



République algérienne démocratique et populaire  
**UNIVERSITE ABDELHAMID INB BADIS DE MOSTAGANEM**  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

N°D'ORDRE : D..... /2012

**Mémoire**

Présenté par

**Mr. BENAISSA Mohamed**

Pour l'obtention du

**Diplôme de Magister en Génie Mécanique**

Option

**Matériaux et environnement**

**COMPORTEMENT DES MATERIAUX  
COMPOSITES AUX CHOC**

**Soutenu le : 26/02/2012.**

Devant le Jury

Président	Ahmed SADOK	Prof.	Université de Mostaganem
Examineur	Djamel OUINAS	Prof.	Université de Mostaganem
Examineur	Ramdane ZENASSNI	Prof.	Université de Mostaganem
Examineur	Houcine GUECHICHI	M.C.A.	Université de Mostaganem
Encadreur	Ahmed HEBBAR	Prof.	Université de Mostaganem

**ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2011 /2012**

## Remerciements

Le remerciement infini avant tous est à Dieu qui ma donné la patience et la chance de continué mes études.

Je dois d'abord exprimer mes plus profonds remerciements à Monsieur **A.HEBBAR** Professeur à l'université de Mostaganem, directeur de mon mémoire, pour son chaleureux accueil, pour son encadrement et ses conseils scientifiques tout le long de ce travail. Si ce travail a pu être mené à bien, c'est grâce à son aide précieuse et ses encouragements constants.

Nous remercions vivement Monsieur *le Divisionnaire de la Sûreté de la Wilaya de Mostaganem et ses collaborateurs* qui ont bien voulu mettre à notre disposition tous les moyens permettant la réalisation de ce modeste travail.

Nous remercions aussi toute *l'équipe de l'entreprise FIPEXPLAST de Chlef* pour leur aide et soutien, ainsi pour la liberté qui nous a été réservée pour pouvoir réaliser les échantillons étudiés.

Merci également au président du jury Monsieur **A.SADOK** Professeur à l'université de Mostaganem d'avoir accepté d'examiner ce travail et accepté de présider ce jury.

Je tiens à remercier tous les membres de mon jury, Monsieur **Dj.OUINAS** Maitre de conférence ``A`` à l'université de Mostaganem, Monsieur **R.ZENASSNI** Maitre de conférence ``A`` à l'université de Mostaganem et Monsieur **H.GUECHICHI** Maitre de conférence ``A`` à l'université de Mostaganem, qui ont bien voulu expertiser ce travail.

## Résumé

L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement au choc des matériaux composites et plus précisément leurs comportements à l'impact de balles par les méthodes statistiques de planification des expériences. Les matériaux étudiés sont des stratifiés construits d'une matrice polyester, renforcée par des fibres de verres.

Ce mémoire se compose de cinq chapitres. Le premier chapitre présente les matériaux composites, leurs classification, leurs considération d'usage, leurs structures et en fin leurs différentes familles.

Dans le chapitre 2, on a présenté les fibres d'aramides qui sont spécialisés dans la protection balistique, la structure chimique des aramides, les propriétés mécaniques, le mode de fabrication et surtout leurs utilisations.

Dans le chapitre 3, une large définition de l'impact, de l'énergie cinétique et les différentes applications (aéronautique, automobile et militaire), le Gillet pare-balles est notre objectif.

Dans le chapitre 4, une représentation bien définie de la méthode appliquée dans notre travail, il s'agit de la méthode statistique de planification des expériences.

Le chapitre 5 présente les travaux expérimentaux effectués pour l'étude du comportement des matériaux composites à l'impact de balle, la présentation des échantillons, leurs procédés de fabrication, leurs dimensions et les matériaux utilisés pour cette expérimentation. Le déroulement des expériences.

Dans le dernier chapitre, une analyse des résultats est effectuée après l'obtention d'un modèle mathématique.

**Mots clés:** matériaux composites, stratifiés, fibres d'aramides, impact de balles, méthodes statistiques de planification des expériences.

## Abstract

The main objective of this work is to study the impact behavior composite materials and their behavior more precisely the impact of the ball by the method of planning experiments. The studied materials are laminated to build a matrix reinforced with polyester and glass fibers. This thesis consists of five chapters. The memory map is as follows:

The first chapter introduces the materials composites. Their classifications, consideration of their use, their structures and their families.

In chapter 2, we presented the aramid fibers which are specialized in ballistic protection, the chemical structure of aramid, mechanical properties, the manufacturing process and especially their use.

In the chapter 3, a broad definition of impact, kinetic energy and the various applications (aerospace, automobile and military). The Gillet armor is our object.

In the chapter 4, a well defined representation of the method used in our work, the method of planning experiments.

The Chapter 5 presents the experimental work carried out to study the behavior of composite materials to the impact of ball, a presentation of samples, their manufacturing processes, the dimensions and materials used for this experiment. The sequence of experiments.

In the last chapter, an analysis of the results was performed using a mathematical model.

**Keywords:** Composites, laminates, aramid fibers, impact of bullets, statistical methods of planning experiments.



## *Liste des figures*

Figure(I.1) : Classification des matériaux composites .....	5
Figure(I.2) : Eléments constituant d'un matériau .....	9
Figure(I.3) : Principaux matériaux de renfort.....	10
Figure(I.4) : Représentation des fibres de verre.....	11
Figure(I.5) : Représentation des fibres de Carbone.....	12
Figure(I.6) : Représentation des fibres d'aramide.....	13
Figure(I.7) : Tissu multiaxial .....	16
Figure(I.8) : Tissu 3D ou tresse .....	16
Figure(I.9) : Tissu hybride carbone-aramide.....	16
Figure(I.10) : Les différentes familles de matrice.....	17
Figure(I.11) : Variation de la température en fonction du temps.....	19
Figure(I.12) : Représentation d'une monocouche .....	28
Figure(I.13) : Les constituants d'un stratifié.....	28
Figure(I.14) : Représentation des plans d'orientation des monocouches .....	29
Figure(I.15) : Exemple d'un stratifier symétrique .....	29
Figure(I.16) : Les composantes d'un sandwich .....	30
Figure(II.1) : Structure des fibres de Kevlar .....	34
Figure(II.2) : Comportement en flexion des composites unidirectionnels à base de résine époxyde avec différents renforts fibreux (carbone, verre, aramide) .....	35
Figure(II.3) : Absorption d'eau d'une fibre para-aramide en fonction du temps de séjour dans l'air ambiant .....	36
Figure(II.4) : Réaction de polymérisation conduisant aux deux types de polymères aramides (para et méta).....	37

## *Liste des tableaux*

Tableau(I.1) : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts .....	14
Tableau(I.2) : Principales différences entre matrices TP et TD .....	18
Tableau(I.3) : Avant Tableau(I.7) tages et Inconvénients des résines TD .....	19
Tableau(I.4) : Avantages et Inconvénients des résines époxydes.....	20
Tableau(I.5) : Avantages et Inconvénients des Polyuréthannes et polyurées .....	20
Tableau(I.6) : Principales caractéristiques mécaniques des résines TD.....	21
Tableau(I.7) : Principales caractéristiques mécaniques des résines TP.....	22
Tableau(II.1) : propriétés mécaniques des différents grades de kevlar.....	38
Tableau(III.1) : Comparaison de la résistance à l'impact de diverses fibres .....	42
Tableau(III.2) : Caractéristiques du SMC retenu pour le bloc avant.....	44
Tableau(IV.1) : Matrice standard pour un plan de type $3^k$ .....	59
Tableau(V.1) : Propriétés de la matrice polyester utilisée .....	64
Tableau(V.2) : Plan de type $3^1. 2^1$ .....	67
Tableau(V.3) : Résultats des essais pour les plaques avec du tamis en acier.....	68
Tableau(V.4) : Résultats des essais pour les plaques sans tamis .....	68
Tableau(VI.1) : Moyennes des résultats des essais pour les plaques avec du tamis .....	69
Tableau(VI.2) : Résultats acceptables avec les moyennes des essais pour les plaques sans grille de tamis.....	75

## *Notations*

### **Majuscules latines**

$E_c$  : Energie cinétique.

$V$  : Vitesse de projectile.

$X_i$  : La limite des intervalles.

$E$  : Résidu.

$N$  : Nombre d'expériences.

$K$  : Nombre de coefficients.

$X_{iu}$  : Elément de la matrice du plan d'expérience.

$Y_{up}$  : Paramètre d'optimisation.

$S_i^2$  : Variance de sondage.

$S^2_{rep}$  : Variance de reproductibilité.

$S(b_i)$  : Valeur de distribution des coefficients de régression.

$S^2_{rés}$  : Variance résiduelle.

$G_{max}$  : Test de Cochran.

$L$  : Nombre de coefficients significatifs.

$\hat{Y}$  : Valeur de la fonction résiduelle.

$F_{exp}$  : Valeur expérimentale du test de Fisher.

$F_{th}$  : Valeur théorique du test de Fisher.

### **Minuscules latines**

$m$  : Masse du projectile.

$f_i$  : Fréquence relative.

$r$  : Coefficient de corrélation.

$\chi^2_{ep}$  : Le test expérimentale.

# Sommaire

<i>Introduction générale</i> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites</b>	
<i>I.1. Introduction</i> .....	4
<i>I.2. Classification des matériaux composites</i> .....	4
<i>I.3. Considération d'usage des matériaux composites</i> .....	6
a) .....	L
<i>es avantages</i> .....	6
b) .....	L
<i>es inconvénients</i> .....	7
<i>I.4. Structure des composites</i> .....	9
<i>I.4.1. Le renfort (les fibres)</i> .....	10
• .....	L
<i>es fibres de verre</i> .....	11
• .....	L
<i>es fibres de carbone</i> .....	12
• .....	L
<i>es fibres d'aramide</i> .....	13
• .....	L
<i>es fibres de bore</i> .....	13
• .....	L
<i>es fibres de silice</i> .....	13
• .....	L
<i>es fibres de polyéthylène de haut module</i> .....	14
<i>I.4.1.1. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts</i> .....	14
<i>I.4.1.2. Architecture des renforts</i> .....	14
<i>I.4.1.3. Ensimage</i> .....	16
<i>I.4.2. La matrice</i> .....	17
• <i>Les différentes familles de matrices</i> .....	17
<i>I.4.2.1. Les thermodurcissables</i> .....	18

1.4.2.2. Les thermoplastiques .....	21
1.4.3 Les charges .....	23
a) Les charges organiques .....	23
b) Les charges minérales .....	23
c) Oxydes et hydrates métallique.....	25
d) Le verre.....	26
e) Le carbone .....	27
1.4.4. L'interphase.....	27
1.5. Les matériaux composites structuraux.....	28
a) Monocouches .....	28
b) Stratifiés.....	28
c) Sandwichs .....	30
1.6. Les technologies de mise en œuvre.....	30

## **Chapitre II : Les fibres aramides**

II.1. Historique .....	33
II.2. Terminologie et structures chimiques.....	34
II.3. Propriétés des aramides .....	35
II.3.1. Caractéristiques Mécaniques .....	35
II.3.2. Autres caractéristiques .....	36
II.3.3. Avantages et inconvénients .....	36
II.4. Fabrication des fibres d'aramides .....	37
II.5. Les différents types (grades) du Kevlar .....	38
II.6. Utilisation des composites à base de fibres d'aramides.....	39

## **Chapitre III : Comportement à l'impact**

III.1. Généralités.....	41
-------------------------	----

III.1.1. Définition d'un impact.....	41
III.1.2. Energie cinétique.....	41
III.1.3. Mécanisme de dissipation.....	41
III.1.4. Matériaux composites utilisés.....	42
III.2. Applications.....	43
III.2.1. Automobiles.....	43
a) Conditions d'impacts.....	43
b) Le choix des matériaux composites.....	44
c) Comportement aux chocs.....	45
III.2.2. Aéronautiques.....	45
a) Condition d'impact.....	45
b) Crash survivable.....	46
c) Choc à l'oiseau.....	46
III.2.3. Militaires.....	47
a) Impact de balles.....	47
b) Gilet pare-balle.....	48
c) Casque militaire.....	50
Conclusion.....	51

## **Chapitre IV : Les méthodes de planification des expériences**

IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Historique.....	53
IV.3. Objectifs et avantages.....	53
I.V.4. Notion de statistiques.....	54
IV.4.1. Diagramme de distribution.....	54
a) Construction du diagramme de distribution.....	54
b) Ajustement linéaire (droite de régression).....	55
c) Test de conformité.....	56

IV.5. Plans d'expériences.....	56
IV.5.1. Plan d'expérience de premier ordre.....	57
a) Plan d'expériences de type $2^K$ .....	57
b) Plan d'expériences simplifié de type $2^{K-P}$ .....	57
IV.5.2. Plan d'expérience de deuxième ordre.....	58
a) Plan d'expériences de type $3^K$ .....	58
IV.6. Analyse de régression.....	59
• Algorithme de calcul.....	59

### **Chapitre V : Etude expérimentale**

V.1. Introduction.....	62
V.2. Matériaux utilisés.....	62
• Présentation des plaques .....	62
• Fibres utilisées pour la fabrication des échantillons.....	63
• Matrice utilisé .....	63
• Tissus et mat utilisés .....	64
V.3. Préparation des plaques .....	65
V.4. Le choix des paramètres .....	66
V.5. Choix du plan d'expérience.....	66
V.6. Procédure des expériences.....	67

### **Chapitre VI : Résultats et discussions**

VI.1. Analyse de l'équation de régression pour les plaques avec tamis .....	69
VI.2. Analyse de l'équation de régression pour les plaques sans tamis .....	75
Conclusion générale.....	78

### **Références**

## *Introduction générale*

L'utilisation des matériaux composites a connue une large application dans la vie quotidienne. Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels, Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes, etc. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels, sécurité...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

Les matériaux composites sont des matériaux qui présentent la particularité d'avoir un comportement mécanique macroscopique différent de celui de leurs constituants pris individuellement ; à ce propos il est primordial d'étudier le comportement mécanique de ces matériaux afin d'élargir leurs domaines d'utilisation et d'augmenter la durée de vie des pièces par un choix bien précis des constituants, matrice renfort et leur pourcentage d'incorporation.

Les matériaux composites hautes performances à renfort de fibres longues et à matrices polymériques sont utilisés fortement dans l'industrie aéronautique, automobile et militaire. L'un des avantages majeurs des stratifiés composites est la capacité d'orienter les fibres de chaque pli afin d'avoir les propriétés, souvent la résistance et la rigidité, appropriées aux chargements dans les directions prévues.

La résistance au choc est l'une parmi les plus importantes caractéristiques qui obligent les industrielles à choisir les matériaux composites.

En mécanique, un impact peut être défini comme le cas particulier d'un choc d'un projectile sur une surface. Les impacts à fortes énergies entraînent souvent la perforation et semblent donc causer les dégâts les plus graves. Cependant, il ne faut pas négliger les impacts à faible énergie car ceux-ci provoquent des délaminages à l'intérieur des

composites qui peuvent se propager sous sollicitation cyclique. Ce phénomène est insidieux car aucun signe extérieur ne prévient de l'endommagement de la structure composite. Dans le cas d'un impact conduisant à la perforation d'une plaque en composite, on peut assimiler l'effet à celui d'une entaille, c'est-à-dire à une diminution de la résistance mécanique d'environ 50 %.

Les impacts causés par les balles des armes à feu sont des impacts de type « faible masse/très haute vitesse ». Les balles pèsent de 2,6 g (22.LRHV) à 15,55 g (Magnum 44) et sont propulsés à des vitesses de 200 à 900 m.s<sup>-1</sup>.

Les impacts de balles sont aussi caractérisés par une très faible surface d'impact et une grande dureté du projectile vis à vis de la surface impactée. La combinaison de ces deux aspects provoque généralement des dommages de type perforation. Le comportement des composites soumis à des impacts balistiques est bien connu.

L'objectif principal de cette étude est de voir le comportement réel à l'impact de balle des stratifiés construits d'une matrice polyester et renforcée par des fibres de verres.

Ce mémoire se compose de cinq chapitres.

Le premier chapitre présente les matériaux composites, leurs classification, leurs considération d'usage, leurs structures et en fin leurs différentes familles.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté les fibres d'aramides qui sont spécialisés dans la protection balistique, la structure chimique des aramides, les propriétés mécaniques, le mode de fabrication et surtout leurs utilisations.

Dans le chapitre 3, une large définition de l'impact, de l'énergie cinétique et les différentes applications (aéronautique, automobile et militaire), le Gillet pare-balles est notre objectif.

Connaitre tout les détails sur l'élaboration d'un produit nous permet de prévoir son évolution au court du temps en fonction des paramètres influents qu'ils soient internes ou externes. Or ces paramètres sont généralement nombreux et difficilement modélisables par les méthodes classiques de la physique. Le concepteur a donc besoin d'une méthode «Expérimentale, peu couteuse en expérience», qui lui permettra de mesurer et de connaitre l'influence de tout les paramètres et d'en déduire les plus influents.

Dans le chapitre suivant une représentation bien définit de la méthode utilisée dans notre travail, c'est la méthode de planification des expériences.

Le chapitre 5 présente les travaux expérimentales effectués pour l'étude du comportement des matériaux composites à l'impact de balle, la présentation des échantillons, leurs procédés de fabrication, leurs dimensions et les matériaux utilisés pour cette expérimentation ainsi que le déroulement des expériences.

Dans le dernier chapitre, une représentation des résultats avec une analyse effectuée à l'aide d'un modèle mathématique.

A la fin de ce mémoire on termine avec une conclusion qui résume les résultats obtenus à partir de cette étude.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur les Matériaux Composites*

### ***I. 1. Introduction***

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les **renforts** qui sont noyés dans une **matrice** dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces [1].

Les matériaux ainsi obtenus sont très *hétérogènes* et *anisotropes*.

Il faut différencier *charges* et *renforts*. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés [1].

### ***I.2. Classification des matériaux composites***

La classification des composites peut être effectuée selon diverses façons. Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts, Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes (*Figure I.1*):

#### **• Composites à renforts de particules:**

Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.

#### **• Composites à renforts de paillettes:**

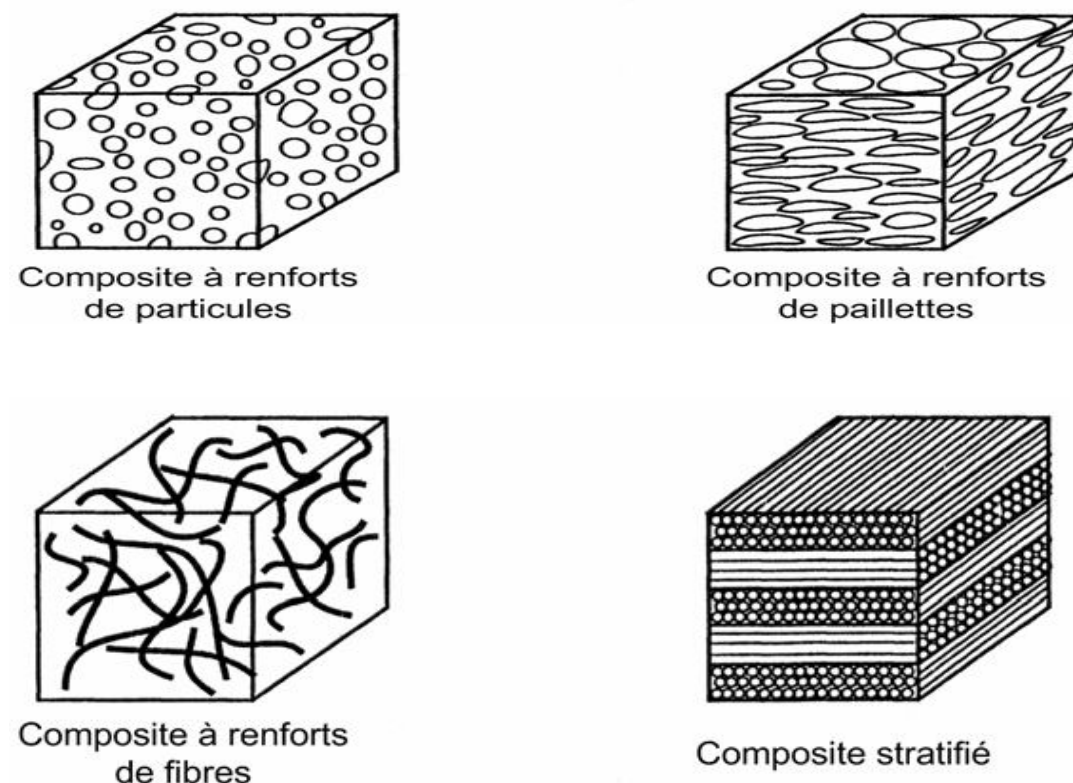
Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.

- **Composites à renforts de fibres:**

Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts : en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues).

- **Composites stratifiés:**

Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification.



*Figure(I.1) : Classification des matériaux composites [2]*

## Chapitre I Généralités sur les Matériaux Composites

---

Les matériaux composites peuvent également être classés par la nature de la matrice comme suit :

- ***Composites à matrice polymérique:***

Les polymères sont caractérisés par une faible densité, une résistance mécanique relativement faible, et une grande déformation à rupture. Les avantages principaux sont le procédé de fabrication relativement mature et le poids faible. Ce type de composites a été développé surtout pour les applications aéronautiques où la réduction de poids est essentielle.

- ***Composites à matrice métallique:***

Dans ces composites, des matériaux métallique comme l'aluminium et le titane sont renforcés par des renforts généralement non-métalliques, souvent des céramiques. De par la nature même du composite, les composites à matrice métallique ont des propriétés mécaniques meilleures ou plus adaptables au chargement que leurs matrices monolithiques. Leurs applications dans les moteurs d'automobile sont bien établies.

- ***Composites à matrice céramique:***

Des matrices céramiques telles que le verre et le carbure de silicium (SiC) peuvent être associées aux renforts comme des métaux, le carbone, et des céramiques. Leur développement a pour but d'améliorer les propriétés mécaniques telles que ténacité et résistance au choc thermique des céramiques monolithiques. Ces composites sont utilisés dans des environnements sévères, par exemple les moteurs de fusées, les boucliers thermiques, ou les turbines à gaz [2].

