

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté de Technologie

Département : Génie Mécanique

Domaine : Science et technique

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**L'utilisation des matériaux composite dans le domaine  
aéronautique et Automobile**

Présenté par : *REHILI CHAMS EDDINE*

Encadrant : *Mr. BOUNAMOUS BOUBAKER Grade MAA Université BADJI MOKHTAR ANNABA*

### Jury de Soutenance :

NEHAL ABDELLAZIZ	MCA	UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA	Président
BOUNAMOUS BOUBAKER	MAA	UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA	Encadrant / Examineur
KALLOUCHE ABDELKADER	MCB	UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

# *Remerciements*

*En tout premier lieu, Je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*Ma plus grande gratitude va à mon encadreur docteur*

*BOUNAMOUS BOUBAKER, pour sa disponibilité permanente, la confiance qu'il m'a accordée, et ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.*

*Ma profonde gratitude et mes plus vifs remerciements vont à tous ceux qui ont voulu accepter de juger ce mémoire.*

*J'adresse mon remerciement les plus sincères aux corps administratifs, les professeurs, le personnel de soutien et en particulier notre bibliothécaire d'avoir contribué pour la réussite de notre formation.*

# *Dédicaces*

## **Je dédie ce modeste travail**

Aux deux personnes qui m'ont soutenu tout au long de ma vie et de mes études,  
à mes très chers et précieux parents, ma mère, mon père.

Aujourd'hui je suis très fier de pouvoir enfin vous offrir le fruit de plusieurs années de travail. J'ai la jouissance de vous dédier ce travail, veuillez-y trouvez le témoignage de mon grand amour et de ma profonde reconnaissance. Je vous souhaite la bonne santé, la joie de vivre et que Dieu vous garde.

A

Mes chers frères, Mes amis.

# *Sommaire*

## **Remerciements**

## **Dédicaces**

## **Introduction générale..... A**

## **Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites ..... 2**

I.1 Introduction ..... 2

I.2 Définition d'un matériau composite ..... 2

I.3 Composantes des matériaux composites ..... 5

I.4 Les procédés de fabrication d'un matériau composite ..... 10

I.5 Conclusion ..... 22

## **Chapitre II : Propriétés des matériaux composites..... 23**

II.1 Introduction ..... 25

II.2 Essai de traction ..... 25

II.2.1 Le comportement élastoplastique ..... 27

II.3 Essai de dureté ..... 33

II.3.1 Dureté Vickers ..... 35

II.3.2 La microdureté ..... 40

II.4 Essai de résilience ..... 41

II.5 Conclusion ..... 43

## **Chapitre III : Applications des matériaux composites ..... 44**

III.1 Introduction ..... 44

III.2 Construction automobile..... 44

III.2.1 composites : matériaux et procédés ..... 47

III.2.2 Les procédés de transformation des composites dans l'automobile ..... 49

III.2.3 Les principales propriétés des composites..... 52

III.2.4 facteurs d'influence et choix de matériaux.....	54
III.2.5 applications.....	57
III.3 Construction aéronautique.....	61
III.3.1 Comment choisir les matériaux composites pour l'aéronautique.....	62
III.3.2 La chimie des matériaux composites pour l'aviation.....	64
III.3.3 Les défis du futur.....	66
III.3.4 Le développement des composites : pas sans la chimie.....	67
III.3.5 Avantages et inconvénients des composites.....	68
III.4 conclusion.....	69
<b>VI. Conclusion Générale.....</b>	<b>70</b>
<b>VII. Bibliographie.....</b>	<b>72</b>

## Liste des figures

<b>Figure I-1:</b> Schéma illustratif d'un matériau composite .....	3
<b>Figure I-2:</b> les différentes parties d'un avion subissent des contraintes diverses.....	4
<b>Figure I-3:</b> La place des matériaux composites dans une automobile en 2014 .....	4
<b>Figure I-4:</b> composition d'un matériau composite .....	5
<b>Figure I-5:</b> Renforts.....	7
<b>Figure I-6:</b> principe de moulage au contact .....	11
<b>Figure I-7:</b> principe de moulage par projection simultanée .....	12
<b>Figure I-8:</b> moulage par injection de résine .....	14
<b>Figure I-9:</b> Moulage a la presse à froid .....	15
<b>Figure I-10:</b> Moulage à chaud.....	16
<b>Figure I-11:</b> Moulage par injection .....	17
<b>Figure I-12:</b> moulage en continu de plaques.....	18
<b>Figure I-13:</b> schémas de procédés automatisés : a) l'enroulement filamentaire ; b) la pultrusion.....	20
<b>Figure I-14:</b> Moulage par centrifugation.....	21
<b>Figure II-1:</b> Machine de traction de marque zwick/Roell.....	26
<b>Figure II-2:</b> Eprouvette de traction .....	26
<b>Figure II-3:</b> Eprouvette de traction alfa/polyester.....	26
<b>Figure II-4:</b> a) sollicitation appliquée sur une éprouvette de traction compression. (b) comparaisons des deux mesures de déformation classiques, déformation rationnelle et conventionnelle. (c) Analyse d'un essai de Traction simple sur un acier inoxydable 316L. Illustration de l'hypothèse de partition.....	28
<b>Figure II-5:</b> résultat d'un essai de traction simple sur un acier doux à 0.48% de carbone (Rami Hamam). .....	30
<b>Figure II-6:</b> Schéma de principe de l'essai Brinell .....	37
<b>Figure II-7:</b> Coefficient de proportionnalité entre la dureté et la limite d'élasticité en fonction de l'angle des faces, selon le coefficient de frottement [Johnson, 1985].....	39
<b>Figure II-8:</b> Micro durometre.....	41
<b>Figure II-9:</b> Mouton pendule ( machine d'essai de résilience).....	42
<b>Figure III-1:</b> Pièces de voiture en matériaux composites .....	44
<b>Figure III-2:</b> Façade avant technique de la Citroën C5 en LFT .....	58
<b>Figure III-3:</b> Vue du hayon de la Mercedes classe A et éclaté de la pièce. ....	60

<b>Figure III-4:</b> Présentation les pièces faites de matériaux installés dans l'avion .....	62
<b>Figure III-5:</b> différence entre les thermoplastiques et des thermodurcissables .....	63

## Liste des tableaux

<b>Tableau II-1: Fiche technique du mouton pendule .....</b>	<b>42</b>
<b>Tableau III-1: Chiffres de 1996 .....</b>	<b>47</b>
<b>Tableau III-2: Le marché des LFT et TRE en Europe .....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau III-3: FACTEURS D'INFLUENCE ET CHOIX DE MATÉRIAUX .....</b>	<b>55</b>

## **Résumé**

Les matériaux composites sont des matériaux hétérogènes de performance élevée. Ils sont parmi les matériaux les plus utilisés dans notre vie quotidienne. Ils ont des propriétés améliorées par rapport à celles des matériaux qui les constituent. Dans ce modeste mémoire, nous avons décrit ces matériaux et donné les techniques de leur mise en œuvre. Pour mieux caractériser ces matériaux, leurs caractéristiques et leurs propriétés, on a besoin de faire un certain nombre d'essais tels que l'essai de traction, l'essai de dureté ou aussi l'essai de résilience.

## **Abstract**

The Composite materials are heterogeneous materials of high performance. They are among the most used materials in our daily lives. They have improved properties compared to those of the materials that make them up. In this modest memoir, we have described these materials and given the techniques for their implementation. To better characterize these materials, their characteristics and properties, it is necessary to carry out a number of tests .such as the tensile test, the hardness test or also the resilience test

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Du fait de leurs caractéristiques mécaniques, les matériaux composites ont suscité un intérêt dans de nombreux secteurs industriels (aéronautique, naval, ou automobile); actuellement, ils subissent un développement effervescent, ce qui conduit à la découverte de nouveaux matériaux avec des propriétés améliorées et des propriétés appropriées. Parmi ces matériaux figurent les matériaux composites développés par Alain Gognet en 1988. Les premiers matériaux composites naturels utilisés étaient le bois et la rafle de maïs. Ce matériau est idéal pour les solutions techniques.

Les matériaux composites sont d'une grande importance dans l'amélioration de différentes propriétés mécaniques, chimiques et physiques. En raison de leur composition et de leurs propriétés,

En fait, la motivation de ces composites pour remplacer les matériaux métalliques est le coût global modeste. C'est pourquoi ces matériaux connaissent un grand succès dans la fabrication et l'utilisation de différents procédés tels que le moulage par contact, le moulage par projection, l'enroulement filamentaire, etc. Pour comprendre les propriétés physico-chimiques de ces matériaux, ils ont passé des essais mécaniques. Cela permet de déterminer les grandeurs physiques caractérisant leur comportement mécanique et de suivre l'évolution sous contrainte pour identifier les phénomènes de dégradation.

Cette étude est divisée en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à la définition des matériaux composites, à la détermination de leur composition, leurs propriétés, leurs caractéristiques, ainsi que les différents procédés de mise en œuvre actuellement utilisés. Le deuxième chapitre, présente quelques principes des essais mécaniques qui permettent de déterminer les grandeurs physiques qui caractérisent le comportement mécanique des matériaux composites. Pour le troisième chapitre et le dernier, nous parlons sur quelques domaines d'applications et d'utilisations, et on précise le domaine aéronautique et automobile.

***Chapitre I : Généralités sur  
les matériaux composites***

## **I.1 Introduction :**

Depuis longtemps, L'industrie aéronautique et automobile utilisent principalement dans les structures des composites, car ils permettent d'avoir le meilleur compromis entre performances mécaniques, poids, durée de vie et coût de fabrication. Comme précise en introduction de ce document, cette étude s'est concentrée sur quelques éléments au généralités sur les matériaux composites et leurs domaines d'utilisations. Alors que la plupart des matériaux ont des propriétés physiques isotropes (indépendantes de l'orientation choisie), les composites stratifiés ont des propriétés anisotropes et souvent orthotropes (pouvant être définies dans les 3 directions principales du repère cartésien donne par l'orientation des fibres et le plan forme par le pli).

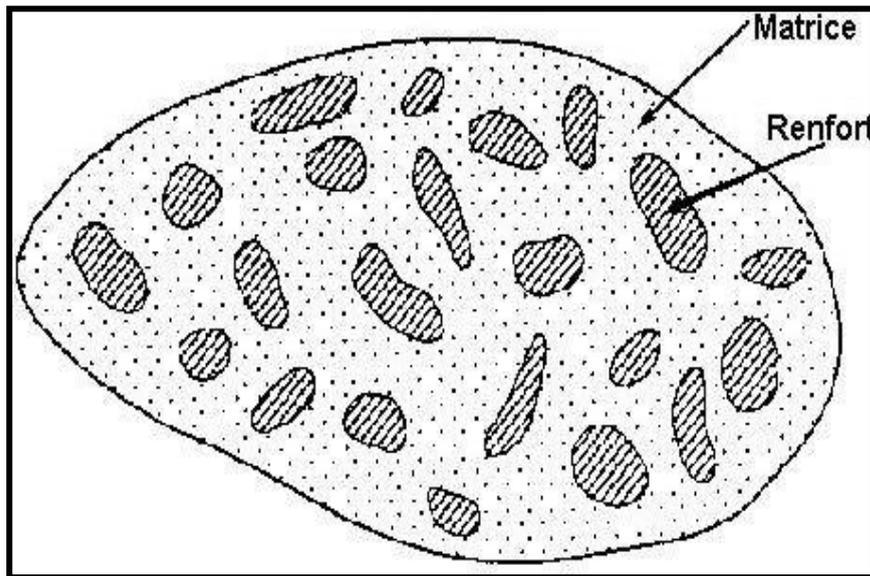
## **I.2 Définition d'un matériau composite**

### **- Qu'est-ce qu'un matériau composite ?**

Est un matériau composé d'au moins deux matériaux aux propriétés différentes, non miscibles, constitué de différentes phases nommées renforts et matrice, Lorsque nous combinons deux ou plusieurs matériaux, nous obtenons un matériau plus performant car il possède toutes les propriétés des matériaux utilisés. Tant que le composite n'est pas endommagé, le renfort et la matrice sont parfaitement liés, et il n'y a pas de glissement ni de séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique. La matrice assure la cohésion entre les renforts, dissipant ainsi les contraintes mécaniques. L'arrangement des fibres et leur orientation peuvent améliorer les propriétés mécaniques de la structure(légèreté, rigidité à un effort, etc.). Nous étudions plus particulièrement les composites renforcés de fibres continues longues pour les industries marine, automobile, aéronautique et aérospatiale. Les éléments de structure sont réalisés par empilement de couches en optimisant les directions des

renforts en fonction des charges qu'elles doivent supporter. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée<sup>1</sup>.

Aujourd'hui, les principales matières plastiques combinées sont les plastiques thermodurcissables (TD) et les plastiques thermoplastiques (TP)<sup>2</sup>.



**Figure II-1:** Schéma illustratif d'un matériau composite

---

<sup>1</sup> Laurent Gornet, Généralités sur les matériaux composites, GeM - Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, <https://hal.archives-ouvertes.fr>, consulté le 04-08-2022

<sup>2</sup> <https://www.polyvia-formation.fr>, consulté le 01-08-2022

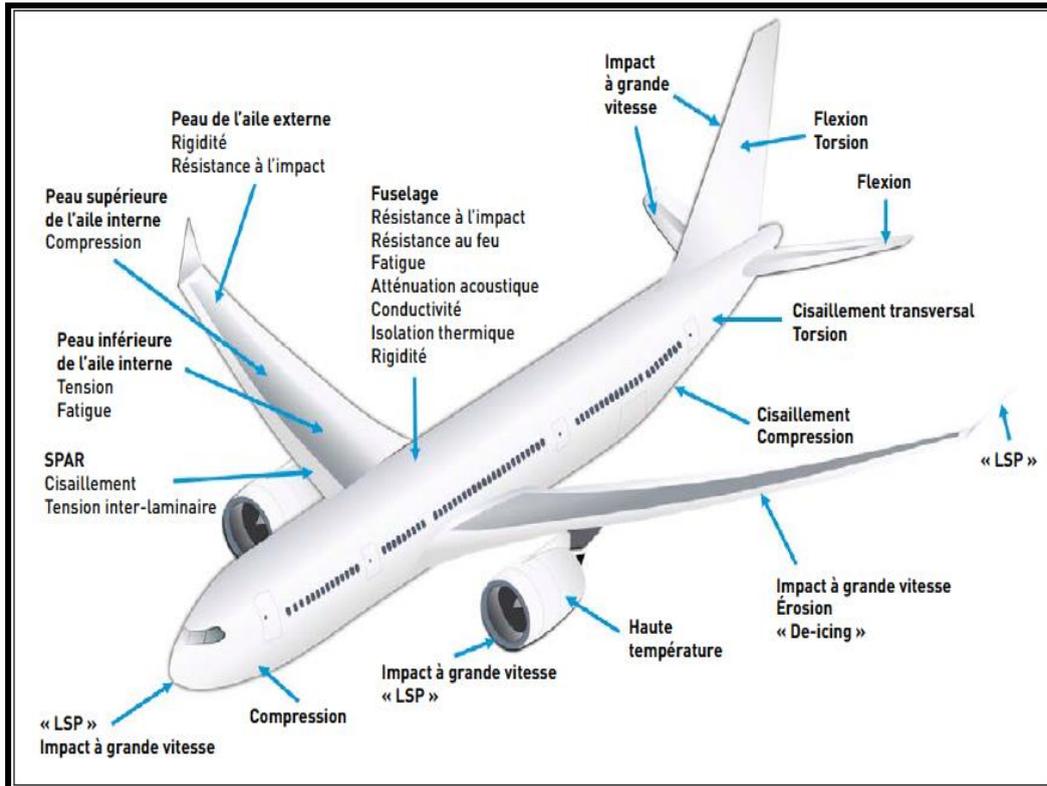


Figure II-2: les différentes parties d'un avion subissent des contraintes diverses.

les matériaux composites utilisés doivent donc avoir une flexibilité importante afin de résister aux force subisse.

