

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU



Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme de master académique en génie mécanique
option construction mécanique

Thème :

**TOLERANCE A LA PROPAGATION DE
L'AVANCEMENT DE LA FISSURE DANS UN
MATERIAU COMPOSITE**

Présenté par : Hichem OULDAMER

Devant le Jury :

Mr. A.BILEK	Maître de conférences /A	UMMTO	Président
Mr. A.DJEBBAR	Professeur	UMMTO	Rapporteur
Mr. H.ZIANI	Maître assistant/A	UMMTO	Examineur
Mr. S.BELHADJI	Maître assistant /A	UMMTO	Examineur

Promotion 2011/2012

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU



Mémoire de fin d'étude

**En vue d'obtention du diplôme de master académique en génie mécanique
option construction mécanique**

Thème :

**TOLERANCE A LA PROPAGATION DE
L'AVANCEMENT DE LA FISSURE DANS UN
MATERIAU COMPOSITE**

Présenté par : Hichem OULDAMER

Devant le Jury :

Mr. A.BILEK	Maître de conférences /A	UMMTO	Président
Mr. A.DJEBBAR	Professeur	UMMTO	Rapporteur
Mr. H.ZIANI	Maître assistant/A	UMMTO	Examineur
Mr. S.BELHADJI	Maître assistant /A	UMMTO	Examineur

Promotion 2011/2012

Remerciements

Je tiens à remercier Mr. A.DJEBBAR professeur à l'UMMTO, chef du département génie mécanique, pour avoir proposé et dirigé ce travail et pour son apport durant notre cursus de travail.

Je remercie aussi Mr. B.KACIMI pour son aide et de nous avoir orienté dans ce travail.

Ma gratitude va tout autant aux membres de jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.

Je remercie le responsable de la formation, Mr S.LARBI ainsi que tous les enseignants qui m'ont suivi durant tout mon cursus de formation.

Je remercie mon père et ma mère pour leurs soutient depuis mon enfance à m'investir dans mes études.

Je remercie Mr. M.OULDAMER et Mr. Y.OULDAMER pour leurs conseils dans ma vie pédagogique et sociale.

dédicace

Je dédie se travail à :

Mes parents ;

Ma sœur Mounia ;

Mes frères Lounis, Amine et Walid ;

A tout mes amis en générale et en particulier : R.CHALALI ;

N.BELKACEMI ; Lola ZHANG ; Mme ALICHE et F.KADI.

Sommaire

Introduction	01
Chapitre I : généralités sur les matériaux composites	
I.1 Définition	02
I.2 Type de matériaux composites	02
I.2.1 Selon les constituants qui le compose	02
I.2.2 Selon la nature de la matrice	02
I.2.3 Composites grande diffusion	04
I.2.4 Composites hautes performances	04
I.3 Les composants du matériau composite	04
I.3 Les renforts	04
I.3.11 Généralités	04
I.3.12 Fibres	05
a. Fibres de verre.....	05
b. Fibres de verre type E.....	05
I.3.13 Architecture des renforts	06
I.3.1.4 Les charges	07
I.3.15 Les adjuvants	07
I.3.2 Les matrices.....	08
I.3.2.1 Les différentes familles de matrice	08
I.3.22 Définitions	08
I.3.23 Résines thermodurcissables	09
I.3.24 . Principales caractéristiques mécaniques des résines :.....	09
I.4.architecture des matériaux composites.....	10
I.4.1. définitions.....	10
a. renfort unidirectionnel.....	10

b. tissus.....	10
d. mats.....	10
e. pli.....	10
f. couche	10
I.4.2. stratifiés	10
I.4.3. composites sandwiches	11
I.5. Mise en œuvre des matériaux composites	12
I.5.1. Moulages sans pression	12
a)moulage au contact	12
b) Moulage par projection simultanée	13
I.5.3. Moulages par compression	14
a)Moulages par injection de résine	14
b) Moulages par compression à froid	14
c) Moulages par compression à chaud	15
d) Moulages par injection	16
I.5.2. Moulages sous vide	16
I.5.4. Moulage en continu	16
I.5.5. Moulage par pultrusion	17
I.5.6. Moulage par centrifugation	18
I.5.7. Moulage par enroulement filamentaire	19
I.6. Domaine d'utilisation des matériaux composites	19
I.6.1. Électricité électronique.....	19
I.6.2. bâtiment et travaux publics	20
I.6.3. Transport	20
a) Routier	20
b) Ferroviaire	20
c) Maritime	20

d) Filaire	20
e) Aérien	20
f) Spatial	20
I.6.4. Mécaniques générale et divers	20
I.6.5. Sports et loisirs	20
I.7. conclusion	21

Chapitre II essais mécaniques

II.1. différents essais mécaniques	22
II.1.1. la traction.....	22
II.1.2. la flexion	25
II.1.2.1. flexion trois points.....	25
II.1.2.2. flexion quatre points.....	29
II.1.3. fatigue.....	29
II.1.4. essai de résilience.....	30
II.1.4. 1. Principe	30
II.1.4. 2. Principe De L'essai De Charpy	30
II.2. conclusion	31

Chapitre III notion de la mécanique de la rupture

III.1. Introduction.....	32
III.2. Mode de rupture.....	32
III.3. Ténacité en choc	32
III.3.1. Définition	32
III.3.2. Principe	32
III.4. Facteur d'intensité de contrainte	34
III.4.1 Critère de résistance.....	34
III.4.2 calcule de K_{Ic}	34
III.4.2.1 Problème de GRIFFITH	34

III.4.2.2 Problème de GRIFFITH dans le cas d'une plaque de largeur finie.....	35
III.4.2.3 Double fissure débouchant dans une plaque de largeur finie.....	36
III.4.2.4 Eprouvette de flexion en trois points	36
III.4.3. relation entre K_{Ic} et K_V	36
III.4.3.1 Niveau ductile de la courbe de transition	37
III.4.3.2 Niveau fragile et bas de la courbe de transition.....	37
III.4.4 Limite de validation du concept du (FIC)	37
III.5 Zone plastique.....	38
III.5.1 Approche d'Irwin	38
III.5.2 Modèle de DUGDALE- BARENBLATT.....	39
III.5.3 Formes de la zone plastique	40
III.6 Taux de restitution d'énergie	41
III.7. méthode de la complaisance pour la mesure du taux de restitution d'énergie G_c .	41
III.7.1 Mesure de G_{IC} par essai de choc.....	43
III.8 Relations entre G_I et K_I	44
III.9 Conclusion	44

Chapitre IV : mécanisme d'endommagement

IV.1 Introduction	45
IV.2 L'endommagement	45
IV.3 Echelle d'observation d'endommagement	45
IV.4 Mécanisme de rupture dans un composite	46
IV.4.1 Rupture de fibre	46
IV.4.2 Rupture de la matrice	46
IV.4.3 Décohésion fibre-matrice	48
IV.5 Endommagement des composites stratifiés	48
IV.5.1 Les fissurations	48
IV.6 Conclusion	51

Chapitre V : partie expérimentale

V.1. Présentation du matériau à étudier	52
V.1.1 Matrice	52
V.1.2 Renfort	52
V.1.3 Géométrie des éprouvettes	52
V.1.4 Elaboration des éprouvettes	53
V.1.5 Problèmes d'élaboration	53
V.2 essai de flexion	53
V.2.1 Présentation des dispositifs expérimentaux	53
V.2.2 résultats des essais de flexion trois points	55
V.3 essai pour la caractérisation au choc	57
V.3.1 Eprouvettes utilisées dans les essais	57
V.3.2 résultats des essais	57
V.3.3 calcul du taux de restitution d'énergie	61
V.3.3.1 critère énergétique	61
V.3.3.2 calcul du G_c par le FIC	65
V. 4 Conclusion	68
Conclusion générale	69

Liste des figures

Figure I.1 : Les constituants d'un composite	2
Figure I.2 : composites selon la nature de la matrice	3
Figure I.3 : Différents types de renforts	4
Figure I.4 : Différent types de textures	6
Figure I.5 : les familles de matrices	8
Figure I.6 : schématise un stratifié code (0/90/45/-45 ₂ /45/90/0)	11
Figure. I.7 : structure sandwich.....	11
Figure I.8 : moulage au contact	13
Figure I.9 : rouleau	13
Figure I.10 : Moulage par projection simultanée	13
Figure I.11 : Moulages par injection de résine	14
Figure I.12 : Moulages par compression à froid	15
Figure I.13 : Moulages par compression à chaud	15
Figure I.14 : Moulage en continu	17
Figure I.15 : Moulage par pultrusion	17
Figure I.16 : Touret-centrifugation	18
Figure I.17 : Moulage par enroulement filamenteux	19
Figure II.1 : éprouvette normalisée et machine de traction	23
Figure II.2 : étapes de l'essai de traction	23
Figure II.3 : digrammes obtenus après l'essai de traction	24
Figure II.4 : schéma représentant flexion trois points	25
Figure II.5 : courbe contrainte-déformation : matériau fragile et ductile	26
Figure II.6 : diagrammes de l'effort tranchant et du moment fléchissant	28
Figure II.7 : Principe de l'essai Charpy	30
Figure III.1 : Mode de rupture	32

Liste des figures

Figure III.2 : les différentes manières de la pré-fissuration des éprouvettes	33
Figure.III.3 : fissure de longueur $2a$ dans une plaque infinie	35
Figure.III.4 : fissure de longueur $2a$ dans une plaque finie	35
Figure.III.5 : double fissure débouchant dans une plaque de largeur finie	36
Figure.III.6 : éprouvette en flexion trois points	36
Figure.III.7 : répartition des contraintes élastique et élastoplastiques dans le plan de la fissure et en aval de son extrémité	38
Figure.III.8 : la forme de la zone plastique Selon DUGDALE	39
Figure.III.9 : la variation de K_{Ic} en fonction de l'épaisseur	40
Figure III.10 : variation du déplacement pour un accroissement de la fissure a charge constante	42
Figure III.11 : courbe force-déplacement d'une rupture fragile	43
Figure IV.1 : Les différentes échelles d'observation de l'endommagement : matériaux stratifié	46
Figure IV.2 : Rupture de fibre	46
Figure IV.3 : Rupture de la matrice	47
Figure IV.4 : Modes de fissuration de la matrice	47
Figure IV.5 : Décohésion fibre-matrice	48
Figure IV.6 : Fissure interlaminaire	48
Fissure IV.7 : Fissure intralaminaire	49
Fissure IV.8 : Fissure translaminaire	49
Figure. IV.9 : Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés	49
Figure .IV.10 : Stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0°	50
figure .IV.11 : Rupture en présence d'un trou d'un composite $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ à fibres de carbone.	50
Figure .IV.12 : Stratifié croisé $\pm 45^\circ$ soumis à une traction dans la direction 0°	51
Figure .IV.13 : Rupture d'un composite $[\pm 45^\circ]_{2S}$ à fibres de carbone	51
Figure. V.1 : image des différents renforts	52
Figure V.2 : géométrie des éprouvettes	53

Liste des figures

Figure V.3 : machine de flexion trois points	54
Figure V.4 : montage pour la réalisation des essais flexion trois points	54
Figure V.5 : évolution contrainte / déformation pour échantillon A1	55
Figure V.6 : évolution contrainte / déformation pour échantillon B4	56
Figure V.7 : géométrie des éprouvettes utilisées dans les essais de flexion trois points	57
Figure V.8 : contrainte /déformation pour C4 et C20	58
Figure V.9 : quelques échantillons du lot C après les essais de flexion	58
Figure V.10 : contrainte /déformation pour D2 et D19	59
Figure V.11 : échantillon D6 après l'essai de flexion	59
Figure V.12 : contrainte /déformation pour B19 et B3	60
Figure V.13 : échantillon B7 après l'essai de flexion	60
Figure V.14 : taux de restitution d'énergie du lot C	62
Figure V.15 : taux de restitution d'énergie du lot D	63
Figure V.16 : taux de restitution d'énergie du lot B	64

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Propriétés des fibres de verre	5
Tableau I.2 : Caractéristiques mécaniques de quelques renforts	5
Tableau I.3 : types de charges	7
Tableau I.4 : caractéristiques de certaines résines	9
Tableau I.5 : caractéristiques des TD et TP	9
Tableau II.1 : quelques essais et les caractéristiques mécaniques mise en évidence	22
Tableau II.2 : dimensions des rayons panne et cylindres d'appuis	26
Tableau II.3 : dimensions des éprouvettes de flexion trois points	27
Tableau II.4 : relation entre Kv avec Kcv et Kcu	31
Tableau V.1 : différents lot utilisé	52
Tableau V.2 : caractéristiques mécanique du lot A en flexion	55
Tableau V.3 : caractéristiques mécanique du lot B en flexion	56
Tableau V.4 : dimensions et résultats pour le lot C	58
Tableau V.5 : dimensions et résultats pour le lot D	59
Tableau V.6 : dimensions et résultats pour le lot B	60
Tableau V.7 : taux de restitution d'énergie pour le lot C	62
Tableau V.8 : taux de restitution d'énergie pour le lot D	63
Tableau V.9 : taux de restitution d'énergie pour le lot B	64
Tableau V.10 : différentes valeurs des différents lots	64
Tableau V.11 : taux de restitution d'énergie pour le lot C	65
Tableau V.12 : taux de restitution d'énergie pour le lot D	66
Tableau V.13 : taux de restitution d'énergie pour le lot B	66
Tableau V.14 : résumer des résultats du taux de restitution d'énergie	66
Tableau V.15 : taux de restitution d'énergie pour les différents lots	67

Liste des symboles

$T_f(^{\circ}\text{C})$ température de fusion ;

$P (\text{Kg}/\text{m}^3)$ la masse molaire ;

$\varepsilon^R(\%)$ allongement en rupture ;

$\sigma_t^R(\text{MPa})$ contrainte de rupture en traction ;

$\sigma_c^R(\text{MPa})$ contrainte de rupture en compression ;

$E(\text{GPa})$ module de YOUNG ;

$G_c(\text{J}/\text{m}^2)$ taux de restitution d'énergie ;

F : charge appliquée (N) ;

r_1 : rayon du cylindre de la panne ;

r_2 : rayon des cylindres d'appuis ;

L : longueur entre appuis (mm) ;

l : longueur totale de l'éprouvette (mm) ;

h : hauteur de la poutre (mm) ;

b : largeur de la poutre (mm) ;

σ_f : contrainte (MPa) ;

τ : contrainte de cisaillement (MPa) ;

R_A : force de réaction au point A (N) ;

R_B : force de réaction au point B (N) ;

M_f moment fléchissant (N.mm) ;

T : effort tranchant (N) ;

W : énergie de déformation (J) ;

W_{fl} énergie de déformation en flexion (J) ;

W_{tr} énergie de déformation en cisaillement (J) ;

δ_T la fleche (mm) ;

I moment d'inertie

Y'' est la dérivée seconde de Y

Y_{\max} la fleche maxi

Liste des symboles

ε_{\max} la déformée maxi

Tr le travail (J) ;

K_{Ic} facteur d'intensité de contrainte MPa \sqrt{mm} ;

G_{1c} taux de restitution d'énergie (KJ/m²) ;

ξ surface de contact (mm);

U énergie absorbé lors du développement de la fissure (J).

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Les matériaux composites (à matrices métalliques, élastomères, polymères ou céramiques) offrent aux industriels et aux designers des possibilités nouvelles d'associer fonction, forme et matériaux, au sein de réalisations, matériaux, systèmes de plus en plus performants. Poids, anisotropie, plurifonctionnalité sont autant d'atouts de principe. Des processus nouveaux de conception, d'industrialisation et de fabrication permettent d'étendre les possibilités techniques, et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids, fonctions...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement.

nous pouvons dire des matériaux composites avancés sont des matériaux polymères (Plastic) utilisés dans les produits renforcés de fibres structurales, par exemple: poutres, Ailes d'un avion....

La problématique du présent travail consiste à étudier l'avancement de la fissure dans un matériau composite a matrice polyester chargé de fibre de verre type E et du recyclé qui pose problème dans sa récupération et qui représente un déchet interdit à jeter dans la nature. ce qui nous amène à calculer le taux de restitution d'énergie et le facteur d'intensité de contrainte. Pour se faire, nous avons répartie ce travaille en plusieurs chapitre : quatre chapitres théoriques et le dernier qui comporte la partie expérimentale.

Le premier chapitre nous donne d'une manière générale les différents types de matériaux composites, ainsi certaines caractéristiques et leur domaine d'utilisation et certaines définitions de bases.

Dans le deuxième chapitre, nous avons donnés une idée générale sur les différents essais mécaniques qui se réalisent sur les matériaux pour les caractériser, et nous avons vu l'utilité de s'étaler sur les essaies flexion trois points vu l'importance qu'ils nous donnent pour extraire les caractéristiques intrinsèque du matériau.

Dans le troisième chapitre, nous avons donnés quelques notions pratiques et générales sur la mécanique de la rupture, aussi les méthodes à suivre pour étudier le comportement d'un matériau à la propagation de la fissure, et puisque le besoin nous le demande, nous avons cité les différents mécanismes d'endommagement dans le quatrième chapitre.

Et en fin, nous présentons la partie expérimentale dans le cinquième chapitre, où nous avons caractérisé les matériaux par le biais des essaie de flexion trois points afin de calculer le facteur d'intensité de contrainte et par la suite le taux de restitution d'énergie qui nous renseigne sur le comportement du matériau a l'avancement de la fissure.

Chapitre I

GENERALITES SUR LES

MATERIAUX

COMPOSITES

Chapitre I : généralités sur les matériaux composites

Les matériaux composites ont été inventés par nos ancêtres avant l'existence de toute industrie, tout en mélangeant de la paille à l'argile pour en faire des briques. Même aujourd'hui on voit des maisons fabriquées par ce matériau qui comporte la paille comme renfort et l'argile comme matrice.

Aujourd'hui, de nouveaux matériaux – fibres et matrices – sont utilisés dans de grandes industries surtout dans le domaine de la mécanique.

I.1 Définition

Un matériau est dit composite lorsqu'il est constitué de deux ou plusieurs éléments distincts et non miscibles. Les qualités des éléments se combinent pour réaliser des propriétés particulières au composite qui sont supérieures aux propriétés des éléments pris individuellement. Les deux éléments principaux sont les renforts et les matrices.

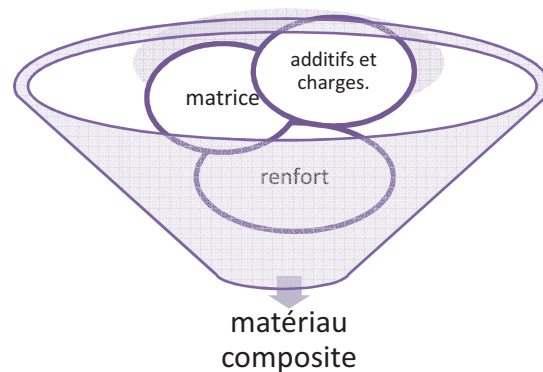


Figure I.1 : Les constituants d'un composite.

I.2 Type de matériaux composites

On distingue différents types de matériaux composites classés selon plusieurs critères.

I.2.1 Selon les constituants qui le compose

On dit qu'un composite est à particules, si le renfort se trouve sous forme de particules, et on dit qu'il est à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres.

I.2.2 Selon la nature de la matrice

On trouve les matériaux organiques, métalliques et minéraux, résumés dans la figure I.2

Chapitre I : généralités sur les matériaux composites

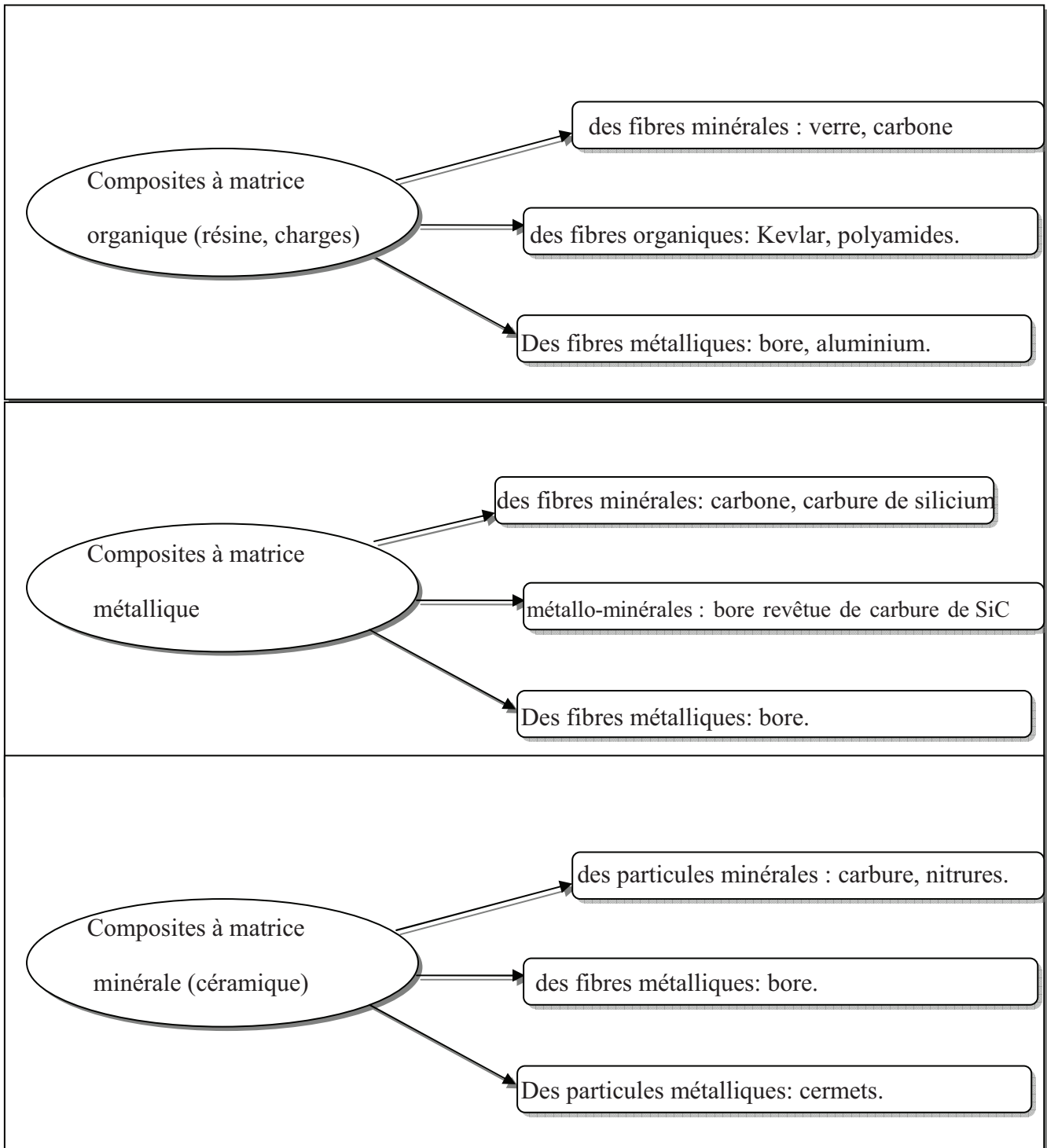


Figure I.2 : composites selon la nature de la matrice.

On introduit aussi la notion de composite grande diffusion et hautes performances.

Chapitre I : généralités sur les matériaux composites

I.2.3 Composites de grande diffusion

Les composites grande diffusion (GD), représentent 95 % des matériaux composites utilisés. En général, ce sont des plastiques armés ou des plastiques renforcés dont le taux volumique de renfort avoisine 30 %. Les principaux constituants de base sont les résines polyesters (95 % des résines thermodurcissables) avec des fibres de verre (plus de 99 % des renforts utilisés) [1].

