



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université MOHAMED BOUDIAF-M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
Département Génie mécanique



Mémoire de Fin d'étude

Présenté par

Madani GRINE

Et

Mustapha GHEBOULI

Pour l'obtention du diplôme

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Constructions mécanique

Thème

Étude de l'effet de l'orientation des fibres sur la rupture des bétons polymères (BP)

Soutenu le : 26-06-2019

Devant le Jury composé de :

Noms et Prénoms	Grades	Qualités	Université
M. Nadir Douib	MAA	Président	Univ.M. BOUDIAF-M'sila
M. Mansour ROKBI	MCA	Encadreur	Univ.M. BOUDIAF-M'sila
M ^{me} Houria BENKHERBECHE	MCB	Co-Encadreur	Univ.M. BOUDIAF-M'sila
M ^{me} .Moussaoui Nafissa	MAA	Examineur	Univ.M. BOUDIAF-M'sila

Année Universitaire 2018 /2019

Remerciements

On souhaite remercier les personnes, sans eux cette étude ne serait pas, en commençant par M. Mansour ROKBI, notre encadreur de ce mémoire, pour sa disponibilité et son aide précieuse et éclairante sur un domaine que nous sommes loin de maîtriser. Outre ses recadrages lorsque on s'égarait, sa contribution, ses nombreux conseils, son écoute et son ouverture d'esprit sont incontestables. On remercie également Dr H. BENKHERBACHE, notre Co-encadreur pour son aide à l'élaboration de ce travail

On remercie particulièrement à remercier le président de ce jury, en la personne Dr Nadir Douib qui nous a fait l'honneur de présider le jury de mémoire.

On tient à remercier Dr N moussaoui enseignante à l'université de Mohamed BOUDIAF-M'sila, qui a bien voulu faire partie du jury.

On exprime notre profonde gratitude à H. ZAGGANE maître de conférence à l'université de Mohamed BOUDIAF-M'sila, pour sa disponibilité et son aide précieuse et éclairante sur son orientation en cour de la mémoire.

On exprime notre profonde gratitude à H. OSMANI Professeur à l'université Ferhat ABBAS Sétif, de nous avoir accueilli au Laboratoire des matériaux non métalliques de l'université de Sétif et pour ses conseils précieux.

Nos remerciements vont également en direction du staff technique et administratif du Hall technologique en particulier celui du laboratoire Moulage.

On remercie tout le staff administratif et enseignants du département Génie Mécanique de l'université Mohamed BOUDIAF-M'SILA.

ملخص

في الآونة الأخيرة وفي ظل الحاجة لإيجاد خرسانة مبلورة لاستبدال الخرسانة العادية جزئيا أو كليا. وهذا باستعمال الياف نباتية او حيوانية (الياف طبيعية) لتحسين الخصائص الميكانيكية والتقليل من كلفة الإنتاج.

يتمحور عمل هذه المذكرة في تحليل سلوكيات الانكسار والخصائص الميكانيكية مثل تمرکز وانتشار التشققات لعينات من نوع (سي تي) من الخرسانة المبلورة المعززة بطبقات الياف الجوت الموضوعة بزوايا مختلفة وموجهة (30°-45°-55°-60° و90°). تمت دراسة بديية وانتشار منطقة التشققات لهذه العينات والتي تحتوي على تشققات بدائي (ثلمة) بأبعاد مدروسة مسبقا بتقنيتين:

تقنية الترابط الرقمي والصور الرقمية.

تقنية تغيير نمو التشقق (الكراك).

الدراسة بينت ان قيم الانتشار الميكانيكي (التشققات) وقيم تغير الشق بالنسبة لتغير الشد كانت قيم مقبولة وتقريبا متوازنة ومتقاربة والنتيجة نفسها كانت لعامل شد الاجهاد ونسبة طاقة الاسترداد بالنسبة لزيادة الشق (الكراك).

Résumé

La nécessité de l'emploi de nouveaux matériaux à hautes performances, en remplacement totale ou partielle du béton classique dans le domaine des travaux publics est de plus en plus pressante, les bétons polymères avec renforts extérieurs à base de fibre végétales, considérés comme matériaux composites stratifiés, pourraient répondre à ce besoin tant économique et technique. Dans cette thématique nous avons travaillé avec un béton polymère renforcé avec des fibres de Jute à différentes orientations (90°, 60°, 55°, 45° et 30°), afin d'étudier l'effet de l'orientations de ces fibres sur les paramètres de rupture lors d'une traction, l'approche dites GRIFFITH a été adoptées, des éprouvettes de CT ont confectionnées à cet effet. Deux méthodes ont été utilisées, la technique de Corrélacion d'Image Digitale (CID) et La Méthode du Changement de la Complaisance de l'éprouvette avec l'accroissement de la fissure (MCC), pour suivre les séquences de l'accroissement de fissure et d'en calculer les paramètres de rupture, le Facteur d'intensité des contraintes K_r , le taux de restitution d'énergie de Griffith G_r et l'accroissement de la fissure Δa , le renforcement des béton polymères par les fibres végétales accroît leur ténacité, surtout après les premières craquements (émoussements), il semble que l'orientation des fibres végétales n'as pas d'effet sur la ténacité.

Abstract

The need for the use of new high-performance materials, in total or partial replacement of conventional concrete in the field of public works is more and more pressing, polymer concretes with external reinforcements based on plant fibers, considered composite materials laminates, could meet this economic and technical need. In this theme we worked with a reinforced concrete polymer with Jute fibers at different orientations (90°, 60°, 55°, 45° and 30°), to study the effect of the orientations of these fibers on the parameters of rupture during a traction, the so-called GRIFFITH approach was adopted, CT specimens were made for this purpose. Two methods were used, the Digital Image Correlation Technique (CID) and the Completeness Change Method of the specimen with crack growth (MCC), to follow the sequences of crack growth. and to calculate the fracture parameters, the stress intensity factor K_r , the Griffith energy release rate G_r and the crack increase Δa . of 2060 N. It seems that CT90° and CT45° have better mechanical behavior when breaking compared to other test specimens.

Tables des matières

Liste des tableaux	i
Liste des figures	ii
Liste des indices	iv
Introduction générale.....	1

Chapitre I

MATÉRIAUX COMPOSITES

1.1	Définition.....	4
1.2	Constituant d'un matériau composite	4
1.2.1	La matrice	5
1.2.1.1	Matrices organiques.....	6
1.2.1.2	Matrices métalliques.....	7
1.2.1.3	Matrices céramiques	8
1.2.1.4	Le rôle de la matrice	8
1.2.2	Les renforts	8
1.2.3	Architecture des renforts	9
1.3	Architecture des matériaux composites.....	10
1.3.1	Composites sandwiches	10
1.3.2	Les Composites stratifiés.....	11
1.3.3	Désignation des stratifiés.....	13
1.4	Mise en œuvre des matériaux composites	15
1.4.1	Moulage au contact.....	16
1.4.2	Moulage par projection.....	17
1.4.3	Moulage par compression.....	17
1.4.4	Moulage sous vide	18
1.4.5	Moulage par transfert de résine (RTM- Resin Transfert Molding).....	18
1.4.6	Moulage en contenu.....	19
1.4.7	Bilan.....	20
1.5	Domaines d'application.....	21
1.6	Conclusion.....	21

Chapitre II

NOTIONS GENERALES SUR LES FIBRES VEGETALES

2.1	Introduction	24
2.2	Définition des fibres naturelles.....	24
2.3	Fibres végétales	26
2.3.1	Définition de la fibre végétale	26
2.3.2	Classification des fibres végétales	26
2.3.3	Les différents renforcements à base des fibres végétales	27
2.3.3.1	Le chanvre	27
2.3.3.2	Le lin.....	27
2.3.3.3	Le Coton	28
2.3.3.4	L'Abaca.....	28
2.3.3.5	Le Kenaf	28

2.3.3.6	Le Sisal	29
2.3.3.7	Le coco	29
2.3.3.8	Palmier dattier.....	30
2.3.3.9	Alfa	30
2.3.3.10	Le Jute	30
2.3.4	Structure de la fibre végétale	31
2.3.5	Propriétés usuelles des fibres végétales.....	32
2.3.5.1	Propriétés chimiques des fibres végétales	32
2.3.5.2	Propriétés Mécaniques des Fibres Végétales.....	33
2.3.5.3	Propriétés physiques des fibres végétales.....	33
2.3.5.4	Autres propriétés spéciales sur les fibres végétales.....	33
2.3.6	Etat de l'art sur les fibres de l'étude	33
2.4	Pourquoi la fibre de jute ?	33
2.4.1	Résistance de jute comme matériau de renfort pour le composite	34
2.4.2	Faiblesse du jute en tant que matériau de renfort pour composite	34
2.4.3	Utilisation de jute pour fabriquer des composites comme substitut du bois ..	34
2.5	Généralité sur les bétons polymères	36
2.5.1	Définition du béton polymère.....	36
2.5.2	La composition principale d'un béton polymère	36
2.5.3	Propriétés de béton polymère	37
2.5.4	Les différentes applications d'un béton polymère :.....	38
2.5.5	Avantages du Béton Polymère	38
2.6	Conclusion.....	39

