avantages :	Inconvénients :
Facilité de mise en oeuvre	Faibles cadences de production
Investissements très faibles	Main d'oeuvre importante
Sans limitation de dimensions	Epaisseur difficile à contrôler
Main d'oeuvre peu qualifiée	Une face brute

Moulage sous vide



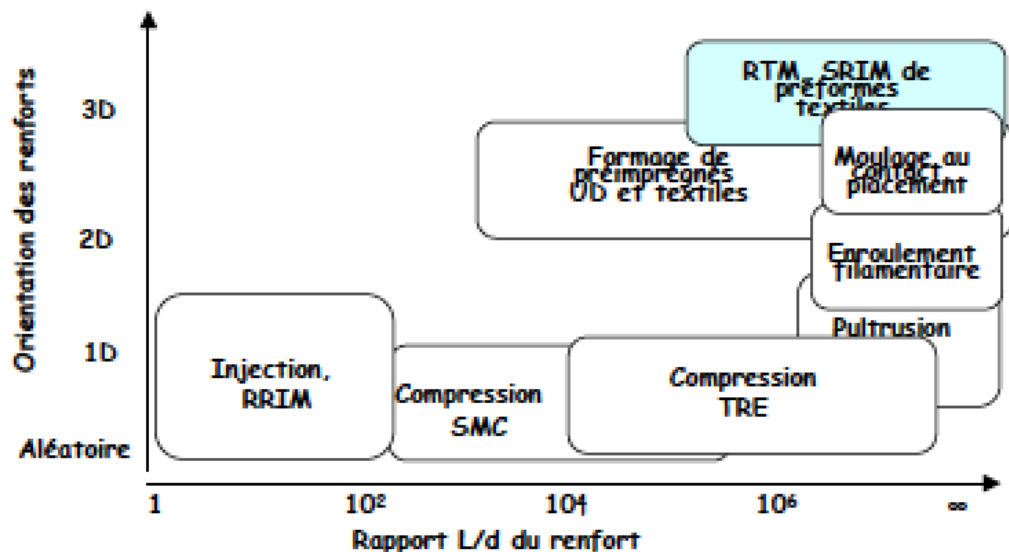
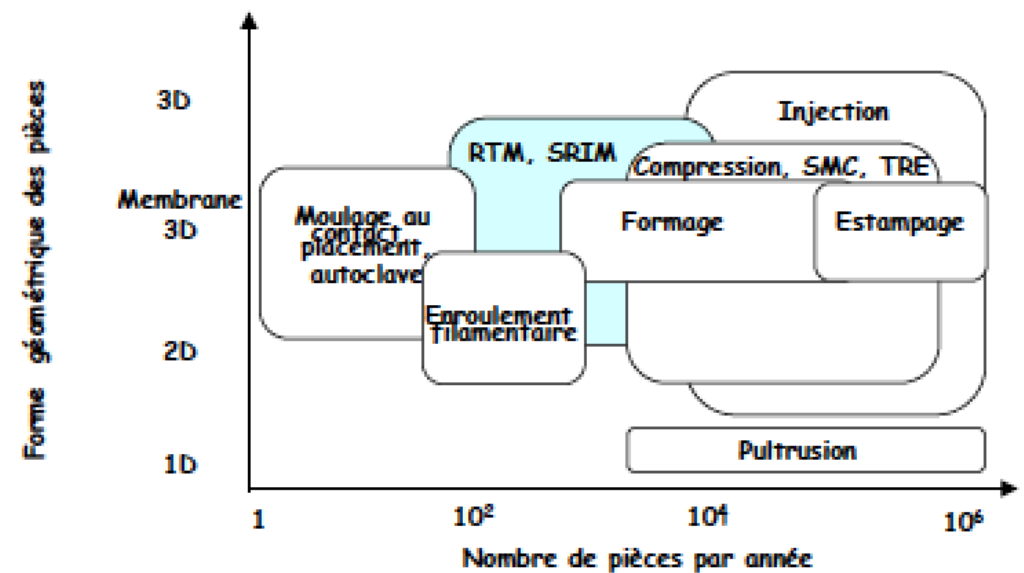
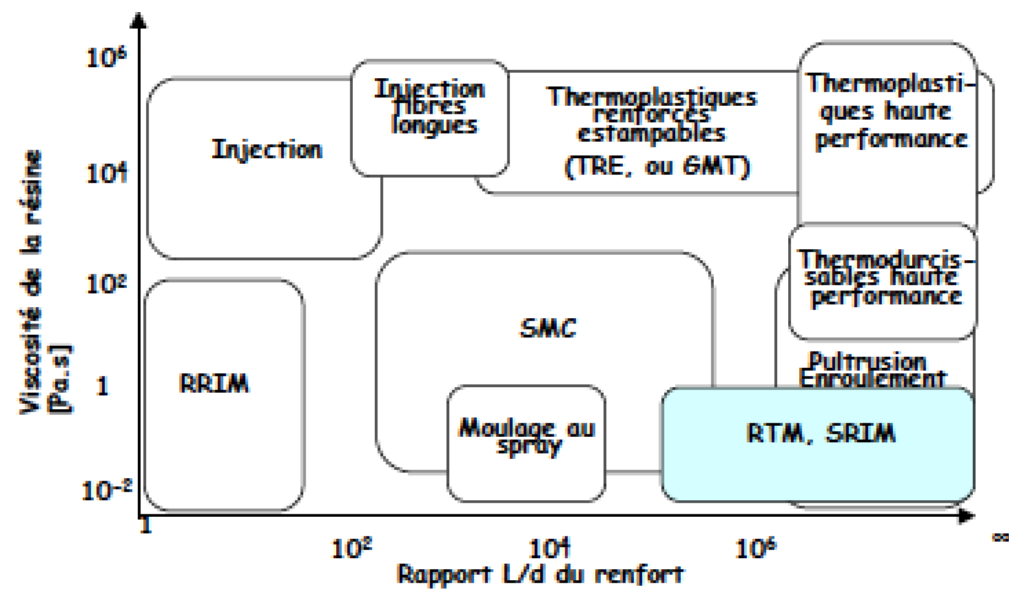
Avantages :	Inconvénients :
Facilité de mise en oeuvre Investissements faibles	Faibles cadences de production Main d'oeuvre importante