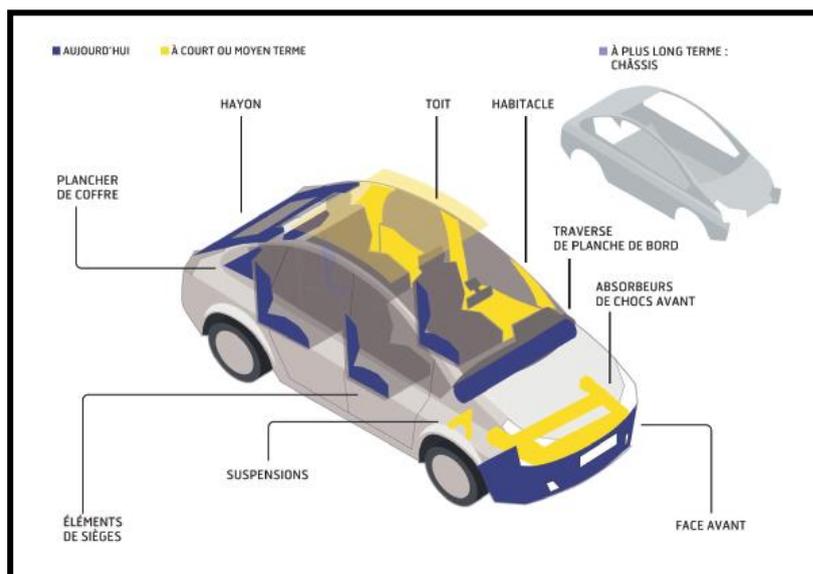


Figure II-3: La place des matériaux composites dans une automobile en 2014

### I.3 Composantes des matériaux composites :

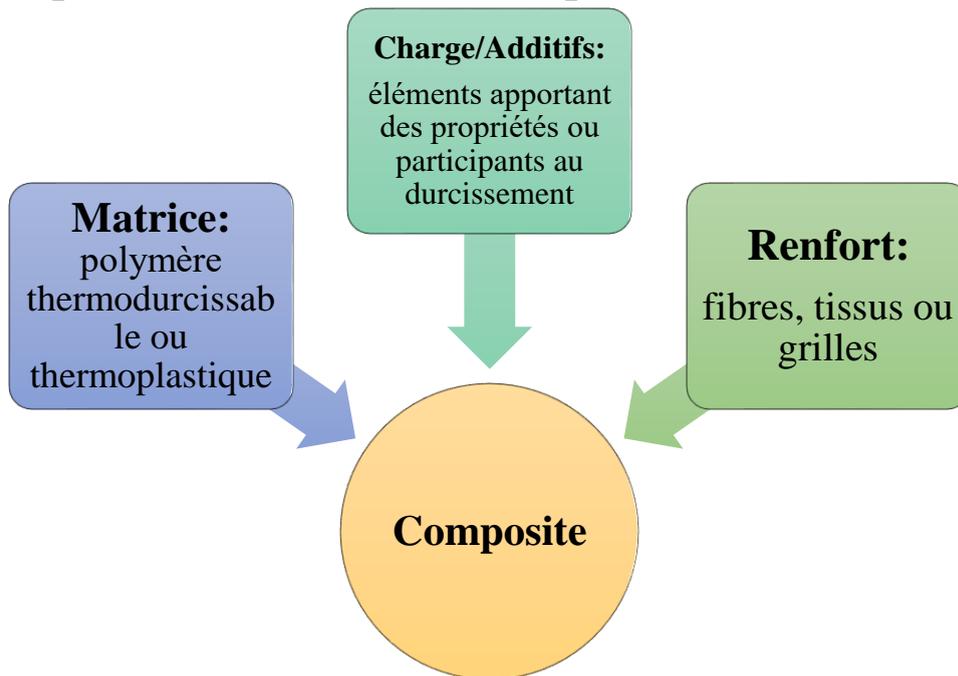


Figure II-4: composition d'un matériau composite

#### ♣ Matrice:

Une matrice est un matériau qui permet d'assurer la résistance chimique et la cohésion du matériau tout en donnant la forme souhaitée au produit final. Elle a pour principal objectif de transmettre les efforts mécaniques au renfort. La matrice assure également la protection du renfort vis-à-vis des diverses conditions environnementales. Elle permet en outre de donner la forme voulue au produit réalisé <sup>1</sup>.

Lorsque le composite est à matrice organique, cette dernière est appelée résine.

#### - Quels sont les différents types de matériaux composites ?

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on distingue habituellement trois catégories en fonction de la nature de la matrice :

-Les composites à matrice organique (CMO);

-Les composites à matrice céramique (CMC);

---

<sup>1</sup> Valentin BIASI, Modélisation thermique de la dégradation d'un matériau composite soumis au feu, INSTITUT SUPERIEUR DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE (ISAE), Université de TROUVERE, 2014

-Les composites à matrice métallique (CMM)<sup>1</sup>.

**Les Composites à Matrices Organiques** : Les CMO ont généralement de faibles sites, une résistance mécanique relativement faible, et une capacité de déformation importante. Ce type de composite est largement répandu à l'échelle industrielle, surtout en aéronautique où les contraintes de poids sont très limitatives lors de la conception de nouveaux avions, on retrouve notamment les thermoplastiques et les thermodurcissables.

Les composites à matrice organique se divisent à leur tour en deux catégories :

- les composites à grande diffusion : ce sont des composites moins performants et aux coûts plus abordables. Ils sont utilisés dans plus de 95 % des cas, particulièrement lors de productions en grande série,
- les composites à haute performance : ce sont des matériaux qui présentent des qualités mécaniques supérieures et qui représentent donc un coût plus important. Ils sont habituellement utilisés dans le domaine de l'aéronautique et de la construction.

**Les Composites à Matrices Céramiques** : Ce modèle de matrice par exemple le carbone et le carbure de silicium peut améliorer certaines propriétés, comme la résistance aux chocs ou la résistance au feu. Ce type de composites est utilisé dans des environnements sévères (moteurs de lanceurs spatiaux, boucliers thermiques, turbines à gaz).

Les CMC réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique).

**Les Composites à Matrices Métalliques** : une matrice métallique telle que l'aluminium et le titane, est mise en forme avec des renforts métalliques ou céramiques. Ce type de composites a de très bonnes performances mécaniques.

---

<sup>1</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Matériau\\_composite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Matériau_composite), consulté le 09-08-2022

Toutefois, leur coût de fabrication élève réduit les applications de ces composites a quelques domaines,

Les CMM pour quelques applications spécialisées. principalement dans l'aérospatial et les moteurs automobiles<sup>1</sup>.

♣ **Renfort :**

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques)<sup>2</sup>.

Le renfort forme l'armature de la pièce et assure l'essentiel des propriétés mécaniques. En général, les renforts sont des fibres, comme :

- La fibre de verre (qui est la plus répandue);
- La fibre de carbone;
- La fibre d'aramide ou encore la fibre végétale qui est renouvelable.

Les renforts est l'ossature reprenant l'essentiel des efforts mécaniques, et donc permettent de rendre le matériau encore plus performant.



**Figure II-5: Renforts**

<sup>1</sup> Mettouchi Lotfi, Influence de la charge particule de cuivre et du renfort couches de fibres de verre sur le comportement mécanique d'un composite, mémoire de Master, Tizi Ouzou

<sup>2</sup> Marc Marzano/ Action composite, Pascal celle, DNFA, (Dossier pédagogique, ANFA), 2014

Les renforts peuvent être classés selon :

- leur composition : métal, verre, polymère, etc. ;
- leur forme :
- fibres : courtes entre 0,1 et 1 mm, longues entre 1 et 50 mm ou continues > 50 mm.
- charges renforçantes : gravier (additionné au ciment pour fabriquer le béton), sable, billes de verre, etc. ;
- leur disposition : mat (nappe de fibres en vrac non tissées) ou tissé.

Le renfort peut être seul au sein d'une matrice (composite homogène) ou combiné à un renfort de nature différente (composite hybride).

Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction, par contre à la compression ont une faible résistance.

Parmi les fibres les plus employées on peut citer :

- Les fibres de verre: qui sont utilisées dans la construction, le nautisme et diverses applications structurelles peu chargées, Le coût de production de ces fibres est peu élevé ce qui en fait l'une des fibres les plus largement utilisées aujourd'hui;

- La fibre de carbone: pour les applications structurelles est conçue pour être plus légère et plus rigide que la fibre de verre. Ils sont obtenus par pyrolyse de précurseurs organiques ou non organiques sous atmosphère contrôlée. Le plus utilisé de ces précurseurs est le polyacrylonitrile (PAN). Ces fibres sont encore relativement élevées, mais il n'a cessé de diminuer avec l'augmentation des volumes de production. On les retrouve dans de nombreuses applications dans l'aéronautique, l'aérospatial et les compétitions sportives et de loisirs (Formule 1, mâts de bateaux);

- Les fibres d'aramide (ou Kevlar qui est une dénomination commerciale): sont utilisées dans la protection balistique comme les gilets pare-balles et dans les réservoirs de carburant souples de Formule 1;

- Les fibres de carbure de silicium sont une bonne réponse à l'oxydation du carbone dès 500 °C. Elles sont utilisées dans des applications très spécifiques travaillant à haute température et sous atmosphère oxydante (spatial et nucléaire). Leur coût de production est très élevé ce qui limite donc leur utilisation.

♣ **Charges ou Additifs:**

Les charges et additifs sont des matériaux pulvérulents ou fibreux d'origine minérale, végétale, synthétique ou organique, chimiquement purs et inertes vis-à-vis des résines. Lorsqu'ils sont mélangés à des résines, ils apportent de nouvelles propriétés et modifient les caractéristiques du produit fini<sup>1</sup>.

**a) Les charges :**

Le nom générique des charges fait référence à toute matière inerte, minérale ou végétale ajoutée à un polymère de base qui peut modifier considérablement les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, améliorer l'aspect de la surface ou, tout simplement, réduire le prix de revient du matériau transformé.

A l'inverse des matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ont toujours contenu des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse, dépassant ce pourcentage le composite arrive à saturation.

Pour un matériau donné, le choix de la charge est basé sur les modifications apportées au produit fini. Cependant, en général, les substances pouvant être utilisées comme charges des matières plastiques doivent d'abord répondre à certaines exigences:

Compatibilité avec la résine de base ;

-Mouillabilité ;

-Uniformité de qualité et de granulométrie ;

-Faible action abrasive ;

---

<sup>1</sup> Jean-Marie Berthelot, Matériaux composite 5ème Edition, Comportement mécanique et analyse des structure

-Bas prix de revient.

**b) Les additifs :**

Un additif désigne une substance qui est introduite dans un mélange pour apporter une propriété spécifique, ils se trouvent en faible quantité (quelque % et moins) et interviennent comme :

- Adjuvants ;
- Lubrifiants et agents de démoulage ;
- Pigments et colorants ;
- Agents anti-retrait ;
- Agents anti-ultraviolets<sup>1</sup>.

**I.4 Les procédés de fabrications d'un matériau composite:**

Le moulage des matériaux composites peut être réalisé par des procédés manuels ou mécanisés. Globalement, les outils nécessaires aux procédés mécanisés sont amortis dans la production de moyennes et grandes séries, c'est pourquoi, d'un point de vue économique, les procédés manuels sont plus adaptés aux petites séries.

**I.4.1 Moulages sans pression:**

La méthode de moulage à froid et sans intervention d'une presse est la méthode la plus simple à mettre en œuvre. Elles nécessitent un équipement minimal, elles doivent donc être amortis. Cette facilité est à l'origine du succès industriel et technologique des composites en fibre de verre.

Ces procédés permettent la production de petites et moyennes séries de pièces quelles que soient leur forme et leur taille. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule.

---

<sup>1</sup> Marc Marzano/ Action composite, Pascal celle, DNFA, (Dossier pédagogique, ANFA), 2014

### I.4.1.1 Moulage au contact :

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée

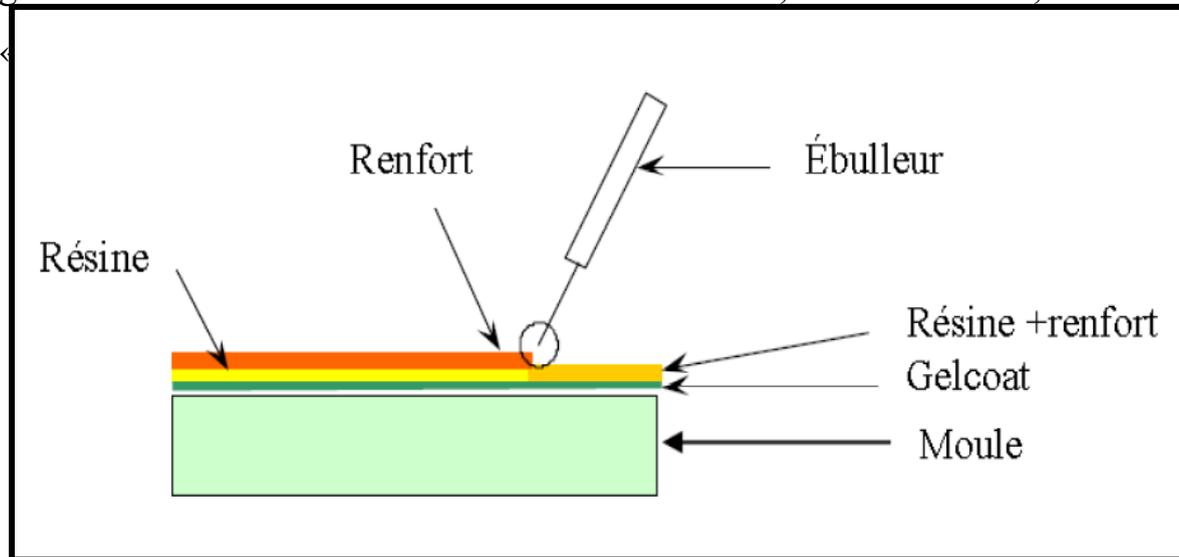


Figure II-6: principe de moulage au contact

- Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

- 1) Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au Rouleau.
- 2) Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
- 3) Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé.
- 4) Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.
- 5) Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).

6) La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).

7) Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc.

#### I.4.1.2 Moulage par projection simultanée :

Le moulage est réalisé en projetant simultanément les fibres coupées et la résine catalytique sur le moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifié et d'un pistolet pour pulvériser la résine et les fibres coupées, l'ensemble de l'opération étant actionné par de l'air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé.

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces à moindre coût. Cependant, les renforts se limitent aux fibres coupées et les propriétés mécaniques du matériau restent moyennes.

Deux faces lisses peuvent être obtenues en utilisant un moule et un contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Le procédé conserve également la possibilité d'intercaler une couche de tissu entre les deux, permettant d'obtenir des pièces

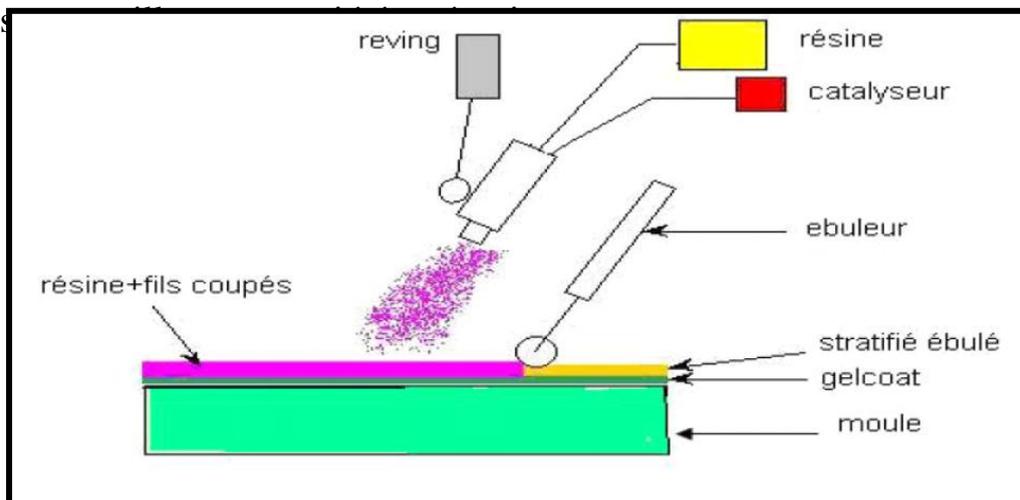


Figure II-7: principe de moulage par projection simultanée

### **I.4.2 Moulage sous vide :**

Le moulage sous vide implique l'utilisation à la fois du vide et de la pression atmosphérique. Après application du gel-coat, le renfort est placé sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Installez ensuite un contre-moule recouvert d'une membrane étanche (feuille de caoutchouc, nylon, etc.). Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et déballe la résine. Le contre-moule peut éventuellement se limiter à une seule membrane d'étanchéité.

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de petites et moyennes séries. Il offre une bonne qualité mécanique grâce à la proportion uniforme de résine et à la réduction des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Cependant, la production était assez lente.

### **I.4.3 Moulage par compression**

#### **I.4.3.1 Moulage par injection de résine:**

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées.

Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.

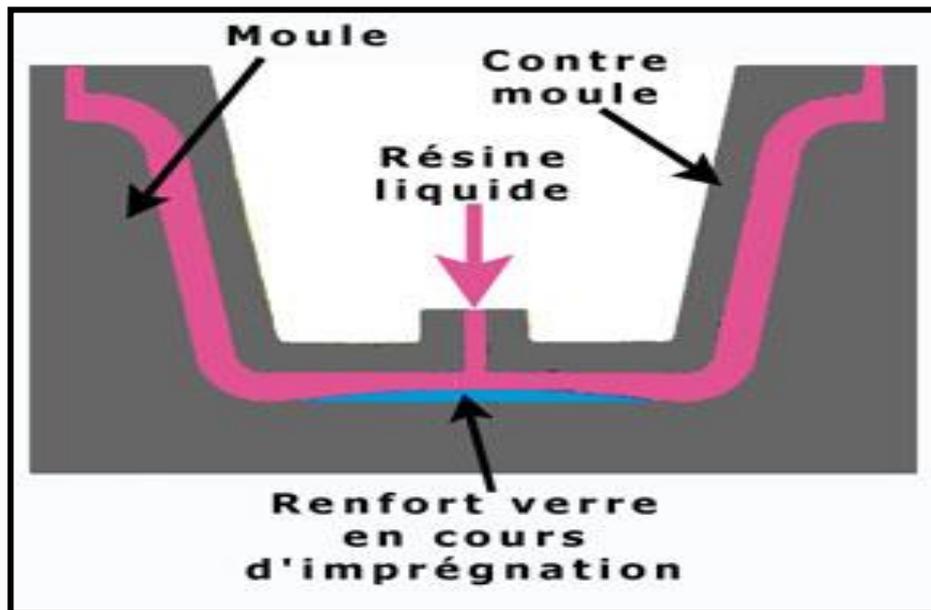


Figure II-8: moulage par injection de résine

#### I.4.3.2 Moulage par compression à froid :

Le moulage est réalisé à basse pression ( $< 5$  bar) sans chauffer le moule, en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie accumulée lors du moulage de la pièce est suffisante pour maintenir le moule à des températures de  $50$  à  $70^{\circ}\text{C}$  en permanence.