I.2.4 Composites haute performance

Les composites haute performance (HP) sont principalement utilisés dans l'aéronautique. Les renforts utilisés sont plutôt des fibres longues dont le taux de renfort est supérieur à 50 %. Contrairement aux composites (GD), leurs propriétés mécaniques, résistance mécanique et rigidité, sont largement supérieures à celles des métaux [1].

I.3 Les composants du matériau composite

I.3.1 Les renforts

I.3.1.1 Généralités

Le renfort a pour rôle d'assurer la tenue mécanique du composite et est souvent de nature filamenteuse : fibres organiques ou inorganiques (voir figure I.3).

Les fibres sont constituées par plusieurs centaines ou milliers de filaments de diamètres variant de 5 à 15 μm , ce qui permet de traiter les mèches sur des machines textiles [2].

Les différents types de renforts sont cités dans l'organigramme ci-dessous [2].

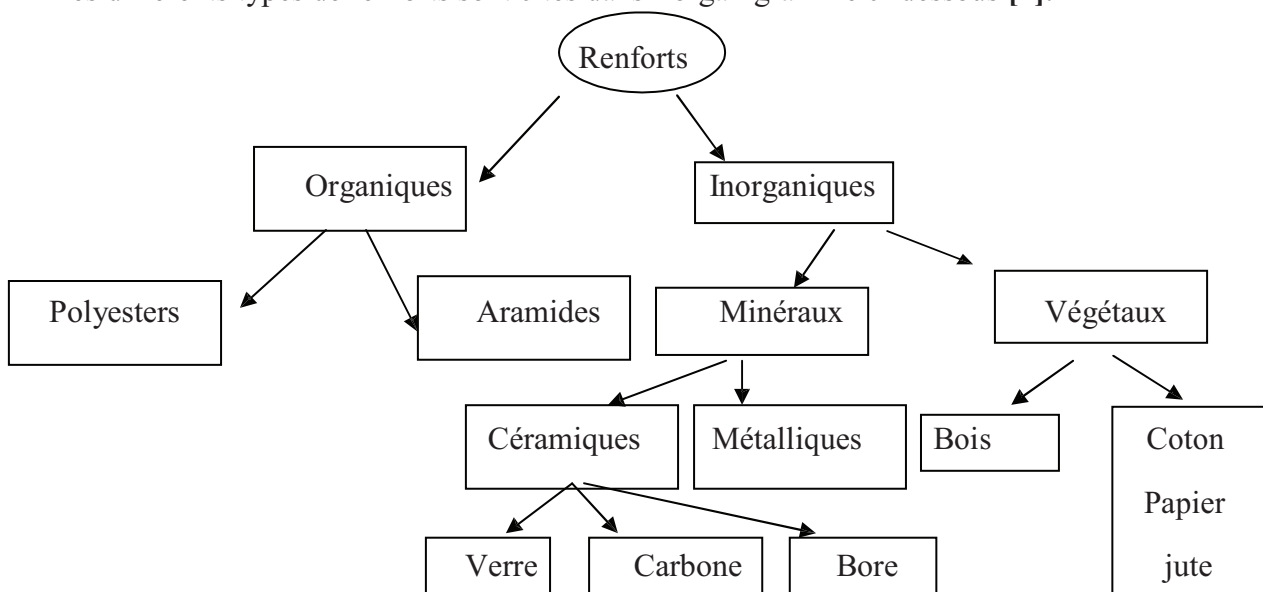


Figure I.3 : Différents types de renforts.

Chapitre I : généralités sur les matériaux composites

I.3.12. Fibres

Ce sont des éléments du matériau composite qui apportent généralement les propriétés mécaniques recherchées.

Il existe différents types de fibres :

Fibres d'aramides, de carbone, de bore, de silice, de polyéthylène de haut module et fibres de verre.

a. Fibres de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois 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) [3].

b. Fibres de verre type E

Les fibres de verre de type E sont les plus répandues pour les composites de grande diffusion. Leurs propriétés sont résumées dans le Tableau I-1 [4].

Densité (g/cm ³)	2,54
Température de ramollissement (°C)	846
Contrainte à la rupture (MPa) à 23°C	3445
Allongement à la rupture (%) à 23°C	4,8
Module d'Young (GPa) à 23°C	72,3

Tableau I-1 : Propriétés des fibres de verre

Le tableau I.2 présente les principales caractéristiques mécaniques de quelques renforts [5].

Fibre	Densité (kg/dm ³)	Charge de rupture en traction	Charge de rupture en compression (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité (MPa)	Diamètre du filament élémentaire
Verre E	2.54	3400	1200	4.8	73000	3 - 30
Verre R	2.48	4400	1300	5.4	86000	3 - 30
Aramide haut module	1.45	3100	500	1	130000	12
Carbone haut module	1.8	2200	1300	-	400000	8

Tableau I.2 : Caractéristiques mécaniques de quelques renforts.

I.3.13 Architecture des renforts

Il existe différentes géométries et textures de renforts. citées dans la figure I.4

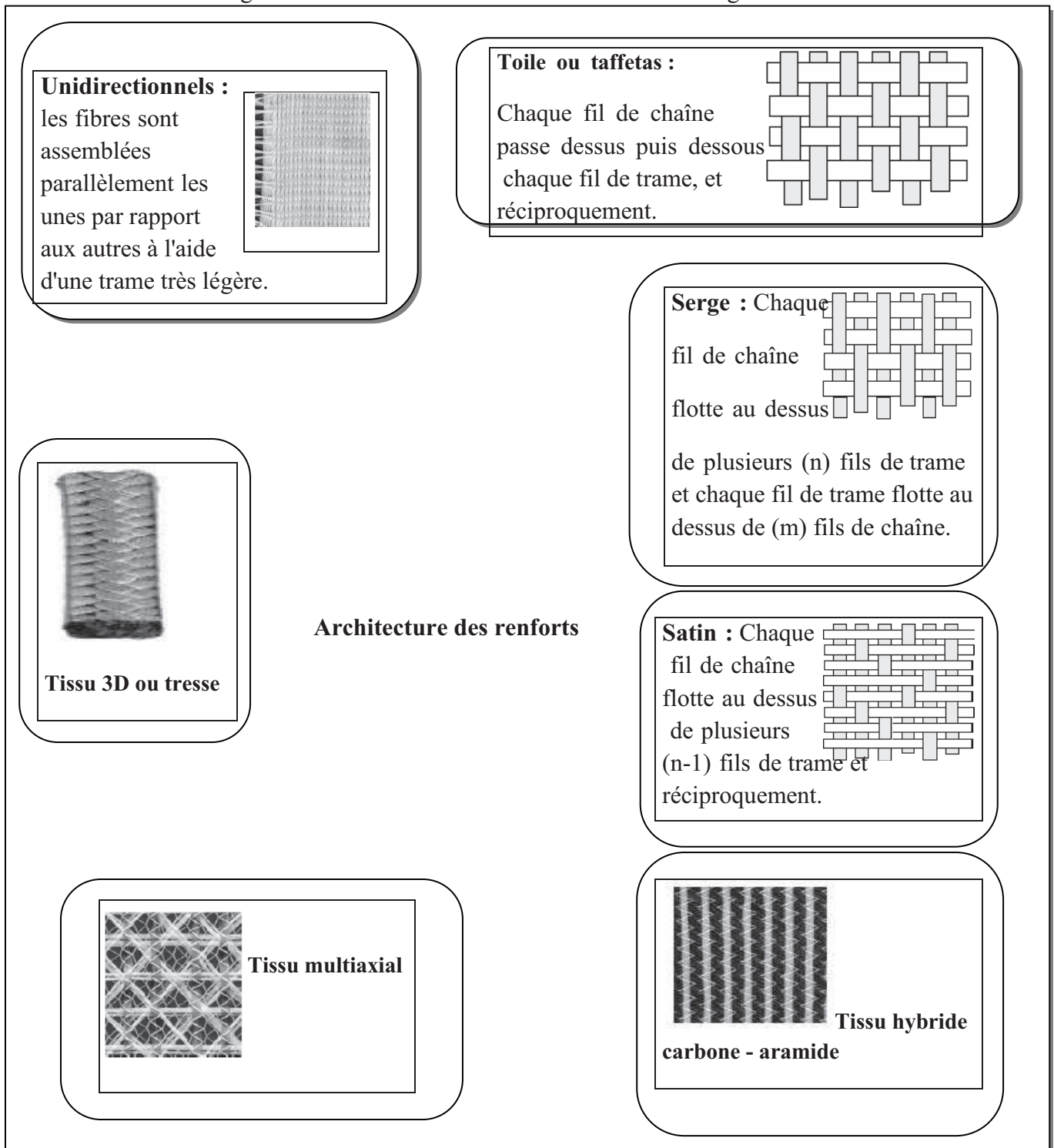


Figure I.4 : Différent types de textures.

I.3.14 Les charges

Charge c'est 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 [6].

Les différents types de charges sont résumés dans le tableau I.3

Les charges	
organiques	minérales
<ul style="list-style-type: none">- Craies et carbonates<ul style="list-style-type: none">- Les silices- Les talcs- La wollastonite- Les argiles et aluminosilicates	<p>Charges cellulosiques, utilisées en tant que charges des résines thermodurcissables (Phénoplastes et aminoplastes).</p> <ul style="list-style-type: none">- Farines de bois ;- Farines d'écorces de fruit et de noyaux ;- Fibres végétales ;- Pâtes de cellulose ;- Amidons

Tableau I.3:types de charges

I.3.15 Les adjuvants

Un des additifs de grande importance est l'agent d'interface qui assure la cohésion et l'adhésion entre les différents constituants. Cet agent est en générale déposé sur les fibres de renfort (ensimage du verre) ou sur les charges (carbonate de calcium enrobé).

D'autres adjuvants sont, dans le cas des matrices thermodurcissables, les catalyseurs et accélérateurs de durcissement.

Dans cette gamme, on trouve également des lubrifiants et démoulant internes facilitant la mise en œuvre, des stabilisateurs thermiques et des anti-oxygène, des inhibiteurs de l'action des rayonnements ultraviolets, des dérivés halogénés améliorant le comportement au feu et enfin des pigments et colorants [7].

I.3.2 Les matrices

La matrice a pour rôle de lier les fibres, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.

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 [8].

I.3.2.1 Les différentes familles de matrice

Nous avons plusieurs types de matrices résumées dans la figure I.5.

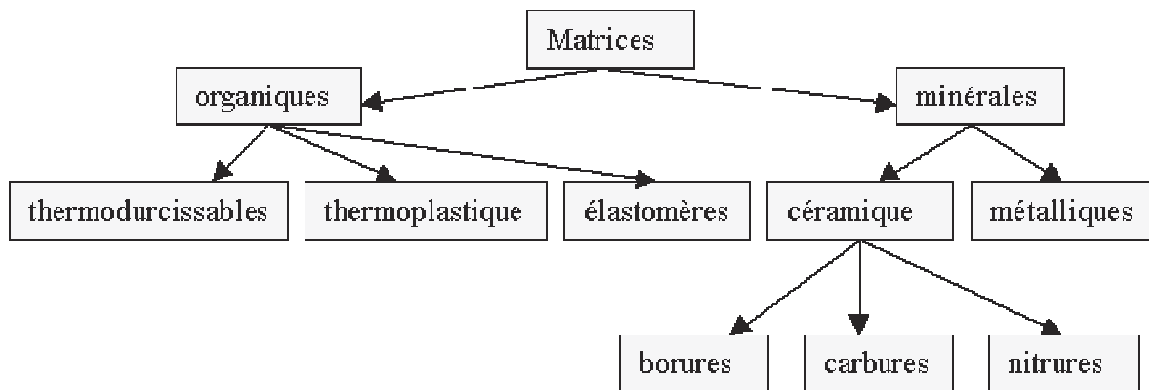


Figure I.5 : les familles de matrices

I.3.2.2 Définitions

- Résine thermodurcissable : polymère transformée en un produit essentiellement infusible et insoluble après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physico- chimique (catalyse, durcisseur).
- Résine thermoplastique : polymère pouvant être alternativement ramollie par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité.
- Résine thermostable : polymère présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de

Chapitre I : généralités sur les matériaux composites

façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques.

- Elastomère thermoplastique : polymère fortement élastique [8].

I.3.23 Résines thermodurcissables

Elles ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées. Les résines des condensations (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxydes sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556.

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau I.3 [9].

Résines	$T_f(^{\circ}C)$	P (Kg/m ³)	$\epsilon^R(\%)$	$\sigma_t^R(MPa)$	$\sigma_c^R(MPa)$	E(GPa)	$G_c(J/m^2)$
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6	100
Phénoliques	120	1200	2,5	40	250	3 à 5	-
époxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5	0,1 - 0,3

Tableau I.4 : caractéristiques de certaines résines.

I.3.24 . Principales caractéristiques mécaniques des résines

Le tableau I.5, nous donne quelques caractéristiques mécaniques des résines [8].

Résines	nom	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	ν	R (MPa)	α m/m ^{°C}	Prix (F/kg)
TD	Polyester	1300	3800	0.37	88	100	15
	Vinylester	1200	3500	0.35	81	65	18
	Epoxyde	1220	5200	0.38	121	40	40
	Silicone	1550	1000	0.45	3	30	200
	Polyimide	1217	3450	0.35	80	36	150
	Phénolique	1350	3000	0.36	70	80	10
TP	Polyamide	1130	1900	0.33	70	85	25
	Polycarbonate	1100	2300	0.33	60	70	30
	Polyester saturé	1310	2800	0.33	55	90	

Tableau I.5 : caractéristiques des TD et TP.

I.4. architecture des matériaux composites

I.4.1. définitions

a) renfort unidirectionnel

Fibres de renforcement disposées dans une seule direction (sauf indication contraire, le renfort supposé continu)

b) tissus

Assemblage de mèches entrelacées.

c) mats

Ce sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle, maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines.

d) pli

Nappe élémentaire dans la constitution d'un stratifié.

e) couche

Ensemble de pli identiques empilés avec la même direction [7].

I.4.2. 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 [8].

Chaque stratifié est codé de la manière suivante :

On doit repérer chaque pli par son orientation (ex 30° , 45° ...)

On sépare les plis par slash (/)

Si on a plusieurs plis successifs de même direction, on met la direction avec un chiffre en indice qui indique le nombre des plis identiques.

Exemple d'un stratifié code [0/90/45/-45/-45/45/90/0] dans la figure I.6

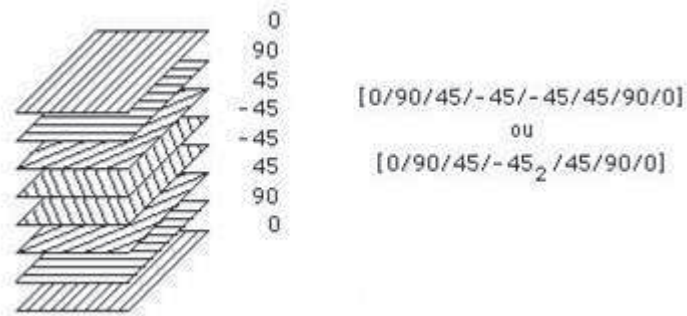


Figure I.6 : schématise un stratifié code (0/90/45/-45₂/45/90/0)

I.4.3. composites sandwichs

Deux peaux relativement minces aux propriétés mécaniques fortes collées sur une âme légère à faibles caractéristiques mécaniques (voir figure I.7).

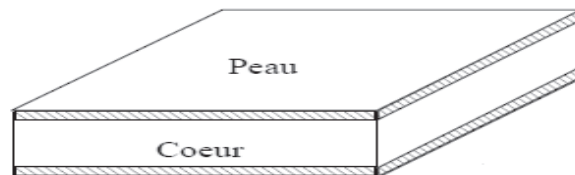


Figure. I.7 : structure sandwich

Avantages :

- Grande légèreté ;
- Grande rigidité flexionnelle ;
- Excellentes caractéristiques d'isolation.

Inconvénients :

- mauvais amortissement et isolation acoustique (problème lié à la densité relativement basse) ;
- Tenue au feu moyenne pour certaines catégories d'âme ;
- Risques de flambement plus élevé que sur les autres structures ;
- Problème de décollement peaux/âme [8].

I.5. Mise en œuvre des matériaux composites

I.5.1. Moulages sans pression

Les méthodes de moulages à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat.

Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de forme et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité des pièces moulées dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur.

a) moulage au contact

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

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

- 1) Le moule est enduit avec la résine catalysée, au pinceau ou au rouleau.
- 2) Le renfort : mat, tissu, etc..., est disposé dans le moule. Divers type de renfort peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
- 3) Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé.
- 4) Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, etc.
- 5) Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).
- 6) La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80°C).
- 7) Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage ponçage, éventuellement peinture [10].

Les figures I.8 et I.9 nous montrent la méthode du moulage au contact et le rouleau utilisé.

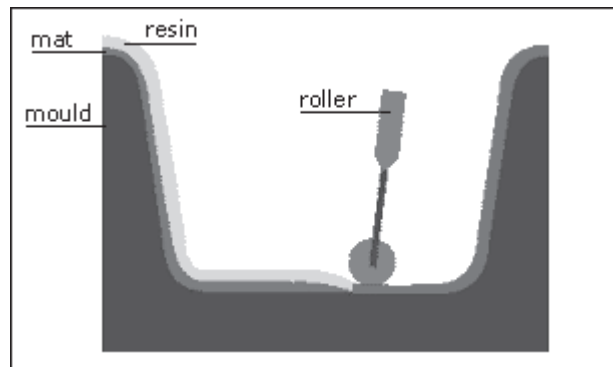


Figure I.8 : moulage au contact

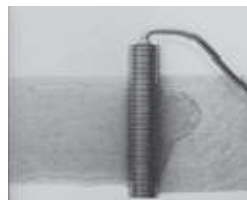


Figure I.9 : rouleau.

b) Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée dans un moule. L'équipement est constitué d'une machine à couper le stratifil et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et ébullée au rouleau cannelé (voir figure I.10)

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques du matériau restent les moyennes.

Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques [10].

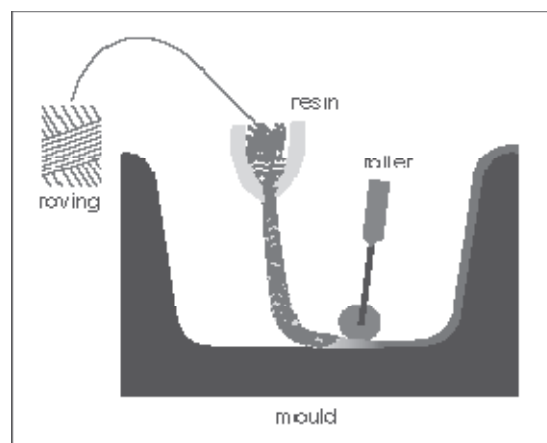


Figure I.10 : Moulage par projection simultanée

I.5.2. Moulages par compression

a) Moulages par injection de résine

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

Ce procédé de moulage à la réalisation de pièces de formes compliquées (voir figure I.11)

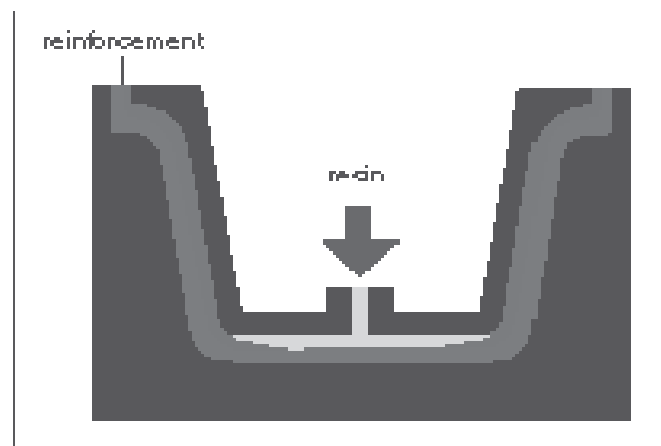


Figure I.11 : Moulages par injection de résine

b) Moulages par compression à froid

Le moulage est effectué à basse pression (< 5 bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70°C, en fonctionnement permanent.

Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gel-coat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contre-moule est fermé, puis pressé. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production (voir figure I.12).

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les pièces possèdent un bel aspect de surfaces sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à chaud [10].

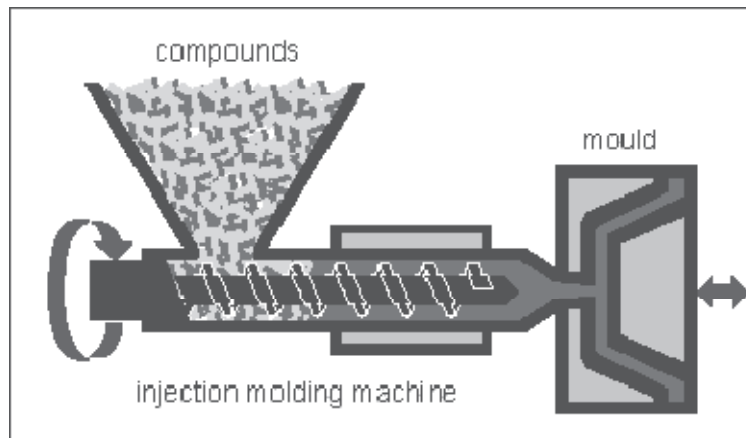


Figure I.12 : Moulages par compression à froid

c) Moulages par compression à chaud

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules chauffants. Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre-moule. Le temps de passage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée (voir figure I.13).

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions important de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est d'ordre de 10 à 50 bars, la température du moule est d'ordre de 80 à 150°C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule [10].

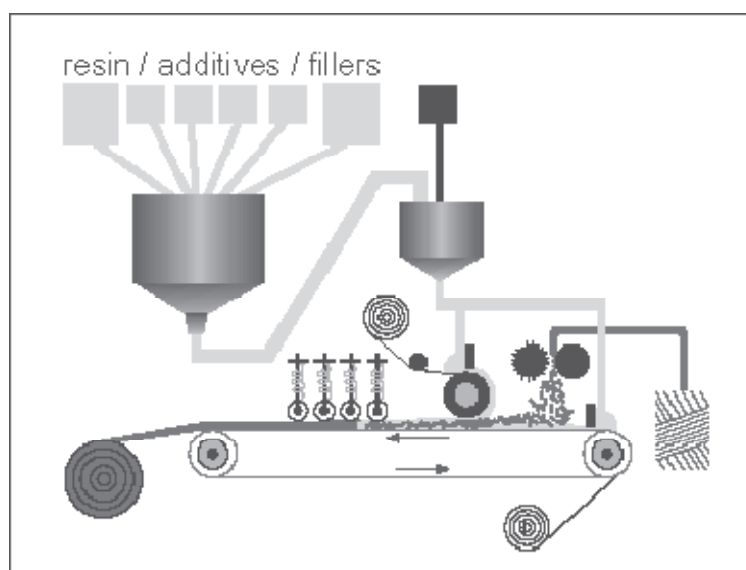


Figure I.13 : Moulages par compression à chaud

d) Moulages par injection

La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, thermoformage, etc.). Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques.

Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats pré imprégnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation.

Le type de matériau obtenu est plus généralement appelé « plastiques renforcés » que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphériques, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries [10].

I.5.3. Moulages sous vide

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction du gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et débulle la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité [10].

I.5.4. Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques, panneaux sandwichs, de panneaux ondulés pour toitures, plaques nervurées, etc.

Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases :

- 1) Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc).
- 2) Une phase de mise en forme.
- 3) Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (50 à 150°C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).
- 4) Une phase de refroidissement et de découpage (voir figure I.14).

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

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

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé. Et permet alors d'élaborer des plaques ou des panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel [10].