Moulage à l'autoclave



Avantages :	Inconvénients :
Contrôle des paramètres Bonne qualité des composites	Investissements Faibles cadences de production

Sélection

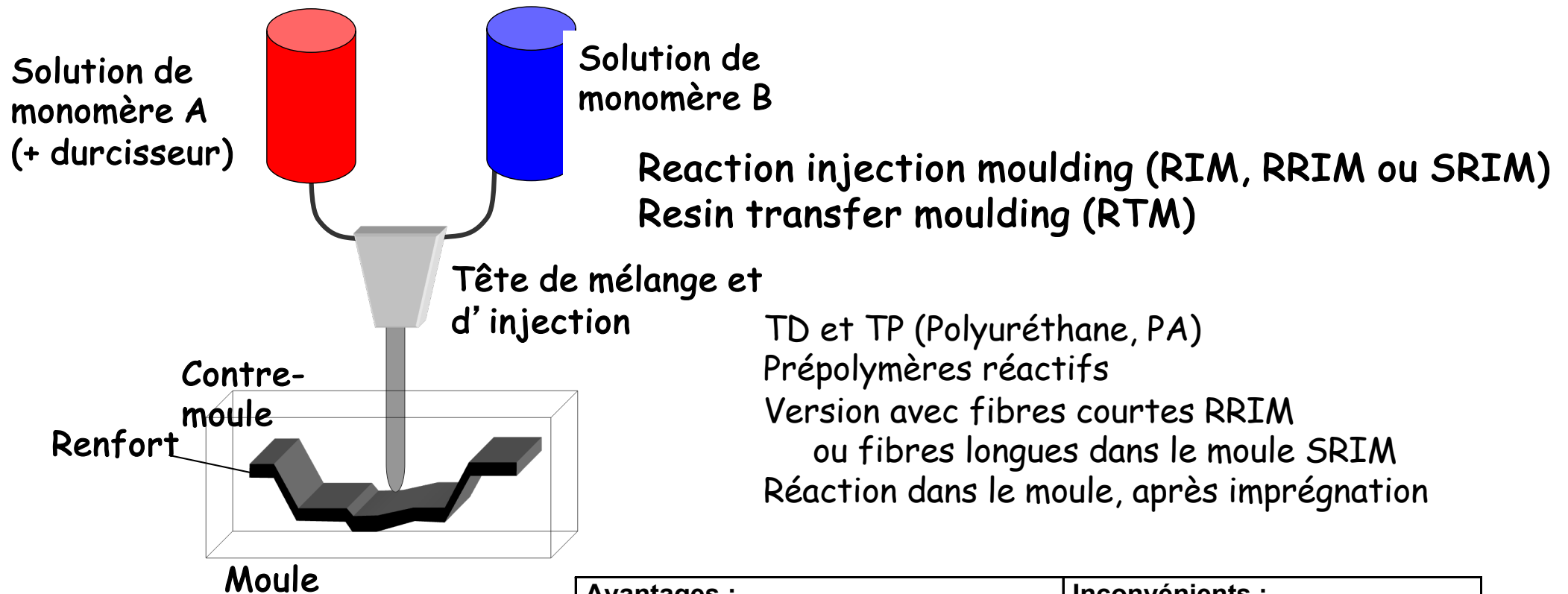


(a) Préimprégnés \rightarrow moule \rightarrow mise en forme

(b) Fibres \rightarrow renfort textile \rightarrow moule \rightarrow imprégnation par moulage

Résine \rightarrow moule

Transfert et injection de résine



Avantages :	Inconvénients :
Faible consommation d'énergie Pression de moulage faible Possibilité de fabrication de grandes pièces complexes Cycles de moulage courts	Performances thermiques limitées