### ***1.3. Considérations d'usage des matériaux composites :***

Dans la conception des produits, il est essentiel d'évaluer et comparer les composites avec les matériaux conventionnels pour bien choisir les matériaux. Les avantages et les inconvénients principaux des matériaux composites sont présentés ci-dessous.

- a) **Les avantages :**

Les avantages les plus cités des matériaux composites incluent :

- ***Propriétés mécaniques adaptables :***

## Chapitre I Généralités sur les Matériaux Composites

---

Un stratifié composite fibreux est un empilement des plis élémentaires qui se comportent ensemble comme un élément structural. Un pli élémentaire est anisotrope, ou orthotrope dans la plupart des cas, avec la résistance et la rigidité dans la direction des fibres beaucoup plus élevées que dans d'autres directions. Il faut alors associer différentes orientations de fibres afin d'obtenir un stratifié capable de résister à diverses sollicitations.

Un avantage principal du stratifié composite est que les plis élémentaires peuvent être orientés de telle façon que la résistance dans une direction donnée corresponde aux chargements prévus. La part de matériau dans des directions non-sollicitées est donc minimisée. La stratification permet également aux ingénieurs de concevoir des structures avec des comportements désirés. Par exemple, les ailes du Grumman X-29, l'avion expérimental à voilure en flèche inversée, peuvent fléchir dans certaines directions et ne peuvent pas se déformer en torsion. Ces comportements, rendus possibles par sa structure en composite, éliminent la divergence structurale (déformation inadmissible ou désintégration des ailes en vol) de l'avion [3].

- ***Haute résistance et haut module :***

Les propriétés mécaniques élevées, notamment la résistance et le module, des matériaux composites haute performances permettent de répondre aux exigences de l'industrie aéronautique. D'autres industries en profitent également, par exemple la vitesse d'une balle de tennis est plus élevée avec des raquettes en carbone/époxy.

- ***Poids :***

Les matériaux composites hauts performances ont une densité de l'ordre de 1,6 contre 2,7 pour les alliages d'aluminium.

- ***Production :***

Les matériaux composites permettent de simplifier l'assemblage de la structure, ce qui compense partiellement leur prix élevé. La réduction du nombre de pièces par rapport aux matériaux conventionnels peut être substantielle.

- ***Maintenance :***

Les composites ont besoin de moins d'entretien que les alliages métalliques. D'une part, ils ne sont pas sensibles à la corrosion. D'autre part, la tenue en fatigue est très bonne.

### ***b) Les inconvénients :***

Bien que les avantages des matériaux composites soient impressionnants, ces matériaux ne sont pas une solution miracle pour toutes les applications. Des inconvénients ou des problèmes existent et peuvent empêcher leur usage. Les inconvénients les plus courants sont les suivants :

- **Coût :**

Les matériaux composites hauts performances ont été développés principalement pour répondre aux besoins de la communauté aérospatiale où le coût élevé peut être toléré en échange de matériaux plus performants. Par conséquent, le transfert de la technologie des composites aux produits de grande consommation est lent, à quelques exceptions comme les équipements de sports où la performance prime également sur le coût.

- **Conception et analyse**

Les matériaux composites sont souvent à la fois hétérogènes et anisotropes. Ces deux caractéristiques sont différentes des celles de la plupart des matériaux conventionnels. Elles nécessitent de nouvelles approches, généralement plus compliquées, pour la conception et l'analyse des structures.

L'hétérogénéité impose l'analyse selon au moins deux points de vue. La micromécanique examine l'interaction des constituants à l'échelle microscopique. La macro-mécanique suppose que le composite est homogène et s'intéresse aux propriétés apparentes du matériau.

Les matériaux anisotropes nécessitent plus de propriétés mécaniques que les matériaux isotropes pour établir les relations contrainte-déformation (les lois de comportement). Ces propriétés sont déterminées selon les directions principales du pli élémentaire (directions parallèle et perpendiculaire à l'orientation des fibres).

Pour les stratifiés composites, les rigidités sont déterminées à l'aide de la théorie classique des stratifiés. La rupture des stratifiés composites se produit de plusieurs façons très complexes. Il est donc difficile d'établir une théorie de résistance qui tienne compte de tous les modes de rupture et de leurs interactions. Par conséquent, la détermination des résistances est plus compliquée et nécessite des vérifications expérimentales [3]. De plus, la résistance d'un stratifié peut être influencée par les contraintes interlaminaires au voisinage des bords libres. La séquence d'empilement du stratifié doit être soigneusement déterminée afin de minimiser ces contraintes.

- **Assemblage :**

Les matériaux composites sont généralement plus fragiles que les matériaux métalliques conventionnels. Par conséquent, la redistribution des contraintes autour des sites de concentration telle que le trou est moins efficace. La résistance et la rigidité d'un stratifié ne peuvent pas toujours être entièrement transférés par un joint. Le trou est donc souvent renforcé par des inserts métalliques ou par l'augmentation de l'épaisseur du stratifié dans la partie trouée. De tels renforcements entraînent du poids supplémentaire pour la structure. Le problème d'assemblage est donc critique pour le succès de l'emploi des matériaux composites.

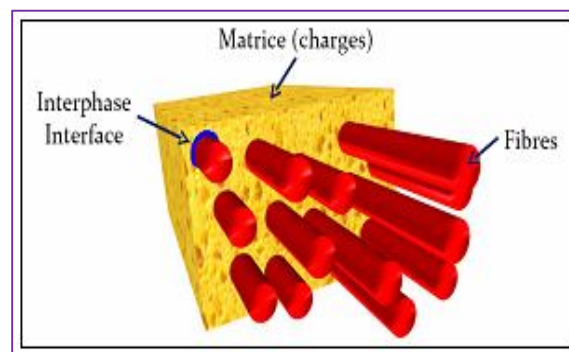
- **Tolérance aux dommages :**

Un des points faibles les plus importants des matériaux composites est la tolérance aux dommages. Des dommages de diverses natures peuvent se produire dans la vie d'une structure, par exemple l'impact, soit en service ou pendant la maintenance, est inévitable. En règle générale, plus un matériau est ductile, plus il est capable de tolérer l'impact car la ductilité fournit la capacité d'absorber de l'énergie. Par conséquent, les structures métalliques ont tendance de se déformer plutôt que de se fracturer sous l'impact. Le caractère fragile des matériaux composites ne permet pas, par contre, de subir l'impact sans avoir d'endommagement [3].

Les dommages sont souvent des fissurations internes de la matrice, indétectables sur la surface de la structure. Ce type de dommages diminue considérablement la résistance en compression de la pièce endommagée. Les dommages des fibres diminuent la résistance en compression ainsi qu'en traction. Les outils pour évaluer la tolérance aux dommages des structures sont le programme d'inspection, l'analyse de la résistance résiduelle, et l'analyse de la propagation des dommages.

### ***I.4. Structure des composites :***

Un matériau composite est composé d'une matrice et un renfort généralement des fibres. La matrice est elle-même composée d'une résine (polyester, époxyde...etc.) et dont le but est d'améliorer ces caractéristiques tout en diminuant le coût de production.



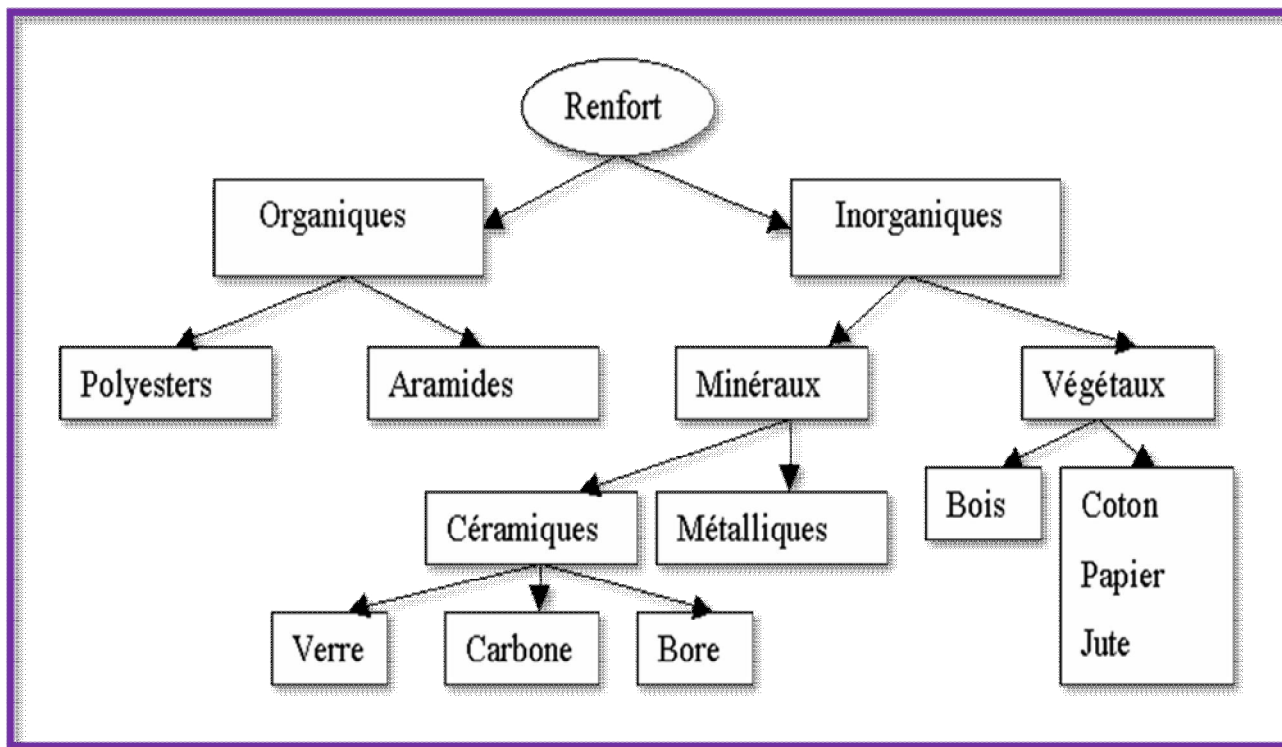
**Figure(I.2) : Eléments constituant d'un matériau [4]**

1.4.1. Le renfort (les fibres) :

Une fibre est une forme de matière extraordinaire possédant une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevés que ceux du même matériau sous forme massive. Sous la forme d'un filament fin, les propriétés d'un matériau sont beaucoup plus proches des valeurs théoriquement possibles que tout autre forme de matière, surtout en résistance de la rupture. En effet, la résistance à la rupture d'un matériau n'est pas une propriété intrinsèque mais dépend des défauts présents à la surface ou dans le volume du matériau, qui engendrent des concentrations de contrainte [5].

Les fibres de renforcement des matériaux composites modernes ont deux origines :

- **Minérale :** Fibres de verre  
Fibres de carbone  
Fibres de bore  
Fibres céramiques (alumine, carbure de silicium)
- **Organique :** Fibres d'aramide [6]



Figure(I.3) : Principaux matériaux de renfort [7]



### ➤ *Les Fibres de verre :*

Elle constitue actuellement le renfort le plus utilisé dans la réalisation des composites essentiel des composites. Composée essentiellement de silice associée à divers oxydes (alumine, alcalins, alcalineux-terreux), le verre textile est obtenu par fusion directe du mélange des matières premières à travers une filière en platine, suivie d'un étirage.

***Figure (I.4) : Représentation des fibres de verre [1]***

On distingue trois principaux types de fibres :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

Le verre E, le plus employé, constitue l'essentiel des applications des composites de grande diffusion.

Le verre textile est disponible sous des présentations très variées :

- Fibres broyées
  - Fibres coupées
  - Fibres continues (roving, stratifils)
  - Mats (de fibres coupées ou continues)
  - Tissus (croisés, unidirectionnels).
- 
- ***Caractéristiques distinctives***
  - Excellente adhérence, grâce aux ensimages appropriés, à la plus part des matrices organiques
  - Bonnes propriétés diélectriques
  - Rapport caractéristiques mécaniques/prix très intéressant.

### ➤ *Les Fibres de carbone*

L'essentiel de la production des fibres de carbone est obtenu à partir d'une fibre « précurseur » Polyacrylonitrile (PAN).

En jouant sur les paramètres de fabrication et, en particulier, sur les températures de mise en œuvre (carbonisation [1.100°C] ou graphitisation [2.500°C]), on obtient deux types de fibres [6] :



*Figure(I.5):Représentation des fibres de Carbone*

[1]

- **Fibres haute résistance (HR)** : pour une combustion de 1000 à 1500 °C, (2.500 à 3.000 Mpa)
- **Fibres haut module (HM)** : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C, (400.000 Mpa)

Les fibres de carbone sont disponibles sous diverses formes :

- Mèches regroupant de 3.000 à 12.000 filaments
- Fibres coupées de quelques millimètres de longueurs
- Rubans et tissus unis ou multidirectionnels.

#### • *Caractéristiques distinctives*

Les fibres de carbone se distinguent par des caractéristiques spécifiques élevées.

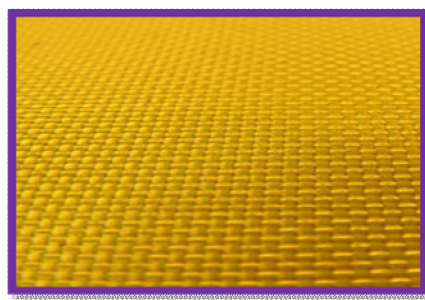
Les fibres HM, en particulier, ont un module spécifique 70 fois supérieur à ceux des alliages d'aluminium.

Elles présentent également un coefficient de dilatation très faible permettant une grande stabilité dimensionnelle des structures et une conductibilité thermique élevée.

Les principaux inconvénients sont la résistance limitée aux chocs et les différences de potentiel engendré au contact des métaux peuvent favoriser des corrosions de type galvaniques.

### ➤ *Les Fibres d'aramide*

Les fibres d'aramide sont obtenues par filage de polyamides aromatiques du type polytéraphalate de p. phényllène diamine.



*Figure (I.6) : Représentation des fibres d'aramide* [1]

Selon le procédé de fabrication, on distingue deux types de fibres :

- les fibres *bas module* :  $E = 70\,000\text{ Mpa}$ , utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- les fibres *hauts module* :  $E = 130\,000\text{ Mpa}$ , employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

Elles sont disponibles commercialement sous forme de :

- mèches
- rubans et tissus divers.
- *Caractéristiques distinctives* :

Ces fibres se caractérisent par une très grande résistance en traction spécifique.

En contre partie, leur comportement en compression est faible et leur adhérence médiocre avec certains matrices (thermoplastiques en particulier).

### ➤ *Les Fibres de bore*

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

### ➤ *Les Fibre de silice (ou de quartz)*

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

### ➤ *Les Fibres de polyéthylène de haut module*

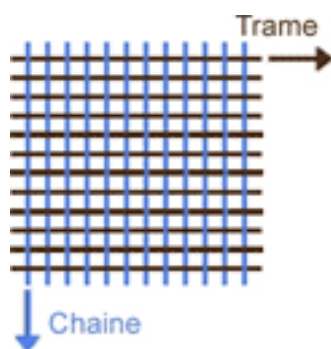
Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicités, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

**I.4.1.1. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts**

Renforts	Diamètre du filament ( $\mu\text{m}$ )	Masse volumique ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $\cdot\text{C}^{-1}$
	<i>d</i>	<i>Mv</i>	<i>E</i>	<i>G</i>	<i>K</i>	<i>Cr</i>	<i>A</i>	<i>a</i>
<i>Verre E</i>	16	26 000	47 000	30 000	0,25	2 500	3,5	$0,5 \cdot 10^{-3}$
<i>Verre R</i>	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	$0,3 \cdot 10^{-3}$
<i>Carbone HM</i>	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	$0,08 \cdot 10^{-3}$
<i>Carbone HR</i>	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	$0,02 \cdot 10^{-3}$
<i>Kevlar</i>	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	$-0,2 \cdot 10^{-3}$
<i>Bore</i>	100	2 600	400 000			3 400	0,8	$0,4 \cdot 10^{-3}$
<i>Silicate d'alumine</i>	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
<i>Polyéthylène</i>		9 600	200 000			3 000		

**Tableau(I.1) : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts [1]**

**I.4.1.2. Architecture des renforts**



Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

## Chapitre I Généralités sur les Matériaux Composites

---

Il existe différentes géométries et textures de renforts :

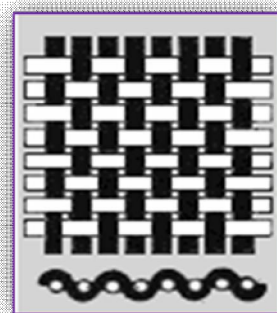
- **Les unidirectionnels (UD) :**

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

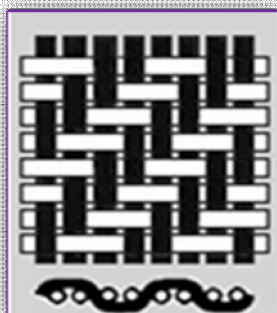
- ❖ **Toile ou taffetas :**

Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous de chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.



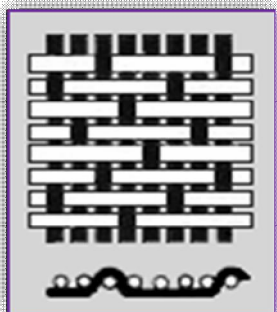
- ❖ **Serge :**

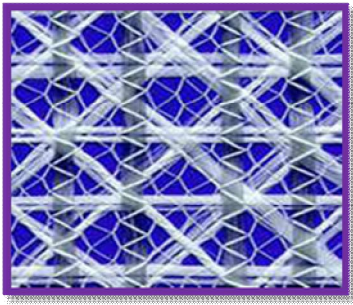
Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.



- ❖ **Satin :**

Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.



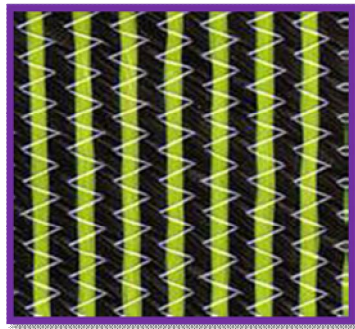


**Figure (I.7) : Tissu multiaxial**



**Figure(I.8): Tissu 3D ou tresse**

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes.



**Figure (I.9) : Tissu hybride carbone – aramide**

### **I.4.1.3. Ensimage**

Les renforts destinées à la fabrication des composites reçoivent un ensimage. L'ensimage est une dispersion aqueuse spécifique comportant un agent collant, un agent pontant et des agents antistatiques, permettant d'assurer différents rôles :

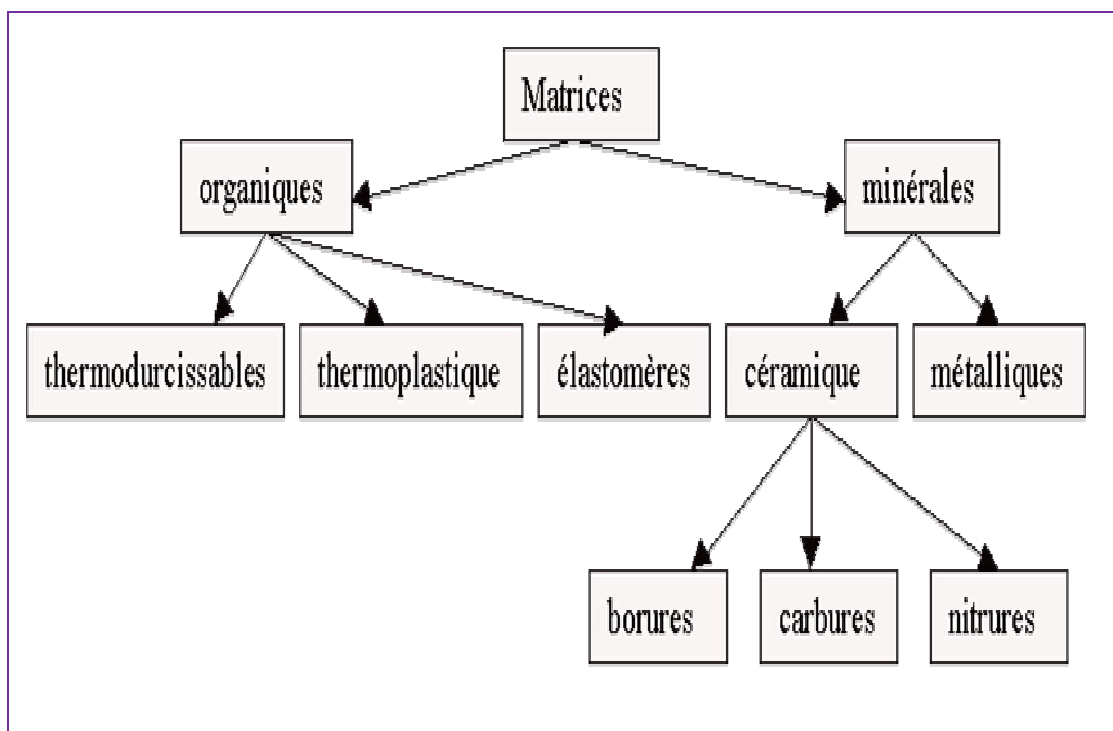
- de la liaison fibre - matrice ;
- cohésion inter filamentaire (raideur du fil) pour qu'il soit manipulable ;
- protection contre l'abrasion générée par la mise en œuvre (frottement contre pièces métalliques) ;
- élimination des charges électrostatiques dues aux frottements ;
- augmentation du mouillage de la fibre au cours de l'imprégnation.

L'ensimage est spécifique pour une résine et un procédé donné.

### I.4.2. La matrice :

Les matrices ont essentiellement pour rôle de transférer les contraintes apportées sur le matériau aux fibres, de les protéger contre les agressions extérieures et donnent la forme du matériau. Elles doivent être en outre assez déformable et présenter une certaine compatibilité avec le renfort. Ainsi, pour pouvoir apporter aux matériaux composites des propriétés mécaniques élevées, les résines doivent posséder des masses volumiques faibles. Il existe plusieurs types de résines classées en deux grandes familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Une nouvelle classe de résines, ayant les propriétés des deux précédentes familles, a vu le jour, il s'agit des thermostables. Les résines bismaléimides (classe 200°C) et les résines polyimides (classe 300°C) utilisées dans les industries aérospatiales en font partie.