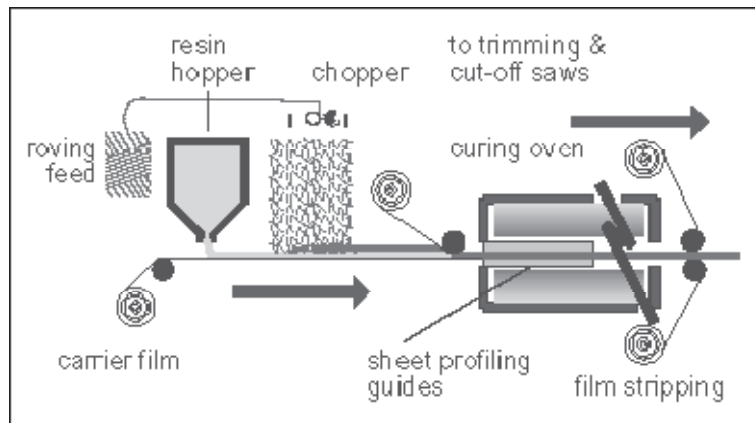


Figure I.14 : Moulage en continu

I.5.5. Moulage par pultrusion

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés, rectilignes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale. Dans cette technique, les renforts : fils, stratifils, rubans, etc. ..., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine (voir figure I.15).

Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques très élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80% en volume. Le procédé est adapté aux productions d'assez grandes séries (vitesse de défilement jusqu'à 20 m/h). Il nécessite un investissement très important en matériel.

Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs [10].

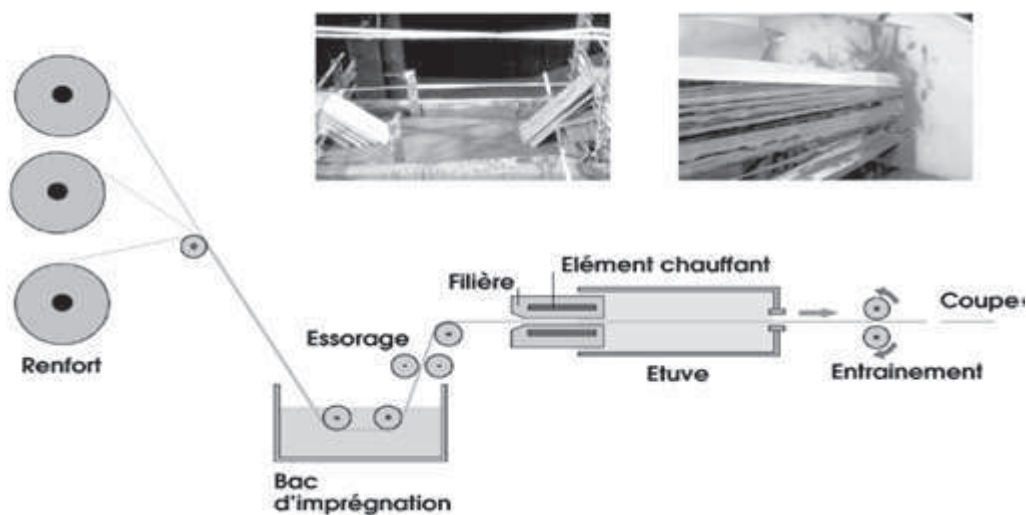


Figure I.15 : Moulage par pultrusion

I.5.6. Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage des pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, etc. Elle est une extrapolation de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé.

Le moule de révolution, enduite d'agent de démoulages, est mis en rotation (à environ 2000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel-coat, on introduit simultanément en continu :

- le renfort : fibre coupée ou stratifil coupé ;
- la résine catalysée et accélérée (résine époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse l'alimentation en résine et de renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve (voir figure I.16).

Un renfort sous forme de rouleau peut être introduit éventuellement en discontinu avant la rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation.

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permet le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision un très bon équilibrage du moule [10].

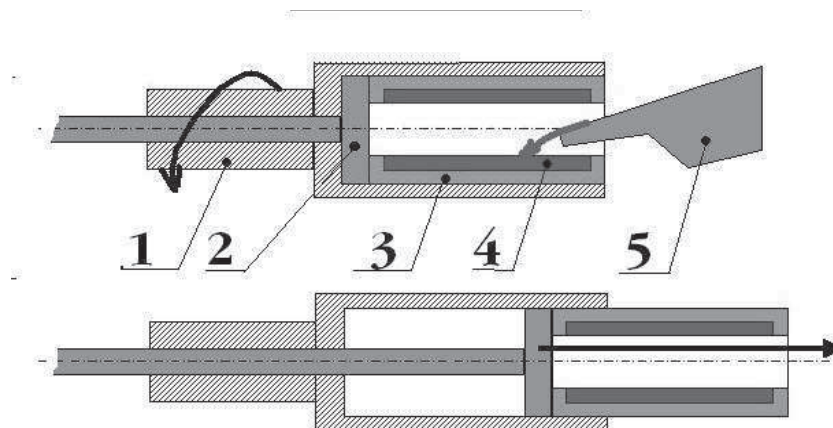


Figure I.16 : Touret-centrifugation.

1=Touret de centrifugation,
3=carapace sable,
5=louche de coulée

2=éjecteur,
4=pièce coulée,

I.5.7. Moulage par enroulement filamentaire

Principe

Le renfort imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation.

Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80% en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement très important en matériel.

Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers type d'enroulements (et par conséquent de stratifications) sont obtenus. On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire [10].

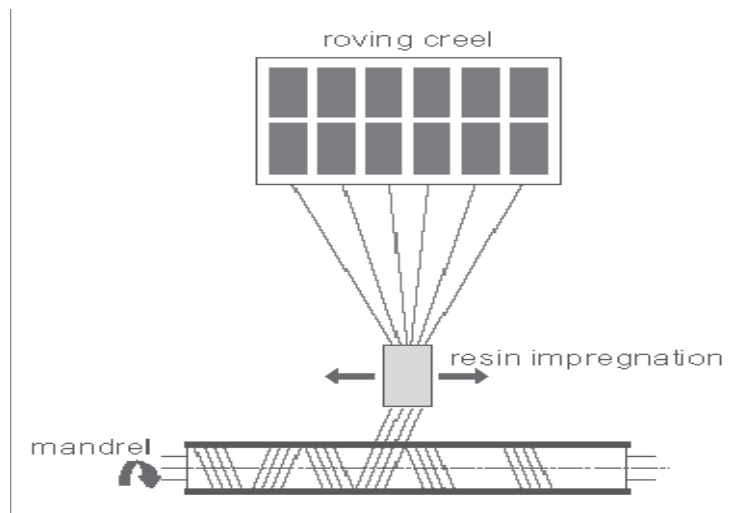


Figure I.17 : Moulage par enroulement filamentaire.

I.6. Domaine d'utilisation des matériaux composites

Les composites entrent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines d'applications possibles.

Piscines, bassins, bâtiments. Les transports aériens, maritime, routier, ferroviaire. Sports et loisirs, etc.

I.6.1. Électricité électronique

Isolants de la grosse constriction électrique, supports de disjoncteurs, supports de circuits imprimés, armoires, coffrets, capots, antennes, radomes, sommets de tours de télévision, chemins des câbles et éoliennes.

Chapitre I : généralités sur les matériaux composites

I.6.2. bâtiment et travaux publics

Cellules d'habitation, cheminées d'usines, coffrages : moules à béton, panneaux de façade, couvertures diverses (coupoles, hublots, ...), piscines, profilés, cloisons, portes, mobilier et sanitaire.

I.6.3. Transport

a) Routier

Pièces de carrosseries : carrosseries complètes, roues, boucliers, calandres, arbre de transmission, ressorts de suspension, poutres de châssis, carters, bras de suspension, cabines, sièges, citernes routières, camions isothermes et caravanes.

b) Ferroviaire

Avants de motrices, voitures, wagons, portes sièges, panneaux intérieurs et gaines de ventilation.

c) Maritime

Hovercrafts, embarcations de sauvetage, vedettes, chalutiers, engins de débarquement, bâtiments antimines, voiliers de compétition, bateaux de plaisance et canoës.

d) Filaire

Cabines de téléphériques, télécabines.

e) Aérien

Avions de tourisme « tout composite », planeurs « tout composite », plusieurs centaines de pièces d'avions : radome, bords d'attaque, volets, pales d'hélicoptères, hélices, arbre de transmission et disques de freins d'avions.

f) Spatial

Corps de propulseurs, corps de rentrée dans l'atmosphère, réservoirs, tuyères.

I.6.4. Mécaniques générale et divers

Engrenages, coussinets, boîtiers de vérins, roues inertielles, bras de robots manipulateurs, lances de métiers à tisser, éléments de tables traçantes, bouteilles de gaz sous pression, tube pour plates-formes offshore et pneumatiques à carcasses radiales.

I.6.5. Sports et loisirs

Raquettes de tennis et de squash, cannes à pêche, skis, planches à voile, de surf, à roulettes, perches à sauter, javelots, arcs et flèches, casques de protection, cadres de bicyclette, clubs de golf et avirons [11].

I.7. conclusion

Les matériaux composites sont utilisés pratiquement dans tous les domaines, vu leur légèreté et le coût comparé aux matériaux traditionnels. En mécanique, l'utilisation des matériaux composites est élargie d'une manière importante vu leurs caractéristiques mécaniques assez bonnes relativement au coût de revient. Les caractéristiques mécaniques ne peuvent être connues qu'avec des méthodes expérimentales sur des éprouvettes normalisées. Dans le chapitre II, nous allons citer quelques essais mécaniques afin d'avoir la méthodologie pour caractériser un certain matériau pour une sollicitation donnée.

Chapitre II

Les essais mécaniques

Chapitre II : Les essais mécaniques

Les essais mécaniques sont des expériences à faire sur des éprouvettes normalisées.

Le but est de caractériser un certains matériaux aux différentes sollicitations mécaniques.

II.1. Différents essais mécaniques

Chaque essai mécanique donne certaine caractéristique, le tableau II.1 montre quelques caractéristiques mécaniques mise en évidence déduite par certains essais mécaniques [12].

Essais mécaniques classiques	Caractéristiques mécaniques principales mises en évidence
<u>TRACTION</u>	Résistance à la traction ; Caractéristiques d'élasticité Capacité d'allongement
<u>DURETÉ</u>	Résistance à la pénétration
<u>RÉSILIENCE</u>	Résistance aux chocs
<u>FATIGUE</u>	Résistance à la fatigue (mouvement répété)

Tableau II.1 : quelques essais et les caractéristiques mécaniques mise en évidence

II.1.1. Essai de traction

L'essai qui nous donne plus d'informations sur un matériau est l'**essai de traction**. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies.

On exerce une force de traction sur une éprouvette normalisée, jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante. L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette [13].

Chapitre II : Les essais mécaniques

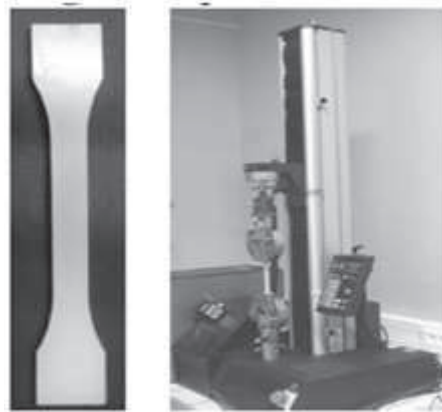


Figure II.1 : éprouvette normalisée et machine de traction

Les différentes étapes de l'essai sont résumées dans la figure II.2

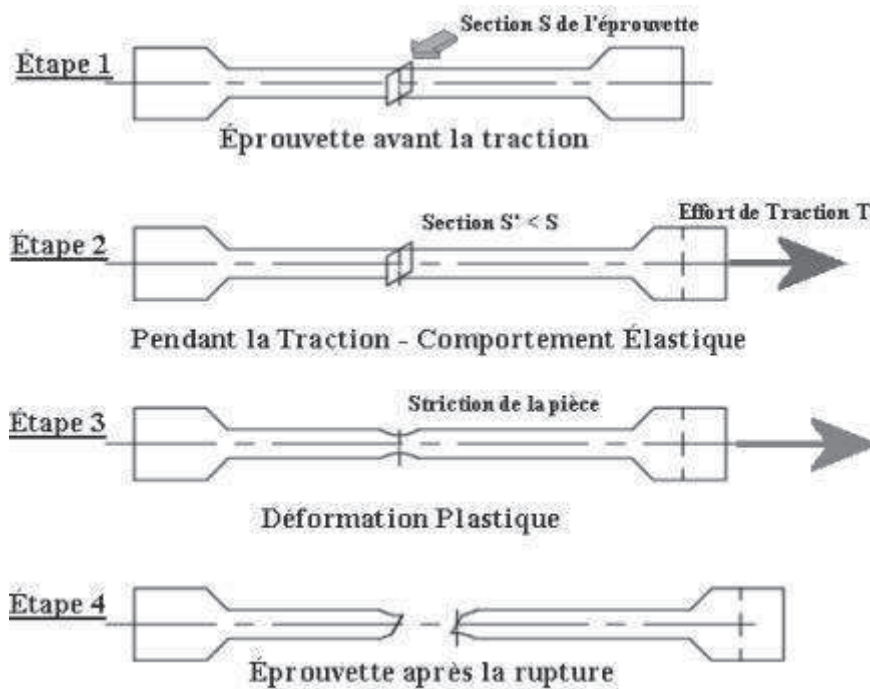


Figure II.2 : étapes de l'essai de traction.

Après l'essai, nous obtenons deux graphes à étudier (voire figure II.3).

Chapitre II : Les essais mécaniques

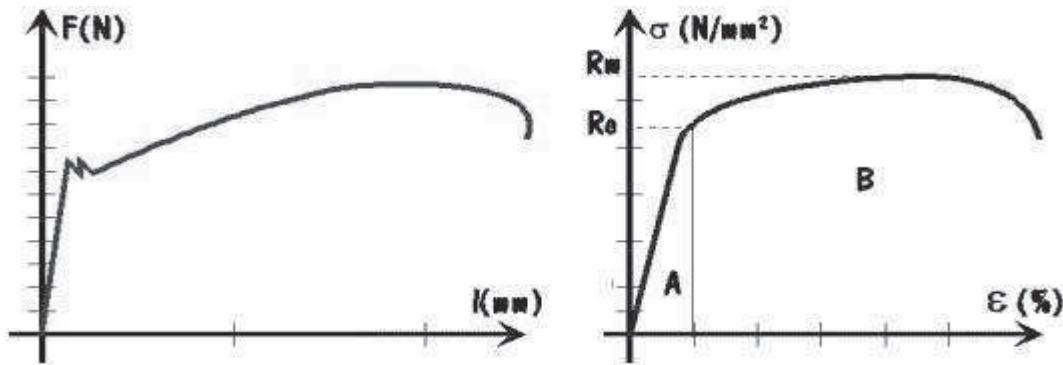


Figure II.3 : digrammes obtenus après l'essai de traction.

Sur le graphe de gauche, on étudie l'allongement de l'éprouvette en fonction de l'effort appliqué, c'est une courbe propre à l'éprouvette testée.

Sur le graphe de droite, on fait apparaître les paramètres du matériau, à savoir le pourcentage d'allongement, en fonction de la contrainte qui est le rapport de l'effort de traction sur la section l'éprouvette.

Dans la courbe des caractéristiques intrinsèques du matériau (celle de droite), on fait apparaître deux zones :

Zone de comportement élastique (Zone A) :

L'éprouvette est sollicitée par une contrainte $\sigma < R_e$, pendant cette phase là, une suppression de l'effort de traction entraînerait un retour de l'éprouvette à ses dimensions normales. On dit que la forme de la courbe est réversible, et que le comportement de l'éprouvette est élastique.

Re (N/mm²) est la contrainte de limite élastique du matériau.

Zone de comportement plastique (Zone B) :

Le comportement plastique du matériau est atteint lorsqu'on dépasse la limite élastique R_e . À partir de ce moment là, une suppression de l'effort de traction sur l'éprouvette laisse apparaître une déformation dite rémanente, c'est à dire que l'éprouvette ne retrouve plus sa forme initiale, la déformation n'est plus réversible.

Le comportement plastique de l'éprouvette permet de faire apparaître les caractéristiques suivantes :

La contrainte de limite à la rupture R_m c'est la valeur maximale de la contrainte pendant l'essai de traction. La contrainte de limite élastique à 0,2% : pour beaucoup de matériau, la courbe d'essai de traction ne montre pas un passage très net du domaine élastique au domaine plastique, on définit alors une limite élastique à 0,2 % notée $R_{e0,002}$ comme étant la contrainte provoquant un allongement rémanent de 0,2 %. Le coefficient de striction qui caractérise la variation relative de la section. Le coefficient de poisson qui caractérise la variation relative de diamètre.

Chapitre II : Les essais mécaniques

II.1.2. Essai de flexion

La flexion est la déformation d'un échantillon qui se traduit par une courbure. Dans le cas d'une poutre, elle tend à rapprocher les deux extrémités de la poutre.

L'essai de flexion d'une poutre est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion. On utilise la flexion dite « trois points » et la flexion dite « quatre points ».

En chaudronnerie, le pliage d'une tôle est une flexion pour laquelle on veut dépasser la limite élastique du matériau, afin d'avoir une déformation définitive (déformation plastique). Dans la plupart des autres cas, on cherche au contraire les conditions nécessaires pour ne pas dépasser la limite élastique, afin de préserver l'intégrité de la pièce [14].

II.1.2.1. Essai de flexion trois points

L'essai de flexion 3 points permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une éprouvette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture. Comme l'essai de compression, l'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction [15].

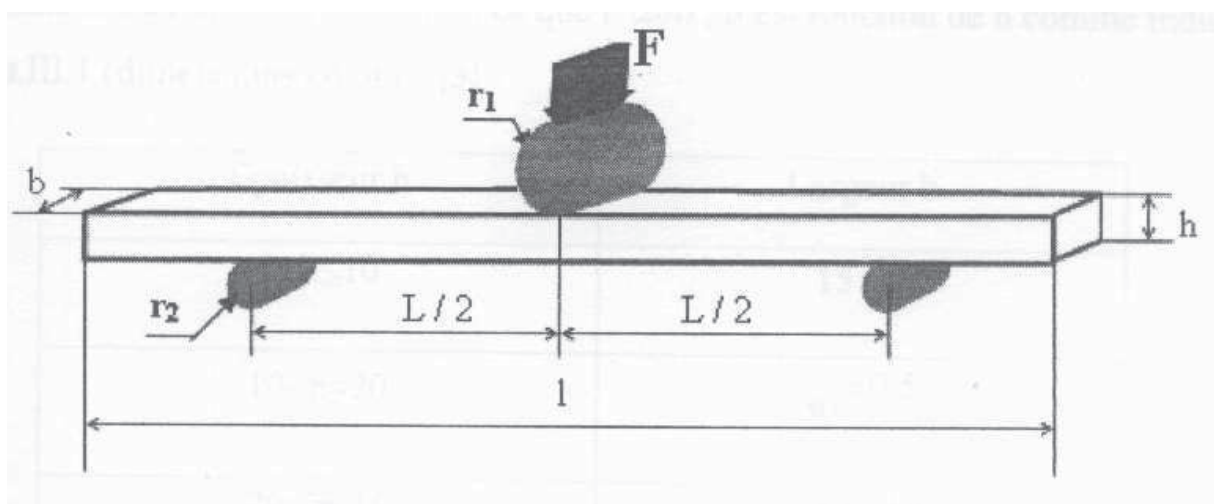


Figure II.4 : schéma représentant flexion trois points

Avec :

F : charge appliquée ;

r_1 : rayon du cylindre de la panne ;

r_2 : rayon des cylindres appuis ;

L : longueur entre appuis ;

Chapitre II : Les essais mécaniques

l : longueur totale de l'éprouvette ;

h : hauteur de la poutre ;

b : largeur de la poutre.

On notera cependant que les contraintes normales maxi sont fonction de la distance entre appuis, ce qui n'est pas le cas de la contrainte de cisaillement maxi. En pratique, lors des essais de flexion, il est donc possible de privilégier un mode de rupture par rapport à l'autre en jouant sur la distance entre appuis. Par exemple, pour des composites à fibres de verre type I ou II, on aura :

— pour, $L / h \geq 16$ rupture en traction-compression ;

— pour, $L / h \leq 5$ rupture en cisaillement interlaminaire [16].

La courbe contrainte – déformation est donnée par la figure II.4.

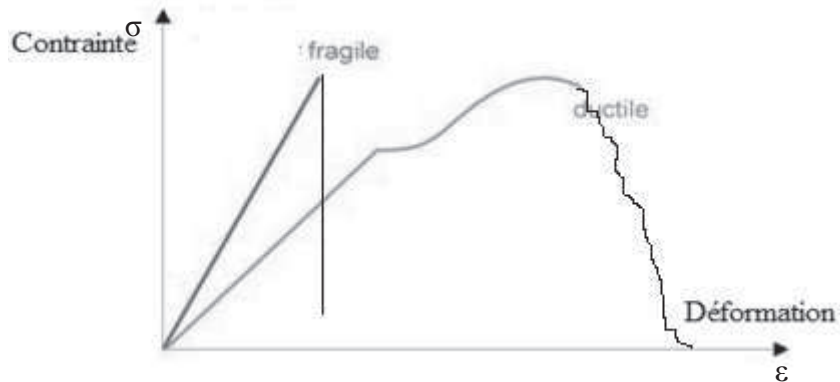


Figure II.5 : courbe contrainte-déformation : matériau fragile et ductile.

Les rayons de la panne et des cylindres d'appuis sont données dans le tableau II.2 [16].

Rayon	Rayon en mm
r_1	5 – 0.2
r_2 pour $h < 3\text{mm}$	2 – 0.2
r_2 pour $h > 3\text{ mm}$	5 – 0.2

Tableau II.2 : dimensions des rayons panne et cylindres d'appuis.

Les Dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois pannes, selon EN ISO 14125 sont données dans le tableau II.3 [2].

Chapitre II : Les essais mécaniques

Epaisseur h	Largeur b
$1 < h \leq 10$	$15^{\pm 0.5}$
$10 < h \leq 20$	$30^{\pm 0.5}$
$20 < h \leq 35$	$50^{\pm 0.5}$
$35 < h \leq 50$	$80^{\pm 0.5}$

Tableau II.3 : dimensions des éprouvettes de flexion trois points.

La variation de la contrainte normale σ_f est donnée par la relation :

$$\sigma_f = \pm \frac{3FL}{2bh^2} \quad (\text{II.1})$$

La contrainte de cisaillement interlaminaire τ est donnée par la relation :

$$\tau = \frac{3F}{4bh} \quad (\text{II.2})$$

Pour la raison de symétrie, les réactions aux appuis sont :

$$R_A = R_B = F/2 \quad (\text{II.3})$$

Pour l'effort tranchant on a :

- ❖ $0 \leq x \leq L/2$: $T = R_A = F/2$
- ❖ $L/2 \leq x \leq L$: $T = -R_B = -F/2$

Pour le moment fléchissant, on a :

$$M_f = \int_0^x T dx \quad (\text{II.4})$$

Pour $0 \leq x \leq L/2$: $M_f = F/2 \cdot x$

Pour $L/2 \leq x \leq L$: $M_f = -F/2 (x - L)$.