Chapitre III

PRESENTATION DU CONCEPT DE LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

3.1	Notions de la mécanique de la rupture	41
3.2	Rupture des matériaux	41
3.2.1	La mécanique de l'endommagement	42
3.2.2	La mécanique de la rupture	42
3.2.3	Modes de rupture	42
3.3	Mécanique linéaire et non linéaire de la rupture	43
3.4	Théorie de la mécanique de la rupture	44
3.4.1	Approche de Griffith	44
3.4.1.1	Taux de restitution d'énergie.....	46
3.4.1.2	Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture.....	50
3.4.2	Approche énergétique.....	51
3.4.2.1	Facteur d'intensité de contrainte.....	51
3.4.2.2	Equivalence entre G_R et K_R	52
3.4.2.3	Paramètres de rupture des matériaux orthotropes.....	52

Chapitre IV

PARTIE EXPERIMENTALE

4.1	Matériaux utilisés	55
4.1.1	Résine	55
4.1.2	Silice	56
4.1.3	Fibres de jute	57
4.1.4	Le filler utilisé (marbre)	58
4.2	Techniques expérimentales	58

4.2.1	Choix des éprouvettes.....	58
4.2.2	Élaboration des plaques en Béton Polymère	59
4.2.3	Préparation et présentation des échantillons CT.....	59
	4.2.3.1 Phase de découpe en spécimen CT	59
	4.2.3.2 Phase de polissage	60
	4.2.3.3 Mesure et étiquetage des spécimens	60
	4.2.3.4 Réalisation du perçage.....	60
	4.2.3.5 L'entaille.....	60
	4.2.3.6 Réalisation des préfissures (precrack)	60
4.3	Essais mécaniques	63
4.4	Mesure de l'accroissement de fissure.....	64
4.4.1	Technique de Corrélation d'Image Digitale CID	64
	4.4.1.1 Préparation de l'éprouvette.....	64
	4.4.1.2 Acquisition des données	64
4.4.2	Méthode du Changement de la Complaisance (MCC).....	65

Chapitre V

RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1	Introduction	Erreur ! Signet non défini.
5.2	Reproductibilité des expériences	Erreur ! Signet non défini.
5.3	Analyse des courbes charge déplacement (P- δ)	Erreur ! Signet non défini.
5.3.1	Séquences du processus de rupture	Erreur ! Signet non défini.
	5.3.1.1 Séquences du processus de rupture des éprouvettes CT stratifiées... Signet non défini.	Erreur !
	5.3.1.2 Processus de rupture (CT 45°).....	Erreur ! Signet non défini.
5.4	Analyse des Courbes-R	73

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale	Erreur ! Signet non défini.
Références bibliographiques	76

LISTE DES TABLEAUX

N°	TITRES DES TABLEAUX	PAGES
Tableau I.1	Caractéristiques moyennes des matrices therm durcissables (TD) non renforcées.....	6
Tableau I.2	Principales différences entre matrices TP et TD.....	7
Tableau II.1	Composition chimique de quelques fibres végétales.....	32
Tableau II.2	Les propriétés usuelles des fibres végétales.....	33
Tableau II.3	Composition chimique de la fibre de jute.....	35
Tableau II.4	Caractéristiques de fibre de jute.....	36
Tableau II.5	Propriétés mécaniques des différents types de bétons de résine et du béton de Ciment.....	38
Tableau II.6	Quelques avantages et inconvénients des bétons polymères.....	39
Tableau IV.1	Principales caractéristiques physiques des fibres de jute.....	58
Tableau IV.2	Caractéristiques physiques du marbre.....	58
Tableau IV.3	Différentes stratifiées élaborées.....	58
Tableau IV.4	Configurations des matériaux stratifiés.....	62
Tableau V.1	La variation de la charge maximale durant le test.....	73
Tableau V.2	Niveaux de charges remarquables des stratifiés.....	77
Tableau V.3	Niveaux de charges remarquables des stratifiés 45°.....	79
Tableau V.4	Les résultats par la méthode MCC.....	81
Tableau V.5	Paramètres de rupture Kr et Gr.....	85

LISTE DES FIGURES

N°	TITRES DES FIGURES	PAGES
Figure I.1	Représentation d'un matériau composite.....	4
Figure I.2	Structures géométriques des composites.....	5
Figure I.3	Organigramme des différentes familles de matrice.....	5
Figure I.4	La classification des types de renforts.....	8
Figure I.5	Représentation d'un pli unidirectionnel : en zoom un toron et une fibre	9
Figure I.6	Différents assemblages de textures.....	10
Figure I.7	Structures Sandwichs.....	11
Figure I.8	Exemples de stratifiés.....	11
Figure I.9	Exemple d'empilement symétrique quasi-isotrope [-45/90/45/0] S.....	12
Figure I.10	Désignation d'un stratifié.....	13
Figure I.11	Convention de signe pour la désignation des stratifiés.....	13
Figure I.12	Technique de moulage.....	16
Figure I.13	Moulage en contact.....	17
Figure I.14	Méthode de projection simultanée.....	17
Figure I.15	Méthode de moulage par compression	18
Figure I.16	Méthode du moulage sous vide.....	18
Figure I.17	Principe du moulage par injection de résine.....	19
Figure I.18	Principe du moulage par injection de résine.....	20
Figure I.19	Principe du moulage par injection de résine.....	20
Figure I.20	Récapitulatif des principaux procédés de mise en forme des composites à fibres longues et matrices therm durcissables.....	20
Figure II.1	Classification des fibres naturelles.....	25
Figure II.2	La plante de chanvre et les fibres de chanvre.....	27
Figure II.3	La plante du lin et les fibres de lin.....	27
Figure II.4	Les fibres naturelles de coton.....	28
Figure II.5	La plante de l'abaca et les fibres de l'abaca.....	28
Figure II.6	La plante de Kenaf avec ses fibres.....	29
Figure II.7	La plante de Sisal avec ses fibres.....	29
Figure II.8	Les fibres naturelles de la plante du coco.....	29
Figure II.9	Les fibres d'alfa.....	30
Figure II.10	La plante de Jute avec ses fibres.....	30
Figure II.11	Structure du bois (observations multi échelles).....	31
Figure II.12	Structure de fibre de jute.....	35
Figure III.1	Modes de rupture.....	42
Figure III.2	Exemple de rupture fragile.....	43
Figure III.3	Exemple de rupture ductile.....	44
Figure III.4	Schéma d'un solide contenant une fissure elliptique « 2a ».....	45
Figure III.5	Propagation (a), déplacement (b) ou à force imposés (c).....	47
Figure III.6	Rupture d'un corps sous : a) charge imposé, b) déplacement imposée.....	47

Figure III.7	La variation de facteur d'intensité de contrainte.....	50
Figure III.8	Éprouvettes proposées par ASTM en mode I.....	51
Figure IV.1	Cycle de polymérisation de résine polyester (isophtalique).....	56
Figure IV.2	Silice.....	56
Figure IV.3	Fibres de jute coupées (Après préparation).....	57
Figure IV.4	Plaque de béton polymère : polyester /silice /marbre/jute.....	59
Figure IV.5	Découpe en spécimen CT.....	60
Figure IV.6	Illustration de l'entaille et la préfissure sur le spécimen CT.....	61
Figure IV.7	La machine du test de l'accroissement de fissure.....	63
Figure IV.8	a) dispositif de fixation, b) Essai de rupture sur les 'éprouvettes (CT).....	63
Figure IV.9	Principe de la MCC.....	66
Figure IV.10	Illustration de la MCC.....	67
Figure V.1	Reproductibilité des différents stratifiés étudiés.....	71
Figure V.2	Cas possibles d'emplacement du font de fissure dans les éprouvettes CT.....	72
Figure V.3	Représentation de la répartition des séquences caractérisant le processus de rupture des éprouvettes CT stratifiés.....	75
Figure V.4	Accroissement de fissure durant le chargement du stratifié.....	76
Figure V.5a	Représentation de la répartition des séquences caractérisant le processus de rupture (courbe (P- δ)).....	77
Figure V.5b	Représentation de la répartition des séquences caractérisant le processus de rupture (courbe (P-T)).....	78
Figure V.6	Évolution de la charge en fonction de l'accroissement de fissure méthode CID (Cas de CT 45).....	79
Figure V.7	Évolution de l'accroissement de la fissure en fonction du temps.....	80
Figure V.8	Évolution de la charge en fonction de l'accroissement de fissure méthode MCC.....	82
Figure V.9	Comparaison des résultats par les deux méthodes CID et MCC pour cette éprouvette (CT 45°).....	82
Figure V.10	Évolution de la charge en fonction de l'accroissement de la fissure des stratifiés CT (30°,45°,55°,60° et90°).....	83
Figure V.11	Évolution de la Courbe -R (Gr).....	84
Figure V.12	Évolution de la Courbe-R (Gr).....	84