- Les différentes familles de matrice



**Figure(I.10) : Les différentes familles de matrice [7]**

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.
- La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se ponte (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

<i>Matrices</i>	<i>Thermoplastiques TP</i>	<i>Thermodurcissables TD</i>
<i>Etat de base</i>	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
<i>Stockage</i>	illimité	réduit
<i>Mouillabilité renforts</i>	difficile	aisée
<i>Moulage</i>	chauffage + refroidissement	chauffage continu
<i>Cycle</i>	court	long
<i>Tenue au choc</i>	assez bonne	limitée
<i>Tenue thermique</i>	réduite	bonne
<i>Chutes et déchets</i>	recyclables	perdus ou recyclés en charges
<i>Conditions de travail</i>	propreté	émanation pour "méthode humide"

*Tableau(I.2) : Principales différences entre matrices TP et TD*

### **1.4.2.1. Les thermodurcissables**

Les thermodurcissables sont des polymères qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport aux thermoplastiques. On retrouve dans cette famille les polyesters insaturés (vinyle ester, les dérivés allyliques, les polyesters condensés, etc.), les résines époxydes, les résines de condensation (les phénoliques, les aminoplastes, les furaniques, etc.).

- **Polyesters insaturés** : C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution.

Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique

## Chapitre I Généralités sur les Matériaux Composites

et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante.

Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale.

La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique.

*I* mise en œuvre et déballage

*II* moulage

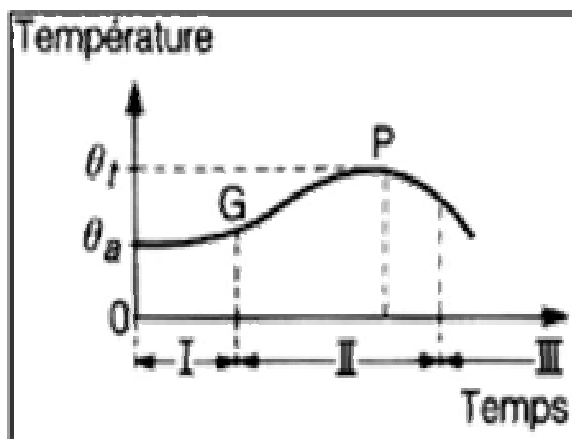
*III* démoulage et post cuisson

$\theta_a$  température ambiante

$\theta_i$  température du pic exothermique

*G* point de gel

*P* pic exothermique



**Figure(I.11) :** Variation de la température en fonction du temps

[1]

Il existe différents types de résines :

- Orthophtalique : la plus courante ;
- Isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité ;
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

## Chapitre I Généralités sur les Matériaux Composites

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Bonne accroche sur fibres de verre Translucidité Bonne résistance chimique Mise en œuvre facile Tenue en température (> 150 °C) Prix réduit	Inflammabilité (sauf résines chlorées) Tenue vapeur et eau bouillante Retrait important (6 à 15 %) Durée de conservation en pot limitée Emission de styrène

***Tableau(I.3) : Avantages et Inconvénients des résines TD***

- **Vinylesters** : On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.
- **Phénoliques** : Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.
- **Epoxydes** : Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction :
  - du durcissement à chaud ou à froid ;
  - de la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200

Avantages	Inconvénients
Tenue mécanique, thermique, chimique et fatigue Faible retrait (1 à 2 %) Excellente adhérence sur fibres Auto-extinguibilité Mise en oeuvre facile, sans solvant	Prix élevé Sensibilité à l'humidité et aux UV Vieillessement sous température Sensibilité aux chocs Temps de polymérisation

***Tableau(I.4) : Avantages et Inconvénients des résines époxydes***

## Chapitre I Généralités sur les Matériaux Composites

- **Polyuréthanes et polyuréés** : Dans la fabrication de pièces composites, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les constituants sont livrés à l'état de prépolymères liquides :
  - \* Polyols + polyisocyanates = polyuréthanes ;
  - \* Polyéthers + polyamines = polyuréés.

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Facilité de moulage in situ Tenue chimique Vieillessement	Résistance mécanique réduite Combustibilité Coloration en masse difficile : foncée

**Tableau(I.5) : Avantages et Inconvénients des Polyuréthanes et polyuréés**

- **Polyimides** : Ces résines sont surtout utilisées dans les composites HP, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures (> 250 °C). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre.
- **Bismaléimides** : Matrices très peu utilisées en Europe. Elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et en température, mais restent difficiles à mettre en œuvre

<i>Matrice TD</i>	<i>Masse volumique (kg.m-3)</i>	<i>Module d'élasticité longitudinal (MPa)</i>	<i>Module de cisaillement (MPa)</i>	<i>Coefficient de Poisson</i>	<i>Contrainte de rupture (traction) MPa</i>	<i>Allongement à rupture %</i>	<i>Coefficient de dilatation thermique °C<sup>-1</sup></i>
	Mv	E	G	k	Cr	A	α
<i>Epoxyde</i>	1 200	4 500	1 600	0,4	130	2	11*10 <sup>-5</sup>
<i>Phénolique</i>	1 300	3 000	1 100	0,4	70	2,5	1*10
<i>Polyester</i>	1 200	4 000	1 400	0,4	80	2,5	8*10 <sup>-5</sup>
<i>Polycarbonate</i>	1 200	2 400		0,35	60		6*10 <sup>-5</sup>
<i>Vinylester</i>	1 150	3 300			75	4	5*10 <sup>-5</sup>

## Chapitre I Généralités sur les Matériaux Composites

<i>silicone</i>	1 100	2 200		0,5	35		
<i>Uréthanne</i>	1 100	700 à 7 000			30	100	
<i>Polyimide</i>	1 400	4 000 à 19 000	1 100	0.35	70	1	$8 \cdot 10^{-5}$

**Tableau(I.6) : Principales caractéristiques mécaniques des résines TD [1]**

### 1.4.2.2. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des chaînes polymères reliées entre elles par de faibles liaisons. Ils sont recyclables et possèdent au moins un solvant. Les thermoplastiques représentent le plus grand tonnage en termes de production à cause de leur facilité de mise en œuvre et des faibles coûts. Ce sont principalement les plastiques traditionnels (le polychlorure de vinyle PVC, le polyéthylène PE, le polypropylène PP, le polyamide PA, les polycarbonates PC, etc.). Leur recyclabilité et leur thermo réversibilité constituent des avantages très importants.

Il existe aussi des thermoplastiques à usage spécifique qui peuvent résister à des températures de l'ordre de 200°C.

Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à 100 °C, hors POM) sont les suivantes :

- Polyamide (PA) : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures
- Polytéréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité ;
- Polycarbonate (PC) : tenue au choc ;
- Polysulfure de phénylène (PPS) : résistance à l'hydrolyse ;
- Polyoxyméthylène (POM) : bonne tenue à la fatigue ;
- Polysulfurés (PSU et PPS) : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud ;
- Polypropylène (PP) : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants :

- Polyamide-imide (PAI) ;
- Polyéther-imide (PEI) ;
- Polyéther-sulfone (PES) ;

- Polyéther-éther-cétone (PEEK) ;

<i>Matrices TP</i>	<i>Masse volumique (kg.m-3)</i>	<i>Module d'élasticité longitudinal (Mpa)</i>	<i>Module de cisaillement (Mpa)</i>	<i>Coefficient de Poisson</i>	<i>Contrainte de rupture (traction) MPa</i>	<i>Allongement à rupture %</i>	<i>Coefficient de dilatation thermique °C<sup>-1</sup></i>
	<i>Mv</i>	<i>E</i>	<i>G</i>	<i>k</i>	<i>Cr</i>	<i>A</i>	<i>a</i>
<b>PP</b>	900	1 200		0,4	30	20 à 400	9*10 <sup>-5</sup>
<b>PPS</b>	1 300	4 000			65	100	5*10 <sup>-5</sup>
<b>PA</b>	1 100	2 000		0,35	70	200	8*10 <sup>-5</sup>
<b>PES</b>	1 350	3 000			85	60	6*10 <sup>-5</sup>
<b>PEI</b>	1 150	3 300			105	60	6*10 <sup>-5</sup>
<b>PEEK</b>	1 300	4 000			90	50	5*10 <sup>-5</sup>

*Tableau (I.7) : Principales caractéristiques mécaniques des résines TP [1]*

### **I.4.3. Les charges :**

On désigne sous le nom général de **charge** toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de 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 variée, à des taux souvent élevés pouvant atteindre compatibilité 60 % en masse.

Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Faible Compatibilité avec la résine de base ;
- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient.

### a) Les charges organiques

- Charges cellulosiques, utilisées en tant que **charges des résines thermodurcissables** (phénoplastes et aminoplastes).

Les avantages de ces matières cellulosiques sont leur coût peu élevé et leur faible densité.

- Farines de bois
- Farines d'écorces de fruit et de noyaux
- Fibres végétales
- Pâtes de cellulose
- Amidons

### b) Les charges minérales

#### • *Craies et carbonates*

La **craie** ou *blanc de Champagne* peut contenir jusqu'à 99 % de calcite, de la silice et d'autres corps minéraux. La taille moyenne de ses particules varie de 1 à 3  $\mu\text{m}$ .

Le **calcaire** et le **marbre** contiennent 80 à 90 % de calcite et des quantités variables d'oxyde de magnésium et de silice. La taille des particules est comprise entre 0,5 et 30  $\mu\text{m}$ .

Le **carbonate de calcium-magnésium** ( $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ ) est préparé à partir des minerais de dolomite. On l'utilise comme charge et aussi comme retardateur de flamme, ajouté à du trioxyde d'antimoine.

Le **carbonate de calcium précipité** est un mélange pratiquement pur à 99,00 % de calcite et d'aragonite, obtenu sous forme de particules très fines (0,05 à 16  $\mu\text{m}$ ).

Il est surtout utilisé avec le **PVC** et dans les **matières thermodurcissables** (SMC, BMC) ainsi que les **polyuréthanes** (RIM) en raison de son caractère **hydrophobe**.

#### • *Les silices*

La **silice** ( $\text{SiO}_2$ ), à l'état pur ou combinée avec des oxydes métalliques, est utilisée comme charge sous différentes formes, suivant son origine, sa cristallinité, sa dureté et la taille des particules. Son incorporation dans la résine améliore les propriétés diélectriques, la résistance à la chaleur et à l'humidité des objets moulés, par exemple ceux en poly(méthacrylate de méthyle).

## Chapitre I Généralités sur les Matériaux Composites

---

On constate également l'augmentation de la température de transition vitreuse, du module d'Young et de la résistance en compression, ainsi que la réduction du gonflement dans les solvants.

- **Les talcs**

Les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage.

Le talc est la charge la plus utilisée dans les thermoplastiques. Il leur confère une meilleure résistance au fluage ainsi qu'une plus grande rigidité. Notons également que l'introduction de talc facilite l'usinage des produits finis.

- **La wollastonite**

Cette charge se présente sous différentes formes : aiguilles, granulés, fibres.

Elle est surtout utilisée dans les polyamides, les ABS et les polysulfones, également en remplacement des fibres de verre dans les SMC et les BMC. Elle améliore en particulier la résistance au rayonnement ultraviolet et à l'hydrolyse. Elle est aussi employée dans les résines époxydes pour assurer une bonne stabilité dimensionnelle ainsi que l'isolation thermique et électrique, et permet un contrôle du retrait au moulage.

- **Les argiles et alumino-silicates**

Ces substances minérales sont en grande partie constituées par de la **silice** (42 à 70 %) et de l'**alumine** (14 à 45 %).

\* **Le kaolin** contribue à une meilleure résistance chimique et électrique, et diminue l'absorption d'eau. On peut l'ajouter à des taux atteignant 60 % dans les compositions à base d'esters polyvinyliques, mais habituellement les poudres à mouler en contiennent de 20 à 45 %.

Le kaolin calciné est utilisé dans les mélanges pour l'isolation de câbles et dans les isolants.

Mélangé à de l'alumine et de la silice, le kaolin calciné est utilisé pour assurer la résistance aux acides.

\* **La vermiculite** est utilisée comme charge de faible densité (2,4) dans les plastiques renforcés de fibres de verre.

\* *Le mica* augmente la stabilité dimensionnelle des pièces moulées ; il améliore les propriétés électriques et thermiques, la résistance aux acides et aux bases, et diminue la reprise d'eau.

Comparé aux fibres de verre, il confère une moins bonne résistance aux chocs ; mélangé avec celles-ci, il permet une réduction des coûts.

### c) Oxydes et hydrates métalliques

- *Poudres et microsphères*

L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium, de titane et d'antimoine sont utilisés sous forme de **poudres fines** comme charges du polypropylène, des compositions polyvinyliques, des résines époxydes, des polyesters insaturés. Tous permettent de diminuer le prix de revient et d'augmenter la densité de la matière élastique.

L'oxyde de béryllium est utilisé sous forme de **microsphères**, qui sont des microsphères de densité voisine de 0,003 et d'un diamètre de l'ordre de 40  $\mu\text{m}$ .

- *Alumine et trihydrate d'aluminium*

On obtient l'**alumine** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), anhydre ou hydratée, à partir de la bauxite. Cette charge apporte aux résines une meilleure résistivité électrique ainsi qu'une bonne conductivité thermique ; elle diminue le coefficient de dilatation thermique linéique, augmente la rigidité ainsi que la résistance à l'abrasion et au feu.

**L'hydrate d'aluminium**  $\text{Al}(\text{OH})_3$  est une charge ignifugeante qui, du point de vue du prix, est concurrentielle ; elle réduit l'inflammabilité ainsi que l'émission des fumées de combustion car elle se décompose de façon endothermique (effet de refroidissement) en alumine et en eau, aux températures supérieures à 220  $^\circ\text{C}$ .

- *Trioxyde d'antimoine*

On chauffe de l'antimoine dans l'air pour obtenir  $\text{Sb}_2\text{O}_4$  qui donne  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  par fusion et décomposition. Sa densité est de 4,2 et sa dureté Mohs comprise entre 6 et 7. Il apporte aux résines ignifugation et coloration blanche et on l'utilise en particulier dans les **PVC** plastifiés.

- *Oxyde de beryllium*

Utilisé sous forme de microsphères dans les résines époxydes, il augmente les conductivités électrique et thermique. Ces carbosphères sont aussi utilisées dans les mousses structurelles (PUR) à densité contrôlée, ainsi que pour la fabrication de pièces polyesters ultralégères.

- *Les céramiques*

Il existe des microsphères en céramique dont la densité varie entre 0,4 et 2,4 et les dimensions de 1 à 3 000  $\mu\text{m}$ . Une microsphère de 70  $\mu\text{m}$  comportant un revêtement permettant une meilleure dispersion a été mise au point. Conseillée dans les résines polyesters en combinaison avec  $\text{CaCO}_3$ , elle apporte une réduction de masse de 15 à 25 % avec une amélioration des résistances à la compression et au choc.

### d) Le verre

- *Poudres de verre*

Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie 13  $\mu\text{m}$  est apparue sur le marché et son incorporation confère aux thermodurcissables de meilleures résistances à l'abrasion et à la compression ; elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces moulées.

- *Billes de verres creuses*

Les billes de verre creuses, de densité comprise entre 0,1 et 0,5, sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent gonflant. Elles améliorent les résistances à l'eau et au vieillissement du PMMA, et diminuent la friabilité des pièces phénoliques.

Les densités de ces microsphères creuses du type borosilicate de sodium et de calcium sont comprises entre 0,38 et 0,45 ; parallèlement, leur résistance à la compression varie de 1,7 à 31 MPa. Les applications sont nombreuses (bâtiment, automobile et aéronautique).

- *Microsphères de verre*

L'utilisation de microsphères de verre permet de réduire de 25 à 35 % la masse des pièces obtenues soit à partir de BMC ou de SMC destinées en particulier à l'industrie automobile, soit également à partir de résines phénoliques pour l'industrie aéronautique. On utilise par ailleurs ce type de charge, dans le cas du PPO modifié, pour la réalisation des capotages de

machines de bureau. Elle permet la réduction du temps de cycle de moulage de 20 à 30 %. Il en est de même dans le cas du moulage des mousses structurales en polyuréthanes.

### e) Le carbone

- *Le noir de carbone*

Le noir de carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques, à la fois comme colorant, pigment, barrière anti-UV, antioxydant.

Le noir de carbone améliore la résistance à la chaleur du polyéthylène réticulé par irradiation et celle du PVC. La conductivité thermique augmente avec le taux de charges, indépendamment de la taille des particules. Par contre, la conductivité électrique des matériaux chargés augmente avec le taux de carbone et avec la finesse des particules

### ***1.4.4. L'interface***

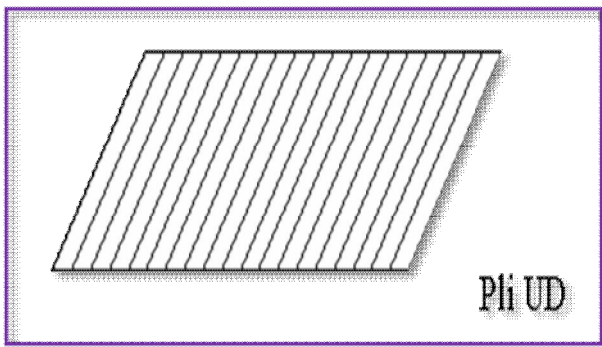
La nature de l'adhésion fibre/matrice inclut le verrouillage mécanique, l'attraction électrostatique, l'enchevêtrement moléculaire, et la réaction chimique.

L'interphase est constituée de la surface de contact (interface) fibre/matrice ainsi que de la région d'un volume fini prolongée dans la matrice. Elle peut être considérée comme un constituant du composite car elle possède des propriétés chimiques, physiques, et mécaniques différentes de celles de la fibre et de la matrice. L'interphase assure la liaison fibre/matrice et permet le transfert des contraintes de l'une à l'autre sans déplacement relatif. Cependant, l'hypothèse que l'interphase n'a pas d'épaisseur est souvent faite pour faciliter l'analyse micromécanique des composites [4].

### ***1.5. Les matériaux composites structuraux :***

#### ***a). Monocouches***

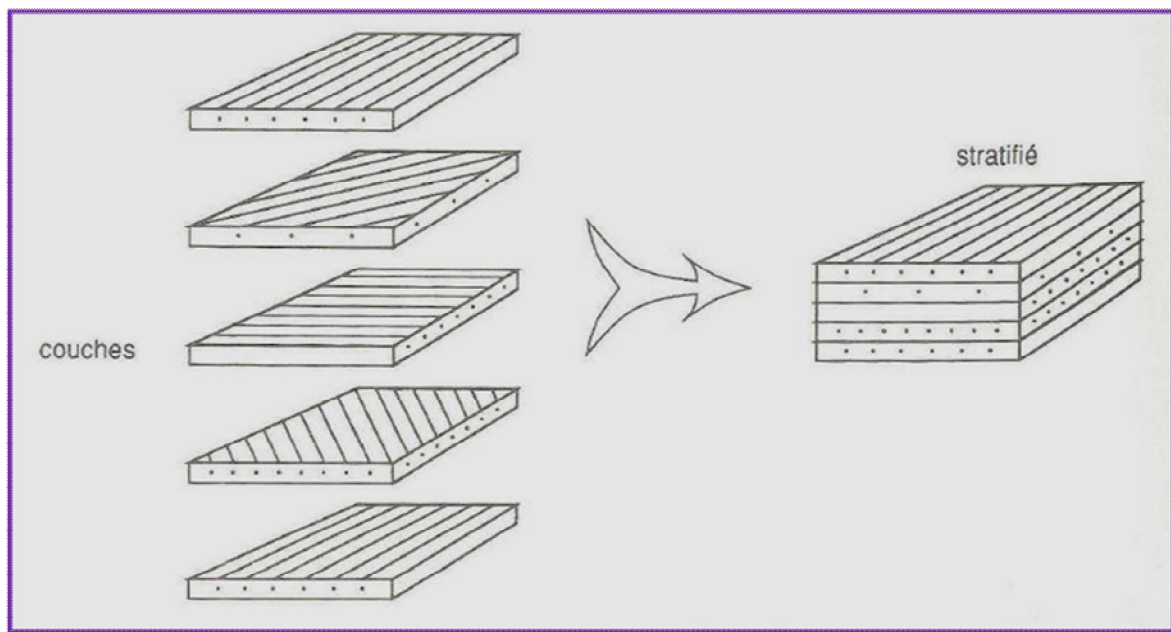
Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.



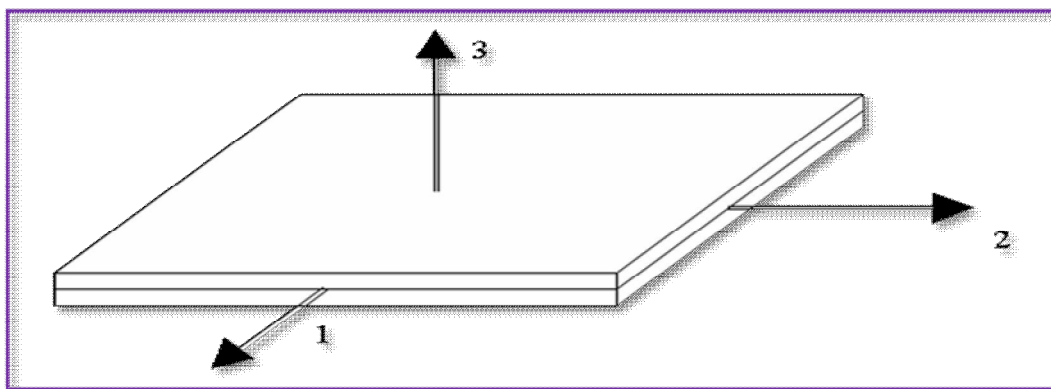
*Figure(I.12) : Représentation d'une monocouche [7]*

***b). Stratifiés***

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.