Transfert et injection de résine



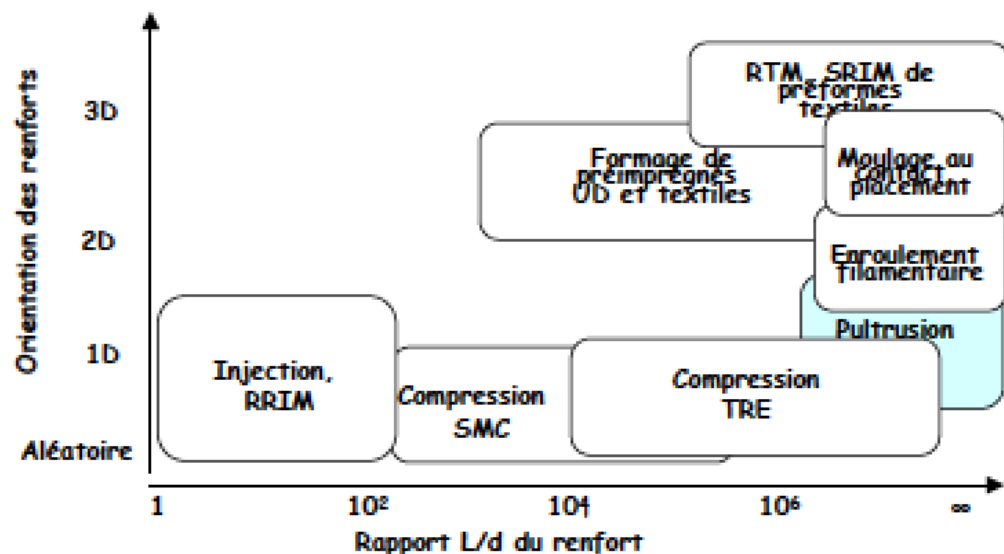
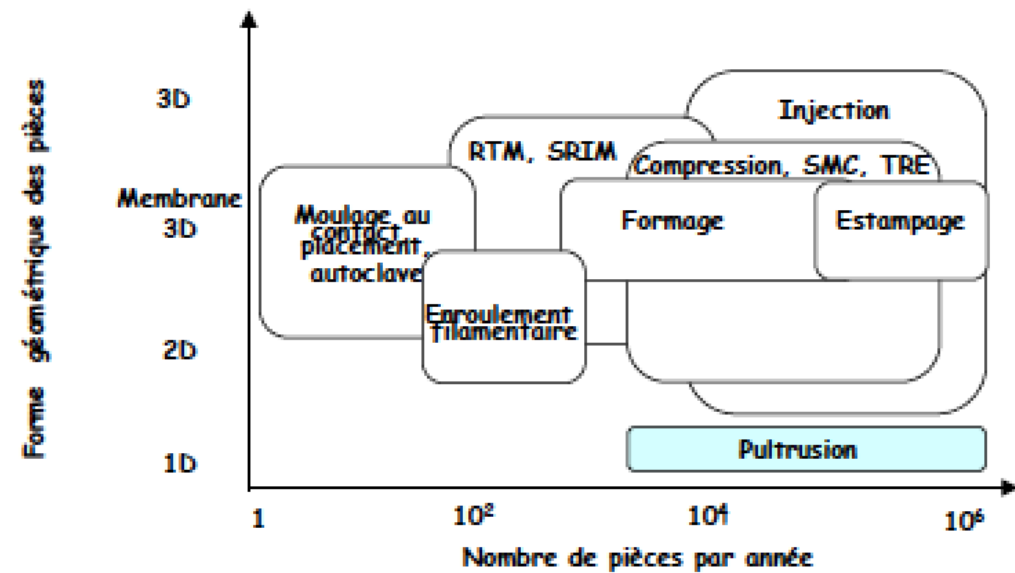
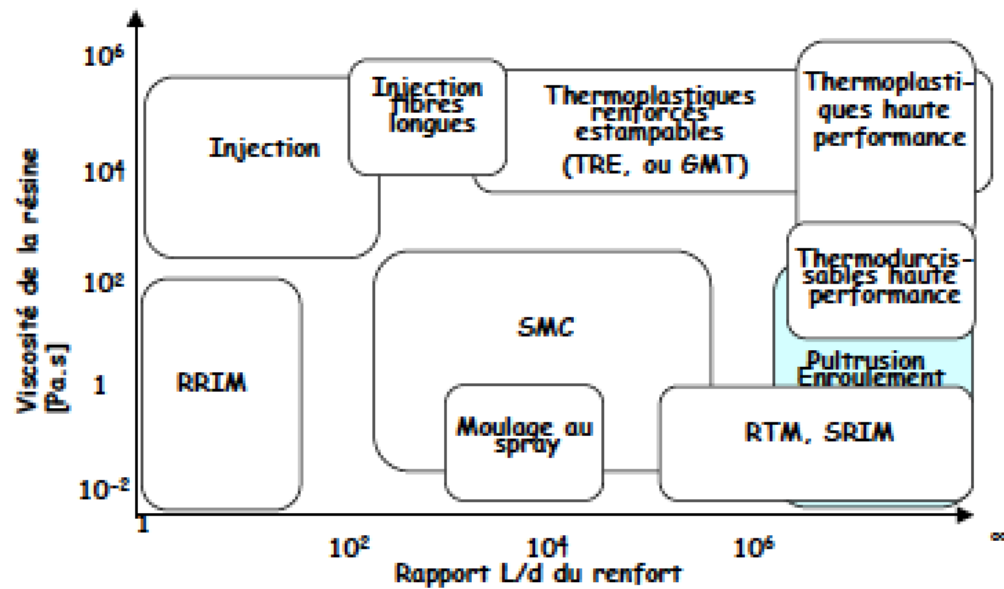
Exemple:
Plancher prototype de
la VW Lupo,
RTM carbone-epoxy
(Alcan Composites,
2004)

Infusion sous vide

Exemple:
Carène de EPFLoop
(2018)