LISTE DES INDICES

Notations

a	Longueur de fissure
a_c	Taille de défaut critique
a_n, a_{n-1}	Longueurs de la fissure à deux cycles successifs
δa	Incrément d'accroissement de la fissure
Δa	Propagation de la fissure
Δa_{rup}	Accroissement de fissure à P_{max}
A	Surface rompue
dA	Incrément d'accroissement de la fissure (fissure plane centrale)
B	Epaisseur de l'éprouvette (CT)
C	Complaisance
E	Module de Young
E'	Module de Young cas déformation plane
E_x	Module de Young dans la direction x
E_y	Module de Young dans la direction y
f_{ij}	Fonction d'angle
$f(v)$	Constante, $f(v) = 1$ (plaque mince), $f(v) = (1 + 2v)$ (plaque épaisse)
G ou G_R	Taux de restitution d'énergie (mode I)
G_{IC} ou G_{I-ini}	Taux de restitution d'énergie à l'amorçage (mode I)
G_{I-Prop}	Taux de restitution d'énergie au plateau (mode I)
G_{xy}	Module de cisaillement relatif au deux directions xy
K ou K_R	Facteur d'intensité de contrainte (mode I)
K_{IC} ou K_{I-ini}	Facteur d'intensité de contrainte à l'amorçage (mode I)
K_{I-Prop}	Facteur d'intensité de contrainte au plateau (mode I)
P	Charge .
r	Distance entre le point M et l'extrémité de fissure
R	Résistance à la rupture
u ou δ	Déplacement
U	Energie totale du système
W_p	Energie potentielle du solide
W_F	Travail externe effectué par les forces externes
W_s	Energie de création d'une nouvelle surface
$Y(\alpha)$	Facteur de forme
ν	Coefficient de poisson
γ_s	Energie surfacique de rupture par unité d'aire
σ_f	Contrainte critique pour le déclenchement de rupture
σ_F	Valeur de la résistance à la rupture de l'éprouvette.
Φ	Energie de déformation élastique stockée.
α	Est la profondeur de l'entaille relative

Abréviations

CT	Traction Compacte (Compact Tension).
ASTM	Société Américaine pour Tests des Matériaux.
CID	Corrélation d'Image Digitale.
MCC	Méthode du Changement de la Complaisance
MLER	Mécanique Linéaire Elastique de Rupture.
SENB	Single-Edge Notched Beam.

ZE
LEFM

Zone Endommagée.
Linear elastic fracture mechanics.

Introduction générale

Le béton polymère est un matériau composite résultant de la substitution partielle ou complète du liant hydraulique par un autre de nature polymère. Sa création pendant la deuxième moitié du XXe siècle pourrait être considérée comme une réinvention du béton ordinaire. Cette gamme de matériaux de construction possède des atouts non atteignables avec les matériaux conventionnels, le béton et le mortier, en termes de performances mécaniques, de poids réduit et de résistance aux agents chimiques [1].

Le béton polymère nécessite le recours à son renforcement bien qu'il soit, plusieurs fois, plus performant que le béton ordinaire. Les fibres de renforts peuvent être, naturelles, métalliques, synthétiques minérales. Parmi les méthodes de renforcement, l'utilisation de composites collés en surface des ouvrages à l'aide de résines durcissant à température ambiante est une technique largement employée pour son efficacité et sa facilité et rapidité de mise œuvre [2].

L'utilisation des fibres végétales, le jute dans cette étude, comme renforts extérieur au béton polymère, lui acquière des propriétés mécaniques, traction et flexion, plus qu'appréciables [3], cependant d'autres caractéristiques doivent être étudiées afin lui assurer une meilleure intégration sur le marché.

L'ajout des fibres végétales avec différentes orientations n'est pas sans conséquences sur le comportement mécanique, en l'occurrence sur la résistance vis-à-vis de la fissuration et sa propagation. Au fait, les bétons fibrés ont une conduite très différente comparativement aux bétons non fibrés, spécialement après la première fissuration où les fibres apportent leur contribution en essayant d'arrêter l'évolution et la propagation des microfissures au sein de la matrice en rendant le béton plus ductile [4].

Le principal objectif de ce travail est de mettre en évidence l'influence de l'orientation de tissus de Jute sur les paramètres de rupture, taux de restitution d'énergie de rupture et le facteur d'intensité des contraintes, d'un béton polymère stratifié.

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à un état des lieux sur les matériaux composites en abordant leurs caractéristiques et ses constituants.

Nous avons abordé au deuxième chapitre les fibres végétales et les bétons polymères, dans la partie fibres végétales, nous avons présenté les types de fibres végétales, leur structure, leurs principales caractéristiques. Quant à la partie béton polymère, nous avons présenté quelques définitions sur le béton polymère, ses constituants, ses principales caractéristiques et différentes utilisations.

Le troisième chapitre traite la mécanique de rupture où l'approche GRIFFITH a été présentée. La partie expérimentale présentée par le chapitre quatre est consacré en premier lieu à la mise en œuvre d'un béton polymère stratifié et la préparation des échantillons de type CT, ensuite nous avons présenté les essais mécaniques exécutés lors cette étude. Deux principales méthodes ont été présentés et utilisées afin de mieux exploiter les résultats des essais dans l'étude de mécanisme de rupture, on citera la méthode CID (corrélation d'images digitales) et la méthode du changement de la complaisance.

Au dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de calcul issus des deux méthodes ainsi qu'une discussion et des interprétations de ces résultats.

En fin, nous avons terminé le travail par une conclusion générale.

Chapitre I

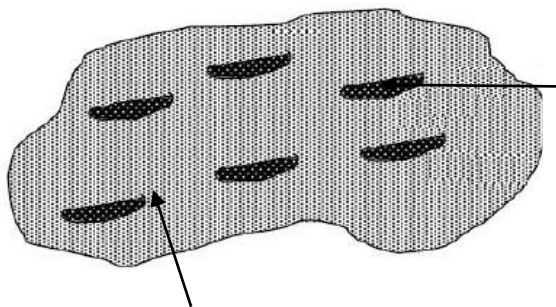
MATÉRIAUX COMPOSITES

1.1 Définition

Un matériau composite est un matériau hétérogène formé au moins de deux constituants qui occupent des phases différentes, ces constituants sont disposés selon une organisation géométrique, qui confère au composite des propriétés supérieures à celles des constituants pris séparément [5].

La mécanique des composites dépend des propriétés des constituants formant le composite et de la structure selon laquelle les renforts sont arrangés dans la matrice. Les composites sont conçus à partir de la combinaison d'au moins de deux facteurs.

Les composites sont formés de matrice et de renforts (**Fig.1.1**).



Renfort

Type : fibre, bille coupeaux, écaille, ...

Composition : carbone, aramide, verre...

Rôle : soutien les efforts (armature)

Sollicitationretenue : traction flexion et

Composition : polymère thermodurcissable ou thermoplastique

Rôle : empêche les déplacements relatifs entre les fibres

Sollicitationretenue : compression

Figure 1.1 : Représentation d'un matériau composite.

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés en trois catégories [6] :

- Les composites à matrice polymère ou organique (**CMO**) ;
- Les composites à matrice métallique (**CMM**);
- Les composites à matrice céramique (**CMC**);

Schématiquement, les propriétés des matériaux composites dépendent [7]:

- Des propriétés des constituants élémentaires.
- De la distribution géométrique des renforts ; par exemple s'ils sont constitués de fibres, de leur orientation.
- Des interactions éventuelles entre les constituants : qualité de l'adhésion entre la matrice et les renforts.

