

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
Département de génie mécanique

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de
MAGISTERE

Option : Construction Mécanique

Par
DJEBLOUN Youcef

THEME

**ETUDE DE LA RUPTURE EN MODE I
D'OUVERTURE DES MATERIAUX
COMPOSITES**

Devant le jury composé de :

Président :

Dr. BOUMERZOUG Zakaria

MC à l'Université de Biskra

Rapporteur :

Dr. HECINI Mabrouk

CC à l'Université de Biskra

Examineurs :

Dr. MEZGHICHE Bouzidi

MC à l'Université de Biskra

Dr. MOUMMI Nouredine

CC à l'Université de Biskra

Invité :

Mr. BOUAZIZ Ahmed

CC à l'Université de Biskra

2003/2004

INTRODUCTION GENERALE

Le remplacement du métal par des matériaux composites (plastiques renforcés à la fibre de verre) devient de plus en plus fréquent dans l'industrie aéronautique ou automobile et ces dernières années, des cabines entières de camion ont été produites en moulage du composite. On reconnaît actuellement que, comparée avec l'acier, l'utilisation de composite permet une plus grande liberté de conception, une résistance accrue à la corrosion et une réduction du nombre de pièces à assembler.

L'analyse de la rupture des pièces en composites après leurs mises en service, montre que derrière chaque cas de rupture, il existe une fissure, qui n'a pas été prise en compte par le concepteur lors des dimensionnements des structures en matériaux composites.

Le matériau composite utilisé dans la fabrication des réservoirs, barques etc. ... fabriqués au niveau de l'ENPC de CHLEF son obtenus par l'association d'une résine polyester et des renforts de fibres de verre ainsi que les additifs nécessaires à la fabrication tel que le catalyseur et l'accélérateur.

Le matériau en question est sujet d'un phénomène de rupture prématuré caractérisé par une fissuration localisée dans des zones de concentration de contraintes, généralement les parties usinées. Ceci nous a amené à lancer une étude qui vise en premier lieu la caractérisation du composite notamment à la fissuration et d'essayer de décrire l'endommagement résultant.

L'objectif de cette étude est d'analyser un cas de rupture éventuelle (le cas le plus dangereux) Mode I, en tenant compte des défauts (fissures) qui peuvent se produire lors de l'exécution de différents phases de moulage des matériaux composites ou résulter de leurs mises en service et d'en reconnaître les causes probables pour donner des perspectives et orienter les recherches qui vont succéder à ce travail d'une part.

D'autre part, mesurer les caractéristiques statiques et de rupture de ce matériaux à travers des essais de traction sur des éprouvettes prismatiques non entaillées pour les caractéristiques statiques et entaillées pour la mesure du facteur d'intensité de contrainte K_I . Enfin tracer les courbes R.

Le présent mémoire comprend en plus d'une introduction générale, deux grandes parties:

1- Partie bibliographique contient trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, on donne un aperçu sur les matériaux composites d'une manière générale.
- Dans le deuxième chapitre est mené l'étude du comportement élastique des matériaux composites. Une présentation globale de la théorie classique des stratifiés.
- Dans le troisième chapitre, on donne des notions sur la mécanique lainière de la rupture, notamment types et modes, facteur d'intensité des contraintes, K et taux de libération d'énergie G .

2- Partie expérimentale contient quatre chapitres

- Le quatrième chapitre présente les constitutions de base du matériau utilisé et la méthode de mise en œuvre des plaques. On trouve dans ce chapitre les techniques de découpe des éprouvettes de forme altère destinées aux essais de traction et les éprouvettes de type SENB pour les essais de rupture.
- Le cinquième chapitre présente les différences procédures expérimentale, les résultats et les discussions relatifs à :
 - la calcination de la résine pour déterminer le taux des fibres
 - l'essai de traction pour déterminer le module de Young et la contrainte de rupture.
- Le sixième chapitre présente les procédures expérimentales des essais de flexion trois points sur les éprouvettes SENB. Cette présentation est suivie des résultats obtenus et leur interprétation.
- Le septième chapitre présente une étude morphologique de la rupture des éprouvettes de traction et des éprouvettes SENB.

Enfin pour conclure une conclusion générale montre la présentation et la discussion des résultats.

I. GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

Il existe différentes familles de matériaux : les métaux, les plastiques, les composites, etc. ...

Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté, ils ont tous temps été utilisé par l'homme, citons par exemple le bois, le béton et le béton armé.

I.1. DEFINITION :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de natures différentes. Se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels [1] [4]:

- légèreté
 - grande résistance à la fatigue
 - liberté de formes
 - maintenance réduite
 - faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf alu carbone)
 - insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
 - Une bonne isolation électrique.
- Leur faible taux d'utilisation vient de leur coût.

On distingue deux types de composites: les composites grande diffusion et les composites haute performance.

- **Grande diffusion :**

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration du matériau (moulage par contact, SMC et injection).

- **Hautes performances :**

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- beaucoup de procédés encore manuels.
- CMM, CMC.

I.2. CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES :

I.2.1. Les renforts :

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

I.2.1.1. Différents types de renfort : [1][7]

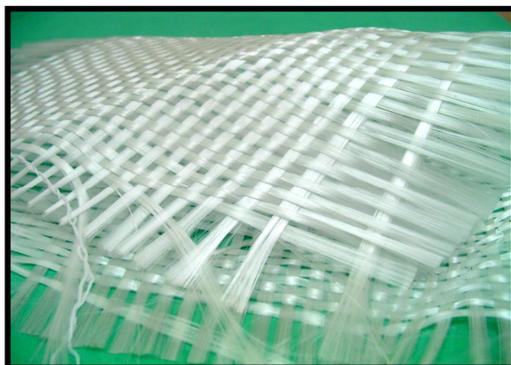
Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées et constituent une fraction volumique de matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7.

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales.

- Sous forme de roving (fils, mèches, etc. ...): le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.
- Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc. ...): le tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving.
Les tissus de roving peuvent peser jusqu'à 800 g/m^2 .
- Sous forme de mat (à fil coupé, à fil continu): le mat est un matelas de fils coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine.



a – Roving de verre

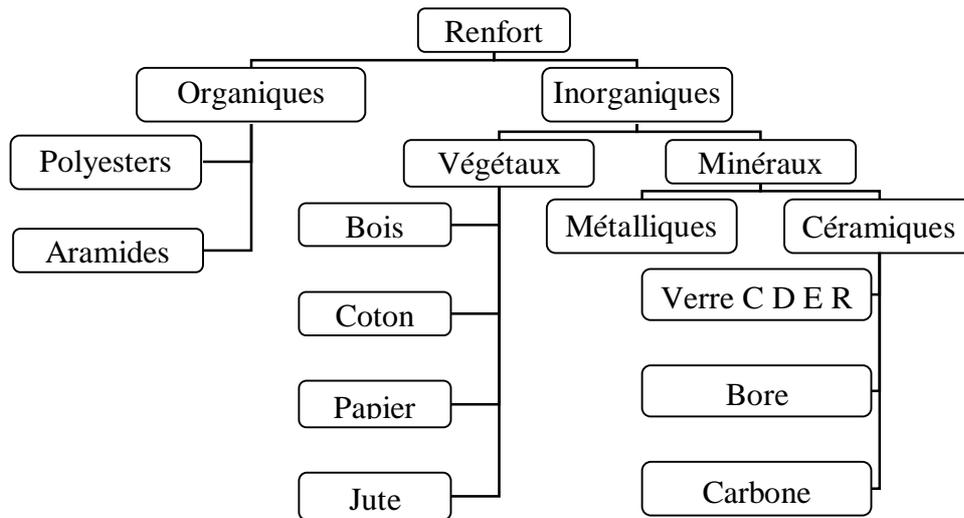


b – Tissu de verre



c – Mat de verre

Fig. (I.1) : Différents types de fibres de verre (documentation Ahlstrom)

I.2.1.2. Différentes natures de renfort:**Fig. (I.2) :** Différentes familles du renfort.**I.2.1.3. Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base : [20]****Tableau I.1 :** Propriétés mécaniques des fibres

fibres	densité	σ_r (MPa) en traction	Allongement à la rupture en %	E_L (MPa) Longitudinale	Diamètre du filament élémentaire μm
Verre E	2.54	3400	4.8	73000	3-30
Verre R	2.48	4400	5.4	86000	3-30
Aramide BM	1.45	3100	2	70000	12
Aramide HM	1.45	3100	1	130000	12
Kevlar	-	2900	2.3	130000	1.45
Aluminium	-	1380	0.7	380000	3.9
Carbone HT	1.78	2800	0.5	200000	8
Carbone HM	1.80	2200	-	400000	8
Bore	2.63	3500	0.8	400000	100-200

I.2.2. La matrice :

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres.

I.2.2.1. Différentes natures de la matrice :

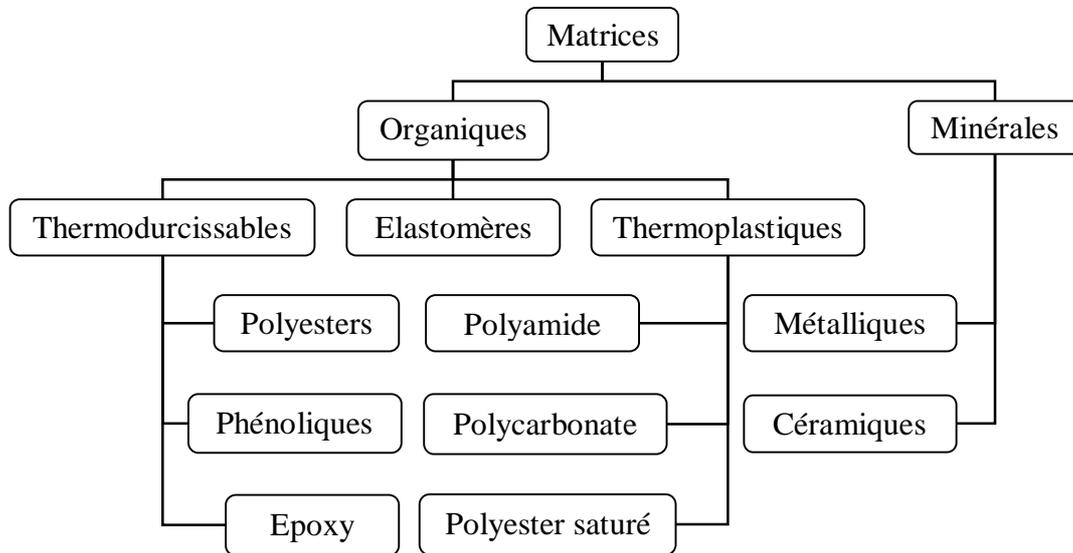


Fig. (I.3) : Différentes familles de matrice.

- Résine thermodurcissable: sont mis en forme et se polymérisent selon la forme souhaitée. La transformation irréversible.
- Résine thermoplastique: mis en forme par chauffage, durcissent au cours du refroidissement. La transformation est réversible.

Tableau I.2 : Principales propriétés des matrices Thermodurcissables et Thermoplastiques:

Matrices	Thermodurcissables	Thermoplastiques
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

I.2.2.2. Principales caractéristiques mécaniques des résines :**Tableau I.3 :** Propriétés mécaniques des résines. [20] [4]

	Polyester	Epoxyde	Phénolique	Polyamide	Aluminium
ε_r en traction (%)	2 - 5	2 - 5	2.5	-	-
ρ (Kg/m ³)	1200	1100-1500	1200	1130	2630
σ_r en traction (MPa)	50 - 80	60 - 80	40	70	358
E en traction (GPa)	2.8 - 3.5	3 - 5	-	3	69

I.2.3. Les charges : [1]

L'objet de la charge renforçant est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines. En générales ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre).

Les principales charges utilisées sont :

- microbille en (verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc. ...)
- des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc. ...)
- des particules de carbone (noir de carbone)

I.2.4. Les additifs : [1]

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés.

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage.
- pigments et colorants.
- agents anti-retraits.
- agents anti-ultraviolets.
- accélérateur.
- catalyseur.

I.2.5. L'interface :

En plus de ces fibres et la matrice, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine.

Des produits chimiques entre aussi dans la composition du composite, l'interphase etc. ... qui peut jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. [1]

I.3. LA MISE EN ŒUVRE DES MATERIAUX COMPOSITES : [3] [7]

Généralement le choix d'un procédé de moulage se fait en fonction de certains paramètres à savoir:

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.

- Durcissement du système :
 - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Les procédés les plus importants sont :

- Moulage par contact
- Moulage par projection simultanée
- Injection thermodurcissable BMC
- Compression thermodurcissable SMC
- Enroulement filamentaire (ou bobinage)

I.3.1. Moulage au contact :

Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu) imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable.

Les pièces de formes quelconques peuvent être réalisées avec une cadence très faible.

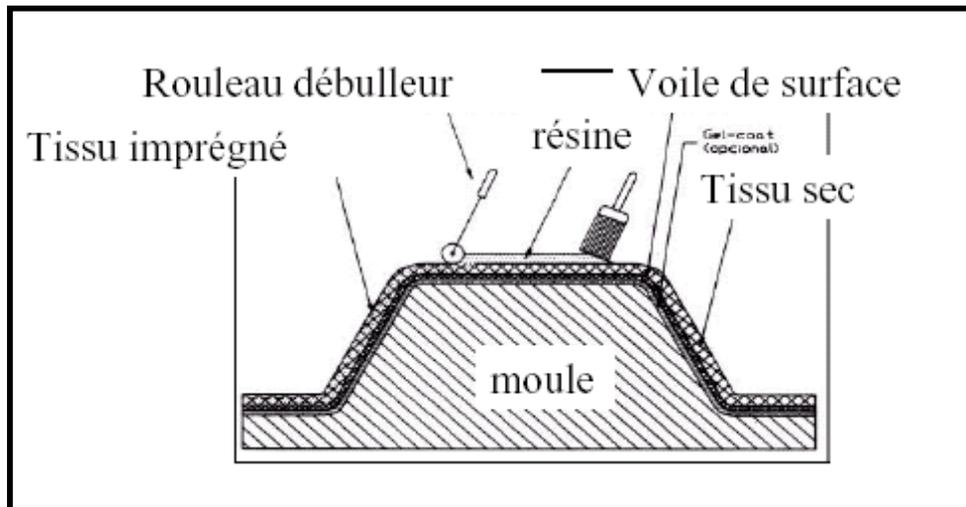


Fig. (I.4) : Moulage par contact

I.3.2. Moulage par projection simultanée :

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifile 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.

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient.

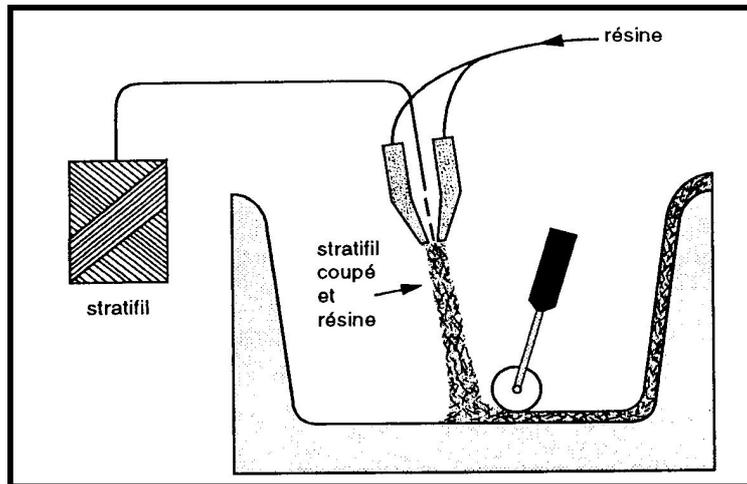


Fig. (I.5) : Moulage par projection simultanée

I.3.3. Injection thermodurcissable BMC: (Bulk Molding Compound).

Le moulage du compound est réalisé entre moule et contre moule chauffé à température entre 140 à 170°C sous une pression de 50 à 100 bars.

Les avantages : réalisation de grandes séries, peu de finition.

