

# Besoins industriels et problématiques

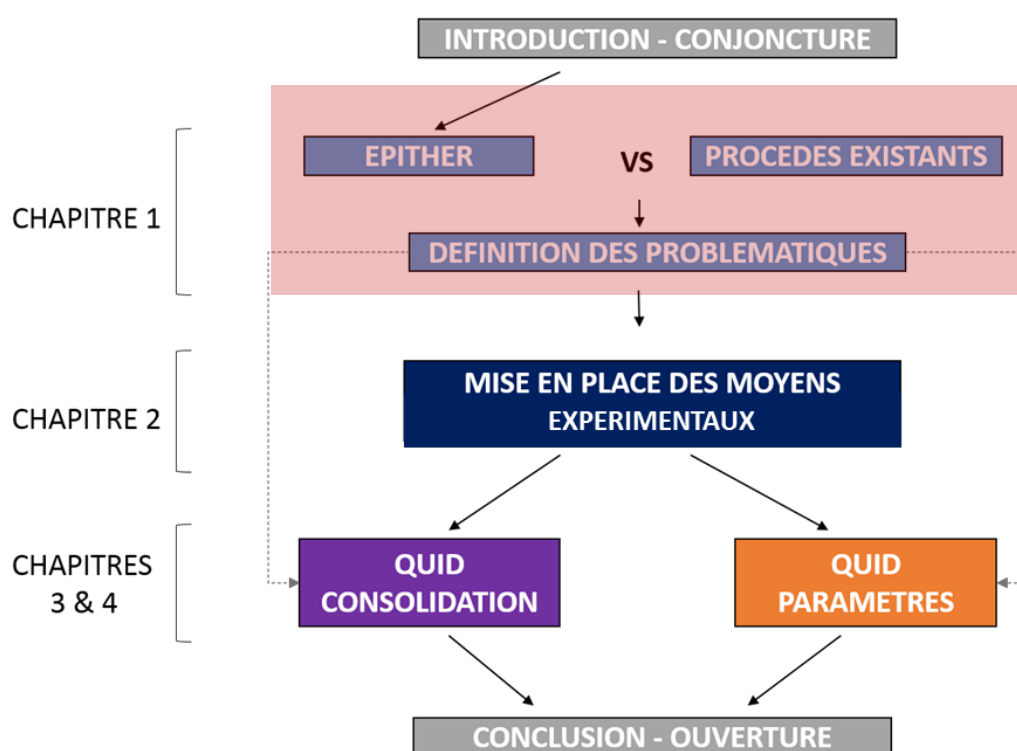
## MISE EN SITUATION :

Un des défis industriels de ces dernières années réside dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques spécifiques des structures automobiles et aéronautiques. Cette problématique a trouvé une réponse dans l'utilisation de nouveaux matériaux tels que les composites présentant des caractéristiques mécaniques intéressantes via la gestion de leur orientation.



## SOMMAIRE

I - INTRODUCTION	13
II - PERFORMANCES MECANIQUES	13
II) 1 - Améliorations par optimisation géométrique	14
II) 2 - Améliorations par optimisation des matériaux -composites	14
II) 3 - Mécanique du composite	20
II) 3) 1 - Micro-mécanique d'un pli unidirectionnel	21
II) 3) 2 - Macro-mécanique des composites	22
III - CONTEXTE TECHNICO-ECONOMIQUE DE MISE EN FORME DE COMPOSITES	24
III) 1 - Procédés et cadences composite	24
III) 2 - Temps de cycle et de mise en forme	26
IV - SYNTHESE DES PERFORMANCES	27
V - PROCEDE DE FABRICATION DE L'ETUDE	29
V) 1 - Historique	29
V) 2 - Procédés actuels de mise en œuvre des thermoplastiques	30
V) 3 - Problématiques similaires dans procédés existants	31
VI - ETAT DE L'ART	32
VI) 1 - Les différentes échelles d'observation du composite	33
VI) 2 - Procédés connexes et problématiques liées	33
VI) 2) 1 - Procédés de forgeage de composite	33
VI) 2) 2 - Comparaison aux différents procédés incluant la problématique de tension de fibres	34
VI) 2) 3 - Précontrainte des fibres	37
VI) 3 - Mouvements des fibres dans un composite à l'état de fusion	41
VII - SYNTHESE DE L'ETAT DE L'ART	42
VIII - CONCLUSION	43



## I - Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'introduire les problématiques traitées dans la thèse ainsi qu'un état de l'art permettant d'apporter un certain nombre de voies d'exploration dans la résolution de ces problématiques.

Dans un premier temps, il est proposé d'introduire l'utilisation de matériaux composites par l'amélioration des performances mécaniques des produits. La notion de composite est alors explicitée afin d'introduire les définitions de couple composite et de donner les principales lois caractérisant le comportement mécanique de ces matériaux.

Les principaux procédés de fabrication composite seront par la suite expliqués, permettant d'introduire le procédé nommé EPITHER (Estampage Innovant de Pièces Thermoplastiques). Ce procédé a pour objectif la réalisation de pièces structurales, c'est-à-dire visant de hautes performances mécaniques, avec des cadences de production élevées.

La description de l'historique du projet permet de mettre en avant un panel de projets et procédés concurrents, possédant des verrous scientifiques communs, lié au type de mise en forme. Ces verrous sont introduits en fin de chapitre ainsi qu'une bibliographie permettant de donner un certain nombre de voies d'exploration pour la thèse.

## II - Performances mécaniques

Le concepteur de produits mécaniques dispose de plusieurs outils pour améliorer le rapport résistance mécanique / masse.

Une première méthode ou possibilité est de réaliser une amélioration topologique de la pièce, par exemple via des outils numériques utilisant des boucles de simulations. L'optimisation topologique consiste à trouver la bonne répartition de matière dans un volume donné soumis à des contraintes.

La seconde méthode d'amélioration se situe dans le choix et l'utilisation d'un matériau permettant d'augmenter les résistances mécaniques spécifiques, en gardant la même géométrie, ou en réalisant aussi une boucle d'amélioration. Une difficulté est la maîtrise et la possibilité de la fabrication de la géométrie du produit associée à un matériau.

## II) 1 - Améliorations par optimisation géométrique

En optimisation topographique, ou optimisation de forme, la géométrie change pour répondre à un besoin spécifique de l'utilisateur. Par exemple, la mise en place d'une nervure permet de rigidifier la pièce en gardant une géométrie de base fixe.

En optimisation topologique, la densité des éléments finis, lors de la simulation, varie de 0 à 1 en fonction des contraintes internes dues aux chargements et aux conditions aux limites. Cela permet d'obtenir une forme, image du chemin parcouru par les efforts, dans la pièce. Ce principe est couramment utilisé dans les premières phases de conception de pièces, où seul l'encombrement, le cas de chargement et les conditions aux limites sont connus comme dans la figure 1 issue des travaux de (Duysinx, 1996) qui montrent un cas d'optimisation topologique de triangle de suspension. Les éléments ne subissant pas de chargement ont une densité proche de 0 tandis que les éléments fortement chargés sont à 1.

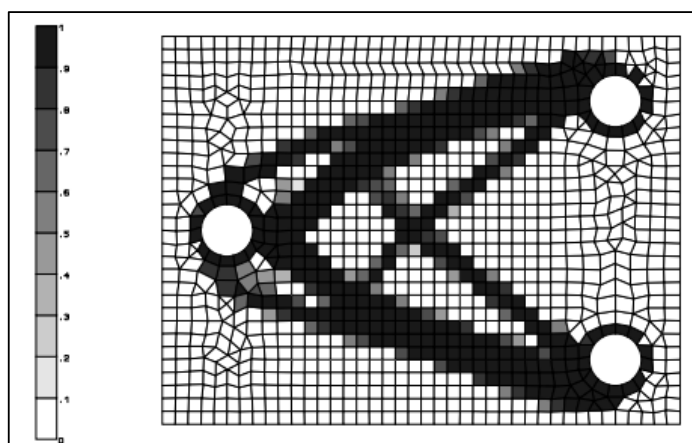


Figure 1 : Principe de l'optimisation topologique

## II) 2 - Améliorations par optimisation des matériaux -composites

Lors de la mise en place d'un cahier des charges industriel, pour la réalisation d'une nouvelle gamme de pièces composites, plusieurs critères d'industrialisation doivent être abordés. Le premier est l'environnement mécanique (et fonctions associées) de la pièce et son cas de chargement. Le second est la quantité de pièces à réaliser sur une période de production donnée, ce qui définit la cadence de mise en forme, et donc intrinsèquement oriente le choix du procédé. D'un point de vue des matériaux, l'optimisation se réalise selon :

- ✓ Le cas de chargement qui définit les résistances mécaniques nécessaires au bon fonctionnement de la pièce. L'optimisation d'un matériau, en vue d'un allègement de la structure se fait donc, au moins, à iso-caractéristiques mécaniques, en diminuant la masse volumique. Le résultat est une résistance spécifique améliorée.

Le choix du matériau s'oriente ainsi, dans le cas de l'optimisation d'une pièce métallique, vers un autre alliage ou vers les composites (cf : flèche bleue sur la figure 2). Pour exemple, l'outil académique CES Edupack permet ce genre d'utilisation, proposant au concepteur des variantes de matériaux, à caractéristiques mécaniques équivalentes, comme par exemple ici le module de Young.

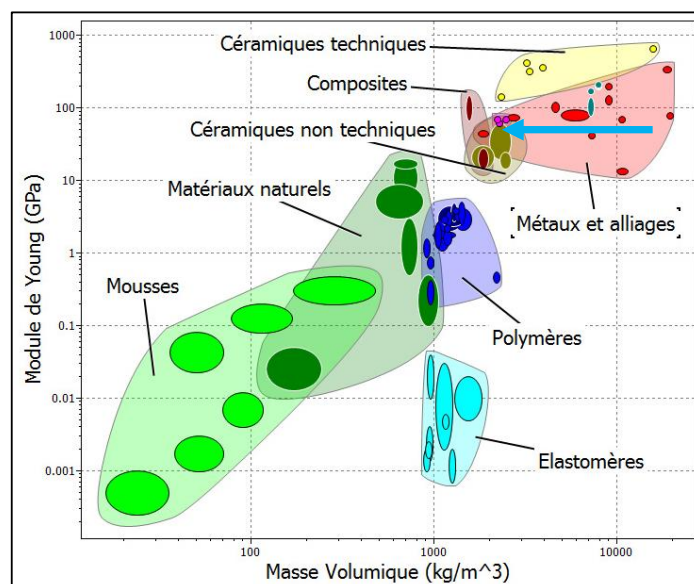


Figure 2 : Classification des matériaux - CES Edupack

Cependant il est nécessaire de ne pas omettre un certain nombre de règles dans l'optimisation matériaux :

- La première est de prendre en considération que tous les matériaux ne sont pas isotropes, et les matériaux composites en sont un bon exemple. Une pièce automobile de liaison au sol, en composite, peut très bien résister aux cas de chargements « classiques », d'une pièce couramment conçue en acier, mais n'offre que peu de résistance dans le cas d'un choc entraînant une déstructuration du matériau car elle ne permet que très peu de déformation

plastique. C'est le cas des contraintes de torsion entraînant des délaminages partiels ou complets de la pièce dans des éprouvettes unidirectionnelles.

L'anisotropie du matériau devra ainsi être optimisée en fonction des cas de chargements du produit fini.

- La seconde règle dans l'optimisation matériaux est de prendre en compte l'environnement cité dans le cahier des charges spécifique à la pièce. Cela comprend les conditions thermomécaniques d'utilisation de la pièce (exemple : résistance mécanique correcte à des températures élevées) qui orienteront le choix du couple composite. La pièce peut, par ailleurs, être soumise à des conditions de fonctionnement bien spécifiques (ex : grenailage dans une pièce de liaison au sol).