1.2 Constituant d'un matériau composite

Les deux constituants de base d'un matériau composite sont la matrice et le renfort. Le renfort assure la tenue mécanique tandis que la matrice assure la cohésion de la structure et le transfert de charges entre les renforts. A ces deux composants principaux peuvent s'ajouter des additifs qui permettent de modifier l'aspect, ou les caractéristiques du matériau. [8]

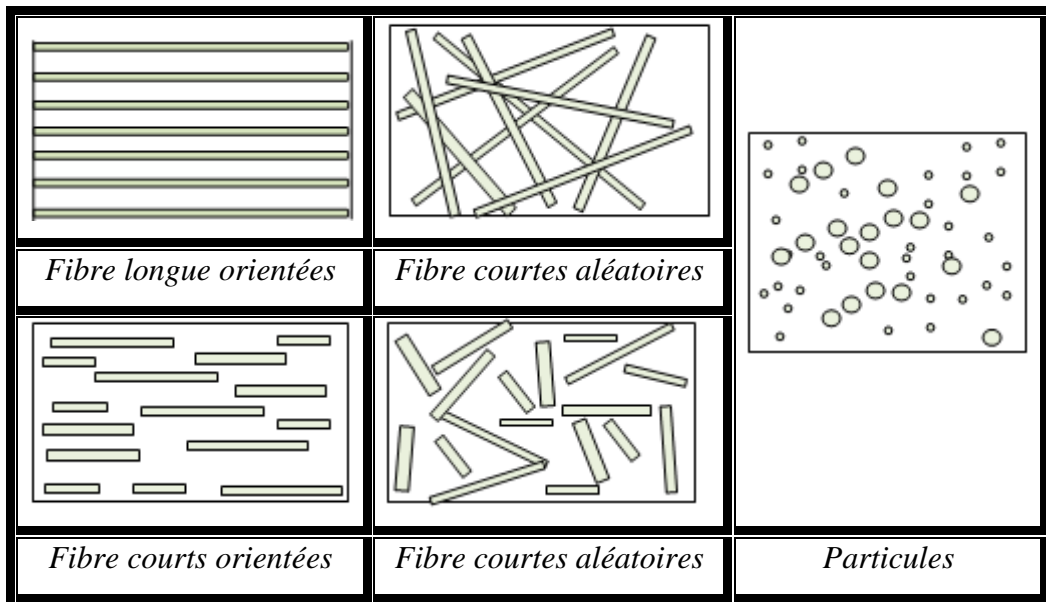


Figure 1.2 : Structures géométriques des composites. [5]

1.2.1 La matrice

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c’est un polymère ou une résine organique [9].

On peut retrouver dans l’organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrice :

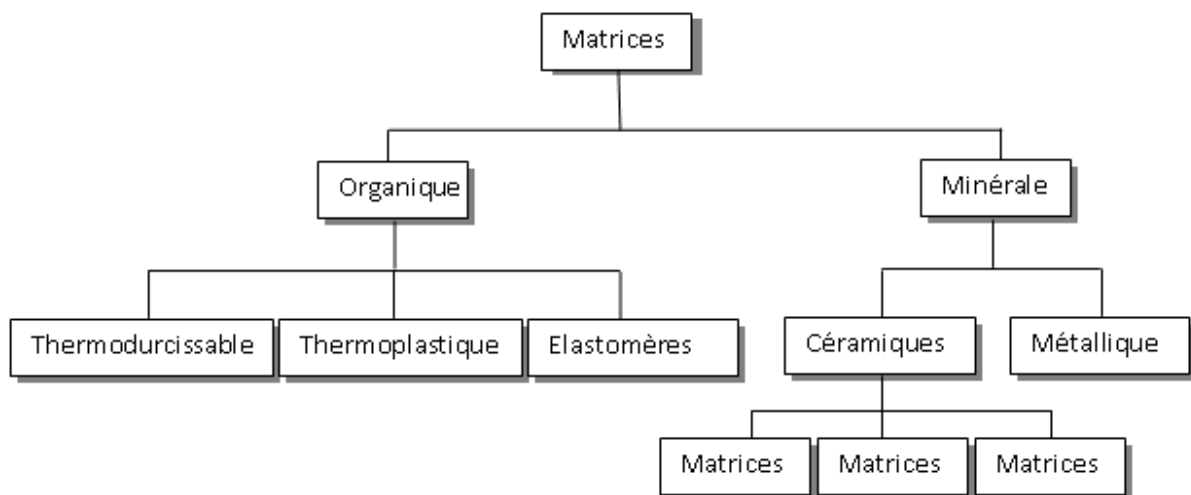


Figure I.3 : Organigramme des différentes familles de matrice.

1.2.1.1 Matrices organiques

Les deux types de résines qui sont, actuellement, utilisées présentent des propriétés foncièrement différentes [10] :

a) Résines thermodurcissables (TD)

Les résines thermodurcissables 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.[11]

Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont [13]:

- **Les polyesters insaturés** : ce sont les résines les plus utilisées dans les applications grandes diffusion GD. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide et polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker ;
- **Les vinylesters** : ce sont des variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique. Elles ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles ;
- **Les résines époxy (ou époxydes)** : constituent la résine type des composites hautes performances HP ;
- **Les résines phénoliques** : sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre ;
- **Les polyuréthanes** : ont une faible viscosité qui facilite un bon remplissage du moule ;

Tableau I.1 : Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées. [14]

Polymère	Masse spécifique (Kg/dm ³)	Résistance à la traction(GPa)	Module de flexion (GPa)
Polyester (UP)	1,2	50-60	3
Vinyl-ester	1,15	70-85	3.5
Phénolique	1,2	40-50	3
Époxyde	1,1-1,4	50-90	3
Polyuréthane	1,1-1,5	20-50	1
Poly-imide	1,3-1,4	30-40	4

Résines thermoplastiques (TP) :

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. [11]

On classe généralement en trois catégories distinctes, les résines TP entrant dans la fabrication de composites :[12]

- Les polymères dits de “grande diffusion”, dont les propriétés mécaniques sont plus faibles mais bénéficient d'un coût compatible avec une production en grande série.
- Les polymères dits “d'utilisation technique”, dont les propriétés mécaniques sont supérieures aux polymères de grande diffusion et qui sont utilisés pour des objets industriels courants comme les pièces de structures.
- Les polymères dits de “hautes performances”, présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important.

Une comparaison entre quelques caractéristiques des résines thermodurcissables et celles des résines thermoplastiques est présentée dans le tableau.1.2 :

Tableau. I. 2 : Principales différences entre matrices TP et TD. [11]

Propriétés	Thermodurcissable	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)	Courte
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleur	Réduit
Chutes et déchets	Perdus ou utilisée en charge	Recyclable
Condition de travail	Emanation de solvants	Propriété

1.2.1.2 Matrices métalliques

L'utilisation des matrices métalliques est encore actuellement en grande partie à un stade préindustriel. Plusieurs matériaux composites tels que ; l'Aluminium et ses alliages, Nickel, Titane, présentent une bonne conductibilité électrique et thermique, une bonne tenue à des températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques transverses. Leur fabrication conduit à des coûts très élevés [10].

1.2.1.3 Matrices céramiques

Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone. Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces qui subissent des contraintes d'origine thermique et leur coût est très élevé [10].

1.2.1.4 Le rôle de la matrice

La matrice a pour rôle de :

- Lier les fibres de renforts ;
- Répartir les contraintes ;
- Apporter la tenue chimique de la structure ;
- Donner la forme désirée au produit final [13].

1.2.2 Les renforts

Le renfort, souvent sous forme de fibres, sert au transfert des charges mécaniques. Les fibres ont une forme remarquable dans la matrice qui possède des propriétés qui s'approchent de plus en plus de celles prévues par la théorie. Ces propriétés sont impressionnantes à cause de leur forme et des moyens de fabrication. La structure moléculaire d'une fibre est généralement alignée dans le sens de l'axe de fibre ce qui produit une structure forte dans cette direction [10].

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure 1.4 [15].

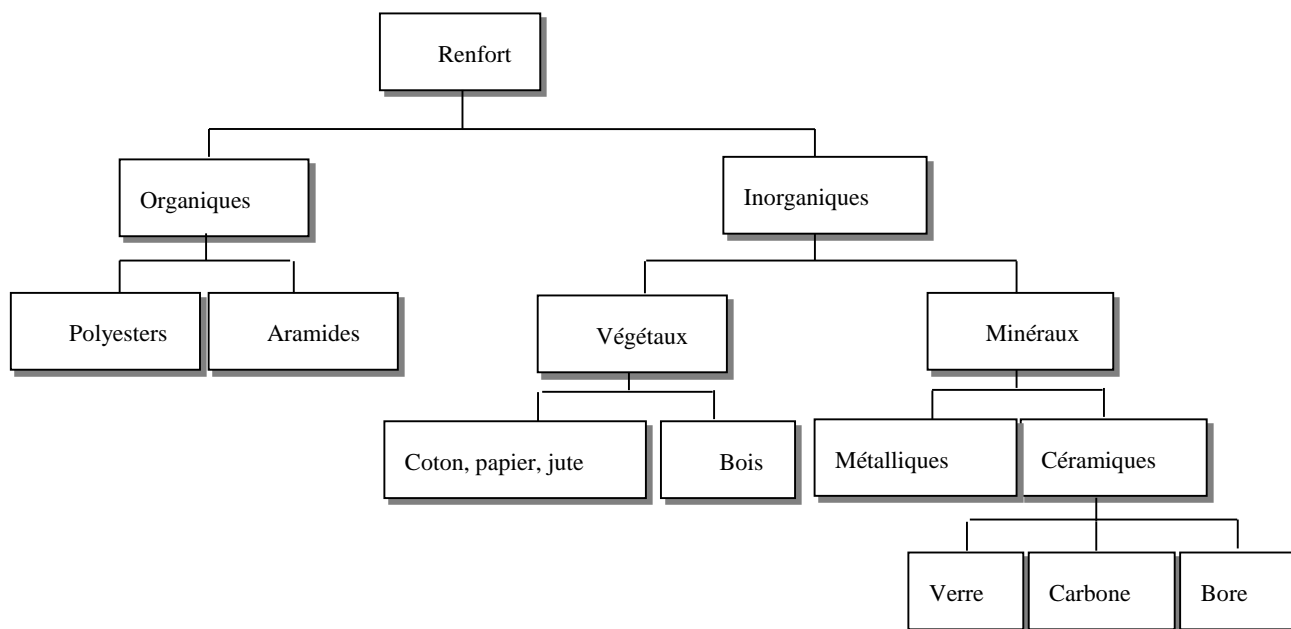


Figure I.4: La classification des types de renforts.