Le compound : c'est de la résine, du fibre coupé et de la charge

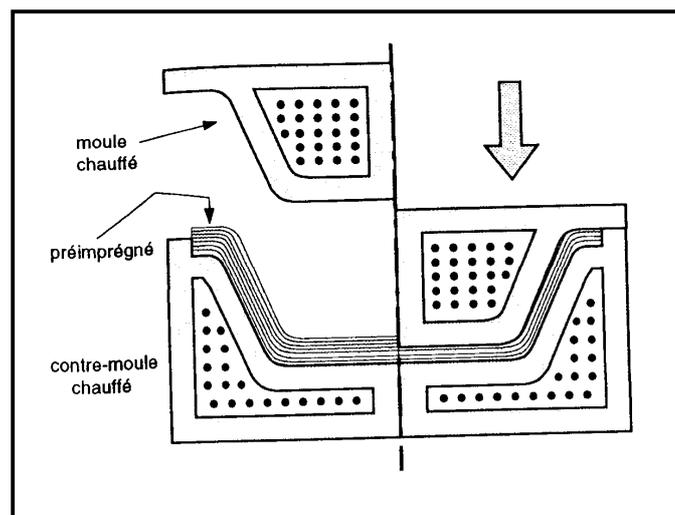


Fig. (I.6) : Injection thermodurcissable BMC

I.3.4. Compression thermodurcissable SMC: (Sheet Molding Compound)

Le principe consiste à déposer des feuilles de préimprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce.

Les avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques. Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition.

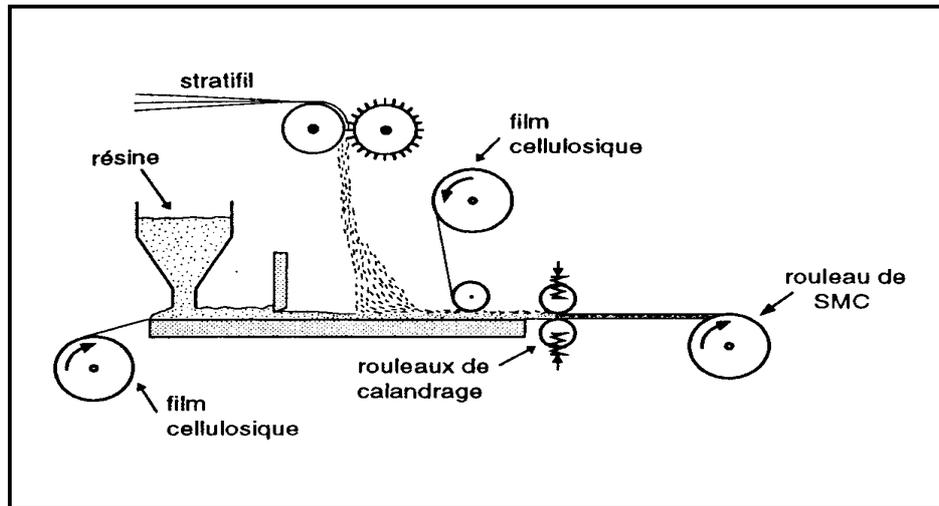


Fig. (I.7) : Compression thermodurcissable SMC

I.3.5. Enroulement filamentaire (ou bobinage):

Technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant.

Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses.

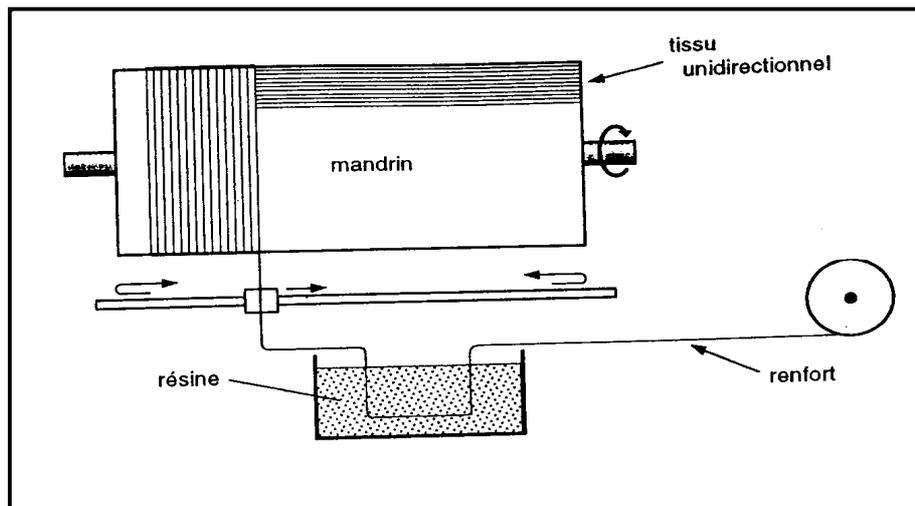


Fig. (I.7) : Enroulement filamentaire (ou bobinage)

Il existe d'autres procédés : pultrusion, drapage en autoclave, centrifugation, stratification en continu, thermoformage sous vide et estampage...

I.4. ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES :

I.4.1. Monocouche:

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissés et mat.

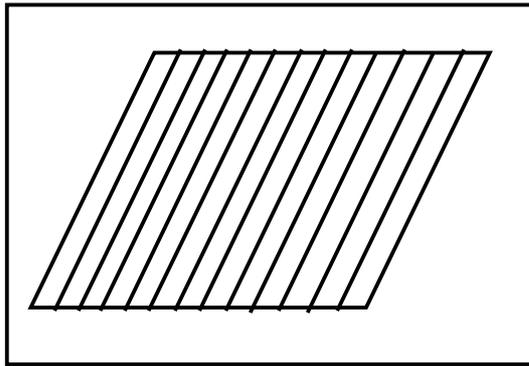


Fig. (I.8) : Couche de composite

I.4.2. Stratifiés :

Les stratifiés sont constitués de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifiés, mat, tissus, etc.) imprégnés de résines.

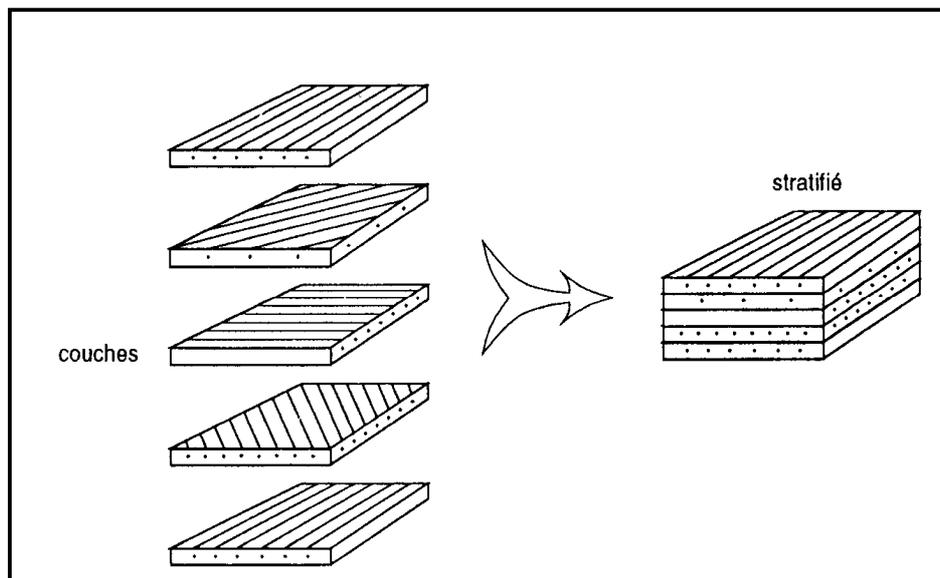


Fig. (I.9) : Constitution d'un stratifié

I.4.3. Sandwichs : [4]

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

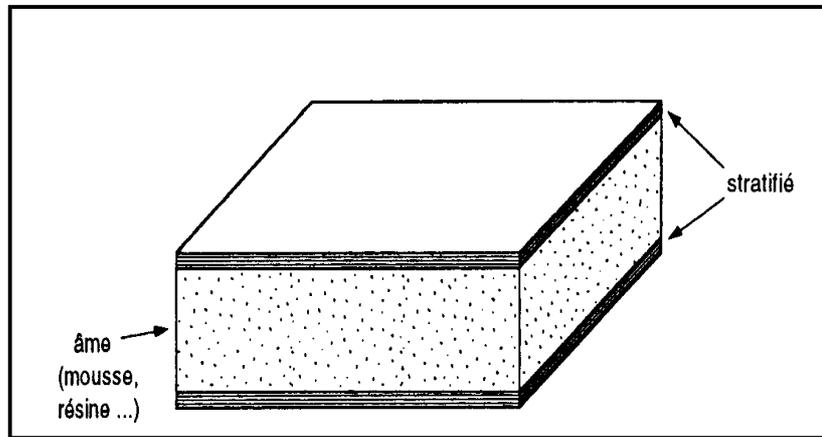


Fig. (I.10) : Matériaux sandwichs à âmes pleines

II. COMPORTEMENT ELASTIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES

Les champs des déformations et des contraintes dans un milieu sont liés par des lois appelées lois de comportement, caractérisant le comportement mécanique du milieu. Ces lois sont décrites par des axiomes qui permettent de rendre compte au mieux des phénomènes observés. L'expérience montre que de nombreux milieux solides déformables ont, pour une température donnée et dans un intervalle donné de déformation, un comportement élastique linéaire.

Dans le domaine de linéarité et en admettant que la température est uniforme dans tout le volume considéré, les matériaux composites se déforment comme les autres matériaux traditionnels.

II.1. GENERALITE SUR LE COMPORTEMENT ELASTIQUE DU MATERIAU :

II.1.1. Elasticité linéaire:[2]

La relation d'élasticité linéaire peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad \text{II.1}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \sigma_{ii} &= \sigma_{\alpha} & \varepsilon_{ii} &= \varepsilon_{\alpha} & \alpha &= 1 \\ \sigma_{ij} &= \sigma_{\beta} & \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{\beta} & \beta &= 9 - i - j \end{aligned}$$

Ou sous forme condensée :

$$\sigma = C \varepsilon \quad \text{II.2}$$

Cette loi, généralement appelée loi de Hooke généralisée, introduit la matrice de rigidité C , symétrique.

Le comportement linéaire d'un matériau est donc décrit dans le cas général par 21 coefficients indépendants.

La relation d'élasticité peut s'écrire sous la forme inverse, suivant :

$$\varepsilon = S \sigma \quad \text{avec} \quad S = C^{-1} \quad \text{II.3}$$

S : matrice de flexibilité ou de souplesse (symétrique).

II.1.3. Matériau anisotrope :

Dans le cas le plus général, la matrice de rigidité et la matrice de souplesse sont déterminées chacune par 21 constantes indépendantes. Ce cas correspond à un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie. Un tel matériau est appelé matériau triclinique ou matériau anisotrope.

II.1.4. Matériau monoclinique :

Un matériau monoclinique est un matériau qui possède un plan de symétrie.

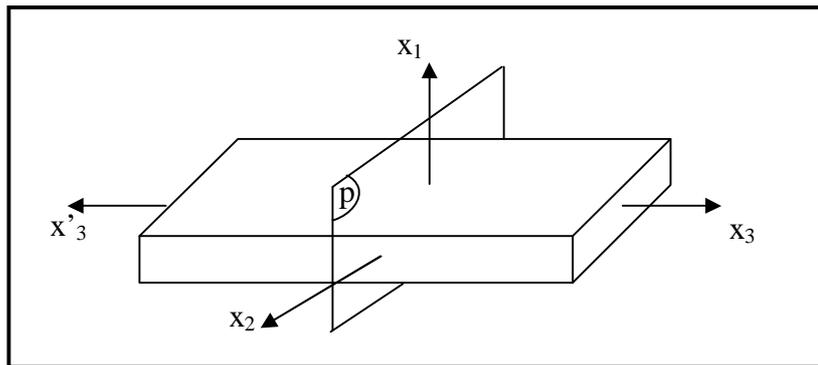


Fig. (II.1) : Plan de symétrie

La forme de la matrice de rigidité (ou souplesse) doit être telle qu'un changement de base effectué par symétrie par rapport à ce plan ne modifie pas la matrice. Dans le cas où le plan de symétrie est le plan (1,2), l'exploitation des changements de base conduit à une matrice de rigidité de la forme :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad \text{II.4}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est réduit à 13.

II.1.5. Matériau orthotrope :

Un matériau orthotrope possède trois plans de symétrie, perpendiculaires deux à deux. Il est à noter que l'existence de deux plans de symétrie perpendiculaires implique l'existence du troisième.

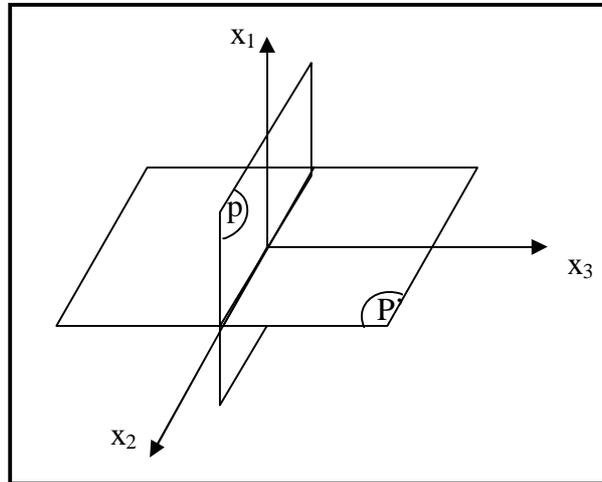


Fig. (II.2) : Matériau orthotrope

La forme de la matrice de rigidité est donc obtenue en ajoutant au matériau monoclinique un plan de symétrie perpendiculaire au précédent. L'invariance de la matrice dans un changement de base effectué par symétrie par rapport à ce deuxième plan conduit à une matrice de rigidité de la forme :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad \text{II.5}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est ramené à 9.

II.1.6. Matériau orthotrope à isotrope transverse :

Le matériau se comporte donc comme un matériau orthotrope possédant de plus un axe de révolution. Le matériau est alors appelé matériau orthotrope de révolution ou isotrope transverse. Il en résulte qu'un changement de base effectué par rotation quelconque autour de cet axe doit laisser inchangée la matrice de rigidité (ou souplesse).

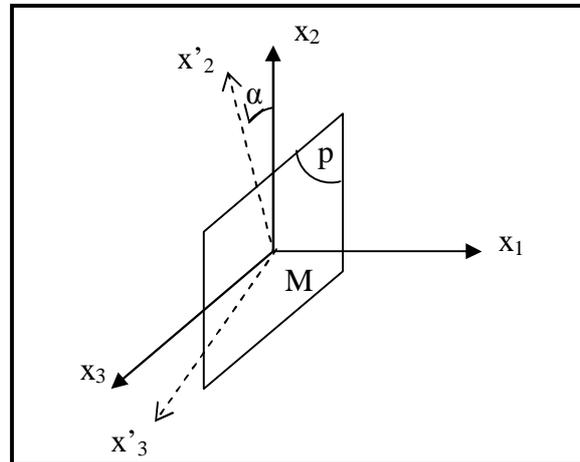


Fig. (II.3) : Plan d'isotropie

La matrice de rigidité s'écrit donc suivant :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad \text{II.6}$$

La matrice de souplesse a la même forme.

Les propriétés du matériau orthotrope à isotrope transverse sont déterminées par 5 constantes d'élasticité indépendantes.

II.1.7. Matériau isotrope :

Un matériau est isotrope si ses propriétés sont indépendantes du choix des axes de référence. Il n'existe alors pas de direction privilégiée, et la matrice de rigidité (ou souplesse) doit être invariante dans tout changement de bases orthonormées.

Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est donc réduit à 2, et conduit à la matrice de rigidité :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \end{bmatrix} \quad \text{II.7}$$

La matrice de souplesse a la même forme.

Généralement, les constantes de rigidité sont exprimées en introduisant les coefficients de Lamé λ et μ :

$$\begin{cases} C_{11} = \lambda + 2\mu \\ C_{12} = \lambda \end{cases} \quad \text{II.8}$$

II.2. COMPORTEMENT ELASTIQUE DES MATÉRIAUX COMPOSITES :

II.2.1. Comportement élastique d'un matériau composite unidirectionnel : [4]

La cellule élémentaire d'un composite unidirectionnel peut être considérée comme constituée d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice (Fig. II.4). Le matériau se comporte donc comme un matériau orthotrope possédant de plus un axe de révolution ou isotrope transverse.