Les diagrammes des efforts en flexion 3 points sur une poutre est représenté dans la figure II.6

Chapitre II : Les essais mécaniques

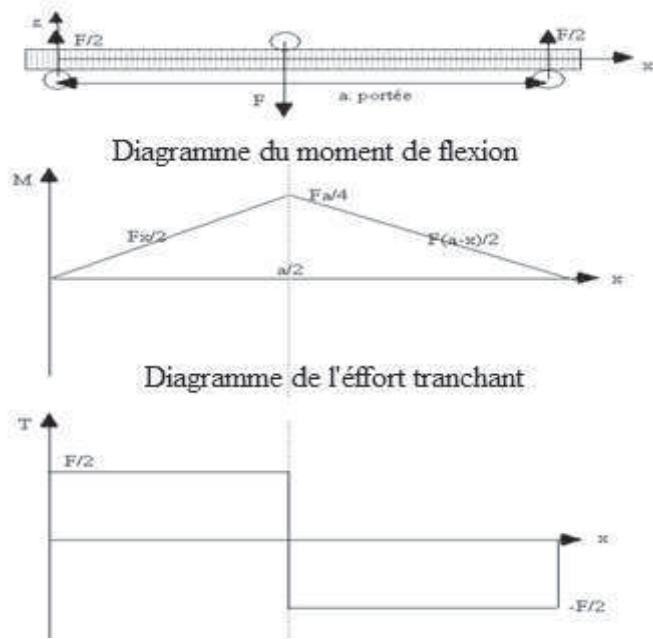


Figure II.6 : diagrammes de l'effort tranchant et du moment fléchissant.

Calcul de l'énergie de déformation (w)

$$\text{On a } W = W_{fl} + W_{tr} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$W_{fl} = \frac{1}{EI} \int_0^{L/2} M^2 dx \quad (\text{II.6})$$

$$W_{tr} = \frac{1}{GS} \int_0^{L/2} T^2 dx \quad (\text{II.7})$$

En remplaçant (II.6) et (II.7) dans (II.5) et en faisant les calculs on aura :

$$W = \frac{F^2 L^3}{96EI} \left[1 + \frac{12EI}{GSL^2} \right] \quad (\text{II.8})$$

Pour la flèche, on a d'après le théorème de CASTIGLIANO:

$$\delta_T = \frac{\partial W}{\partial F} \quad (\text{II.9})$$

Donc :

$$\delta_T = \frac{FL^3}{48EI} \left[1 + \frac{12EI}{GSL^2} \right] \quad (\text{II.10})$$

L'équation de la déformée s'écrit sous forme :

$$EIY'' = -M_f \quad (\text{II.11})$$

$$Y'' = -\frac{1}{EI} \left(\frac{F}{2} x \right) \quad (\text{II.12})$$

Chapitre II : Les essais mécaniques

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{II.13})$$

Y'' est la dérivée seconde de Y , on passant par l'intégration deux fois, on aura :

$$Y = -\frac{1}{EI} \left(\frac{F}{12}x^3 + C_1x + C_2 \right)$$

C_1 et C_2 sont des constantes d'intégration, on les détermine par les conditions aux limites :

$$X=0 \Rightarrow Y=0, \text{ d'où } C_2=0$$

$$X=L/2 \Rightarrow Y'=0, \text{ d'où } C_1 = -\frac{FL^2}{16}$$

Au finale :

$$Y = -\frac{1}{EI} \left(\frac{F}{12}x^3 - \frac{FL^2}{16}x \right) \quad (\text{II.14})$$

Pour une valeur de $x = L/2$, on aura la flèche maxi :

$$Y_{\max} = \frac{FL^3}{48EI} \quad (\text{II.15})$$

L'expression du module de YOUNG :

$$E = \frac{FL^3}{48Y_{\max}I} \quad (\text{II.16})$$

On peut introduire l'expression de la déformation :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (\text{II.17})$$

II.1.2.2. l'essai de flexion quatre points

La différence principale avec la flexion trois points se situe entre les deux charges : le moment fléchissant est constant et l'effort tranchant est nul. Cette situation est qualifiée de flexion pure [14].

II.1.3. fatigue

Les essais mécaniques ci-dessus cités constituent une étude en statique du matériau.

En effet, on cherche le plus souvent à travailler dans le domaine élastique d'un matériau, et une étude statique permet de déterminer la zone élastique.

Mais, lorsque les efforts varient avec le temps, c'est le phénomène de fatigue qui intervient. Les pièces peuvent rompre même si elles travaillent dans le domaine élastique.

La fatigue concerne tous les matériaux et pas uniquement les métaux: le phénomène de fatigue existe auprès des polymères.

Chapitre II : Les essais mécaniques

Le phénomène de rupture par fatigue se déroule en 3 phases distinctes:

PHASE I : phase d'initiation de la fissure

PHASE II : Phase de propagation de la fissure

PHASE III : Phase de rupture finale de la pièce

Principe

On sollicite jusqu'à rupture plusieurs éprouvettes du même métal, et selon le nombre de cycles de rotation qu'elles ont réussi à encaisser et la contrainte à laquelle elles ont été soumises, on détermine la limite de rupture en fatigue.

II.1.4. essai de résilience

II.1.4.1. principe

Cet essai consiste à rompre en son milieu d'un seul coup de mouton-pendule une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. Cet essai (procédure) s'appelle essai de CHARPY. On détermine l'énergie absorbée par la pièce dont on déduit la résilience.

II.1.4. 2. Principe de L'essai de Charpy

Le choc d'un solide contre un autre produit un effort important appliqué instantanément appelé Force de Percussions, qui dure un instant très court de l'ordre de 0.015, c'est la force la plus rapidement appliquée quand possible réalisée, l'essai d'un matériau effectué dans ces conditions caractérise sa résistance à l'action d'une force instantanée, mais la mesure de l'intensité d'une telle force est très délicate à mettre en œuvre.

La résistance aux chocs d'un matériau ne sera pas donnée en fonction de l'intensité de la force de percussions, mais du travail dépensé pour rompre l'éprouvette d'essai.

L'appareil utilisé pour mesurer cette énergie est le mouton Charpy (voir figure II.7).

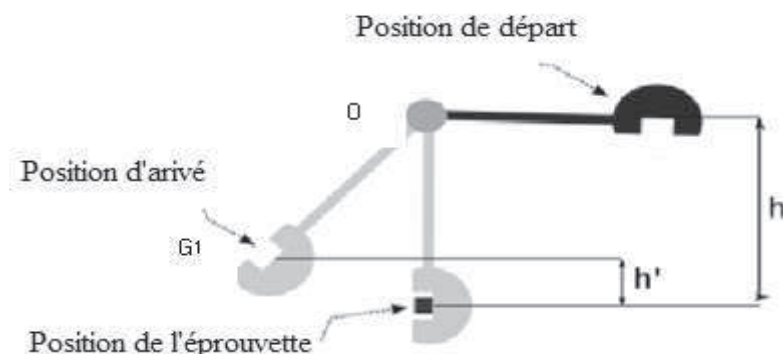


Figure II.7 : Principe de l'essai Charpy

La figure II.7 est l'ensemble dit mouton Charpy, qui comporte principalement un pendule tournant au tour d'axe.

Chapitre II : Les essais mécaniques

L'éprouvette d'essai est posée sur deux appuis parallèles, elle est entaillée du côté opposé au point d'impact.

Dans cet appareil un dispositif de blocage permet de maintenir le pendule à la position départ est de libéré brusquement, le pendule tourne au tour de O vient frapper l'éprouvette lorsqu'il atteint sa position la plus basse au point G, et rampât l'éprouvette et remonte. Un dispositif permet de repère avec exactitude la position au G_1 .

L'énergie absorbée durant la rupture de l'éprouvette :

$$Tr = P(h - h') \quad (II.19)$$

En appelle résilience, le rapport du travail de rupture par la section nette de l'éprouvette au doit de l'entaille.

Les notations précisent à employées sont :

KCV : Entaille en V

KCU : Entaille en U

La relation entre la résilience normalisée KV et les résiliences KCV et KCU (non normalisées) sont données par les relations du tableau II.4.

KCV est obtenue en multipliant KV par 1,25

KCU est obtenue en multipliant K par 2

Unité	J/cm ²	Joule
Forme d'entaille		
V	KCV	1.25 KV
U	KCU	2 KV

Tableau II.4 : relation entre Kv avec Kcv et Kcu

II.2 Conclusion

La caractérisation d'un matériau composite doit tenir en compte de toutes les conditions. Les essais mécaniques sont réalisés pour déterminer les propriétés mécaniques intrinsèque du matériau afin d'optimiser la matière, minimiser les coûts de production, prévoir la fatigue et la rupture..., mais, dans l'industrie, on est confronter à des dommages et rupture avant les limites tracer dans l'étude, car d'autres paramètre intervient comme la présence des défauts dans les pièces. Donc, nous voyons la compréhension et l'étude de la mécanique de la rupture qui est le sujet du 3ème chapitre est très importantes.

Chapitre III

Notions de la mécanique de la rupture

III.1. Introduction

La mécanique de la rupture tend à définir une propriété du matériau qui peut se traduire par sa résistance à la rupture fragile (fracture). Car si les structures sont calculées pour que les contraintes nominales ne dépassent pas, en règle générale, la limite d'élasticité du matériau et soient donc par voie de conséquence à l'abri de la ruine par rupture de type ductile ; elles ne sont pas systématiquement à l'abri d'une ruine par rupture de type fragile que ce soit à partir d'une fissure préexistante à la mise en service ou créée en service.

III.2. Mode de rupture

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible des lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements.

Les mouvements possibles de chaque fissure sont représentés en trois modes indépendants :

Mode I : ouverture (ou clivage) ;

Mode II : cisaillement plan ;

Mode III : cisaillement anti-plan.

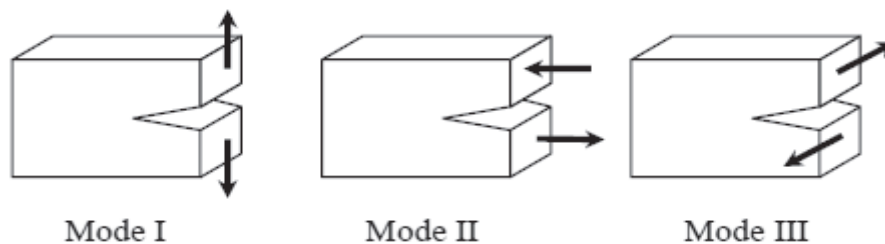


Figure III.1 : Mode de rupture

III.3. Ténacité en choc

III.3.1. Définition

C'est la résistance des matériaux à la propagation de la fissure. Elle prend en compte la présence de défauts.

III.3.2. Principe

On détermine expérimentalement la ténacité, en utilisant des éprouvettes pré-fissurées de différentes manière (entaille : centrale, double latérale, latérale..., Voir la figure III.2 [17]).

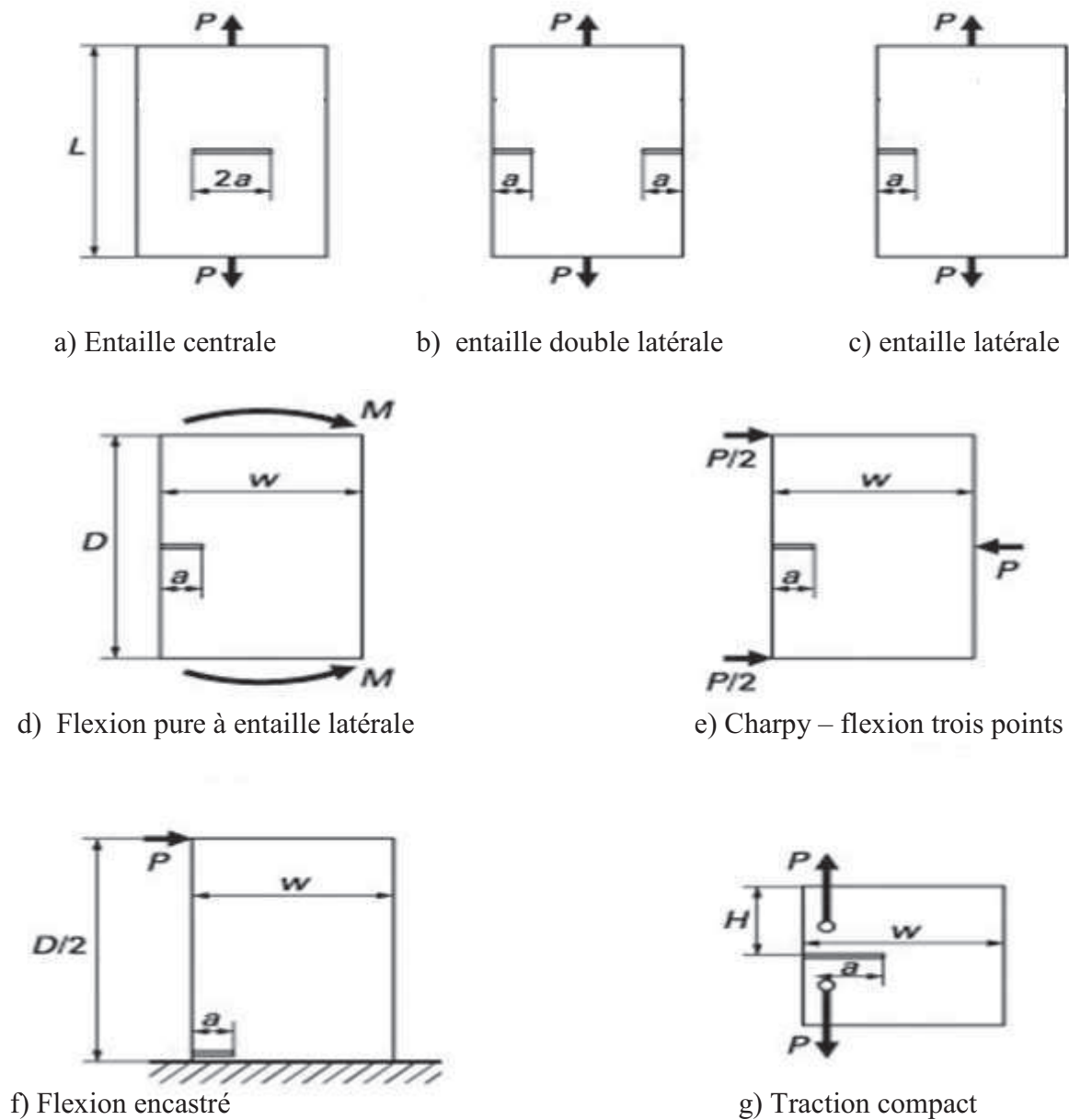


Figure III.2 : les différentes manières de la pré-fissuration des éprouvettes.

On fait subir aux échantillons un système de force dépendant du mode de rupture à étudier. Le mode 1 est le plus pénalisant.

La résistance à la fissuration est représentée par :

G_c : le taux de restitution d'énergie

Ou

K_{Ic} : le facteur d'intensité de contrainte.

III.4. Facteur d'intensité de contrainte

Le facteur d'intensité de contrainte K caractérise la sévérité des contraintes au voisinage du fond de fissure. Il est utilisé comme tous les autres critères pour quantifier une possibilité de propagation instable qui est à éviter. En mode I, il est donné par la formule suivante :

$$K_I = \sigma \cdot \Phi \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{III.1})$$

Où : Φ est un coefficient géométrique dépendant des formes de la fissure et de la structure.

Dans le cas le plus simple, où la fissure est débouchant dans une plaque de dimension infinies Φ prend la valeur de 1.

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{III.2})$$

III.4.1 Critère de résistance

Pour conclure sur la sécurité de la structure, on compare la valeur du FIC K_I à une valeur caractéristique critique du matériau considéré appelée, FIC critique K_{Ic} , par l'expression suivante :

$$\sigma \cdot \Phi \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \leq K_{Ic} \quad (\text{III.3})$$

Cette expression met en évidence la relation existante entre la géométrie de la structure et celle de la fissure avec le niveau de chargement et le type du matériau. Il s'ensuit que le concepteur ou le contrôleur peut respecter cette condition en intervenant pour un choix obligatoire ou optimum sur :

Le chargement : par l'abaissement du niveau de sollicitation, en diminuant la contrainte nominale, ou localement en évitant les concentrations de contraintes.

Le type de matériau : en choisissant un matériau qui possède un K_{Ic} plus élevé.

La géométrie : faire un contrôle des défauts, et intervenir sur les dimensions de la structure.

III.4.2 calcul de K_{Ic}

III.4.2.1 Problème de GRIFFITH

Sous ce nom est désigné le problème élémentaire d'une fissure de longueur $2a$, dans une plaque infinie dans les deux directions chargées uniformément selon le mode I.

Le facteur d'intensité de contrainte est dans ce cas :

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (III.4)$$

$$\Phi = 1$$

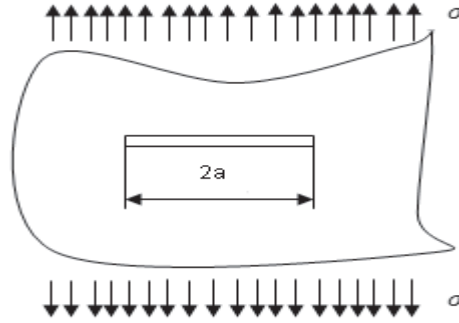


Figure.III.3: fissure de longueur 2a dans une plaque infinie

On montre que tous les cas peuvent se déduire du problème de Griffith par introduction de différents facteurs de correction tenant compte de la géométrie du détail, de la forme de la fissure, du champ local de contraintes, etc..

III.4.2.2 Problème de GRIFFITH dans le cas d'une plaque de largeur finie

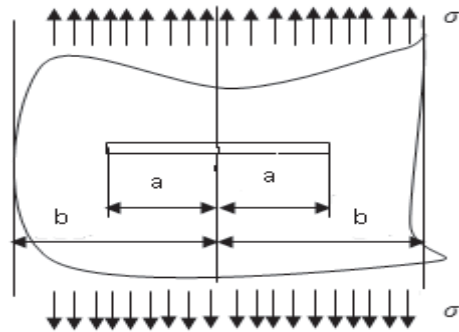


Figure.III.4: fissure de longueur 2a dans une plaque finie

$$\Phi = f\left(\frac{a}{b}\right)$$

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \times f\left(\frac{a}{b}\right) \quad (III.5)$$

Le facteur de correction $\Phi = f\left(\frac{a}{b}\right)$ peut-être calculé à 0,3% près par la formule ci-après :

$$\Phi = f\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{1 - 0,5\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 0,044\left(\frac{a}{b}\right)^3}{\sqrt{1 - \frac{a}{b}}} \quad (III.6)$$

La même formule peut-être utilisée dans le cas du mode II. Dans le cas du mode III, l'expression (III.7) fournit une valeur exacte de K_{III} .

$$K_{III} = \tau\sqrt{\pi a} \left(\frac{2b}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2b}\right)^{1/2} \quad (III.7)$$

III.4.2.3 Double fissure débouchant dans une plaque de largeur finie

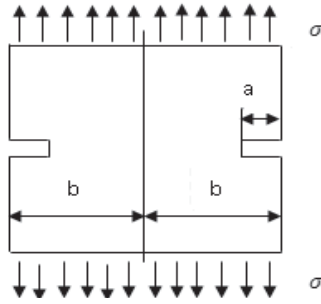


Figure.III.5: double fissure débouchant dans une plaque de largeur finie

Dans ce cas, le facteur de contrainte est, avec une précision de 0,5%, calculé par la formule (III.8)

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{1,122 - 0,561\frac{a}{b} - 0,205\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 0,471\left(\frac{a}{b}\right)^3 - 0,190\left(\frac{a}{b}\right)^4}{\sqrt{1 - \frac{a}{b}}} \quad (III.8)$$

K_I et K_{II} sont calculés à l'aide de la formule (III.5) avec $f\left(\frac{a}{b}\right)$ donnés par (III.7).

III.4.2.4 Eprouvette de flexion en trois points

$$K_I = \frac{3PL}{2b^2t} \sqrt{\pi a} \times f\left(\frac{a}{b}\right) \quad (III.9)$$

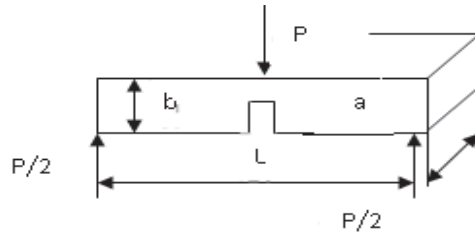


Figure.III.6 : éprouvette en flexion trois points

Le facteur de correction $f\left(\frac{a}{b}\right)$ dépend du rapport $\frac{L}{b}$

Pour $\frac{L}{b} = 4$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = 1,090 - 2,120\frac{a}{b} + 8,20\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 14,18\left(\frac{a}{b}\right)^3 + 14,57\left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad (III.10)$$

Pour $\frac{L}{b} = 8$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = 1,107 - 2,120\frac{a}{b} + 7,71\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 13,55\left(\frac{a}{b}\right)^3 + 14,25\left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad (III.11)$$

III.4.3. relation entre K_{Ic} et K_V

Les relations proposées ne sont valables que dans un domaine restreint de température.

III.4.3.1 Niveau ductile de la courbe de transition

La méthode BOLFE- BARSOM [20] propose de déterminer une relation entre K_{IC} et K_V . Cette relation est la suivante :

$$\left[\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right]^2 = 0.646 \frac{K_V}{\sigma_e} - 6.35 \times 10^{-3} \quad (\text{III.12})$$

En remarque à travers cette relation que K_{IC}^2 et K_V est une relation linéaire.

III.4.3.2 Niveau fragile et bas de la courbe de transition

Nous retiendrons dans ce cas la relation de SAILORS et CORTEN qui dit que

$$K_{IC}^2 = \alpha E \cdot (K_V) \quad (\text{III.13})$$

Le coefficient α varie entre $0.66 \cdot 10^{-3} < \alpha < 10^{-3}$ selon la nature de métal étudié

Cette relation fournit une valeur dynamique de K_{IC} , la courbe de K_{IC} statique et dynamique sont décalées, ROLFE et BARSOM proposent d'exprimer ces décalages par les relations :

$$\Delta T = 95 - 0,1\sigma_e \uparrow \quad \Rightarrow \quad 250 \leq \sigma_e \leq 950 \quad (\text{III.14})$$

$$\Delta T = 0 \quad \Rightarrow \quad \sigma_e > 950 \quad (\text{III.15})$$

Ainsi que la courbe K_{IC} statique est telle obtenue par translation vers la gauche de la courbe K_{IC} dynamique.

III.4.4 Limite de validation du concept du (FIC)

Le critère précédemment prononcé n'est valable que dans le matériau isotrope ayant un comportement élastique parfaitement plastique. Par ailleurs, la concentration de contrainte en fond d'entaille crée une plastification locale dans l'entaille et doit rester petite par rapport à la longueur de la fissure et à la dimension de la structure de façon à ne pas perturber la distribution élastique des contraintes. (MLER) est d'autant plus applicable que la zone plastique est petite se qui impose aux pièces d'avoir des dimensions très supérieures à la taille de cette zone, laquelle est la fonction du rapport $\frac{K_{IC}}{\sigma_e}$

La ASTM (américain société of testing matériel) sa recommandation est imposée aux éprouvettes utilisées pour la détermination du (FIC) d'avoir l'épaisseur (t) et une longueur (a) t et a en mettre.

$$t, a \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right)^2 \quad (\text{III.16})$$

III.5 Zone plastique

III.5.1 Approche d'Irwin

Dans le plan d'une fissure et en aval de l'extrémité de celle-ci, la contrainte normale σ_y lorsque la sollicitation est en mode I par exemple, pour $\theta=0$ est donné par la relation suivante

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (\text{III. 17})$$

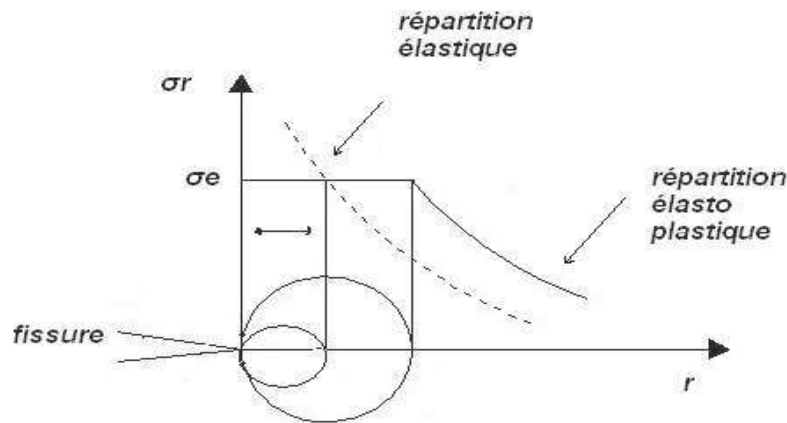


Figure.III.7 : répartition des contraintes élastique et élastoplastiques dans le plan de la fissure et en aval de son extrémité

Au voisinage de la pointe, il existe des contraintes qui dépassent la limite élastique, donc création d'une zone plastique de dimension :

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_E} \right)^2 \quad (\text{III. 18})$$

La plastification se produit pour tout $r \leq r_p$.