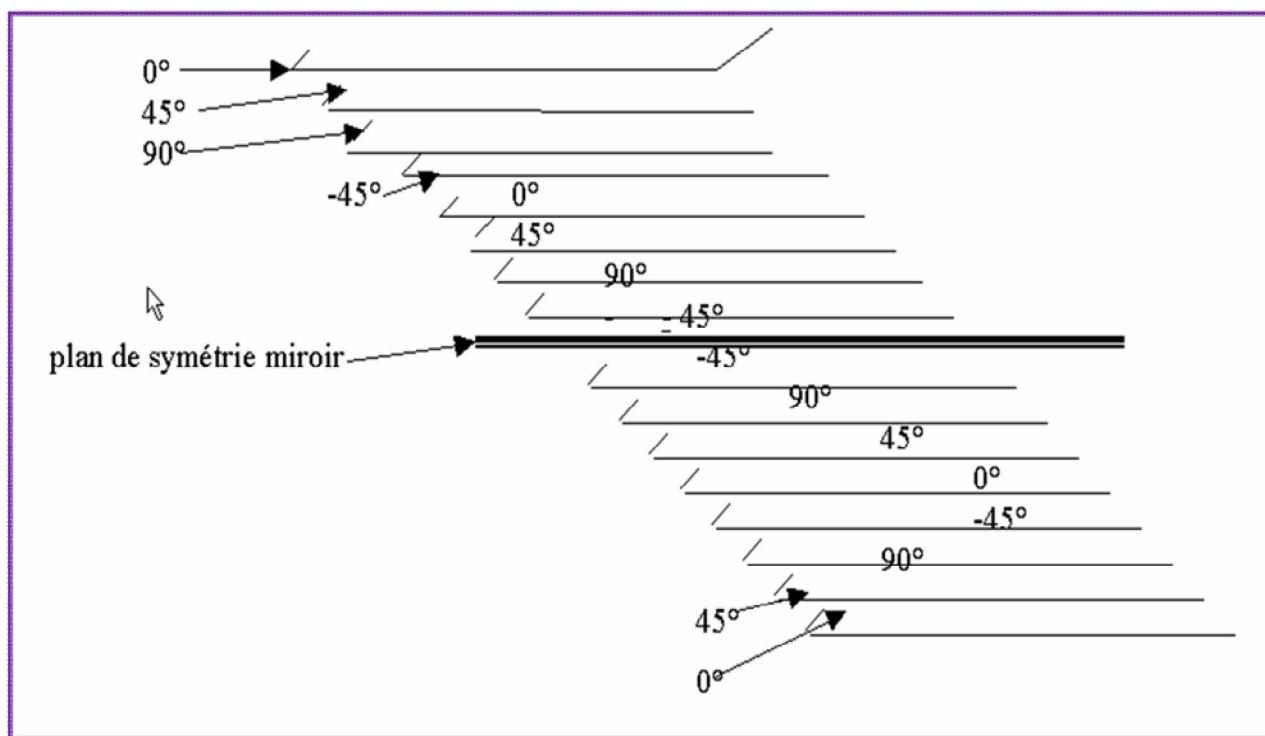
*Figure(I.13) : Les constituants d'un stratifié [8]*



Figure(I.14) : Représentation des plans d'orientation des monocouches [7]

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

Notation " composite " : Un stratifié possédant l'empilement  $(0, +45, +90, -45)2s$  est un stratifié avec 4 couches dans les directions  $0^\circ, -45^\circ, 90^\circ$  et  $+45^\circ$ , l'orientation  $0^\circ$  coïncidant avec la direction **1** du repère principal du composite. Ces plans seront réparties symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.



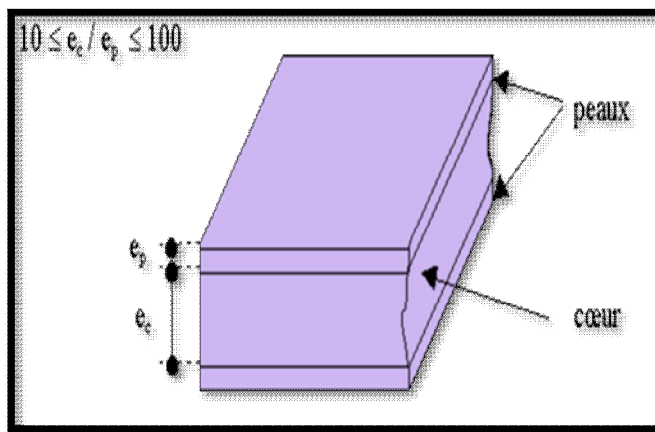
Figure(I.15) : exemple d'un stratifier symétrique [7]

On pourra avoir des stratifiés de type :

- **Equilibré** : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction  $+\theta$  que de couches orientées suivant la direction  $-\theta$ .
- **Symétrique** : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
- **Orthogonal** : stratifié comportant autant de couches à  $0^\circ$  que de couches à  $90^\circ$ .

### c). Sandwichs

C'est un matériau composé de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique.



**Figure(I.16) :** Les composantes d'un sandwich [7]

### **I.6. Les technologies de mise en œuvre :**

Le but de ce paragraphe n'est pas de détailler les différentes techniques d'élaboration des matériaux composites mais de les présenter dans leur globalité et de préciser dans quels cas elles sont utilisées. Il existe plusieurs méthodes pour élaborer et mettre en forme les composites qui peuvent être regroupées en catégorie :

- par extrusion, très utilisée avec les thermoplastiques ;
- par imprégnation, utilisée souvent avec les tissus et les fils ;
- par dépôt pour les composites en sandwichs.

Ces techniques sont souvent suivies d'un moulage qui définit les formes du matériau.

## Chapitre I Généralités sur les Matériaux Composites

---

Le moulage est aussi peut être réalisé de plusieurs façons :

- ***par compression (à froid, à chaud, par injection de résine)*** : pour obtenir des formes profondes et délicates. Il s'agit d'une méthode utilisée pour les composites à fort taux de renfort ou des pièces produites en grande quantité ;
- ***sous pression (au contact, à injection simultanée)*** : méthode la plus simple permettant l'obtention de pièces en grande série et à bas prix. Le taux de renfort est toutefois limité ;
- ***sous vide (pour des pièces de petites et moyennes séries)*** ;
- ***en continu*** : les pièces obtenues sont planes ou ondulés, les composites en sandwichs sont souvent préparés par cette technique ;
- ***par pultrusion qui intervient d'habitude après imprégnation des fibres (fils, stratifils, tissus)***, les profils obtenus sont rectilignes ou en courbes à section constante. Cette technique donne des matériaux à caractéristiques mécaniques élevées suivant l'axe car les taux de fibres peuvent atteindre 80% ;
- ***par centrifugation*** : technique réservée pour les formes cylindriques (tubes, tuyaux) ;
- ***par enroulement filamentaire (circonférentiel, hélicoïdal, mandrin)*** permettant la conception de pièces (cylindriques et sphériques) avancées. La proportion de fibres dans le composite peut atteindre 80% donc de hautes caractéristiques mécaniques. Néanmoins, c'est une méthode très couteuse.

La conception d'un matériau composite dépend du type d'application, de chargement, etc. Ce qui le diffère fortement des matériaux classiques, où la conception d'une structure est adaptée en fonction du matériau constitutif. Il est évident de voir que la qualité et la convenance d'un matériau composite dépendent du choix de ces deux composants de base (matrice et fibres) en fonction des applications spécifiques qui lui sont envisagées. D'après Trejo O'Reilly, l'optimisation des propriétés interfaciales entre les composants doit toujours être pris en compte. Plus spécifiquement, deux dispositifs fondamentaux doivent être atteints

## Chapitre I Généralités sur les Matériaux Composites

---

➤ Il est essentiel que le liquide qui enveloppe les fibres pendant la formation du composé réalise leur mouillage spontanément, c'est-à-dire que l'énergie d'adhésion résultant de ce contact doit surmonter l'énergie cohésive du polymère.

➤ les performances mécaniques seront améliorées si la ligne formée par l'interface comporte des enchevêtrements macromoléculaires résultant de la diffusion dans la matrice polymère et des chaînes greffées sur les fibres.

## *Chapitre II*

# *Les fibres aramides*

### *II.1. Historique :*

La fibre aramide de première génération est née dans les années 60. C'était une fibre polyamide aromatique ininflammable qui ne fondait pas. Cependant, elle ne présentait pas des caractéristiques de stabilité thermique suffisantes. En effet, en cas d'exposition à des flux thermiques intenses, les tissus se rétractaient. Dans les années 70, les fibres de deuxième génération sont apparues avec de meilleures performances de stabilité thermique. C'est au cours des années 80 que les fibres de troisième génération ont été mises sur le marché. En plus des performances techniques, elles présentent de meilleures performances textiles (souplesse, anti-boulochage). [9]

Les polyamides aromatiques ont été introduits pour la première fois dans des applications commerciales au début des années 1960, avec une fibre méta-aramide [poly (m-phénylèneisophthalamide), MPD-I] produite par Du Pont de Nemours sous la marque Nomex. Cette fibre synthétique, utilisée pour le textile, ne s'enflamme pas dans des taux normaux d'oxygène (autoextinguibilité). Elle est largement utilisée dans la production de vêtements de protection, de filtration de l'air, de la chaleur et pour l'isolation électrique ; c'est aussi un substitut de l'amiante. Le méta-aramide est également produit aux Pays-Bas et au Japon par *Teijin* (marques *Technora* et *Conex*), en Chine par Yantai (marque *New Star*) et une variante de méta-aramide en France (*Kermel*).

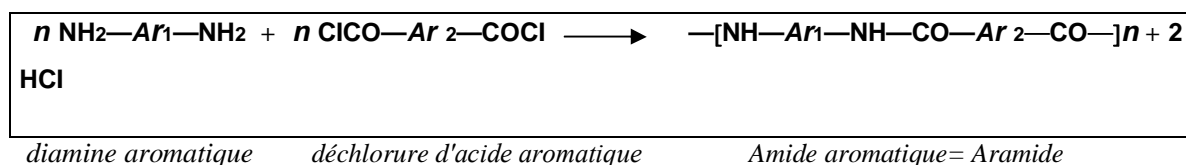
Basée sur des recherches antérieures par Monsanto et Bayer, une fibre para-aramide nettement plus tenace (résistance à la rupture voisine de 3 GPa) et rigide (le module d'élasticité peut dépasser 100 GPa) a été également mise au point dans les années 1960-1970 par Du Pont et Akzo Nobel.

Beaucoup de travaux ont été réalisés par Stéphanie *Kwolek* en 1961 alors qu'elle travaillait pour Du Pont. Cette société a été la première à introduire un para-aramide appelé Kevlar en 1973. Une fibre similaire appelée *Twaron* avec une structure chimique voisine a été présentée par *Akzo* en 1978, en raison de brevets sur le processus de production dans les années 1980. La marque *Twaron* est actuellement détenue par la société *Teijin* [10].

## II.2. Terminologie et structures chimiques :

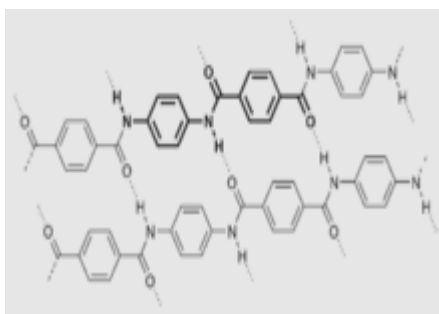
Le polymère PPD-T (para-aramide) est insoluble dans les solvants conventionnels. En revanche, il est soluble dans les acides forts comme l'acide sulfurique concentré.

Une solution de 20 % du polymère dans l'acide sulfurique est anisotrope et se comporte comme un cristal liquide. Soumis à une extrusion sous forte pression dans une filière (un capillaire très fin), le polymère s'oriente fortement. Cette orientation est conservée après un court passage à l'air libre suivi d'un trempage dans l'eau froide. La fibre est formée lors de ce filage par voie humide en jet sec (dry-jet wet spinning) puis lavée, neutralisée, séchée, et finalement bobinée. La fibre est constituée de filaments d'un diamètre de l'ordre de 12 µm. La fibre para-aramide ainsi produite est dite bas module (Kevlar 29, Twaron et Technora). La version haut module (correspondant aux Kevlar 49 et Twaron HM) est produite par étirement à chaud d'une fibre para-aramide voisine du type bas module, appelée communément précurseur.



*Ar* désignant un noyau aromatique.

La distinction entre **para-aramide** et **méta-aramide** est liée à la structure moléculaire particulière des deux matières de base : diamine et déchlorure d'acides aromatiques.



**Figure(II.1) : Structure des fibres de Kevlar** [11]

Le mot aramide vient de la contraction d'**A**romatique poly**a**mide. C'est la présence du groupe amide qui est responsable de la température de fusion élevée des polyamides et de la résistance aux solvants des polyamides. Le groupe amide rend possible la formation de liaisons hydrogène très intenses dans les plants réticulaires contenant les atomes caténaire.

Les polyamides aliphatiques, qui ont une température de fusion comprise entre 200 et 300°C suivant la longueur des groupes aliphatiques intercalaires, forme la base de fibre textiles et de plastiques technique. Ce sont des matériaux ayant des caractéristiques mécaniques relativement modestes ( $E = 2-4 \text{ GPa}$  ;  $R_m = 0,1 \text{ GPa}$ ). La chaîne polymère des polyamides aliphatiques reste relativement flexible et ces matériaux sont thermoplastiques. Dans le cas des polyamides aromatiques comme le poly (p-phénylène téréphtalamide), la présence des groupes aromatiques rigidifie considérablement la chaîne. Le polymère n'est généralement plus thermoplastique et il n'est possible de le dissoudre que dans des solvants très polaires.

### II.3. Propriétés des aramides :

#### II.3.1 Caractéristiques Mécaniques :

- **Résistance et module en traction :**

Les fibres d'aramide présentent un bon équilibre de résistance et de module en traction et, en particulier, une excellente résistance spécifique à la rupture en traction.

- **Allongement à la rupture :**

Selon le type de fibres, il est de 2.8% ( $E = 131 \text{ GPa}$ ) ou de 4 % ( $E = 83 \text{ GPa}$ ), intermédiaire entre ceux des fibres de **verre** et de **carbone**.

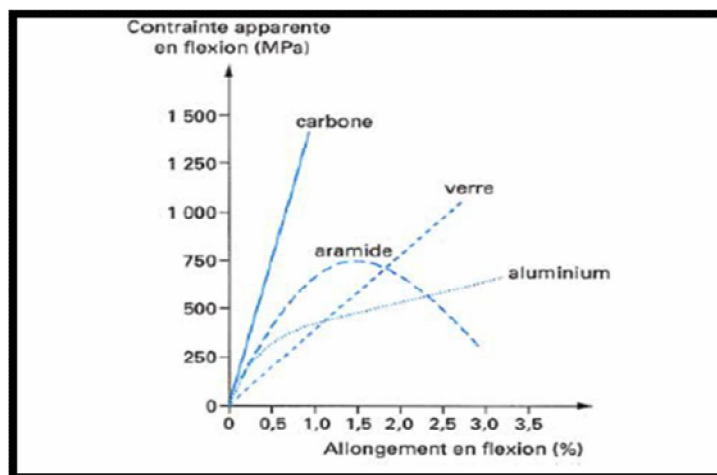
- **Résistance à la compression :**

Les fibres d'aramide présentent *des caractéristiques médiocres en compression* qui sont probablement une des conséquences de leur faible adhérence aux résines.

- **Résistance en flexion :**

Le comportement de la fibre est élastique sous faible charge et plastique sous forte charge, montrant ainsi une certaine analogie avec les métaux.

**Figure(II.2) : Comportement en flexion des composites unidirectionnels à base de résine époxyde avec différents renforts fibreux (carbone, verre, aramide) [11]**



### II.3. 2 Autres caractéristiques :

#### • Propriétés thermiques:

Les fibres d'aramide ont une très bonne tenue thermique. Le module d'élasticité en traction conserve à 300°C plus de 80 % de sa valeur à température ambiante.

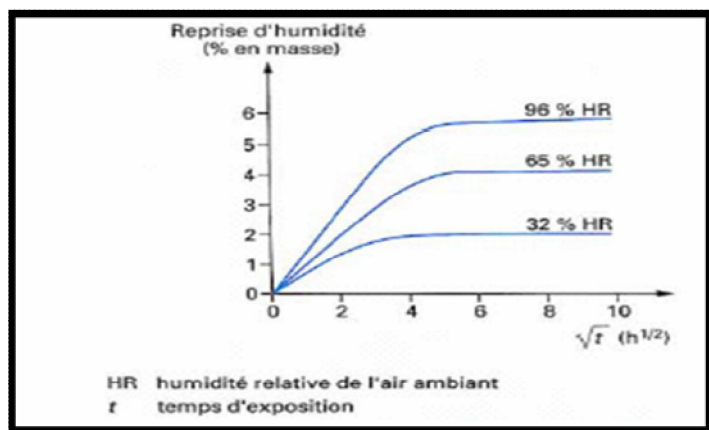
#### • Tenu aux U.V:

Les fibres d'aramide sont très sensibles aux rayons U.V (perte des caractéristiques).

#### • Repris d'humidité:

Une caractéristique propre aux polyamides, et donc aux fibres aramides, est leur reprise d'humidité plus importante que celle des fibres de carbone et de verre.

**Figure(II.3) : Absorption d'eau d'une fibre para-aramide en fonction du temps de séjour dans l'air ambiant [11]**



### II.3. 3 Avantages et inconvénients :

#### • Les avantages :

- Haute résistance à la traction.
- Module d'élasticité élevé
- Excellent facteur d'amortissement des vibrations.
- Faible densité: 1.44 g/cm<sup>3</sup> • Excellente stabilité thermique : -70 °C à + 180°C
- N'entretient pas la combustion, ne fond pas, carbonisation à 425°C
- Bonne résistance à la fatigue
- Excellentes propriétés diélectriques. Matériau non conducteur.
- Bonne résistance chimique aux carburants, à l'eau de mer (sauf acides et bases forts)
- Prix intermédiaire (2 à 3 fois moindre que celui des fibres de carbone)

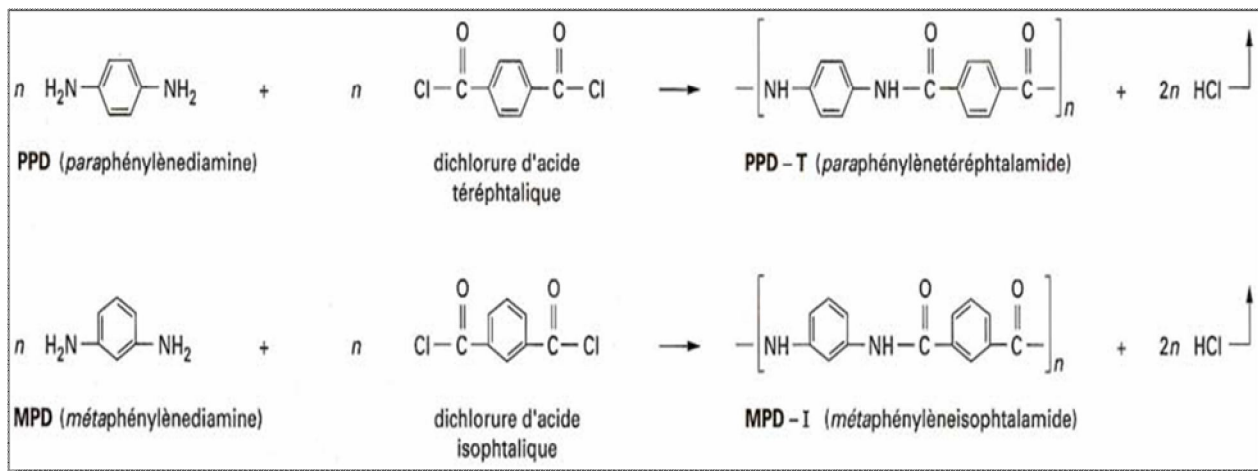
#### • Les inconvénients :

- Très faible résistance à la compression.
- Reprise d'humidité importante (4% environ).
- Faible adhérence avec les résines d'imprégnation.
- Sensibilité aux ultraviolets.
- Prix intermédiaire 10 fois celui des fibres de verre E.
- Usinage délicat des matériaux ainsi renforcés.

**II.4. Fabrication des fibres d'aramides :**

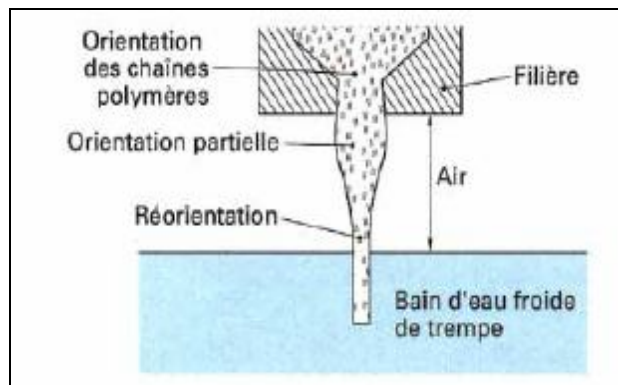
Les fibres d'aramides sont des fibres synthétiques artificielles obtenues en trois ou quatre étapes :

- On fait réagir paraphénylène diamine avec le chlorure de terephtalyle dans un solvant organique pour obtenir le PPD-T.



**Figure(II.4):** Réaction de polymérisation conduisant aux deux types de polymères aramides (*para* et *méta*) [11]

- Le polymère obtenu est dissout dans l'acide sulfurique. À ce stade, le polymère est partiellement orienté dans une forme de cristaux liquides. Ce polymère est extrudé dans une filière et filé. Les filaments sont refroidis par jet d'air. Finalement, suivent les étapes de lavage, séchage et bobinage.



**Figure (II.5) :** Développement de la structure orientée par le procédé de filage humide en jet sec d'une fibre aramide [11]

### II.5. Les différents types (grades) de Kevlar :

Il existe plusieurs types ou plusieurs grades de fibres de Kevlar: Kevlar, Kevlar29, Kevlar 52, Kevlar 49, etc.

- **Le Kevlar** de base est surtout utilisé pour le renforcement des pneumatiques et d'autres caoutchoucs.
- **Le Kevlar 29** est principalement utilisé dans des applications industrielles telles que des câbles, ou bien pour remplacer l'amiante, la doublure de freins, pour le renforcement de la coque d'un bateau, ou encore pour la fabrication des gilets pare-balles.
- **Le Kevlar 49** est le grade ayant la plus grande résistance à la traction de tous les aramides. Il est utilisé dans certains plastiques, pour le renforcement de coques et pour la fabrication de certaines pièces d'avions et de cadres de vélos.