Les matériaux composites sont définis de la façon suivante :

*« Un produit composite représente l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles. La nouvelle structure ainsi obtenue a des propriétés physiques bien supérieures à celles caractérisant le matériau de base ». (Mihaluta, 2011)*

Comme présentés sur la figure 3, ils sont constitués d'une matrice et d'un renfort. Le renfort supporte les contraintes mécaniques tandis que la matrice sert de liant, et transmet les contraintes d'un renfort à un autre.

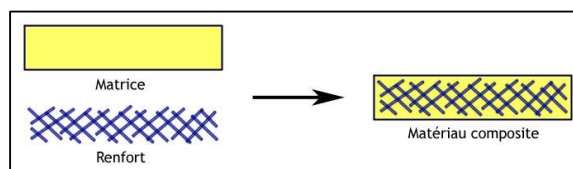


Figure 3 : Représentation d'un composite - livementor - définition d'un composite

Il existe plusieurs types de matériaux composites, en allant du bois, qui est un composite naturel, au béton armé. Les classes de composites industriels, cités dans cette étude, sont communément composés d'une matrice thermoplastique ou thermodurcissable. Il existe par ailleurs des composites avec des matrices différentes comme des matrices métalliques ou céramiques (REF GADOW). Suivant l'essor du domaine de la plasturgie depuis quelques dizaines d'années, les matériaux composites s'imposent comme une alternative fiable aux alliages métalliques dans la conjoncture de réductions des masses embarquées dans les domaines du transport. Il existe un nombre considérable de composites différents grâce aux possibilités d'assemblage fibres matrice qui sont de plus en plus importants. Cependant deux grandes familles de matériaux composites sont différenciables :

- **Les composites à matrice thermdurcissable**, qui sont injectés/infusés par des procédés comme le RTM (Resin transfert molding). Ils ne peuvent pas être reformés et sont difficilement recyclables. Une fois la polymérisation réalisée, l'ensemble des liaisons entre les chaînes de polymère sont figées, et ne peuvent qu'être maintenues ou définitivement détruites. Un moyen de les recycler est donc de les broyer et de recharger une résine avec la poudre obtenue afin d'apporter des propriétés spécifiques.
- **Les composites à matrice thermoplastiques** peuvent être remis en forme. Ils sont utilisés dans les procédés de compression comme le BMC (Bulk Molding Compound) ou, plus techniques, dans les procédés comme le CFRT (Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic). Cette famille de composite est la plus récente, et offre de nombreuses possibilités dans la mise en forme des pièces structurelles des nouveaux moyens de transport.

Dans le manuscrit et dans les différents travaux seul les composites à matrice thermoplastique sont étudiés et utilisés en raison de leur capacité de remise en forme au-dessus de la température de fusion du thermoplastique. De cette capacité est née l'idée de thermoformage composite. C'est une technique utilisée depuis longtemps dans la mise en forme de pièces de faible épaisseur, mais peu connue pour l'obtention de pièces dites massives, à fibres continues. En effet, dans la plupart des cas ce sont des plaques, préchauffées par un système infrarouge, qui sont mises en forme pour obtenir une morphologie plus complexe. Comme cité dans l'introduction, les composites thermoplastiques à fibres continues sont en plein essor dans le domaine des pièces structurelles, tant pour le domaine de l'automobile que de l'aéronautique. En plus d'être recyclables, ils doivent répondre non seulement aux cas de chargements qui leur seront imposés lors de leur cycle de vie, mais parfois aussi aux conditions extrêmes qu'ils peuvent connaître, comme des écarts de température très élevés (cas d'une pièce extérieure aéronautique). La réalisation pièce composite adaptée dépend dans ce cas du mécanicien, du plasturgiste, mais aussi du chimiste améliorant ses formulations afin d'obtenir une meilleure interface fibre matrice et de meilleures résistances aux différentes conditions d'utilisation. Le nombre de possibilités de couplage est encore augmenté par l'introduction dans la matrices de charges, fibres de verres, fibres de carbones, etc., permettant des résistances spécifiques améliorées, comme présenté dans la figure ci-dessous issue des techniques de l'ingénieur (Piccirelli and Giocosa, 2011)



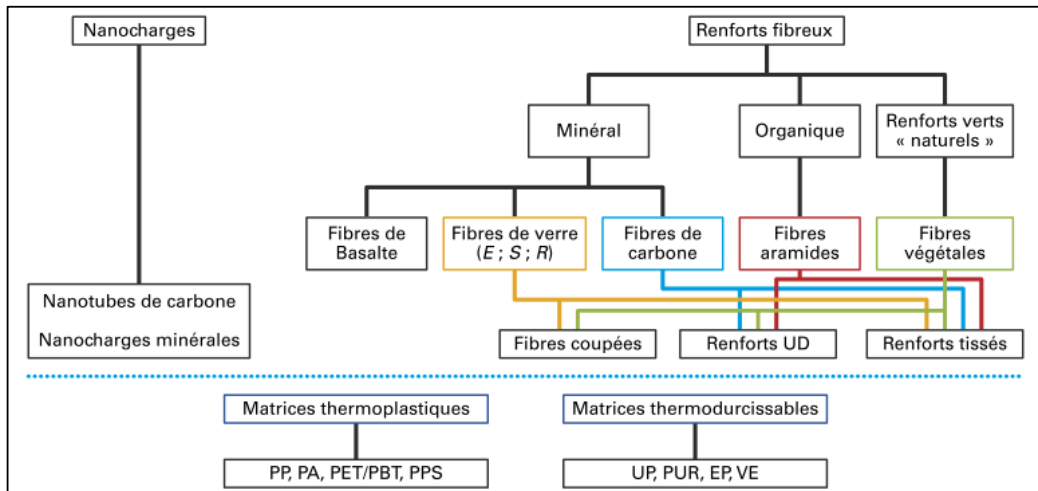


Figure 4: Différents couples composites, renforts, matrices et charges

Les renforts

Différents types de fibres sont présentes sur le marché et sont vendues et développées dans de nombreuses configurations. Il existe ainsi des fibres synthétiques et naturelles classées selon leurs résistances mécaniques. La fibre de carbone est la plus utilisée dans l’aéronautique pour des caractéristiques mécaniques spécifiques très élevées (le rapport résistance mécanique / masse volumique est très intéressant). Par ailleurs, il existe des fibres de verre, répandues dans le domaine de l’automobile, du kevlar et des fibres naturelles telles que le lin ou le chanvre. La plupart des caractéristiques mécaniques des fibres couramment utilisées, comme critères de choix, sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques des fibres courantes et comparaison

Nom	Masse volumique	Module de Young	Contrainte à la traction	Rigidé spécifique
Fibre de verre	2,5 g/cm <sup>3</sup>	70 GPa	1700 Mpa	28 Gpa
Fibre de carbone	1,8 g/cm <sup>3</sup>	230 à 820 Gpa	2000 à 7000 Mpa	128 à 455 Gpa
Aramide	1,4 g/cm <sup>3</sup>	130 Gpa	3000 Mpa	98 Gpa
Polyéthylène	0,97 g/cm <sup>3</sup>	170 Gpa	3000 Mpa	175 Gpa
Acier	7,8 g/cm <sup>3</sup>	210 Gpa	750 Mpa	27 Gpa
Aluminium	2,7 g/cm <sup>3</sup>	75 Gpa	260 Mpa	28 Gpa

Le conditionnement de ces matériaux est varié, les fibres sont vendues en bobines, sous différentes formes, qu’elles soient tissées ou co-mêlées torons par torons. (Une fibre co-mêlée est composée de fibres de carbones continues, mélangées à des fibres de thermoplastique. Il existe plusieurs types de co-mêlages). Elles peuvent aussi être découpées en fibres courtes et pré-mêlées avec du thermoplastique pour des procédés de mise en forme comme les BMC (Bulk molding compound) (LE, 2011). Pour les procédés visant la réalisation de pièces à hautes caractéristiques des fibres continues sont utilisées avec une maîtrise de l’anisotropie.

Les matrices

La matrice est le liant présent dans le composite. Son rôle est de figer la structure et de transmettre les efforts entre les différents renforts. La matrice polymère peut être thermoplastique ou thermodurcissable. Dans le cas d’une remise en forme ultérieure (cas de l’utilisation d’une préforme) la matrice est thermoplastique. Il existe plusieurs classes de polymères en fonction du type d’utilisation. Pour une utilisation dans des conditions spécifiques tels que de grands écarts de températures, l’utilisation de polymère à hautes performances est nécessaire. C’est ainsi qu’on retrouve des thermoplastiques à hautes températures de fusion tels que le PEEK ou le PEKK dans des utilisations aéronautiques. Les prix de ces polymères sont très élevés à cause de leurs moyens de mise en œuvre spécifiques.

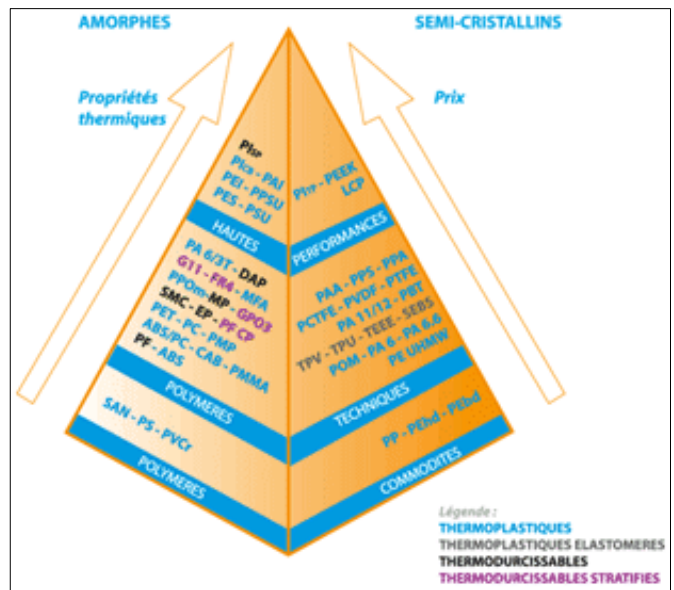


Figure 5 : Pyramide d'utilisation des polymères - Dediene Multiplasturgy

Comme montré dans la figure 5, il existe 2 grandes familles de polymères (en plus d'être thermoplastiques ou thermodurcissables) :

- les polymères amorphes comme le PMMA ou le PET où il n'y a pas de structure dans les chaînes de polymères (métaphore du plat de spaghetti)
- les polymères semi-cristallins comme le PPS où les chaînes s'ordonnent pendant la polymérisation.

Ces polymères sont définis thermiquement par trois grandeurs :

- la température de transition vitreuse qui correspond à un passage amorphe des chaînes polymères
- la température de fusion,
- la température de recristallisation.

Tableau 2 : Polymères communs – données issues de caractérisations IS Composite

Désignation	Nom	Type	T° transition vitreuse	T° cristallisation	T° fusion	Masse volumique
PPS	Polysulfure de phénylène	Semi-cristallin	90°C	243°C	285°C	1,35 g/cm <sup>3</sup>
PEEK	Polyétheréthercétone	Semi-cristallin	162°C	304°C	348°C	1,31 g/cm <sup>3</sup>
PEKK	Polyéthercétonecétone	Semi-cristallin	155 °C	277°C	332°C	1,31 g/cm <sup>3</sup>
Paht	Polyamide haute température	Semi-cristallin	155°C	232°C	271°C	-
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle	Amorphe	-	-	135°C	1,188 g/cm <sup>3</sup>

L'étude réalisée a donc privilégié l'utilisation d'un composite aéronautique, constitué d'un thermoplastique appelé PPS (Polysulfure de phénylène), qui est généralement utilisé pour les pièces de précision grâce à sa bonne fluidité à température de fusion. Cette nécessité a été définie via un cahier des charges client, directement lié au développement du procédé de mise en forme. Il s'agit d'un cahier des charges aéronautique, ce qui correspond à la réalisation d'une pièce ayant des tenues mécaniques élevées à des températures hautes comme basses, et possédant un taux de porosité très faible.