IRWIN, considère l'expression (III. 19) qui donne une valeur pour laquelle tout r qui lui est inférieure est supposé comme plastifié, puis il énonce que la zone plastique en mode I est circulaire de diamètre égale à r_p . Mais pour des considérations de la distribution des contraintes, il s'est avéré que la zone plastique est plus étendue, généralement, on admet que r_p est un rayon pour cette zone. Comme le montre la figure III.7.

Ces considérations sont valables que pour un état de contrainte plan, la triaxialité des contraintes en un état de déformation plan donne un rayon de la zone plastique par l'équation (III. 19).

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_E} \right)^2 \quad (\text{III. 19})$$

III.5.2 Modèle de DUGDALE- BARENBLATT

Dans un état de contrainte plan, un autre modèle de zone plastique en mode I a été proposé par DUGDALE qui suppose que la plastification en bout de fissure se fait selon des bandes étroites de longueurs w , comme illustré sur la figure III.8 [20].

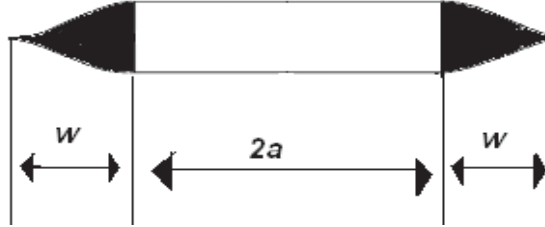


Figure.III.8 : la forme de la zone plastique Selon DUGDALE

Dans une pièce soumise à une traction uniforme à l'infinie, la valeur de w est donnée par la relation (III. 20).

$$w = -a + \frac{a}{\cos \frac{\sigma \pi}{\sigma_e 2}} \quad (\text{III. 20})$$

On remarque par considération du seul premier terme du développement en série de $\cos \frac{\sigma \pi}{\sigma_e 2}$ que, lorsque $\sigma \ll \sigma_e$, la taille de la zone plastique donnée par ce modèle est peu différente de celle prévue par IRWIN.

$$W = \frac{\pi K_I^2}{8 \sigma_e^2} \approx \frac{K_I^2}{\pi \sigma_e^2} \quad (\text{III. 21})$$

Cependant, lorsque le rapport $\frac{\sigma}{\sigma_e}$ devient important, les modèles de DUGDALE et celui d'IRWIN diffèrent considérablement.

Lorsque la taille de la zone plastique n'est pas négligeable en regard des dimensions du corps ou de la longueur de la fissure, cette dernière doit être corrigée du rayon de la zone plastique. La longueur à considérer est alors une longueur dite effective a_{eff} (ou corrigée), telle que :

$$a_{\text{eff}} = a + r_p \quad (\text{III. 22})$$

Le facteur d'intensité de contrainte devient alors :

$$K_{\text{Ieff}} = \Phi (a_{\text{eff}}) \sigma \sqrt{\pi a_{\text{eff}}} \quad (\text{III. 23})$$

Et il est dit facteur d'intensité de contrainte effectif. La taille de la zone plastique étant elle-même fonction de K_I , la valeur effective du facteur d'intensité de contrainte doit être obtenue par approximations successives [7].

L'existence de la zone plastique suppose un comportement du matériau non linéaire, alors des caractéristiques différentes de celles supposées idéales, donc la comparaison du K_I ne doit pas

Chapitre III : Notions de la mécanique de la rupture

être avec le K_{Ic} mais avec une valeur critique K_c qui est relié à la valeur de K_{Ic} par la relation (III. 24), mais on peut garder le calcul par K_{Ic} si l'épaisseur est suffisante pour avoir un état de déformation plan au sein de l'éprouvette ce qui est montré dans la figure III.9 [7].

$$K_c^2 = K_{Ic}^2 \left[1 + \frac{1.4}{t^2} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_e} \right)^4 \right] \quad (\text{III. 24})$$

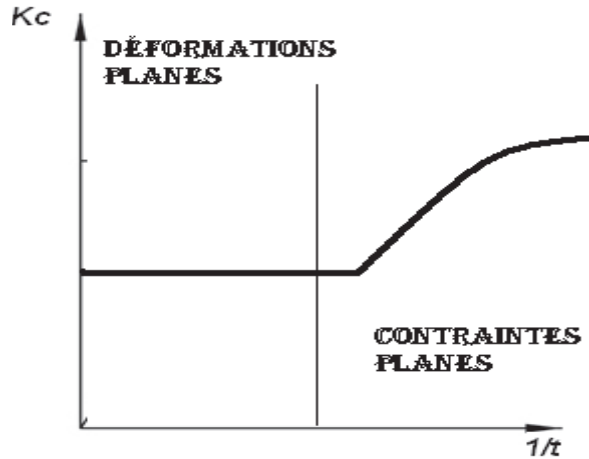


Figure.III.9 : la variation de K_{Ic} en fonction de l'épaisseur

III.5.3 Formes de la zone plastique

TRESCA et VON MISES considère pour illustrer l'étendu de la zone plastifiée, qui n'est pas forcément circulaire.

Le calcul de la forme de la zone plastique $r_p(\theta)$ par ces deux critères donne, en mode I :

a) En contraintes planes

$$\text{Von Mises} \quad r_p(\theta) = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_E^2} \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \left(1 + 3\sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (\text{III.25})$$

$$\text{Tresca} \quad r_p(\theta) = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_E^2} \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \left(1 + \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)^2 \quad \text{pour } 0 < \theta < \pi \quad (\text{III.26})$$

b) En déformations planes

$$\text{Von Mises} \quad r_p(\theta) = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_E^2} \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \left((1 - 2\nu)^2 + 3\sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (\text{III.27})$$

Tresca

$$\left\{ \begin{array}{l} r_p(\theta) = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_E^2} \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \left(1 - 2\nu + \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)^2 \text{ si } 0 \leq \theta \leq 2 \text{Arc sin}(1 - 2\nu) \\ r_p(\theta) = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_E^2} \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \text{ pour } 2 \text{Arc sin}(1 - 2\nu) < \theta < \pi \end{array} \right. \quad (\text{III.28})$$

III.6 Taux de restitution d'énergie

Noté G , le taux de restitution d'énergie représente l'énergie nécessaire pour faire progresser la fissure d'une longueur unité.

Elle correspond à la décroissance de l'énergie potentielle totale W_p pour passer d'une configuration initiale avec une longueur de fissure a , à une autre où la fissure s'est propagée d'une longueur da :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial W_p}{\partial A} \\ W_p = W_e + W_{ext} \end{array} \right. \quad \text{Avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} W_e = \int_{\Omega} \sigma : \varepsilon \\ W_{ext} = \int_{\Omega} f \cdot u \end{array} \right. \quad (\text{III.29})$$

Où W_e représente l'énergie de déformation élastique, W_{ext} l'énergie potentielle des forces extérieures F , et ∂A l'incrément de surface correspondant à l'extension de la fissure.

En utilisant le champ des contraintes dans la zone singulière et la loi de comportement élastique linéaire, il est possible de relier le taux de restitution d'énergie aux facteurs d'intensités de contraintes par :

$$G = \frac{(K_I^2 + K_{II}^2)}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2u} \quad \text{où} \quad \left\{ \begin{array}{l} E' = E \text{ en contraintes planes} \\ E' = \frac{E}{1-\nu^2} \text{ en déformations planes} \\ u = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ est le module de cisaillement} \end{array} \right. \quad (\text{III.30})$$

Où E est le module d'Young et ν le coefficient de poisson.

III.7. méthode de la complaisance pour la mesure du taux de restitution d'énergie G_c

La complaisance représente le déplacement provoqué par une force appliquée égale à l'unité. C'est donc l'inverse de la rigidité K :

$$P = Kx \Leftrightarrow x = C P \quad (\text{III.31})$$

Dans le domaine de la mécanique, la mesure de C , ou plus précisément celle de sa dérivée par rapport à la longueur de la fissure permet une détermination commode du facteur d'intensité de contrainte. [18].

Considérons deux éprouvettes identiques contenant des fissures de longueurs voisines a et $a + da$.

L'énergie nécessaire à la propagation de la fissure de a à $(a+da)$ est égale à la surface du triangle OAB, c'est-à-dire :

$$U = \int_0^{P_c} [x(a + da) - x(a)] dP \quad (\text{III.32})$$

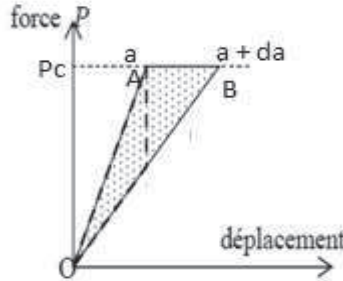


Figure III.10 : variation du déplacement pour un accroissement de la fissure a charge constante.

Par ailleurs, nous ne considérons que le premier terme du développement en série de Taylor, on peut écrire :

$$x(a + da) - x(a) = \left(\frac{\partial x}{\partial a}\right)_P da \quad (\text{III.33})$$

Ayant, par définition de la complaisance, $x = CP$, on obtient la relation:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial a}\right) = P \left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)_P da \quad (\text{III.34})$$

D'où:

$$U = \left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)_P da \int_0^{P_c} P dP = \frac{1}{2} P_c^2 da \left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)_P \quad (\text{III.35})$$

L'énergie de propagation unitaire G_c est donc égale à $\frac{U}{da}$, c'est-à-dire

$$G_c = \frac{1}{2} P_c^2 da \left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)_P \quad (\text{III.36})$$

Il s'en suit que la mesure de $\left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)_P$ permet la détermination de K_I .

En pratique on réalise n essais avec n longueurs de fissure différentes. La pente de chaque droite P-x représente la valeur de la complaisance pour cette longueur de fissure.

Il est ainsi possible de tracer la courbe C - a et de déterminer $\left(\frac{\partial C}{\partial a}\right)_P$ à l'instabilité [18].

III.7.1 Mesure de G_{IC} par essai de choc

E. Plati et J.G. Williams [19] ont proposé une méthode d'exploitation des résultats de choc Charpy ou Izod permettant de déduire l'énergie de rupture G_{IC} du matériau.

Pour le cas des ruptures fragiles, ces deux auteurs ont considéré une éprouvette avec une fissure de longueur a et de surface A , soumise à une charge P entraînant un déplacement x . Si la déformation de cette éprouvette est purement élastique, sa complaisance est exprimée par :

$$C(a) = \frac{x}{P} \quad (III.37)$$

L'énergie élastique emmagasinée a pour expression :

$$U = \frac{1}{2} p x = \frac{1}{2} p^2 C \quad (III.38)$$

Le taux de restitution d'énergie d'une éprouvette est déterminé par la relation (III.39).

$$G = \frac{dU}{dA} \quad (III.39)$$

$$D'où : \quad G = \frac{1}{2} p^2 \frac{dC}{dA} = \frac{1}{2} \frac{P^2}{B} \frac{dC}{dA} \quad (III.40)$$

Pour une rupture fragile (instable) celle-ci s'effectue sans apport d'énergie supplémentaire de la part des forces extérieures. L'énergie consommée par la création de deux surfaces est prélevée sur l'énergie élastique stockée et l'énergie perdue par le marteau sera égale à l'énergie élastique emmagasinée jusqu'au moment de l'amorçage (figure III.8)

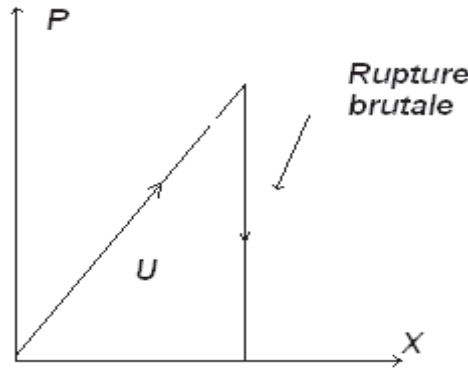


Figure III.11 : courbe force-déplacement d'une rupture fragile

En tirant la valeur de p^2 à partir de la dernière équation et en la remplaçant dans l'expression de l'énergie élastique U , nous obtenons :

$$p^2 = \frac{2Gc \cdot B}{dC/da} \quad (III.41)$$

Et

$$U = Gc \cdot B \cdot \frac{C}{dC/da} = Gc \cdot B \cdot W \cdot \frac{C}{dC/d(\frac{a}{W})} = Gc \cdot B \cdot W \cdot \Phi \quad (III.42)$$

Chapitre III : Notions de la mécanique de la rupture

B est l'épaisseur de l'éprouvette, W sa largeur et Φ représente un facteur de calibration dépendant de la profondeur de l'entaille et de rapport (L/W). Ce facteur a été tabulé par E. Plati et J.G. Williams. L étant la longueur entre appuis.

La valeur de G_c est donnée par la pente de la courbe $U = f(BW\Phi)$ pour une série d'éprouvettes avec différentes profondeurs d'entailles.

III.8 Relations entre G_I et K_I

Dans le cas du mode I on aura les relations suivantes :

En déformation planes

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (\text{III.43})$$

En contraintes planes

$$G_I = K_I^2 / E^2 \quad (\text{III.44})$$

Plus généralement, lorsque les trois modes sont présents, on obtient la relation d'Irwin sous la forme :

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \quad (\text{III.45})$$

III.9 Conclusion

La ténacité dépend de plusieurs paramètres dont la géométrie de la structure, de la triaxialité des contraintes ou bien du facteur d'entrave à la plasticité (contrainte maximale / contrainte nominale).

Dans une bonne étude et caractérisation d'un matériau, d'autres paramètres peuvent intervenir comme l'endommagement de ces constituants de base. C'est l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV

Mécanisme de

l'endommagement et de la

rupture

IV.1 Introduction

A mesure que les ruptures mécaniques se succèdent et les besoins réclament des efforts plus importants, la capacité d'un système mécanique à les supporter diminue et le dommage subi augmente.

Le dommage, ou le niveau d'endommagement, est un nombre qui caractérise le degré d'avancement de la dégradation qui précède une défaillance. Historiquement cette notion a été introduite lors de l'étude de la fatigue des matériaux. Les défaillances sont dans ce cas des ruptures (traction, torsion, flexion...).

IV.2 L'endommagement

C'est tout changement microstructurale au sein du matériau, qui crée une détérioration irréversible plus ou moins importante.

La dégradation des propriétés de toute structure stratifiée quand elle est sollicitée, est effective bien avant sa rupture finale.

Les matériaux composites contrairement aux matériaux métalliques, leurs géométrie dépendent de l'arrangement de ses constituants et non pas du mode de chargement.

L'endommagement présente un caractère unilatéral, les microfissures pouvant se refermer sous l'action du chargement.

IV.3 Echelle d'observation d'endommagement

Il existe différents échelle d'observation d'endommagement :

- Microscopique : (de nano m \rightarrow micro m) c'est là où apparaisse la rupture d'adhérence entre les fibres et la matrice.
- Mésoscopique : (de micro m \rightarrow mm) apparition des fissure intralaminaires, aussi rupture des fibres.
- Macroscopique : (de mm \rightarrow m) observation du phénomène de décollement inter pli : délaminage.

La figure IV.1 représente les différentes échelles d'observation des fissures.

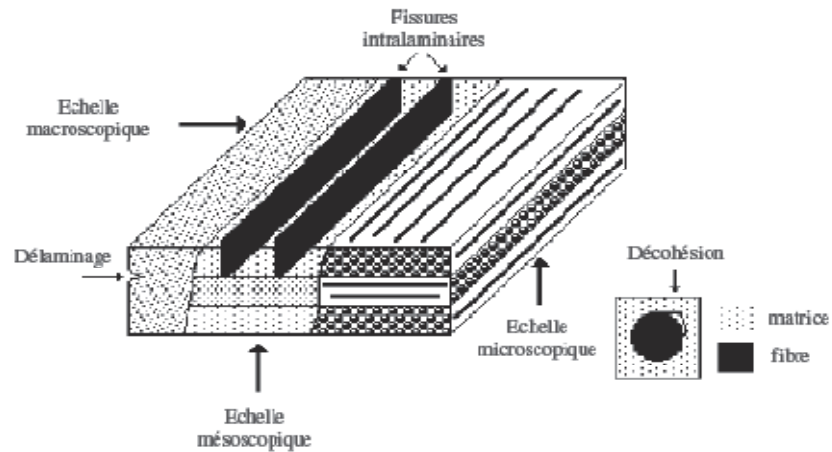


Figure IV.1 : Les différentes échelles d'observation de l'endommagement : matériaux stratifié.

IV.4 Mécanisme de rupture dans un composite

Il existe divers mécanismes élémentaires qui causent la rupture finale d'un composite. Ça dépend de la sollicitation, l'architecture des constituants et de l'orientation des plis.

On a trois types de rupture :

- La rupture des fibres ;
- La rupture des matrices ;
- La rupture de l'interface fibre-matrice.

IV.4.1 Rupture de fibre

Si la contrainte de traction dans une fibre atteint la contrainte à la rupture de la fibre automatiquement, on aura sa rupture, ce qui va produire une concentration de contrainte au voisinage de la rupture et la redistribution de ces contraintes.

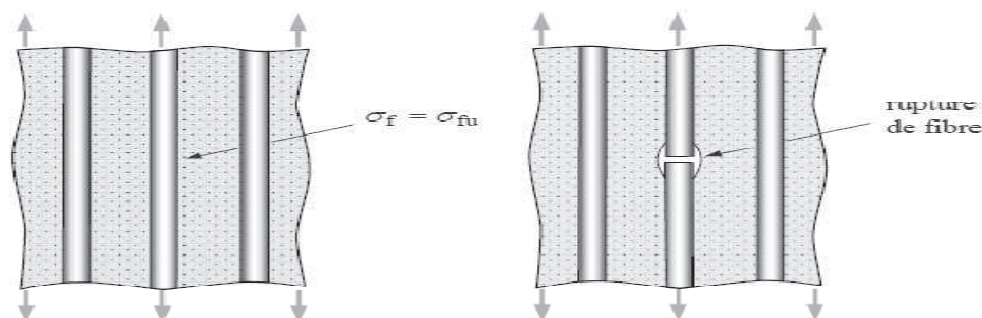


Figure IV.2 : Rupture de fibre

IV.4.2 Rupture de la matrice

Dès que la contrainte à la rupture est atteinte, il y'aura apparition d'une fissure qui progressera jusqu'à la rupture finale.

On a parfois naissance des fissures lors de l'élaboration du matériau (défauts).

Si σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture en traction, la fissuration est transverse, et si τ_m atteint la contrainte à la rupture en cisaillement, la fissure est longitudinale. (Figure IV.3).

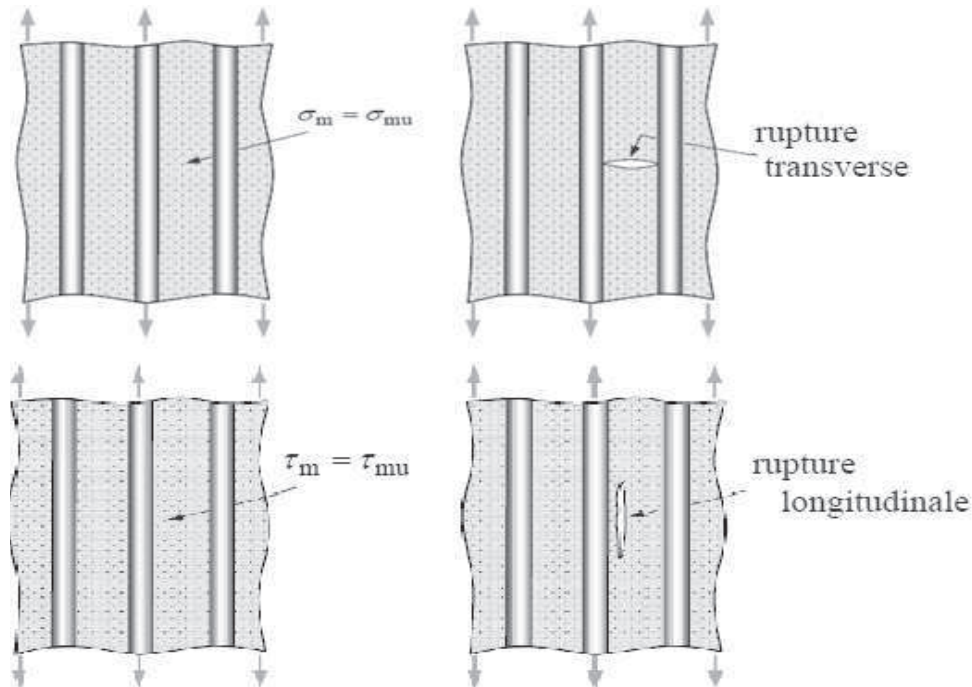


Figure IV.3 : Rupture de la matrice.

Le 2^{ème} mode cité, ne se produit que dans le cas où la contrainte de décohésion de l'interface est supérieure à celle du cisaillement de la matrice, sinon c'est le phénomène de décohésion de l'interface qui apparaîtra.

Pour des déformations assez faibles sous charges cycliques, seule la matrice est endommagée par l'apparition de plusieurs fissures. On parle de fissuration dispersée (figure IV.4 a). Par contre, pour des contraintes élevées, les fibres se cassent et permettent la propagation de fissure. C'est le mode de rupture localisé (figure IV.4 b).

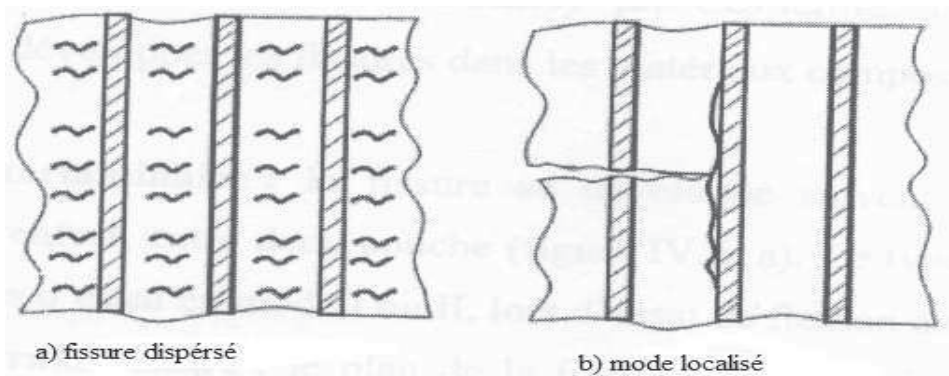


Figure IV.4 : Modes de fissuration de la matrice.

IV.4.3 Décohésion fibre-matrice

Comme cité précédemment, la décohésion fibre-matrice intervient lorsque la contrainte de cisaillement τ dans la matrice atteint la contrainte de décohésion τ_d , à condition que τ_d est inférieure à τ_m (contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice).