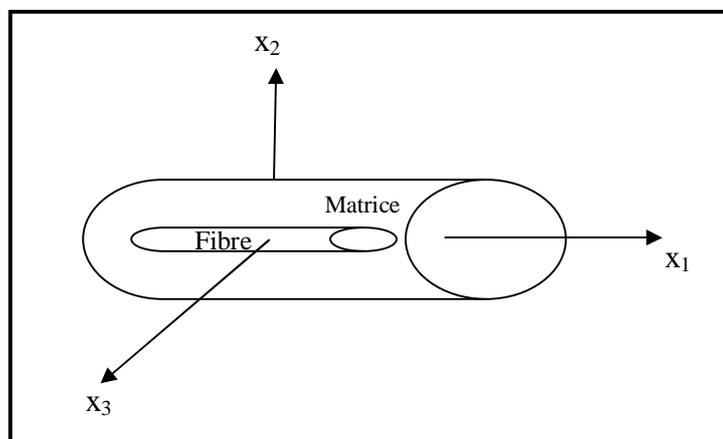


Fig. (II.4) : Composite unidirectionnel

II.2.2. Comportement élastique d'un matériau composite orthotrope :

Les matériaux composites stratifiés sont constitués de plusieurs couches de matériaux composites unidirectionnels ou de composites à base de tissus. Ces couches possèdent trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope. (paragraphe II.1.5 et II.1.6)

II.2.3. Comportement élastique d'une couche hors axes d'orthotropie : [1][4]

Le comportement élastique d'un matériau composite unidirectionnel ou tissu, exprimé dans les directions principales étant exposé précédemment: un axe suivant la direction des fibres ou de la chaîne, les deux autres axes étant orthogonaux. Or, nous avons vu que les stratifiés étaient élaborés par couches successives, dont la direction des fibres ou de la chaîne est décalée d'une couche à l'autre. Pour faire l'étude du comportement élastique de tels stratifiés, il est alors nécessaire de prendre un système d'axes de référence pour l'ensemble du stratifié, et de rapporter le comportement élastique de chaque couche à ce système de référence.

Dans ce qui suit nous considérons donc la figure II.5 une couche de matériau composite unidirectionnel ou tissu de directions principales (1,2,3), le plan (1,2) étant confondu avec le plan de la couche, et la direction 1 confondue avec la direction des fibres ou de la chaîne. L'objectif est de caractériser les propriétés élastiques de la couche, en les exprimant dans le système d'axes de référence (1',2',3) du stratifié, la direction des fibres ou de la chaîne faisant un angle θ avec la direction 1'. Ce système d'axes est usuellement référencé comme système (x,y,z).

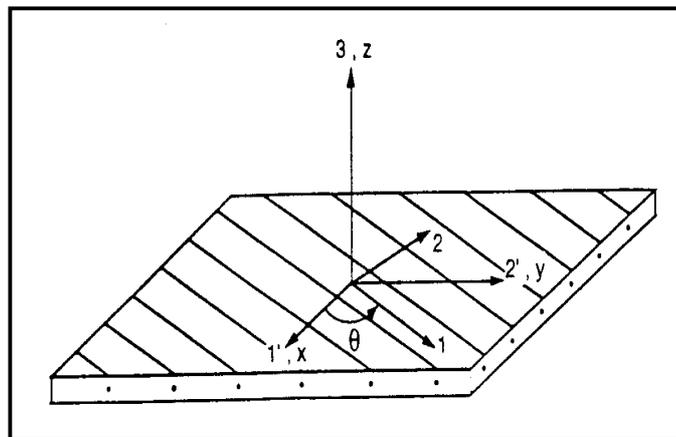


Fig. (II.5) : Axes principaux (1,2,3) d'une couche de stratifié et axes de référence (1',2',3) = (x,y,z) du stratifié

Soit :

- dans la base (\vec{e}) : $\sigma = C \varepsilon$ II.9
- dans la base (\vec{e}') : $\sigma' = C' \varepsilon'$ II.10

Les relations de changement de base, relatives aux contraintes et déformations, peuvent être écrites d'une manière générale sous les formes :

$$\begin{cases} \sigma' = T\sigma \\ \varepsilon' = T\varepsilon \end{cases} \quad \text{II.11}$$

Et en combinant les relations II.9, II.11, il vient :

$$\sigma' = T C T^{-1} \varepsilon' \quad \text{II.12}$$

Où T est la matrice de changement de base (6×6).

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 0 & 0 & 0 & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 0 & 0 & 0 & -2 \sin \theta \cos \theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -2 \sin \theta \cos \theta & 2 \sin \theta \cos \theta & 0 & 0 & 0 & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad \text{II.13}$$

Le comportement élastique d'une couche, rapporté à ses axes principaux, est donné par la relation (II.9). Les matrices de rigidité C' et de souplesse S' , exprimées dans la base (1',2',3), sont obtenues en appliquant aux matrices de rigidité et de souplesse, rapportées à la base (1, 2, 3), les relations de changement de base. Ces relations permettent de déterminer la matrice de rigidité C' et la matrice de souplesse S' exprimées dans la base (1',2',3).

La relation de changement de base des matrices de rigidité :

$$C' = T C T^t \quad \text{II.14}$$

Sous forme matriciel :

$$\begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{13} & 0 & 0 & C'_{16} \\ C'_{12} & C'_{22} & C'_{23} & 0 & 0 & C'_{26} \\ C'_{13} & C'_{23} & C'_{33} & 0 & 0 & C'_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C'_{44} & C'_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C'_{45} & C'_{55} & 0 \\ C'_{16} & C'_{26} & C'_{36} & 0 & 0 & C'_{66} \end{bmatrix} \quad \text{II.15}$$

Par un raisonnement analogue, on trouve de même la relation de changement de base des matrices de rigidité :

$$S' = T S T^{-1} \quad \text{II.16}$$

Les propriétés du matériau composite en dehors de ses axes principaux sont déterminées par 13 constantes d'élasticité indépendantes.

II.2.4. Comportement élastique d'un composite stratifié : [1]

Dans la théorie des stratifiés l'ensemble des couches constituées de fibres et de matrice est considéré comme un matériau homogène et anisotrope. Donc, des principes de la théorie d'élasticité et de la flexion des plaques sont applicables.

Dans notre présent travail, l'utilisation de la théorie des stratifiés se résume à la détermination des propriétés mécaniques de notre plaque.

II.2.4.1. Théorie classique des stratifiés :

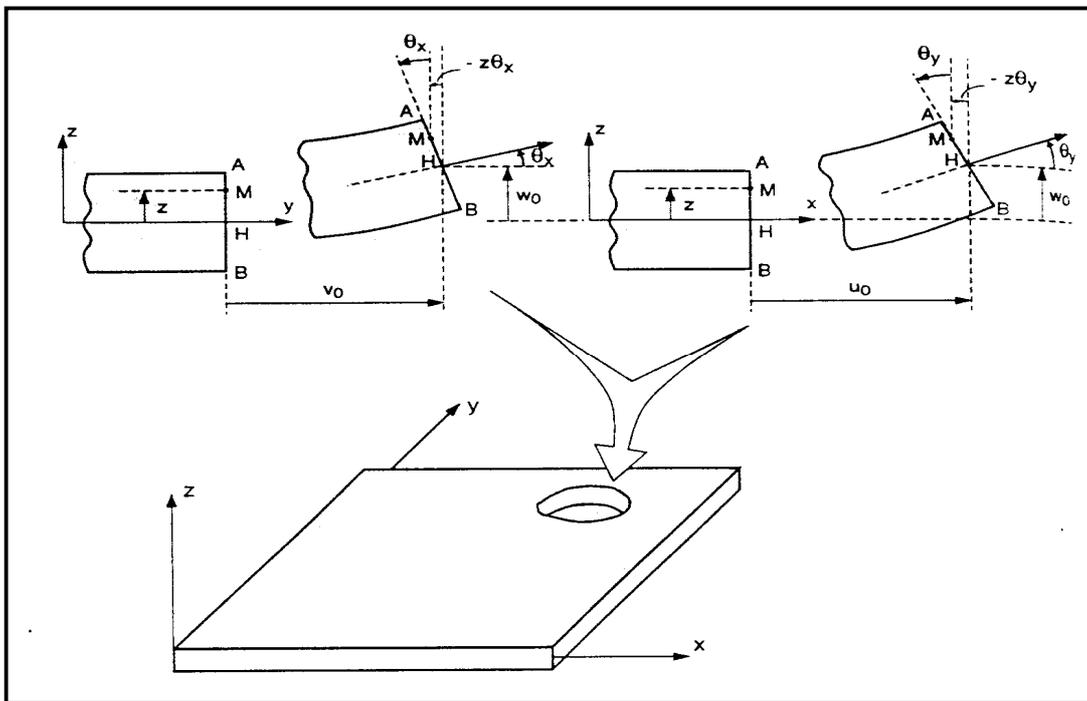


Fig. (II.5) : Schématisation des déformations dans le cas de la théorie classique des stratifiés

Les particules situées avant déformation sur une normale au feuillet moyen restent après déformation sur une normale au feuillet moyen déformé.

- Le champ des déplacements s'écrit :

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z\theta_y \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z\theta_x \quad \text{avec: } \theta_x = \frac{\partial w_0}{\partial y}, \theta_y = \frac{\partial w_0}{\partial x} \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y) \end{aligned} \quad \text{II.17}$$

- Le champ des déformations s'écrit :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \varepsilon_{xy} &= \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \\ \varepsilon_{zz} &= \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0\end{aligned}\tag{II.18}$$

Finalement, le champ des déformations s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}\tag{II.19}$$

Ou sous forme abrégée :

$$\varepsilon(M) = \varepsilon(x, y, z) = \varepsilon_m(x, y) + z k(x, y)\tag{II.20}$$

Avec : $\varepsilon_m(x, y)$ déformation en membrane
 $k(x, y)$ déformation en flexion et torsion

- Le champ des contraintes s'écrit :

$$\sigma(M) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\tag{II.21}$$

- Les contraintes dans la couche k s'expriment suivant :

$$\sigma_k(M) = \sigma_k(x, y, z) = Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z Q'_k K(x, y)\tag{II.22}$$

Q' la matrice de rigidité réduite de la couche k (3×3).

- Résultantes en membrane dans le cadre de la théorie classique des stratifiés s'écrit :

$$N(x, y) = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z Q'_k k(x, y)] dz\tag{II.23}$$

Ou en définitive sous la forme :

$$N(x, y) = A \varepsilon_m(x, y) + B k(x, y)$$

$$\text{avec : } A = [A_{ij}] = \sum_{k=1}^n (h_k - h_{k-1}) (Q'_{ij})_k \quad \text{II.24}$$

$$B = [B_{ij}] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (h_k^2 - h_{k-1}^2) (Q'_{ij})_k$$

N : Résultantes en membrane

A : La matrice de rigidité en membrane.

B : La matrice de couplage membrane-flexion-torsion.

- Le champ des moments de flexion et de torsion sous la forme suivante :

$$M_f(x, y) = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [z Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z^2 Q'_k k(x, y)] dz \quad \text{II.25}$$

Ou :

$$M_f(x, y) = B \varepsilon_m(x, y) + D k(x, y)$$

$$\text{avec : } D = [D_{ij}] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (h_k^3 - h_{k-1}^3) (Q'_{ij})_k \quad \text{II.26}$$

M_f : Moments de flexion et de torsion

D : La matrice de rigidité en flexion.

II.2.4.2. Equation du Comportement d'un composite stratifié :

L'équation constitutive d'une plaque stratifiée exprime les résultantes et moment en fonction des déformations en membrane et des courbures. Elle s'obtient en regroupant les expressions (II.24) et (II.26) suivant une seule écriture matricielle sous la forme contractée :

$$\begin{bmatrix} N \\ M_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_M \\ k \end{bmatrix} \quad \text{II.27}$$

Les termes des matrices A , B et D peuvent être également exprimés en fonction de l'épaisseur e_k et la cote du centre de la couche k sous la forme:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q'_{ij})_k e_k$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q'_{ij})_k e_k z_k \quad \text{avec } \begin{matrix} e_k = h_k - h_{k-1} \\ z_k = \frac{(h_k + h_{k-1})}{2} \end{matrix} \quad \text{II.28}$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q'_{ij})_k \left(e_k z_k^2 + \frac{e_k^3}{12} \right)$$

Q'_{ij} : est la matrice de rigidité réduite de la couche k.

Dont les rigidités réduites transformées Q' sont:

$$\begin{aligned}
 Q'_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta, \\
 Q'_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta, \\
 Q'_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta), \\
 Q'_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta), \\
 Q'_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta, \\
 Q'_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta.
 \end{aligned} \tag{II.29}$$

Q_{ij} : étant les coefficients élastiques de la matrice de rigidité réduite en contrainte plane définis par:

$$\begin{aligned}
 Q_{11} &= \frac{E_L}{1 - \frac{E_T}{E_L} \nu_{LT}^2} \\
 Q_{22} &= \frac{E_T}{E_L} Q_{11} \\
 Q_{12} &= \nu_{LT} Q_{22} \\
 Q_{66} &= G_{LT}
 \end{aligned} \tag{II.30}$$

III. MECANIQUE LINEAIRE ELASTIQUE DE LA RUPTURE

La rupture est un problème auquel l'homme aura à faire face aussi longtemps qu'il construira des édifices ou fabriquera des structures. Ce problème est actuellement plus crucial avec le développement de structures complexes lié au progrès technologique. Les avancées dans la connaissance de la mécanique de la rupture permettent aujourd'hui et plus précisément de puis le milieu du 20^e siècle, de mieux prévenir le risque de rupture.

Pendant, beaucoup de mécanismes de rupture sont encore mal connus notamment lorsqu'on utilise de nouveaux matériaux ou de nouveaux procédés. Le coût des ruptures catastrophiques représente, d'après une étude économique de début des années 80, près de 4% du PNB dans les pays industriels développés. On pourrait réduire ce coût d'environ 30% si on appliquait correctement les concepts connus de la mécanique de la rupture et de 25% supplémentaires par le développement des recherches dans le domaine de la rupture. [10]

On distingue deux catégories de rupture des structures:

- soit une négligence dans la conception, dans la construction ou dans l'utilisation de la structure
- soit l'utilisation d'un nouveau matériau ou d'un nouveau procédé, qui peut provoquer une rupture inattendue.

Dans le premier cas, le risque de rupture peut être évité dès lors que la structure est bien dimensionnée avec un choix de matériaux adaptés et que les chargements sont correctement évalués.

Dans le deuxième cas, la prévention de la rupture est plus délicate. Lorsqu'on utilise un nouveau matériau ou un nouveau procédé, il y a souvent un certain nombre de facteurs que le concepteur ne maîtrise pas toujours car la mise en œuvre de nouvelles techniques, bien qu'elle procure des avantages, conduit inévitablement à des problèmes potentiels.

Un exemple bien connu du deuxième cas est la rupture de ce qu'on appelait les bateaux de la liberté pendant la deuxième guerre mondiale. Ces bateaux, dont la coque était assemblée par soudage et non par rivetage, coûtaient moins chers et étaient fabriqués plus rapidement. Ce changement de procédé de fabrication qui constituait un progrès indéniable, conduisait cependant à des ruptures catastrophiques qui se développaient dans les joints de soudure. [10]

Aujourd'hui, la plupart des bateaux sont assemblés par soudage mais le progrès des connaissances et l'utilisation des doubles coques en aciers plus adaptés permettent de mieux maîtriser ce risque de rupture.

III.1. DEFINITION :

Le mécanisme de rupture est un processus mécanique produisant au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée *fissure*. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. Par rapport au facteur temps.

On distingue deux types de rupture :

- rupture fragile : la rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide possible des fissures (consommation d'énergie faible).

- rupture ductile : la rupture ductile semble liée essentiellement à la présence d'inclusion ou de précipités. Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est en général importante (consommation d'énergie grande).

III.2. MODE DE RUPTURE :

La propagation d'une fissure peut se faire suivant trois modes de déplacement des faces de la fissure dans un plan défini. Elle peut aussi se faire suivant des modes mixtes qui les combinent tous les trois. La figure (III.1) illustre les trois modes de rupture.

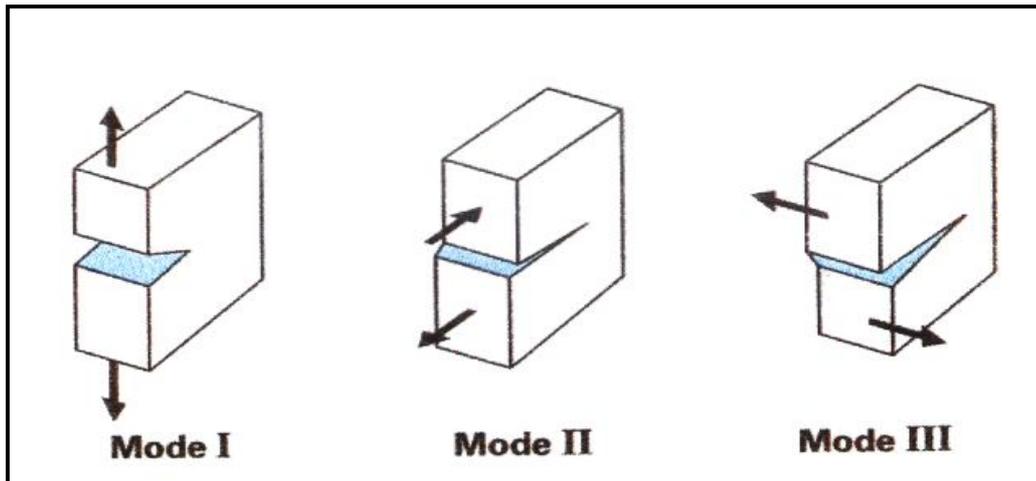


Fig. (III.1) : Schématisation des trois modes de rupture

- Mode I : les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement l'une par rapport à l'autre, c'est le mode par ouverture.
- Mode II : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan, et dans une direction perpendiculaire au front de fissure. Il est appelé aussi mode par glissement droit.
- Mode III : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de fissure, c'est le mode de glissement vis.