Sélection

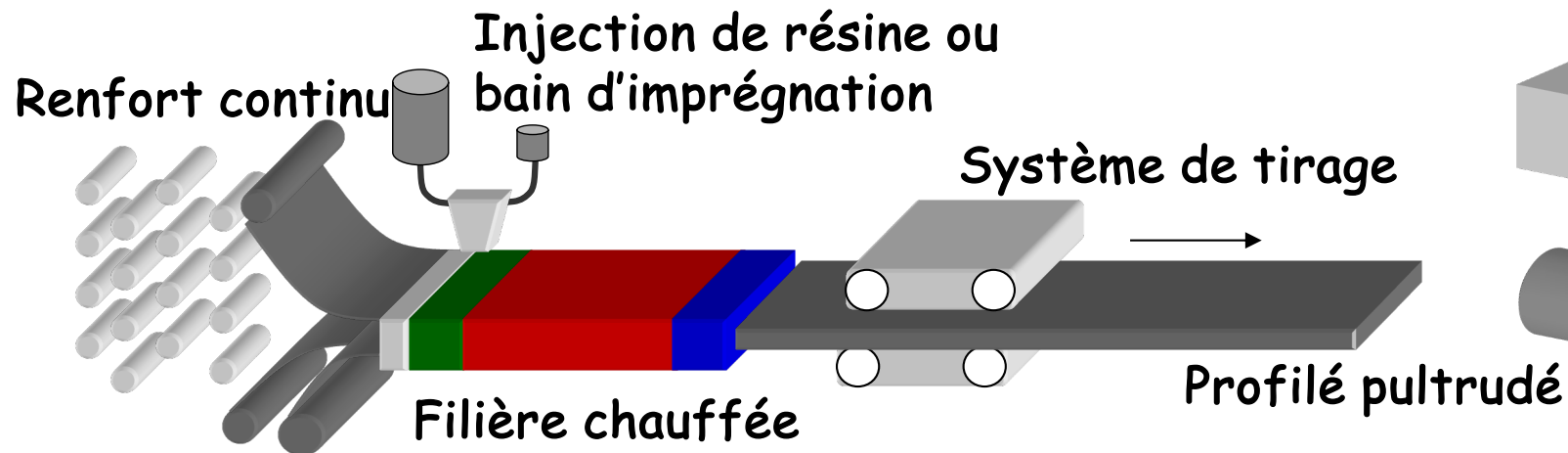


(a) Préimprégnés \rightarrow moule \rightarrow mise en forme

(b) Fibres \rightarrow renfort textile \rightarrow moule \rightarrow imprégnation par moulage

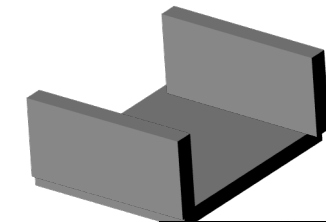
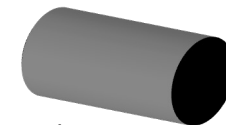
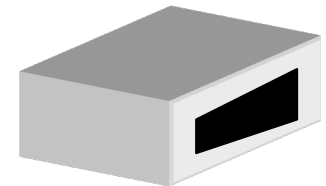
Résine \rightarrow moule \rightarrow imprégnation par moulage

Pultrusion

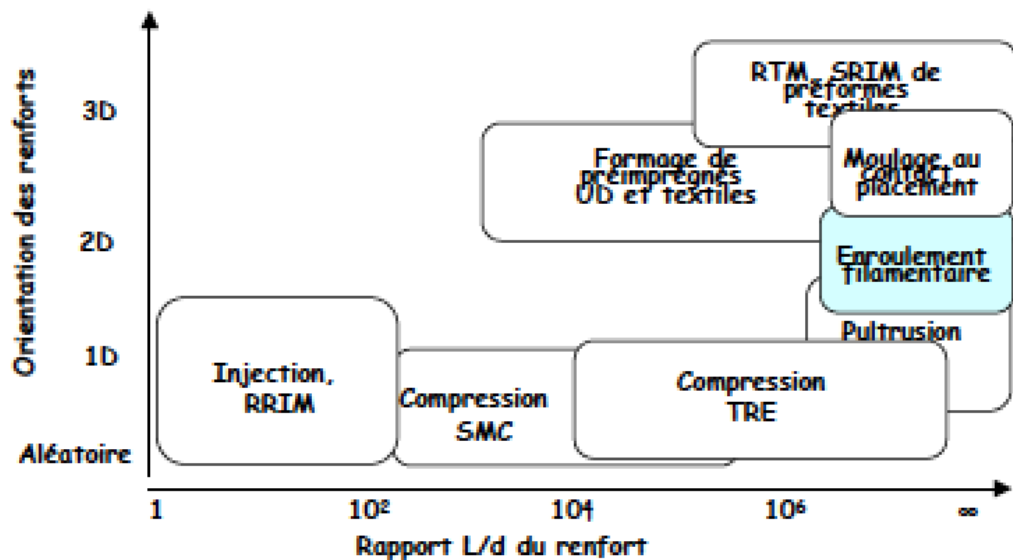
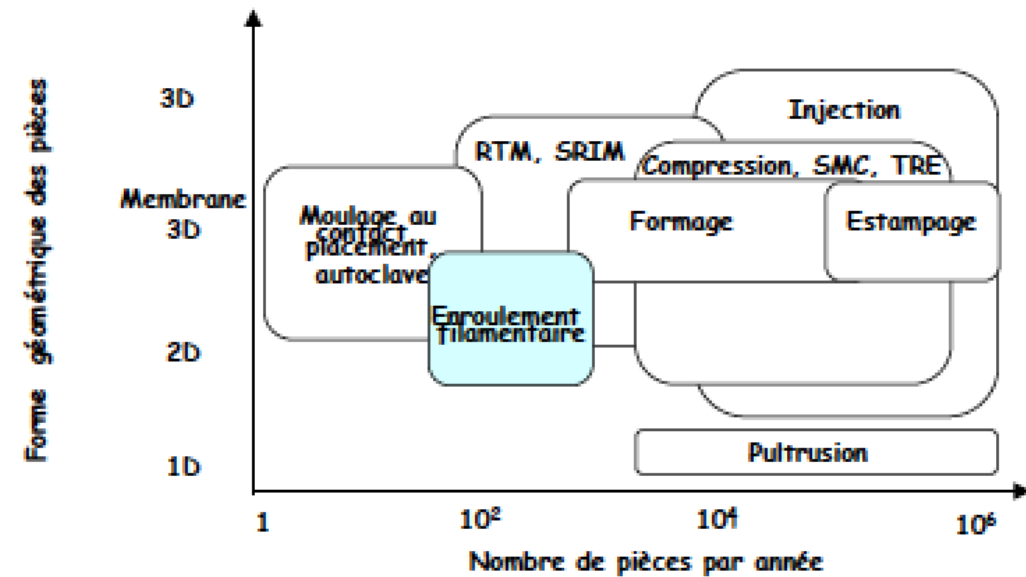
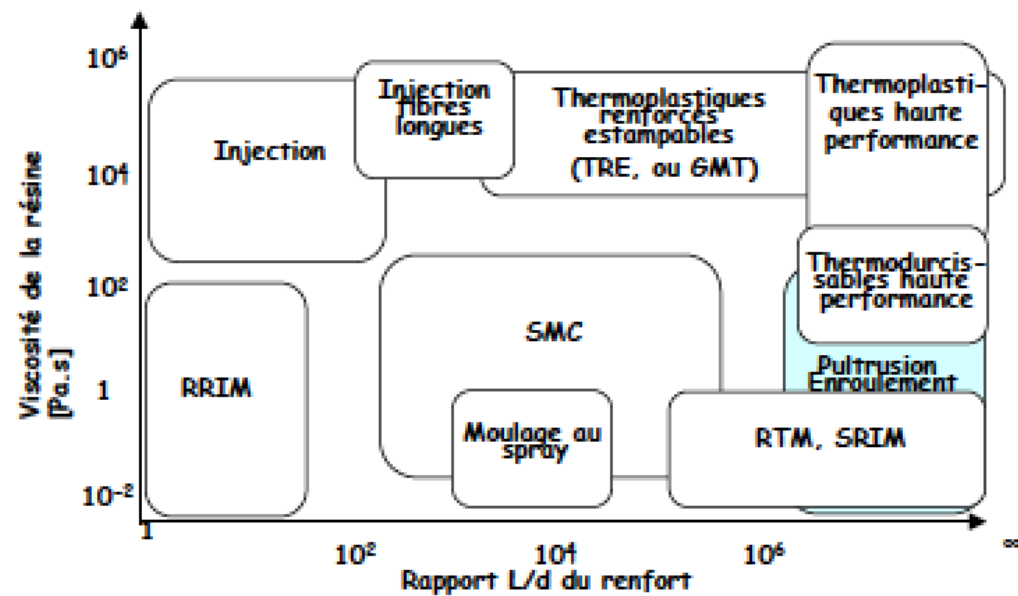