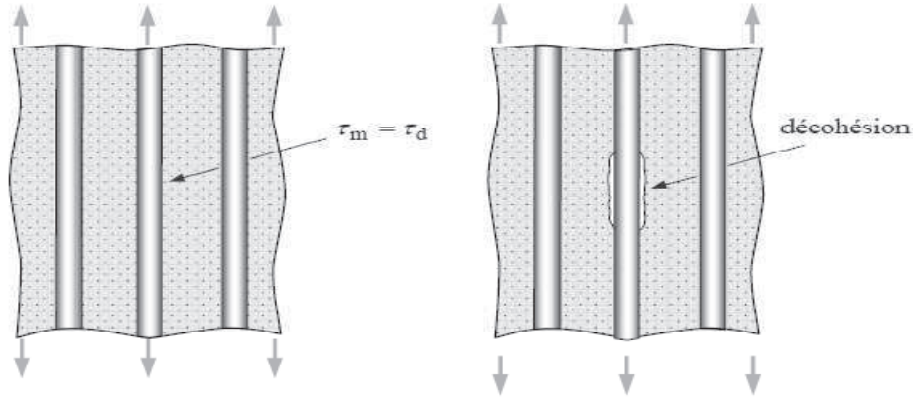


Figure IV.5 : Décohésion fibre-matrice.

IV.5 Endommagement des composites stratifiés

IV.5.1 Les fissurations

On distingue différents types de fissuration selon les plans dans lesquels peuvent se développer.

- Fissure interlaminaire : développement de la fissure selon un plan parallèle aux couches de renforts, et entre deux couches. On le rencontre lors d'essai en mode I ou II aussi en flexion entre appuis rapprochés (voire figure IV.6).

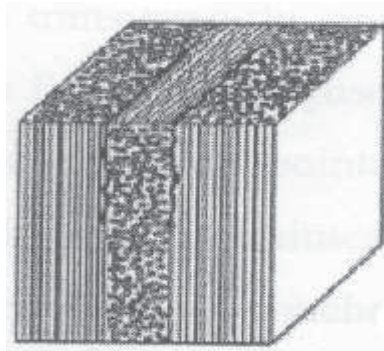
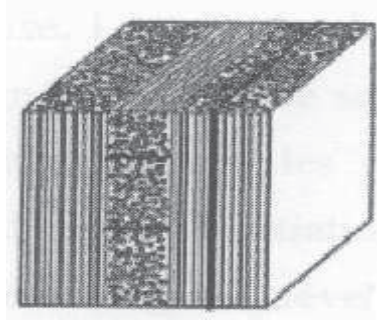


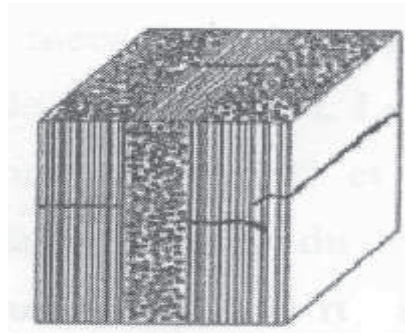
Figure IV.6 : Fissure interlaminaire

- Fissure intralaminaire : développement de la fissure selon un plan perpendiculaire ou parallèle aux couches de renforts et à l'intérieur des couches. On le rencontre lors d'essai de cisaillement ou traction transverse sur matériau unidirectionnel (voire figure IV.7).



Fissure IV.7 : Fissure intralaminaires

- Fissure translaminaire : développement de la fissure selon un plan perpendiculaire aux couches et aux renforts. Exemple : essai de traction ou compression uniaxial dans le sens des fibres (voire figure IV.8).



Fissure IV.8 : Fissure translaminaire

Dans le cas de stratifiés, aux mécanismes élémentaires décrits précédemment (décohésion fibre-matrice, rupture longitudinale de la matrice, rupture transverse de la matrice, rupture de fibres), s'ajoute (figure IV.9) un mécanisme de rupture entre les couches, appelé rupture par délaminage. Les mécanismes de rupture induits dépendent de la nature des constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé [5].

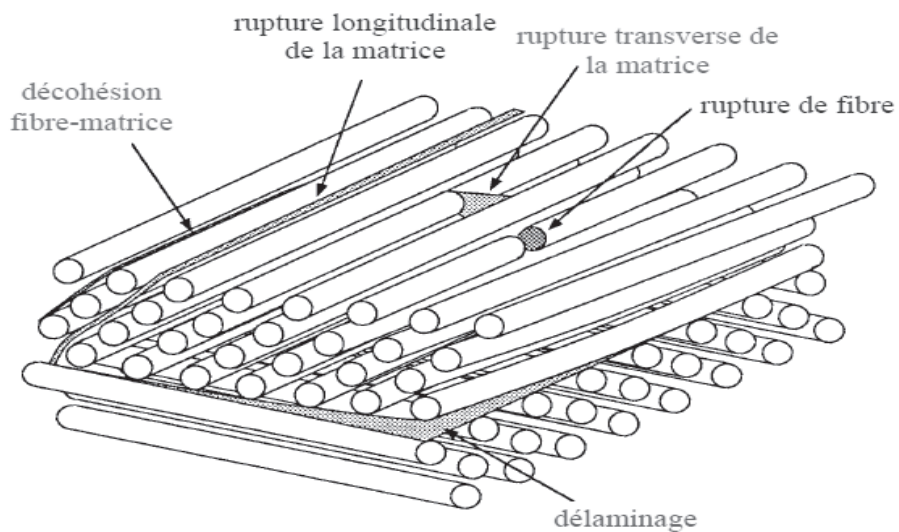


Figure. IV.9 : Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés.

a) dans le cas d'un stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0° (figure IV.10), le premier phénomène de rupture observé est celui de la fissuration des couches orientées à 90° . La fissuration se produit par rupture longitudinale de la matrice ou/et par rupture de l'interface fibre-matrice dans les couches orientées à 90° . Cette fissuration conduit à la formation de fissures orientées transversalement (figure IV.11) à la direction du chargement mécanique. Ainsi, cette fissuration initiale des couches à 90° est appelée fissuration transverse du stratifié croisé. Lorsque le chargement mécanique est augmenté, le nombre de fissures croît jusqu'à atteindre un état de saturation de la fissuration. Les fissures transverses créent en pointes de fissures, entre les couches orientées à 90° et à 0° , des concentrations de contraintes qui conduisent à l'initiation puis à la propagation du délaminage à l'interface entre les couches. Ce délaminage se développe ensuite jusqu'à la rupture finale du stratifié par rupture des fibres et de la matrice dans les couches à 0° . La figure IV.11 montre l'aspect final de la surface après rupture [5].

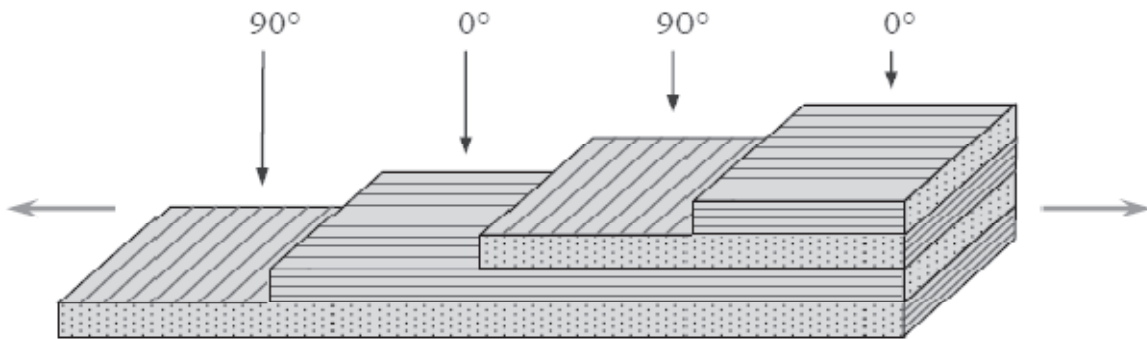


Figure .IV.10 : Stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0° .



a)

b)

figure .IV.11 : Rupture en présence d'un trou d'un composite $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ à fibres de carbone. (a) Rupture macroscopique au droit du trou. (b) Bord de l'éprouvette loin du trou : les couches à 90° sont microfissurées.

b) Dans le cas d'un stratifié croisé $\pm 45^\circ$, soumis à une traction longitudinale dans la direction 0° (figure IV.12), on observe d'abord une rupture longitudinale dans les couches à $\pm 45^\circ$, suivie d'un délaminage entre les couches. La figure IV.13 donne un exemple de rupture observé dans ce cas.

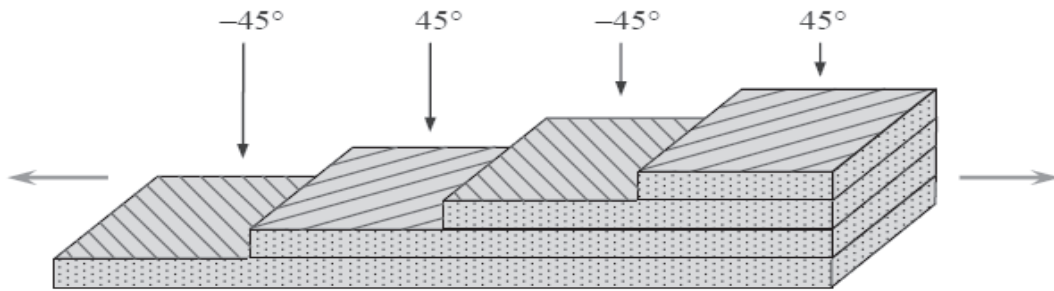


Figure .IV.12 : Stratifié croisé $\pm 45^\circ$ soumis à une traction dans la direction 0° . Dans ce cas, on observe d'abord une rupture longitudinale dans les couches à $\pm 45^\circ$, suivie d'un délaminage entre les couches. La figure IV.13 donne un exemple de rupture observé dans ce cas.

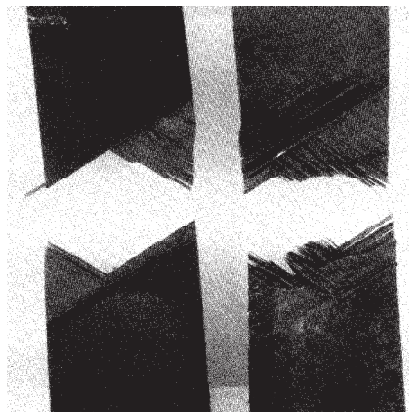


Figure .IV.13 : Rupture d'un composite $[\pm 45^\circ]_{2S}$ à fibres de carbone

IV.6 Conclusion

La connaissance de l'état de l'endommagement d'une structure d'un matériau composite est une nécessité largement reconnue, et ce tant pour des raisons de fiabilité, et donc de sécurité.

Il désigne aussi les dégradations des caractéristiques mécaniques des matériaux au cours du temps.

Chapitre V

ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre V : Etude expérimentale

V.1. Présentation du matériau à étudier

Les matériaux composites utilisés dans cette étude sont destinés à la fabrication des bateaux de pêches et de loisirs. Les constituants de base de ces matériaux sont des produits commerciaux.

V.1.1 Matrice

Nous avons utilisé une matrice en polyester thermodurcissable.

V.1.2 Renfort

Un type de renfort est utilisé, qui intervient dans la fabrication des stratifiés, les fibres de verres de type E.

Les différents stratifiés sont montrés au tableau V.1

Je désigne :

300 : mat 300 g/m² ;

450 : mat 450g/m² ;

800 : taffetas 800 g/m².

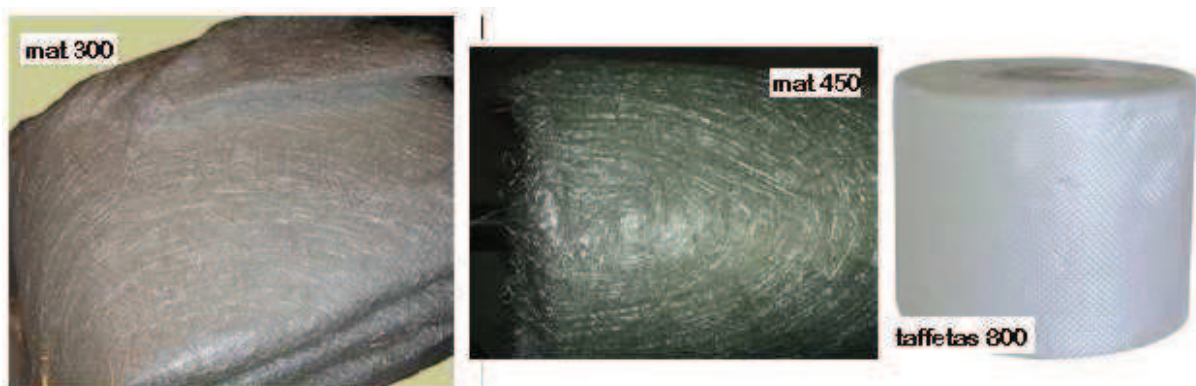


Figure. V.1 : image des différents renforts.

lot	Ordre des plis
A	300, 450, 800, 300
B	300, le recyclé, 800, 300
C	2(300), 2(450), 2(800), 2(300)
D	3(450), 800, 2(450), 800, 450

Tableau V.1 : différents lot utilisé.

V.1.3 Géométrie des éprouvettes

Les éprouvettes soumises aux essais sont découpées dans une seule direction qui est la direction longitudinale.

Chapitre V : Etude expérimentale

Les dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais statiques ont été choisies selon la norme (NF EN ISO 178, ASTM D790) c'est-à-dire : $l = 20h$ mm ; b est en fonction de h indiqué ci-dessous :

$$10 < b \leq 15 \text{ mm et } h \leq 5 \text{ mm}$$

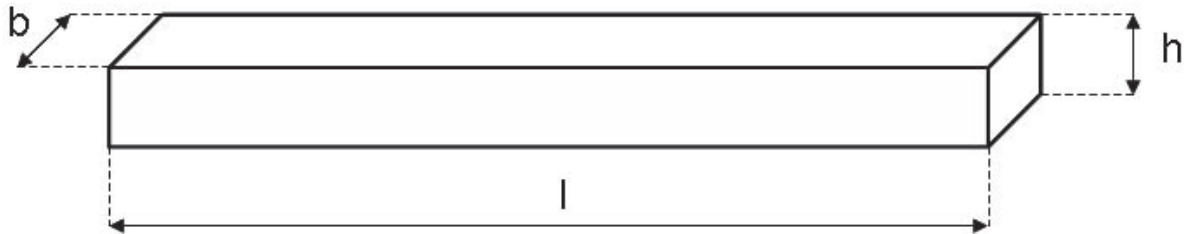


Figure V.2 : géométrie des éprouvettes

V.1.4 Elaboration des éprouvettes

Les éprouvettes ont été élaborées avec la méthode du moulage au contact.

V.1.5 Problèmes d'élaboration

Une variation trop importante de la longueur des éprouvettes, nous amène à des variations importantes d'épaisseurs.

Il est impossible de fabriquer plusieurs plaques dans les mêmes conditions

Les plaques sont soumises à des défauts différents surtout celles qu'on a mis du recycler qui lors du découpage des éprouvettes on voit beaucoup de défauts.

V.2 essai de flexion

La détermination des caractéristiques intrinsèque d'un matériau nécessite des essais de traction, compression, flexion ... etc.

Dans notre étude nous avons réalisé des essais de flexion trois points.

V.2.1 Présentation des dispositifs expérimentaux

Les essais de flexion trois points sont réalisés sur une machine de type IBERTEST (figure V.3). C'est une machine universelle qui peut effectuer sans encombre la traction, compression et la flexion. Sa capacité de compression est de 100 KN, avec des vitesses de chargement qui varient de 1 à 500 mm/min contrôlées automatiquement. Le dynamomètre qui sert à mesurer la force appliquée se trouve sur une traverse inférieure fixe. La machine possède aussi une traverse supérieure mobile entraînée par deux vices sans fin, mis en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment inférieur. Sur chaque traverse se trouve un more qui permet de fixer la pièce. Un capteur permet d'enregistrer la flèche de l'éprouvette

Chapitre V : Etude expérimentale

ainsi que la force au cours de l'essai qui seront projetées directement sur l'écran d'un ordinateur lié à la machine.

Nous avons effectué des essais de flexion avec une vitesse qui vaut $v = h/2$. Et nous avons utilisé un mécanisme qui nous permet la réalisation des essais flexion trois points voir (figure V.4).



Figure V.3 : machine de flexion trois points



Figure V.4 : montage pour la réalisation des essais flexion trois points

Chapitre V : Etude expérimentale

V.2.2 résultats des essais de flexion trois points

Nous allons présenter dans nos résultats la force maximale de rupture, la flèche maxi à la rupture, contrainte de rupture, la déformée en rupture, la contrainte de cisaillement, la contrainte d'élasticité et sa déformée, le module de YOUNG et le mode de rupture.

Pour le mode de rupture nous allons désigner :

Traction par T, délaminage par D, compression par C et la non rupture à l'échelle macroscopique avec NR.

Les relations utilisées sont :

$$\sigma_{\max} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad , \quad \tau = \frac{3F}{4bh} \quad , \quad \epsilon_{\max} = \frac{6hf}{L^2}$$

f : est la flèche.

F : force

L=100 (mm)	b (mm)	h (mm)	Pr (N)	σ_r (MPa)	ϵ_r	σ_e (MPa)	ϵ_e	τ_{\max} (MPa)	E (GPa)	Mode
A 1	15,40	3,71	179	84	0,0590	11,69	0,019	2,34	2,32	D T
A 2	15,13	4,63	184	71	0,0392	4,98	0,008	1,96	3,10	D T
A 4	15,90	4,00	196	88	0,0480	9,48	0,015	2,44	2,98	D T
A 5	15,53	4,06	209	90	0,0579	14,87	0,021	2,49	3,10	D T
A 6	15,26	3,80	206	97	0,0458	14,16	0,023	2,69	2,42	D T
Moy	15,44	4,04	194,76	85,83 (15)	0,05	11,04 (6)	0,02	2,38	2,78 (0.46)	/

Tableau V.2 : caractéristiques mécaniques du lot A en flexion

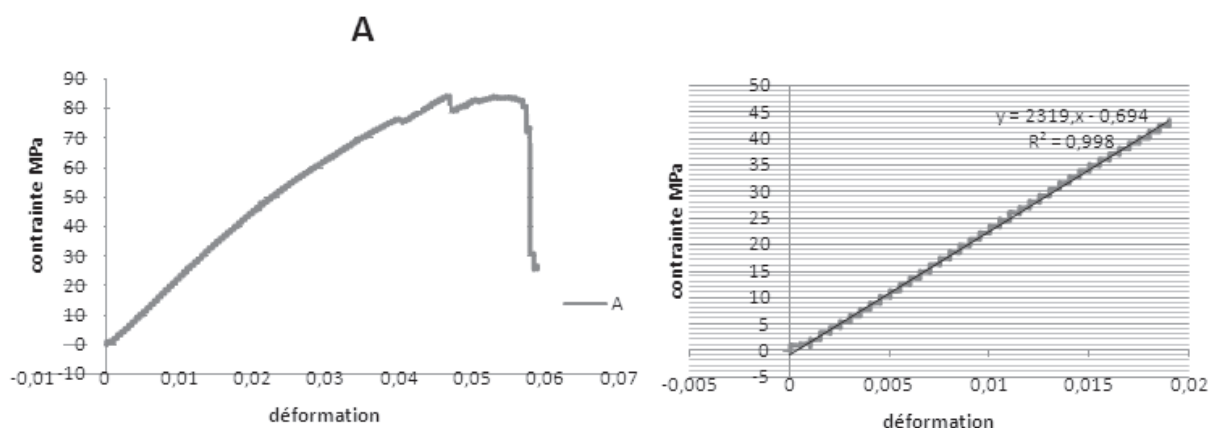


Figure V.5 : évolution contrainte / déformation pour échantillon A1

L= 120 (mm)	b (mm)	h (mm)	Pr (N)	σ_r (MPa)	ϵ_r	σ_e (MPa)	ϵ_e	τ_{max} (MPa)	E (GPa)	Mode
B 1	14,70	4,81	215	82	0,0420	29,77	0,013	2,28	2,32	D T
B 2	15,29	5,25	238	80	0,0550	38,69	0,013	2,23	2,80	D T
B 3	15,07	4,85	187	69	0,0430	29,43	0,016	1,92	1,95	D T
B 4	14,81	4,72	217	84	0,0430	36,82	0,140	2,33	2,35	D T
B 5	14,95	5,07	298	106	0,0350	25,53	0,007	2,94	3,54	D T
Moy	14,96	4,94	231,18	84,29 (22)	0,04	32,05 (6.64)	0,04	2,34	2,59 (0.95)	/

Tableau V.3 : caractéristiques mécanique du lot B en flexion.

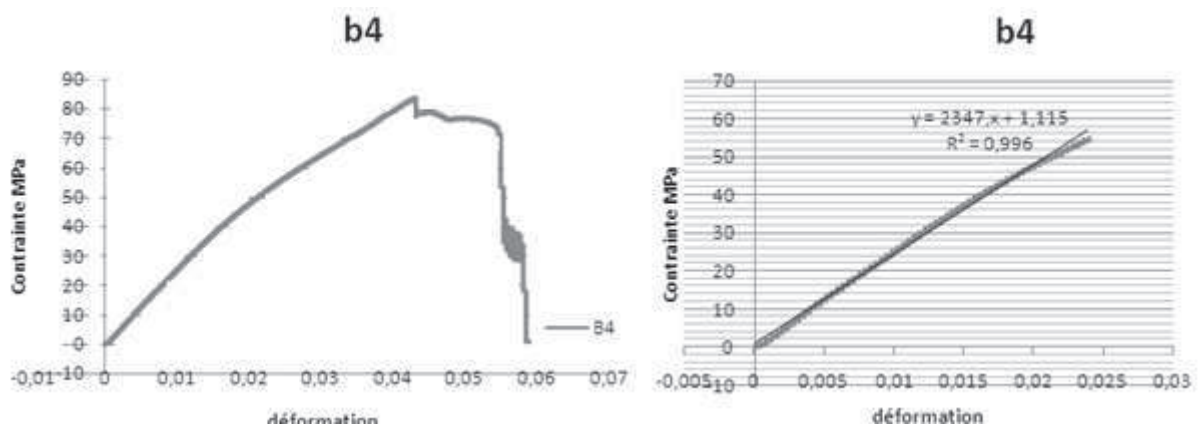


Figure V.6 : évolution contrainte / déformation pour échantillon B4.

Interprétation des résultats

Dans chaque lot, nous observons que toutes les éprouvettes ont le même comportement, mais nous observons aussi une dispersion dans les contraintes de rupture et élastique et dans le module de YOUNG, cela est cause que les éprouvettes possèdent des défauts surtout dans celles qui contiennent du recyclé (nous voyons des défauts à l'échelle macroscopique), aussi, comme nous l'avons signalé, les hauteurs des éprouvettes sont très variées, surtout que les longueurs des éprouvettes est relativement importante, ce qui conduit à la non répartition des contraintes comme le donne les relations théoriques, et que les efforts de réactions ne sont pas symétriques. Le module de YOUNG est plus grand dans l'échantillon qui contient du mat 450g/m² que dans l'échantillon qui contient du recyclé à la place du mat. Nous constatons la même comparaison pour les contraintes à rupture.

Nous trouvons que le comportement dans le lot B est ductile et que le lot A représente un comportement fragile qui nous donne un module de YOUNG plus élevé.

V.3 essai pour la caractérisation au choc

La réponse des matériaux au choc est caractérisée par le tau de restitution d'énergie G_c qui est déterminé par des essais de choc ou de flexion trois points.

Nous avons effectué des essais de flexion trois points pour des éprouvettes prés fissurées.