Les moules et contre-moules sont enduits d'agent de démoulage et de gel coat. Puis la barre d'armature et la matrice sont placées sur le moule. . L'ensemble moule/contre-moule se ferme et presse. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en mode de production continue.

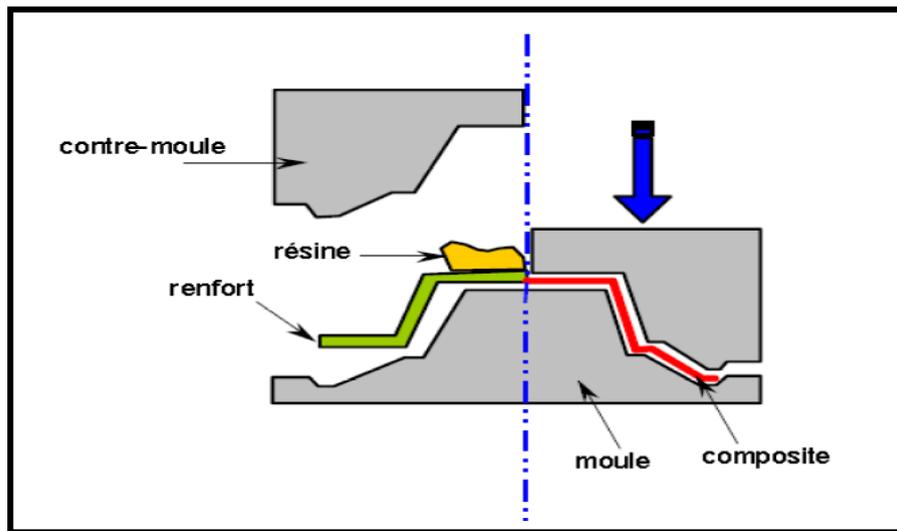


Figure I-9: Moulage a la presse à froid

Ce procédé de mise en forme est adapté à la fabrication des pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) n'est pas aussi important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être fabriqués par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la presse à chaud.

#### I.4.3.3 Moulage par compression à chaud

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries à l'aide de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffés.

Un renfort constitué de brins coupés ou de mats de brins continus, de tissus ou par des préformes, est placé sur une matrice chauffée et pré-appliqué avec un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est alors coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé selon un cycle défini par descente et pressage du contre moule. Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce retirée.

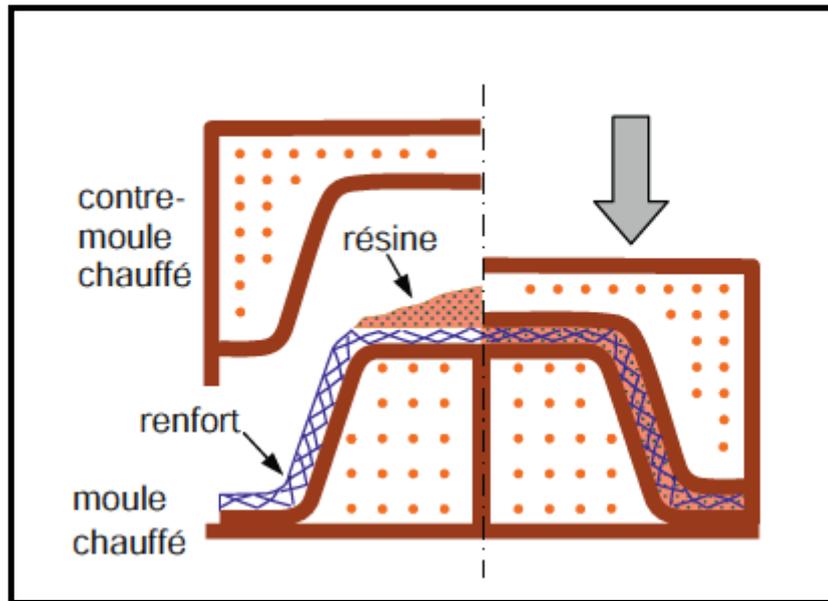


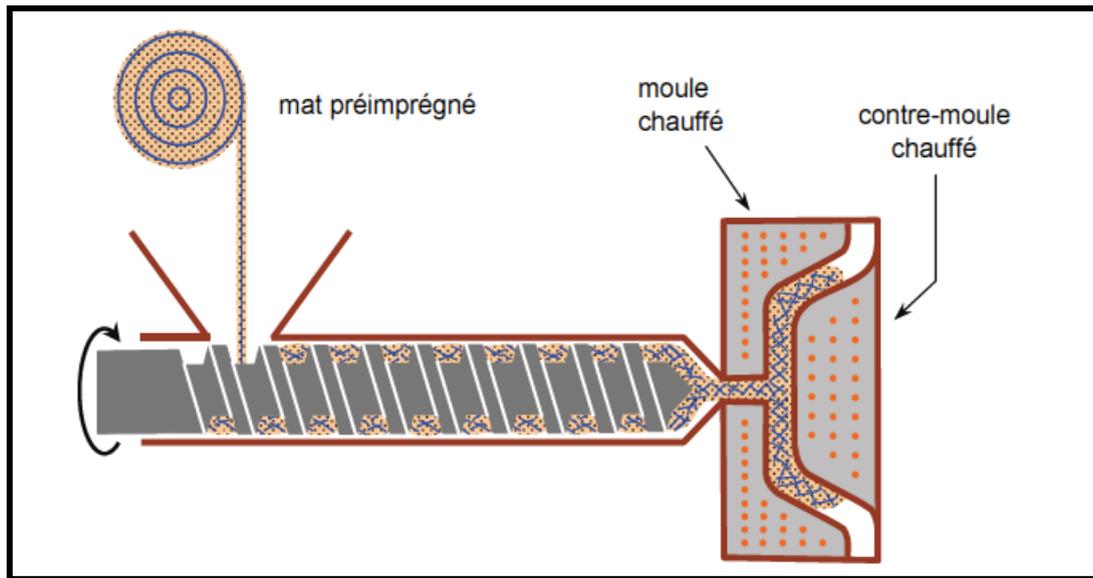
Figure II-10: Moulage à chaud

Ce procédé de moulage permet d'obtenir une part importante de renfort, ce qui donne des pièces aux bonnes propriétés mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est de d'environ de 10 à 50 bars et la température du moule est de l'ordre de 80 à 150 °C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule.

#### I.4.3.4 Moulage par injection :

Le moulage par injection est la méthode la plus courante de mise en œuvre des thermoplastiques renforcés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, etc.).

Il est réalisé sur des presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques. Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats préimprégnés sont extrudés à travers une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous haute pression dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation.



**Figure II-11:** Moulage par injection

Le type de matériau obtenu est plus communément appelé "plastique renforcé" que les matériaux composites. En effet, compte tenu des propriétés du renfort (fibres courtes, sphères...), la contrainte de rupture et le module d'Young de la résine sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technologie est adaptée à la production de pièces en très grande séries.

#### **I.4.4 Moulage en continu :**

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwiches (figure 3.7), de panneaux ondulés pour toitures (figure 3.8), plaques nervurées, etc.

Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases.

1. Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc.).
2. Une phase de mise en forme.

3. Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).

4. Une phase de refroidissement et découpage.

Dans le cas de la fabrication de plaques planes, la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.

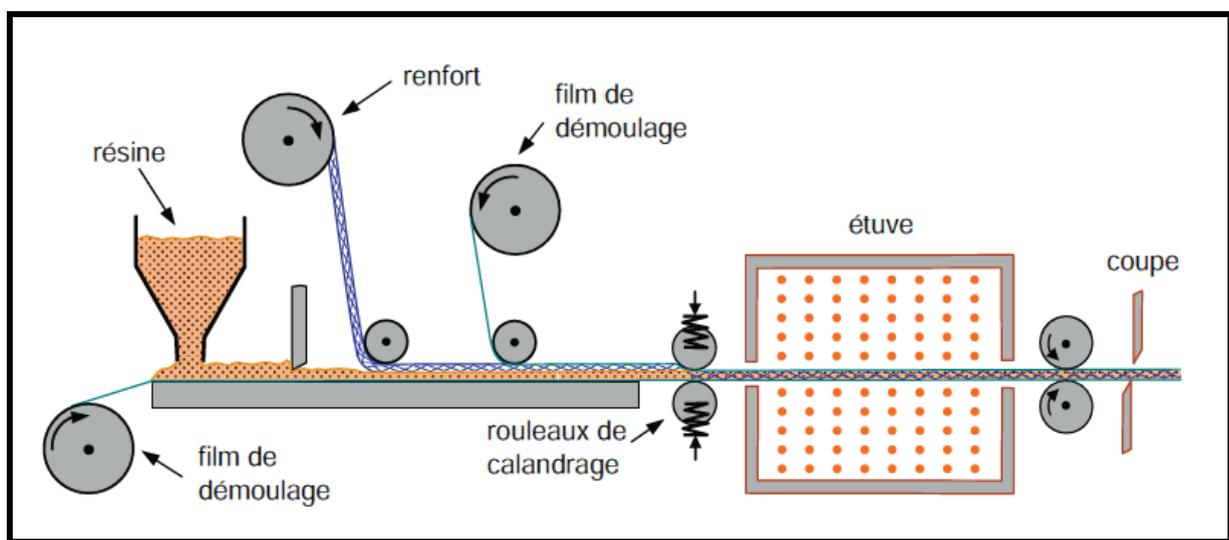


Figure II-12: moulage en continu de plaques

Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation par l'intermédiaire de rouleaux mobiles.

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel.

#### I.4.5 Moulage par pultrusion :

Le procédé de pultrusion permet de réaliser des profilés, droits ou courbes, à section constante, hautement renforcés dans les directions principales.

Dans cette technique, les renforts : fils, laminés, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalytique et s'en imprègnent. Ils passent ensuite dans un moule chauffé, qui façonne les contours dans le moule tout en polymérisant la résine.

Le procédé convient aux résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les profilés obtenus présentent des propriétés mécaniques élevées, puisqu'il est possible d'obtenir une forte proportion de matériau de renfort jusqu'à 80% en volume. Le procédé est adapté à la production en grande série (vitesses de défilement jusqu'à 20 m/h). Cela demande beaucoup d'investissement matériel. Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs, etc.

### **I.4.6 Moulage par enroulement filamentaire:**

#### **Principe:**

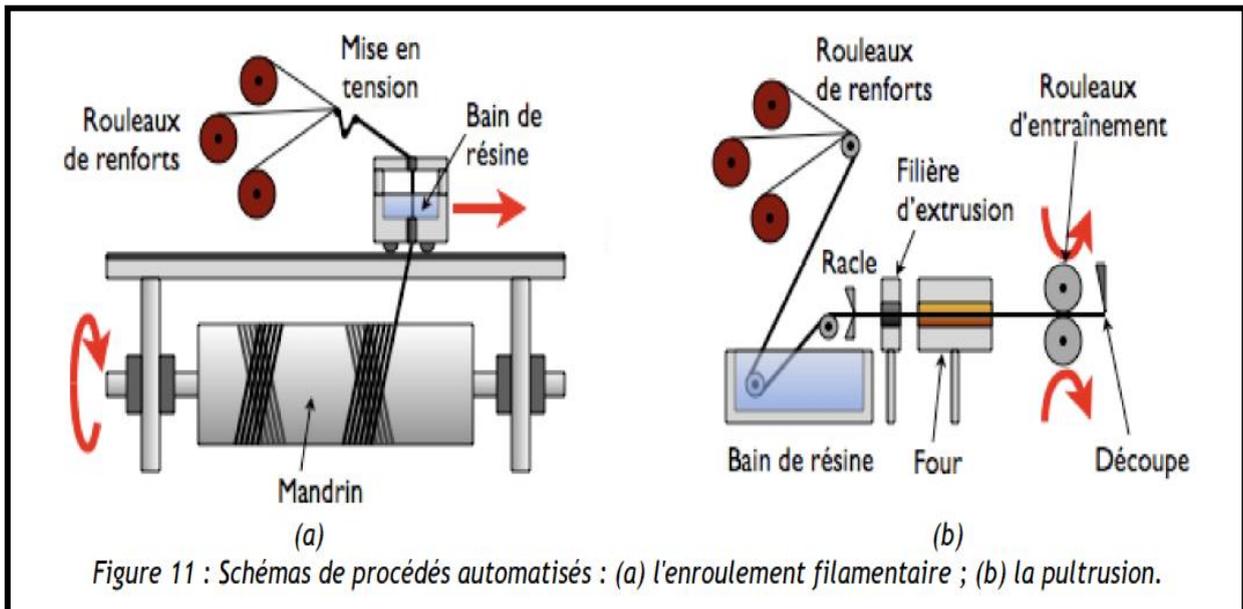
Le matériau de renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé sur des mandrins cylindriques ou rotatifs avec une légère tension. Ce type de moulage est idéal pour les surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent contenir des proportions élevées de matériau de renforcement (jusqu'à 80 % en volume), et ainsi des caractéristiques mécaniques élevées peuvent être obtenues. L'investissement en matériel est très important. En fonction du mouvement relatif du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, différents types d'enroulements (et par conséquent de stratifications) peuvent être obtenus.

On distingue :

- l'enroulement circonférentiel,
- l'enroulement hélicoïdal,
- l'enroulement polaire<sup>1</sup>;

---

<sup>1</sup> Jean-Marie Berthelot, Matériaux composite 5ème Edition, Comportement mécanique et analyse des structure



**Figure II-13:**schémas de procédés automatisés : a) l'enroulement filamentaire ;  
b) la pultrusion

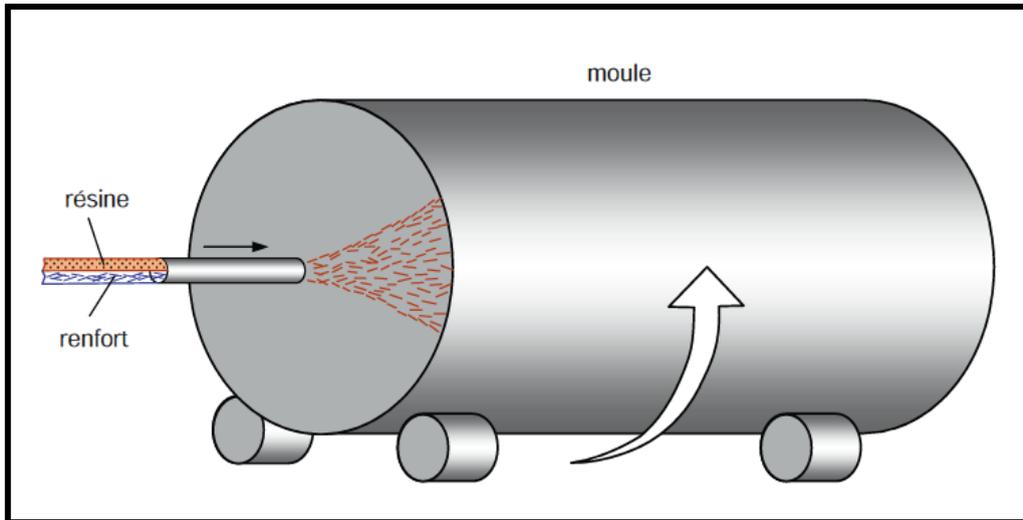
#### I.4.7 Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces tournantes, notamment des canalisations, réservoirs, etc. Il s'agit d'une extrapolation de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifuge. Réglez le moule rotatif enduit d'agent de démoulage pour qu'il tourne (environ 2 000 tr/min). Après dépôt éventuel de gel coat, on introduit simultanément en continu :

- le renfort : fibres coupées ou stratifié coupé ;
- la résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à Froid.

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous action centrifuge. La stratification se produit à travers des passages successifs de buses d'alimentation en résine et en renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée en étuve. Le renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut éventuellement être introduit de manière discontinue avant la rotation du moule. La résine est ensuite introduite lors de la centrifugation.

Après polymérisation, la pièce cylindrique est démoulée et le retrait de la résine permet le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule.



**Figure II-14:** Moulage par centrifugation

## **I.5 Conclusion :**

Depuis des dizaines d'années les matériaux composites sont connus avec un grand succès à bien des égards, que ce soit ses caractéristiques, ses procédés de mise en œuvre ou bien ses domaines d'utilisation. Dans ce chapitre, nous avons décrit les matériaux composites en mentionnant leurs composants ainsi que les techniques adoptées pour leur fabrication.