Surtout thermodurcissables et thermoplastiques
Fibres sèches ou fibres préimprégnées

Avantages :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> Méthode de production en continu Bon contrôle du pourcentage de renfort Grande automatisation possible Vitesses de production élevées Réalisation de formes variables 	<ul style="list-style-type: none"> Investissements assez importants Limitations dans les variations d'épaisseur.



Sélection



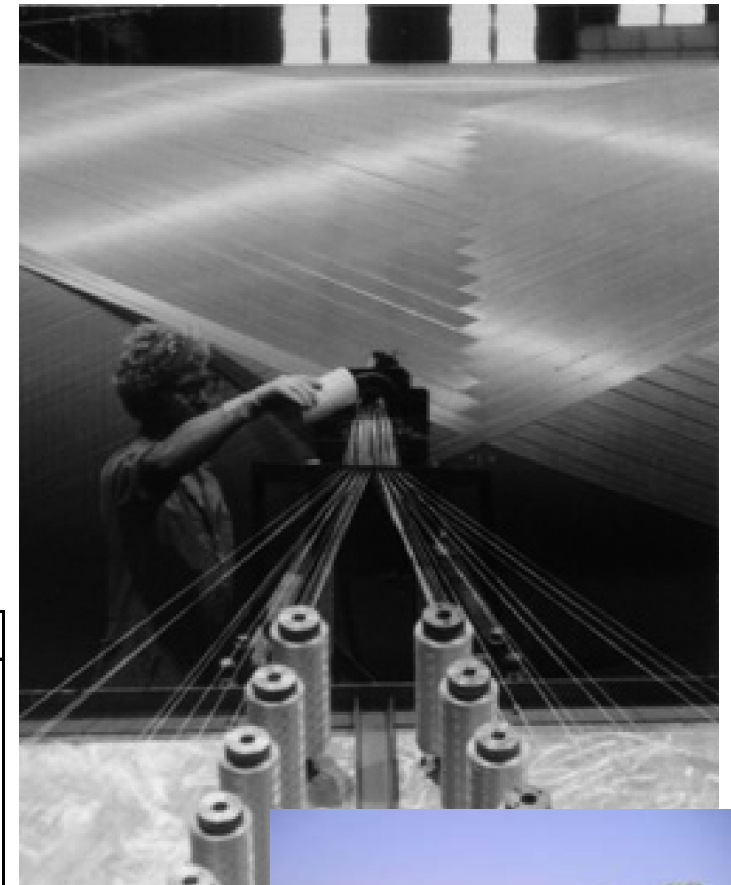
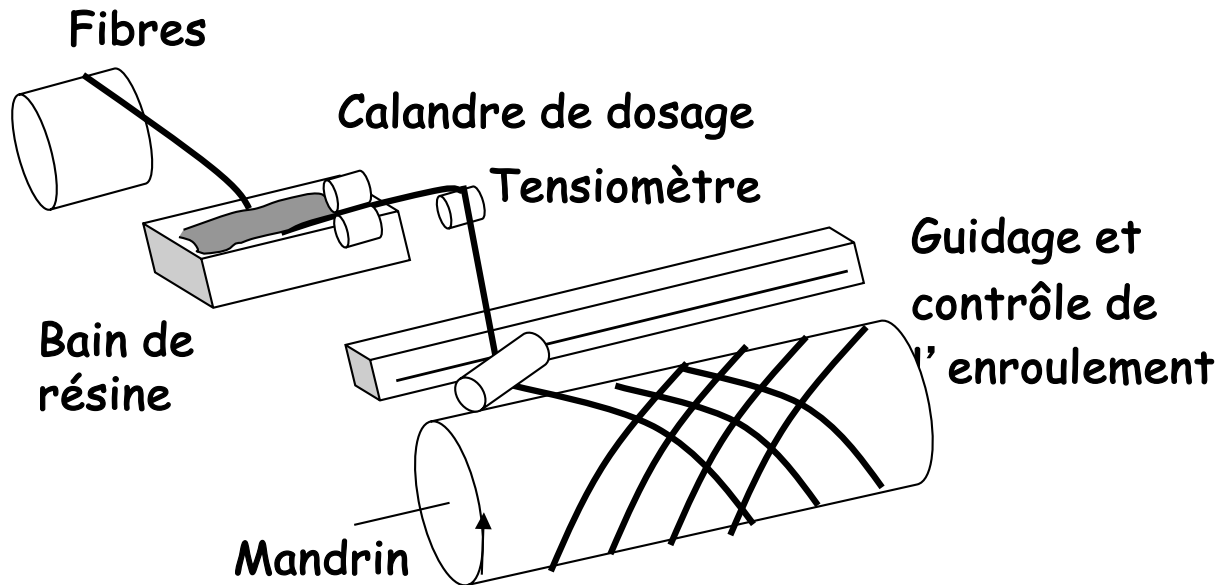
(a) Préimprégnés \rightarrow moule \rightarrow mise en forme