## II) 3 - Mécanique du composite

Les performances mécaniques des pièces composites sont une variable dépendante des fibres utilisées. La performance mécanique du composite dépend ainsi de :

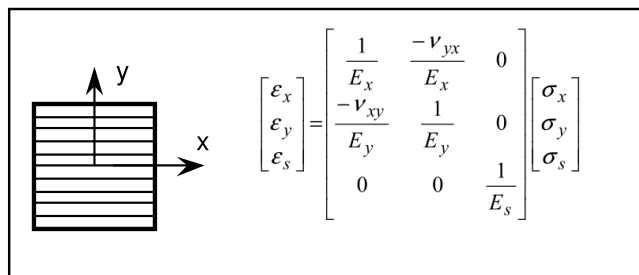
- la longueur des fibres ; courtes longues ou continues ;
- la fibre utilisée ; carbone, verre, aramide ;
- de l'orientation en fonction du chargement mécanique de la pièce.

- Le taux de fibre
- La cohésion fibre

Comme précisé précédemment la matrice thermoplastique utilisée répond quant à elle à d'autres caractéristiques mécaniques, comme la résistance à la température, à la corrosion, au froid, etc. (même lors de comparaisons de stratifiés composites avec des aciers faiblement alliés cf : (Degeratu and Bizdoaca, 2007). Pour introduire la mécanique du composite, il est proposé de définir rapidement les principales grandeurs définissant un pli unidirectionnel, puis un aspect macro-mécanique sera traité.

II) 3) 1 - Micromécanique d'un pli unidirectionnel

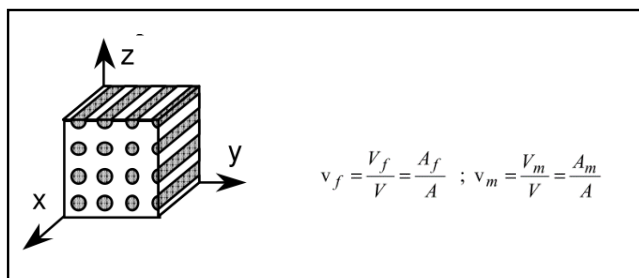
Le cas le plus élémentaire de mécanique des composites est décrit comme un pli élémentaire (qui correspond à une couche élémentaire constituée d'un alignement de fibres et de matrices). Il s'agit d'un pli unidirectionnel avec des fibres continues orientées dans le sens longitudinal du pli. L'ensemble des caractéristiques thermomécaniques sont obtenues via la loi des mélanges définissant la répartition des propriétés en fonction des taux volumiques associés à chacun des composants. La loi de Hooke, pour un volume élémentaire fini, est ainsi définie, dans le cas d'une élasticité anisotrope, comme :



The diagram shows a rectangular ply with horizontal fibers, oriented along the x-axis. A coordinate system (x, y) is shown with x pointing right and y pointing up. To the right of the diagram is a matrix equation relating the strain vector  $\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_s \end{bmatrix}$  to the stress vector  $\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_s \end{bmatrix}$ .

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\nu_{yx} & 0 \\ -\nu_{xy} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{E_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_s \end{bmatrix}$$

Avec  $E_x$  : module d'Young longitudinal,  $E_y$  : Module d'Young transversal,  $E_s$  : Module de cisaillement dans le plan et  $\nu_{xy}$  Coefficient de poisson longitudinal. La loi des mélanges est définie comme le rapport des taux volumiques de la fibre et de la matrice. Pour passer d'un taux volumique à un taux massique, il faut utiliser un rapport de densité.



The diagram shows a 3D rectangular volume element with fibers oriented along the z-axis. A coordinate system (x, y, z) is shown with x pointing left, y pointing right, and z pointing up. To the right of the diagram are equations for the volume fractions of the fiber ( $v_f$ ) and matrix ( $v_m$ ).

$$v_f = \frac{V_f}{V} = \frac{A_f}{A} ; v_m = \frac{V_m}{V} = \frac{A_m}{A}$$

Avec :  $v_f$  : le taux volumique de fibres,  $v_m$  le taux volumique de matrice,  $V$  le volume total,  $V_f$  le volume occupé par les fibres,  $V_m$  le volume occupé par la matrice,  $A_f$  l'aire des fibres sur une section élémentaire,  $A_m$  l'aire de la matrice sur une section élémentaire. Si les porosités sont nulles ou négligées alors :  $v_f + v_m = 1$

Les problématiques liées au taux volumique de fibres, comme l'apparition de gradients à la suite des mises en forme seront rencontrées dans cette étude, et plus particulièrement dans le chapitre 3. La notion de taux volumique est importante dans l'équilibre mécanique des pièces car elle influence localement les résistances mécaniques en fonction de l'historique de mise en forme.

II) 3) 2 - Macro-mécanique des composites

Résistances spécifiques

Comme spécifié dans le paragraphe d'introduction des composites, l'avantage de l'utilisation de ces matériaux réside dans leurs caractéristiques mécaniques spécifiques ; il est possible de citer la résistance à la traction spécifique comme présenté sur la figure 6, ci-dessous. Avec les céramiques techniques, et dans le sens longitudinal des fibres, les matériaux composites sont très fragiles et ne possèdent quasiment pas de zone de déformation plastique. C'est encore plus vrai dans le cas spécifique des fibres de carbone continues qui ont un très grand module de Young.

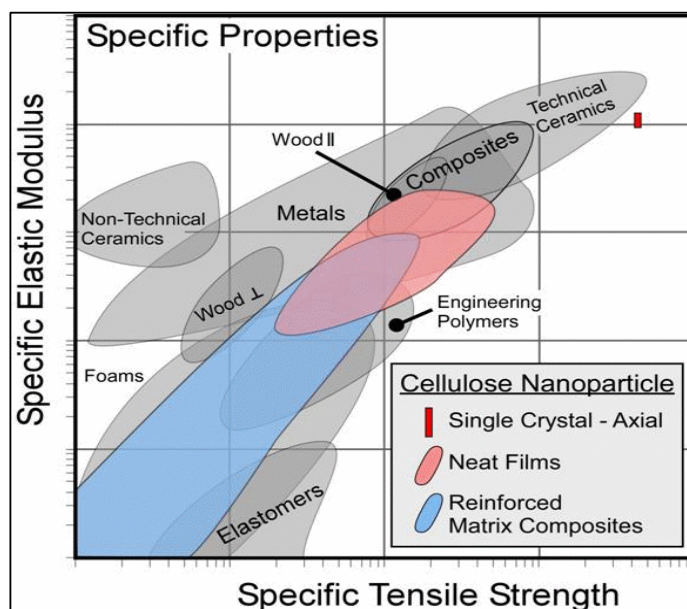


Figure 6 : Comparaison des différents matériaux en fonction de leur caractéristiques mécaniques – Source extérieure

### Taux volumique de fibre

La macro mécanique des composites est définie non seulement par couple composite utilisé (renforts/matrice) mais aussi par le rapport volumique entre ces deux éléments. Communément, le taux volumique de renforts se situe aux alentours de 40 % pour des composites de grande production comme c'est le cas dans les procédés tels que le BMC et le SMC. Ce rapport peut atteindre des valeurs élevées au-dessus desquelles le couple composite n'est plus viable. En effet la transmission des efforts entre les brins de renforts n'est plus assurée au-dessus d'un taux volumique identifié aux alentours de 70 % comme présenté dans les travaux de thèse de (Motahhari, 1998) (figure ci-après). Les études récentes tendent à se rapprocher de cette limite qui permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques spécifiques du composite. En effet, la fibre ayant en général une masse volumique inférieure à celle de la matrice, la réduction de la quantité volumique de matrice doit permettre la diminution de la densité moyenne du composite tout en augmentant ses caractéristiques mécaniques. Cette valeur seuil a cependant son importance dans l'évaluation de la santé matière finale de la pièce, dans un souci d'homogénéité des caractéristiques mécaniques. Dans le cas de mise en forme massive certaines zones peuvent présenter des défauts caractéristiques d'essorage de résine, atteignant ainsi des taux volumiques de fibres trop élevés. De tels cas sont présentés dans la suite de cette étude.

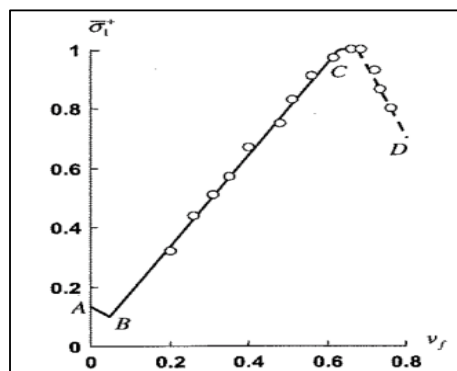


Figure 7 : Evolution des caractéristiques mécaniques en fonction du taux volumique de fibres – thèse Motahhari

La macro mécanique des composites est le résultat d'un couplage entre plusieurs paramètres. Comme présenté précédemment la composition du composite a une influence capitale dans le calcul de ces macros caractéristiques mécaniques. L'orientation des fibres a elle aussi une importance capitale dans la résistance aux différents cas de chargement de la pièce finale. Les différentes recherches dans le domaine des CFRT (Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic) tendent à utiliser au maximum les caractéristiques anisotropes du couple fibres thermoplastique. C'est le cas notamment dans les procédés comme l'enroulement filamentaire, qui sera

présenté plus tard dans cette étude, où les cas de chargement sont calculés à différentes orientations d'enroulement.

### Influence géométrique

Ce critère d'orientation des fibres est intrinsèquement lié un autre critère. Les spécificités morphologiques des pièces définissent, elles aussi, les résistances mécaniques des pièces composites produites. Les remontées de formes ou l'épaisseur des pièces sont des exemples d'utilisation et d'optimisation morphologique des pièces en vue de leur donner une résistance mécanique spécifique à un cas de chargement. Les pièces structurales, dans les domaines de l'automobile et de l'aéronautique, sont souvent dites « épaisses ». Une pièce est dite « épaisse » lorsqu'elle vérifie le critère de Tsai (Roy and Tsai, 2014) qui a étudié la mise en forme des cylindres composites massifs. La plus grande dimension de la pièce doit être équivalente à 10 fois l'épaisseur au maximum. Ce critère est valable dans le cas de son étude sur le cylindre composite formé par enroulement filamentaire et défini de façon arbitraire.

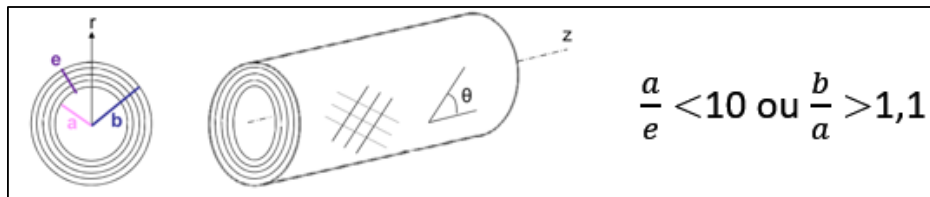


Figure 8 : Critère de Tsai

## III - Contexte technico-économique de mise en forme de composites

### III) 1 - Procédés et cadences composites

Les cadences de production dans le domaine des matériaux composites dépendent du processus de fabrication utilisé.