## *Chapitre II : Propriétés des matériaux composites*

## II.1 Introduction :

Les caractéristiques mécaniques fondamentales du matériau composite alfa/polyester sont déterminées par les essais de traction et de flexion trois points en tenant compte des normes liées à ces essais ainsi que du respect des dimensions des éprouvettes testées.

## II.2 Essai de traction<sup>1</sup>

L'essai de traction est le plus fondamentale parmi tous les essais mécaniques. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall.

Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

Le principe de cet essai est de soumettre une éprouvette normalisées à une extension progressive dans le sens de la longueur jusqu'à obtention de la rupture. La machine utilisée pour effectuer les essais de traction sur nos éprouvettes est une machine de marque zwick/Roell (laboratoire Boumerdes, Figure III.15) pilotée par microordinateur. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes normalisées (Figure III.16) à température ambiante. Nous récupérons des courbes contraintes /déformations.

---

<sup>1</sup> Jean Marie Berthelot, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4ème Edition, Lavoisier 2005.



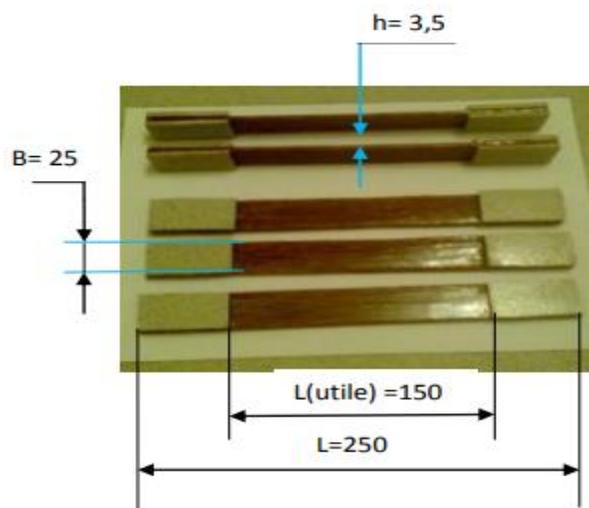
Figure III-1: Machine de traction de marque zwick/Roell



Figure III-2: Epreuve de traction



(a) : Montage de l'éprouvette



(b) : dimensions de l'éprouvette de traction alfa/polyester

Figure III-3: Epreuve de traction alfa/polyester

## II.2.1 Le comportement élastoplastique

### II.2.1.1 Méthode de caractérisation

Les essais de traction-compression uniaxiaux sont à la fois les plus simples et les plus couramment utilisés pour mettre en évidence les caractéristiques du comportement élasto-plastique mécanique d'un matériau métallique. On soumet une éprouvette de longueur initiale  $L_0$  et de section initiale  $S_0$ , à un effort croissant  $F$  lors d'un essai de traction et à un effort cyclique lors d'un essai de traction-compression.

On mesure l'allongement de l'éprouvette à l'aide d'un extensomètre, et éventuellement la variation de section à l'aide d'un capteur diamétral (Figure 14 a).

On calcule alors la contrainte et la déformation conventionnelles :

$$\sigma = \frac{F(t)}{S_0} \quad \varepsilon = \frac{L(t) - L_0}{L_0}$$

Si l'on dispose d'un capteur diamétral, on peut éventuellement calculer la contrainte et la déformation rationnelle :

$$\sigma = \frac{F(t)}{S(t)} \quad \varepsilon = \int_{\tau=0}^{\tau=t} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L(t)}{L_0}$$

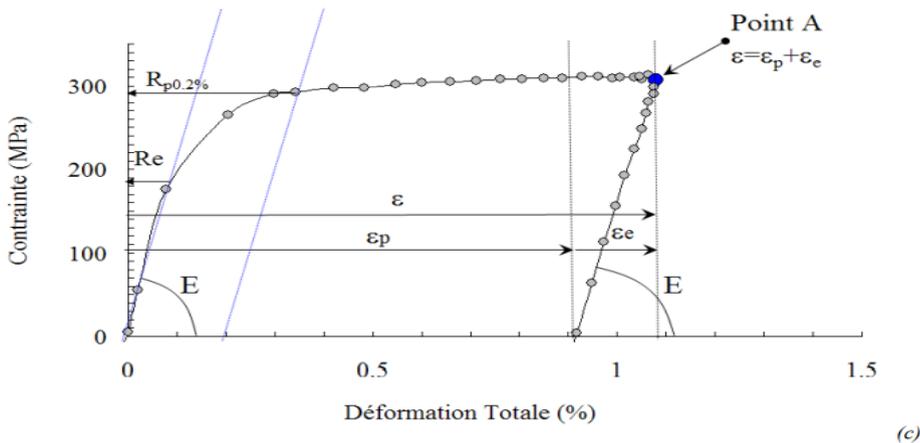
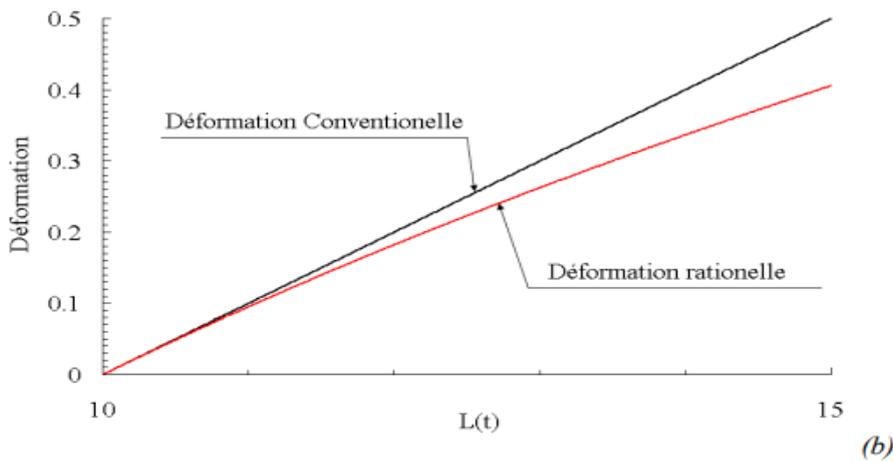
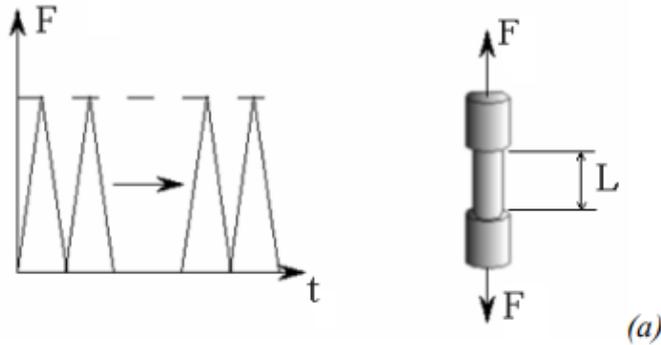
Cette distinction est usuelle. Cependant, en pratique tant que la déformation n'excède pas 0.2 les deux mesures de déformation ont moins de 10% d'écart (Figure 14 b).

### II.2.1.2 Analyse d'un essai de traction

On peut alors tracer l'évolution de la contrainte appliquée en fonction de la déformation.

Pour de très petites déformations, la courbe contrainte-déformation est linéaire, avec une pente  $E$ , où  $E$  est le module d'Young. Si l'on décharge l'éprouvette, sa

déformation revient à zéro, le comportement est élastique. Puis la courbe tend à devenir non-linéaire, et lorsqu'on décharge l'éprouvette, il reste une déformation permanente, le comportement est élasto-plastique.



**Figure III-4:** a) sollicitation appliquée sur une éprouvette de traction compression. (b) comparaisons des deux mesures de déformation classiques, déformation rationnelle et conventionnelle. (c) Analyse d'un essai de Traction simple sur un acier inoxydable 316L.

Illustration de l'hypothèse de partition.

◇ **Hypothèse de partition**

On observe généralement que lorsque les déformations restent petites ( $\varepsilon < 0.2$ ) on peut faire l'hypothèse de partition des déformations.

En effet à tout instant, si l'on décharge l'éprouvette, on observe que la pente de la courbe contrainte déformation est de nouveau linéaire avec une pente E. le comportement est élastique lors de la décharge. Mais à  $\sigma=0$ , il reste une déformation plastique ou permanente notée  $\varepsilon_p$ . Si l'on recharge à partir de ce point, de nouveau le comportement du matériau est élastique, linéaire avec un module E puis devient non-linéaire.

Ainsi, la déformation totale  $\varepsilon$  est la somme d'une déformation élastique  $\varepsilon_e$  et d'une déformation plastique  $\varepsilon_p$ .

$$\text{Soit : } \underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}_e + \underline{\varepsilon}_p \quad \text{avec à tout instant} \quad \underline{\sigma} = \underline{E} \underline{\varepsilon}_e \quad \text{Où } E \text{ e } \sigma = \varepsilon \text{ est}$$

l'opérateur d'élasticité (en traction simple on aura simplement  $\sigma=E\varepsilon$  , où E est le module d'élasticité §4.4.2.)

◇ **Limite d'élasticité conventionnelle**

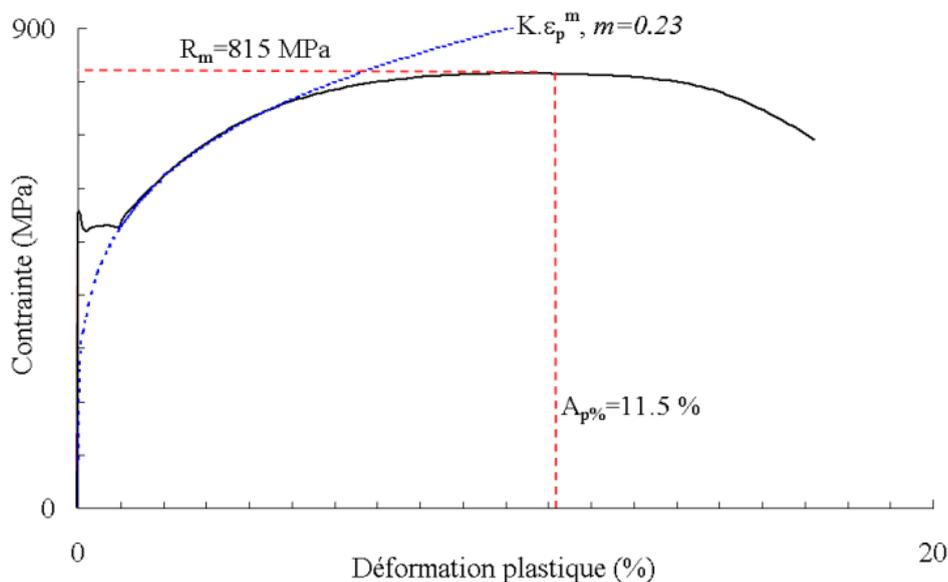
On définit la limite d'élasticité « vraie » du matériau comme la contrainte à partir de laquelle le comportement cesse d'être purement élastique lors de la première mise en charge du matériau. Sur la Figure 14c, cette limite d'élasticité  $R_e$  se trouve aux alentours de 170 MPa. Mais l'on voit bien que selon le critère de non-linéarité que l'on se donne on pourra trouver différentes valeurs pour cette limite d'élasticité vraie.

On définit donc une limite d'élasticité conventionnelle,  $R_{p0.2\%}$  comme la contrainte à partir de laquelle la déformation plastique excède 0.2% lors de la première mise en charge du matériau. On peut de même se définir une limite

d'élasticité  $R_{p0.02\%}$ , comme la contrainte à partir de laquelle la déformation plastique du matériau excède 0.02%.

#### ◇ **Contrainte maximale**

Au-delà de la limite d'élasticité le matériau présente généralement de l'écrouissage. La contrainte à appliquer pour obtenir un écoulement plastique augmente lorsque la déformation augmente. Elle sature en général à une valeur appelée contrainte maximale et notée  $R_m$  (Figure 5).



**Figure III-5:** résultat d'un essai de traction simple sur un acier doux à 0.48% de carbone (Rami Hamam).

La courbe en traits pleins est le résultat d'essai, la courbe en pointillé l'ajustement par une fonction  $s = K \epsilon_p^m$ . On définit aussi, la contrainte maximale  $R_m$ , l'allongement réparti  $A_p\%$

#### ◇ **Taux d'écrouissage**

Dans certains cas, on peut avoir besoin de définir le taux d'écrouissage du matériau. C'est une donnée importante, par exemple pour sélectionner un matériau pour réaliser une mise en forme par déformation plastique.

Le taux d'érouissage, noté H, est la pente de la courbe contrainte-déformation plastique :

$$H(\varepsilon_p) = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon_p} \right|_{\varepsilon_p}$$

En toute rigueur ce taux d'érouissage varie avec la déformation plastique. Ainsi on ne dispose pas d'une donnée unique pour caractériser le taux d'érouissage d'un matériau mais d'une courbe. Ce n'est pas toujours pratique lorsqu'on veut faire une sélection de matériau. On emploie alors le coefficient de Lankford, qui est l'exposant m de la courbe  $\sigma = K\varepsilon^m$  qui s'ajuste le mieux sur la phase d'érouissage du matériau.

### ◇ Allongement plastique réparti Ap% et striction

Lors d'un essai de traction, on observe que la déformation reste homogène tant que la contrainte reste inférieure à Rm. Au-delà la déformation plastique se localise, on assiste au phénomène de striction.

On définit donc l'allongement plastique réparti, noté Ap% qui est la déformation plastique au delà de laquelle la déformation plastique devient hétérogène.

Au-delà de cette déformation, selon le type d'éprouvette, éprouvette plate, éprouvette cylindrique ou autre, on obtient des résultats différents.

L'allongement plastique à la rupture n'est donc pas caractéristique du matériau seulement mais aussi de l'éprouvette. Tandis que l'allongement plastique réparti Ap% est réellement une donnée du matériau.

Lors d'un essai de traction compression, avant la striction :

$$\frac{dF}{F} \geq 0, \text{ à la striction } \frac{dF}{F} = 0.$$

$$\text{Or } F = \sigma.S \Rightarrow \frac{dF}{F} = \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dS}{S} \geq 0$$

L'évolution de l'effort de traction est lié d'une part à l'évolution de la contrainte d'écoulement du matériau (écrouissage) et d'autre part à la variation de section de l'éprouvette (localisation).

Comme la déformation plastique se fait sans changement de volume on peut écrire :

$$V = L.S \Rightarrow \frac{dV}{V} = 0 = \frac{dS}{S} + \frac{dL}{L} = \frac{dS}{S} + d\varepsilon$$

En rassemblant les deux équations il vient alors :

$$\frac{dF}{F} = \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dS}{S} \geq 0 \Rightarrow \frac{d\sigma}{\sigma} - d\varepsilon \geq 0 \Rightarrow \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \geq \sigma$$

C'est-à-dire qu'on obtient un critère de striction fondé sur la capacité d'écrouissage du matériau

( $d\sigma/d\varepsilon$ ).

En pratique il est bien connu que la capacité d'écrouissage du matériau contrôle la localisation de la déformation. En effet, si une zone se déforme plastiquement davantage que son environnement et s'il reste au matériau une certaine capacité d'écrouissage, la contrainte d'écoulement locale devient alors plus élevée qu'ailleurs, ce qui tend à limiter par la suite la déformation plastique dans cette zone et donc à homogénéiser la déformation. En revanche, si le matériau ne présente plus d'écrouissage rien ne s'oppose à la localisation de la déformation.

Ainsi, à la fois,  $\sigma_p$  et le coefficient d'écrouissage sont des paramètres important pour choisir un matériau pour réaliser une mise en forme par déformation plastique. Nous allons raffiner ci-dessous la notion d'écrouissage.

### **II.3 Essai de dureté <sup>1</sup> :**

La classification des matériaux selon le critère de dureté se fait à travers des testes de dureté, répondants à des normes bien déterminées. Il existe plusieurs duretés :

La dureté de Mohs, la dureté Brinell, la dureté Vickers ; la dureté Knoop et la dureté Rockwell B et C. Sur nos échantillons, nous allons effectuer des testes de dureté Vickers ainsi que des testes de micro dureté Vickers.

La norme de dureté Vickers a été adoptée en 1952 et celle de micro dureté en 1969.

Les essais dits de « dureté » mesurent la pression moyenne de contact des matériaux, lors de l'enfoncement d'un indenteur (conique, pyramidal ou sphérique) sur une surface plane. La dureté est évaluée après retrait de l'indenteur, à partir de la mesure de la dimension de l'empreinte de l'indenteur, ou pendant l'essai à partir de la courbe d'indentation qui lie la profondeur d'indentation à la charge appliquée, c'est donc bien une manière de caractériser le comportement plastique du matériau.

La dureté, lorsqu'elle est mesurée sur un matériau ductile dans les conditions définies par les normes, peut être considérée comme un paramètre intrinsèque au matériau. Cependant, bien que le résultat obtenu soit une pression, on l'exprime sans dimension puisque la pression mesurée dépend de la géométrie de l'indenteur. Ainsi, une valeur de dureté est un nombre (la pression moyenne de contact exprimée en  $\text{Kgf/mm}^2$  ) suivi d'un sigle H (pour dureté – Hardness en anglais) et d'un indice qui indique le type de pénétrateur utilisé (V pour Vickers ou B pour Brinell, par exemple).