V.3.1 Eprouvettes utilisées dans les essais

Les essais de flexion trois points sont effectués sur des éprouvettes prismatiques de dimension (60×10) mm avec un épaisseur qui vari entre 5 à 9 mm, découpées à partir de plaques du composite selon le sens longitudinal. L'entaille a été réalisée avec une scie à métaux. Les dimensions des fissures ont été prise de tel manière satisfaire la condition : $0,2 < a/b < 0,6$.

a est la profondeur de l'entaille et b est la hauteur de l'éprouvette. La géométrie des éprouvettes est représentée sur la figure V.7 en prenant w est la largeur.

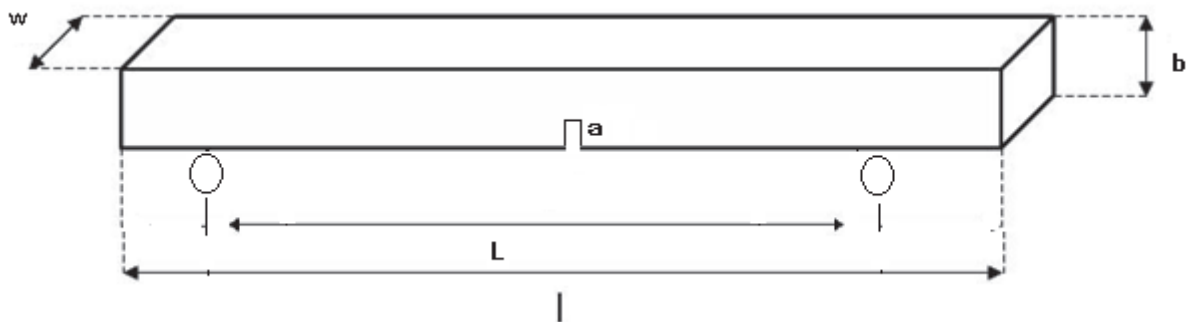


Figure V.7 : géométrie des éprouvettes utilisées dans les essais de flexion trois points.

Les essais de flexion trois points ont été réalisés sur la machine traction compression et flexion de type IBERTEST.

La vitesse du chargement est fixé a $b/2$, selon la hauteur de l'éprouvette.

V.3.2 résultats des essais

Les caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes sont résumées dans les tableaux suivant ; tel que la hauteur, la largeur, l'entaille, le rapport a/b , et le facteur Φ qui est un facteur de calibration (voir annexe 1), ainsi les forces maximales de rupture.

Chapitre V : Etude expérimentale

C	B mm	w mm	a mm	a/w	Φ	ϕWb mm ²	F max N	σ max MPa	ζ max MPa
1	6,09	10,15	2	0,328	0,416	25,699	512,98	181,28	6,22
2	5,95	10,15	2	0,336	0,407	24,595	423,46	160,44	5,26
3	6,10	10,29	2	0,328	0,416	26,134	695,81	241,36	8,31
4	6,36	10,30	2	0,314	0,432	28,294	805,24	246,75	9,22
5	6,25	10,28	2	0,320	0,425	27,306	667,10	215,56	7,79
6	6,95	10,06	2	0,288	0,467	32,617	1244,93	303,03	13,35
7	6,56	10,35	2	0,305	0,444	30,139	990,28	276,08	10,94
8	6,95	10,31	2	0,288	0,467	33,428	1040,12	247,04	10,89
moy	6,40	10,24	2	0,313	0,434	28,526	797,49	233,94	9,00
17	6,54	10,00	2,5	0,382	0,361	23,607	386,39	142,04	4,43
18	6,30	10,31	2,5	0,397	0,348	22,594	513,76	207,05	5,93
19	6,01	10,30	2,5	0,416	0,331	20,516	235,67	111,43	2,86
20	5,85	10,01	2,5	0,427	0,322	18,841	315,59	168,56	4,04
21	6,06	10,32	2,5	0,413	0,334	20,909	231,81	106,34	2,78
22	6,55	10,32	2,5	0,382	0,361	24,435	227,58	80,67	2,53
23	6,00	10,00	2,5	0,417	0,331	19,850	460,69	225,65	5,76
24	6,21	10,00	2,5	0,403	0,343	21,289	273,38	119,17	3,30
moy	6,19	10,16	2,5	0,404	0,341	21,505	330,61	145,11	3,95

Tableau V.4 : dimensions et résultats pour le lot C.

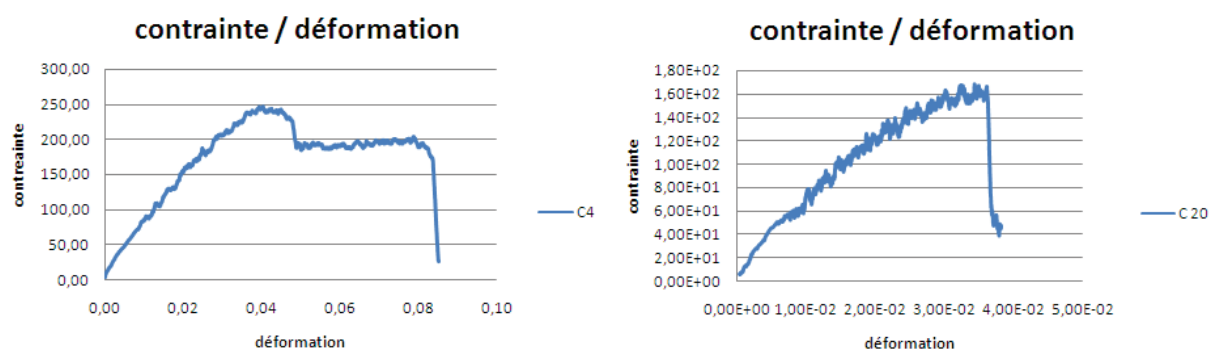


Figure V.8 : contrainte /déformation pour C4 et C20

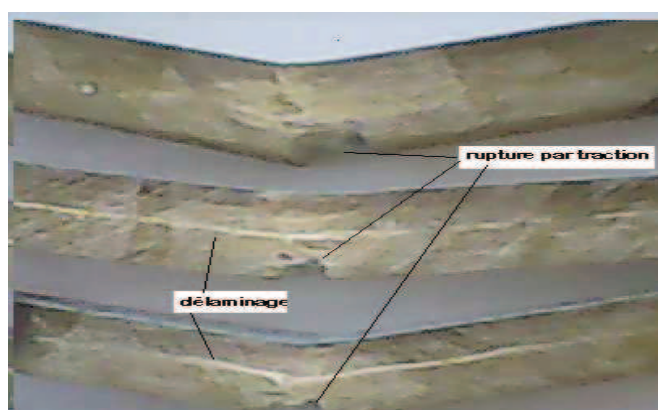


Figure V.9 : quelques échantillons du lot C après les essais de flexion.

Chapitre V : Etude expérimentale

D	B mm	w mm	a mm	a/w mm	ϕ	ϕWb mm ²	F max N	σ MPa	ζ max MPa
1	9,13	10,38	2	0,219	0,586	55,555	1435	163,14	11,35
2	9,11	10,88	2	0,220	0,585	57,992	1361	148,52	10,30
3	8,03	10,23	2	0,249	0,527	43,302	967	155,94	8,83
4	9,32	10,38	2	0,215	0,597	57,727	991	107,00	7,68
5	9,19	10,00	2	0,218	0,590	54,182	1157	134,00	9,44
6	9,18	10,32	2	0,218	0,589	55,802	1650	186,00	13,06
7	8,92	10,20	2	0,224	0,575	52,348	2053	252,00	16,93
moy	8,98	10,34	2	0,223	0,578	53,844	1374	173,27	11,65
17	9,2	10,00	2,5	0,272	0,490	45,062	1287	172,06	10,49
18	9,95	10,27	2,5	0,251	0,523	53,474	1046	110,10	7,68
19	9,01	10,25	2,5	0,277	0,481	44,414	1142	157,74	9,27
20	8,15	10,20	2,5	0,307	0,442	36,707	951	175,19	8,58
21	7,93	10,21	2,5	0,315	0,431	34,890	923	183,97	8,55
22	9	10,14	2,5	0,278	0,480	43,845	1361	190,68	11,19
23	9,14	10,38	2,5	0,274	0,487	46,207	1372	179,85	10,84
24	8,34	10,38	2,5	0,300	0,450	38,984	1180	199,99	10,22
moy	8,84	10,23	2,5	0,284	0,473	42,948	1158	171	10

Tableau V.5 : dimensions et résultats pour le lot D.

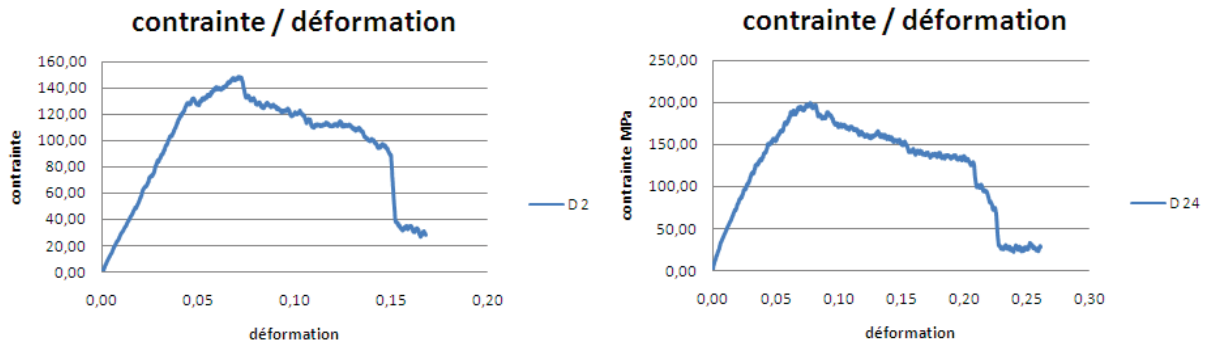


Figure V.10 : contrainte /déformation pour D2 et D19.



Figure V.11 : échantillon D6 après l'essai de flexion.

Chapitre V : Etude expérimentale

B	B mm	w mm	a mm	a/w mm	ϕ	ϕWb mm ²	F max N	σ MPa	ζ max MPa
1	5,56	10,04	2	0,360	0,382	21,341	19,18	9,0	0,3
2	5,57	10,09	2	0,359	0,383	21,524	19,35	9,0	0,3
3	5,61	10,03	2	0,357	0,386	21,701	11,30	5,2	0,2
5	5,89	10,15	2	0,340	0,403	24,122	32,23	12,6	0,4
7	5,56	10,01	2	0,360	0,382	21,277	13,37	6,3	0,2
8	5,89	10,13	2	0,340	0,403	24,074	23,30	9,1	0,3
moy	5,68	10,08	2	0,352	0,39	22,340	19,79	8,5	0,3
18	5,72	10,07	2,5	0,437	0,313	18,058	18,48	10,6	0,2
19	5,7	10,08	2,5	0,439	0,312	17,937	19,34	11,2	0,3
20	5,45	10,09	2,5	0,459	0,297	16,330	10,04	6,9	0,1
23	5,97	10,14	2,5	0,419	0,329	19,920	20,49	10,1	0,3
24	5,98	10,04	2,5	0,418	0,330	19,792	19,38	9,6	0,2
moy	5,76	10,08	2,5	0,434	0,316	18,407	17,55	9,7	0,2

Tableau V.6 : dimensions et résultats pour le lot B

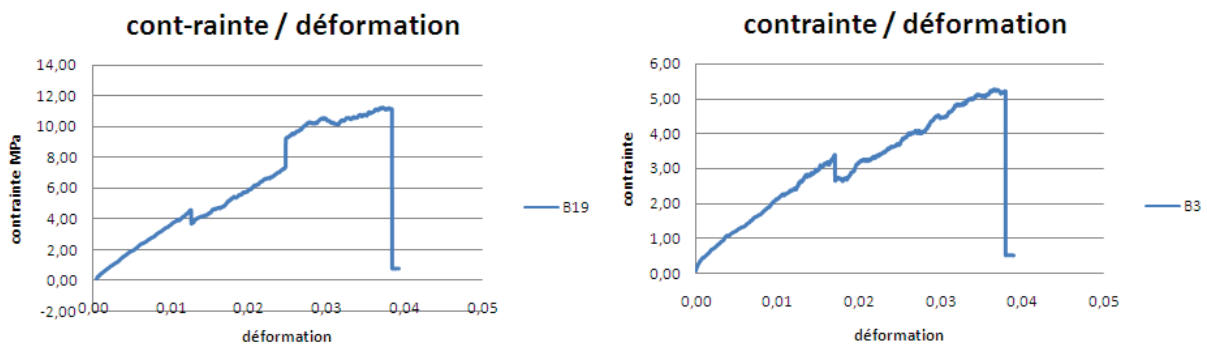


Figure V.12 : contrainte /déformation pour B19 et B3.



Figure V.13 : échantillon B7 après l'essai de flexion.

Interprétation des résultats

La force maximum de rupture pour le lot C est de **797.49 N** pour les éprouvettes a entaille de 2 mm, et elle est a **330.61 N** pour les éprouvettes a entaille de 2.5 mm, c'est-à-dire une chute de **58%**.

Chapitre V : Etude expérimentale

La force maximum de rupture pour le lot D est de **1323** N pour les éprouvettes a entaille de 2 mm, et elle est a **1158** N pour les éprouvettes a entaille de 2.5 mm, c'est-à-dire une chute de **13%**.

La force maximum de rupture pour le lot B est de **19,79** N pour les éprouvettes a entaille de 2 mm, et elle est a **17,55** N pour les éprouvettes a entaille de 2.5 mm, c'est-à-dire une chute de **11%**.

Nous voyons que les contraintes diminuent en passant des éprouvettes à entaille 2 mm vers les éprouvettes à entaille 2.5 mm.

La diminution de la force à la rupture en fonction de l'augmentation de la profondeur de l'entaille, est expliquée par la présence de l'entaille qui affaiblit la structure en diminuant le nombre de fibres qui participe à la résistance de l'éprouvette, ce qui fragilise la structure de plus en plus que la profondeur de l'entaille augmente.

La diminution des contraintes revient à dire que les sections ne sont pas homogènes, et que dans les éprouvettes à entaille de 2.5 mm il y'a moins de fibres que dans celle à entaille de 2 mm.

V.3.3 calcul du taux de restitution d'énergie

Pour la caractérisation de la ténacité, nous pouvons utiliser deux concepts, le critère énergétique qui se base sur l'énergie absorbé lors du développement de la fissure jusqu'à rupture (atteindre la contrainte critique de rupture) ou, tout en passant par la méthode du facteur d'intensité de contrainte.

V.3.3.1 critère énergétique

Nous avons calculé l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette, cette énergie vaut l'aire sous la courbe force en fonction du déplacement, jusqu'à la force maximale, et pour se faire, il existe plusieurs méthode pour se calcul, soit en utilisant ORIGIN qui est un logiciel de calcul ou bien tout simplement la méthode des trapèzes.

Et pour avoir des résultats plus proche, nous avons appliqué cette méthode pour chaque deux point qui se succède, avec la relation :

$$U = \sum (f_{i+1} - f_i) \times \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \quad (V.1)$$

F_i est la force au point i et f_i est la flèche au point i.

La sommation se fait jusqu'à la force maximum de rupture pour le calcul d'énergie de rupture, et elle se fait jusqu'à la force qui conduit à la contrainte élastique pour l'énergie consommer dans le domaine élastique.

Chapitre V : Etude expérimentale

Les résultats des différentes énergies pour les éprouvettes, ainsi que le taux de restitution d'énergie, sont résumés dans les tableaux suivants :

Le taux de restitution d'énergie est calculé par :

i) $U = G.B.W.\Phi \Rightarrow G = U / (B.W.\Phi)$

ii) En utilisant la pente de la droite de la fonction U, et puisque on n'a pas beaucoup changé les profondeurs d'entaille, nous avons choisis quelques point pour tracer la courbe.

iii) $G = \Delta U / (w \cdot \Delta a)$ [20]. Pour cette méthode, nous l'appliquons entre deux éprouvettes qui ont des entailles différentes.

Gc est donné en Kj/m^2

C	ϕWb	U [j]	i	ii	iii	U ela	i ela	ii ela	iii ela
1	25,699	1,090	42,4	94	51	0,29	11,13	64	9
2	24,595	0,716	29,1		47	0,46	18,87		23
3	26,134	1,040	39,8		24	0,41	15,73		75
4	28,294	1,160	41,0		72	0,64	22,65		91
5	27,306	1,260	46,1		85	0,43	15,60		80
6	32,617	1,046	32,1		86	1,60	49,05		(272)
7	30,139	1,650	54,7		(163)	0,71	23,66		(137)
8	33,428	1,810	54,1		(247)	1,16	34,70		(145)
moy	28,526	1,222	42,43		61	0,71	23,92		55,63
17	23,607	0,836	35,4		Voir dans le graphe de la figure V.14		0,24		10,21
18	22,594	0,919	40,7			0,03	1,54		
19	20,516	0,483	23,5			0,35	17,01		
20	18,841	0,615	32,6			0,24	12,84		
21	20,909	0,571	27,3			0,25	11,77		
22	24,435	0,801	32,8			0,18	7,53		
23	19,85	0,836	42,1			0,03	1,43		
24	21,289	0,576	27,1			0,44	20,48		
moy	21,505	0,705	32,7		0,22	10,35			

Tableau V.7 : taux de restitution d'énergie pour le lot C

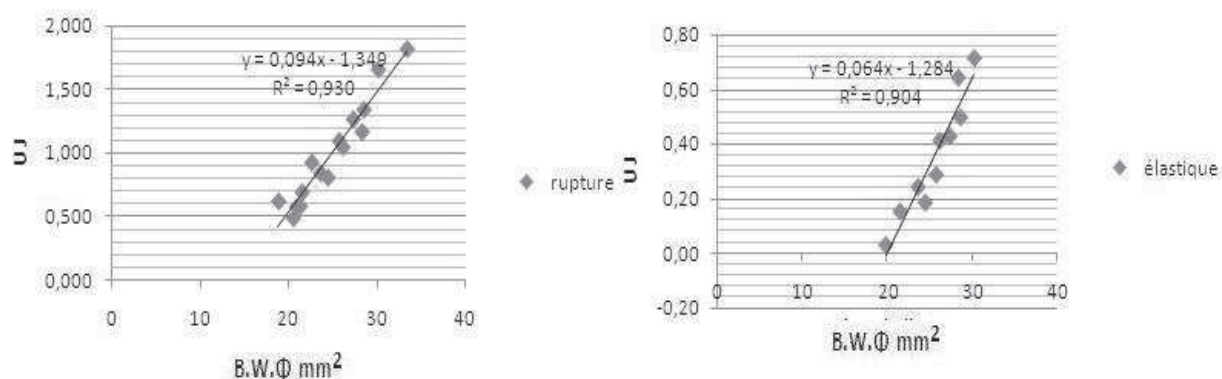


Figure V.14 : taux de restitution d'énergie du lot C

Chapitre V : Etude expérimentale

D	ϕWb	U [j] rup	i	ii	iii	U (j) elas	i	ii	iii
1	55,555	2,21	39,8	51 Voir dans le graphe de la figure V.15	24	0,69	12,5	35 Voir dans le graphe de la figure V.15	22
2	57,992	1,72	29,7		50	0,35	6,1		(-77)
3	43,302	1,84	42,5		24	0,85	19,6		53
4	57,727	1,21	21,0		15	1,21	21,0		15
5	54,182	1,94	35,8		56	1,01	18,6		(126)
6	55,802	1,73	31,0		14	0,81	14,6		16
7	52,348	2,34	44,7		64	0,94	17,9		40
moy	53,84	1,86	34,92		35	0,84	15,74		29
17	45,062	2,09	46,4			0,58	12,9		
18	53,474	1,13	21,1			0,59	11,0		
19	44,414	0,57	12,9			0,07	1,7		
20	36,707	1,14	31,1			1,14	31,1		
21	34,89	1,02	29,2			0,41	11,6		
22	43,845	1,72	39,2			0,58	13,3		
23	46,207	1,47	31,8			0,74	15,9		
24	38,984	1,66	42,6			0,38	9,7		
moy	42,95	1,48	31,79			0,56	13,40		

Tableau V.8 : taux de restitution d'énergie pour le lot D

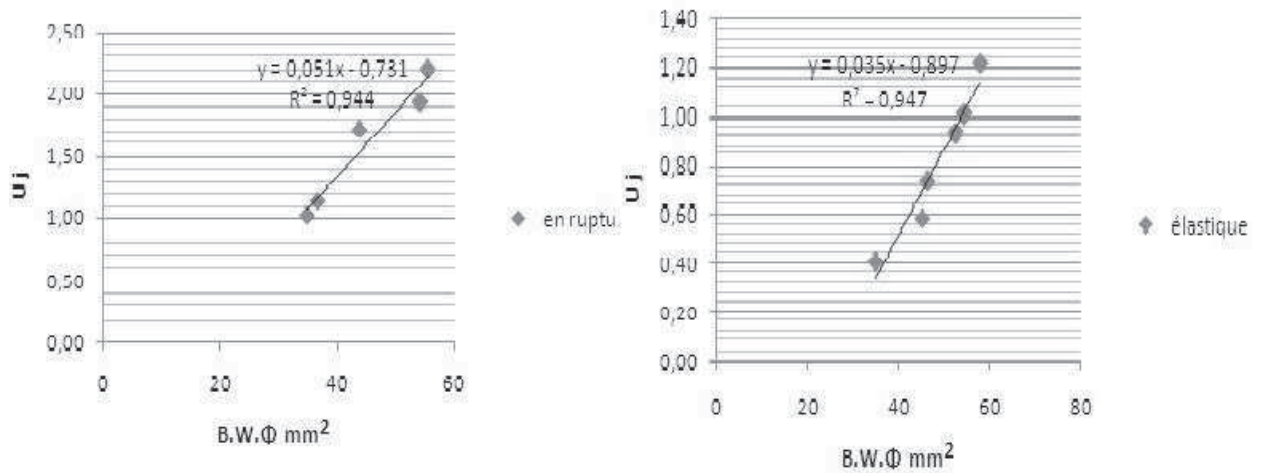


Figure V.15 : taux de restitution d'énergie du lot D

Chapitre V : Etude expérimentale

B	ϕWb	U rup [j]	i	ii	iii	U elas [j]	i	ii ela	iii ela
1	21,341	0,036	1,7	7	3	0,017	0,8	4	1
2	21,524	0,033	1,5		3	0,008	0,4		1
3	21,701	0,063	2,9		10	0,022	1,0		4
5	24,122	0,054	2,2		9	0,039	1,6		(8)
7	21,277	0,088	(4,1)		(15)	0,008	0,4		1
8	24,074	0,064	2,7		10	0,029	1,2		5
moy	22,34	0,056	2,2		6,8	0,021	0,8		2,6
18	18,058	0,023	1,3	Voir dans le graphe de la figure V.16		0,011	0,6	Voir dans le graphe de la figure V.16	
19	17,937	0,017	0,9			0,002	0,1		
20	16,33	0,014	0,9			0,001	0,0		
23	19,92	0,011	0,5			0,002	0,1		
24	19,792	0,014	0,7			0,002	0,1		
moy	18,407	0,016	0,9			0,003	0,2		

Tableau V.9 : taux de restitution d'énergie pour le lot B

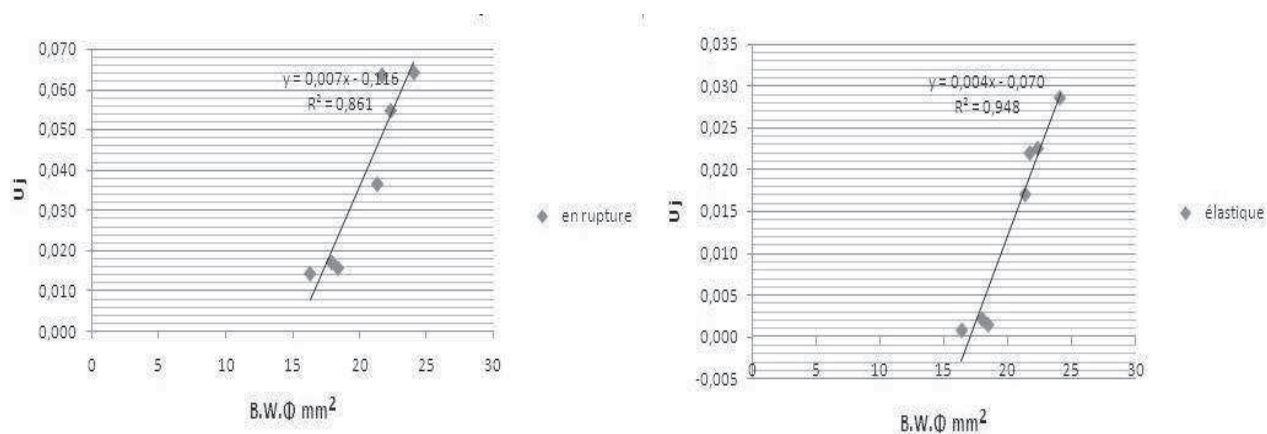


Figure V.16 : taux de restitution d'énergie du lot B

Résumer des résultats (Gc est en Kj/m²).