Dans l'industrie automobile, dans un souci de production à très haute cadence, ce sont des procédés tels que l'injection ou la compression qui sont en général prédominants. Le couple procédé de fabrication et matériau utilisé définit les caractéristiques mécaniques de la pièce finale. Dans les procédés à haute cadence se trouvent essentiellement les composites renforcés de fibres courtes avec des taux volumiques en renfort n'excédant pas les 40 %. Ces longueurs de fibres et ce taux volumique bas leurs donnent des caractéristiques mécaniques relativement basses,

très inférieures à celles pouvant être obtenues avec des fibres continues. Dans le domaine de l'aéronautique, nécessitant des cadences de production moins élevées que celle de l'automobile, les procédés utilisant des fibres continues sont prédominants comme présenté dans la figure 9 issue des techniques de l'ingénieur (Piccirelli and Giocosa, 2011).

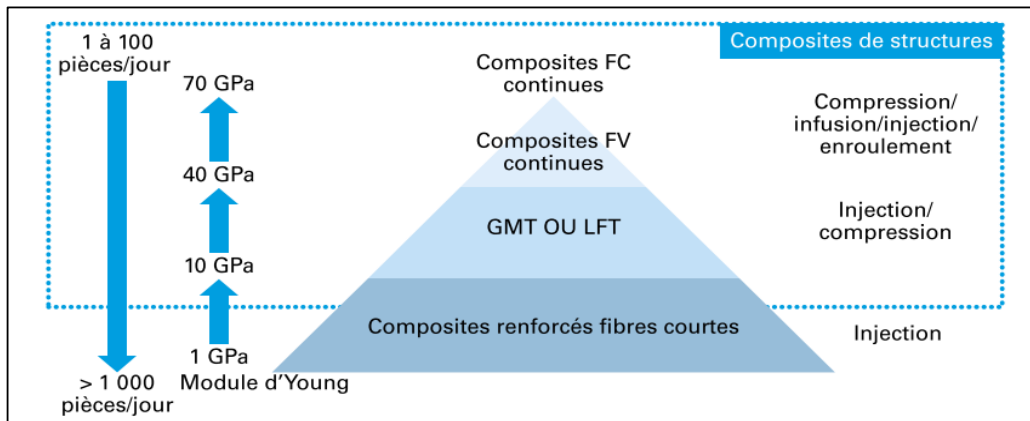


Figure 9 : Cadences et résistances mécaniques des procédés de fabrication composite- technique de l'ingénieur

Le défi de réalisation de pièces structurales dans le domaine de l'automobile réside justement dans la conciliation entre des cadences élevées et des caractéristiques mécaniques élevées via les composites à fibres continues. En terme de cadences pures, ce sont les injections et compressions de thermoplastique qui permettent la plus grande production. Sur la figure 10 ci-dessous, TP correspond à thermoplastique, TD correspond à thermodurcissable, BMC, déjà expliqué précédemment signifie Bulk Moulding Compound et RTM signifie Resin Transfer Molding.

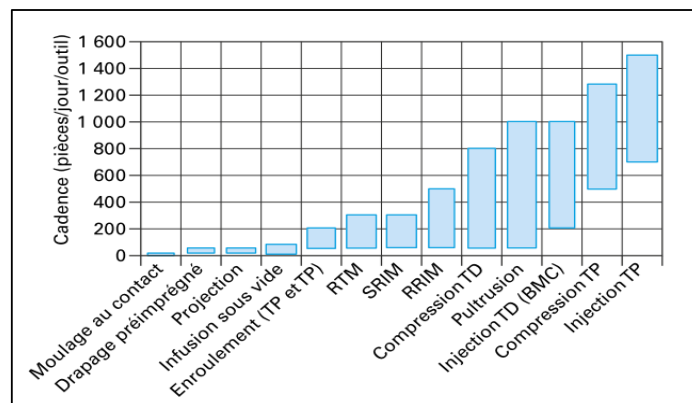


Figure 10 : Cadence estimée des différents procédés de fabrication composite, source Techniques de l'Ingénieur / Renault



### III) 2 - Temps de cycle et de mise en forme

Les temps de cycle sont propres aux procédés de mise en forme. Ils sont définis par l'ensemble des étapes de chauffe, d'imprégnation et de refroidissement nécessaire à la réalisation d'une pièce. Un certain nombre de temps sont dits incompressibles car ce sont des paramètres intrinsèques, c'est-à-dire qu'ils sont définis par le matériau lui-même.

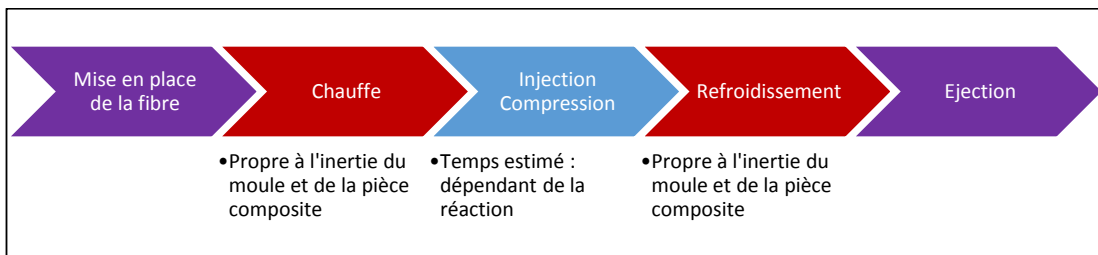


Figure 11 : Etapes générales de mise en forme

La plupart des procédés de mise en forme des composites peuvent être définis en trois étapes de mise en forme différentes correspondant à des temps spécifiques :

- Le premier type de temps est celui de la manutention des fibres sèches, pré-imprégnées ou co-mêlées. Il s'agit aussi du temps d'éjection de la pièce finie. Ce temps est limité par les capacités du robot ou de l'opérateur et peut être facilement optimisé.
- Le second type de temps est celui défini par la thermique du composite et de l'outillage.
- Le troisième et dernier type de temps est celui défini par l'injection ou la compression du composite

Un des temps incompressibles de la mise en œuvre est le temps de chauffe du composite défini par les caractéristiques thermiques du polymère et de la fibre, mais aussi par les conditions limites au niveau de la chauffe de l'outillage et les capacités calorifiques associées. Le caractère massif des pièces peut poser lui aussi un problème dans la chauffe et le refroidissement via les contraintes de recristallisation du polymère. Les cyclages thermiques des outillages permettent d'ores et déjà de répondre à un certain nombre de problématiques mais demandent des technologies coûteuses. Dans les procédés de compression à présent couramment utilisés dans l'automobile comme dans l'aéronautique, la mise en forme se réalise dans un outillage isotherme à une température inférieure à la température de recristallisation du thermoplastique. Le composite est chauffé en extérieur du moule, transformant ainsi un goulot d'étranglement en stock tampon.

Le cycle thermique de l'outillage peut être cependant nécessaire dans le cas de certaines injections ou compressions et des architectures d'outillages spécifiques sont développées en ce sens.

Des structures de refroidissement en nid d'abeilles en cours de développement permettront d'améliorer les temps de cycle thermique des outillages par le passage d'un fluide calorifuge sous pression, évitant ainsi la massivité des outillages de mise en forme classique. Un autre axe d'amélioration de temps de cycle pour la mise en forme des composites est l'injection haute pression de résine plus fluide et plus réactive.

## IV - Synthèse des performances

**Les besoins industriels des prochaines années se situent dans la réalisation de pièces mécaniques structurelles plus légères.** La fabrication de telles pièces passe par une optimisation des géométries mais aussi des caractéristiques mécaniques spécifiques du produit. Une amélioration des matériaux est plus qu'envisageable dans la conjoncture d'allègement des structures, et une solution à cette problématique est l'utilisation de matériaux composites thermoplastiques à fibres continues.

Un grand nombre de procédés de mise en forme composite permettent la réalisation de pièces à hautes performances mécaniques à des cadences faibles et non adaptées au secteur de l'automobile. Ces procédés, comme l'enroulement filamentaire ou le drapage, sont présentés dans la figure 12.

**Le défi industriel présent, dans l'aéronautique et surtout dans l'automobile, est la réalisation de pièces structurelles plus légères, en composite, à des cadences élevées.** Le mariage entre performances mécaniques et cadences de production élevées passe par l'utilisation des thermoplastiques renforcés par des fibres continues nommées CFRT (Continuous fiber reinforced thermoplastic).

Des problématiques technologiques sont d'ores et déjà identifiées dans le placement des fibres continues à haute vitesse, dans le cadre de développement d'autres procédés comme l'enroulement filamentaire.

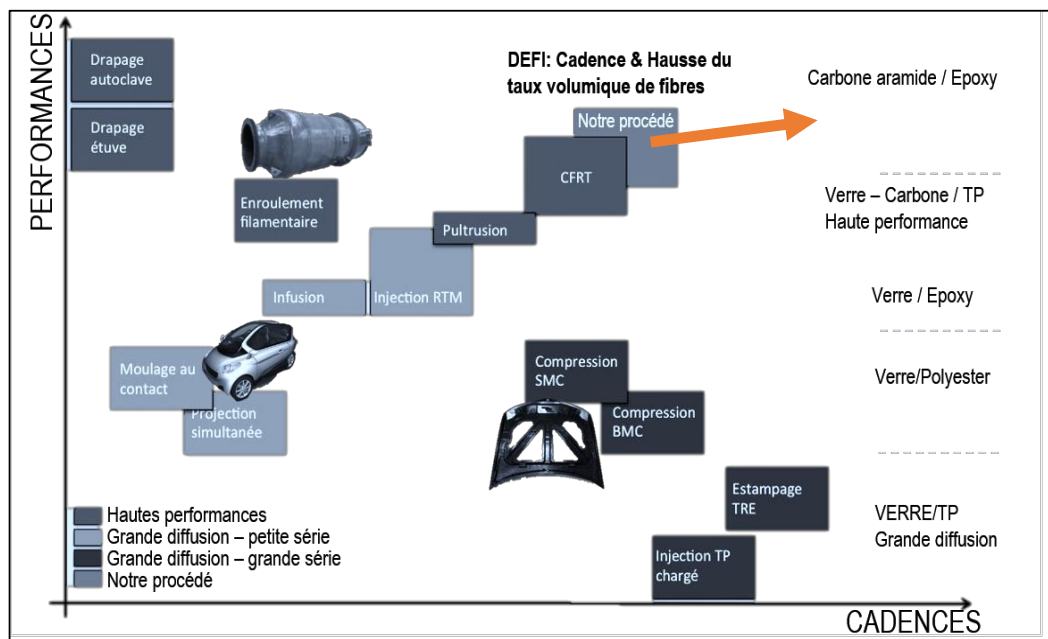


Figure 12 : Classement des procédés de mise en forme selon la cadence et les performances mécaniques

Cette thèse présente un procédé de mise en forme CFRT (Continuous fiber reinforced thermoplastic) ayant pour objectif la réalisation de pièces structurales à des cadences élevées (flèche orange sur la figure ci-dessus).

La réalisation de pièces structurales massives est possible par le développement d'un procédé répondant au cahier des charges suivant :

- utilisation maximale de l'anisotropie du composite en fonction des cas de changement
- mise en place de propriétés morphologiques complexes (maîtrise de la mise en position des fibres et de leur placement lors du procédé de mise en forme)
- réalisation de pièces à des cadences de production élevées

## V - Procédé de fabrication de l'étude

Le sujet de cette thèse est la contribution au procédé de mise en forme EPITHER, développé par un consortium.