L'intérêt principal de cet essai est qu'on peut le réaliser sur des échantillons de dimensions très réduites, sans préparation particulière excepté un polissage de

---

<sup>1</sup> site : <http://www.utc.fr/tomas/Themes/Unités/>.

surface. Ceci permet de tester la réussite d'un traitement de surface qui porte sur quelques centaines de micromètres de profondeur, ou la qualité d'un revêtement de surface, ou encore la taille de la zone affectée par le soudage de deux tôles... On l'utilise préférentiellement lorsque le prélèvement d'éprouvettes de traction conventionnelle est difficile. Des essais de microdureté et nanodureté ont ainsi été développés afin de tester des zones de plus en plus réduites, jusqu'à des surfaces de quelques micromètres carrés.

D'autre part, l'essai de dureté présente l'intérêt d'être plus ou moins non destructif, facile à mettre en oeuvre et peu coûteux par comparaison avec des essais de traction. C'est donc une méthode de contrôle couramment utilisée pour établir des cartographies de dureté sur des sections de pièces massives, après mise en forme et traitements thermiques.

Cependant, si cette méthode d'essai présente des avantages évidents, il reste qu'en dépit de sa grande facilité de mise en oeuvre elle reste difficile à interpréter mécaniquement. En effet, on n'accède pas directement aux propriétés mécaniques du matériau testé, à savoir la limite d'élasticité, la contrainte maximale  $R_m$ , le taux d'écroutissage, le module d'élasticité  $E$ . Seule une interprétation mécanique de l'essai peut permettre de lier la mesure de dureté à ces propriétés.

En 1882, Hertz a conduit l'analyse du contact de deux solides élastiques de révolution. Les formules qu'il a proposées permettent de déterminer le module d'élasticité à partir des essais de dureté. Pour ce qui est de la plasticité, Hill [Hill,1947] a résolu le problème de l'indentation d'un plan rigide plastique parfait par un coin rigide indéformable. Une relation de proportionnalité directe est trouvée entre la limite d'élasticité et la dureté. Une proportionnalité a également été observée par [Tabor,1951] sur des aciers de construction ( $R_m=3,5 \text{ HB}$ ,  $R_m=3 \text{ HV}$ , n.b. règle empirique valable uniquement pour les

aciers). Cependant, en général, la seule mesure des dimensions de l’empreinte ne permet pas de déterminer les propriétés de traction monotone du matériau.

### II.3.1 Dureté Vickers:

La dureté Vickers a été conçue dans les années 1920 par les ingénieurs de la société Vickers en Angleterre. Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un indenter sous une charge donnée durant 15 secondes. L'indenter est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de  $136^\circ$ . La charge appliquée est comprise entre 1 et 120 kgf. Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope.

L’indenteur de l’essai Vickers est une pyramide à base carrée. L’angle des faces est précisément défini par les normes ( $136^\circ$ ). Le schéma de principe de cet essai est donné sur la Figure 5.1. La dureté est le rapport de la force appliquée (exprimée en Kgf) sur la surface de contact (exprimée en millimètres carrés), c’est à dire la pression moyenne dans le contact. L’aire de contact est estimée à partir de la dimension de l’empreinte après retrait de l’indenteur (Figure 5.1). L’épaisseur de l’échantillon doit être supérieure à 1.5 fois la diagonale des empreintes (environ 7.5 fois la profondeur  $h$ ) et la distance entre les centres de deux empreintes supérieure à six fois la diagonale des empreintes. En deça de ces limites, les empreintes de dureté interagissent. Si la distance à respecter entre deux empreintes est assez importante, en revanche l’épaisseur nécessaire à l’essai est assez faible. Ainsi, cette méthode est elle plus particulièrement utilisée pour les essais de micro-dureté et de nano-dureté pour lesquels, en outre, la réalisation d’un indenteur “ dur ” de forme sphérique est difficile. De plus un des intérêts de cet essai est que la géométrie du problème ne change pas au cours de l’enfoncement de l’indenteur, ce qui permet de comparer facilement des indentations de tailles très différentes, et notamment de comparer expériences et simulations à l’aide d’un seul maillage (3D) pour toutes les profondeurs.

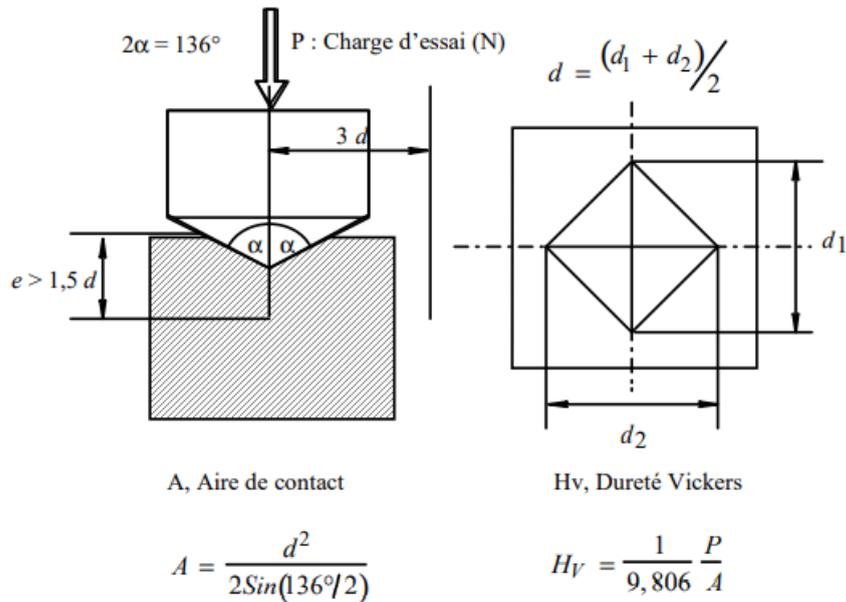


Figure II-6 : Schéma de principe de l'essai Vickers

La dureté Vickers (HV) est calculée e à l'aide de la formule suivante :

$$HV = \frac{1,854F}{D^2} \quad (III.2)$$

Où :

F est la charge appliquée en kgf et D, la diagonale de l'empreinte en millimètres.

La profondeur de pénétration H est :

$$H = \frac{D}{7} \quad (III.3)$$

La figure III.19 présente le duromètre utilisé pour nos échantillons, les essais étant effectués au niveau du laboratoire matériaux à l'entreprise EI de Azazga.

#### ◇ Essai Brinell et Rockwell Bille.

L'essai Brinell est le plus simple dans son principe. Une bille est imprimée sur une surface sous une charge fixée et la mesure de dureté est effectuée après son retrait. En supposant que l'aire de l'empreinte de la bille après son retrait est peu différente de celle obtenue sous charge, on détermine, comme pour l'essai

Vickers, la pression moyenne de contact comme la charge appliquée (en Kgf) divisée par l'aire de contact de la bille et de la surface plane (en mm<sup>2</sup>). On trouve facilement cette aire à partir du diamètre de l'empreinte.

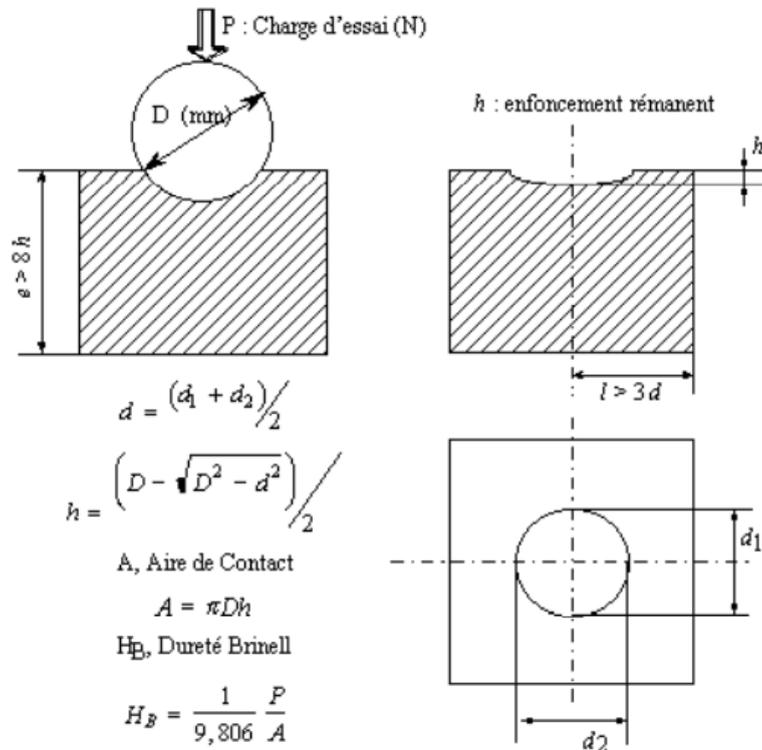


Figure III-6: Schéma de principe de l'essai Brinell

Deux sources d'erreurs importantes peuvent perturber la mesure : la première est que le retrait élastique soit trop important et par conséquent que la mesure du diamètre de l'empreinte après décharge conduise à une surestimation de la pression moyenne de contact réelle. La charge à appliquer doit donc être suffisante pour que le retrait élastique reste négligeable devant les dimensions de l'empreinte. La seconde source d'erreur provient du fait que l'indentation laisse des contraintes résiduelles dans le matériau à des distances très grandes du centre de l'empreinte, ainsi une seconde empreinte réalisée à une trop faible distance de la première est elle affectée par le champ de contrainte résiduel de la première. De même une empreinte réalisée trop près d'un bord ou sur une plaque d'épaisseur trop faible ne sera pas représentative du matériau. La norme de

l'essai Brinell indique que la distance entre les centres de deux empreintes doit être supérieure à six fois le diamètre de l'empreinte. De même, l'épaisseur de l'échantillon doit dépasser huit fois la profondeur de l'empreinte.

Les zones d'influence des essais Brinell (8 h) et Vickers (7,5 h) sont assez proches, et on trouvera également par ces deux méthodes des pressions moyennes de contact assez similaires. Cependant, les géométries des zones plastifiées et les niveaux de triaxialité des contraintes de ces deux essais étant a priori différents, les deux méthodes de mesure n'ont aucune raison de donner la même valeur de dureté. Des tableaux de passage entre les différentes duretés sont fournis dans les normes (NF A 03-172, 173), mais ces tableaux sont indicatifs et peuvent varier selon le matériau.

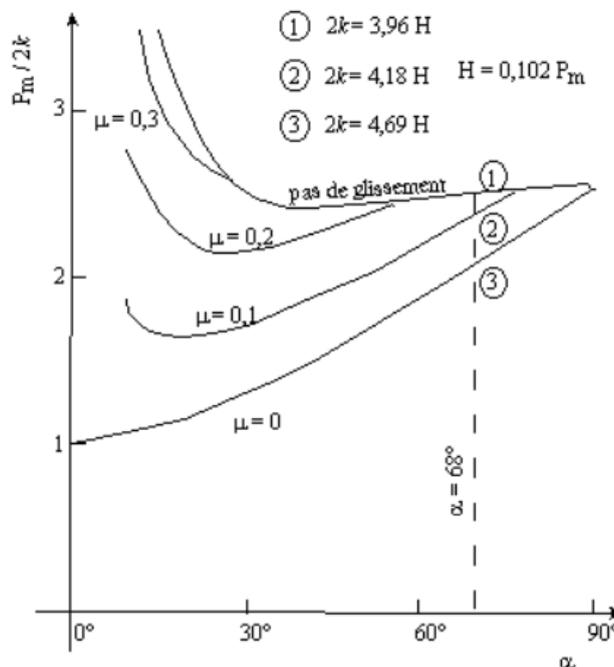
Il faut bien noter que la corrélation entre l'essai de traction et tel ou tel essai de dureté n'est valable que pour un type de matériau tout comme la corrélation entre l'essai Vickers et l'essai Brinell. Il faudra particulièrement se méfier des corrélations entre essais de dureté dans le cas des matériaux poreux.

### ◇ Relations entre dureté et contrainte d'écoulement.

Des calculs analytiques ont été effectués (Hill) en supposant un comportement rigide-plastique pour le matériau avec une contrainte d'écoulement plastique en cisaillement notée  $k$ . Dans ce cas, il existe une relation de proportionnalité entre la pression moyenne de contact et la limite d'élasticité du matériau testé. Le coefficient de proportionnalité dépend de l'angle  $2\alpha$  entre les faces de l'indenteur et du coefficient de frottement. Sur la figure ci-après [Johnson, 1985] sont indiqués les coefficients de proportionnalité entre la pression moyenne de contact et la contrainte d'écoulement ( $2k$ ) selon le coefficient de frottement. Pour la valeur conventionnelle utilisée lors des essais Vickers  $\alpha=68^\circ$ , l'effet du frottement est assez faible.

On trouve alors une relation entre la dureté (notée ici  $H$ ) et la limite d'élasticité ( $2k$ ) qui varie pour  $\alpha=68^\circ$ , entre  $2k = 3,9 H$  et  $2k = 4,7 H$  selon le coefficient de frottement des surfaces.

Dans le cas d'un comportement élasto-plastique parfait, on trouve pour l'essai Brinell, comme pour l'essai Vickers, une relation de proportionnalité entre la dureté et la limite d'élasticité. soit  $R_m = 2,8 \cdot HB$  pour l'essai Brinell.

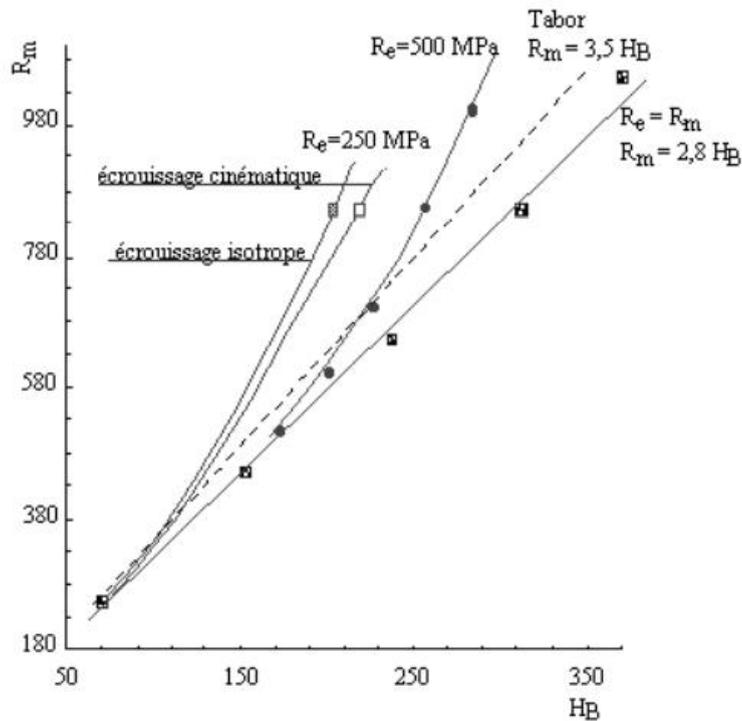


**Figure III-7:** Coefficient de proportionnalité entre la dureté et la limite d'élasticité en fonction de l'angle des faces, selon le coefficient de frottement [Johnson, 1985].

◇ **Rôle de l'érouissage du matériau.**

Cependant le fait que le matériau présente de l'érouissage modifie considérablement cette relation. Ceci explique en partie l'écart entre le coefficient de proportionnalité trouvé ici et celui déterminé par Tabor  $R_m = 3,5 \cdot HB$  pour des aciers de construction [Tabor, 1951]. Par exemple, sur la ci-après, les cercles pleins correspondent à des calculs par éléments finis, pour des comportements de matériaux tels que la limite d'élasticité soit toujours de 500

MPa, tandis que la quantité d'érouissage augmente. Si on trace la charge maximale  $R_m$  en fonction de la dureté calculée, on constate que la mesure de dureté est effectivement sensible à  $R_m$  mais que l'évolution est nettement non-linéaire.



**Figure II-8 :** Effet de la limite d'élasticité et de l'érouissage sur la mesure de dureté

### II.3.2 La microdureté :

L'essai de microdureté est un essai effectué sous très faible charges ( $F < 0,2$  daN) avec un pénétrateur en diamant de forme pyramidale diamant,. Les empreintes résultantes font quelques microns.

Les essais de microdureté Vickers sont effectués sur un appareil équipé d'un microscope permettant de localiser la phase à soumettre à l'indentation. De ce fait, lorsque le choix de la charge et la zone à indenter sont réalisés, le pénétrateur se déplace pour cibler la phase voulue et se retire après 20 secondes d'indentation. Une empreinte de forme pyramidale est tracée sur la surface de

l'échantillon. La mesure des deux diagonales à l'aide de deux droites permet de calculer la valeur de la microdureté à l'aide d'un programme placé sur l'appareil. Le microduromètre utilisé est représenté sur la figure III.20.



**Figure II-8:**Micro durometre

### **II.4 Essai de résilience<sup>1</sup>**

Il arrive souvent que les matériaux, de très bonnes qualités plastiques sous les efforts statiques, deviennent très fragiles sous l'action du choc. La résilience caractérise la résistance au choc des matériaux. C'est une caractéristique mécanique importante.