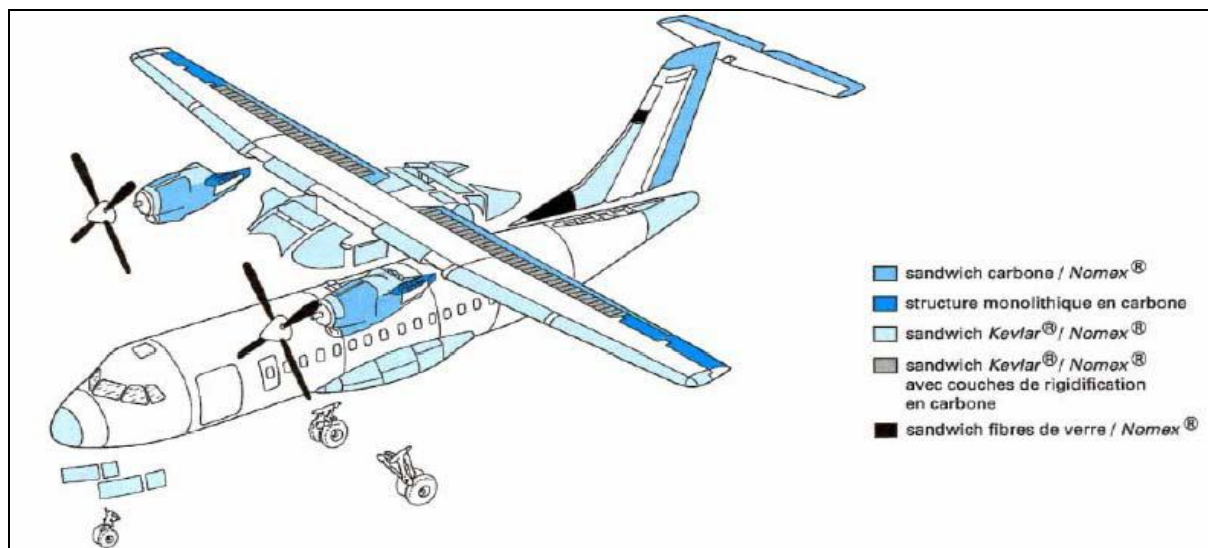
<i>Grade</i>	<i>Densité g/cm<sup>3</sup></i>	<i>Module de traction (GPa)</i>	<i>Résistance à la traction (GPa)</i>	<i>Allongement (%)</i>
<b><i>Kevlar 29</i></b>	1.44	83	3.6	4.0
<b><i>Kevlar 49</i></b>	1.44	131	3.6 - 4.1	2.8
<b><i>Kevlar 149</i></b>	1.47	86	3.4	

*Tableau(II.1): propriétés mécaniques des différents grades de kevlar. [12]*

### II.6. Utilisations des composites à base de fibres aramides :

Les aramides sont utilisés dans de nombreuses applications à haute technologie dans l'aéronautique, l'aérospatiale, la construction navale, le secteur militaire pour fabriquer par exemple des gilets pare-balles ou des casques. Ces matériaux se rencontrent aussi dans l'automobile et le sport et loisir.

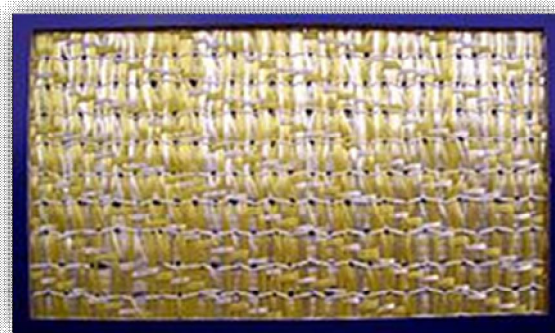
- Le principal avantage des fibres aramide est leur résistance élevée à la traction pure, on les choisira tout particulièrement pour de telles utilisation (ex.: coques de bateaux de compétition)
- Leur légèreté permet de les utiliser largement dans l'aéronautique.



**Figure (II.6):** Différents matériaux composites présents dans un ATR-42 [11]

- Leur résistance à l'allongement (4% à la rupture) permet aussi de les utiliser pour les bandes transporteuses et courroies trapézoïdales.
- Leur amortissement des vibrations est intéressant pour le capotage des moteurs et pour les articles de sport.
- Malheureusement, elles sont très faibles en compression et peu résistantes en flexion, leurs utilisations devraient se généraliser dans des matériels comme les capacités haute pression (propulseur, bouteilles de gaz) ou des tubes soumis à haute pression interne.

Pour pallier leur faiblesse en compression et utiliser néanmoins leur qualité, les fibres aramides sont parfois associées à d'autres fibres (carbone ou verre) dans des tissus mixtes (composite hybride).



**Figure (II.7):** Tissu hybride verre/aramide [1]

## Chapitre II Les fibres aramides

---

Probablement les applications les plus populaires du Kevlar sont dans la protection balistique: *gilets par balle* et *blindage* et dans ces cas c'est surtout le **kevlar 29** qui est utilisé.

Les propriétés balistiques du kevlar ou en d'autres termes sa capacité d'absorber de l'énergie proviennent du glissement des fibres dans la matrice à cause de sa mauvaise adhésion. D'ailleurs, pour les applications de blindage, on peut même traiter la surface des fibres avec des agents de démoulage!!

*Chapitre III*  
*Comportement à l'impact*

### III.1. Généralités

#### III.1.1. Définition d'un impact

En mécanique, le choc correspond à l'application d'une force importante durant un temps court, généralement accompagné d'un brusque changement de vitesse. Un impact peut être défini comme le cas particulier d'un choc d'un projectile sur une surface.

Les impacts à fortes énergies entraînent souvent la perforation et semblent donc causer les dégâts les plus graves. Cependant, il ne faut pas négliger les impacts à faible énergie car ceux-ci provoquent des délaminages à l'intérieur des composites qui peuvent se propager sous sollicitation cyclique. Ce phénomène est insidieux car aucun signe extérieur ne prévient de l'endommagement de la structure composite. Dans le cas d'un impact conduisant à la perforation d'une plaque en composite, on peut assimiler l'effet à celui d'une entaille, c'est-à-dire à une diminution de la résistance mécanique d'environ 50 % [13].

#### III.1.2. Energie cinétique

Il existe une grande variété de type de chocs possibles qui dépendent de l'énergie cinétique liée à la masse du projectile et à sa vitesse. L'énergie d'impact d'un projectile correspond à son énergie cinétique, donnée par la relation :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \dots\dots\dots (III.1)$$

Il est donc évident que les deux paramètres principaux régissant l'intensité d'un impact sont la masse et la vitesse du projectile. On remarque que la vitesse du projectile est le paramètre le plus important : lorsqu'on double la vitesse d'un projectile, son énergie cinétique  $E_c$  est multipliée par quatre. Cela conduit à distinguer deux types d'impacts suivants la vitesse du projectile [13] :

- les impacts à faible vitesse (de l'ordre de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ ),
- les impacts à forte vitesse (de l'ordre de  $100 \text{ m.s}^{-1}$ ).

#### III.1.3. Mécanisme de dissipation

Lors de l'impact sur une pièce composite, on observe trois types d'endommagement microscopiques permettant la dissipation de l'énergie apportée par l'impact:

- la microfissuration de la matrice,
- la rupture de fibres,

### Chapitre III Comportement à l'impact

---

- le délaminage de plis.

L'observation de la microstructure du matériau endommagé a permis d'identifier les principaux mécanismes d'endommagement : l'amorçage de microfissures aux interfaces fibre/matrice et la propagation des fissures au travers de la matrice. La dernière phase d'endommagement fait apparaître des fissures interlaminaires qui représentent le début du délaminage. Les mécanismes d'endommagement sont liés aux mécanismes d'absorption d'énergie, notamment la formation de nouvelles surfaces par microfissuration et le frottement entre les surfaces créées.

Il semblerait qu'il existe aussi des différences de propagation des dommages entre les plaques et les coques en composites.

Dans les coques en composites, les dommages apparaissent d'abord sur le pli extérieur puis se propagent dans les plis interne jusqu'au pli intérieur.

Dans les plaques en composites, les dommages passent du pli extérieur au pli intérieur

#### **III.1.4. Matériaux composites utilisés**

Parmi les fibres utilisées dans les matériaux composites, ce sont les fibres d'Aramide (Kevlar) qui présente les meilleures caractéristiques de résistance aux impacts. Les fibres de Kevlar combinent en effet une bonne résistance à la flexion avec une énergie de rupture élevée. On les associe souvent avec des fibres de carbones pour augmenter la rigidité des pièces.

Comme on le voit sur le Tableau (III.1), le Kevlar est talonné de prêt par le Verre E en ce qui concerne les propriétés de résistance aux impacts. Cela explique le choix du verre pour le renfort des pièces automobiles pour lesquelles le Kevlar est trop onéreux.

<i>Fibre</i>	<i>Résistance à la flexion (MN.m<sup>-2</sup>)</i>	<i>Energie de rupture (J.m<sup>-2</sup>)</i>
<i>Kevlar 49</i>	<b>980</b>	<b>2,6 10<sup>5</sup></b>
<i>Verre E</i>	<b>500</b>	<b>2,0 10<sup>5</sup></b>
<i>Renfort mixte (41% Kevlar+59%Carbone)</i>	<b>970</b>	<b>9,8 10<sup>4</sup></b>
<i>Carbone à haut module</i>	<b>860</b>	<b>8,0 10<sup>3</sup></b>

**Tableau (III.1): Comparaison de la résistance à l'impact de diverses fibres [13]**

### *III.2. Applications*

#### *III.2.1. Automobiles*

##### *a) Conditions d'impacts*

Le comportement des véhicules lors d'un crash est un sujet d'étude actuel dont le but est de minimiser l'impact du crash sur les passagers. Pour cela, on cherche à maximiser la dissipation de l'énergie du crash par déformation des composants matériels entourant les passagers [14].

Durant la dernière décennie, de nombreuses attentions se sont portées sur les structures en matériaux composites. Les principaux avantages des composite par rapport aux matériaux isotropes plus conventionnels sont leur grande résistance à la rupture et leur rigidité élevée. De plus, l'importante influence de l'orientation des fibres permet un ajustement sur mesure des propriétés mécaniques selon certains axes privilégiés.

Dans l'automobile, on distingue typiquement trois vitesses de chocs représentatives des conditions d'utilisation :

- **Chocs à 5 km/h** : essai réalisé conformément à la directive européenne ECE 42. Le choc doit être entièrement repris par le bouclier avant avec absence complète de défauts visible sou cachés.
- **Chocs à 15 km/h** : essai propre aux compagnies d'assurance, destiné à apprécier les coûts de réparation et donc le niveau des primes d'assurance. L'essai consiste à provoquer l'impact du véhicule contre un mur rigide. Le choc est repris par un système d'absorbeurs sous forme de cônes en composites BMC (*Bulk Molding Compound*) qui, grâce à la ruine progressive du matériau, permettent une absorption d'énergie suffisante sur les premiers 100 mm d'écrasement.
- **Chocs à 50 km/h** : essai consistant à projeter frontalement le véhicule contre un mur conformément à la directive ECE 12. Pour être conforme, il faut que l'habitacle conserve son intégrité, que le déplacement du tablier soit inférieur à 150 mm et celui du volant inférieur à 127 mm. Les portes doivent rester fermées et pouvoir s'ouvrir après le choc.

### Chapitre III Comportement à l'impact

Afin de respecter ces critères, le principe retenu est celui de l'absorption de l'énergie cinétique par le bloc avant et le début du plancher grâce à la capacité des composites à absorber l'énergie sous forme d'une destruction progressive du matériau [15].

#### *b) Le choix des matériaux composites*

Les matériaux composites ont été choisis en fonction de critères technico-économiques permettant de fabriquer les pièces dans des conditions réalistes en s'appuyant sur les moyens existants dans le tissu industriel européen. Leurs modes de transformation doivent être des techniques bien maîtrisées dans l'industrie automobile ou dont le développement est suffisamment avancé et prometteur pour justifier leur utilisation. Les propriétés mécaniques et d'usage doivent permettre d'obtenir un comportement fonctionnel en cohérence avec les cahiers des charges du constructeur. Les prix de revient et les coûts d'investissements doivent être inférieurs ou identiques à ceux de l'acier [16].

Ces critères de choix ont conduit à privilégier les **composites renforcés par des fibres de verre** plutôt que les composites hautes performances à base de fibres de carbone ou de Kevlar. Nous verrons que les propriétés des composites de moyenne performance sont suffisantes pour répondre aux exigences fonctionnelles.

<i>Caractéristiques</i>	<i>Méthodes d'essais</i>	<i>Etat initial</i>	<i>Après vieillissement</i>	<i>Objectif</i>
<i>Densité</i>	<i>ISO 1183</i>	<i>1,89</i>	<i>NA</i>	<i>OK</i>
<i>Taux de verre (%)</i>	<i>NF T 57-518</i>	<i>48</i>	<i>48</i>	<i>OK</i>
<i>Taux de charge (%)</i>	<i>NF T 57-518</i>	<i>21</i>	<i>21</i>	<i>OK</i>
<i>Module traction en (GPa)</i>	<i>NF T 57-101</i>	<i>14</i>	<i>+ 8%</i>	<i>≥ 15</i>
<i>Contrainte en traction (MPa)</i>		<i>155</i>	<i>+ 2%</i>	<i>≥ 150</i>
<i>Module de flexion (GPa)</i>	<i>NF T 57-105</i>	<i>14,6</i>	<i>+ 8%</i>	<i>≥ 15</i>
<i>Contrainte en flexion (MPa)</i>		<i>270</i>	<i>+ 2%</i>	<i>≥ 250</i>
<i>Limite de fatigue (MPa)</i>	<i>NF T 51-120</i>	<i>70</i>	<i>70</i>	<i>≥ 50</i>
<i>Absorption d'énergie (J/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>NF T 50-118</i>	<i>2,6</i>	<i>2,6</i>	<i>≥ 2</i>
<i>Transition vitreuse (C)</i>	<i>NF L 17-451</i>	<i>195</i>	<i>195</i>	<i>≥120</i>

*Tableau (III.2): Caractéristiques du SMC retenu pour le bloc avant [15]*

## Chapitre III Comportement à l'impact

---

*DSM Composite Resins* (fabriquant international de résines utilisées dans les matériaux composites) a formulé un système de résines vinylester renforcées par des fibres de verre pour répondre à ces exigences et obtenir en plus de bonnes caractéristiques en fatigue grâce à une excellente adhérence fibres/résine.

Les caractéristiques du SMC (*Sheet Molding Compound*) mesurées sur éprouvettes prélevées sur plaques de 3 mm (Tableau III.2) présentent deux particularités intéressantes :

- une limite de fatigue de 70 MPa nettement supérieure à la contrainte maximale mesurée au niveau de la fixation des amortisseurs en haut de chapelle de l'ordre de 50 MPa ;
- une température de transition vitreuse de 195°C qui assure une très bonne résistance thermique des pièces situées dans le compartiment moteur.

### ***C) Comportement aux chocs***

La sécurité des occupants d'un véhicule automobile, constitue pour Renault « **une croisade pour la vie et un enjeu commercial majeur** » : minimiser les risques de lésions lors d'un accident, préserver l'habitacle et améliorer la retenue des occupants est l'objectif des recherches menées dans le domaine de la sécurité passive depuis de nombreuses années.

Les études préliminaires sur éprouvettes, puis sur éléments de longeron ont démontré que l'absorption d'énergie par des composites est obtenue par la ruine progressive du matériau par délaminage par opposition à la déformation plastique des métaux.

### ***III.2.2. Aéronautiques***

#### ***a) Conditions d'impacts***

Contrairement aux applications automobiles, le coût élevé des composites à base de Kevlar ou de Carbone n'est pas rédhibitoire dans le domaine de l'aéronautique. Les composites époxy/Kevlar ou époxy/Carbone sont donc très utilisés dans la construction aéronautique pour leurs performances mécaniques supérieures et l'allègement qu'ils entraînent. La tendance actuelle veut que la part de composite dans les avions se substitue de plus en plus à celle de l'aluminium.

Les deux impacts typiquement rencontrés dans l'aéronautique civile ou militaire sont :

- les crashes survivables (moins de 11 m.s<sup>-1</sup>),
- les chocs à l'oiseau (de 100 à 600 m.s<sup>-1</sup>).

### *b) Crash survivable*

Le concept de crash survivable est très précisément défini puisqu'il est l'objet d'une norme militaire Américaine : Mil STD 1290. Cette norme fixe notamment la vitesse verticale maximale à  $10,5 \text{ m.s}^{-1}$  en dessous de laquelle un crash est dit survivable. Plus explicitement, cela signifie qu'en dessous d'une vitesse de chute de  $10,5 \text{ m.s}^{-1}$  la déformation des composants de l'appareil doit suffisamment absorber l'énergie d'impact pour permettre la survie du personnel naviguant.

L'exemple le plus évident de l'utilisation des matériaux composites dans une telle application est celui de l'hélicoptère Européen Tigre. Celui-ci est sensé survivre à 85 % des crashes

survivables grâce à l'absorption du chocs par son train d'atterrissage, son fuselage et ses sièges. Le fuselage du Tigre est composé d'une matrice époxy à renfort mixte de fibres de Carbone et de Kevlar [13].

De manière générale, les matériaux composites utilisés sont des stratifiés multicouches composés d'un empilement de plusieurs sous-stratifiés, principalement Carbone/époxy et Kevlar/époxy. Les stratifiés Carbone/époxy permettent de répondre aux exigences de rigidité mécanique du fuselage alors que les stratifiés Kevlar/époxy améliorent la réponse aux impacts et aux crashes de l'ensemble.

La capacité du matériau à absorber l'énergie mécanique de l'impact est essentiellement reliée au caractère endommageable de sa microstructure. Afin de pouvoir optimiser le stratifié multicouche, on s'intéresse aux propriétés mécaniques et à l'endommagement des sous-stratifiés. Le comportement des stratifiés Carbone/époxy dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels figurent le procédé d'élaboration, le mode de chargement mécanique et la vitesse de sollicitation..

### *c) Choc à l'oiseau*

Depuis les débuts de l'aviation motorisée, la collision des avions avec des oiseaux, couramment appelée "Choc à l'oiseau", a toujours représenté un danger majeur.. Comme le montre la Figure (III.1)



**Figure (III.1): Détérioration d'une dérive suite à collision avec un oiseau [14]**

## Chapitre III Comportement à l'impact

---

La plupart de ces collisions ont lieu à proximité des aéroports lors des phases de décollage/atterrissage où les avions traversent les zones de vol des oiseaux. Statistiquement 87 % des chocs à l'oiseau ont lieu en dessous de 600 m d'altitude. Ce problème est d'autant plus préoccupant que ces phases sont celles où les avions sont les plus vulnérables.

De nombreuses techniques sont employées pour limiter la présence des oiseaux dans les zones aéroportuaires : rapaces (aigles, faucon), large zone herbeuse, diffusion de cris d'oiseaux blessés, détonations graves, etc. Cependant aucune de ces méthodes n'apporte pleine satisfaction et il est donc nécessaire de concevoir les avions en prenant en compte ce genre de chocs.

Les chocs à l'oiseau sont des impacts de type « petite masse/grande vitesse » puisque la masse moyenne des oiseaux percutés est d'environ 600 g pour une vitesse comprise entre 100 et 600 m.s<sup>-1</sup> [15]. Les tests expérimentaux utilisent généralement un canon à air comprimé permettant de projeter des carcasses de poulets morts (d'où le nom de canon à poulets). Cependant suite à certains problèmes d'hygiène, des projectiles de substituts ayant les mêmes propriétés d'impact ont été développés. On peut, par exemple, utiliser des mélanges d'eau et de gélatine bovine moulés selon des formes particulières [13].

Les résultats des tests de chocs à l'oiseau montrent que les plaques s'endommagent habituellement au niveau des extrémités maintenues lorsqu'elles sont impactées par des projectiles de grande masse à partir d'un certain seuil de vitesse. En utilisant des impacts de type « vitesse élevées/faible masse », cette rupture structurelle peut être substituée par une rupture locale. En conséquence le type de rupture est relié aux conditions de fixations et d'assemblages des pièces composites.

### ***III.2.3. Militaires***

#### ***a) Impacts de balles***

Les impacts causés par les balles des armes à feu sont des impacts de type « faible masse/très haute vitesse ». Les balles pèsent de 2,6 g (22.LRHV) à 15,55 g (Magnum 44) et sont propulsés à des vitesses de 200 à 900 m.s<sup>-1</sup>.

Les impacts de balles sont aussi caractérisés par une très faible surface d'impact et une grande dureté du projectile vis à vis de la surface impactée. La combinaison de ces deux aspects provoque généralement des dommages de type perforation. Le comportement des composites soumis à des impacts balistiques est bien connu [14].

### ***b) Gillet pare-balle***

Les gilets pare-balle sont les armures des temps modernes. Conçus pour résister à certaines armes à feu, les gilets pare-balle sont constitués de matériaux capables de résister à la perforation des balles. Il est à noter cependant que les gilets pare-balle n'emmagasinent pas totalement l'énergie de l'impact d'une balle et les utilisateurs portent souvent des bleus (contusions) aux endroits même des impacts.