### V) 1 - Historique

L'objectif des travaux de thèse est de contribuer à la définition du procédé de mise en forme composite massif EPITHER. Il s'agit d'un procédé développé dans le cadre d'un consortium entre trois partenaires :

- AM Valor (filiale recherche et valorisation de Arts et Métiers ParisTech)
- Institut de Soudure (anciennement PPE)
- SETFORGE du groupe Farinia.

Ce procédé a été imaginé depuis 2010 avec notamment le dépôt d'un premier brevet français en 2011 et d'un second brevet, quant à lui européen, en 2015. L'objectif du consortium est de développer un procédé de mise en forme de pièces composites massives, à hautes caractéristiques spécifiques, afin de réaliser des pièces à utilisation structurelle dans l'automobile comme dans l'aéronautique. Au départ, l'idée de ce procédé est venue de la rencontre entre un industriel de la forge et un industriel du composite. La transposition des méthodes de forge, pour la réalisation de pièces en composite massif, s'inscrit aujourd'hui dans la diversification des activités des industriels de la sidérurgie. Dans un souci de réduction des coûts une transposition des méthodes utilisées en forge est aujourd'hui envisagée. L'utilisation de l'anisotropie, à l'avantage du concepteur, est connue dans les domaines de la forge à froid à travers la gestion du fibrage des pièces forgées. (CF figure 13 ci-dessous).

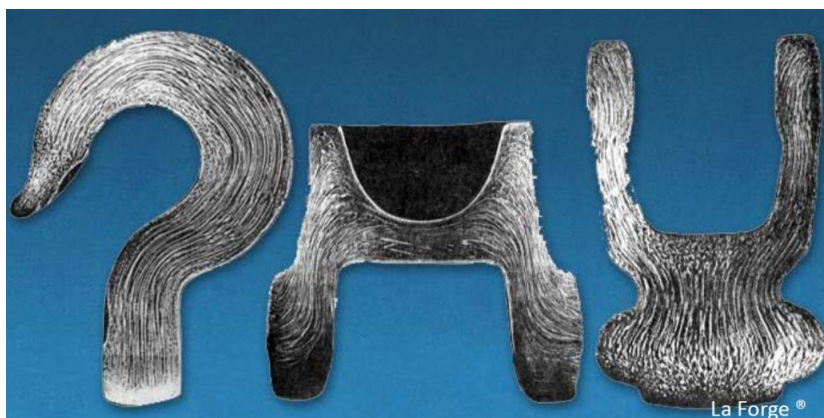


Figure 13 : Fibrage de pièces en acier

Le concept de la mise en forme est simple ; une préforme morphologiquement simple est enroulée et pré-consolidée, elle est ensuite chauffée à température de fusion, déplacée dans un moule isotherme à une température inférieure à la température de cristallisation du thermoplastique, puis finalement mise en forme afin de supprimer les porosités et de lui donner des propriétés morphologiques plus complexes.

Le développement de ce nouveau procédé appelé EPITHER comporte un ensemble d'axes de recherche comme la stratégie d'enroulement des fibres continues, la préhension des préformes à fusion et le formage isotherme du composite. Un certain nombre de procédés présentent des problématiques similaires, comme la gestion de la tension des fibres dans les méthodes de mise en forme. La connaissance et la compréhension de ces problématiques permet une meilleure stabilité du procédé, ainsi qu'une gestion optimisée des caractéristiques mécaniques.

## V) 2 - Procédés actuels de mise en œuvre des thermoplastiques

Deux méthodes ont été étudiées pour réaliser les pièces selon le procédé EPITHER, en fonction de la matière première utilisée, des thermoplastiques. Cette matière première peut être disponible comme une bobine de fibres co-mêlées, avec un thermoplastique déjà enroulé avec la fibre de carbone ou de verre. Il s'agit de la voie fondue. La voie sèche, quant à elle, correspond à l'enroulement de fibres sèches, puis l'injection de résine lors de l'étape de préformage. Cette voie a été écartée au fur et à mesure des travaux par sa difficulté de mise en œuvre. En effet l'injection de pièces sèches complexes s'avère très difficile ; les chemins préférentiels de résine sont difficilement gérables et se montrent très problématiques dans le remplissage homogène de la pièce. Quelle que soit la méthode, deux opérations bien distinctes sont à l'origine du procédé de mise en forme EPITHER et sont présentées sur la figure 14.

- **Première opération** : réalisation d'ébauche simple par enroulement de fibres continues, puis finition de la préforme par **voie sèche** (injection de résine une fois les fibres sèches placées dans le moule) ou **voie fondue** (imprégnation en continu ou semi produit co-mêlé). L'ébauche ou préforme se veut comme morphologiquement simple et facilement réalisable. Elle peut être pré-consolidée ou non.

- **Deuxième opération** : forgeage de la pièce composite pour finition de la morphologie des pièces

Dans cette opération la remontée de nervures ou de rainures permet de donner des résistances spécifiques aux pièces. Cette mise en forme finale

permet de réduire le taux de porosités afin d'atteindre les critères d'acceptabilité des domaines automobiles et aéronautiques.

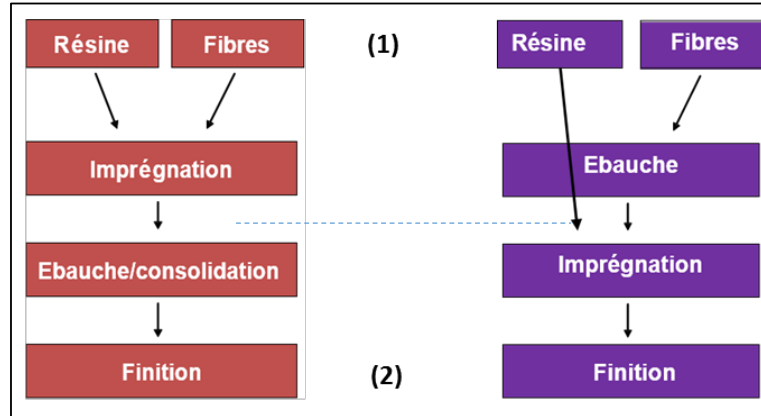
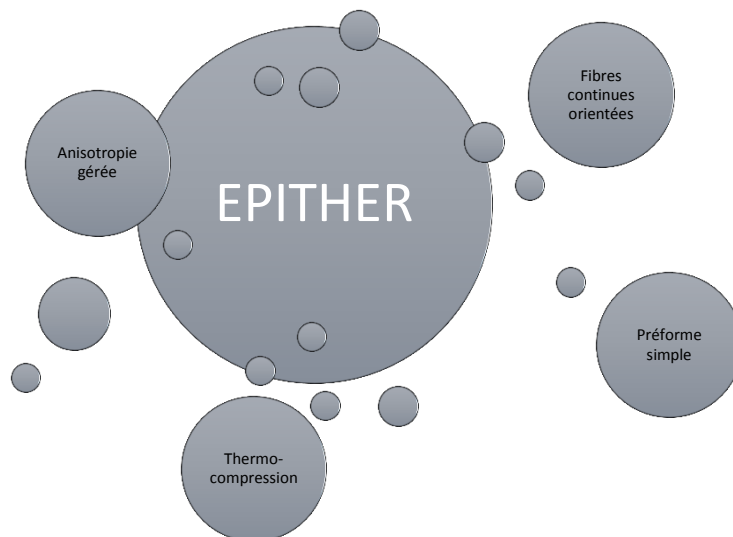


Figure 14 : Deux voies de fabrication des pièces EPITHER

### V) 3 - Problématiques similaires dans les procédés existants

Le procédé développé correspond à une thermocompression de composite épais et non de plaques. Cette thermocompression est réalisée sur des pièces à fibres continues dont l'orientation est choisie au mieux par le concepteur afin d'utiliser au mieux l'anisotropie finale de la pièce. Cette thermocompression doit apporter des propriétés morphologiques spécifiques sans perdre l'orientation des fibres ni la tension qui leurs est appliquée lors de l'opération de préformage. Un ensemble d'idées gravitent autour de ce nouveau procédé de mis en forme comme l'orientation des fibres continues, le préformage ou la réalisation de thermocompression massive.



Ces idées se retrouvent en dans un certain nombre de procédés existants.

- La gestion de l'anisotropie et l'orientation des fibres continues est une problématique étudiée dans l'enroulement filamentaire, visant la réalisation, en général, de réservoir ou de tubes en composite (Hahn, Kempner and Lee, 1993). L'enroulement filamentaire est un procédé à présent connu et une des problématiques, qui lui est couramment associée, est la gestion de la tension d'enroulement des fibres.
- La prédictibilité du mouvement des fibres lors de la mise en forme est une problématique couramment associée au procédé de thermocompression de plaques, mais aussi SMC et BMC. L'étude des mouvements des fibres continues en thermocompression n'est que très peu présente dans la littérature et sont généralement assimilée à des mouvements fluides sans coefficient de friction avec l'outillage. (Balasubramanyam, Jones and Wheeler, 1989)

L'identification des besoins industriels a permis de déterminer un ensemble de procédés connexes à notre étude. Ces procédés possèdent leurs problématiques propres qui peuvent parfois être comparées à celles rencontrées dans le procédé EPITHER mais aussi des pistes de solution. Une comparaison directe avec l'existant est nécessaire pour identifier les problématiques et verrous scientifiques de la thèse, auxquelles ne répondent pas les études existantes.

## VI - Etat de l'art

Dans l'état de l'art, il est nécessaire dans un premier temps de rappeler les différentes échelles d'observation du composite, allant de l'observation nanoscopique à structurelle, afin de comprendre à quel niveau d'intégration se situent les différentes études présentées dans les différents points présentés.

Par la suite, le procédé EPITHER est comparé aux différents procédés incluant des notions de tension de fibres continues et l'apport de la précontrainte des fibres est évalué dans une certaine limite. Les phénomènes de mouvements de fibres, appelés dans la littérature «Squeezing flow », sont mis en avant ainsi que les modèles de consolidation composite courant.

## VI) 1 - Les différentes échelles d'observation du composite

Il existe cinq niveaux d'intégration dans l'observation des composites. Ces niveaux d'intégration sont présentés sur la figure 16, ci-dessous. À chaque niveau d'intégration une observation différente est nécessaire.

L'aspect multi échelles des composites est nécessaire dans la simulation mécanique des pièces composites. En effet, le modèle à une échelle structurelle est souvent lié à une homogénéisation d'un modèle réalisé à une échelle mésoscopique, qui correspond à un pli composite. L'échelle macroscopique montre plusieurs plis orientés et l'échelle structurelle détermine la pièce finale. Dans cette thèse, les caractéristiques étudiées comme les taux de porosités peuvent s'observer à des échelles microscopiques comme macroscopiques et correspondent respectivement à des micros porosités et à des macros porosités. Ces porosités seront présentées dans le chapitre suivant.