L'énergie consommée pour rompre le barreau est mesurée en faisant la différence d'énergie potentielle entre la hauteur de chute du « mouton » et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. Si ce dernier était complètement fragile, le « mouton » remonterait à la même hauteur que celle d'où il a chuté ; s'il était au contraire extrêmement tenace, il ne serait pas rompu et le pendule ne remonterait pas du tout. L'énergie de rupture

---

<sup>1</sup> Technique de l'ingénieur, traité plastiques et composites, Essais mécaniques des plastiques AM3510

ainsi déterminée s'appelle la résilience  $J/cm^2$ . Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace.

Le tableau ci après représente quelques caractéristiques du mouton pendule utilisé

**Tableau III-1: Fiche technique du mouton pendule**

<b>Données techniques</b>	<b>Grand model</b>	<b>Petit model</b>
Numéro modèle	Zwick 5101	Zwick 5102
Longueur du pendule	390mm	225mm
Capacité de travail	0...50/25/15/7,5 joule	0...4/2/1/0,5 joule
Vitesse d'impact	3,85m/s	2,93m/s



**Figure II-9: Mouton pendule ( machine d'essai de résilience)**

**II.5 Conclusion :**

Comme on sait que les matériaux composites ont plusieurs propriétés qui le rendent plus résistant, plus rigide et plus performant le plus longtemps travers les conditions sévères environnementales, c'est pourquoi nous avons présenté les essais mécaniques et dans ce chapitre et nous avons abordé quelques propriétés mécaniques de ces matériaux et leurs dégradations.

# *Chapitre III : Applications des matériaux composites*

### III.1 Introduction

Les matériaux composites, pour leurs propriétés remarquables par rapport aux matériaux traditionnels telles la rigidité, légèreté et résistance à des contraintes d'origine mécanique ainsi, connaissent depuis plusieurs décennies un développement spectaculaire dans des secteurs industriels très variés.

### III.2 Construction automobile

Les matériaux composites se démarquent par leur légèreté et leur facilité de mise en œuvre. Leur résistance mécanique, physique et chimique offre un large éventail de possibilités en termes d'utilisation, de design, de géométrie et d'intégration de fonctions. S'adaptant parfaitement à toute sorte d'environnement, même les plus hostiles, ils s'intègrent totalement à notre quotidien à tel point qu'ils peuvent passer inaperçus. L'industrie automobile reste un grand champ d'investigation pour les matériaux composites. A ce jour, plus de 30 000 tonnes de matières plastiques et composites sont utilisées pour la fabrication de pièces de carrosserie, notamment dans les pare-chocs, les ailes, les portes latérales, les ouvrants arrière, les pièces sous capot....



**Figure IV-1:** Pièces de voiture en matériaux composites

Le choix des matériaux, tel que l'industrie aéronautique, aérospatiale, automobile, ferroviaire, sports et loisirs, bâtiment, génie civil est toujours un problème complexe où le comportement coût/performance règne en maître

Les composites de haute performance ont été longtemps confinés dans l'aéronautique civile à des pièces de structure secondaire (habillage intérieur, volets), plus rarement primaire et jamais à la voilure, car il se posait deux difficultés :

- Coûts élevés par rapport à l'aluminium
- Risques de délaminage interdisant le vol sur les structures aérodynamiques chargées.

Les premières pièces composites ont été introduites sur les satellites à la fin des années 1970. Les matériaux utilisés sont essentiellement des fibres de carbone à haut module d'Young avec résine d'époxyde. Les premiers matériaux composites ont été introduits sur les missiles balistiques dans le milieu des années 1960 par l'utilisation de structures bobinées fibres de verre/résine époxyde, les structures bobinées fibres d'aramide/époxyde ayant été introduites dans la fin des années 1970. Les fibres de carbone pour la réalisation de structures bobinées ont été introduites dans le milieu des années 1970<sup>13</sup>.

L'utilisation des matériaux composites dans les constructions aéronautiques entraîne un gain de poids substantiel. Leur emploi permet, à performances égales, des gains de masse variant de 10% à 20%. Le poids de l'avion moyen-courrier Boeing 767 a été réduit, par l'emploi des composites, de 921 kilogrammes par rapport à la solution conventionnelle. Les matériaux composites sont essentiellement utilisés pour la conception et réalisation des propulseurs à poudre des lanceurs de satellites et de leur tuyère d'éjection des gaz de propulsion, obtenue par bobinage de fibres de verre, de kevlar ou de carbone<sup>14</sup>, afin de résister à la pression interne résultant de la combustion du

---

<sup>13</sup> Zinck P., Salmon L., Gérard J.F., « Durabilité d'Interfaces Polyépoxyde / Fibre de Verre E au Sein de Microcomposites et de Matériaux Composites Unidirectionnels en Milieu humide », *Micromechanical Modeling Polymer*, vol 42, (2001), pp. 5401-5413.

<sup>14</sup> Cherdoud-Chihani A., Mouzali M., Abadie M.J.M., « Study of Crosslinking AMS/DGEBA System by FTIR », *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 69, (1998), pp. 1167-1178.

propergol solide et aux efforts de lancement qui, dans certain cas, se traduisent par des chocs et des vibrations.

Sur les avions commerciaux, les premiers appareils produits industriellement en grande série utilisaient essentiellement des alliages d'aluminium, de l'acier et du titane, aujourd'hui ; les avions commerciaux les plus récents utilisent en masse encore 54% d'alliage d'aluminium, mais 20% de matériaux composites ont été introduits dans la structure, 13% d'acier, 6% de titane et 7% de matériaux divers.

Certains obstacles à l'utilisation massive des composites sont progressivement levés, en particulier par des acteurs étrangers, par exemple :

- Dans le cadre du programme Advanced Composite Technology mené par la NASA et Boeing a été mis au point un nouveau procédé permettant de développer des ailes en composites 20% moins chères qu'avec des matériaux conventionnels,
- Développement de composites à mémoire de forme mené par British Aerospace et Daimler Benz
- Décision d'Airbus d'équiper les fuselages de ses futurs A380 en technologie composite dite « Glare ».

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, chez les grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) pour développer des coffres et hayons.

La société LOHEAC de transports routiers <sup>15</sup>, a pu réduire substantiellement sa consommation de carburant grâce à l'économie de poids obtenue en remplaçant

---

<sup>15</sup> Puglia D., Valentini L., Kenny J.M., « Analysis of the Cure Reaction of Carbon Nanotubes/Epoxy Resin Composites Through Thermal Analysis and Raman Spectroscopy », Journal of Applied Polymer Science, vol. 88, (2003), pp. 452-458.

les cabines conventionnelles de ses tracteurs par de nouveaux éléments moulés en une seule pièce renforcés de fibre à haute résistance<sup>16</sup>.

Les composites sont choisis pour la conception de ressorts à lames<sup>17</sup>. Ce sont des pièces de suspension routières très sollicitées, utilisées par les véhicules de gros tonnage et dont la lame secondaire, assurant 80% de la fonction suspension en évitant des ruptures brutales<sup>18</sup>.

#### III.2.1 composites : matériaux et procédés

Les matériaux composites peuvent être classés en deux grandes familles :

**Tableau IV-1: Chiffres de 1996**

	Marche SMC/BMC	Applications dans l'automobile
SMC	175 100 t	35 000 t
BMC	82 400 t	25 000 t
SMC + BMC	257 500 t	60 000 t

- les composites à base de polymères thermoplastiques (TP)
- les composites à base de polymères thermodurcis-sables (TD)

La différence essentielle réside dans leur comportement quand on les chauffe :

- Un composite à matrice thermoplastique fond à des températures généralement comprises entre 200 et 300 °C et se solidifie en refroidissant. Ce comportement est répétitif, ce qui est important pour la transformation de ce type de matériaux.

---

<sup>16</sup> Liang G., Zuo R., Lu T., Wang J., « Modification of Vinyl Ester Resin by a New Thermoset Liquid crystalline Diacrylate », *Journal of Materials Science*, vol. 40, (2005), pp. 2089-2091.

<sup>17</sup> Narayanan S., Schadler L.S., « Mechanisms of Kink-band Formation in Graphite/Epoxy Composites : a Micromechanical Experimental Study », *Composite Materials and Technology*, vol. 59, (1999), pp. 2201-2213.

<sup>18</sup> Laine M.R., Kim S.G., Rush J., Mollan M., Sun H.J., Lodaya M., « Ringopening Polymerization of Epoxy end-terminated Poly (Ethylene Oxide) as a Route to Highly Crosslinked Materials with Exceptional Swelling Behavior (II) », *Polymer International*, vol. 56, (2007), pp.1006- 1015

- Un composite à matrice thermodurcissable fabriqué à partir d'une résine liquide polymérise et se solidifie sous l'action de la température (200° à 400° ). Cet état est irréversible.

Les composites thermodurcissables utilisés dans l'automobile sont principalement les SMC (« Sheet Molding Compound ») et le BMC (« Bulk Molding Compound »). Ces deux matériaux sont essentiellement réalisés à partir de polyester insaturé, de fibres de verre coupées et de charges minérales. Ces constituants sont mélangés pour obtenir une pâte visqueuse que l'on appelle semi-produit pré-imprégné. Il est à noter que le taux de verre massique dans ces matériaux est d'environ 15–20 %. Un marché de 14 000 tonnes de fibres de verre représente donc 60 000 tonnes de SMC/BMC (tableau I).

Le marché français représente 55 % des applications automobiles du SMC/BMC en Europe car RENAULT, PSA et MATRA ont lancé l'utilisation de ces matériaux principalement pour les façades techniques et les pièces de carrosserie<sup>19</sup>.

Quant au marché allemand, il représente 28 % en Europe et se destine aux applications suivantes : cadres de toit et poutres de pare-chocs **1**

Les composites thermoplastiques utilisés dans l'automobile sont le TRE (« Thermoplastique renforcé estam-pable ») et les LFT (« Long Fiber Thermoplastic »).

Nous rappelons que les thermoplastiques fibres courtes (<1 mm) même s'ils représentent la majorité des applications dans l'automobile, ne sont pas traités dans cet travail car nous nous intéressons ici aux composites qui peuvent permettre de fabriquer des pièces structurelles exclusivement. Les pièces en thermoplastique fibres courtes utilisent majoritairement des matrices polyamide

---

<sup>19</sup> HAQUIN Bénédicte, "Endiguer la dérive du poids", in R et D La route de l'innovation, p 22-25 n° 5 avril 1997

et sont utilisées pour des pièces sous capot (rampes d'injection, couvre-culasses, collecteurs d'admission...).

Le marché des LFT et TRE en Europe représentait 38 000 tonnes en 1998, soit 14 000 tonnes de fibres de verre. Le taux de renfort massique des LFT varie entre 20 et 50 % avec une forte majorité d'applications entre 30 et 40 % de verre en masse.

**Tableau IV-2: Le marché des LFT et TRE en Europe**

Procédé / Matrice	TP	TD
Compression	TRE	SMC
Injection	LFT	BMC

### **III.2.2 Les procédés de transformation des composites dans l'automobile**

Dans le marché automobile actuel, on distingue deux types de procédés : la compression et l'injection comme le montre le tableau II.

#### **III.2.2.1 Moulage des composites thermodurcissables**

Le BMC et le SMC sont adaptés aux marchés industriels de moyenne et grande série, les temps de cycle variant de 1'30" à 3 minutes<sup>20</sup>.

- Compression du SMC. Le SMC se présente sous forme d'une feuille très visqueuse et manipulable. Elle est placée dans un moule monté sur une presse verticale et chauffé à 160–170 °C sous forme de flans prédécoupés. Le SMC classique, soumis à une compression de 3 à 6 MPa suivant les formulations, flue pour prendre la forme de la pièce tout en amorçant un processus de polymérisation. Le temps de cycle est de 2 à 3 minutes. Les grandes utilisations se trouvent dans le transport routier (automobile,

---

<sup>20</sup> EUROPEAN ALLIANCE FOR SMC, SMC/BMC Design for Success,

utilitaires) et ferroviaire, l'électrotechnique et le bâtiment. Suivant les utilisations, il contient de 15 à 30 % de renfort.

- L'injection du BMC. Le BMC et ses dérivés (KMC, CIC...) se présentent sous forme d'une masse très visqueuse (« choucroute »), modulable par injection. Le compound est injecté sous forte pression (>100 bars) dans un moule fermé, chauffé à 160–180 °C où il va polymériser. Le temps de cycle est de 1'30" à 2 minutes. Les grands secteurs d'utilisation sont l'électrotechnique l'électroménager et l'automobile. Les taux de verre sont généralement de 10 à 20 %.

#### III.2.2.2 Moulage des demi-produits thermodurcissables

Le TRE et le LFT sont adaptés au marché automobile de moyenne et grande série avec des temps de cycle de l'ordre d'une minute<sup>21</sup>.

- La compression de TRE. La compression de plaques TRE est essentiellement dédiée à l'automobile. Les matériaux en feuilles, réalisés généralement par extrusion/calendrage sont préchauffés sous forme de flans prédécoupés à plus de 250 °C (four Infra-Rouge) puis transférés dans un moule refroidi monté sur une presse verticale. Ils sont alors moulés par compression/estampage. Les temps de cycle sont inférieurs à une minute mais le coût matière élevé les pénalise. Ils sont de plus en plus concurrencés par l'apparition de nouveaux couples matériaux/technologies du type.
- L'injection/compression ou l'injection de LFT. Les granulés LFT sont réalisés par extrusion. Le polymère fondu et le renfort sous forme de fils coupés sont mélangés à des températures de l'ordre de 250 °C. Le mélange est extrudé sous forme de joncs qui sont refroidis puis coupés. Les taux de verre peuvent aller de 10 à 60 % en masse. Les granulés sont moulés sur des presses d'injection ou d'injection-compression où ils sont préchauffés

---

<sup>21</sup> Rudd C.D. et al., *Fibres composites for lightweight vehicle structures — Cost effective manufacture*, Materials for Lean Weight Vehicles (1997).

à plus de 250 °C. Ils sont injectés sous très forte pression (>200 bars) dans un moule fermé refroidi. Les temps de cycle varient suivant les pièces à réaliser de 30 secondes à 2 minutes 30. Les grands secteurs d'utilisation sont l'automobile, l'électrotechnique, l'électronique et l'électroménager, le matériel industriel et agricole.

### III.2.2.3 Les nouvelles évolutions matériaux/technologies

La croissance des composites entraîne un foisonnement des travaux de R&D. Ces travaux engendrent des évolutions importantes, toutes orientées vers un accroissement de la compétitivité et des performances.

Nous citerons principalement :

Dans les composites thermodurs :

- L'émergence de procédés qui constituent des ponts entre les procédés de petite série et les grands procédés industriels SMC, BMC :

(1) RTM (Resin Transfer Molding),

(2) SRIM (Structural Reaction Injection Molding).

- Le premier consiste à injecter un polyester dans un moule fermé, à basse pression (quelques bars) où a été déposé préalablement le renfort verre (mats à fils continus ou tissu), nécessitant des investissements relativement faibles et évolutifs. Il constitue un procédé particulièrement intéressant pour les petits mouleurs (contact/projection) qui se développent. Suivant le degré d'industrialisation les temps de cycle peuvent en effet varier de 30'' à 5'.
- Le deuxième, beaucoup plus lourd en investissement, consiste à injecter sur une préforme de mats de verre, un mélange de deux résines qui imprègne les fibres et se solidifie rapidement. Le SRIM tend à prendre une place intéressante dans les pièces de moyenne série.

- On observe en outre des travaux importants réalisés autour des SMC basse pression (moulage à pression < 20 bars) visant à diminuer le coût des investissements presses/outillages

Dans les composites thermoplastiques : Les travaux de recherche d'amélioration des propriétés mécaniques conduisent au développement de nouveaux matériaux, notamment<sup>22</sup> :

- L'apparition de technologies LFT directes où le demiproduit thermoplastique est préparé in situ sur la ligne de moulage [4, 5]
- Le Twintex, tissu mixte Fibres de verre et Fibres de polypropylène qui permet d'atteindre des niveaux de propriétés inconnus jusqu'à ce jour grâce à un taux de verre de 60 % en masse [6]. Dans ses applications automobile (poutres de pare-chocs et planchers de coffre), le Twintex est mélangé avec du TRE ou du LFT.
- L'apparition des premières applications des matériaux sandwich constitués d'une âme NIDA polypropylène et de peaux polypropylène/fibres de verre.

#### III.2.3 Les principales propriétés des composites

L'amélioration des propriétés thermomécaniques conférées par les renforts place les composites en position concurrentielle des matériaux traditionnels, notamment des métaux. Cela leur permet d'être présents dans les grands secteurs industriels : automobile, électrotechnique, électroménager, génie chimique, BTP...

Les principales caractéristiques des composites à base de fibres de verre sont les suivantes<sup>23</sup> :

- Une densité faible comprise entre 1 et 2 par rapport à l'aluminium (2,5) et à l'acier.

---

<sup>22</sup> TUBUS BAUER : une grande première, Composites 29 (octobre/novembre 1998).