(b) Fibres \rightarrow renfort textile \rightarrow moule \rightarrow imprégnation par moulage

Résine \rightarrow moule \rightarrow imprégnation par moulage

Enroulement filamentaire

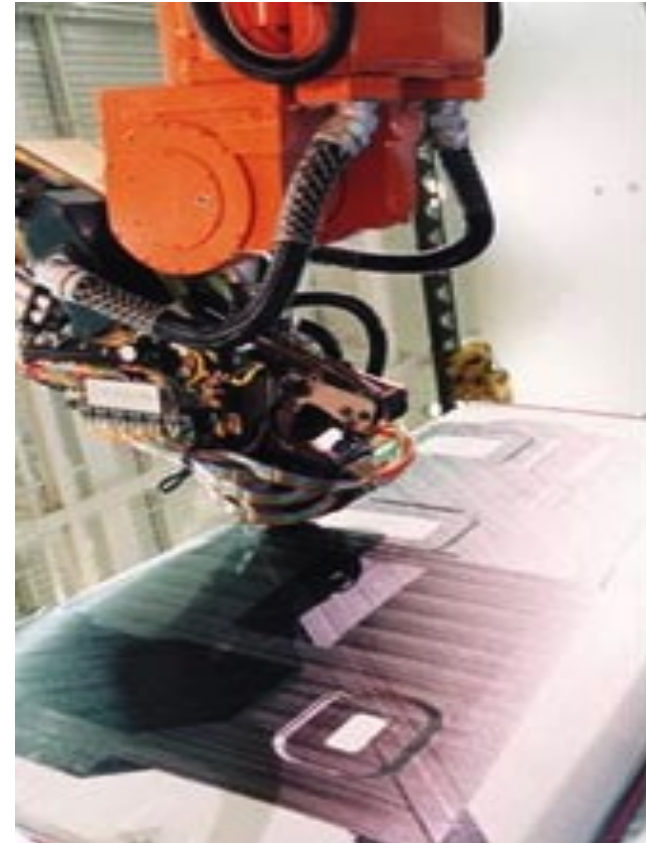
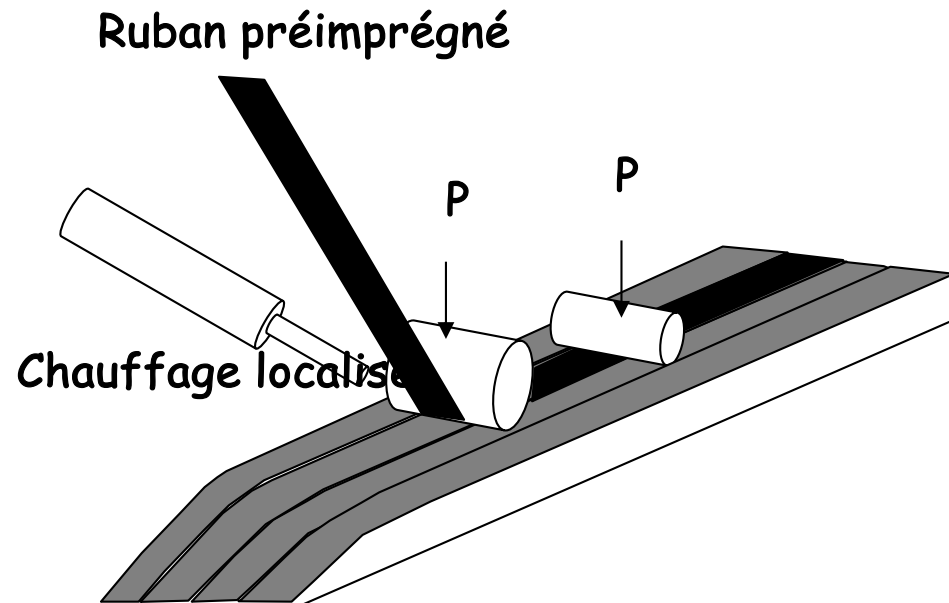
Réservoirs, réservoirs sous pression, tubes....