Le mode I est considéré comme le plus dangereux en raison de l'ouverture par traction qui favorise l'initiation et la propagation des fissures. C'est le type le plus répandu dans le cas des matériaux fragiles. Par conséquent, il est le plus étudié.

III.3. MESURE DE LA TENACITE :

La mécanique de la rupture prend en considération la présence de défaut au sein du matériau, et propose d'étudier son influence sur le comportement mécanique durant le chargement, ainsi que son évolution au cours du chargement. Elle permet de quantifier le rupture et de décrire les phénomènes de rupture des matériaux.

Griffith (1920) posa les bases de cette théorie en se basant sur les ruptures soudaines dans le domaine élastique, le principe s'énonce en supposant que la rupture brutale provient d'une instabilité de la fissure qui se produit lorsque l'énergie potentielle mécanique libérée par l'extension d'une fissure dépasse l'énergie absorbée par cette extension. [8]

III.3.1. Facteur d'intensité des contraintes :

Lorsqu'un corps fissuré est sollicité par un champ de force il se produit au voisinage de la fissure une très grande concentration de contraintes, dans ces conditions qui représentent d'un point de vue pratique la réalité des pièces et structures. Les théories de l'élasticité permettent d'exprimer la contrainte proche du front de fissure par une série de Taylor en coordonnées polaires:

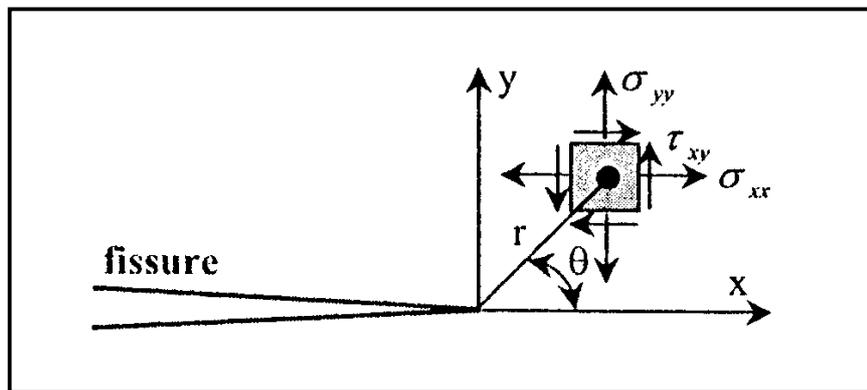


Fig. (III.2) : Détermination des axes (x, y) et des coordonnées (r, θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \underbrace{\dots + \dots + \dots}_{\text{négligeable}} \quad \text{III.1}$$

K_I représente le facteur d'intensité de contraintes en mode I définis par IRWIN [5].

IRWIN a cherché une expression pouvant définir le champ de contraintes au voisinage de la fissure en tenant compte de la zone plastique par l'accroissement de la fissure. Il suggère que la fissure devient instable et se propage lorsque le facteur d'intensité de contraintes K_I atteint une valeur critique K_{IC} appelée ténacité qui caractérise quantitativement la résistance d'un matériau à la propagation brutale d'une fissure en mode I. Il énonça ainsi le critère de contrainte par la relation:

$$K_{IC} = \sigma_c \cdot Y \cdot \sqrt{a} \quad \text{III.2}$$

Y : Représente un coefficient de forme, c'est une fonction géométrique de l'éprouvette et de la longueur de fissure, il est donné pour les principales pièces par des tables. Dans le cas de la flexion trois points :

$$Y = 1.93 - 3.07\left(\frac{a}{W}\right) + 14.53\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25.11\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25.80\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad \text{III.3}$$

III.3.1.1. Détermination expérimentale de K_{IC} :

L'essai consiste à solliciter en traction ou en flexion des éprouvettes géométriquement identiques comprenant des fissures de longueurs différentes, les charges de rupture relevées serviront au calcul de K_{IC} . Dans la mesure ou l'on veut représenter graphiquement la courbe qui traduit l'évolution de K_{IC} et sera en fonction de a/w .

III.3.2. Taux de restitution d'énergie :

On se basant sur des considérations thermodynamiques GRIFFITH a mis en évidence le fait que la rupture est un phénomène consommateur d'énergie, car pour augmenter la surface d'une fissure dans un matériau il faut fournir un certain travail. Le bilan énergétique du système composé des forces extérieures et du corps fissuré s'écrit:

$$\frac{dW}{dA} = \frac{dU}{dA} + \frac{dT}{dA} \quad \text{III.4}$$

W : Travail des forces extérieures

U : l'énergie élastique stockée dans les matériaux

A : surface de la fissure

T : la somme de toutes les énergies dissipées de façon irréversible

L'énergie cinétique étant supposée nulle (situation quasi-statique). De cette relation découle l'énergie nécessaire à la création de surface (G) :

$$\frac{d}{dA}(W - U) = \frac{dT}{dA} = G \quad \text{III.5}$$

Elle est appelée taux de restitution d'énergie. L'amorçage de la fissure se caractérise par une valeur critique du taux de restitution d'énergie notée G_{IC} d'où le critère de rupture:

$$G \geq G_{IC} \quad \text{III.6}$$

III.3.2.1. Méthode des compliances pour la mesure de G_{IC} : [5]

Pour un corps fissuré, le taux du restitution d'énergie par unité de surface est donné par :

$$G = \frac{dU}{dA} \quad \text{III.7}$$

Sachons que :

U: énergie du système

A: surface de la fissure $A = B \cdot a$

B: largeur, a : longueur de fissure

Ce qui donne:

$$G = \frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad \text{III.8}$$

Sur une série d'éprouvettes identiques et fissurées avec différentes longueur de fissures on mesure l'évolution de la charge en fonction du déplacement.

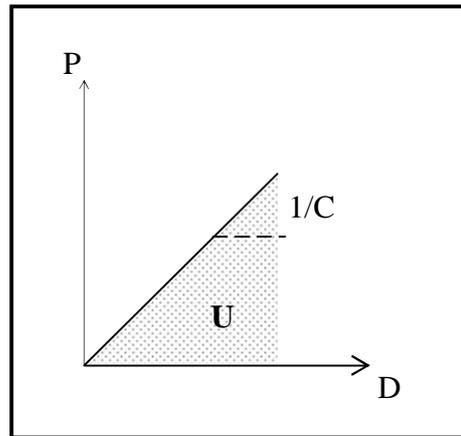


Fig. (III.3) : courbe typique charge déplacement

C: représente la compliance du système,

$$C = \frac{D}{P} \quad \text{III.9}$$

Ce qui nous donne une méthode expérimentale basée sur la forme :

$$G = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{B} \cdot \frac{dC}{da} \quad \text{III.10}$$

Une fois les compliances de chaque éprouvette calculé, on trace la variation de C en fonction de a, figure (III.4)

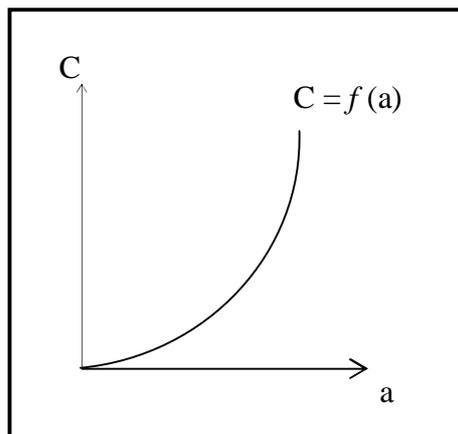


Fig. (III.4) : Evolution de la compliance en fonction de la longueur de fissure

On détermine par interpolation la relation $C = F(a)$, pour aboutir à relation de $\frac{dC}{da}$ ainsi nous obtenons différentes valeurs de G ce qui va permettre de tracer son évolution en fonction des différentes longueurs de fissures, figure (III.5).

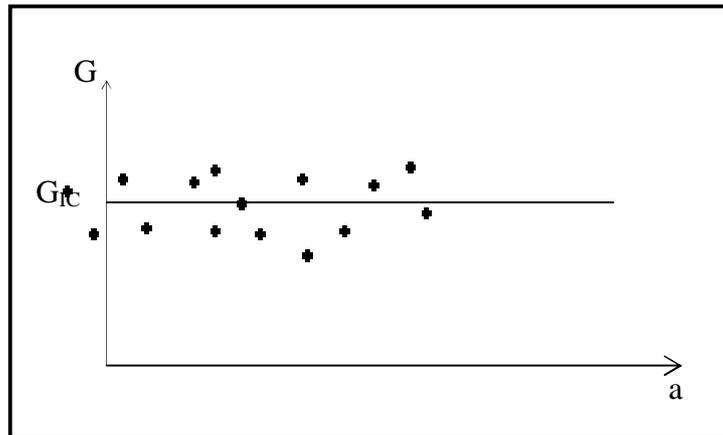


Fig. (III.5) : Evolution du taux de restitution d'énergie en fonction des longueur de fissure

III.3.2.2. Méthode WILLIAMS pour la mesure de G_{IC} : [27] [5]

Le paramètre intrinsèque G_{IC} mesuré en choc des matériaux à été estimé par la méthode de C. E. TURNER et J. G. WILLIAMS en utilisant les technique de la mécanique linéaire élastique de la rupture. En cassant en choc des éprouvettes de différentes longueurs d'entailles, on peut tracer la droite $U = f(B, W, Y)$:

$$U = G_{IC} \times B \times W \times Y \quad \text{III.11}$$

Dont la pente G_{IC} représente le taux de restitution d'énergie critique du matériau.

U est l'énergie perdue par le marteau et Y un facteur de calibration qui a été tabulé par les même auteurs. Il dépend de la profondeur d'entaille, des dimensions de l'éprouvette et de la distance entre appuis. Figure (III.6) :

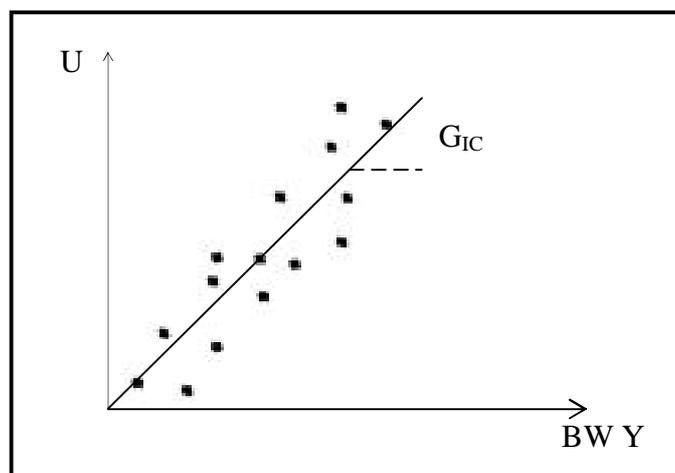


Fig. (III.6) : Représentation graphique de l'énergie en fonction de la géométrie

III.4. LIMITES DE VALIDITES :

Quand un corps fissuré est soumis à un chargement, la concentration de contraintes en fond de fissure crée une plastification localisée, l'applicabilité des méthodes de M. L. E. R dépend en premier lieu de la taille de cette zone plastique et exige que celle-ci reste petite par rapport à la longueur de fissure et aux dimensions du corps ce qui assurera la non perturbation de la distribution élastique des contraintes [5].

IRWIN et ORWAN [8] mettent l'hypothèse de la formation de la zone plastique, Figure (III.7), et propose les corrections suivantes :

$$- rp = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \text{ cas des contraintes planes}$$

$$- rp = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \text{ cas des déformations planes}$$

rp : correction plastique

σ_e : contrainte élastique

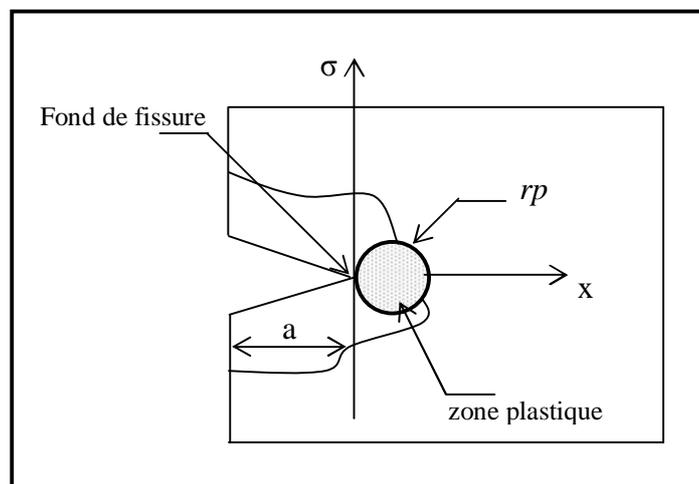


Fig. (III.7) : Zone plastique en fond de fissure
représentation d'IRWIN

Ceci qui impose aux pièces des dimensions de taille très importante par rapport aux dimensions de la zone plastique. La norme ASTM donne les dimensions de l'entaille de la largeur et de l'épaisseur de l'éprouvette :

$$a, B \geq 2,5 \left[\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right]^2 \quad \text{et} \quad W \geq 5 \left[\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right]^2 \quad \text{III.12}$$

Dans le cas des polymères WILLIAMS propose :

$$W \geq 6,25 \left[\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right]^2 \quad \text{III.13}$$

Dans le cas des composites, on ne peut parler de zone plastique mais plutôt de zone endommagée dont les dimensions sont beaucoup plus importantes que la zone plastique, ce qui représente une limitation pour la M. L. E. R. Pratiquement la zone endommagée n'est que la propagation des fissures donc elle n'est pas le siège de dissipation d'énergie s'opposant au développement de la rupture comme dans le cas des métaux [8].

Dans le cas où la zone endommagée prend des dimensions importantes par rapport à celles de la pièce, K_C et G_C ne peuvent représenter des paramètres qui décrivent la résistance à la fissuration du matériau qui varie avec l'augmentation de la fissure. Cette instabilité dépend de la géométrie de la pièce figure (III.8).

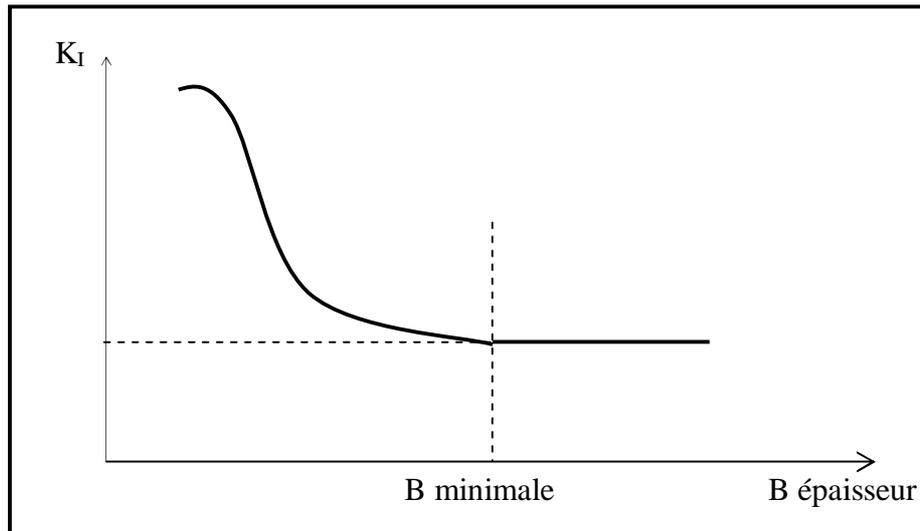


Fig. (III.8) : Evolution de la résistance à la fissuration en fonction de l'épaisseur

III.5. LE CONCEPT DES COURBES R :

L'instabilité de la résistance à la fissuration est décrite selon une courbe unique appelée courbe (R) figure (III.9). Cette courbe représente un paramètre intrinsèque, elle permet de déterminer le (K) instable ou le (G) instable. L'utilisation des courbes (R) permet de distinguer la phase de propagation stable et instable de la rupture.