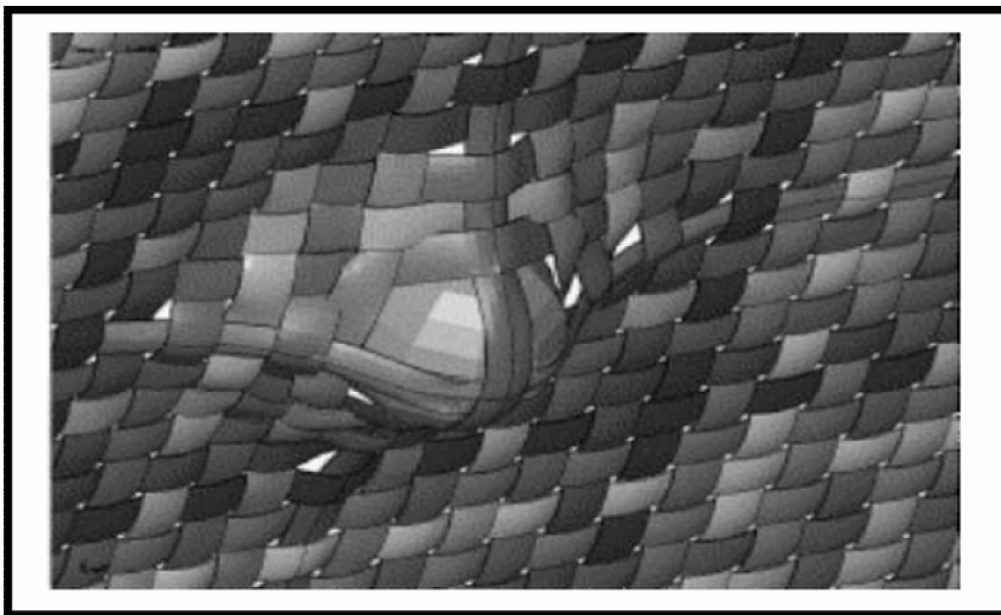
***Figure(III.2):Représentation d'un  
Gilet par balle [10]***

Il existe une classification (*NIJ Standard-0101.04*) des protections en fonction des armes à feu contre lesquelles elles protègent efficacement [14] :

- **Type I** (.22 LR; .380 ACP)
- **Type IIA** (9 mm; .40 S&W)
- **Type II** (9 mm; .357 Magnum)
- **Type IIIA** (High Velocity 9 mm; .44 Magnum)
- **Type III** (Rifles)
- **Type IV** (Armor Piercing Rifle)

Les normes NIJ régissent aussi très strictement les conditions dans lesquelles doivent s'effectuer les tests des gilets pare-balle avant leur commercialisation

Le choix des matériaux utilisés dépend du niveau de classification. De manière générale plus un gilet est protecteur (type IV), plus il est lourd et encombrant.



*Figure (III.3) : Illustration de l'arrêt d'une balle par un tissu balistique [14]*

Parmi les matériaux utilisés, on trouve des tissus à base de fibres de Kevlar car ces derniers présentent une excellente résistance à la perforation (*Figure III.3*).

Les gilets pare-balle ne sont pas des composites au sens où on l'entend en aéronautique ou dans l'automobile. Ils sont généralement composés de plusieurs couches alternant tissus balistiques et film plastique permettant le maintien et l'imperméabilité de l'ensemble.

Le nombre de couches de tissus balistiques est généralement lié au niveau de protection souhaité. Par exemple, un gilet de niveau **II** comporte entre 16 et 20 couches de Kevlar alors qu'un gilet de niveau **III** en comporte entre 24 et 28 couches.

Les fibres de Kevlar ne sont pas les seules à être utilisées dans les tissus balistiques, on trouve aussi d'autres types de fibres à haut module et haute résistance :

- Para-aramide (*p-phenylene terephthalamide*) : Kevlar de DuPont, Twaron et Technora de Teijin Twaron,
- UHMWPE (*Ultra High Molecular Weight Polyethylene*) : Dyneema de DSM, GoldFlex et Spectra de Honeywell,
- PBO (*poly (p-phenylene-2,6-benzobisoxazole)*) : Zylonde Toyobo.

Certains gilets pare-balle intègrent aussi des plaques en acier ou en céramiques (oxyde d'aluminium, carbure de silicium, carbure de bore) sur certaines parties vitales. Cependant le poids élevé de ces protections supplémentaires cantonne leurs utilisations à la protection contre des armes de guerre (Type III et IV). L'apparition de gilets pare-balle en composite à matrice céramique ou métallique n'est cependant pas à exclure pour les générations

### Chapitre III Comportement à l'impact

---

futures. Ces derniers devraient fournir une excellente protection balistique pour un poids acceptable.

#### *C) Casque militaire (Military helmet)*

Le casque de combat est un des équipements militaires les plus anciens de par l'importance vitale de la zone qu'il est sensé protéger. Les statistiques des combats modernes sont explicites : la tête reçoit environ 20% des blessures pour une surface représentant environ

9% de la surface du corps exposée en combat.

Pendant longtemps les casques militaires étaient uniquement composés de métal. Jusqu'à la seconde guerre mondiale le casque de combat était composé d'une coque en acier dur pour un poids de 0,5 à 1,8 kg. Ce n'est qu'à partir des années 80 que les casques en *Aramide* ont fait leurs premières apparitions dans certaines unités d'élites (Forces Spéciales, au début des années 1970, l'*US Army* a développé un nouveau type de casque plus léger et protecteur : le PASGT (*Personal Armor System Ground Troops*). Ce casque utilise une structure multicouche de fibres Aramides de Kevlar en substitut de l'acier. Le composite se compose de fibres de Kevlar 29 et d'une matrice de PF (phénol formaldéhyde) et de PVB (polyvinyl butyral). Depuis, quelques changements ont été apportés pour améliorer l'ensemble.



***Figure(III.4): Représentation d'un  
Casque militaire [10]***

Les casques militaires suivent la même classification d'efficacité que les gilets pare-balle mais les protocoles de tests divergent légèrement (NIJ Standard-0106.01).

### **Chapitre III Comportement à l'impact**

---

Il est à noter que la résistance aux balles des casques de combat est inférieure à celles des gilets pare-balle. Les meilleurs casques actuels atteignent difficilement le niveau de protection III. Cela est une conséquence des exigences de légèreté qui s'opposent à l'utilisation des plaques en céramiques ou en acier intégrées dans les gilets pare-balle de haute protection (Type III et IV).

### ***Conclusion***

L'énergie apportée par un impact sur une pièce composite est dissipée par un endommagement microscopique de la pièce : microfissuration de la matrice, rupture des fibres ou délaminage des plis.

Qu'il soit de forte ou de faible énergie, tout impact sur un composite est important car il peut entraîner l'apparition de délaminages internes qui peuvent ensuite se propager sous sollicitation cyclique et mener à la ruine de la pièce.

Comme tous composites, la résistance aux impacts est une propriété que l'on peut adapter sur mesure suivant les exigences mécaniques et/ou économique de l'application finale.

Les matériaux composites à base de fibres de Kevlar présentent une excellente résistance aux impacts combinée à de bonnes performances mécaniques pour un coût relativement élevé ce qui réserve leurs utilisations à des domaines tels que l'aéronautique ou la protection balistique.

Les composites renforcés par des fibres de verres présentent aussi une bonne résistance aux impacts même si elle est inférieure à celle des composites à base de Kevlar. Cependant leur faible coût permet leurs utilisations dans des applications plus courantes comme l'automobile.

## *Chapitre IV*

# *Les Méthodes de planification des expériences*

### IV .1. Introduction

Depuis quelques années, on s'est aperçu que la qualité d'un produit dépendait principalement de la conception de ce produit ou plus précisément de la connaissance parfaite de cette conception plutôt que du produit fini lui-même. En effet, connaître tout les détails sur l'élaboration d'un produit permet de prévoir son évolution au court du temps en fonction des paramètres influents qu'ils soient internes ou externes.

Or ces paramètres sont généralement nombreux et difficilement modélisables par les méthodes classiques de la physique. Le concepteur a donc besoin d'une méthode «Expérimentale, peu couteuse en expérience», qui lui permettra de mesurer et de connaître l'influence de tout les paramètres et d'en déduire les plus influents. Un plant d'expériences représente l'outil adéquat qui permettra de répondre à l'ensemble de ces questions. Tout phénomène  $Y$  dépend de nombreux paramètres  $X_i$  ( $X_1, X_2, X_3, X_4$ ), afin de connaître l'influence du paramètre  $X_2$  sur  $Y$ , la logique veut que l'on fixe tout les autres ( $X_1, X_3, X_4$ ) et que l'on fasse varier seul  $X_2$ , il faudrait effectuer la même opération pour  $X_1$ ,  $X_3$  et  $X_4$  pour avoir leur influences sur le système. Ainsi, si on décide de prendre 3 point expérimentaux par variables étudiées, il faudrait réaliser  $3^4 = 81$  expériences, se qui est considérable.

La question à ce posé est comment diminuer ce nombre d'expériences (de manière intelligente !!), afin d'observer les mêmes effets plus rapidement. Il n'est déjà pas possible de faire moins de 2 points d'études (valeurs minimal et maximal du paramètre) par variables et il semble difficile de rejeter l'influence de certaines valeurs au hasard. La solution à ce problème est de faire varier l'ensemble des paramètres à la fois. Cette solution apporte plusieurs avantages si elle est appliquée correctement.

- Diminution du nombre d'essais ;
- Connaissance des effets de paramètres  $\rightarrow$  réduction des paramètres influents ;
- Possibilité d'évaluer les effets des interactions entre les paramètres ;
- Meilleure précision des résultats ;
- Modélisation mathématique de l'expérience ;

### IV .2. Historique

La préoccupation de Ronald Aylmer Fischer, chercheur du laboratoire statistique Rothamsted en Grande Bretagne, par les analyses statistiques des données expérimentales en

1919, lui donna l'idée d'exécuter des expériences systématiquement suivant des conditions statistiques. En 1924 il développait l'analyse de variance comme procédé d'exploitation. Il publiait son premier livre « The design of experiments » en 1935 [17].

De 1950 à 1960 des méthodes de planification ont été suggérées pour les expérimentateurs, parallèlement à des méthodes simples il y avait aussi déjà des problèmes d'optimisation. Les plans d'expériences pour les problèmes d'optimisation étaient proposés pour la première fois en 1951 par Box et Wilson [18].

Les plans de premier et de second degré étaient très intéressants pour la recherche industrielle surtout dans le développement des processus chimiques. En 1958 Scheffe découvrait un nouveau domaine dans son travail « Experiments with mixtures ». Et depuis, il existe des plans d'expériences pour l'examen des systèmes à plusieurs composantes.

En 1959 présentait Kiefer une base théorique pour la constitution des plans d'expériences optimaux.

En 1960 ces procédés statistiques ont trouvé une large utilisation dans les différents secteurs scientifiques à caractère expérimental.

De là la théorie de planification a été approfondie, ce qui a permis un nombre important de critères d'optimisation.

Après les publications des scientifiques anglais et américains, Nalimov entama en

1965 les méthodes statistiques extrémales de planification d'expériences [18], et depuis, il existe une centaine de travaux soviétiques. [19]

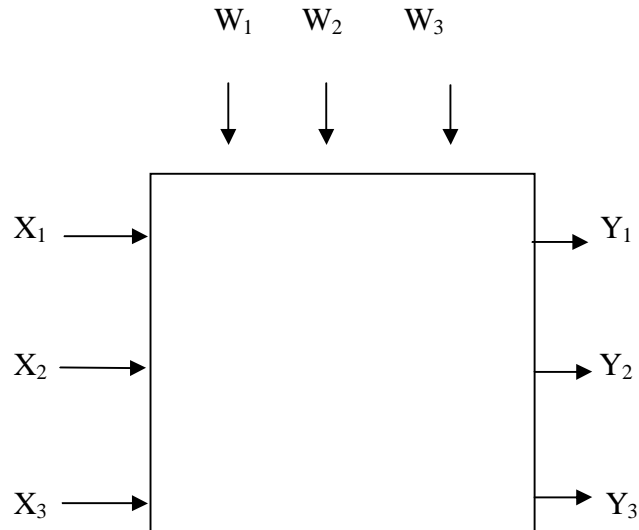
### IV. 3. Objectifs et avantages

Pour les scientifiques, le grand intérêt de toutes méthodes est d'arriver à l'interprétation scientifique de chaque résultat obtenu par l'expérience faite sur chaque

## Chapitre IV Les Méthodes de planification des expériences

---

objet à étudier. Sur cette figure, on remarque l'existence de trois grandeurs différentes qui caractérisent le fonctionnement de l'objet :



Figure(IV.1) : Représentation schématique des grandeurs

Lors de l'étude expérimentale d'un objet

- $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_L$  : les variables de sortie au niveau de l'objet à étudier.
- $X_1, X_2, X_3, \dots, X_L$  : les grandeurs fonctionnelles de l'objet à étudier, peuvent être variables suivant nos objectifs.
- $W_1, W_2, W_3, \dots, W_L$  : les grandeurs incontrôlables à cause de leurs variations (parasites).

La méthode de planification des expériences est une méthode multifactorielle utilisée pour l'analyse et le traitement des données dans le domaine technologique.

Cette dernière apporte deux avantages fondamentaux :

- Elle est efficace pour l'étude des processus comportant beaucoup de variables indépendantes, son efficacité réside dans la variation de ces variables simultanément.
- Acheminement rapide sur la zone de l'optimum, en assurant l'exactitude des résultats.
-

## Chapitre IV Les Méthodes de planification des expériences

---

### IV .4. Notions de statistiques :

#### IV.4.1. Diagramme de distribution:

##### a) Construction du diagramme de distribution:

La distribution se constitue par la détermination des classes, le calcul des fréquences et des fréquences relatives. Le nombre de classes se détermine par la relation [20].

$$K= 1 + \log_2 n \dots\dots\dots (IV.1)$$

Où: K : nombre de classes ; N : effectif total de l'échantillon

La dimension de la classe est déterminée par :

$$h = \frac{X_{max} - X_{min}}{K} \dots\dots\dots (IV.2)$$

$X_{max}$  : valeur maximale dans l'échantillon étudié

$X_{min}$  : valeur minimale dans l'échantillon étudié

A partir de cette valeur, on détermine les limites de chaque intervalle qui correspond à chaque classe:

$$X_i = X_{i-1} + h \dots\dots\dots(VI.3)$$

Une fois les classes sont déterminées, on calcule la fréquence relative de chacune:

$$f_i = n_i / n \dots\dots\dots(VI.4)$$

Ici  $0 \leq n_i / n \leq 1$ , et la somme des fréquences relatives est égale à 1.

##### b) Ajustement linéaire (droite de régression):

L'objectif est de remplacer le nuage de point par une droite [21]. Ces points se rapprochent d'une droite ayant l'équation  $Y = a + bx$  , la méthode des moindres carrés

## Chapitre IV Les Méthodes de planification des expériences

---

consiste à déterminer un couple unique de valeur a et b tel que  $\sum (ax_i + b - y_i)^2$  soit un minimum.

On appelle la droite obtenue droite de régression de Y par rapport à X. Cette droite passe par le point moyen M0 (centre de gravité du nuage) et ayant les coordonnées  $(\bar{X}, \bar{Y})$ .

La pente de cette droite de régression:

$$b = \frac{\sum(x_i - \bar{X}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{X})^2} = \frac{cov(x, y)}{Var(x)} \dots\dots\dots(VI.5)$$

Aussi:

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \dots\dots\dots(VI.6)$$

On définit de même, la droite de régression X par rapport à y de pente:

$$\hat{b} = \frac{cov(x, y)}{Var(y)} \dots\dots\dots(VI.7)$$

Aussi:

$$\hat{a} = \bar{X} - \hat{b}\bar{Y} \dots\dots\dots(VI.8)$$

Le coefficient de corrélation sera:

$$r = \frac{cov(x, y)}{\sqrt{Var(x) \cdot Var(y)}} \dots\dots\dots(VI.9)$$

Où

$$r^2 = b \cdot \hat{b} \dots\dots\dots(VI.10)$$

Les deux droites de régression forment entre elles un angle  $\theta$  appelé angle de régression avec lequel la corrélation peut être:

- moyenne, si :  $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$  et  $0 < r < 1$
- maximale, si :  $\theta = 0^\circ$  et  $r = 1$
- minimale, si :  $\theta = \frac{\pi}{2}$  et  $r = 0$

c) Test de conformité:

Le test de conformité (Khi-deux) relatif à chaque échantillon permet de vérifier la conformité de la répartition expérimentale à une répartition théorique choisie. Il permet donc de vérifier la qualité d'ajustement de la distribution en question à une distribution normale uniforme [22]. Le teste expérimental  $\chi_{exp}^2$  se calcule comme suit:

$$\chi_{exp}^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(n_i - np_i)^2}{n \cdot p_i} \dots\dots\dots(VI.11)$$

Avec:

$n_i$  : effectif de chaque classe

$n$  : effectif total

$$p_i = y_{i+1} - y_i \dots\dots\dots(VI.12)$$

IV .5. Plans d'expériences:

Les méthodes statistiques de planification des expériences sont utilisées pour l'analyse et le traitement des données expérimentales, elles sont efficaces pour l'étude des processus comportant beaucoup de variables indépendantes. Ces méthodes permettent la variation de la variable dépendante Y, quand les variables indépendantes ( $X_1, X_1, \dots, X_n$ ) varient. On envisage alors une variation simultanée de tous les paramètres influents sur le phénomène étudié, ce qui permet de constater quelle est la force d'interaction entre les paramètres, et donc de réduire le nombre total d'expériences.

De ce fait l'expérimentateur est confronté par le choix d'un plan d'expériences, lui permettant d'aboutir au résultat recherché sans exiger un nombre élevé d'essais [20].

## Chapitre IV Les Méthodes de planification des expériences

### IV.5.1. Plan d'expériences de premier ordre:

#### a) Plan d'expériences de type $2^k$ :

Dans un plan d'expériences de type  $2^k$ , chaque facteur comprend deux niveaux avec les valeurs +1 et -1. Si  $k=3$  les points d'expériences se trouvent sur les sommets d'un cube. On constate que l'air de l'optimum se situe au niveau de la surface ombrée

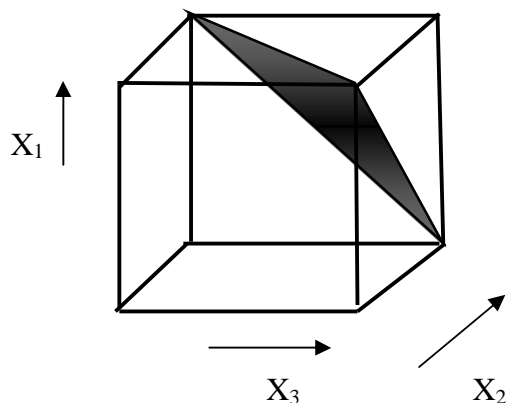


Figure (IV.2) : Représentation du plan de type  $2^3$  [20].

Pour deux facteurs le domaine d'étude est un carré complet. Le modèle mathématique est modèle du premier degré par rapport à chaque facteur. Le modèle est :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + E \dots\dots\dots(VI.13)$$

Avec :

Y : réponse

$b_0$  : valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.

$b_1$  : effet du facteur 1.

$b_2$  : effet du facteur 2.

$b_{12}$  : interaction entre les facteurs.

E : résidus.

#### b) Plan d'expériences simplifié de type $2^{k-P}$ :

Pour l'étude de quatre, cinq ou plusieurs paramètres, les plans d'expériences de type

## Chapitre IV Les Méthodes de planification des expériences

$2^k$  nécessitent un nombre important d'expériences. A cause des interactions de faibles influences, il y a possibilité de réduire le nombre d'expériences. Un plan de type  $2^7$  nécessite

128 expériences, il pourra être remplacé par un plan simplifié de type  $2^{5-2}$  par exemple pour devenir un plan de type  $2^3$ , nécessitant huit expériences seulement avec une précision peu réduite.

### IV.5.2. Plans d'expériences de deuxième ordre:

On utilise un plan de deuxième degré généralement lorsque le modèle mathématique issu d'un plan de premier ordre n'est pas adéquat, malgré les répétitions des expériences douteuses.

Les plans de deuxième ordre nécessitent un temps considérable, c'est pour ça qu'uniquement les paramètres les plus influents seront maintenus.

#### a) Plan d'expériences de type $3^K$ :

Dans une expérience de type  $3_3$  par exemple, chaque paramètre comprend trois niveaux, avec les valeurs -1, 0, et +1, et en cas de nécessité, il peut avoir jusqu'à cinq niveaux  $-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$ .