Avantages :	Inconvénients :
Moulage de pièces de révolution, sans limitation de dimensions Face intérieure lisse Taux de fibres jusqu'à 80% Orientation des fibres dans le sens préférentiel	Investissements importants Cadence de fabrication faibles Face extérieure brute



Dépose de ruban



Avantages :	Inconvénients :
Automatisation Placement préférentiel des renforts Pièces convexes et concaves	Investissements importants Contrôle du soudage entre les rubans

Mise en œuvre des composites

En fonction de L/d , puis de l'écoulement...

1- $L/d = 1-100$, fibres courtes ou particules, nanocharges.

A- peu d'écoulement relatif

A1: Injection

A2: Extrusion

2- $L/d = 100-1000$ Fibres courtes

A- peu d'écoulement relatif

A1: Injection

A2: Extrusion

B- Ecoulement à l'échelle de quelques fibres ou particules

B1: Moulage par compression

B2: Moulage par centrifugation

2- $L/d > 1000$ Fibres longues

A- peu d'écoulement relatif:

A1: moulage en autoclave ou bache à vide de préimprégnés

A2: thermoformage de thermoplastiques en feuilles, moule fermé ou diaphragme

A3: moulage de comélés

A4: dépose de rubans

B- Ecoulement à l'échelle d'une mèche de fibres:

B1: Pultrusion

B2: Enroulement filamentaire

B3: fabrication des préimprégnés pour A: GMT, SMC, prepregs, etc..

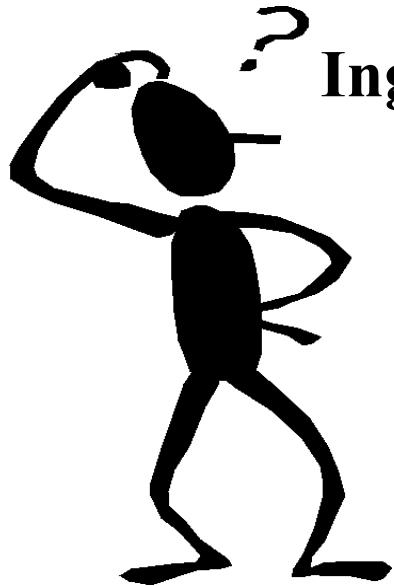
C- Ecoulement à l'échelle de la pièce:

C1: Liquid composite molding: RTM. VARTM. SRIM, etc...

Critères de choix de la mise en œuvre et des matériaux

Selection Criteria

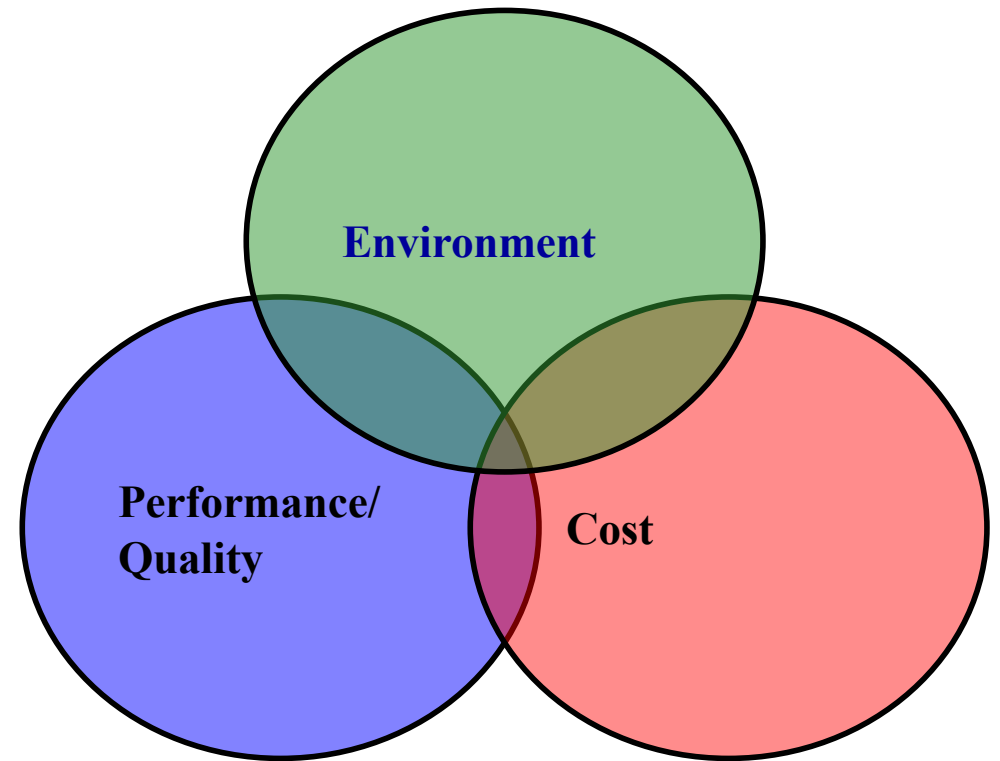
- Performance visée
- Coûts visés
- Impact sur l'environnement!