La nature du renfort est en fonction de l'application et du volume des pièces à réaliser, elle permet de distinguer deux grandes familles parmi ces composites [16] :

- Les renforts à fibres courtes qui permettent d'améliorer le comportement de la matrice seule. Celle-ci reste l'élément de base et l'on obtient alors un « **polymère renforcé** » ;
- Les renforts à fibres continues qui jouent un rôle majeur dans le comportement mécanique du composite.

1.2.3 Architecture des renforts

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée [5]

Il existe différentes géométries et textures des renforts : les mats, les tissés, les unidirectionnels, les tricots et les multidirectionnels.

- **Les mats** : sont des nappes de filaments, de fibres discontinues, disposés sans orientations préférentielles et maintenus ensemble par un liant soluble. Ce sont des matériaux déformables, quasi-isotropes dans leur plan et peu coûteux malgré des propriétés mécaniques moindres.
- **Les tissus** : sont réalisés sur des métiers à tisser. Ils sont obtenus par entrecroisement des mèches selon deux directions perpendiculaires : chaîne et trame. Ils peuvent avoir différentes armures : la toile ou le taffetas, le sergé et le satin. L'armure contrôle la rigidité du tissu.
- **Les unidirectionnelles** : sont constituées de fils de chaînes maintenus par des fils de trame fins (voir Fig. I.5).

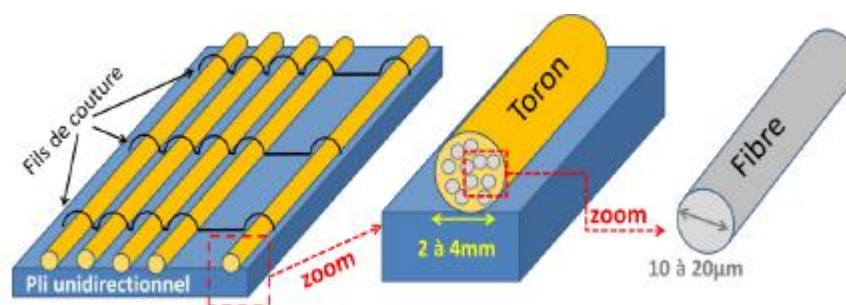


Figure I.5 : Représentation d'un pli unidirectionnel : en zoom un toron et une fibre [17].

- **Les tricots** sont formés par bouclage d'un ou plusieurs fils et offrent de plus grandes possibilités de motifs que le tissage. Leur principale caractéristique est leur déformabilité.
- **Les multidirectionnels** : sont des structures 3D formées de fibres orientées dans plusieurs directions de l'espace. Les différentes couches sont liées entre elles, et dans

l'objectif de mettre en forme les composites par estampage, cette architecture n'est pas envisagée [5], un schéma illustratif des renforts multidirectionnels est donné par la figure I.6.

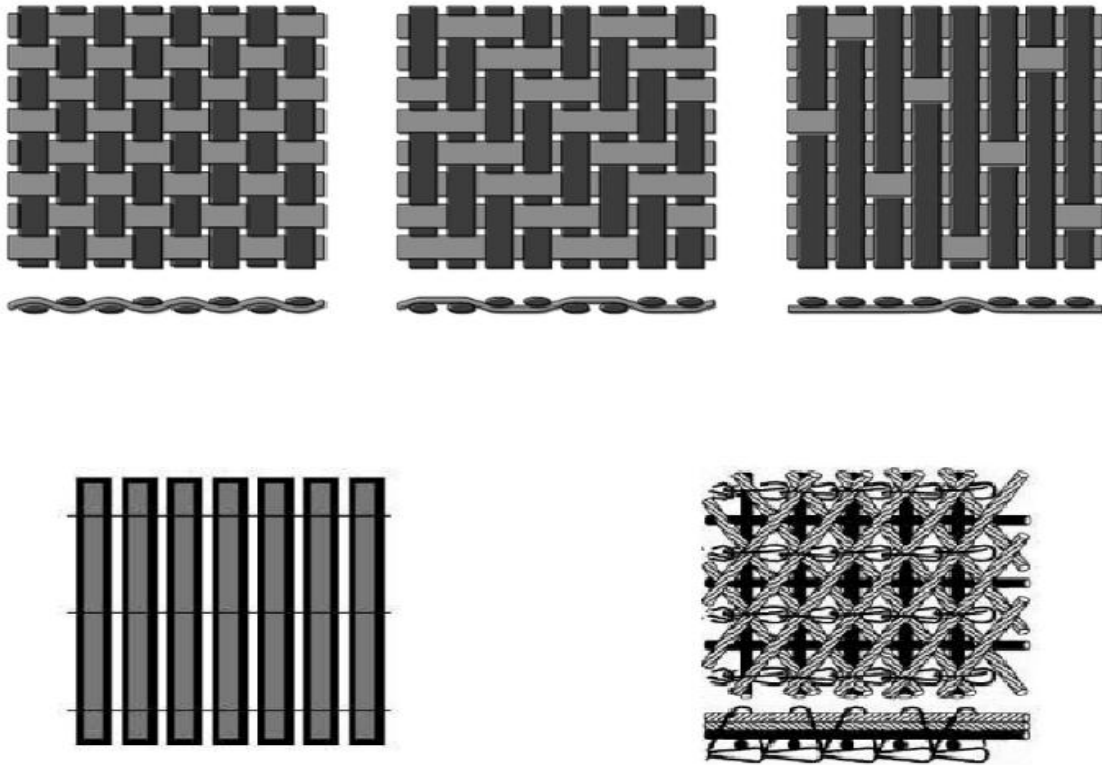


Figure I.6 : Différents assemblages de textures.

1.3 Architecture des matériaux composites

La structure des matériaux composites est très variée. Les renforts peuvent être sous forme de mâts, de fibres courtes, de fibres longues ou de tissés. Les fibres peuvent être disposées en uni-direction, multi-directions ou aléatoire.

Pour les structures plus complexes, les composites sont composés de plusieurs couches différentes. On aborde ici deux groupes principaux de structures composites : stratifiés et composites sandwiches.

1.3.1 Composites sandwiches

Les matériaux composites sandwichs résultent, généralement de l'association de deux semelles ou peaux, de faibles épaisseurs, constituées de matériaux de haute résistance et haut

Module, d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible masse volumique. Ces structures complexes offrent de grandes potentialités aux concepteurs dans des domaines divers. L'âme la plus utilisée dans les sandwichs à âme pleine est la mousse de polymère, tel que le

polyuréthane (PU), polychlorure de vinyle (PVC). L'assemblage des peaux et du cœur est réalisé par collage avec des adhésifs de synthèse de type époxy ou polyester.

Pour concevoir des pièces rigides en flexion et en torsion, une technique couramment employée est celle des structures en sandwich (Fig.1.7), constituées de deux peaux (généralement stratifiées) collées sur une âme épaisse mais légère, comme une mousse de polymères ou un nid d'abeilles, à l'aide d'adhésifs.

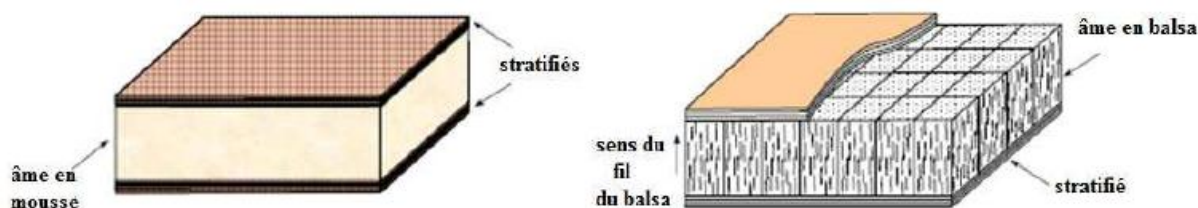


Figure 1.7 : Structures Sandwichs. [5]

1.3.2 Les Composites stratifiés

Les stratifiés sont constitués de couches composites successives appelées plis (voir Fig.I.8). Ces plis composites peuvent être de même renfort et orientés dans des directions différentes, ou de renforts différents dans le cas d'un stratifié hybride.