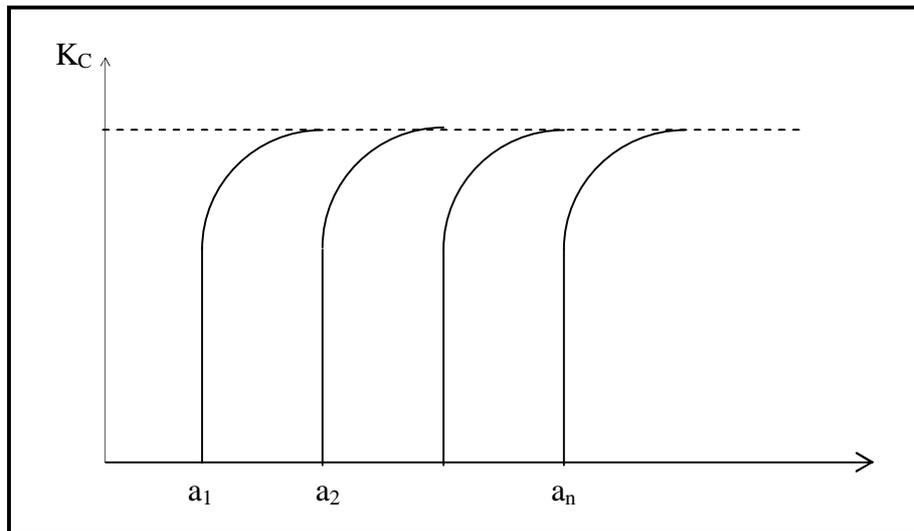


Fig. (III.9) : Représentation graphique de l'évolution de la résistance à la fissuration en fonction de la longueur de fissure

On distingue la propagation stable et instable de la rupture, les courbes (R) peuvent être tracées soit en énergie G_R soit en facteur de contraintes K_R .

Le traçage d'une courbe R nécessite la connaissance en tout instant de la longueur de fissure propagée et de la charge correspondante.

En pratique la difficulté réside en la mesure de la longueur instantanée de la fissure, cette longueur effective instantanée est donnée par l'expression suivante: [19]

$$a_{\text{eff}} = a_0 + a_{\text{st}} \quad \text{III.14}$$

a_0 : longueur initiale de la fissure

a_{st} : longueur de la propagation stable de la fissure mesurée.

III.6. METHODE EXPERIMENTALE POUR TRACER LES COURBES R :

Pour tracer la courbe R, il faut connaître à tout instant la longueur de fissure évoluant en fonction de la charge. Pour ce faire la méthode expérimentale utilisée est celle des compliances.

Cette méthode consiste à solliciter en traction des éprouvettes identiques avec différentes longueurs de fissure, on enregistre la charge en fonction du déplacement.

La mesure de la pente de la partie linéaire pour les différentes longueurs de fissures croissantes permet d'établir les différentes longueurs de fissures figure (III.10) :

$$C = f\left(\frac{a}{W}\right) \quad \text{III.15}$$

La méthode de la compliance consiste à mesurer la pente de la droite passant par l'origine en un point de chargement P_i de la courbe charge - déplacement.

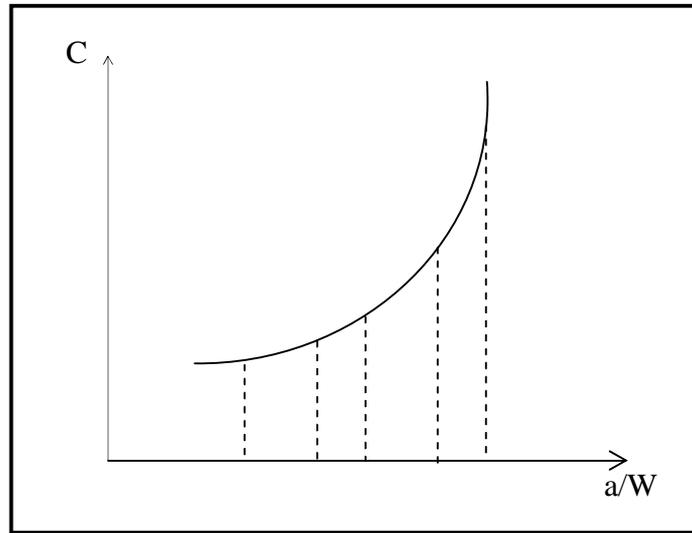


Fig. (III.10) : Courbe C en fonction de a/W

Connaissant les (C_i) on peut trouver les (a_i) correspondantes, ce qui permettra de tracer les courbes R soit en énergie soit en contraintes en fonction de la longueur de propagation de fissures. Figure (III.11).

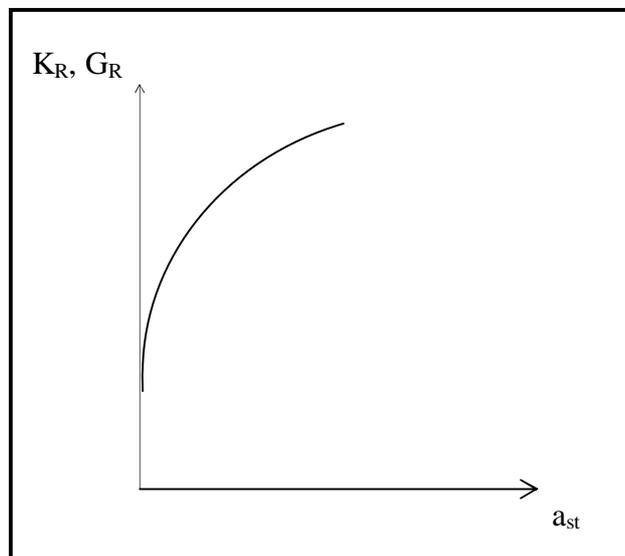


Fig. (III.11) : Courbe (R) unique indépendante de la longueur de fissure initiale

IV. MATERIAUX DE L'ETUDE

Dans cette partie nous nous intéresserons plus particulièrement au matériau composite qui fait l'objet de notre étude, nous tiendrons compte des constituants de base, du mode d'obtention et de la découpe des éprouvettes.

IV.1. PRESENTATION DES CONSTITUANTS DE BASE :

IV.1.1. Résine :

La résine utilisée est de type polyester insaturé.

Les principales caractéristiques de cette résine d'appellation industrielle NORSODYNE S 2010 V ont été tirées de la fiche technique donnée par l'entreprise FIPEX PLAST (Chlef).

IV.1.1.1. Caractéristiques de la résine :

Couleur :	jaune
Masse volumique à 20°C :	1.12 g/cm ³
Viscosité à 25°C :	275 CPS
Temps de gel :	12 min
Durée de stockage à 25°C :	4 mois

IV.1.1.2. Propriétés de la résine durcie non renforcée :

Masse volumique à 20°C :	1.20 g/cm ³
Contrainte de rupture en traction :	54 MPa
Allongement à la rupture :	1.5 %
Contrainte de rupture en flexion :	107 MPa
Module d'élasticité :	3900 MPa
Retrait volumique :	1.7 %

IV.1.2. Les aditifs :

Les aditifs utilisés dans notre étude sont :

- 1.2 % de catalyseur curox m300 MEKP (Methylethyl Ketone Peroxide – oxygène actif 4%).
- 0.2 % d'accélérateur (octoat de cobalt 6% de concentrations).

IV.1.3. Renfort :

Le renfort utilisé est de type verre E Ahlstrom, importé de Finlande et qui se présente sous différentes formes :

- mat à fils coupés de différents grammages à savoir 300, 450 et 600 g/cm³ utilisé pour le moulage par contact. La référence industrielle est de la forme suivante : M501
- tissu

Les principales caractéristiques du verre E ont été tirées de la revue technique de la fibre de verre E (Ahlstrom).

Masse volumique :	2,50 – 2,59 g/cm ³
Module d'élasticité en traction :	7,25.10 ⁴ MPa
Allongement à la rupture :	4,4 – 4,5 %

IV.2. PRESENTATION DES MATERIAUX :

Dans ce paragraphe nous allons présentés le matériau étudié, obtenus par le procédé de moulage par contact.

Le problème posé dans ce type de moulage est comment varier le taux de fibre de verre dans les différentes plaques moulées par contact ?

Dans cet axe de recherche, des plaques (stratifié) de (90×110) cm², de différents taux de fibres de verre ont été fabriquées dans le laboratoire de l'unité de polyester insaturée (FIPEX PLAST) de Chelf. Le mode de renforcement des plaques comporte quatre types de renfort :

- mat de type 300 g/cm²
- mat de type 450 g/cm²
- mat de type 600 g/cm²
- tissu

Ce problème a été résolu par le changement du poids de taux de renforcement (taux de la fibre) utilisé dans les différentes plaques du stratifié moulé par la méthode suivante :

$$\text{poids de résine (g)} = \frac{\text{poids de fibre (g)} \times \text{taux de résine (\%)}}{\text{taux de fibre (\%)}}$$

Le moulage des plaques utilisées est façonné à partir des étapes suivantes :

- Préparation du moule (gabarié : une plaque à surface lisse).
- Découpage du mat ou tissu de verre (90cm × 110 cm).
- Pesage du mat ou tissu de verre coupé.
- Calcul des taux de fibre et de la résine suivant la méthode précédente.
- Préparation de la résine.
- Moulage (manuellement : pinceau et débuteur).
- Pause de durcissement (24h).
- Démoulage.

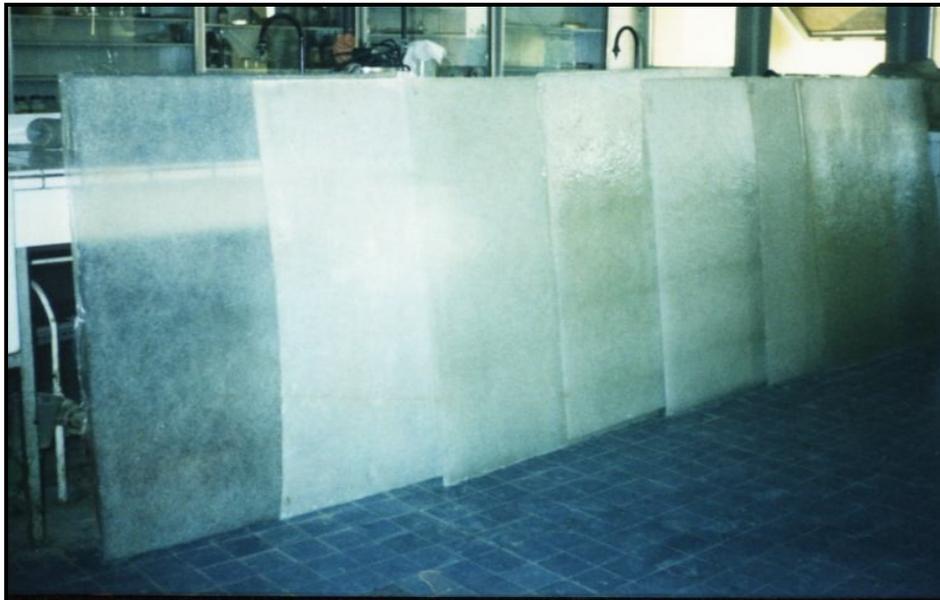


Fig. (IV.1) : Les différentes plaques moulées par contact

Le taux de renforcement dans les plaques moulé du stratifié peut être illustré comme suit tableau (IV.1):

- **Tableau IV.1** : Le taux de renforcement dans les plaques moulé.

N°	Mode de renforcement	Poids de la fibre (g)	Poids de la résine (g)	Taux de la fibre (%)	Taux de la résine (%)
1	300 – 300 – 300	930	3720	20	80
2	300 – 450 – 300	1090	1090	50	50
3	450 – 450 – 450	1365	3185	30	70
4	300 - 450 - 600 - 450 - 300	2150	3225	40	60
5	450 – 450 – 450	1365	5460	20	80
6	450 – tissu – 450	1200	2800	30	70

IV.3. DECOUPE DES EPROUVETTES :

L'opération de découpe des éprouvettes est d'une délicatesse imposante, non seulement pour respecter les restrictions dimensionnelles et géométriques mais aussi les effets de l'usinage sur les composites. Par voie de conséquence un intérêt particulier a été accordé à cette opération.

Selon les normes relatives aux plastiques renforcés ISO 13586 et ASTM 5045, il est recommandé d'utiliser des scies en diamant, mais par mesure d'adaptation au matériel existant, nous avons utilisé une machine de coupe de bois (7 opérations), les conditions de coupe adoptées sont les suivantes :

- Vitesse de coupe de 4500 tr/min
- Disque en diamant
- Avance manuelle
- Sans lubrification

Pour les éprouvettes de tractions, les barreaux découpés (25 × 165) mm seplacent dans un gabarié, l'ensemble est placé dans un fraiseuse verticale pour fraiser la forme altère.

Pour les éprouvettes destinées à des essais de fissuration en mode I, les recommandations des normes déjà citées sur les géométries, conditions d'entaillage, et de pré fissuration ainsi que les conditions des essais et les règles de dépouillement des résultats permettent l'évaluation expérimentale du K_{IC} et G_{IC} pour une sollicitation en traction ou en flexion. Les essais sont menés sur des éprouvettes SENB (Single Edge Notched Bend).

IV.3.1. Les éprouvettes d'altère de traction :

Les essais de traction ont été menés sur des éprouvettes de forme altère, selon la norme ISO FLACHPROBE DIN 50 114 – 12.5 × 50. Figure (IV.2)

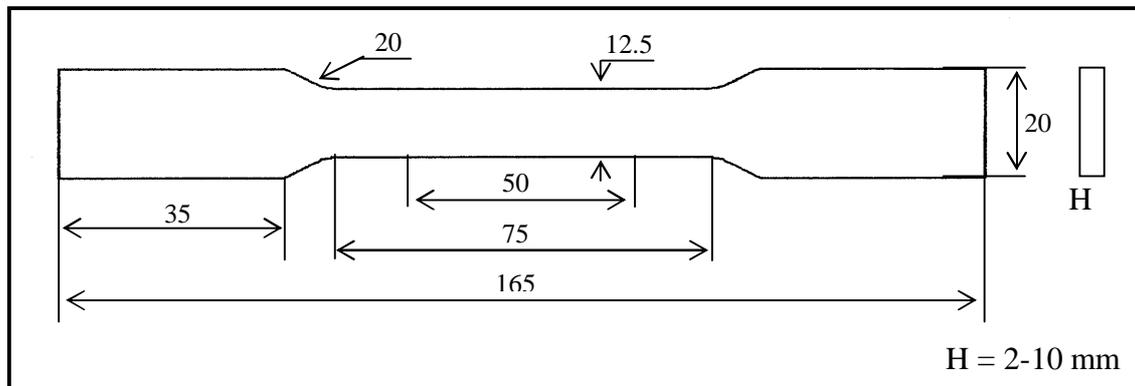


Fig. (IV.2) : Géométrie des éprouvettes de traction

IV.3.2. Les éprouvettes SENB :

Pratiquement, les éprouvettes sont de forme prismatique à entaille latérale, d'une épaisseur qui varie entre 2 – 6 mm.

Les dimensions et la géométrie sont représentées sur la figure. (IV.3) :

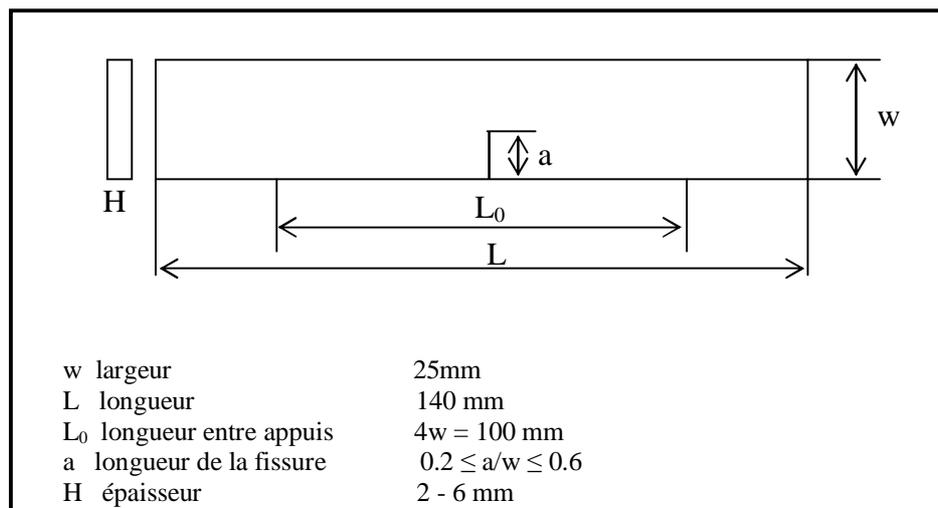


Fig. (IV.3) : Géométrie des éprouvettes SENB

La réalisation de l'entaille au sein de l'éprouvette est une opération très délicate, il est conseillé de l'exécuter au moyen d'une scie diamantée, puis de réaliser une fissure naturelle en tapant légèrement sur une lame de rasoir ou de la faire glisser dans le cas d'un composite très tenace. En revanche il est déconseillé de forcer la lame dans l'entaille en raison des contraintes résiduelles qui peuvent être induites. La longueur de fissure ainsi faite doit avoir une longueur qui dépasse quatre fois le rayon du fond d'entaille initiale. [5]

Dans notre cas, les dimensions des éprouvettes sont indiquées sur la figure (IV.3). La réalisation de l'entaille est faite au moyen d'une scie métallique. La fissure naturelle est provoquée en glissant une lame de bistouri en fond de l'entaille, les mesures des longueurs de fissures ont été effectuées à l'aide d'un profil projecteur model PJ25 marque MITUTOYO (×10).