<sup>23</sup> Price C.B., Thermoplastic sandwich materials for cost effective lightweight automotive structural panels, Materials for Lean Weight Vehicles (1997)

- Les modules des matériaux composites sont entre 5 et 20 GPa alors que l'aluminium a un module de 70 GPa et l'acier de 210 GPa. Cette différence de module est compensée par l'épaisseur des pièces et la possibilité de mouler des formes complexes nervurées.
- Il en résulte un rapport performances/poids élevé, illustré par exemple par l'utilisation des composites dans les ressorts à lames d'utilitaires et les poutres de parechocs.
- Une tenue thermique intéressante, qui va permettre, par exemple, d'utiliser les composites dans les couvercles de culasse automobile.
- Une stabilité dimensionnelle autorisant l'assemblage ou la cohabitation avec des pièces métalliques (ex : pièces de carrosserie, faces avant techniques).
- Les composites présente de plus les avantages inhérents aux plastiques, en particulier
  - tenue à la corrosion,
  - coloration dans la masse,
  - facilité de mise en forme avec des procédés très diversifiés. Ce caractère est doublement important car il permet :
    1. D'obtenir des formes complexes en une seule opération de moulage. Ceci ouvre la voie à l'intégration des fonctions donc à une réduction drastique des coûts d'assemblage. De même, il est possible de nervurer facilement les pièces pour améliorer leur rigidité.
    2. D'optimiser les choix matériaux/technologie en fonction des séries à produire

Les matériaux ont aussi quelques limitations à prendre en compte lors de la conception des pièces :

- Les problèmes liés à l'anisotropie due aux orientations préférentielles de certains renforts lors du moulage (cas des fils coupés) : hétérogénéité des propriétés, retraits différentiels
- Faible tenue au fluage à chaud, surtout pour les composites thermoplastiques.
- Difficile maîtrise des aspects de surface, liée à la présence de renforts fibreux, surtout pour les pièces peintes.
- Coûts matière élevé vis à vis des matériaux traditionnels (de 8 F le kg dans les meilleurs cas à plus de 30 F le kg). L'intégration de fonctions et le niveau des investissements (outillages, machines) ont à cet égard une importance capitale dans la compétitivité de la solution composite.
- Recyclage difficile, surtout dans le cas des composites thermodurcissables. Cette question a mobilisé la profession des thermodurs : des organismes comme ERCOM et VALCOR, de même que la SMC Automotive Alliance aux USA et en Europe contribuent largement à minimiser ce problème en proposant aujourd'hui des solutions concrètes de réincorporation ou de réutilisation <sup>24</sup>.

#### **III.2.4 facteurs d'influence et choix de matériaux**

Le choix des matériaux dans l'automobile est complexe et lié à un certain nombre de grandes contraintes que nous avons tenté de regrouper, sans prétendre pour autant être exhaustifs. Nous distinguerons des facteurs économiques, des facteurs liés à la concurrence et aux besoins des consommateurs et des facteurs liés à l'évolution des réglementations (voir tableau III).

---

<sup>24</sup> Guillon S., SMC/BMC market in Europe, in : AUK Conference, octobre 1999

Tableau IV-3: facteurs d'influence et choix de matériaux

Facteurs d'influence	Leurs conséquences	Apport des matériaux composites
<i>Contraintes économiques</i>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des coûts d'investissement et d'assemblage</li> <li>• Réduction du temps de développement des modèles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intégration de fonctions. Concepts modulaires diversifiés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aptitude à la complexité des formes</li> <li>• Etendue de la gamme matériaux</li> <li>• Précision dimensionnelle</li> <li>• Flexibilité des composites</li> <li>• Investissement/ticket d'entrée réduit</li> </ul>
<i>Besoins clients et offre concurrentielle</i>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enrichissement des fonctions</li> <li>• Évolution du style extérieur et intérieur (formes, complexité)</li> <li>• Confort</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diversification des gammes donc des séries</li> <li>• Diversification des besoins</li> <li>• Limiter les contraintes imposées aux stylistes</li> <li>• Augmentation de l'espace habitable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilité et diversité des technologies</li> <li>• Etendue de l'offre matériaux</li> <li>• Liberté des formes</li> </ul>
<i>Évolution des réglementations</i>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acoustique/bruit</li> <li>• Consommation de carburant</li> </ul> <p style="text-align: center;">⇕</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Protection de l'environnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction de l'espace sous capot, encapsulation moteur</li> <li>• Recherche d'allègement</li> </ul> <p style="text-align: center;">⇕</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des émissions dans l'air</li> <li>• Recherche de concepts fonctionnels mono-familles de matériaux</li> <li>• Choc frontal et latéral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performances thermomécaniques et d'insonorisation</li> <li>• Rapport poids/performances</li> <li>• Recyclabilité « démontrée » /revalorisation énergétiques/chimiques</li> <li>• Réutilisation hors automobile</li> <li>• Qualité d'absorption d'énergie au choc</li> </ul>

### III.2.4.1 Les facteurs d'ordre économique

Un des facteurs clés du développement des composites dans l'automobile est la réduction des prix par la réduction des coûts d'investissement et d'assemblage. En effet, la complexité des formes qui peuvent être obtenues avec des composites et l'étendue de la gamme de matériaux permet la conception de modules diversifiés et l'intégration de fonctions.

### III.2.4.2 L'offre concurrentielle et l'évolution des besoins des consommateurs

La concurrence a pour conséquence un engagement marqué des constructeurs dans la diversification de leurs gammes, l'accélération du renouvellement et du restylage extérieur et intérieur de leurs modèles. Parallèlement, l'enrichissement des fonctions et la poussée de l'électronique créent de nouveaux besoins. Enfin, l'offre en matière de confort amène une recherche d'espace habitable au détriment de l'espace sous capot.

Ces évolutions intéressent directement les matériaux composites : à la diversification, ils répondent par la flexibilité de production et l'étendue de l'offre matériaux. En matière de style, ils permettent une liberté de formes qui n'est plus à démontrer.

### III.2.4.3 L'évolution des réglementations

Cette évolution touche à la fois :

- le domaine acoustique et les normes de bruit.
- la sécurité, qu'il s'agisse de choc frontal ou latéral,
- la protection de l'environnement : consommation de carburant et pollution de l'air, recyclage et revalorisation des matériaux.

#### III.2.4.3.1 Acoustique et normes de bruit<sup>25</sup>

L'une des conséquences importantes des évolutions dans ce domaine est l'encapsulation de l'espace sous capot qui tend par ailleurs à se réduire. Elle provoque l'apparition de nouvelles fonctions (écrans sous moteur par exemple) mais favorise aussi la recherche d'intégration de fonctions permettant de gagner en volume occupé. Ceci entraîne d'autre part une élévation des températures sous capot, donc des cahiers des charges thermomécaniques. Globalement cette évolution est favorable aux composites qui bénéficient de leurs qualités en terme d'insonorisation et de leur aptitude à réaliser des formes complexes sans reprise .

#### III.2.4.3.2 Sécurité<sup>26</sup>

L'évolution des réglementations génère le développement des nouveaux concepts, touchant en particulier le bloc avant des véhicules et le module portières. Les qualités d'absorption d'énergie des composites peuvent y jouer un rôle intéressant.

---

<sup>25</sup> Thome J.P., Le challenge 71 dBA en bruit extérieur, SFIP/SIA 0498-08, avril 1998.

<sup>26</sup> Gumery X., Bloc avant : évolutions des prestations client, SFIP/SIA 0498-10.

### **III.2.4.3.3 L'environnement<sup>27</sup>**

Nous notons d'une part la recherche de l'allègement des matériaux. En général, les composites présentent des rapports performances/poids attractifs [15]. D'autre part, la volonté de recyclage et de revalorisation des matériaux favorise la tendance à rechercher des modules ou concepts fonctionnels monofamilles de matériaux.

Enfin il faut mentionner la recyclabilité et la revalorisation démontrées des matériaux en ajoutant que leurs possibilités en terme d'intégration de fonction ne peut que faciliter les opération de démontage sur les véhicules en fin de vie.

### **III.2.5 applications**

L'utilisation des composites fibres longues concerne trois grands domaines du véhicule : l'espace sous capot, la carrosserie et le soubassement. L'habitacle est le domaine privilégié des matières plastiques mais principalement à l'état non renforcé. L'utilisation est donc limitée à des applications spécifiques (garnitures de pavillons avec des concepts polyuréthanes/fibres de verre) ou ponctuelles (structures de sièges en TRE ou SMC).

#### **III.2.5.1 Pièces sous capot : Exemple de la façade avant technique**

L'évolution des matériaux composites utilisés pour la fonction de façade avant technique montre les progrès effectués sur les matériaux et sur le savoir faire des constructeurs et des équipementiers.

La première façade avant technique utilisée sur un véhicule de grande dimension est celle de la Peugeot 405 en 1987. Cette pièce est réalisée en SMC avec un niveau d'intégration de fonctions élevé. Plusieurs véhicules ont utilisé la même technique (Citroën XM, Peugeot 605, Volvo 850, Renault Safrane, Citroën Xantia, VW Sharan, Ford Taurus...).

La seconde génération de matériaux utilisés pour cette fonction, le TRE, a été introduite par VW sur la Golf (A3) en 1991. Depuis, le groupe VW a utilisé ces

---

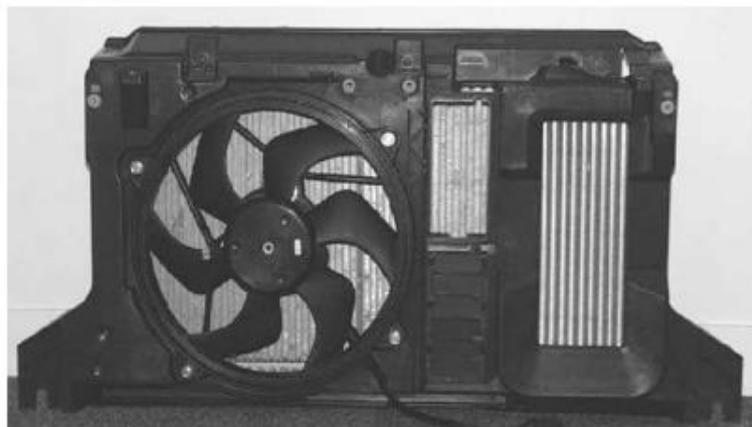
<sup>27</sup> Beaufiles P., Nouvelles contraintes fonctionnelles sur le bloc avant : les attentes matériaux, SFIP/SIA 0498-11.

matériaux sur la majorité de ses modèles (Golf A3 et A4, VW Polo, Audi A3, Audi A4, Audi A6, VW Passat...).

Depuis ces deux dernières années, de nouveaux procédés à base d'injection compression se sont développés pour réduire les coûts de matériaux et de transformation. Ceci a conduit à utiliser plusieurs nouveaux matériaux/produits dont le nom varie selon l'utilisateur mais qui sont tous basés sur la présence de polypropylène renforcé par des fibres de verre longues (10 à 50 mm). Ce sont les procédés LFT dont certains mélangent directement les fibres et le polypropylène (procédés CPI et XRE). Les applications actuellement sur le marché sont la Volvo 850, la Peugeot 206 et la VW Passat.

Tout récemment, le procédé d'injection-compression a été remplacé par le procédé d'injection de PP fibres longues, ce qui permet de mouler des pièces plus complexes et plus homogènes (avantages de l'injection) sans reprises. La première pièce en série est la façade avant de la Citroën C5 ( figure 2).

Enfin, les nouvelles normes de sécurité et la nécessité dans certains cas de renforcer la pièce ont conduit



**Figure IV-2:** Façade avant technique de la Citroën C5 en LFT

au développement de façades avant technique hybrides selon un procédé développé par BAYER. Il s'agit dans ce cas de venir renforcer un insert métallique déposé dans un moule d'injection par un réseau de nervures thermoplastiques. Les deux premiers exemples en série se trouvent sur une version de l'Audi A6 et sur la Ford Focus <sup>28</sup>.

#### III.2.5.2 Pièces de carrosserie<sup>29</sup>

Le taux de pénétration des matériaux composites dans les pièces de carrosserie automobile reste à ce jour encore assez marginal et on peut observer une forte disparité entre les constructeurs et selon les marchés.

Néanmoins les pièces en composite ont bénéficié depuis une vingtaine d'années d'applications de plus en plus nombreuses dans le monde. La Citroën BX avait déjà en 1982 un capot et un hayon en thermodurcissable SMC et BMC. Ces matériaux permettent l'allègement d'une pièce de grande taille. Ils peuvent supporter les contraintes de tenue mécanique (choc, raideur) et de température (dilatations).

Depuis, de nombreuses applications ont été et sont utilisées en série avec une « explosion » sur le marché américain. Un rapport récent de la SMC Automotive Alliance de 1998 montre que 125 pièces de carrosserie en SMC étaient déjà en série aux USA (capots, hayons, aides, spoilers...) en 1998.

Ce marché va s'étendre rapidement avec l'utilisation de composites (SRIM, SMC) pour des caisses de pickup avec des séries de plus de 200 000 pièces·an-1 et par application. En Europe, l'illustration la plus convaincante du SMC pour des pièces de carrosserie est celle de l'Espace qui, depuis trois générations, a l'ensemble de sa carrosserie en SMC (toit, hayon, panneaux de portes, ailes...) et bientôt l'Avantime (même pièces).

---

<sup>28</sup> Hybrid front end Ford Focus, Kunststoffe 3 (1999), p53

<sup>29</sup> Les composites dans l'industrie automobile nord-américaine expérience et évolutions, Composites 35 (septembre/octobre 1999) 33-37.



**Figure IV-3:** Vue du hayon de la Mercedes classe A et éclaté de la pièce.

Le principal obstacle avec ces matériaux est la difficulté à obtenir un aspect « classe A ». De plus, les matériaux composites se heurtent à la culture acier des constructeurs et aux chaînes d'assemblage existantes qui obligent le montage des panneaux de carrosserie avant cataphorèse et éliminent un grand nombre de matériaux qui ne peuvent supporter une température entre 180 et 200 °C<sup>30</sup>. Dans le cas de certains projets, la pièce de carrosserie peut être montée après cataphorèse et avant peinture, ou encore être livrée comme un module peint et assemblé par l'équipementier. C'est le cas de deux pièces fabriquées par le groupe Venture-Peguform.

La première pièce est le hayon de la Mercedes Classe A qui est constitué d'une doublure en TRE et de deux pièces de peau injectées en alliage Noryl GTX (Matériau de GE Plastics). La pièce est assemblée par collage, peinte et livrée avec ses accessoires (y compris la lunette arrière) à Mercedes (voir figure 3).

<sup>30</sup> Guyot H., Materials evolution prospects in the automotive industry, Ingénieurs de l'automobile (mars 2000) 48-55.

La seconde pièce est le portillon arrière de la Renault Scénic RX4 ( figure 3). Cette pièce est constituée d'une doublure en BMC, d'un cadre métallique (nécessaire pour le support de la roue de secours) et d'une pièce de peau injectée en alliage polycarbonate/polybutylène téréphtalate. La doublure et la peau sont collées, l'ensemble est peint avec les accessoires et livré à Renault comme un module<sup>31</sup>.

Les solutions existantes en série sont donc très variées allant du tout thermodur (SMC/BMC) au tout thermoplastique, en passant par des hybrides thermodur/thermoplastique.

Pour répondre aux normes acoustique et de réduction de la consommation de carburant (en travaillant l'aérodynamique), le soubassement des voitures est de plus en plus caréné, en particulier pour Mercedes et Audi.

Ces carénages sont pour la plupart réalisés en TRE, ce matériau permettant de former des pièces planes, rigides et avec une bonne résistance à l'impact et aux agressions de l'environnement sous caisse.

On note également le développement d'un nouveau marché : celui des cuvettes de roue de secours en TRE pour les Mercedes Classe A, Classe C et Classe S et en SMC pour la Peugeot 607.

### **III.3 Construction aéronautique<sup>32</sup>**

L'utilisation des matériaux composites dans les constructions aéronautiques entraîne un gain de poids substantiel. Leur emploi permet, à performances égales, des gains de masse variant de 10% à 20%. Le poids de l'avion moyen-courrier Boeing 767 a été réduit, par l'emploi des composites, de 921 kilogrammes par rapport à la solution conventionnelle, Lorsque des matériaux composites sont introduits dans l'industrie aéronautique comme suit :

---

<sup>31</sup> Buisson G., Évolution des applications thermoplastiques renforcés verre dans l'industrie automobile européenne, 1994.