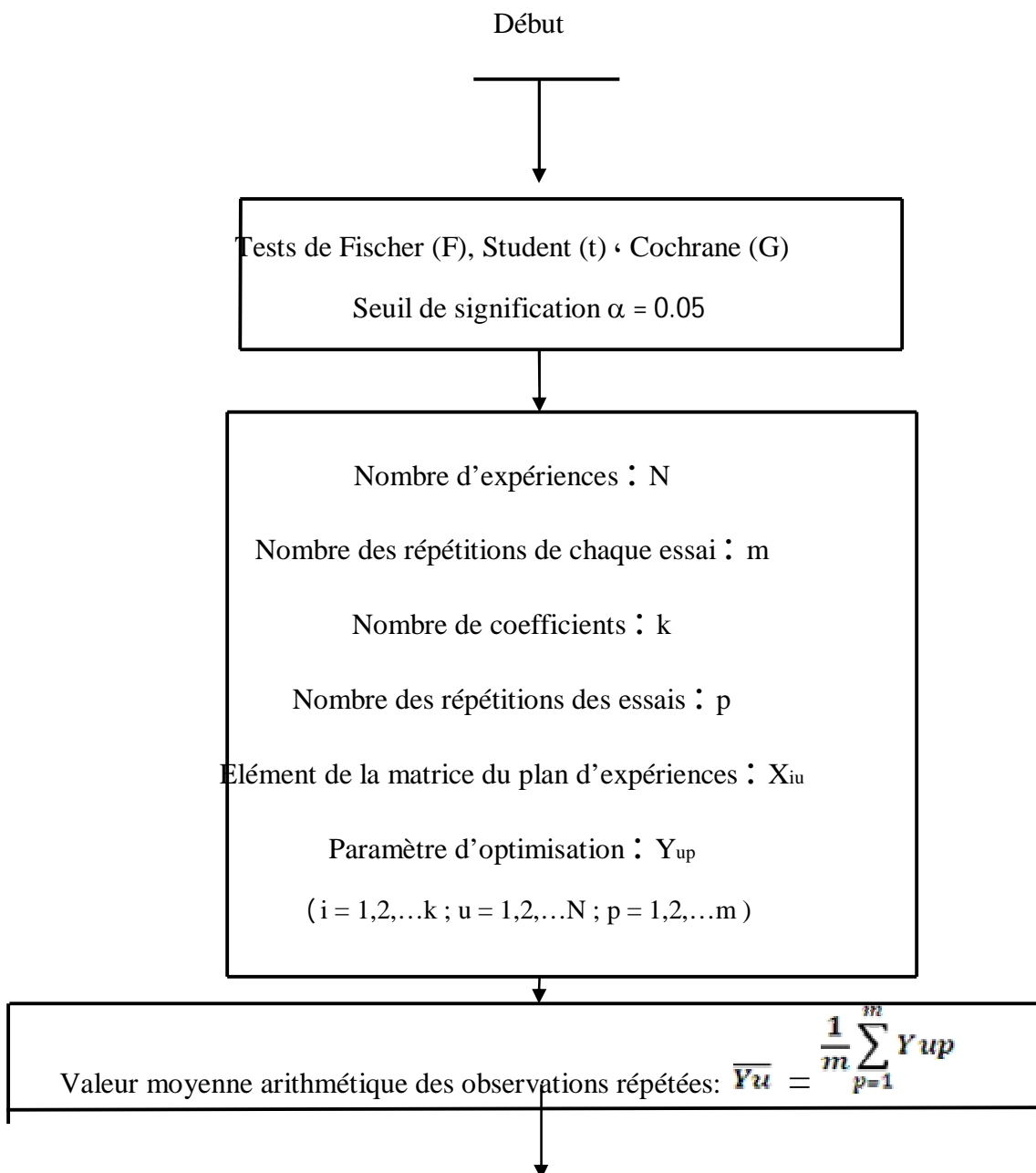
N° Exp	Matrice des variables indépendantes										Matrice de réponse			
	$X_0$	Matrice du plan					$X_1^* = X^*k$					$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
	$X_1$	$X_2$	.....	$X_k$	$X_1X_2$	$X_iX_j$ .....	$X_{k-1}X_k$	$X_1^2-2/3$	.....	$X_k^2-2/3$				
1	1	-1	-1	.....	-1	+1	.....	-1	1/3	1/3				
2	1	+1	-1	.....	-1	-1	.....	+1	1/3	1/3				
-	-													
n	n	0	0	.....	0	0.....	0	.....	0	-2/3	-2/3			
	$\bar{y}$	$b_1$	$b_2$	.....	$b_k$	$b_{12}$	$b_{ij}$	$b_{k-1;k}$	$b_{11}$	$b_{kk}$				

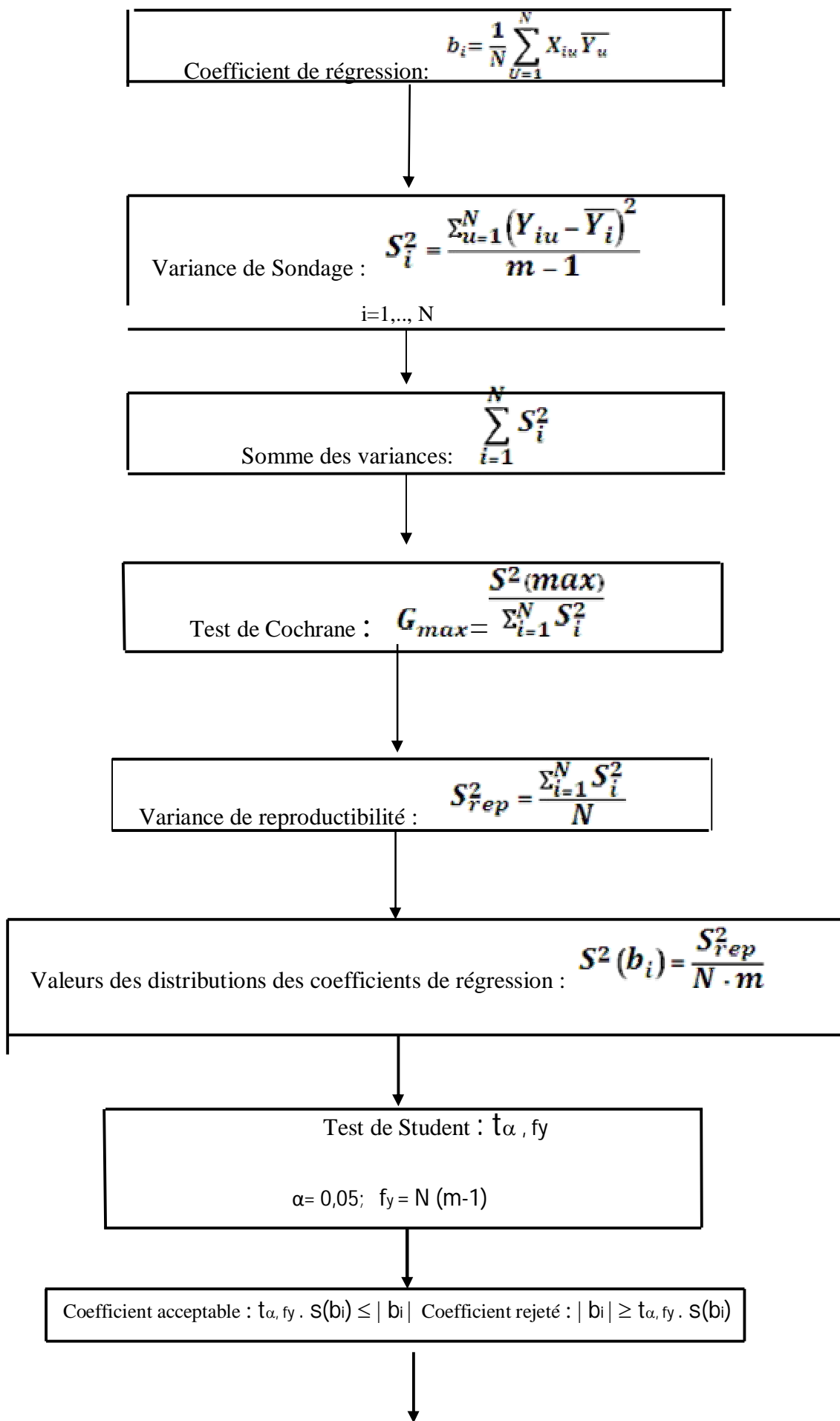
Tableau (IV.1) : Matrice standard pour un plan de type  $3^k$  [17].

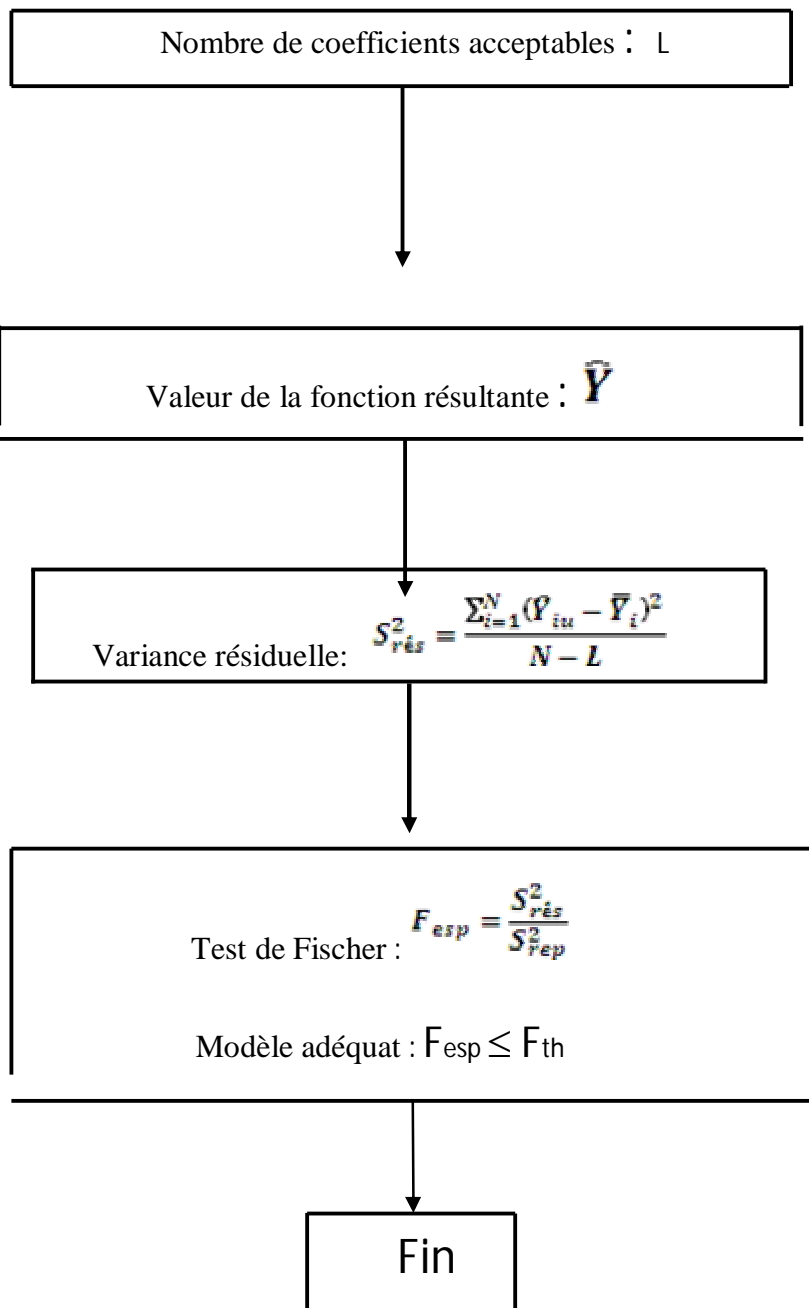
**IV .6. Analyse de régression:**

Une fois le modèle mathématique est obtenu (équation de régression), on procède à l'analyse statistique des résultats. Cette analyse a pour but de vérifier la signification des coefficients de régression et l'adéquation du modèle selon l'algorithme (IV.1) suivant:

Algorithme de calcul







# *Chapitre V*

## *Etude expérimentale*

### ***V.1. Introduction***

Ce chapitre présente les travaux expérimentaux effectués dans le cadre de ce projet. Des essais d'impact de balle ont été réalisés pour déterminer la pénétration de la balle dans des plaques en matériaux composites à base de fibres de verres.

Le chapitre commence par la présentation des matériaux composites utilisés pour les essais. La fibre et la matrice et leurs propriétés sont présentées. La préparation des plaques est décrite dans la partie suivante. Après le choix des paramètres influents sur la résistance à l'impact des matériaux composites tels que le type et l'orientation des fibres, le choix du plan d'expérience est nécessaire. Ensuite, les moyens et la procédure d'essai sont présentés et à la fin du chapitre on a présenté les résultats obtenus dans des tableaux.

### ***V. 2. Matériaux utilisés***

Les fibres aramides (Kevlar) présentent les meilleures caractéristiques de résistance aux impacts, mais malheureusement se n'est pas facile de les trouver sous forme de matières premières, cela nous a obligé de choisir les fibres de verre qui ont aussi de bonnes propriétés de résistance à l'impact.

Les échantillons sont des plaques en matériaux composites à base de fibres de verres de dimensions 250 X 250 mm<sup>2</sup> et d'épaisseur moyen de 13 mm;

- **Présentation des plaques**

1. Un stratifié composé de 18 couches de **Mat de verre** de **450g/m<sup>2</sup>** (fibres coupées d'orientations aléatoires), le matériau est élaboré par moulage.
2. Un stratifié composé de 24 couches de tissu de verre, les couches sont superposées avec une même orientation, **[0°]<sub>20</sub>**, le matériau est élaboré par moulage.
3. Un stratifié composé de 24 couches de tissu de verre, les couches sont superposées avec une orientation de 45° l'une sur l'autre, **[0°,45°]<sub>10</sub>**, le matériau est élaboré par moulage.
4. Un stratifié composé de 18 couches de tissu de verre plus une couche de grille en acier **G** au milieu, les couches sont superposées avec une orientation de 45° l'une

sur l'autre avec une symétrie par rapport au grille,  $[(0^\circ, 45^\circ)_5 \bar{G}]_S$ , le matériau est élaboré par moulage.

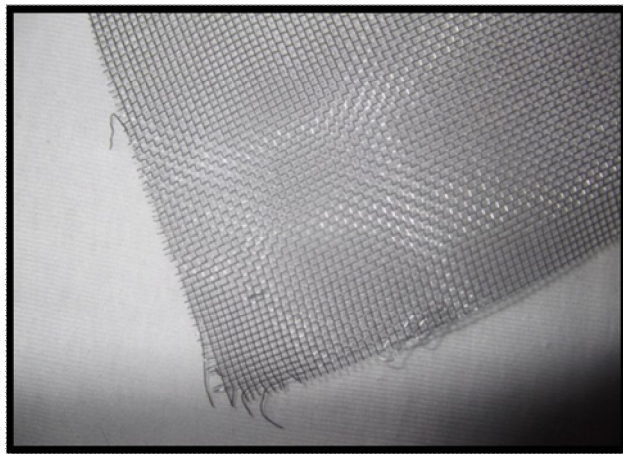
5. Un stratifié composé de 16 couches de tissu de verre plus deux (2) couches de grille en acier  $G$ , les couches sont superposées avec une orientation de  $45^\circ$  l'une sur l'autre avec une symétrie par rapport au grille,  $[(0^\circ, 45^\circ)_4 G, (0^\circ, 45^\circ)]_S$ , le matériau est élaboré par moulage.

6. Un stratifié composé de 16 couches de tissu de verre plus trois (3) couches de grille en acier  $G$ , les couches sont superposées avec une orientation de  $45^\circ$  l'une sur l'autre avec une symétrie par rapport au grille,  $[(0^\circ, 45^\circ)_2 \bar{G}]_2 S$ , le matériau est élaboré par moulage.

- **Fibres utilisées pour la fabrication des échantillons**

- Fibre de verre (E) :

Ce sont des borosilicates d'alumine à très faible teneur en oxydes des métaux alcalins développées pour leurs bonnes propriétés électriques d'isolation, de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leurs cout modéré, ils représentent 96% du marché mondial des fibres de verre de renforcement.



- Grille de Tamis :

C'est un filet très fin en acier, le diamètre des files est de 0,1mm.

**Figure(V.1) : Représentation de la grille de tamis utilisé pour le renforcement des plaques.**

- **Matrice utilisé**

- Polyester :

La résine utilisée est *SIRESTER FS 0993LP*, c'est une résine polyester insaturé orthophtalique, diluée au styrène, moyennement réactive et à faible viscosité [23].

**Propriétés Mécaniques en durcies et les caractéristiques:**

<i>Propriétés</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
<i>Dureté Barcol</i>	30	
<i>Résistance à la flexion</i>	60	Mpa
<i>Module d'élasticité en flexion</i>	1500	Mpa
<i>Résistance à la traction</i>	30	Mpa
<i>Module d'élasticité en traction</i>	1500	Mpa
<i>Allongement à la rupture</i>	20	%
<i>Teneur en styrène</i>	37	%
<i>Stabilité à 65°C</i>	6	Jour
<i>Temps de gel à 25°C</i>	11	Minute
<i>Teneur en styrène</i>	37	%

*Tableau(V.1): Propriétés de la matrice polyester utilisée [23]*

**Tissus et mat utilisés :**

Dans nos expériences on a utilisé deux formes de tissus ou de Mat de verre la *Mat450g/m<sup>2</sup>* et le tissu sous forme de toile.



Figure(V.2) : Mat 450g/m<sup>2</sup>



Figure(V.3) : Toile ou Taffetas

### ***V.3. Préparation des plaques***

Les plaques ont été réalisées au niveau de la société FIPEXPLAST (Société de Films et Polystyrène Expansé) de chlef.

Pur la préparation des plaques on a utilisé les outils et les produits suivants :

- La fibre de verre (les deux formes citées)
- Le filet ou le squelette en acier
- La résine polyester
- L'accélérateur
- Le catalyseur
- La cire : C'est elle qui va permettre le démoulage
- Le gel coat : Il assure la finition de la pièce

Autres outils indispensables :

- Le rouleau ébulleur : Pour éliminer ou minimisé les bulles d'air dans le matériau
- Un pinceau
- Une seringue pour pouvoir doser de faibles quantités de l'accélérateur

- Un balance
- De l'acétone
- Des chiffons doux

La pièce (moule) sur laquelle la plaque sera faite doit être propre et dégraissée et elle doit être imperméable. De plus elle ne pourra présenter de « contre-dépouille », c'est-à-dire une forme qui interdisant le démoulage.

- Nettoyage du moule à l'aide du coton sèche.
- On passe une couche de cire de démoulage soigneusement en allant dans tous les coins.
- Après séchage, lustrage soigné : le moule doit devenir brillant.
- Le cirage et lustrage doivent être effectués 3 fois (un mauvais cirage et un mauvais lustrage conduiront à un mauvais démoulage.
- On prépare une découpe de Mat ou de tissu de verre.
- On prépare la résine en ajoutant l'accélérateur toujours selon la proportion de 2%
- On tartine le moule que l'on fixe sur un support.
- On pose la 1<sup>ère</sup> couche de mat ou de tissu de verre et à l'aide du pinceau, on imprègne la fibre de verre.
- A l'aide du rouleau ébulleur, on imprègne totalement la fibre à force de passages répétés sur l'ensemble de la pièce. Les bulles doivent disparaître.
- Selon l'épaisseur de la plaque demandée on placera les couches et on répète l'opération jusqu'à l'obtention de cette épaisseur, la résine doit déborder de la pièce.
- Après 8 heures de séchage on commence par éliminer ce qui dépasse et on démoule notre plaque.

### ***VI.4. Le choix des paramètres***

Beaucoup d'études ont abordés le comportement au choc des matériaux composites à matrice polymérique, ces études confirment que le comportement des composites soumis à des impacts balistiques est influencée par les propriétés de matériau et les paramètres d'expérimentation.

Le choix des facteurs influents sur le comportement des composites à l'impact de balle a été fait sur la base des connaissances préliminaires de l'étude bibliographique détaillée au chapitre III.

Après l'étude bibliographique et suivant les moyens disponibles on a amené à choisir les facteurs suivants :

- La forme et l'orientation des fibres utilisées
- La distance de projection de la balle

### ***V.5. Choix du plan d'expérience***

Comme on a deux facteurs, pour les deux types de plaques, l'orientation des fibres varie sur trois(3) niveaux et la distance à la quelle on tire la balle varie sur deux (2) niveaux, le choix d'un plan composé est acceptable, nécessitant  $2^1 \cdot 3^1 = 6$  expériences, pour chaque type de plaque.

- La distance de tire ( $X_1$ ) varie sur deux niveaux :  $\{10m, 20m\}$
- L'orientation des fibres ( $X_2$ ) varie sur trois niveaux :  $\{orientation\ aléatoire, 0^\circ, 45^\circ\}$

Et pour les plaques renforcées avec le squelette en acier on a :

- La distance de tire ( $X_1$ ) varie sur deux niveaux :  $\{10m, 20m\}$
- Le nombre de couches du grille de tamis :  $\{1couche, 2couches, 3couches\}$

N°	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub> <sup>*</sup>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	$\bar{Y}_i$
1	+	-	-	+	1/3	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>	
2	+	+	0	0	-2/3	Y <sub>21</sub>	Y <sub>22</sub>	Y <sub>23</sub>	
3	+	-	+	-	1/3	Y <sub>31</sub>	Y <sub>32</sub>	Y <sub>33</sub>	
4	+	+	-	-	1/3	Y <sub>41</sub>	Y <sub>42</sub>	Y <sub>43</sub>	
5	+	-	0	0	-2/3	Y <sub>51</sub>	Y <sub>52</sub>	Y <sub>53</sub>	
6	+	+	+	+	1/3	Y <sub>61</sub>	Y <sub>62</sub>	Y <sub>63</sub>	

Tableau(V.2): Plan de type 3<sup>1</sup>. 2<sup>1</sup>

### V.6. Procédure des expériences

Pour étudier la résistance des matériaux composites soumis à des impacts de balles on a utilisé la même arme, *pistolet Makarov*, avec les mêmes conditions géométriques de la balle, *balle de 9 mm*, et on a répété la même expérience pour les deux types de plaques (*les plaques sans squelette d'acier et les plaques avec squelette*).

Une fois à une distance de *10 m* et une fois à *20 m*, et suivant les plants d'expériences choisis on tire sur les plaques avec la même arme (en gardant la même position et le même angle de projection), et à la fin on mesure la perforation de la balle. L'ensemble des essais a été triplé pour chaque condition expérimentale. La valeur finale est obtenue en faisant la moyenne des trois mesures.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau (V.3) pour les plaques avec squelettes, et dans le tableau (V.4) pour les plaques sans squelette.

N°	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub> <sup>*</sup>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	$\bar{Y}_i$
1	+	-	-	+	1/3	10,13	11,15	9,1	
2	+	+	0	0	-2/3	8,85	9,8	10,6	
3	+	-	+	-	1/3	7,96	10,1	8,8	
4	+	+	-	-	1/3	10,3	7,28	8,35	
5	+	-	0	0	-2/3	8,35	9,8	7,12	
6	+	+	+	+	1/3	5,9	6,15	5,85	

Tableau(V.3): Résultats des essais pour les plaques avec du tamis en acier

N°	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub> <sup>*</sup>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	$\bar{Y}_1$
1	+	-	-	+	$\frac{1}{3}$	/	/	/	
2	+	+	0	0	$-\frac{2}{3}$	5,22	6,20	4,30	
3	+	-	+	-	$\frac{1}{3}$	7,10	7,25	9,25	
4	+	+	-	-	$\frac{1}{3}$	/	/	/	
5	+	-	0	0	$-\frac{2}{3}$	3,75	3,41	3,65	
6	+	+	+	+	$\frac{1}{3}$	6,85	6,65	6,55	

*Tableau(V.4): Résultats des essais pour les plaques sans tamis*

## *Chapitre VI*

### *Résultats et discussions*

## Chapitre VI Résultats et discussions

• Pour pouvoir analyser les résultats, on doit procéder à la détermination des modèles mathématiques à coefficients significatifs issues de la présente expérimentation. En suivant l'organigramme (IV.1), du (chapitre IV).