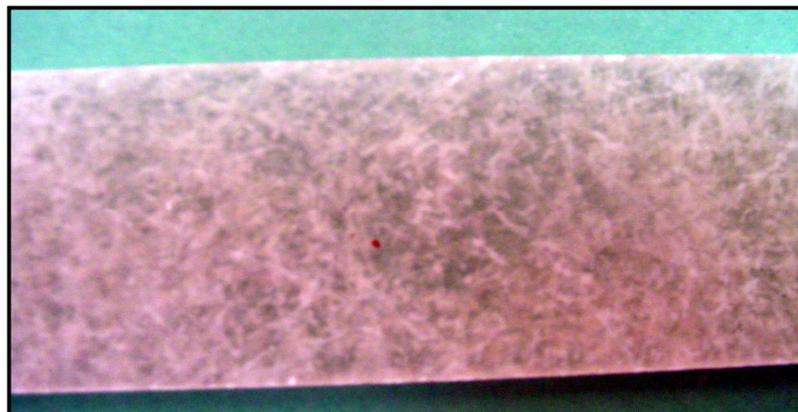
IV.4. DEFAUTS DE FABRICATION :

Les défauts observés après le moulage au contact peuvent avoir plusieurs origines. Connaître les types de défauts et leurs origines s'avère très important à connaître dans la mesure où des interventions à faible coût peuvent s'opérer avec succès pour réduire ces défauts en nombre, voire même les éliminer dans certains cas. Les défauts de moulage au contact peuvent avoir plusieurs origines possibles liées :

- A la matière
- A un mauvais paramétrage du procès
- Le travail se fait manuellement (le taux de la résine varié sur la superficie de la pièce).
- La polymérisation de la résine varie d'un point à un autre.
- La surface de la pièce n'est pas uniforme. Fig. (IV.4)
- Les bulles d'air. Figure (IV.5)
- Epaisseur variable d'une pièce à une autre, d'une partie à une autre. Ce qui contribue fortement à augmenter la dispersion des résultats des essais sur les composites. Figure (IV.6)



(a)



(b)

Fig.(IV.4) : Surface supérieure du composite moulé au contact

a- Image microscopique ($\times 120$)

b- Image macroscopique

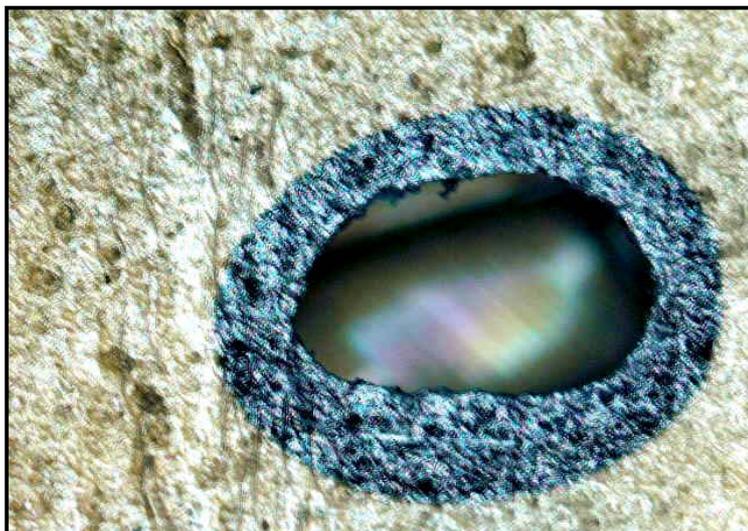


Fig. (IV.5) : bulles d'air.
Image microscopique ($\times 50$)

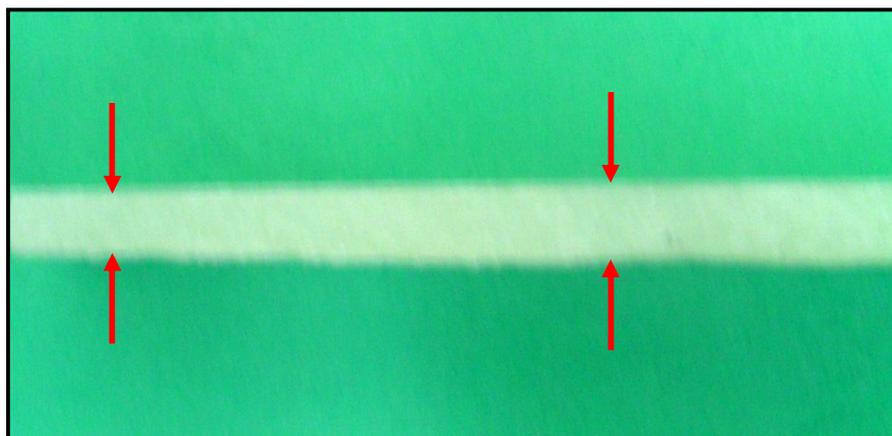


Fig. (IV.6) : Différence des épaisseurs
Image macroscopique

V. CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU COMPOSITE

V.1. TAUX DE FIBRES :

V.1.1. Opération de calcination :

Dans le but de déterminer le pourcentage en poids de fibres de verre dans les matériaux composites étudiés, moulés par contact, plusieurs échantillons de section (1×1) cm² sont découpés des éprouvettes après les essais de caractérisation mécanique (traction). Ils ont été soumis à l'opération de calcination.

V.1.2. Appareillages utilisés :

- four.
- balance électronique de précision (0.001 g).
- creuset.
- Dissicateur et célicagel.

V.1.3. Calcination :

L'échantillon est pesé avec une précision de 0.001g et placé ensuite dans un creuset préalablement pesé. L'ensemble est placé dans un four à une température de 625°C jusqu'à ce que la résine soit entièrement calcinée (2 heures). Le creuset est mis ensuite dans un dissicateur jusqu'à refroidissement complet. Finalement, l'ensemble creuset et cendres sont pesés.

V.1.4. Mesure du taux de verre : [7]

Le taux de fibres de verre calculé en poids est déduit de celui de la résine. Ce dernier est donné par la formule suivante :

$$M_f = \frac{B}{A} \times 100 \% \quad \text{avec } M_m = 100 - M_f \quad \text{V.1}$$

Ou :

$$V_f = \frac{M_f \cdot \rho_m}{\rho_f - M_f \cdot (\rho_f - \rho_m)} \times 100 \% \quad \text{avec } V_m = 100 - V_f \quad \text{V.2}$$

A : poids de l'échantillon en (g) avant calcination.

B : poids de l'échantillon en (g) après calcination (poids de fibre de verre).

C : poids de la résine calciné (g).

M_f et M_m : fraction massique de la fibre et de la matrice en (%).

V_f et V_m : fraction volumique de la fibre et de la matrice en (%).

ρ_m , ρ_f : la masse volumique de la matrice et de la fibre (g/cm³)

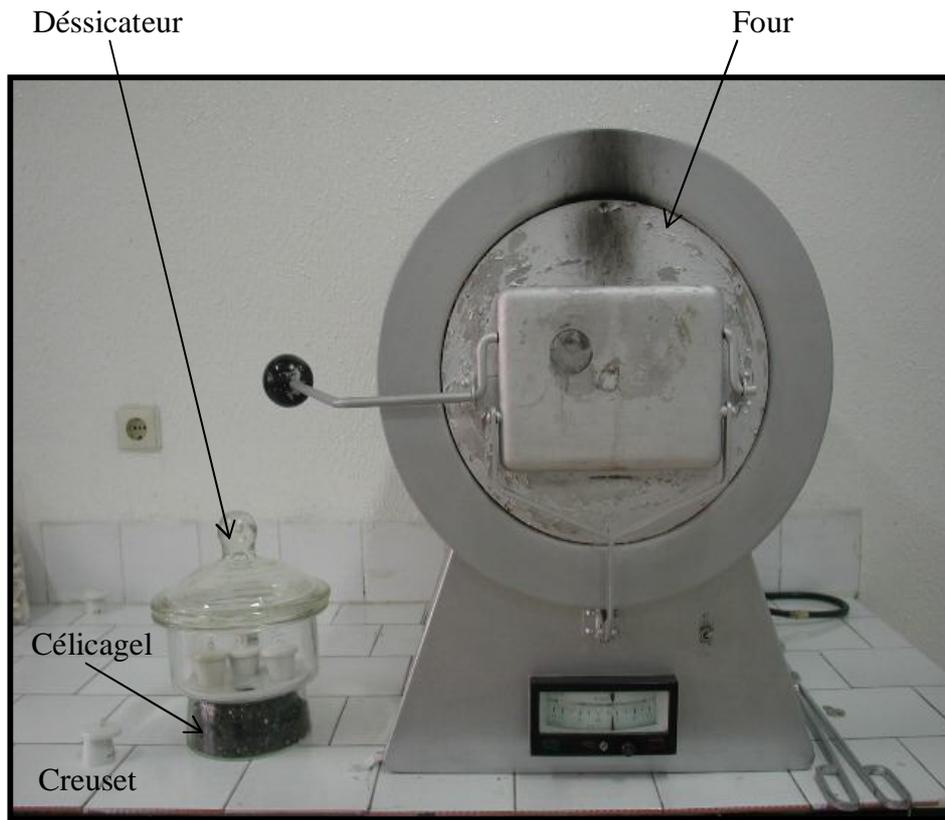


Fig. (V.1) : Appareillages utilisé pour la calcination

V.1.5. Résultats de mesure du taux de verre :

Les résultats enregistrés ont été obtenus sur les éprouvettes testées en traction des stratifiés fabriqués par le procédé de moulage par contact sont :

- **Tableau V.1 :** Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : trois (3)

Mode de stratification : 300 – 300 – 300

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.534	0.092	0.442	17.22	9.08
2	0.485	0.104	0.381	21.44	11.58
3	0.492	0.085	0.407	17.27	9.11
4	0.477	0.092	0.385	19.28	10.28
5	0.441	0.097	0.344	21.99	11.92
Moyenne				19.44	10.39
Ecart type				2.24	1.33
Coef _ varia %				11.54	12.83

- **Tableau V.2 :** Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : trois (3)

Mode de stratification : 300 – 450 – 300

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.337	0.127	0.210	37.68	22.49
2	0.299	0.113	0.186	37.79	22.57
3	0.323	0.120	0.203	37.15	22.10
4	0.283	0.108	0.175	38.16	22.85
5	0.326	0.123	0.203	37.73	22.53
Moyenne				37.70	22.51
Ecart type				0.36	0.26
Coef _ varia %				0.95	1.19

- **Tableau V.3** : Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : trois (3)

Mode de stratification : 450 – 450 – 450

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.470	0.134	0.336	28.51	16.06
2	0.537	0.162	0.375	30.16	17.17
3	0.493	0.140	0.353	28.39	15.99
4	0.498	0.155	0.343	31.12	17.82
5	0.440	0.133	0.307	30.22	17.21
Moyenne				29.68	16.85
Ecart type				1.18	0.79
Coef _ varia %				3.99	4.72

- **Tableau V.4** : Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : cinq (5)

Mode de stratification : 300 – 450 – 600 – 450 – 300

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.570	0.231	0.339	40.52	24.64
2	0.573	0.225	0.348	39.26	23.68
3	0.624	0.233	0.391	37.33	22.24
4	0.631	0.243	0.388	38.51	23.11
5	0.621	0.241	0.380	38.80	23.33
Moyenne				38.88	23.40
Ecart type				1.15	0.87
Coef _ varia %				2.98	3.73

- **Tableau V.5** : Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : trois (3)

Mode de stratification : 450 – 450 – 450

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.536	0.137	0.399	25.55	14.14
2	0.678	0.149	0.529	21.97	11.90
3	0.587	0.145	0.442	24.70	13.60
4	0.553	0.132	0.421	23.86	13.08
5	0.602	0.128	0.474	21.26	11.47
Moyenne				23.46	12.84
Ecart type				1.81	1.12
Coef _ varia %				7.71	8.77

- **Tableau V.6** : Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : trois (3)

Mode de stratification : 450 – tissu – 450

N°	A (g)	B (g)	C (g)	M_f (%)	V_f (%)
1	0.389	0.117	0.272	30.07	17.11
2	0.363	0.115	0.248	31.68	18.20
3	0.382	0.114	0.268	29.84	16.95
4	0.382	0.117	0.265	30.62	17.48
5	0.378	0.110	0.268	29.10	16.45
Moyenne				30.26	17.24
Ecart type				0.96	0.65
Coef _ varia %				3.17	3.78

- **Tableau V.7 : Récapitulatif des résultats**

Plaque	Taux de fibre Théori- %	Taux de fibre Expéri- %	Ecart type	Coef-varia %	Erreur %
300 300 300	20	19.44	0.39	2.00	2.80
300 450 300	50	37.70	8.69	19.83	24.60
450 450 450	30	29.68	0.22	0.75	1.06
300 450 600 450 300	40	38.88	0.79	2.00	2.80
450 450 450	20	23.46	2.44	11.26	17.30
450 tissu 450	30	30.26	0.18	0.61	0.86

Après l'opération de calcination, on trouve une faible différence entre le taux de fibres de verre dans les stratifiés moulés par contact au taux propose avant le moulage. Cela peut être du à l'hétérogénéité de la plaque et à la mise en œuvre manuelle du matériau.

Enfin, on peut dire qu'on a obtenu l'objectif voulu (la variation de taux de fibre de verre dans les différentes plaques).

V.2. CARACTERISTIQUES STATIQUES EN TRACTION :

Dans cette partie, nous allons décrire la procédure expérimentale utilisée pour la réalisation des éprouvettes de traction correspondante aux matériaux composites étudiés. Une analyse des résultats de mesures de caractérisation mécanique (contrainte à la rupture, module élastique) par traction directe sera présentée.

V.2.1. Essai de traction :

Les essais ont été effectués au niveau du laboratoire d'essai mécanique de l'Entreprise des Réalisations industrielles de SERIANA (ERIS, Batna) sur une machine universelle à système hydraulique, la figure (V.2) montre une vue générale de la machine d'essai.

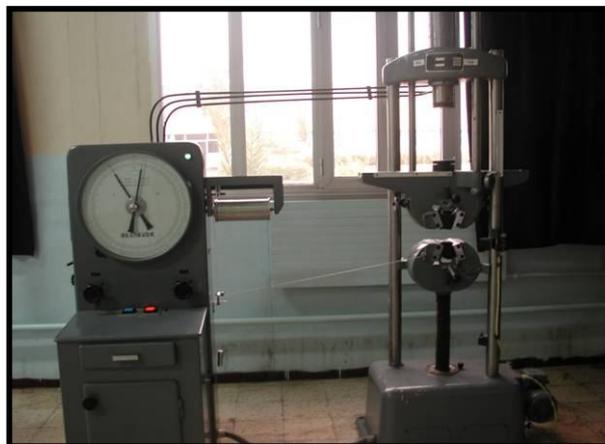


Fig. (V.2) : Vue générale de la machine d'essai de traction.

Les éprouvettes à tester sont maintenues entre deux mors ou deux mâchoires figure (V.3). Les essais de traction sont faits entre la traverse supérieure fixe sur laquelle est monté le capteur de force et la traverse mobile à laquelle on rend solidaire la mâchoire inférieure.

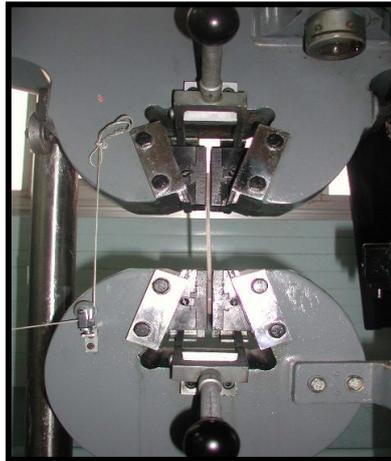


Fig. (V.3) : Eprouvettes a testé placé entre les deux mors

Les résultats du test s'inscrivent sur un enregistreur graphique dont le modèle de base permet l'enregistrement de la charge (mouvement de plume) en fonction de la position de la traverse ou en fonction de défilement du papier millimètre.