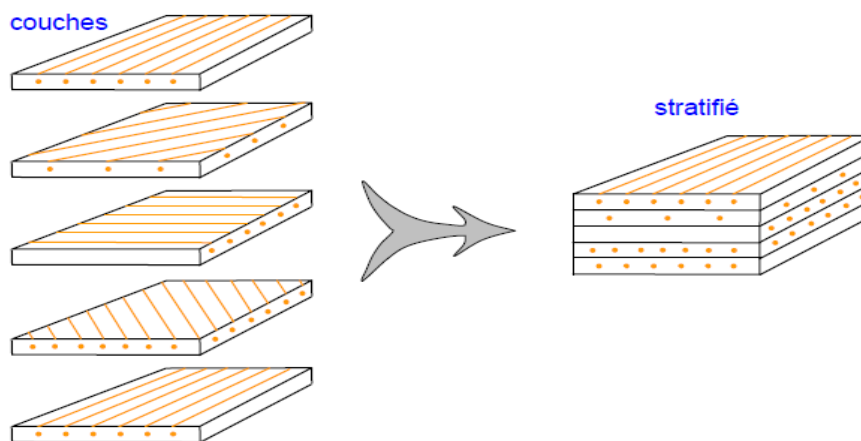


Figure 1.8 : Exemples de stratifiés. [12]

En général, le renfort de chaque pli du stratifié se caractérise par sa nature (carbone, lin, verre, etc.) et sa présentation (fils, mat, tissu). Les architectures de stratifiés en termes de disposition des couches sont aussi très variées (orientation des renforts, empilement symétrique ou antisymétrique, répétition de séquence, etc.). Le choix de renfort et d'architecture du stratifié dépendra donc de l'utilisation du matériau composite en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposé [18].

Les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres. Les mats sont peu résistants en traction et devront être réservés aux zones comprimées.

- Une stratification croisée sera sensible au délaminage inter laminaire.
- Une stratification avec moins trois directions de fibres sera nécessaire pour avoir un pseudo-isotropie dans le plan du stratifié.
- Les stratifiés hybrides permettent d'avoir de meilleures performances en utilisant au mieux les propriétés des diverses fibres disponibles. Parmi les différents hybrides, on peut distinguer

Des hybrides inter-plies, constitués d'une suite de couches, chacune de renfort différent.

Des hybrides intra-couches, constitués par une séquence de couches. Dans une couche, des fibres différentes sont combinées, par exemple, par le tissage, pour former le renfort de la couche.

Les orientations normalisées On désigne les stratifiés par l'orientation des fibres de chaque pli par rapport à un repère global arbitraire (x, y, z), l'axe x correspondant le plus souvent à la direction du chargement.

Un pli orienté à 0° présente des fibres dirigées selon l'axe x et un pli orienté à 90° des fibres selon y. Un stratifié quelconque de N plis est ainsi désigné par le N-uplet des orientations de ses plis dans le sens des z croissants. Pour condenser l'écriture, on note sous forme d'indice le nombre de plis adjacents de même orientation ainsi que le nombre de répétitions d'une même séquence de plis.

L'indice "s" correspond à un stratifié symétrique, il nous renseigne uniquement sur la moitié de l'empilement de la surface au plan de symétrie miroir.

La figure 1.9 présente l'exemple d'un empilement symétrique $[-45/90/45/0]_s$.

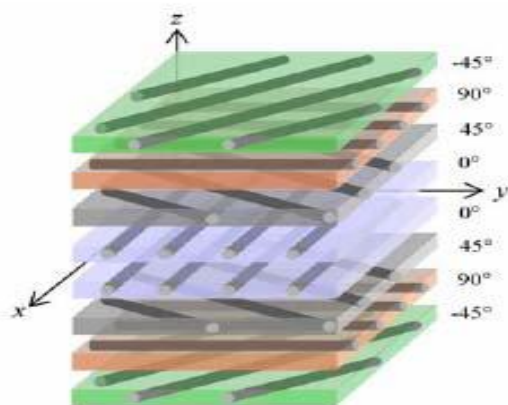


Figure 1.9 : Exemple d'empilement symétrique quasi-isotrope $[-45/90/45/0]_s$. [19]

1.3.3 Désignation des stratifiés

La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

- Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe x de référence.
- Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents.
- Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique.
- Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre.

Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code. La désignation dépend du système d'axes choisi. Un exemple est donné à la figure 1.10.

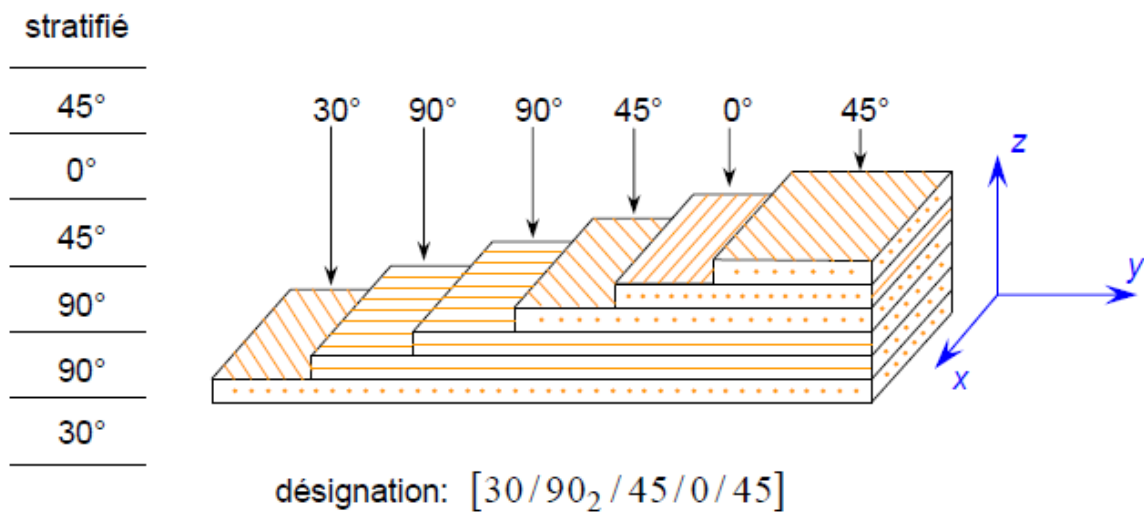


Figure 1.10 : Désignation d'un stratifié.

a) Angles positifs et négatifs

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais de signes opposés, les signes + ou - sont utilisés. La convention pour les angles positifs ou négatifs dépend du système d'axes choisi : une inversion peut apparaître suivant le choix effectué (figure 1.11).

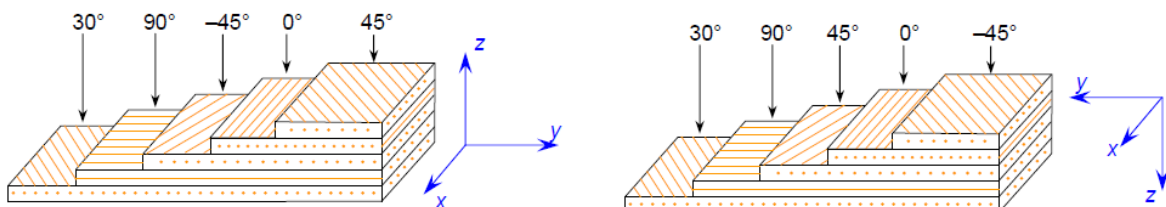
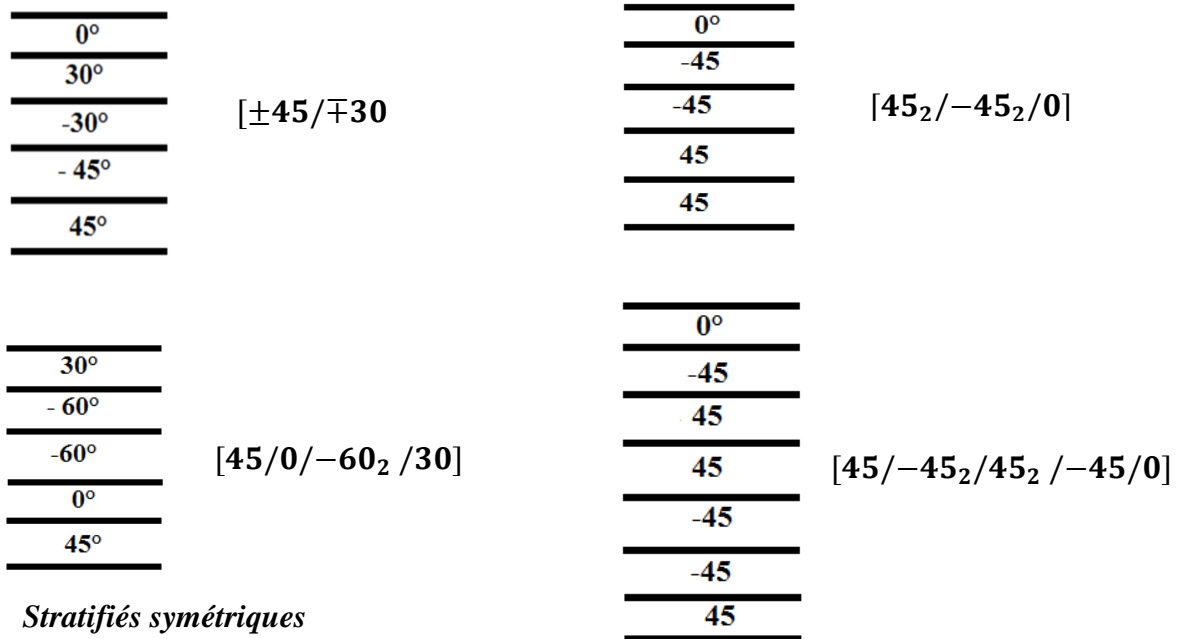