Lot	Gc en rupture			Gc élastique		
	i	ii	iii	i	ii	iii
C	37.5	94	6.1	17	64	56
D	33.5	51	35	14.5	35	29
B	1.6	7	6.8	0.5	4	2.6

Tableau V.10 : différentes valeurs des différents lots.

V.3.3.2 calcul du G_c par le FIC

De même, nous allons utiliser différentes méthodes :

- i) $K_{Ic} = \frac{3FL}{2wb^2} \cdot \Phi \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$
- ii) $K_{Ic} = \frac{6L\xi\sigma_{max}}{4wb^2} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \Phi$ [21].
- iii) $K_{Ic} = \sigma_{max} \Phi \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$
- iv) $G_{Ic} = \frac{\sigma^2 \pi \cdot a}{E}$

ξ est la surface où la contrainte est répartie

$$\xi = 2.15 \sqrt{\frac{P d}{2} \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{E'} \right)}$$

Où E' est le module de YOUNG de la canne cylindrique, elle est en acier donc $E' = 210\text{GPa}$

$P = F/w$, c'est la charge linéaire : qui est répartie sur la largeur de l'éprouvette.

Le passage du FIC vers le taux de restitution d'énergie se fait par la relation :

$G_I = K_I^2 / E$. Les résultats sont résumés dans les tableaux suivants

C	K i	Gi	K ii	Gii	K iii	Giii	G iv
1	85,21	2,61	30,47	0,33	188,91	12,84	74,23
2	72,18	1,87	25,40	0,23	163,78	9,65	58,15
3	113,79	4,66	46,17	0,77	251,88	22,82	131,59
4	125,55	5,67	47,51	0,81	267,15	25,67	137,54
5	106,19	4,06	38,91	0,54	229,64	18,97	104,97
6	179,75	11,62	65,41	1,54	354,36	45,17	207,44
7	148,44	7,93	55,76	1,12	307,20	33,95	172,19
8	146,54	7,72	46,98	0,79	288,88	30,02	137,86
moy	122,21	5,77	44,58	0,77	256,48	24,89	128,00
17	54,83	1,08	19,14	0,13	143,69	7,43	56,97
18	73,44	1,94	32,51	0,38	201,85	14,66	121,06
19	35,30	0,45	12,73	0,06	103,50	3,85	35,06
20	49,84	0,89	24,19	0,21	151,99	8,31	80,23
21	34,39	0,43	11,87	0,05	99,64	3,57	31,93
22	31,24	0,35	7,94	0,02	81,72	2,40	18,37
23	71,19	1,82	37,76	0,51	209,21	15,74	143,77
24	40,86	0,60	14,60	0,08	114,49	4,72	40,10
moy	48.89	0,95	20.09	0,18	138.26	7,58	65,94

Tableau V.11 : taux de restitution d'énergie pour le lot C

Chapitre V : Etude expérimentale

D	K i	Gi	K ii	Gii	K iii	Giii	G iv
1	146,195	10,8	27,752	0,390	239,715	29,115	84,681
2	132,681	8,9	23,014	0,268	217,824	24,040	70,191
3	116,193	6,8	27,284	0,377	206,052	21,512	77,378
4	98,634	4,9	14,646	0,109	160,043	12,978	36,430
5	121,503	7,5	21,430	0,233	198,031	19,870	57,134
6	168,062	14,3	33,936	0,584	274,619	38,211	(110)
7	218,940	24,3	54,643	1,513	363,437	66,925	(202)
moy	143,193	10,4	29,759	0,449	251,227	31,979	71
17	125,260	7,9	29,509	0,441	236,178	28,262	117,744
18	90,522	4,2	14,452	0,106	161,469	13,210	48,215
19	110,990	6,2	25,369	0,326	212,603	22,902	98,969
20	104,189	5,5	30,326	0,466	216,790	23,813	122,067
21	104,172	5,5	32,696	0,542	222,175	25,010	134,615
22	133,916	9,1	34,088	0,589	256,737	33,397	144,611
23	129,560	8,5	30,421	0,469	245,487	30,534	128,658
24	123,760	7,8	36,233	0,665	252,398	32,277	(159)
moy	115,296	6,837	29,137	0,450	225,480	26,176	113

Tableau V.12 : taux de restitution d'énergie pour le lot D

B	K i	Gi	K ii	Gii	K iii	Giii	G iv
1	3,552	0,005	0,362	5,25E-05	8,665	0,03	0,205
2	3,561	0,005	0,360	5,17E-05	8,667	0,03	0,205
3	2,077	0,002	0,158	9,94E-06	5,016	0,01	0,068
5	5,554	0,012	0,589	1,39E-04	12,734	0,06	0,398
7	2,484	0,002	0,212	1,80E-05	6,058	0,01	0,100
8	4,024	0,006	0,364	5,29E-05	9,226	0,03	0,209
moy	3,542	0,006	0,341	5,40E-05	8,394	0,03	0,20
18	2,957	0,003	0,398	6,32E-05	9,331	0,03	0,354
19	3,100	0,004	0,432	7,47E-05	9,835	0,04	0,397
20	1,673	0,001	0,202	1,64E-05	5,711	0,01	0,148
23	3,138	0,004	0,370	5,46E-05	9,288	0,03	0,318
24	2,992	0,004	0,346	4,77E-05	8,834	0,03	0,287
moy	2,772	0,003	0,349	5,13E-05	8,600	0,03	0,30

Tableau V.13 : taux de restitution d'énergie pour le lot B

Résumer des résultats

Lot	G i	G ii	G iii	G iv
C	3,36	0,47	16,24	96,97
D	8,6	0,4	29,1	92
B	0,004	5,26E-05	0,031	0,249

Tableau V.14 : résumer des résultats du taux de restitution d'énergie.

Chapitre V : Etude expérimentale

Résumer des résultats de Gc en KJ/m²

Méthode	En passant par le FIC				En passant par les énergies					
	i	ii	iii	iv	i		ii		iii	
					Rupt.	Elast.	Rupt.	Elast.	Rupt.	Elast.
Lot										
C	3.36	0.47	16.24	96.97	37.5	17	94	64	61	56
D	8.6	0.4	29.1	92	33.5	14.5	51	35	35	29
B	0.004	5.26 ^E -5	0.03	0.25	1.6	0.5	7	4	6.8	2.6

Tableau V.15 : taux de restitution d'énergie pour les différents lots.

Interprétation des résultats

L'énergie de rupture est inversement proportionnelle à la profondeur de l'entaille, car il faut moins d'énergie pour rompre une éprouvette entaillée, ou une énergie moindre pour rompre une éprouvette ayant une entaille plus profonde que l'autre, d'autre part, les éprouvettes ayant des profondeurs d'entaille de 2.5 mm, se trouvent moins cohésives, ce qui implique une énergie de cohésion moindre, par rapport à celles ayant des profondeurs d'entaille de 2 mm.

L'énergie de rupture du lot B est moindre que les deux autres lots ; car il possède du recyclé qui augmente le nombre de défauts dans les échantillons, aussi on voit que le lot D est moins résistant qu'au lot C, car les pièces du lot D sont plus épaisses que celles du lot C.

Pour les résultats obtenus par l'outil de calcul du taux de restitution d'énergie avec le FIC, qui sont plus comparables dans le domaine élastique avec les résultats de la méthode énergétique, car dans le domaine non linéaire la mécanique élastique de la rupture cesse d'être utilisée, laissant la place aux relations de la mécanique non linéaire.

La présence du recyclé diminue fortement la résistance du matériau, elle crée des défauts dans la matrice vu que le recyclé est broyé, donc il est mis sous forme de granulés.

La dispersion des résultats obtenus dans le même lot peut être interprétée par :

Les dimensions, vu la variation de l'épaisseur due au procédé de fabrication.

Les entailles ne sont pas faites d'une manière précise, et nous n'avons pas pris en considération la vraie forme de l'entaille.

Nous voyons, que l'endommagement des pièces commence par le délaminage, donc l'intervention du mode II avant le mode de rupture I.

Dans le lot B, la dispersion est beaucoup plus grande que dans les deux autres lots, car la machine de flexion est très sensible aux efforts relativement petits.

Chapitre V : Etude expérimentale

Pour le lot D, nous avons aimé de calculer le module de YOUNG en utilisant des éprouvettes normalisées, car nous l'avons calculé par les éprouvettes entaillées, donc les résultats par la méthode du FIC ne sont pas très significatif.

La dispersion des résultats dans le même lot avec les différentes méthodes revient à dire que chaque méthode à des limites d'application.

Pour les méthodes qui prennent en considération le FIC, nous constatons selon les résultats :

- i) ne prend pas en compte la vraie contrainte dans les éprouvettes
- ii) est une méthode utilisée beaucoup plus pour les matériaux traditionnels.
- iii) Vue les résultats obtenus, nous pouvons dire que c'est la méthode la plus adaptée pour notre travail.
- iv) C'est une méthode qui ne prend pas en compte la forme de la fissure.

Pour les méthodes énergétiques, selon les résultats obtenus :

- i) est une méthode directe qui calcule le G_c pour chaque éprouvette.
- ii) Nous devons faire des expériences de choc sur plusieurs éprouvettes de différentes entailles.
- iii) Il s'agit d'une approximation de la méthode (ii) entre deux éprouvettes de différentes entailles, elle a été utilisée pour la caractérisation du bois.

V.4 Conclusion

Les dispersions trouvées dans nos résultats, reviennent au mode d'élaboration des éprouvettes à l'architecture des types de renforts utilisés, et a de beaucoup de facteurs touchants les méthodes de calculs et le matériel utilisé.

Les matériaux qui sont épais, sont plus vulnérables aux sollicitations du choc, se qui est confirmé par la comparaison entre lot C et lot D.

Le recyclé, fragilise le matériau, vu son architecture et sa forme, le mettre directement dans le matériau pourras nous conduire a des défauts plus importants.

conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail nous a permis de :

Caractériser, les trois types du matériau composites polyester-fibres de verre.

De suivre une démarche expérimentale, du prélèvement à la réalisation des éprouvettes sous différents formes, destinées aux essais mécaniques.

Les essais de flexion trois points effectués sur éprouvettes normalisées nous a permet de calculer le module de Young longitudinal.

Les essais de flexion trois points, sur éprouvettes entaillées, nous on permet, d'une part de constater, l'influence de la profondeur d'entaille sur le comportement mécanique des matériaux étudiées, car la limite de rupture diminue en fonction de l'augmentation de la profondeur de la fissure. Aussi l'exploitation des courbes forces-déplacement obtenues, nous a permis de quantifier les énergies induisant, la déformation plastique, jusqu'à la rupture.

Les valeurs du taux de restitution d'énergie (G) en (KJ/m²) obtenues, varient pour les lots D et C de 33.5 à 37.5 KJ/m², Dont leurs superpositions aux résultats trouvés dans la littérature, sur la détermination du taux de restitution d'énergie du matériau, dont l'influence de l'augmentation de l'épaisseur sur la fragilité du matériau.

Le paramètre du taux de restitution d'énergie (G), est comparé aux forces de frottement empêchant l'avancement de la fissure pour la création de nouvelles surfaces, sous l'effet des contraintes extérieur. Car par exemple pour le lot C on a obtenu 37.5 KJ/m², ce qui signifie ; pour créer une surface de 1m², il faut fournir une énergie de 37500 joule.

Le calcul du taux de restitution d'énergie (G), en passant par le facteur d'intensité de contrainte Nous a permis de faire les constats suivant :

Les valeurs, sont plus proches des valeurs obtenues dans le domaine élastique, ce qui permet de dire, d'après la littérature sur la mécanique de la rupture, que l'outil numérique donne les valeurs du taux de restitution d'énergie dans le domaine élastique. Et au-delà d'autre formules régissant le domaine non linéaire seront appliquées.

Les éprouvettes destinées aux essais de flexion trois points, sont usinées dans la direction longitudinale, on aurait aimé réaliser d'autre éprouvettes dans les directions transversale, afin de mieux comprendre le comportement vis-à-vis la fissuration dans toute les directions, vu le caractère orthotrope du matériau.

Ce travail n'est qu'une approche primaire des résultats, car il est nécessaire de passer par un calcul numérique pour le facteur d'intensité de contrainte, en mettant un programme qui prendra en considération la vraie forme de la fissure.

Bibliographie

Bibliographie

[1] **Pierre JACQUINET**

Utilisation des matériaux composites

Edition HERMES, paris 1991.

[2] **Maurice REYNE**

Technologie des composites

Edition HERMES, Paris 1990.

[3] **BORHANE KECHAOU**

Corrélation entre propriétés diélectriques et mécaniques de composites a matrice époxyde renforcée par des fibres de verres E .thèse doctorat 2003

[4] **Bénédicte BONNET**

Comportement au choc de matériaux composites pour applications automobiles 2005

[5] **Jean-Marie Berthelot**

Matériau composites, comportement mécanique et analyse des structures

4ème édition, ED TEC&DOC, Lavoisier, 2005.

[6] **Ihab EL SAWI**

Dispersion de nanotubes de carbone et intégration de la fonction de conductivité électrique dans les matériaux composites structuraux. Thèse doctorat juillet 2010.

[7] **KACIMI Bachir**

Comportement aux chocs des composites à renforts verre et matrice organique.

Mémoire de magister, laboratoire de Mécanique, structure et Energétique.

U.M.M.T.O 2010.

[8] <http://www-ipst.u-strasbg.fr> par **Nadia BAHLOULI**

[9] **L'industrie française des matériaux composites**

Etude stratégique réalisé pour le compte de la DiGITIP / SIM. Loius Berreur Bernard de

Maillard Rév. 2 du 13 mai 2002 Stanislas Nösperger 17 décembre 2001.

[10] **Daniel GAY**

Matériaux composite 3eme édition revue et augmentée

Édition HERMES 1991.

[11] **Michel CHATAIN**

Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites 1996.

Bibliographie

- [12] laboratoire de matériaux de l'ECAM
Document publié par **Patrice COUVRAT**
<http://matériaux.ecam.fr>
- [13] **Société Francophone de Biomatériaux Dentaires**
B. JACQUOT
Date de création du document 2009-2010
- [14] Samia DRIDI
Essais de Caractérisation des Structures Tissées
Thèse doctorat 2010
- [15] laboratoire de matériaux de l'ECAM
Document publié par **Pierre LOURDIN**
<http://matériaux.ecam.fr>
- [16] **TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**
L'expertise technique et scientifique de référence
- [17] **D. FANÇOIS et L.JOLY**
La rupture des métaux. Edition MASSON 1972.
- [18] **B. BARTHELEMY**
Notions pratiques de la mécanique de la rupture.
Edition EYROLLES 1980.
- [19] **E. PLATI ET J.G. WILLIAMS**
The determination of the fracture parameters for polymers in impact. Polymer engineering and science, vol 15 N ° 6, pp 470 – 477, june 1975.
- [20] **Salim Kennouche**
Détermination de la résistance à la propagation de fissures d'essences de bois Algériens
Thèse doctorat (Boumerdès 2010).
- [21] Julien R_ETHOR_E
Méthode éléments finis étendus en espace en temps : application a la propagation dynamique des fissures. Thèse doctorat soutenue le 10 juin 2005

Annexe

Annexe 1

Le facteur de calibration ϕ tabulé par E.PLATI et J.G Williams.

a/B	Φ				
	L/B=4	L/B=6	L/B=8	L/B=10	L/B=12
0,04	1,681	2,456	3,197	3,904	4,580
0,06	1,183	1,715	2,220	2,700	3,155
0,08	0,933	1,340	1,725	2,089	2,432
0,10	0,781	1,112	1,423	1,716	1,990
0,12	0,680	0,957	1,217	1,461	1,688
0,14	0,605	0,844	1,067	1,274	1,467
0,16	0,550	0,757	0,950	1,130	1,297
0,18	0,505	0,688	0,858	1,015	1,161
0,20	0,468	0,631	0,781	0,921	1,050
0,22	0,438	0,584	0,718	0,842	0,956
0,24	0,413	0,543	0,664	0,775	0,877
0,26	0,391	0,508	0,616	0,716	0,808
0,28	0,371	0,477	0,575	0,665	0,748
0,30	0,354	0,450	0,538	0,619	0,694
0,32	0,339	0,425	0,505	0,578	0,647
0,34	0,324	0,403	0,475	0,542	0,603
0,36	0,311	0,382	0,447	0,508	0,564
0,38	0,299	0,363	0,422	0,477	0,527
0,40	0,287	0,345	0,398	0,448	0,494
0,42	0,276	0,328	0,376	0,421	0,462
0,44	0,265	0,311	0,355	0,395	0,433
0,46	0,254	0,296	0,335	0,371	0,405
0,48	0,244	0,281	0,316	0,349	0,379
0,50	0,233	0,267	0,298	0,327	0,355
0,52	0,224	0,253	0,281	0,307	0,332
0,54	0,214	0,240	0,265	0,288	0,310
0,56	0,205	0,228	0,249	0,270	0,290
0,58	0,196	0,216	0,235	0,253	0,271
0,60	0,187	0,205	0,222	0,238	0,253

Annexe 2

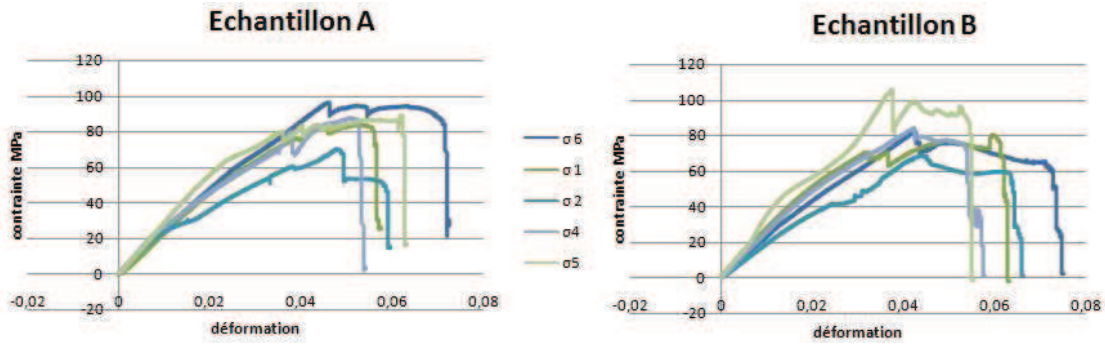


Figure 1 : résultats contraintes / déformations pour les essais de flexion lot A et B

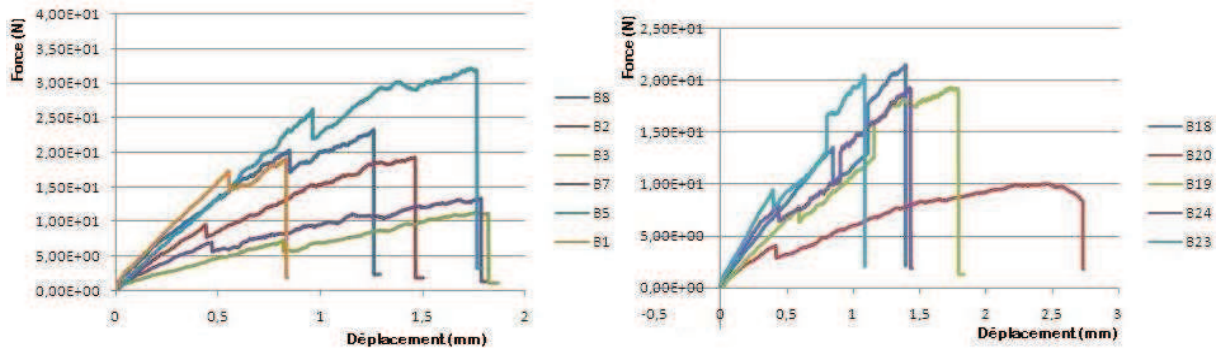


Figure 2 : résultats force / déplacement pour le lot B

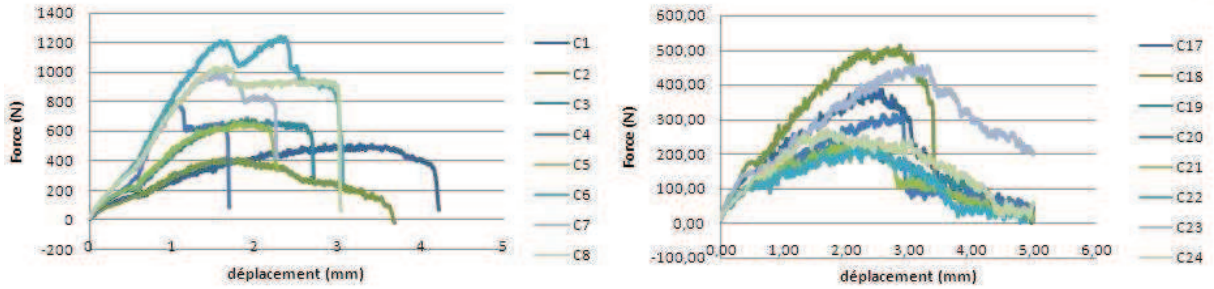


Figure 3 : résultats force / déplacement pour le lot C

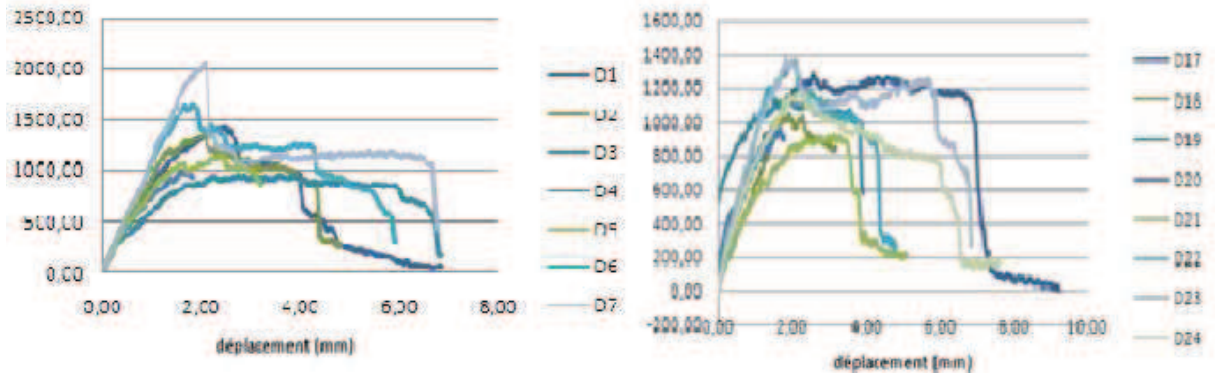


Figure 4 : résultats force / déplacement pour le lot D