<sup>32</sup> 1. <https://solvay.fr>

- Plusieurs parties structurales et aérodynamiques sont en stratifié ou sandwich (dans l'A380, la pièce qui opère la jonction entre ailes et fuselage est en composite).
- Freins en carbone (brevet Messier Bugatti): matrice en carbone et fibres non tissées en carbone aussi.
- Pales des hélices et des turbines, même à contrôle passif du pas. (Figure 4)



**Figure IV-4:** Présentation des pièces faites de matériaux installés dans l'avion

### III.3.1 Comment choisir les matériaux composites pour l'aéronautique

#### III.3.1.1 La matrice

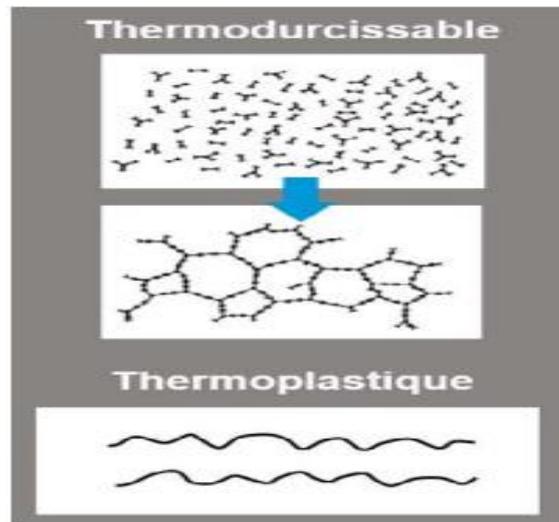
La chimie de la matrice est sélectionnée pour répondre aux multiples impératifs liés à l'utilisation du matériau. Le choix fondamental se fait entre une matrice thermodurcissable<sup>33</sup> ou une matrice thermoplastique<sup>34</sup> (Figure 4). Un thermodurcissable est un polymère fabriqué à partir de petites molécules – les monomères<sup>35</sup> –, qui constituent un milieu liquide. Pendant la cuisson du matériau composite, ces molécules réagissent pour former un réseau en trois dimensions qui durcira à la température de transition vitreuse (T<sub>g</sub>) et donnera la structure finale du matériau composite.

---

<sup>33</sup> Thermodurcissable : qualifie un matériau qui durcit de façon irréversible au-dessus d'une certaine température.

<sup>34</sup> Thermodurcissable : qualifie un matériau qui durcit de façon irréversible au-dessus d'une certaine température.

<sup>35</sup> Monomère : molécule qui, par enchaînements successifs avec des molécules identiques ou différentes, donne naissance à une structure polymère.



**Figure IV-5:** différence entre les thermoplastiques et des thermodurcissables

Un thermoplastique est un produit fabriqué à partir de chaînes moléculaires déjà polymérisées solides à température ambiante. On doit fondre ces résines pour les mettre en forme ; au refroidissement, le produit conserve la forme qui lui a été donnée.

### III.3.1.2 La température de service<sup>36</sup>

Un facteur de choix est celui de la température « de service », c'est-à-dire celle à laquelle le matériau doit être utilisé (Figure 5). Près d'un réacteur, les températures sont plus élevées que sur une aile. Pour un avion civil, ce ne sont pas les mêmes températures que pour un avion de chasse militaire supersonique où le frottement de l'air sur l'aile fait chauffer celle-ci à des températures jusqu'à 100-120 °C.

---

<sup>36</sup> <https://www.1001crash.com/index-page-composite>.

### III.3.1.3 La résistance à l'environnement

Un autre critère est la résistance à l'environnement. Si un avion est parqué sur un runway (une piste) en Malaisie par exemple, à Kuala Lumpur où règne un climat chaud et humide, il sera soumis à une humidité qui diffusera dans les polymères et en réduira les performances : avoir une bonne résistance à l'humidité est donc indispensable.

En hiver c'est la résistance du polymère à l'antigel qui apparaît comme importante. On peut aussi citer la résistance au « jet fuel » (carburant) et même aux solvants à peinture ; quand un avion est vendu d'une compagnie à une autre, il faut enlever la peinture pour que la nouvelle compagnie puisse mettre son logo et repeindre avec ses couleurs. On doit donc utiliser des solvants très agressifs et il faut que les matrices polymères résistent. Tous ces critères sont importants.

### III.3.1.4 La conduction électrique et la résistance au feu

D'autres critères concernent la conduction électrique pour assurer une résistance à la foudre (qui intervient en moyenne une fois par an et est susceptible de gravement endommager l'appareil), ainsi que la résistance au feu, surtout importante pour le fuselage, et qui permet que tous les passagers aient le temps d'évacuer l'avion en cas d'atterrissage difficile. Bien entendu, le coût du produit fini reste inéluctablement un critère de choix, même pour les avions militaires. Toutes ces propriétés dépendent au premier degré du choix de la matrice, thermodurcissable ou thermoplastique.

### III.3.2 La chimie des matériaux composites pour l'aviation

Pour les structures primaires des avions, les matrices ressortissent à trois types de chimie (voir la Figure 5). Ce sont les résines époxy<sup>37</sup>, qui ont des températures de service jusqu'à environ 120 °C, les résines bismaléimides, qui peuvent aller jusqu'à 200 °C-230 °C, puis les polyimides, qui vont jusqu'à

---

<sup>37</sup> Résine époxy : composé chimique au pouvoir adhérent et thermodurcissable qui peut être utilisé comme colle ou combiné à d'autres substances pour former une matière plastique comme la résine époxy.

des températures de 300 °C et sont plus utilisées près des réacteurs dans les avions de combat.

Un mot ici sur la flexibilité au design des composites. On en saisit l'importance en comparant diverses pièces de l'avion (Figure 6). Par exemple, un stabilisateur vertical est chargé en torsion. Une aile d'avion en vol, quand l'aile se plie, au-dessus on est en compression alors qu'en dessous on est en tension, donc on n'a pas toujours les mêmes besoins au point de vue design. Pour le bord d'attaque d'une aile ce sera la résistance à l'impact à haute vitesse qui sera déterminante. Sur le dessus du fuselage, la résistance à l'impact des grêlons est très importante et il en est de même pour le dessus d'une aile. La technologie des composites permet d'adapter le design au besoin de l'application avec beaucoup de souplesse.

Voici quelques exemples de choix de matériaux. Pour le nouveau bombardier, l'aile est en composite, la fibre est une fibre de carbone et la résine est une résine époxy. La technique de fabrication met en jeu une infusion de résine : toutes les fibres de renforcement sont sèches, mises en forme, puis la résine est infusée dans le renforcement. Le choix de la matrice polymère doit à la fois assurer de bonnes performances pour l'aile terminée après la cuisson mais aussi préserver une réactivité bien ajustée, ni trop élevée pour permettre d'infuser l'aile, ce qui peut prendre plusieurs heures, mais en avoir suffisamment pour que les réactions se fassent de manière efficace. Le chimiste ou donc le rôle essentiel de concevoir la composition chimique de cette matrice polymère.

Pour l'équipement intérieur de l'avion aussi, se pose le problème du choix des matériaux. Par exemple pour les boîtes de rangement des bagages dans l'avion, on doit garantir la résistance à la propagation du feu ainsi qu'à la toxicité des fumées. Il y a aussi une exigence forte de résistance mécanique compte tenu de l'utilisation faite par les passagers. Il faut aussi tenir compte du coût. Ces

critères ont conduit à la sélection des résines phénoliques<sup>38</sup>, la chimie phénolique étant bien maîtrisée.

Dans le cas des pales de rotor d'un hélicoptère, c'est le critère de résistance à la fatigue

Les différentes parties d'un avion subissent des contraintes diverses. Les matériaux composites utilisés doivent donc avoir une flexibilité importante afin de résister aux forces subies

qui domine le design. Le matériau choisi est une fibre de verre de type S plutôt que de type E<sup>39</sup> avec une résine époxy. Pour certains avions de combat, le critère de sélection de la chimie est d'une part la résistance à la compression et d'autre part la résistance à une température plus élevée nécessaire quand ils volent en vitesse supersonique. Une des solutions adoptées sont les résines bismaléimides<sup>40</sup>.

Pour les aubes de réacteurs, on utilise les résine époxy pour avoir des résistances suffisantes à de très grandes vitesses d'impact. Par exemple au décollage, s'il arrive que des oiseaux soient ingérés dans le réacteur, on peut évidemment avoir de la perte d'intégrité de l'équipement.

### III.3.3 Les défis du futur<sup>41</sup>

Quels sont les défis du futur ? On en voit de plusieurs catégories.

Pour la recherche : il s'agit de continuer à développer des résines pour augmenter la performance. Les clients veulent toujours plus de performance mais aussi plus d'intégration dans le design et plus de multi-fonctionnalités.

---

<sup>38</sup> Résine phénolique : polymère thermodurcissable issu du formaldéhyde et du phénol.

<sup>39</sup> Les verres de type S et E se différencient l'un de l'autre par les proportions de leurs composants, notamment en silice (SiO<sub>2</sub>), alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ou encore oxyde de calcium CaO.

<sup>40</sup> Résine bismaléimide : résine composée de deux fonctions maléimide H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>(CO)<sub>2</sub>NH.

<sup>41</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté\\_Vickers](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté_Vickers)

Pour l'industrialisation : l'industrie aéronautique a adopté des cahiers des charges de composites sur la structure, et quand on voit les rythmes de production (peut-être 60 ailes par mois pour certaines industries), c'est vraiment de l'industrie. Cela se rapproche de l'industrie automobile avec des vitesses de production très élevées et les défis associés. Un autre défi pour les composites est le recyclage. Comme on utilise de plus en plus de composites dans l'aéronautique, que faire de ces composites en fin de vie d'un avion ? C'est un gros défi auquel nous faisons face<sup>42</sup>.

Et finalement, la certification : cela demande énormément de tests de validation, et pour adopter de nouvelles chimies et de nouveaux matériaux, c'est parfois plus long que ce qu'on ne souhaiterait

#### **III.3.4 Le développement des composites : pas sans la chimie**

le rôle clé de la chimie dans le développement des matériaux composites. D'un côté nous avons l'aspect virtuel (la simulation par ordinateur), et de l'autre l'aspect expérimental. Ils vont vraiment main dans la main. Quand on développe des nouvelles chimies, on parle vraiment de la structure moléculaire : partir d'une molécule, et si on veut une plus grande réactivité, changer la structure de la molécule ou partir d'une molécule aliphatique<sup>10</sup> vers une molécule aromatique<sup>11</sup> pour avoir plus de rigidité sur le polymère et des températures d'utilisation plus élevées. Il y a beaucoup de design, d'optimisation de molécules. On part des molécules puis on va vers les alliages de polymères, puis l'échelle suivante consiste à tester ces polymères puis les polymères avec les fibres de renforcement. Ensuite, on passe à une plus grande échelle ; point de vue échantillon mécanique, puis « sub elements » (donc des petites pièces d'avion) pour aller jusqu'à la tête de la pyramide. On trouve des chimistes qui ont commencé comme chimistes et qui ont fini comme ingénieurs en mécanique en réalisant des tests. On trouve des ingénieurs en mécanique qui ont

---

<sup>42</sup> Access Australia project : The vision becomes a reality, Composites 29 (october/novembre 1998) 20–21.

commencé à faire des tests et qui ont pris passion pour la chimie, sont revenus plus bas dans la pyramide et ont travaillé sur la chimie. Cette activité est vraiment multidisciplinaire et il est passionnant de travailler dans ce domaine<sup>43</sup>.

#### III.3.5 Avantages et inconvénients des composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

1. Leur légèreté
2. Grande résistance à la fatigue
3. Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion
4. Insensibilité aux produits chimiques
5. Possibilité de prendre plusieurs formes (pièces complexes)
6. Bonne tenue au feu (attention aux dégagements toxiques)
7. Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion
8. Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication
9. La sensibilité à la chaleur
10. La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

---

<sup>43</sup> Valersteinas P., Le projet MOSAIC : une entrée en force des composites dans la structure automobile, Composites 8 (mars/avril 1995) 85–91.

### **III.4 Conclusion**

Les matériaux composites occupent une grande importance dans leurs domaines d'utilisation grâce aux caractéristiques et propriétés mécaniques, physiques, thermiques, électriques et ainsi de suite) qu'ils ont par rapport aux autres matériaux, comme nous avons précisés dans ce chapitre. Mais tout comme il a ses avantages, il a aussi ses inconvénients.

# **Conclusion Générale**

Les matériaux composites sont une source constante d'amélioration des performances des structures aéronautiques dans un domaine où le gain de masse peut se traduire directement par une augmentation des performances que ce soit pour les avions civils ou militaires, les hélicoptères, les missiles ou les satellites. Aujourd'hui, sont arrivés à un degré d'utilisation tel qu'il ne serait plus possible de se passer de cette famille de matériaux sur les applications aéronautiques.

L'objectif de ce mémoire consiste à présenter les matériaux composites en générale en mentionnant quelques procédés de fabrication. Les matériaux composites se sont des matériaux hétérogène à de bonne performance. Ils sont couramment les plus utilisés dans plusieurs domaines quotidiennement, car ils ont des propriétés et caractéristiques élevées par rapport à celles des matériaux. Nous avons décrit également certains nombres d'essais qui permettent de caractériser ces matériaux.

Les composites jouent un rôle très intéressant dans la protection et la résistance des matériaux. La corrosion et les chocs qu'ils rencontrent dans l'environnement. Mais cette résistance reste non permanente car ces matériaux peuvent être endommagés au niveau de ses composants : décohésion des matrices et des renforts. Malgré ces lacunes, les composites restent l'un des matériaux les plus utilisés dans différentes applications et de nombreux domaines, tels que l'aviation, l'automobile, Construction, etc. De plus, ils sont disponibles dans le commerce et à peu coûteux à produire.

# **Bibliographie**

## Livres et thèses

1. Access Australia project : The vision becomes a reality, Composites 29 (octobre/novembre 1998) 20–21.
2. Beaufile P., Nouvelles contraintes fonctionnelles sur le bloc avant : les attentes matériaux, SFIP/SIA 0498-11.
3. Buisson G., Évolution des applications thermoplastiques renforcés verre dans l'industrie automobile européenne, 1994.
4. Cherdoud-Chihani A., Mouzali M., Abadie M.J.M., « Study of Crosslinking AMS/DGEBA System by FTIR », Journal of Applied Polymer Science, vol. 69, (1998).
5. EUROPEAN ALLIANCE FOR SMC, SMC/BMC Design for Success,
6. Guillon S., SMC/BMC market in Europe, in : AUK Conference, octobre 1999
7. Gumery X., Bloc avant : évolutions des prestations client, SFIP/SIA 0498-10.
8. Guyot H., Materials evolution prospects in the automotive industry, Ingénieurs de l'automobile (mars 2000).
9. HAQUIN Bénédicte, "Endiguer la dérive du poids", in R et D La route de l'innovation, p 22-25 n° 5 avril 1997
10. Hybrid front end Ford Focus, Kunststoffe 3 (1999).
11. Jean Marie Berthelot, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4ème Edition, Lavoisier 2005.
12. Jean-Marie Berthelot, Matériaux composite 5ème Edition, Comportement mécanique et analyse des structure
13. Laine M.R., Kim S.G., Rush J., Mollan M., Sun H.J., Lodaya M., « Ringopening Polymerization of Epoxy end-terminated Poly (Ethylene Oxide) as a Route to Highly Crosslinked Materials with Exceptional Swelling Behavior (II) », Polymer International, vol. 56, (2007).
14. Laurent Gornet, Généralités sur les matériaux composites, GeM - Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique.
15. Les composites dans l'industrie automobile nord-américaine expérience et évolutions, Composites 35 (septembre/octobre 1999).
16. Liang G., Zuo R., Lu T., Wang J., « Modification of Venyl Ester Resin by a New Thermoset Liquid crystalline Diacrylate », Journal of Materials Science, vol. 40, (2005).
17. Marc Marzano/ Action composite, Pascal celle, DNFA, (Dossier pédagogique, ANFA), 2014

18. Marc Marzano/ Action composite, Pascal celle, DNFA, (Dossier pédagogique, ANFA), 2014
19. Narayanan S., Schadler L.S., « Mechanisms of Kink-band Formation in Graphite/Epoxy Composites : a Micromechanical Experimental Study », Composite Materials and Technology, vol. 59, (1999).
20. Price C.B., Thermoplastic sandwich materials for cost effective lightweight automotive structural panels, Materials for Lean Weight Vehicles (1997)
21. Puglia D., Valentini L., Kenny J.M., « Analysis of the Cure Reaction of Carbon Nanotubes/Epoxy Resin Composites Through Thermal Analysis and Raman Spectroscopy », Journal of Applied Polymer Science, vol. 88, (2003).
22. Résine bismaléimide : résine composée de deux fonctions maléimide  $H_2C_2(CO)_2NH$ .
23. Rudd C.D. et al., Fibres composites for lightweight vehicle structures — Cost effective manufacture, Materials for Lean Weight Vehicles (1997).
24. Thome J.P., Le challenge 71 dBA en bruit extérieur, SFIP/SIA 0498-08, avril 1998.
25. TUBUS BAUER : une grande première, Composites 29 (octobre/novembre 1998).
26. Valentin BIASI, Modélisation thermique de la dégradation d'un matériau composite soumis au feu, INSTITUT SUPERIEUR DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE (ISAE), Université de TOULOUSE, 2014
27. Valersteinas P., Le projet MOSAIC : une entrée en force des composites dans la structure automobile, Composites 8 (mars/avril 1995).
28. Zinck P., Salmon L., Gérard J.F., « Durabilité d'Interfaces Polyépoxyde / Fibre de Verre E au Sein de Microcomposites et de Matériaux Composites Unidirectionnels en Milieu humide », Micromechanical Modeling Polymer, vol 42, (2001).

### Site internet :

1. <http://www.utc.fr/tomas/Themes/Unités/>.
2. <https://solvay.fr>
3. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté\\_Vickers](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté_Vickers)
4. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Matériau\\_composite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Matériau_composite)
5. <https://hal.archives-ouvertes.fr>, consulté le 04-08-2022
6. <https://www.polyvia-formation.fr>.
7. <https://www.1001crash.com/index-page-composite>.