Ingénieur Composites

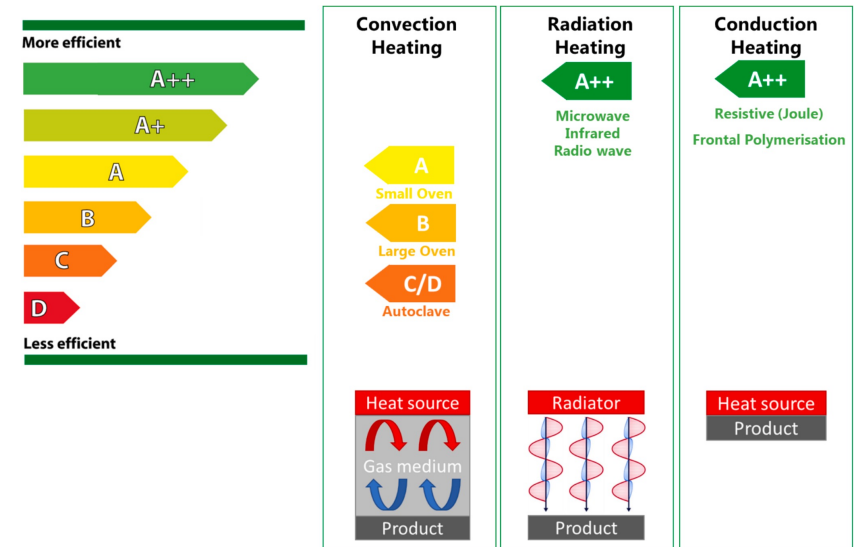
Evaluation

- Performance – masse, propriétés méca, mise en oeuvre
- Coût – Cost modelling
- Environnement - Life Cycle Assessment (LCA)



Energie des différents procédés

- Energie contenue dans les matériaux (fibres, résine) et les consommables (films, démoulant, grilles d'infusion...)
- Energie utilisée pour le procédé:
 - Energie contenue dans les équipements, bâtiments, etc.
 - Transport and stockage (freezers)
 - Energie mise en jeu dans le cycle de cuisson, pression...



Energie des différents procédés

Table 1
The embodied energy of common fibres.

Fibres	Embodied energy (MJ/kg)
CF	521–1563
	1468
	183–286
	272–300
	1000
	704
	855
	286–478
	190–870
Recycled CF	27–94
GF	13–32
	49–54
	7–16
China reed fibre	3.6
Flax fibre	6.5

200-1500

10-50

Table 4
Contributions to the embodied energy of preregs.

Prepreg manufacturing sub-processes	Specific energy consumption (MJ/kg)
Resin blending	0.1
Resin coating	1.4
Resin impregnation	2.1
Prepreg winding	0.2
Atmosphere control	20.8
Raw material storage	11.5
Prepreg storage	3.4
Release coated paper production	0.5

30

Table 6
The embodied energy of common thermoset resins.

Thermoset resins	Typical service temp. (°C) [32]	Embodied energy (MJ/kg)
Epoxy	130	76–80
		47–93
		126–139
Phenol	150	33
		73–81
Polyester	120	63–78
		68–75
Polyurethane	n.a.	32–64
Polyurethane (flexible foam)	75	67
Polyurethane (rigid foam)	155	88–97

30-100

Table 8
SEC of typical composite manufacturing processes.

Manufacturing process	Specific energy consumption (MJ/kg)
Autoclave (thermoset)	47
Autoclave (thermoplastic)	141
Autoclave (thermoset, CF)	386
Autoclave	21–23
Autoclave (aerospace component)	>600
Hand lay-up/Spray-up	8–13
Spray-up	15
Hand lay-up	19
Hand lay-up (thermal oven cur., thermoset, CF)	220
Hand lay-up (microwave cur., thermoset, CF)	265
CDF (thermoplastic)	85
Thermoforming (hot compound)	30–79
Preform matched die	10–11
Cold press	12
	28–36
Compression moulding (hot press)	3–4
	14–18
RTM (thermoset)	27
RTM (thermoplastic)	81
RTM	12–13
VARI	10–11
	3–5
VARI (thermal oven cur., thermoset, CF)	82
VARI (microwave cur., thermoset, CF)	91
Filament winding	3
	6–8
Pultrusion	3
	3–10
Laser assisted automated tape laying	0.5–1.4 (MJ/m)

300?

20?

3-10?

INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE DES PROCÉDES DE MISE EN FORME DES COMPOSITES

Etude réalisée
sur le territoire français

RAPPORT FINAL

EXPERTISES

juin
2024

IPC

Process	MJ/kg composite	Kg CO ₂ eq/kg composite
Wet lay-up	12	0.67
Spray molding	20	1
Infusion processes	58.5	2.56
Light RTM	23.9	1.18
Pultrusion	8.5	0.2
Filament winding	12	0.5
SMC	28	0.9
Prepreg compression (180°C, 1 hour)	89.2	1.19
Autoclave cure* Prepreg materials	40-600 30	

* Lunetto et al., Journal of Manufacturing Processes 85 (2023) 858–874

A retenir

- Les principales méthodes de mise en oeuvre des composites, en fonction du facteur de forme du renfort, de la distance relative parcourue par la résine, de la complexité des pièces, et des volumes de production/temps de cycle autorisé.
- Prochain cours: les phénomènes physiques et comment les modéliser...