La contrainte à rupture est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{rup} = \frac{P}{S} \quad \text{V.3}$$

P : la force appliquée à l'éprouvette au moment de la rupture.

S : la section de l'éprouvette.

La déformation à rupture est donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon_{rup} = \frac{L_x}{R \times L_0} \quad \text{V.4}$$

L_x : est le déplacement enregistré par le plume de l'enregistreur.

R : est le rapport entre la vitesse du papier et celle de la machine ($R = V_p / V_m$).

L_0 : est la longueur de la partie calibrée de l'éprouvette.

Le module longitudinal élastique est déterminé à partir de la partie linéaire de la courbe charge déplacement suivant loi de Hooke.

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad \text{V.5}$$

V.3. PRESENTATION ET DISCUSSIONS DES RESULTATS :

V.3.1. Les courbes :

Les figures (V.4 et V.5) montrent des exemples de courbe charge- déplacement obtenue par traction sur des éprouvettes prélevées d'un stratifié moulé par contact avec un taux de fibre de verre.

L'allure de ces courbes est presque la même pour les autres taux de fibres.

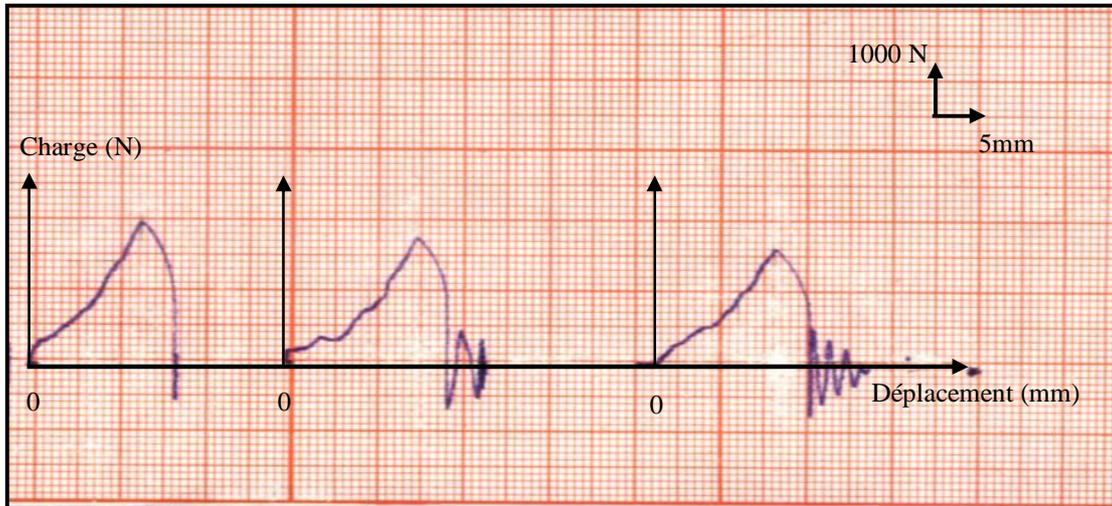


Fig. (V.4) : Courbe charge déplacement en traction.
Résine non renforcé

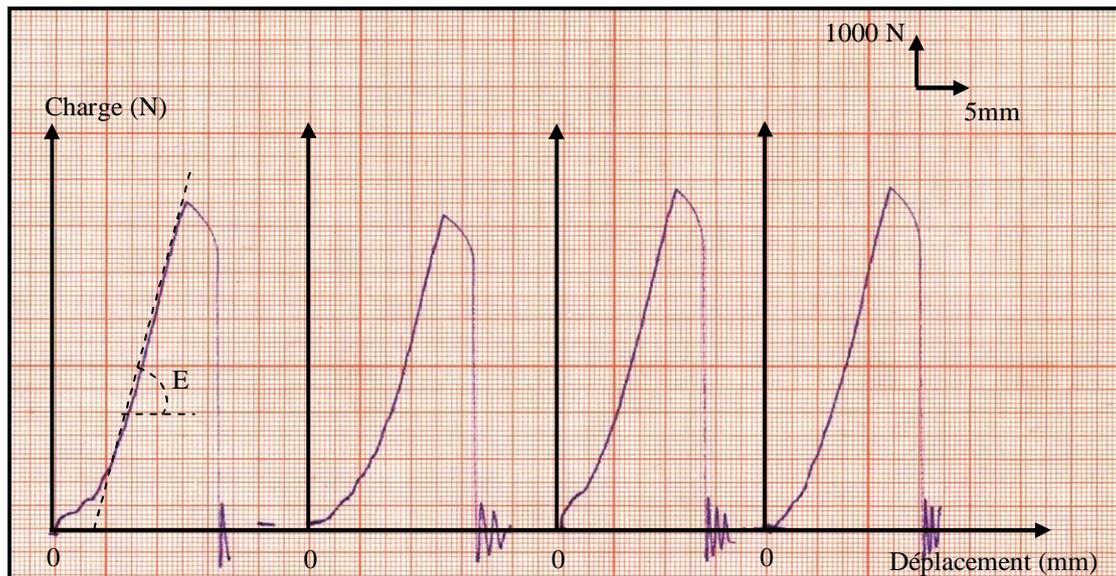


Fig. (V.5) : Courbe charge déplacement obtenue sur éprouvette
avec un taux de fibres $M_f = (38.88 \pm 1.15) \%$.

L'allure des courbes charge – déplacement montre une partie linéaire qui représente le comportement élastique du matériau, dans cette partie la charge augmente considérablement pour de faibles déplacements. Contrairement à la seconde partie où les déformations sont importantes de faibles charges.

Les résultats de mesure de la contrainte à la rupture, de la déformation à la rupture et du module de Young sont rassemblés dans les tableaux suivants :

- **Tableau V.8** : Caractérisation mécaniques de la résine non renforcé en traction.

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
I S1	12.73	3.35	1100	1.5	37.53	2.1	1279.09
I S2	12.57	3.67	1400	1.75	30.34	2.5	1083.75
I S3	12.72	3.71	900	1.5	40.26	2.1	1514.28
I S4	12.80	3.73	1800	1.375	37.70	1.9	1221.66
I S5	12.24	3.50	1700	1.75	39.68	2.5	1245.33
Moyenne					37.10	2.22	1268.82
Ecart type					3.96	0.26	156.03
Coef _ varia %					10.68	12.08	12.29

- **Tableau V.9** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (19.44 \pm 2.24) \%$.

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
I T1	12.26	2.84	3000	3.00	86.15	4.28	1608.27
I T2	12.17	2.40	2800	3.50	-	-	-
I T3	12.31	3.43	2900	3.25	68.68	4.64	1657.98
I T4	11.00	3.56	3100	3.25	79.16	4.64	1608.78
I T5	12.50	3.25	3000	3.00	81.22	4.28	1550.57
Moyenne					78.80	4.46	1606.40
Ecart type					7.35	0.18	43.91
Coef _ varia %					9.33	4.03	2.73

- **Tableau V.10** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (37.70 \pm 0.36) \%$.

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
II T1	12.28	1.87	3900	3.50	169.86	5.00	3048.78
II T2	12.45	1.83	3900	4.00	171.20	5.71	2827.04
II T3	12.40	1.93	3400	3.50	142.08	5.00	2632.67
II T4	12.35	1.82	3050	3.25	135.73	4.64	2803.73
II T5	12.36	1.80	3300	3.25	148.38	4.64	2675.35
Moyenne					153.45	4.99	2797.51
Ecart type					16.22	0.43	162.89
Coef _ varia %					10.57	8.74	5.82

- **Tableau V.11** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (29.68 \pm 1.18) \%$.

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
III T1	12.36	3.22	4100	3.375	103.04	4.82	2069.68
III T2	12.32	3.15	5000	4.00	128.86	5.71	2164.94
III T3	12.35	2.89	4800	3.75	134.49	5.35	2196.69
III T4	12.27	2.94	3800	3.75	105.35	5.35	2134.73
III T5	12.34	2.86	4300	4.75	121.84	6.78	2115.80
Moyenne					118.71	5.60	2136.36
Ecart type					14.01	0.73	48.29
Coef _ varia %					11.80	13.05	2.26

- **Tableau V.12** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (38.88 \pm 1.15) \%$.

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
IV T1	12.26	3.30	7700	4.75	-	-	-
IV T2	12.17	3.37	7200	4.75	-	-	-
IV T3	12.04	3.56	6800	4.50	158.65	6.42	2830.92
IV T4	12.29	3.31	7300	4.50	179.49	6.42	2891.56
IV T5	12.25	3.53	7300	4.50	168.82	6.42	2806.04
Moyenne					168.98	6.42	2842.84
Ecart type					10.42	0	43.98
Coef _ varia %					6.16	0	1.54

- **Tableau V.13** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (23.46 \pm 1.81) \%$

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
V T1	12.42	3.61	3700	3.25	-	-	-
V T2	12.49	4.67	4600	3.25	78.87	4.64	1632.37
V T3	12.40	4.05	4400	3.25	87.61	4.64	1672.64
V T4	12.35	3.76	4000	3.25	86.15	4.64	1608.15
V T5	12.31	4.17	4200	3.50	81.82	5.00	1636.46
Moyenne					83.61	4.73	1637.40
Ecart type					4.00	0.15	26.60
Coef _ varia %					4.79	3.29	1.62

- **Tableau V.14** : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (30.26 \pm 0.96) \%$

N°	B (mm)	H (mm)	Fr (N)	ΔL_r (mm)	σ_r (N/mm ²)	ϵ_r (%)	E (N/mm ²)
VI T1	12.01	2.69	3700	3.50	111.11	5.00	2806.04
VI T2	12.37	2.56	4400	3.75	138.97	5.35	2476.31
VI T3	11.07	2.30	3600	3.25	-	-	-
VI T4	12.28	2.45	3500	3.00	119.68	4.28	2559.84
VI T5	12.46	2.51	4500	3.75	143.90	5.35	2462.42
Moyenne					128.41	4.99	2576.15
Ecart type					15.56	0.43	159.18
Coef _ varia %					12.12	8.74	6.17

V.3.3. Discussions des résultats :

D'après les résultats des tableaux précédant nous allons étudier l'influence du taux de fibres de verre sur les caractéristiques mécaniques obtenues par traction pour les stratifiés moulés.

V3.3.1. Contrainte à la rupture :

On observe d'après la courbe contrainte - taux de fibre, que l'augmentation du taux de fibres de verre dans le stratifié, entraîne une augmentation de la résistance à la rupture. Ces résultats sont illustrés sur les deux figures (V.6), (V.7).

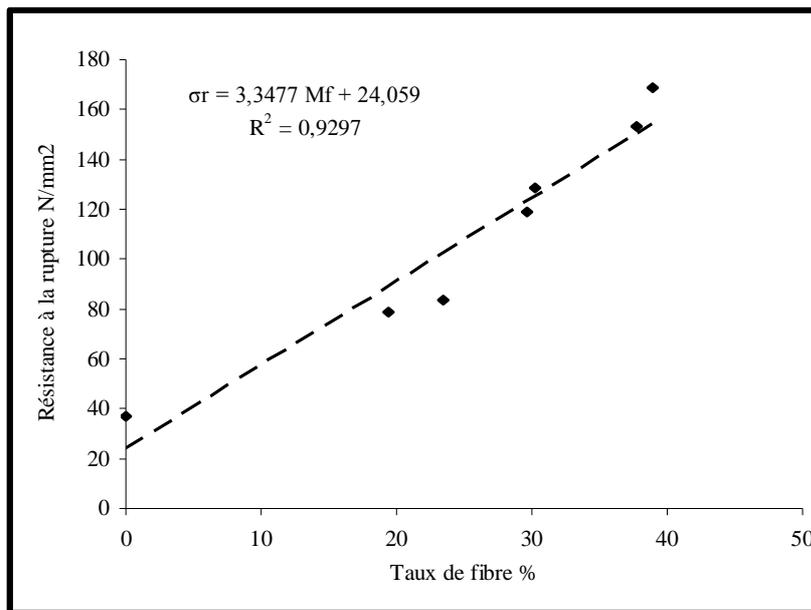


Fig. (V.6) : Variation de la résistance à la rupture en fonction du taux de fibre massique

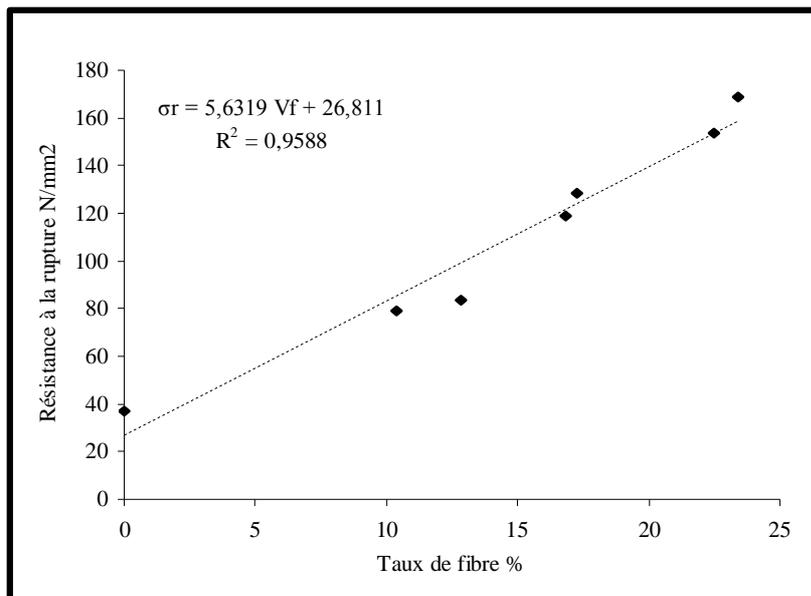


Fig. (V.7) : Variation de la résistance à la rupture en fonction du taux de fibre volumique

R : coefficient de corrélation.

La prévision de la résistance à la rupture en fonction de V_f peut être décrite par l'équation expérimentale suivante :

$$\sigma_r = 5.6319V_f + 26.811 \quad \text{V.6}$$

Afin de comparer les valeurs mesurées par l'équation expérimentale avec celles estimées par la loi théorique suivante : [7]

$$\sigma_r = \frac{3}{8} \sigma_{fr} V_f + (1 - V_f) \sigma_{mr} \quad \text{V.7}$$

La figure si dessous montre la prévision entre la loi théorique et l'équation expérimentale en fonction de taux de fibre V_f .

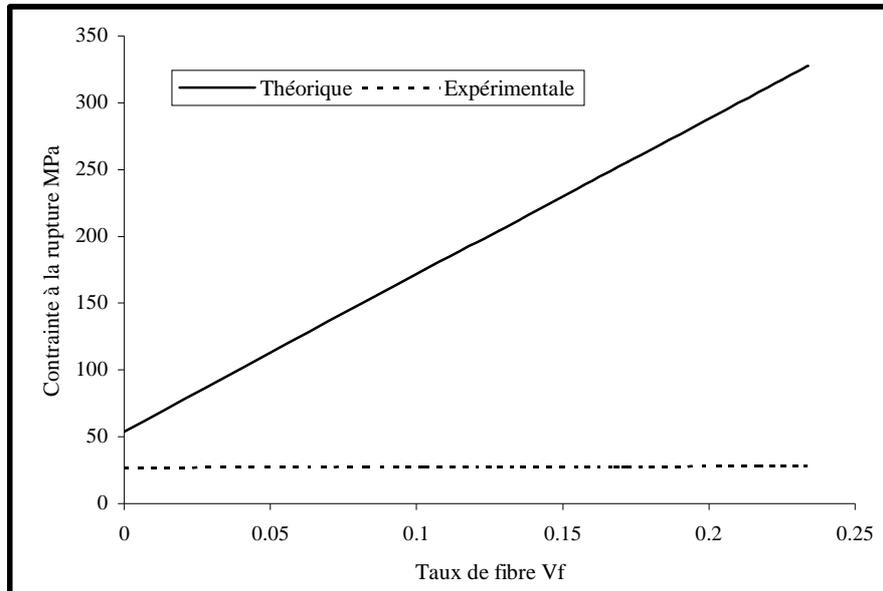


Fig. (V.8) : Prévision Théorique et Expérimentale

A partir de la figure (V.8), on observe les valeurs mesurées expérimentalement de la contrainte à la rupture sont nettement inférieures à celles déterminées par la formule théorique à cause des condition suivante :

- Défaut de fabrication
- Les procédures de découpe des éprouvettes.

V.3.3.2. Module élastique :

La figure (V.9) montre la variation entre le module élastique et le taux de fibres de verre.