### VI.1. Analyse de l'équation de régression pour les plaques avec tamis :

L'analyse de l'équation de régression se fait à l'aide de l'organigramme (IV.1) :

1) On détermine la moyenne des résultats des essais grâce à la formule suivante :

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m y_{iu} \dots\dots\dots(VI.1)$$

$$\text{Ou} : \begin{cases} i=1,2,\dots,N \\ u=1\dots m \end{cases}$$

N : Nombre d'expériences → N = 6

M : Nombre de répétition de chaque expérience → m = 3

N°	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub> <sup>*</sup>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	$\bar{Y}_i$
1	+	-	-	+	1/3	10,13	11,15	9,1	<b>10,12</b>
2	+	+	0	0	-2/3	8,85	9,8	10,6	<b>9,75</b>
3	+	-	+	-	1/3	7,96	10,1	8,8	<b>8,95</b>
4	+	+	-	-	1/3	10,3	7,28	8,35	<b>8,64</b>
5	+	-	0	0	-2/3	8,35	9,8	7,12	<b>8,2</b>
6	+	+	+	+	1/3	5,9	6,15	5,85	<b>5,96</b>

**Tableau(VI.1): Moyennes des résultats des essais pour les plaques avec du tamis en acier**

2) On désigne la variance de sondage par la formule (VI.2) :

$$S_i^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_i)^2}{m - 1} \dots\dots\dots(VI.2)$$

-  $S_1^2 = 1,0507$

-  $S_2^2 = 0,7675$

-  $S_3^2 = 1,1625$

-  $S_4^2 = 1,4619$

-  $S_5^2 = 1,7966$

-  $S_6^2 = 0,0259$

3) On calcul la somme des variances de sondage :

$$\sum_{i=1}^N S_i^2 = 6,2651 \quad ; \text{ Pour } N= 6$$

4) On forme le rapport suivant :

$$G_{max} = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} \dots\dots\dots(VI.3)$$

Où :

$S_{max}^2$ : La valeur maximale de variance de sondage

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{max}^2 = 1,7966 \\ \sum_{i=1}^N S_i^2 = 6,2651 \end{array} \right.$$

Donc :  $G_{max} = 0,28$

La valeur tabulée du critère de Cochran avec un seuil de 0,05 est :  $G_t = 0,6161$  ;

$G_t$  : Représente La valeur tabulée du critère de Cochran (voir annexe I).

5) On applique le test de Cochran :

Du fait que :  $G_{max} < G_t$  alors, les variances de sondage sont homogènes.

6) On calcul la variance de reproductibilité par la formule (VI.4) :

$$S_{rep}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} \dots\dots\dots (VI.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N S_i^2 = 1,2651 \\ N = 6 \end{array} \right.$$

Donc :  $S_{rep}^2 = 1,044$

7) On calcul les coefficients de régression par les formules suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u \dots\dots\dots (VI.5) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{ii} = \frac{\sum X_i \bar{Y}_i}{\sum (X_i)^2} \dots\dots\dots (VI.6) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_0 = \bar{Y} - \frac{2}{3} \sum_1^K b_{ii} \dots\dots\dots (VI.7) \end{array} \right.$$

$$b_0 = \bar{Y} - \frac{2}{3} b_{22} \dots\dots\dots (VI.8)$$

[  $b_0 = 8,19$  ;  $b_1 = -0,523$  ;  $b_2 = -0,962$  ;  $b_{12} = -0,377$  ;  $b_{22} = -0,668$  ]

8) On obtient le modèle suivant :

$$Y_1 = 8,19 - 0,523 X_1 - 0,962 X_2 - 0,377 X_1 X_2 - 0,668 X_2^2 \dots\dots\dots(VI.9)$$

9) Signification des coefficients de régression:

Si :  $|b_i| \geq \Delta b_i$  ; alors les coefficients sont significatifs

L'intervalle de coefficients de régression pour  $\alpha = 0,05$  est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta b_i = \pm t_{\alpha, f_y} \cdot S(b_i) \dots\dots\dots(VI.10) \\ t_{\alpha} = 1,782 \quad \text{(voir annexe II)} \end{array} \right.$$

10) On calcul la dispersion des coefficients de régression par la formule (VI.11)

$$S^2(b_i) = \frac{S_{\text{rep}}^2}{N \cdot m} \dots\dots\dots(VI.11)$$

Pour :  $m=3$  et  $N=6$  ;  $\left\{ \begin{array}{l} S(b_i) = 0,24 \\ t_{\alpha, f_y} = 1,782 \end{array} \right.$  On trouve :  $\Delta b_i = 0,42$

11) Signification des coefficients de régression :

$ b_0  = 8,19$	$>$	$0,42$	$\rightarrow$	$b_0$ est significatif	}	L= 4
$ b_1  = 0,523$	$>$	$0,42$	$\rightarrow$	$b_1$ est significatif		
$ b_2  = 0,962$	$>$	$0,42$	$\rightarrow$	$b_2$ est significatif		
$ b_{12}  = 0,377$	$<$	$0,42$	$\rightarrow$	$b_{12}$ n'est pas significatif		
$ b_{22}  = 0,668$	$>$	$0,42$	$\rightarrow$	$b_{22}$ est significatif		

12) On maintient le modèle ayant uniquement les coefficients de régressions significatifs

$$Y_1 = 8,19 - 0,523 X_1 - 0,962 X_2 - 0,668 X_2^2 \dots\dots\dots(VI.12)$$

Sachant que  $X_2^* = X_2^2 - 2/3$ , alors le modèle aura la forme :

$$Y_1 = 8,63 - 0,523 X_1 - 0,962 X_2 - 0,668 X_2^2 \dots\dots\dots(VI.13)$$

13) On calcule les  $\hat{Y}_i$  en remplaçant les valeurs des facteurs indépendants ( $X_1, X_2, \dots$ ) dans le modèle mathématique.

$$\hat{Y}_1 = 9,44$$

$$\hat{Y}_2 = 8,11$$

$$\hat{Y}_3 = 7,52$$

$$\hat{Y}_4 = 8,4$$

$$\hat{Y}_5 = 9,15$$

$$\hat{Y}_6 = 6,47$$

14) On calcule la variance résiduelle par la formule (VI.14) :

$$S_{res}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2}{N - L} \dots\dots\dots(VI.14)$$

L : Nombre de coefficients significatifs, L= 3 et N= 6

$$S_{res}^2 = 3,023$$

15) Teste de Fisher :

$$F_{exp} = \frac{S_{res}^2}{S_{rep}^2} \dots\dots\dots(VI.15)$$

Pour :  $S_{rés}^2 = 3,023$  et  $S_{rep}^2 = 1,044$

On trouve :  $F_{exp} = 2,89$

- Pour que le modèle soit adéquat il faut que :  $F_{exp} < F_{th}$

$F_{th}$  ( $f_1, f_2$ ) est déterminé pour  $[N-L, N(m-1)]$  ;

Donc,  $F_{th}(2, 12) = 3,88$

$$F_{exp} = 2,89 < F_{th} = 3,88$$

Le test de Fisher est vérifié, le modèle mathématique est donc adéquat et il aura comme surface de réponse (Figure VI.1) :

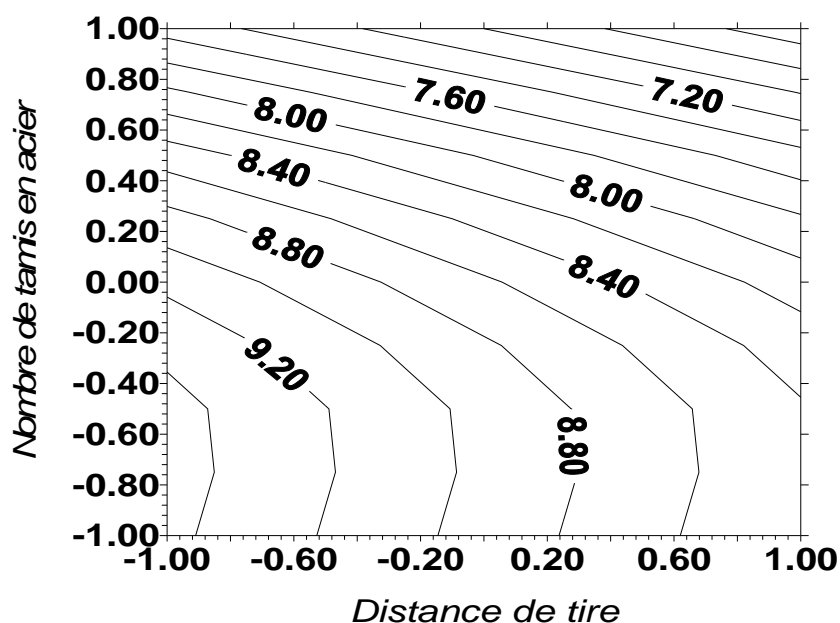


Figure VI.1) : Effet de la distance de tire et du nombre de tamis sur la profondeur de pénétration

La figure (VI.1) montre l'effet de la distance de tire et du nombre de tamis sur la profondeur de pénétration. A partir de la surface de réponse, nous constatons que la profondeur de pénétration des balles décroît non linéairement et lentement puis linéairement et rapidement.

L'emplacement de deux ou trois tamis ne pouvait montrer son importance, car même un seul tamis n'a pas été percuté mais seulement embouti, cela est du peut être à la distance

## Chapitre VI Résultats et discussions

minimale qui été de 10m (moyens non disponibles pour aller au dessous de cette distance) et peut être aussi du aux défauts causés par la difficulté de réalisation des stratifiés avec plus qu'une seule couche de tamis (surtouts les bulles d'air). La profondeur maximale de pénétration des balles dans les éprouvettes était de 9.40 mm sur une épaisseur de 15 mm.

- Pour les résultats du tableau (V.4) on a éliminé les deux expériences 1 et 2 car les résultats ne sont pas acceptables, c'est-à-dire toutes les balles tirées sur la 1<sup>er</sup> plaque percute totalement cette dernière, alors la plaque n'as pas pue résistée et elle n'a pas donnée des résultats acceptables.

Le tableau (VI.4) devient comme suite :

N°	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	$\bar{Y}_i$
1	+	-	-	+	5,22	6,20	4,30	<b>5,24</b>
2	+	+	-	-	7,10	7,25	9,25	<b>7,86</b>
3	+	-	+	-	3,75	3,41	3,65	<b>3,60</b>
4	+	+	+	+	6,85	6,65	6,55	<b>6,68</b>

*Tableau(VI.2): Résultats acceptables des essais pour les plaques sans grille de tamis*

### VI.2. Analyse de l'équation de régression pour les plaques non renforcées :

On suit la même procédure de l'analyse, suivant l'organigramme (IV.1)

(N = 4 , m = 3)

- La variance de sondage :

$$\sum_{i=1}^N S_i^2 = 2,3979$$

- La variance de reproductibilité :

$$S_{rep}^2 = 0,5992$$

- Le modèle s'écrit :

$$Y_2 = 5,845 + 1,420 X_1 - 0,705 X_2 + 0,115 X_1 X_2 \dots\dots\dots(VI.15)$$

- Signification des coefficients de régression :

$$S(b_i) = 0,223 ; t_{\alpha, f_y} = 1,860$$

$$\Delta b_i = 0,4155$$

- Les coefficients significatifs :

$$\begin{array}{l} |b_0| = 5,845 > 0,4155 \dots\dots \text{Significatif.} \\ |b_1| = 1,425 > 0,4155 \dots\dots \text{Significatif.} \\ |b_2| = 0,705 > 0,4155 \dots\dots \text{Significatif.} \\ |b_{12}| = 0,115 < 0,4155 \dots\dots \text{N'est pas significatif} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} |b_0| \\ |b_1| \\ |b_2| \\ |b_{12}| \end{array}} \right\} L=3$$

- On maintient le modèle

$$Y_2 = 5,845 + 1,425 X_1 - 0,705 X_2$$

- La variance résiduelle :

$$S_{res}^2 = 0,0529$$

- Test de Fisher :

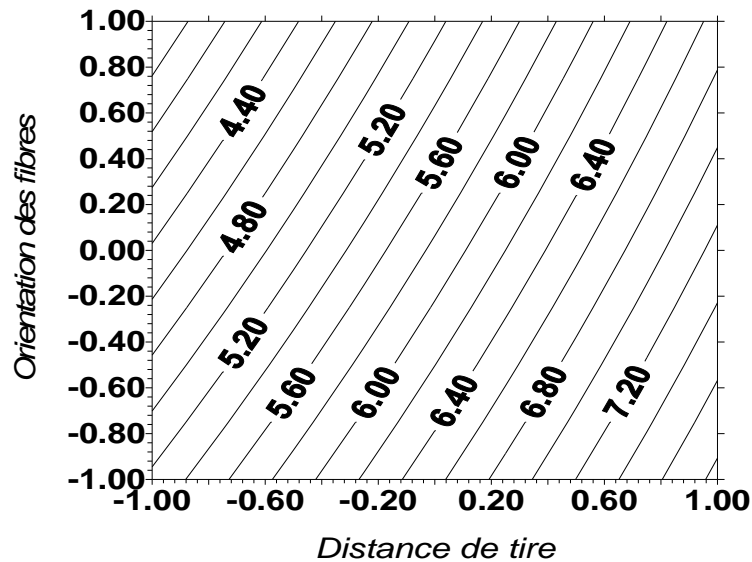
$$F_{exp} = 0,088$$

$F_{th}(f_1, f_2)$  est déterminé pour  $[N-L, N(m-1)]$  ; pour (1, 8)

$$F_{th} = 5,32$$

$$F_{exp} (0,088) < F_{th}(5,32)$$

Le teste de Fisher est vérifié alors le modèle est pas adéquat, le modèle mathématique est donc adéquat et il aura comme surface de réponse (Figure VI.2) :



*(Figure VI.2) : Effet de la distance de tire et de l'orientation des fibres du composite sur la profondeur de pénétration des balles*

La figure (VI.2) représente l'effet de la distance de tire et l'orientation des fibres sur la profondeur de pénétration dans un matériau composite. La surface de réponse montre une décroissance linéaire de la profondeur de pénétration des balles dans le composite avec l'augmentation de l'angle de tissage vers  $45^\circ$ . Pour une distance de 14,40 mètres par exemple, la profondeur de pénétration dans un composite tissé à  $0^\circ$  est de 6,40 mm, alors qu'à un tissage à  $45^\circ$ , la profondeur pour la même distance de tire est de 5 mm.

## *Conclusion Générale*

## Conclusion générale

---

La production de matériaux composites se développe rapidement. Ces matériaux apportent à leurs utilisateurs des avantages importants grâce à leurs nombreuses propriétés : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes, etc..... Se sont des matériaux qui présentent la particularité d'avoir un comportement mécanique différent de celui de leur constituons pris individuellement et, même parfois, leur caractéristiques mécaniques sont supérieurs aux alliages pour des masses inférieures.

Ces avantages multiplient leurs domaines d'application : secteur industriel, transport comme l'automobile, camionnage, navale, ferroviaire et aéronautique, et aussi d'autres secteurs comme le bâtiment ou encore des équipements "sports et loisirs".

Actuellement, ces matériaux sont très intéressants dans le domaine de sécurité, la protection personnelle et blindage avec produits balistiques. Par exemple, grâce à la résistance au choc élevée de la fibre de Kevlar, il est actuellement utilisé dans le domaine balistique (Gillet pare-balle). Par contre le kevlar reste très chère par rapport aux fibres de verres se qui favorise l'utilisation de ce dernier dans le domaine automobile.

Le but principal de ce mémoire est d'entamer une étude préliminaire du comportement aux chocs, sous impact de balle, des matériaux composites à base de fibres de verres.

La préparation des échantillons a été faite manuellement se qui peut causer des différences dans les dimensions et les propriétés des plaques.

Les essais sont effectués avec la même arme avec les mêmes conditions géométriques de la balle afin d'appliquer la même énergie sur tous les échantillons.

Les résultats obtenus dans le dernier chapitre montrent :

- Pour les plaques sans grille de tamis, les résultats montre que la profondeur de pénétration dans un matériau composite à fibre de verre est liée à l'angle d'orientation des fibres. La plaque réalisée avec des fibres de verres, coupées est aléatoirement superposées, a une résistance aux chocs très faible par rapport aux autres plaques car elle était totalement percutée par les balles. Par contre nous avant remarquer que les deux autres plaques (angle de  $0^\circ$  et  $45^\circ$ ) sont réussies à arrêter les balles de 9mm, en plus on remarque que la profondeur de pénétration se décroît avec l'augmentation de l'angle de tissage, une distance de 14,40 mètres par exemple, la profondeur de pénétration dans un composite tissé à  $0^\circ$  est

## Conclusion générale

---

de 6,40 mm, alors qu'à un tissage à 45°, la profondeur pour la même distance de tire est de 5 mm.

- Pour les plaques renforcés avec le grille de tamis, l'utilisation d'une seule couche de tamis avec les fibres de verres a été suffisante pour arrêter les balles et ça favorise leur utilisation afin de minimiser le nombre de couches de fibres de verres ou de kevlar. La réalisation de ces plaques a été un peu difficile car le tamis utilisé n'était pas spécialement destiné à ce genre d'utilisation, ceci risque d'avoir causé des défauts dans le composite (bulles d'air) et surtout si on utilise plusieurs couches de tamis.

# *Références*

### *Références Bibliographiques*

- [1] C.A.R.M.A Centre d'animation régional en matériaux avancées (GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES). Actualisation October 2006.
- [2] GÜRDAL, Z., HAFTKA, R.T., & HAJELA, P. « Design and optimization of laminated composite materials. » Canada: Wiley-Interscience Publication, 1999, 352 p. ISBN 047125276X.
- [3] Pongtorn PROMBUT « caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels » Thèse doctorat de l'université de Toulouse ; soutenue le 27 Septembre 2007.
- [4] L.Guillaumat, F.Dau, A.Alzina, Cours matériaux composites « Matériaux composites et fiabilité » (le 28 janvier 2008, Clermont-Ferrand).
- [6] Gilbert CHRETIEN «matériaux composites à matrice organique». Mars 1986 Paris.
- [7] Nadia BEHLOULI « Cours matériaux composites »  
« <http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/comp0.htm> ».
- [8] Roland HARRY « Cours matériaux composites » LGM Laboratoire de Génie Mécanique Bordeaux 1996.
- [9] F.ROOS, M.GUIMON, R.VINCENT Dossier Médico-Technique DMT « Fibres d'aramides : éléments pour l'évaluation des risques ».
- [10] « <http://fr.wikipedia.org/wiki/Kevlar> ». Consulté le 10.03.2011.
- [11] René PINZELLI « Fibres aramides pour matériaux composites ».Technique de l'ingénieure [A 3 985].
- [12] <http://www.cours.polymtl.ca/mec6306/Fibres-aramide.pdf>. Consulté le 02.04.2011.
- [13] Bathias C., Matériaux composites, l'Usine Nouvelle, Dunod, Paris, 2005.
- [14] Jean-Richard ANDRE, Matthieu SONNATI «Comportement à l'impact des matériaux composites » Master 2 MQM 2006-2007.
- [15] VALERSTEINAS P., Projet Mosaïc : structure automobile en composites et aluminium, Techniques de l'Ingénieur, AM5605, 1998.

## Références

---

- [16] A . GIOCOSA, Les composites dans l'industrie automobile, Techniques de l'Ingénieur, AM5600, 1999.
- [17] A. Schiffer ; « Introduction à la pratique des planifications des expériences », édition Leipzig, 1986.
- [18] G. E. P. Box and K. B. Wilson, On the Experimental Attainment of Optimum Conditions; Journal of the Royal Statistical Society. Vol. XIII. N°1, (1951), p 1- 45.
- [19] V. P. Nalimov, « Méthodes de statistiques de planification extrémales des expériences », Moscou 1965.
- [20] A. Hebbar ; «Méthodes statistique de planification extrémale des expériences » ; Notion et applications pour chercheurs expérimentateurs, Université de Mostaganem, 2003.
- [21] K. Huang, O. Admane, Statistiques cours et exercices, OPU 1991.
- [22] K. Khaldi, Méthodes statistiques, Rappels de cours-Exercices corrigés, O.P.U 1995.
- [23] Documentations internes de la société FIPEXPLAST de Chlef.

# *Annexes*





## Annexe 2

## Test de Student (t)

v \ $\alpha$	$\alpha$				
	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
1	3.087	6.314	12.706	30.821	63.657
2	1.886	2.920	4.303	6.905	9.925
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	1.476	2.015	2.571	3.385	4.032
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	1.333	1.740	2.110	2.5672	2.898
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861

## Annexes

---

<b>20</b>	1.325	1.725	2.085	2.528	2.845
<b>21</b>	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
<b>22</b>	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
<b>23</b>	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
<b>24</b>	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
<b>25</b>	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
<b>26</b>	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
<b>27</b>	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
<b>28</b>	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
<b>29</b>	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
<b>30</b>	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
<b>40</b>	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704
<b>60</b>	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660
<b>120</b>	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617
<b>∞</b>	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

*Résumé*

	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	238.9	243.9	249.0	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.3	19.33	19.37	19.41	19.45	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.84	8.74	8.64	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.04	5.91	5.77	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.82	4.68	4.53	4.36
6	5.99	5.14	4.79	4.53	4.39	4.28	4.15	4.00	3.84	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.73	3.57	3.41	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.44	3.28	3.12	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.23	3.07	2.90	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.07	2.91	2.74	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	2.95	2.79	2.61	2.40
12	4.75	3.88	3.49	3.26	3.11	3.00	2.85	2.69	2.50	2.30
13	4.67	3.80	3.41	3.18	3.02	2.92	2.77	2.60	2.42	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.70	2.53	2.35	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.64	2.48	2.29	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.59	2.42	2.24	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.55	2.38	2.19	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.51	2.34	2.15	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.48	2.31	2.11	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.45	2.28	2.08	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.42	2.25	2.05	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.40	2.23	2.03	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.38	2.20	2.00	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.36	2.18	1.98	1.73

## *Résumé*

5	4.24	3.38	2.99	2.76	2.60	2.49	2.34	2.16	1.96	1.71
6	4.22	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.32	2.15	1.95	1.69
7	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.30	2.13	1.93	1.67
8	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.44	2.29	2.12	1.91	1.65
9	4.18	3.33	2.93	2.70	2.54	2.43	2.28	2.10	1.90	1.64
0	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.27	2.09	1.89	1.62
0	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.18	2.00	1.79	1.51
0	4.00	3.15	2.76	2.52	2.37	2.25	2.10	1.92	1.70	1.39
2	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.01	1.83	1.61	1.25
5	3.84	2.99	2.60	2.37	2.21	2.09	1.94	1.75	1.52	1.00