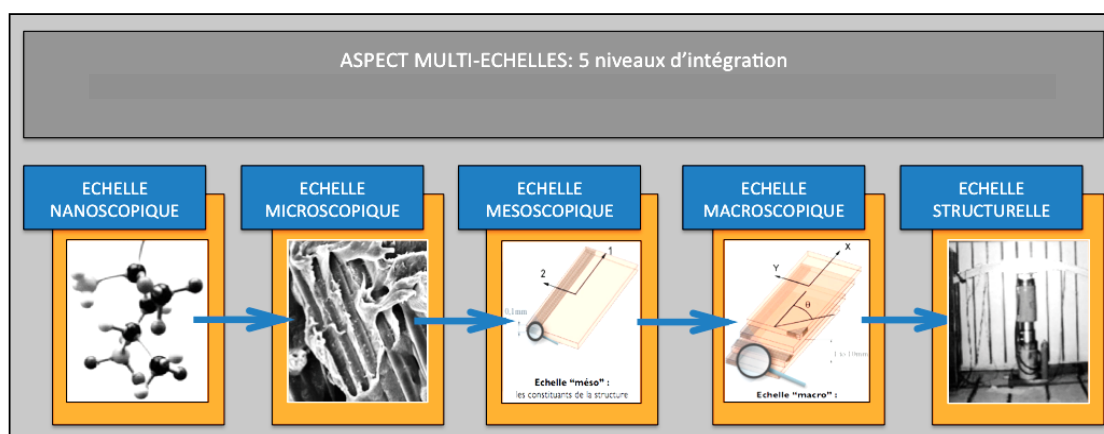


Figure 15 : Aspect multi-échelle des composites

## VI) 2 - Procédés connexes et problématiques liées

### VI) 2) 1 - Procédés de forgeage de composite

La dénomination forgeage de composite a été utilisée dans quelques cas ces dernières années. Il ne s'agit évidemment pas de forgeage, qui correspond à une déformation plastique du matériau, mais plutôt d'une thermocompression spécifique. Les procédés développés par Duqueine, Forged Composite (Feraboli *et al.*, 2010) ou Carbone Forgé, correspondent à des thermocompressions de composite à fibres longues, afin d'obtenir des pièces netshape, à utilisation semi structurelle. Les applications sont très rares et se sont limitées, pour le moment, aux loisirs et sports mécaniques. L'ensemble des procédés correspondant à une dénomination « carbone forgé » sont présentés sur la figure 16.



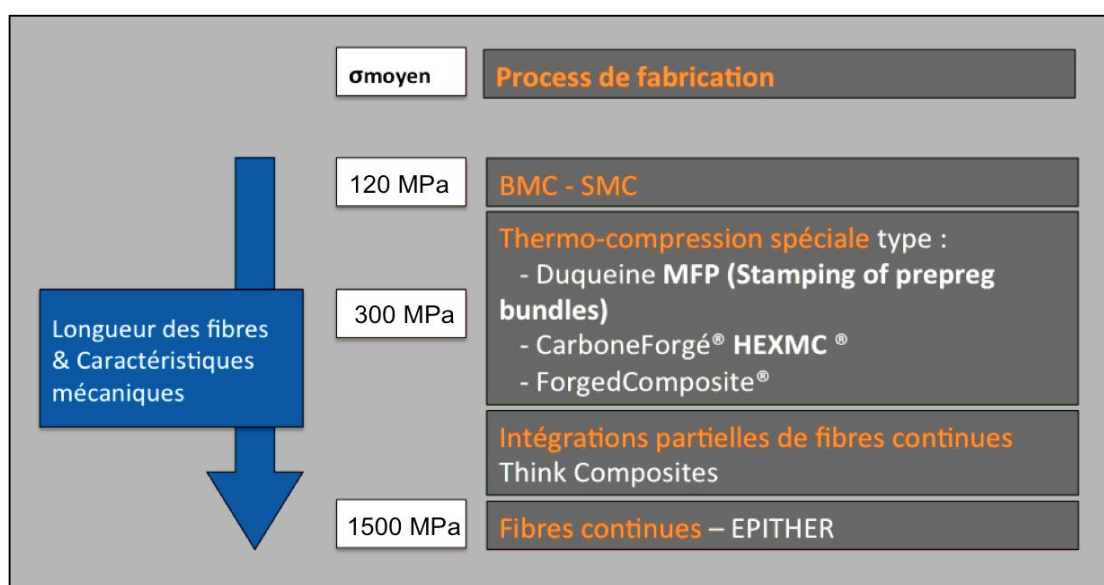


Figure 16 : EPITHER et Forgeage de composite existant



Figure 17 : Pédalier Carbone Forgé

Une pièce structurale réalisée par carbone forgé est présentée dans l'illustration, figure 17, ci-dessous. Il s'agit d'un pédalier ayant la spécificité de posséder des inserts mis en place lors de la mise en forme. D'autres pièces ont été réalisées via cette thermocompression spéciale et notamment des triangles de suspension pour Lamborghini via la société Forged-composite. Ces productions sont cependant à l'état de prototypes et restent très sporadiques. Les résistances

mécaniques sont par ailleurs inférieures à celles souhaitées dans le procédé EPITHER utilisant des fibres continues dans son ensemble.

VI) 2) 2 - Comparaison aux différents procédés incluant la problématique de tension de fibres

L'enroulement filamentaire correspond à la phase d'ébauche dans le procédé de mise en forme EPITHER. Le principe est relativement simple : une mèche de fibres (tous les types de fibres sont utilisés ; mais en général il s'agit de carbone ou de verre) est pré-imprégnée d'une résine thermoplastique/thermodurcissable puis est enroulée

selon un certain angle autour d'un moule. Il s'agit de pièces de révolution de type « réservoir ou tuyaux ». Le couple résine/fibre est comprimé pour éviter les porosités et bien placer la fibre, puis est polymérisé à l'aide d'un système chauffant. Ce procédé industriel est un des rares utilisant une seule mèche de fibres continues. Il présente un intérêt certain pour les problématiques rencontrées dans le travail de thèse de par sa spécificité ; les modes de ruptures, qu'ils soient entre fibre et fibre, ou de délaminages entre la fibre et la matrice, sont caractérisés lors d'essais de résistance du matériau.

Ainsi, l'enroulement filamentaire présente un certain nombre de problématiques scientifiques, et il est possible de citer de plusieurs thématiques étudiées à travers les publications :

- La caractérisation des modes de ruptures du matériau composite;
- L'influence de la tension des fibres sur les caractéristiques mécaniques du matériau. Il s'agit du thème d'étude de (Mertiny and Ellyin, 2002)
- La modélisation par éléments finis du procédé d'enroulement filamentaire. Cette modélisation est possible via la création d'un modèle multi-échelles équivalent comme explicité dans le chapitre de modélisation des composites. Il s'agit du thème d'étude de : (Zhao *et al.*, 2001)

Dans le cas de la réalisation d'un réservoir, figure 18, les problématiques telles que l'influence de la précontrainte lors de l'enroulement, ont fait l'objet de simulations numériques et calculs analytiques (pour par exemple comprendre la contrainte imposée par la succession des couches de composite); d'essais mécaniques sur des matériaux composites précontraints ainsi que des analyses micrographiques sur échantillons.

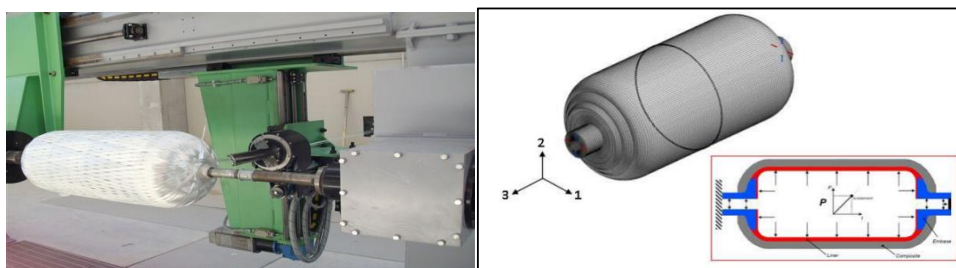


Figure 18 : Enroulement filamentaire d'un réservoir & simulation

#### Principe de fonctionnement de l'enroulement filamentaire

Les mèches de fibres subissent une pré-imprégnation (si elles ne le sont pas déjà) à travers un procédé de bain solvant. Ces fibres sont ensuite guidées et enroulées autour d'un mandrin rotatif. (Cf Figure 19) Plusieurs couches sont appliquées autour du moule, avec différents angles d'enroulement afin de créer un matériau résistant

aux contraintes dues à la pression interne du réservoir, aux chocs et à la fatigue du matériau qui peut se créer à la suite des cycles de remplissage. La polymérisation se fait au moment de l'enroulement via un système de chauffe et parfois compression des fibres. L'enroulement peut se faire de différentes façons en fonction des nécessités d'empilement de la pièce; les paramètres clé étant : l'angle d'enroulement et la force/vitesse d'enroulement comme présenté dans la figure 19 ci-dessous issue des techniques de l'ingénieur (Krawczak, 2002)

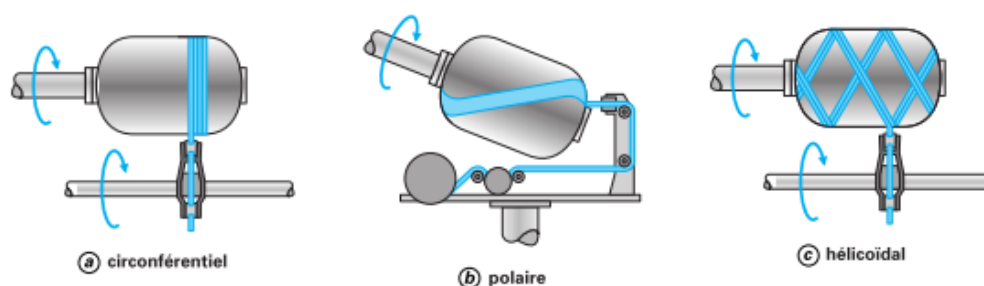


Figure 19 : Principe de l'enroulement filamentaire

#### Plusieurs types d'enroulements filamenteux

Les modes d'enroulements répondent à des critères de résistance à la contrainte différents et sont ainsi définis en fonction de l'outillage, de l'usage et de l'application. Il existe 3 types d'enroulement filamentaire ; l'enroulement polaire, l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal comme présenté sur la figure 19.

L'exemple de l'enroulement filamentaire n'est pas anodin. Il s'agit d'un procédé connu, utilisant des fibres continues en optimisant l'anisotropie en fonction du cas de chargement défini dans le cahier des charges. Les techniques d'enroulement et la technologie utilisée dans le domaine de l'enroulement filamentaire fournissent une bonne approche à la réalisation de pièces simples, dans le cadre du procédé connexe à cette étude.

#### Verrous scientifiques associés

L'enroulement filamentaire est un procédé de fabrication à présent connu, maîtrisé pour certaines applications industrielles. Au cours de son développement, un certain nombre de verrous ont dû être résolus pour bien le maîtriser. C'est ainsi que des méthodes de simulation spécifiques ont été développées sur les lois de micromécaniques présentes dans les études des matériaux composites. Les

problématiques scientifiques liées à l'enroulement filamentaire peuvent être résumées des manières suivantes :

- L'optimisation des stratégies d'enroulement;
- L'influence des paramètres procédés comme la vitesse ou la force d'enroulement sur la résistance de la pièce et sa santé matière;
- L'optimisation de la simulation par éléments finis de pièces réalisées par enroulement filamentaire (Création de matériaux homogènes en fonction des directions d'enroulement);
- La création de critères spécifiques à ces modes de rupture;

La précontrainte des fibres dans le procédé d'enroulement filamentaire présente une importance capitale pour gérer les caractéristiques mécaniques de la pièce, mais aussi son taux volumique de fibres. On peut par exemple citer le travail de thèse de (Thomas, 2011), qui s'est intéressé aux mécanismes d'endommagement d'un réservoir de stockage de gaz réalisé en enroulement filamentaire, avec comme renfort un carbone HR (Haute résistance) et une matrice polyamide. Le procédé expérimental a été mis en place, avec différentes trajectoires d'enroulement, des caractérisations mécaniques à la rupture par essais de traction sur anneaux composites, ainsi que des simulations numériques par éléments finis.