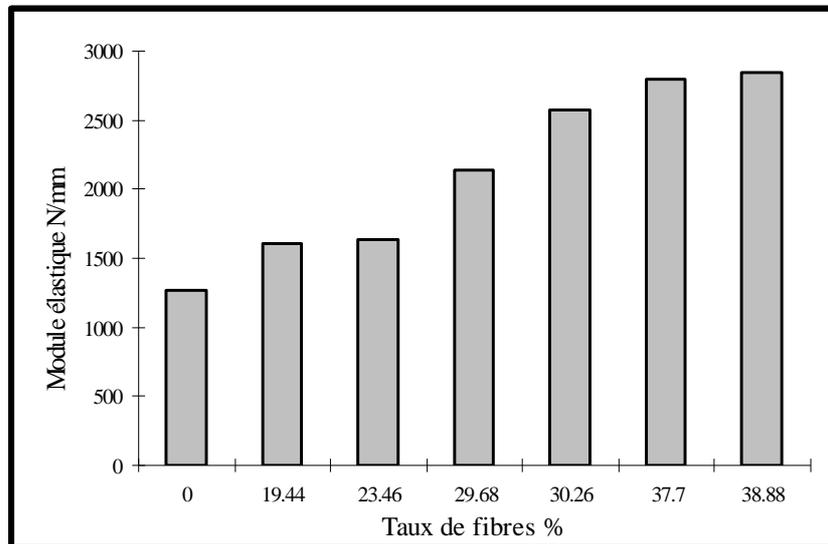


Fig. (V.9): Variation du module élastique en fonction du taux de fibre massique

L'augmentation du taux de fibres de verre dans les stratifiés moulés, entraîne une amélioration du module élastique.

VII. ETUDE FRACTOGRAPHIQUE DE LA RUPTURE

Dans cette partie nous allons essayer de mettre en évidence les types d'endommagement résultant des essais de traction sur éprouvettes entaillées et non entaillées. Sous ces deux aspects, microscopique et macroscopique la rupture sera étudiée en tenant compte de la morphologie des différents types de fissuration rencontrés, de leurs répartition ainsi que leurs orientations par rapport à la direction principale des éprouvettes et la direction de l'application de la charge. Nous essayerons par la même occasion de monter le scénario de la rupture pour distinguer les phases initiales et avancées de la rupture. Pour ce faire nous nous baserons sur les observations visuelles et microscopiques des ruines.

dans le cas des éprouvettes des essais de traction, la figure (VII.1) représentent :

- la fissuration transverse de la résine avant la rupture finale
- la rupture des fibre, et puis la rupture finale en 2 morceaux.

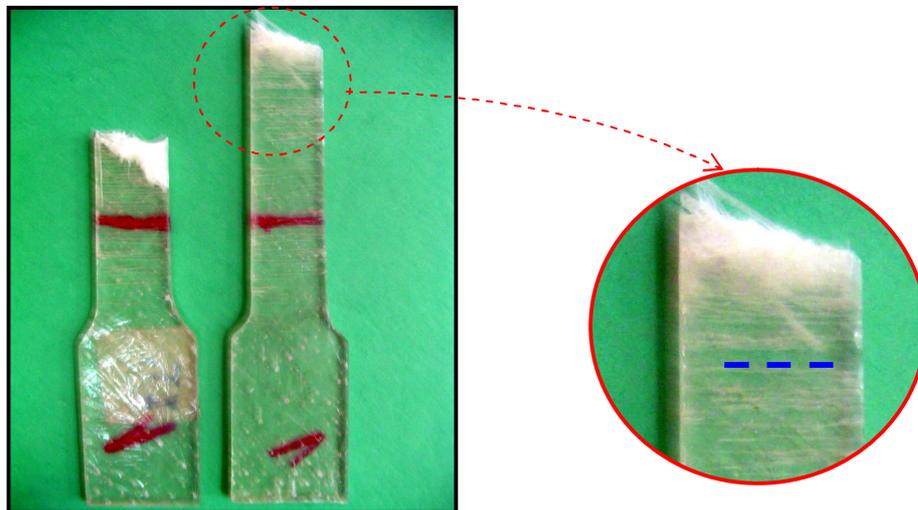


Fig. (VII.1) : Fissuration transverse image macroscopique

La figure (VII.2) montre la fissure qu'est localisée sur la surface des éprouvettes elle représente le premier mode de la rupture.



Fig. (VII.2) : Fissuration transverse image microscopique ($\times 100$)

Photo (VII.3) montre la rupture en cisaillement de l'éprouvette sur les morts.

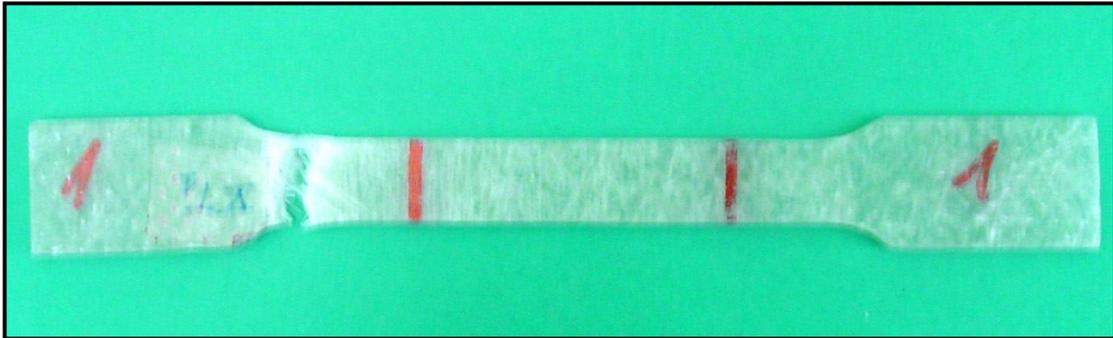


Fig. (VII.3) : Rupture par cisaillement en traction
Image macroscopique

Les photos (VII.4,5,6) montrent le chemin de la propagation de la fissure derrière la fissure initiale. Il est à noter que ces propagations ne débutent pas toujours du fond de la fissure initiale, ce qui est contradictoire à ce que a été montré théoriquement dans la bibliographie. (à cause du concentration de contrainte). Ceci est dû à notre avis à la difficulté d'usiner la fissure initiale et surtout le fond de fissure. Ceci est clairement observé dans les figures (VII.7, VII.8)

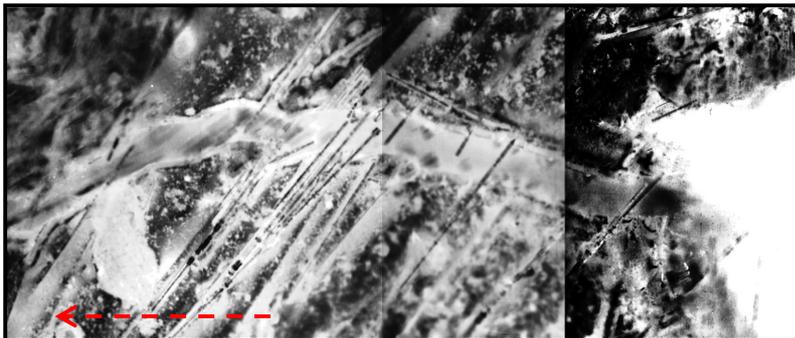


Fig. (VII.4) : Propagation or le fond de la fissure.
Photo microscopique ($\times 120$)

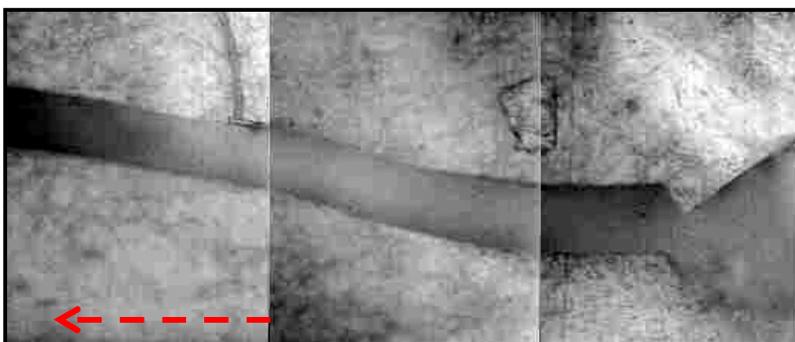


Fig. (VII.5) : Propagation de la fissure initiale
Photo microscopique ($\times 120$)



Fig. (VII.6) : Déchirures des éprouvettes de SENB
Photo macroscopique

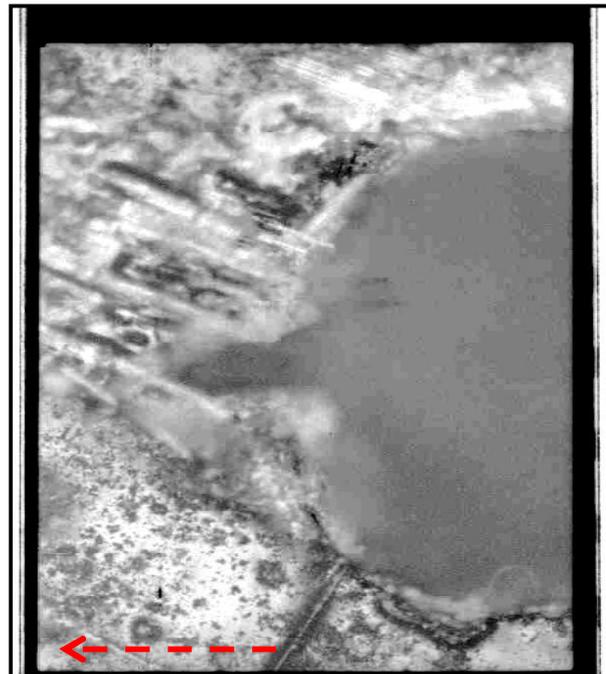


Fig. (VII.7) : Vue de la fissure initiale avant l'essai.
Photo microscopique ($\times 120$)



Fig. (VII.8) : Vue en plan du fond de fissure initiale avant l'essai.
Photo microscopique ($\times 120$)

D'autre part, cette mécanisme ne permet pas de bien contrôler le voisinage de la fissure initiale. Cette donnée est éventuellement engendrée par d'autres déformations de fabrication et de sciage.

Les photos (VII.9, 10) montrent que la déchirure a été propagée en plusieurs directions (propagation dans le volume).

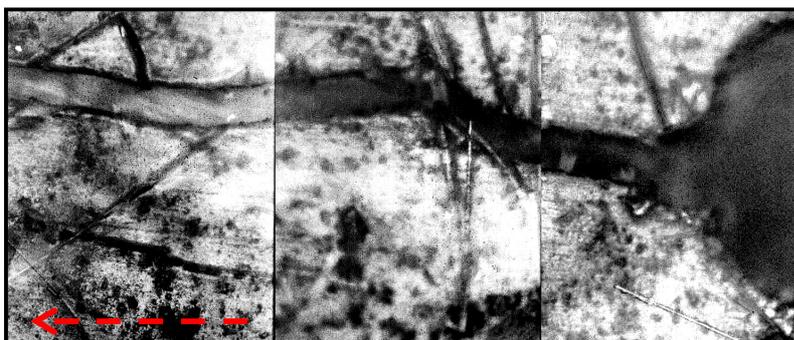


Fig. (VII.9) : Propagation de la fissure en plusieurs directions
Photo microscopique ($\times 120$)

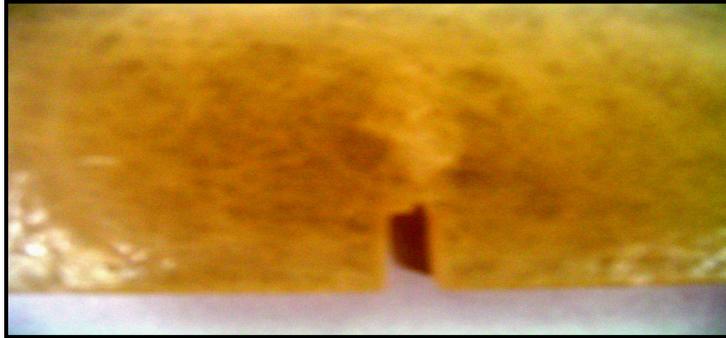


Fig. (VII.10) : Propagation de la fissure en plusieurs directions
Photo macroscopique

La photo (VII.11) montre que la rupture de la fissure a été produite en délaminage.

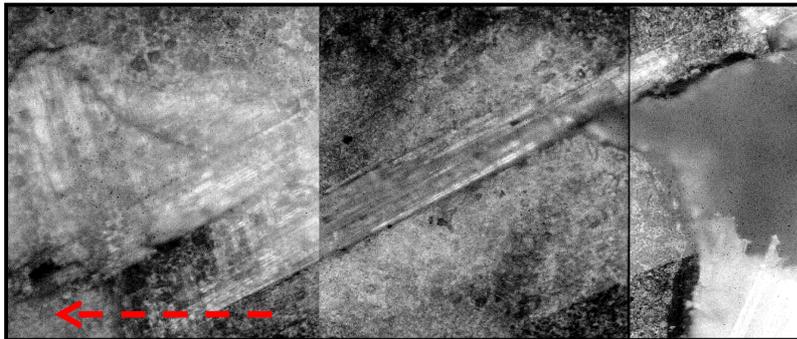


Fig. (VII.11) : Propagation de la fissure par délaminage
Photo microscopique ($\times 120$)

La photo (VII.12) montre que la déchirure présente des déchaussements et des décohésions de fibres de verre.

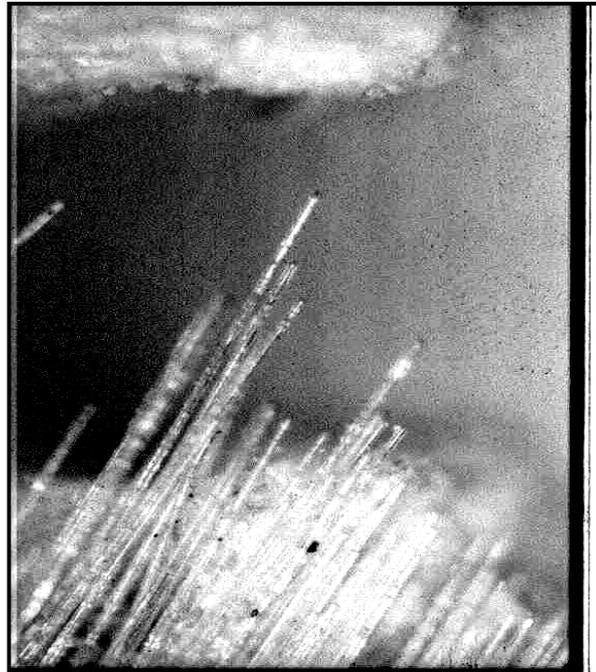


Fig. (VII.12) : Déchaussement et décohésion de fibre de verre cas des éprouvettes SENB ($\times 120$)

CONCLUSION GENERALE

Le but de cette étude est d'analyser un cas de rupture des matériaux composites, c'est le mode le plus dangereux (mode I).

Ce travail nous a permis de dégager les points suivants :

Des informations théoriques et pratiques qui concernent les matériaux composites, leur fabrication et leur utilisation dans les conceptions des pièces mécaniques.

L'examen microscopique et macroscopique des plaques moulé par contact a révélé des défauts et des problèmes liés au processus de fabrication :

- présence de porosité importante.
- Différence d'épaisseur d'un endroit à un autre du moule.
- Formation du bulle d'air : siège de concentration de contrainte.

Nous avons mené une expérimentation dans laquelle nous avons mesuré :

- 1- les caractéristiques mécaniques en traction du composites en trouvent :
 - l'augmentation du taux de fibres de verre dans les stratifiés moulés, entraîne une amélioration du module de Young.
 - L'augmentation du taux de fibres de verre dans les stratifiés, entraîne une augmentation de la résistance à la rupture.
- 2- La détermination expérimentale du facteur d'intensité de contrainte pour les différents taux de fibres de verre a montré que :
 - l'amorçage de l'endommagement est caractérisé par une valeur K_{am} . Indépendante de la longueur d'entaille initiale.
 - L'utilisation des courbes K_R permet de caractériser le déclenchement brutal de la rupture par une valeur K_{ins} . Indépendante de a/W .
 - La ténacité augmente avec la teneur en fibre de verre.
- 3- l'analyse fractographique ainsi que les observations visuelles et microscopiques des ruines ont mis en évidence les types d'endommagement suivants :
 - Formation des fissures transverses en traction
 - Le chemin de la fissuration derrière la fissure initial est tortueux
 - Déchaussement et décohésion de fibres de verre
 - Délaminage du composite localisé entre les couches du renfort verre.

Comme perspectives futures, nous recommandons une analyse approfondie du procédé de fabrication pour réduire et ou éliminer les défauts émanant.