Figure 1.11 : Convention de signe pour la désignation des stratifiés. [18]

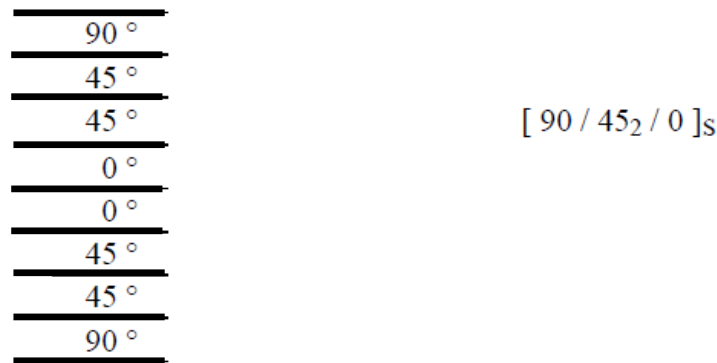
Nous donnons ci-après quelques exemples de désignation de stratifiés. [20]



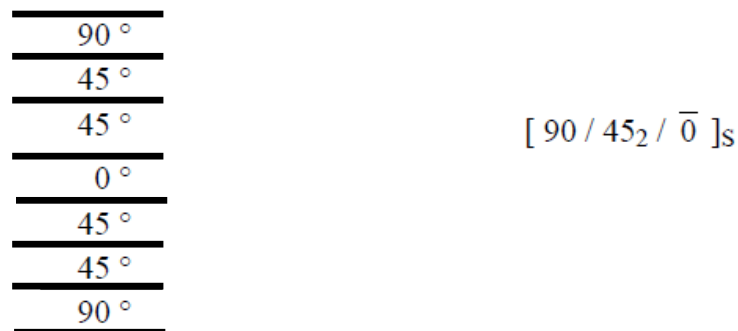
b) Stratifiés symétriques

Un stratifié est symétrique si son plan moy nécessite alors que la moitié des couches successives.

Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie. Un indice S indique que le stratifié est symétrique.[20]

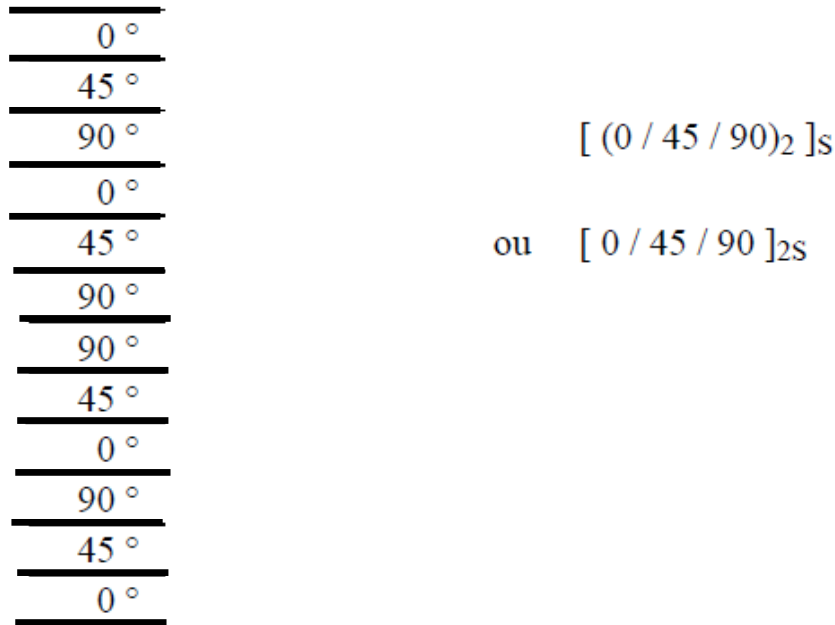


Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée.



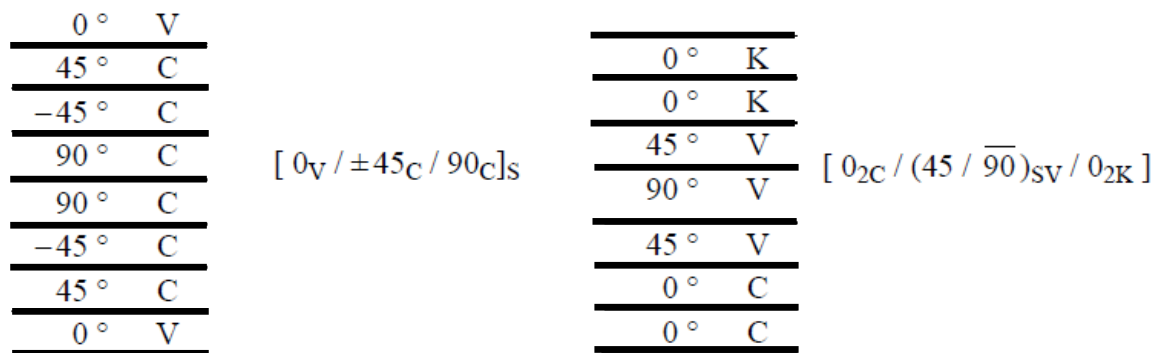
c) Stratifiés de Séquences

La répétition de séquences peut être indiquée par un indice indiquant le nombre de fois où une séquence est successivement répétée.



d) Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation. Par exemple, pour des stratifiés avec la même résine :



avec V : verre, C : carbone, K : Kevlar

1.4 Mise en œuvre des matériaux composites

La mise en forme des matériaux composites peut avoir lieu par des procédés manuels ou mécanisés. Dans l'ensemble, les outils nécessaires aux procédés mécanisés s'amortissent en

produisant en moyenne et grande série ; c'est pourquoi les procédés manuels sont plus adaptés à la petite série du point de vue économique. [15]

L'élaboration d'un matériau composite consiste en trois opérations indispensables qui sont :

- 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.

Le moulage reste le procédé le plus utilisé dans l'élaboration de matériaux composites, mais Il existe d'autres procédés aussi importants [13], nous présentons les différentes techniques de moulage pour la mise en œuvre des matériaux composites par la figure I.12.

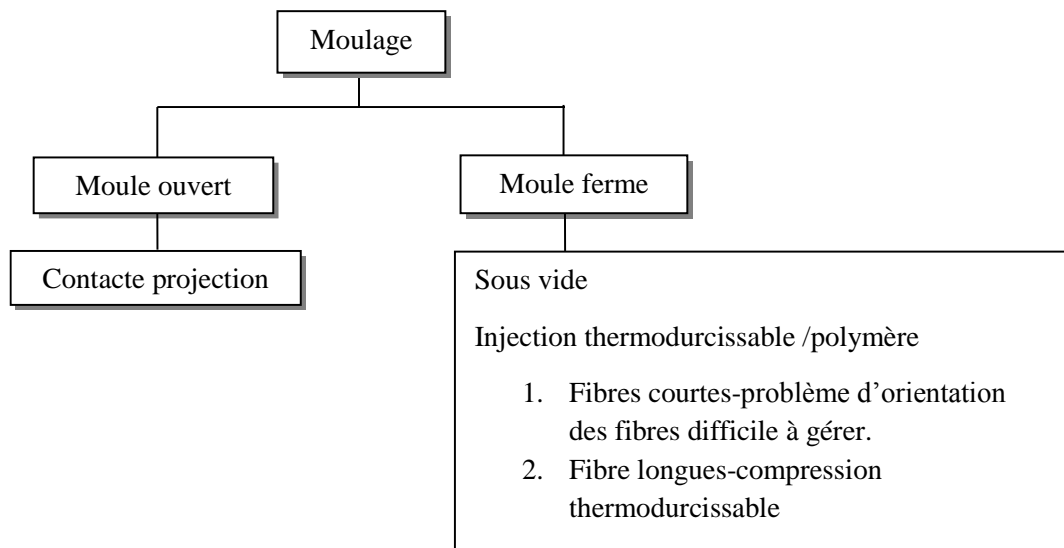


Figure I.12 : Technique de moulage.