#### VI) 2) 3 - Précontrainte des fibres

##### La précontrainte dans les plaques

Un certain nombre d'études, et notamment dans l'enroulement filamentaire, permettent de donner des éléments de réponse à la question : "Pourquoi précontraindre les fibres ?". Cette question a été abordée dans différents travaux de thèse comme par exemple dans le travail de (Motahhari, 1998), mais aussi, plus récemment dans la thèse de (Krishnamurthy, 2006). Les objectifs généraux sont de définir l'apport des pré-tensions des fibres dans les propriétés du matériau, mais aussi de comprendre les différentes méthodes disponibles pour réaliser des composites précontraints. Il faut, par ailleurs, réaliser une comparaison avec le matériau envisagé pour réaliser le projet de thèse ; du PEEK/PEKK (polyétheréthercétone/polyéther-kétone-hétone) ou du PPS (Polysulfure de phénylène) pour la partie aéronautique. Lors de l'enroulement des préformes, dans le procédé connexe à notre étude, la précontrainte des fibres peut avoir une influence capitale sur les propriétés morphologiques et mécaniques de la pièce. La tendance, liée à cette précontrainte lors de l'enroulement, doit être identifiée via les recherches bibliographiques sur les contraintes de fibres.

### Analogie avec le béton précontraint

La précontrainte du béton permet au matériau de résister efficacement aux contraintes mécaniques comme la traction ou la flexion présentes dans les modes de charges usuels rencontrés dans le domaine du génie civil. La figure 20 ci-dessous présente une analogie entre béton et composite.

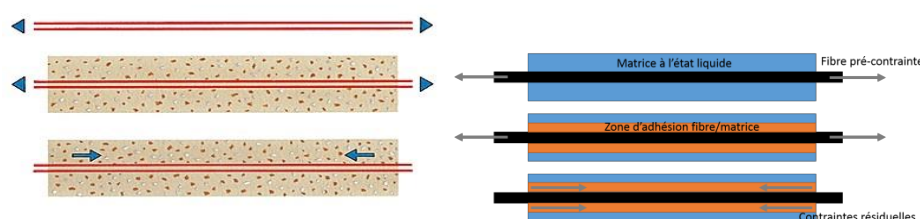


Figure 20 : Analogie béton (à gauche, cours béton précontraint) et composite (à droite)

Le principe est simple ; le béton armé (avec l'acier faisant office de renfort) subit plusieurs changements lors de sa conception comme présenté dans la figure 20 ci-dessus. Dans le cas d'un pont ; les renforts d'aciers sont contraints, le liant se fige, et les contraintes dans le béton sont libérées. L'équilibre mécanique est atteint, et les renforts métalliques précontraints appuient sur le béton, l'obligeant à travailler en compression. Ce procédé est particulièrement efficace car le béton est un matériau supportant très mal les efforts de traction (qui sont présents dans la moitié de la géométrie lors d'une flexion, dans la partie basse).

Les différences de caractéristiques thermomécaniques entre la fibre et la résine entraînent des variations non négligeables dans les conceptions de pièces composites. L'idée utilisée pour les matériaux composites est très similaire. La précontrainte des fibres, la polymérisation, la relaxation des contraintes des fibres et ainsi la compression de la matrice imposée par l'équilibre statique d'une pièce permet, selon les études (Krishnamurthy, 2006), d'obtenir une meilleure liaison renfort/matrice, mais aussi une nette amélioration des caractéristiques mécaniques. Les mécanismes en jeu dans la réalisation du béton précontraint peuvent ainsi être appliqués au composite, mais dans une certaine limite, bien sûr, celui du comportement des plaques composites (pièces fines). En effet les études pratiques ne permettent pas d'appliquer ces principes aux pièces composites massives (Rien n'a été testé d'après les études bibliographiques trouvées jusqu'à présent).

## Méthode de précontrainte

L'ensemble des études proposant la réalisation de pièces composites, à base de résine thermodurcissable ou thermoplastique, se concentrent essentiellement sur des géométries simples, permettant la caractérisation mécanique rapide, comme les plaques. Celles-ci offrent la possibilité de découper d'éprouvettes de traction/flexion normalisées, tout en utilisant un outillage simple (réduisant ainsi les coûts d'usinage). La matrice la plus couramment utilisée est l'époxy, mais dans le cadre des travaux présentés dans ce manuscrit, bien sûr, seulement des thermoplastiques (permettant le thermoformage) sont utilisés. La recherche bibliographique a permis de regrouper une grande partie des méthodes de réalisation de plaques composites à partir de fibres précontraintes ; elles ont l'avantage de fournir des résultats variés présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Ensemble des études prenant en compte la précontrainte des fibres

Auteur(s)	Année	Matériau	Objectif	Méthode	Résultats
Tuttle	1988	CA + Epoxy	Trouver l'influence de la précontrainte sur les contraintes résiduelles du matériau	/	Avec des taux volumiques de fibres arrivant à 60%, les effets de température et de polymérisation entraînent des contraintes résiduelles importantes. Précontraindre les fibres diminue cet effet (de 24MPa à 0,98MPa)
Jorge et al	1990	Verre + polyester	Caractéristiques mécaniques, sens unidirectionnel	Poids	Seuil limite de précontrainte de fibres au dessus duquel la contrainte maximale admissible finale du matériau ne change plus. L'analyse des ruptures ne présente pas de différences entre la matière précontrainte et celles qui ne l'est pas
Shulte et Marissen	1992	CA + Epoxy	Caractéristiques mécaniques, sens unidirectionnel	V-Slot	Amélioration de la contrainte admissible et de l'allongement maximum d'environ 3%
Rose and Whitney	1993	CA + Epoxy	Modèle mathématique et mesure de la première rupture	Enroulement filamentaire	La contrainte à la rupture du premier ensemble augmente de 29% avec une précontrainte de 700MPa
Sui et al	1995	VIRALL (hybride)	Caractéristiques mécaniques, sens unidirectionnel	Thermocompression	Augmentation de certaines caractéristiques mécaniques (Young, contrainte à la rupture), mais diminution de l'allongement à la rupture
Tuttle et al	1996	CA + Epoxy	Caractéristiques mécaniques, sens unidirectionnel & fracture transverse	Cylindre hydraulique	Meilleure accroche de la matière qui permet de réduire le délaminage
Motaharri et Cameron	1997-1998-1999	Verre + Epoxy	Contrainte résiduelle, impact et flexion	Machine tension horizontale	Reduction des contraintes résiduelles, +33% d'amélioration à la résilience, amélioration de la résistance à la flexion
Zhao et Cameron	1998	Composé verre et PP	Caractéristiques mécaniques, sens unidirectionnel	Fibre alignment rig	Amélioration de la contrainte admissible et de l'allongement maximum d'environ 20%, amélioration de la résistance au délaminage d'environ 10%
Hadi et Ashton	1998	Verre + Epoxy	Caractéristiques mécaniques, sens unidirectionnel à différents taux de fibre	Enroulement filamentaire	Amélioration de la contrainte admissible et de l'allongement
Dvorak et Surorov	2000	Verre + Epoxy	Modélisation mathématique du phénomène de précontrainte de fibres et de ses influences	/	
Jevons et al	2002	Verre + Epoxy	Impact à faible vitesse, tissé	Biaxial loading machining	Faible amélioration de la résistance à l'impact
Krishnamurthy	2005-2006	Verre + Epoxy	Caractéristiques mécaniques, sens unidirectionnel, évaluation des capteurs d'efforts pour caractériser le matériau	Machine tension horizontale	Amélioration des caractéristiques mécaniques, notamment la fatigue
Schlichting et al	2010	Résines dentaires	Résistances à la flexion	Poids	Amélioration de la raideur du matériau, de la flèche maximale et de la résistance à la flexion sur des très petites éprouvettes (2mm*25mm) avec des précontraintes allant jusqu'à 300N (taux volumiques de fibres bas)

Très peu de cas d'études ont été réalisés avec des matériaux thermoplastiques. (Zhao and Cameron, 1998) ont utilisé un co-mélé Verre/Polypropylène, permettant d'obtenir des améliorations intéressantes des caractéristiques mécaniques. Ces thèses et publications comme celles de (Bekampienė, Domskienė and Širvaitienė, 2011)

représentent l'ensemble des cas d'expérimentation mise en place pour comprendre l'influence de la tension des fibres ; comme unique variable dans la fabrication de composites. Dans les cas d'enroulement filamenteux, la tension des fibres est considérée comme une variable, dépendant essentiellement de la force et de la vitesse d'enroulement. Les rares cas d'utilisation de matrices thermoplastiques n'ont cependant pas permis de comprendre l'évolution de la tension des fibres suite au procédé de thermoformage, point essentiel de notre projet.

Toutes les méthodes de précontraintes présentées dans la partie précédente permettent de mettre en avant l'influence de la tension des fibres, dans la réalisation de pièces simples. La plupart des études réalisées jusqu'à présent concernent des plaques composites, précontraintes à différents niveaux. Les essais ont été réalisés principalement avec des fibres de verre et des résines thermodurcissables comme l'époxy. Ces essais ont, dans la majorité des cas, permis d'affirmer que la précontrainte des fibres apporte une augmentation significative des caractéristiques mécaniques, jusqu'à un seuil limite de précontrainte, après lequel ces caractéristiques se dégradent.

L'influence mécanique de la précontrainte des fibres est prouvée. Cependant de nombreuses questions restent en suspens concernant l'influence de cette action de précontrainte sur les renforts.

- Quelle est l'influence de la précontrainte des fibres sur les caractéristiques mécaniques d'une pièce plus complexe qu'une plaque (type biellette) ?
- L'influence d'un thermoformage après refroidissement du matériau précontraint. Dans quelles mesures se réaliserait le relâchement interne des contraintes ?
- L'influence de la précontrainte sur des pièces plus complexes, avec des rayons courts, sur la perméabilité du matériau.

Les conclusions générales de cette étude bibliographique sont donc :

- Améliorations quasi-systématiques des caractéristiques mécaniques des pièces (20-30%) grâce en grande partie à un meilleur alignement des fibres
- Améliorations des résistances au délaminage (contact fibre résine) & Amélioration des modes de destruction des pièces composites
- Très peu d'études ont été réalisées avec des thermoplastiques.
- Aucune étude trouvée ne s'est intéressée au thermoformage
- Aucune étude trouvée ne permet de comprendre le comportement de pièces plus massives dans le cas de thermoformages}

### VI) 3 - Mouvements des fibres dans un composite à l'état de fusion

Il existe plusieurs types de mouvements lors de la mise en forme du composite à température de fusion. Dans le cas des fibres continues, l'étude de (Barnes and Cogswell, 1989) discerne quatre types de mouvements comme présenté dans l'illustration, figure 21, ci-dessous. Le premier est le passage de résine à travers les fibres ; ce phénomène s'appelle la percolation. Le deuxième, qui correspond à une remontée de nervures dans le sens transversal aux fibres s'appelle « squeezing flow » et est défini dans les études de (Barnes and Cogswell, 1989) et (Balasubramanyam, Jones and Wheeler, 1989). Ce mouvement transverse des fibres est repris dans les études de (Shuler and Advani, 1996), qui ont intégré le thermoplastique à température de fusion comme un fluide non-newtonien.

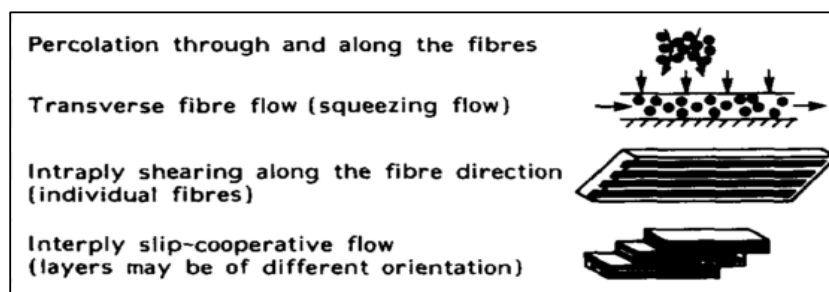
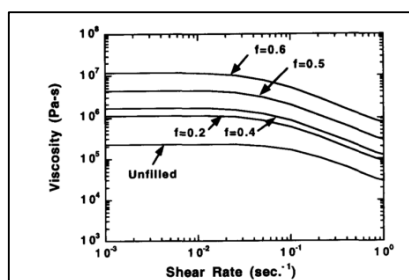


Figure 21 : Principaux mouvements relatifs fibre matrice (Barnes and Cogswell, 1989)

Un fluide non newtonien peut-être rhéo-fluidifiant, c'est-à-dire que sa viscosité diminue en augmentant le taux de cisaillement qui lui est imposé. À des taux de cisaillements bas, le caractère rhéo-fluidifiant des thermoplastiques à température de fusion n'apporte que très peu de changement dans l'imprégnation car la fluidité reste quasi constante, comme présenté dans le graphique ci-dessous issu des travaux de (Shuler and Advani, 1996).



Graphique 1 : Viscosité en fonction du taux de cisaillement, à différents taux volumiques de fibres

Cependant, à des vitesses plus élevées, qui peuvent être provoquées par des changements de forme soudains, cette caractéristique s'avère importante et doit être prise en compte.



## VII - Synthèse de l'état de l'art

Les matériaux composites sont qualifiables à différentes échelles d'observation. Dans le cas de la consolidation composite des défauts types sont observables ; les micros porosités à l'échelle microscopique et les macros porosités à l'échelle macroscopique. Un ensemble de procédés similaires au procédé de fabrication EPITHER ont été présentés dans l'état de l'art.

**Les procédés de mise en forme qui possèdent la dénomination forgeage de composites** sont des procédés de thermocompression spécifique de composites à fibres longues. Cela permet la réalisation de pièces d'habillement et de pièces semi structurelles telles qu'un pédalier d'automobile. Les résistances mécaniques proposées par ces procédés ne conviennent pas au cahier des charges défini pour la réalisation de pièces composites structurelles.

**Le procédé d'enroulement filamentaire**, utilisant lui des fibres continues, présente un certain nombre de problématiques présentées et développées par la suite. Le caractère massif de ces pièces enroulées provoque parfois des mouvements de résine de l'intérieur vers l'extérieur de la pièce, créant ainsi un gradient de taux volumique de fibres. Aussi, l'influence de la précontrainte des fibres dans la résistance mécanique finale a été démontrée via l'étude bibliographique. Une amélioration quasi systématique des propriétés mécaniques est permise via l'alignement des fibres lors de leur mise en tension. Cela impacte directement les résistances mécaniques spécifiques en les améliorant de 20 à 30 % (exemple pour le module de Young), et en améliorant aussi la résistance au délaminage grâce à un meilleur contact fibre résine. Cependant, l'absence notable d'études sur la précontrainte des composites à matrices thermoplastiques soulève un certain nombre de questions :

- que deviennent les précontraintes des fibres après thermoformage ?
- ces précontraintes évoluent-elles dans le temps ?
- la massivité des pièces a-t-elle une influence sur l'état contrainte interne de l'enroulement ?

**L'étude bibliographique des mouvements du composite avec un thermoplastique à température supérieure à celle de fusion** a permis de mettre en avant quatre modes de mouvement de la matière. La fibre étend indéformable, c'est la matrice qui entraîne ses mouvements composites. À un état de fusion sa viscosité correspond à celle d'un fluide non newtonien ; elle se fluidifie lorsque le taux de cisaillement qui lui est appliqué augmente. Ce comportement est décrit par des lois rhéologiques comme par exemple la loi de Carreau Yasuda. Ces lois sont imputables dans les logiciels de simulation de mise en forme et le logiciel CFD, mais demande des capacités de calcul importantes.

## VIII - Conclusion

La conjoncture actuelle oblige les constructeurs automobiles aéronautiques de s'orienter vers la réalisation de pièces structurelles plus légères, permettant ainsi une réduction des masses embarquées et donc à la fois une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et des consommations énergétiques. L'allègement des structures peut-être réalisé via une optimisation topologique ou une optimisation du matériau utilisé. Le composite donne une alternative intéressante de par ses résistances mécaniques spécifiques élevées. Cependant la mise en place des composites dans la réalisation de pièces structurelles soulève un certain nombre de problématiques. Dans un premier temps les lignes de fabrication doivent être repensées et adaptées aux métiers de la plasturgie et du composite. Dans un second temps, d'un point de vue conception, l'utilisation de composite dans la réalisation de pièces structurelles impose des efforts de calcul et de simulation de par le caractère fortement anisotrope du matériau. L'optimisation de l'anisotropie doit être pensée et appliquée via le placement de fibres continues afin de répondre aux cas de chargement imposé par le cahier des charges de la pièce. Le procédé proposé dans cette étude est un procédé de mise en forme composite visant la réalisation de pièces structurelles massives, en utilisant au maximum l'anisotropie du matériau par le dépôt de fibres sous tension mais aussi par la mise en place de morphologies complexes lors du passage de préforme à forme finale. Ce procédé de fabrication possède des similitudes avec les thermocompressions courantes via le mouvement des fibres lors de la mise en forme, mais aussi avec l'enroulement filamentaire qui impose aux concepteurs de définir des stratégies d'enroulement (chemin normal et tension).

Il en ressort, des différentes études bibliographiques réalisées, une méconnaissance de l'influence de la massivité des pièces dans le cas des thermocompressions. Seul quelque cas de pièces massives sont présentés et ne permettent pas de comprendre les modes de consolidation des pièces réalisables dans le procédé EPITHER. Par exemple, une question reste en suspens ; **y a-t-il un gradient de porosité ou de taux volumique de fibres sur la hauteur d'une pièce massive thermocompression ?**

L'écoulement des fibres continues, lors de la mise en forme, peut être corrélé à un certain nombre de lois et d'expériences citées dans la bibliographie. Cependant ces lois ne sont applicables que sur des fibres continues en absence de tension lors de la mise en forme, ce qui change complètement le modèle et ramène l'étude à la question suivante : **comment se comportent les torons tendus lors de la mise en forme afin d'obtenir des propriétés morphologiques spécifiques ?**

Les consolidations sous tension n'ont été étudiées que dans les cas de matrices thermodurcissables et dans le cas de plaques. Cela ne permet pas de comprendre le mode de consolidation permettant le passage d'une préforme enroulée sous tension à

une pièce finale morphologiquement plus complexe. Il est ainsi intéressant de répondre à la question suivante : **quels sont les modes et étapes de consolidation des préformes enroulées sous tension à température de fusion lors de la mise en forme ?**

## IX - Liste des figures et bibliographie

Figure 1 : Principe de l'optimisation topologique .....	14
Figure 2 : Classification des matériaux - CES Edupack .....	15
Figure 3 : Représentation d'un composite - livementor - définition d'un composite....	16
Figure 4: Différents couples composites, renforts, matrices et charges .....	18
Figure 5 : Pyramide d'utilisation des polymères - Dedienne Multiplasturgy .....	19
Figure 6 : Comparaison des différents matériaux en fonction de leur caractéristiques mécaniques – Source extérieure.....	22
Figure 7 : Evolution des caractéristiques mécaniques en fonction du taux volumique de fibres – thèse Motahhari .....	23
Figure 8 : Critère de Tsai.....	24
Figure 9 : Cadences et résistances mécaniques des procédés de fabrication composite- technique de l'ingénieur.....	25
Figure 10 : Cadence estimée des différents procédés de fabrication composite, source Techniques de l'Ingénieur / Renault .....	25
Figure 11 : Etapes générales de mise en forme .....	26
Figure 12 : Classement des procédés de mise en forme selon la cadence et les performances mécaniques .....	28
Figure 13 : Fibrage de pièces en acier .....	29
Figure 14 : Deux voies de fabrication des pièces EPITHER.....	31
Figure 15 : Aspect multi-échelle des composites .....	33
Figure 16 : EPITHER et Forgeage de composite existant.....	34
Figure 17 : Pédalier Carbone Forgé .....	34
Figure 18 : Enroulement filamentaire d'un réservoir & simulation .....	35
Figure 19 : Principe de l'enroulement filamentaire .....	36
Figure 20 : Analogie béton (à gauche, cours béton précontraint) et composite (à droite) .....	38
Figure 21 : Principaux mouvements relatifs fibre matrice (Barnes and Cogswell, 1989) .....	41

- Balasubramanyam, R., Jones, R. S. and Wheeler, a. B. (1989) 'Modelling transverse flows of reinforced thermoplastic materials', *Composites*, 20(1), pp. 33–37. doi: 10.1016/0010-4361(89)90679-4.
- Barnes, J. a. and Cogswell, F. N. (1989) 'Transverse flow processes in continuous fibre-reinforced thermoplastic composites', *Composites*, 20(1), pp. 38–42. doi: 10.1016/0010-4361(89)90680-0.
- Bekampienè, P., Domskienè, J. and Širvaitienè, A. (2011) 'The Effect of Pre-Tension on Deformation Behaviour of Natural Fabric Reinforced Composite', *ISSN 1392-1320 Material Science*, 17(1).
- Degeratu, S. and Bizdoaca, N. G. (2007) 'CONSIDERATIONS SUR LE DIMENSIONNEMENT DES PLAQUES COMPOSITES STRATIFIEES A MATRICE POLYMERE', pp. 435–438.
- Duysinx, P. (1996) 'Du milieu continu à la structure élastique'.
- Feraboli, P., Gasco, F., Wade, B., Maier, S., Kwan, R., Salmon, W., Masini, A., Deoto, L. and Reggiani, M. (2010) 'FOR THE SUSPENSION ARMS OF THE SESTO ELEMENTO', pp. 1–13.
- Hahn, H. T., Kempner, E. a. and Lee, S. S. (1993) 'The stress development during filament winding of thick cylinders', *Composites Manufacturing*, 4(3), pp. 147–156. doi: 10.1016/0956-7143(93)90099-T.
- Krawczak, P. (2002) 'Réservoirs haute pression en composites', *Techniques*.
- Krishnamurthy, S. (2006) 'Prestressed advanced fibre reinforced composites: fabrication and mechanical performance', (February).
- LE, T. T. N. (2011) 'Prevision De La Loi De Comportement Des Composites Bmc', p. 192.
- Mertiny, P. and Ellyin, F. (2002) 'Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(12), pp. 1615–1622. doi: 10.1016/S1359-835X(02)00209-9.
- Mihaluta, M. (2011) 'Etude de la mise en œuvre industrielle d'un nouveau procédé de mise en forme de produits composites'.
- Motahhari, S. (1998) 'Fibre prestressed composites: A study of the influences of fibre prestressing on the mechanical properties of polymer matrix composites'.
- Picciorelli, N. and Giocosa, A. (2011) 'Les composites dans l'industrie automobile', *Techniques de l'ingénieur*, 33(0).
- Roy, A. K. and Tsai, S. W. (2014) 'Design of Thick Composite Cylinders', 110(August 1988). Available at: [http://pressurevesseltech.asmedigitalcollection.asme.org/data/Journals/JPVAS/28303/255\\_1.pdf](http://pressurevesseltech.asmedigitalcollection.asme.org/data/Journals/JPVAS/28303/255_1.pdf).
- Shuler, S. . and Advani, S. . (1996) 'Transverse squeeze flow of concentrated aligned fibers in viscous fluids', *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 65(1), pp. 47–74. doi: 10.1016/0377-0257(96)01440-1.
- Thomas, C. (2011) 'Etude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV'.
- Zhao, J. and Cameron, J. (1998) 'Reinforced With Pre-stressed Glass Fibers', 19(3).
- Zhao, L., Mantell, S. C., Cohen, D. and Mcpeak, R. (2001) 'Finite element modeling of the ® lament winding process', 52.