1.4.1 Moulage au contact

C'est la méthode la plus simple qui demande le moins d'équipements. On utilise des moules en bois vernis, en métal, etc., sur lesquels on dépose successivement : un agent de démoulage, une couche de surface (optionnelle) et des couches successives de renforts imprégnés au rouleau d'une résine polymérisant à température ambiante, voir figure I.13

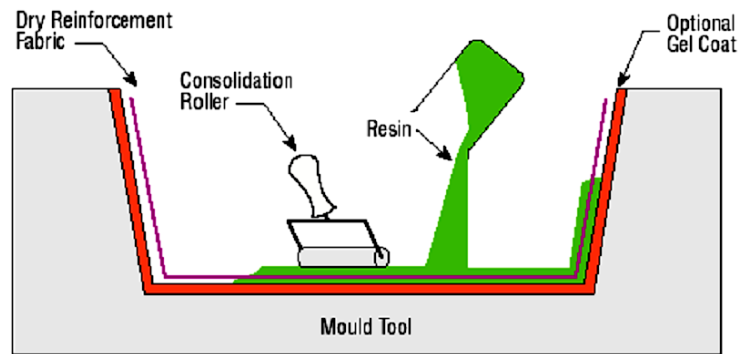


Figure I.13 : Moulage en contact. [21]

1.4.2 Moulage par projection

Dans cette méthode, la résine et les fibres de renfort coupées sont projetées simultanément au moyen d'un pistolet sur une forme.

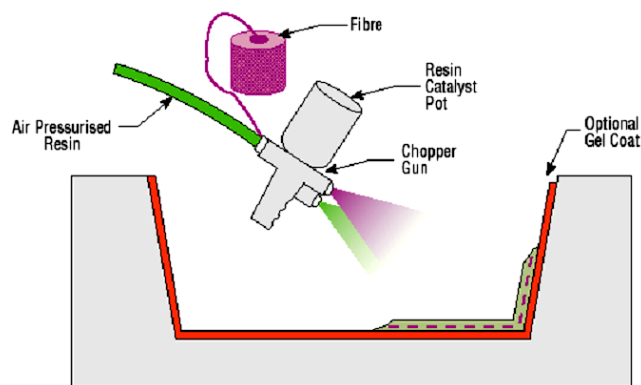


Figure I.14 : Méthode de projection simultanée. [21]

1.4.3 Moulage par compression

Le moulage par compression est l'un des procédés les plus économiques pour la production de grandes séries de pièces de petites et de moyennes dimensions. Dans ce procédé, on place une préforme de compound de moulage (résine, renfort, catalyseur et additifs déjà pré-mélangés dans des proportions optimales) dans la cavité d'un moule chauffé, et ensuite on la presse aux dimensions finales. On utilise des pressions qui vont de 0.5 à 15MPa, un schéma explicatif cette technique est donnée par la figure I.15.

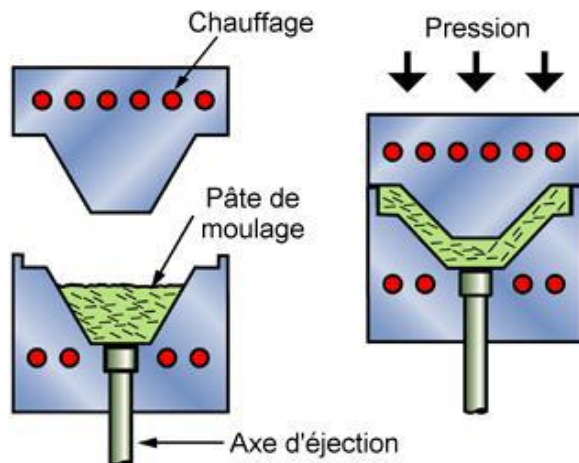


Figure I.15 : Méthode de moulage par compression [21].

1.4.4 Moulage sous vide

Les renforts fibreux sont placés à sec sur un film démoulant qui épouse les formes du moule. Une membrane souple joue le rôle de contre-moule et assure l'étanchéité. Le vide créé permet à la résine de se diffuser dans les renforts fibreux et cavités. Cette méthode pourrait être combinée avec un système de chauffage qui servirait à polymériser la résine. Aux conditions ambiantes, la pression qui fait couler la résine est égale à la pression atmosphérique de 1 atm.

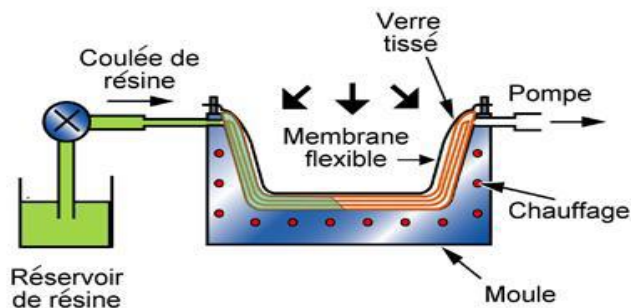


Figure I.16 : Méthode du moulage sous vide. [21]

1.4.5 Moulage par transfert de résine (RTM- Resin Transfert Molding)

Le moulage par transfert de résine consiste à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation des résines est réalisée par le vide ou par l'injection de la résine. Cette méthode permet d'atteindre des taux volumiques élevés des fibres, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes complexes, voir figure I.17.

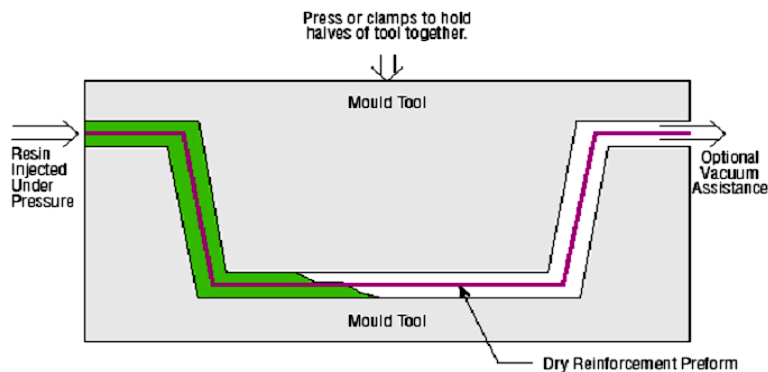


Figure I.17 : Principe du moulage par injection de résine. [21]

1.4.6 Moulage en contenu

Le moulage en contenu permet la fabrication de la plaque planes, panneaux sandwich, (figure 1.18) de panneaux ondulés pour toiture (figure 1.19), plaque nervurées, etc...Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases.

- 1- Une phase d'imprégnation des renforts : fibre, mats ou tissus, la résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc...).
- 2- Une phase de mise en forme.
- 3- Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (60° à 150°) en forme de tunnel, dans la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).
- 4- Une phase de refroidissement et découpage.

Dans le cas de fabrication de plaque plane (figure 1.18) la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.

Dans le cas de panneau ondulés la mise en forme intervient à la cour de la polymérisation (Figure 1.19), par l'intermédiaire de rouleaux mobiles

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

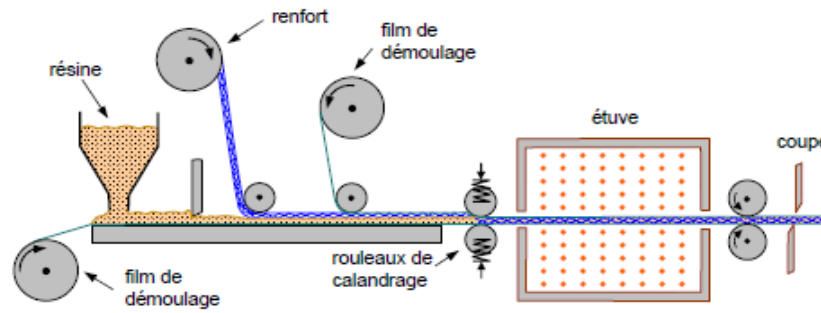


Figure I.18: Moulages en continu de plaque.

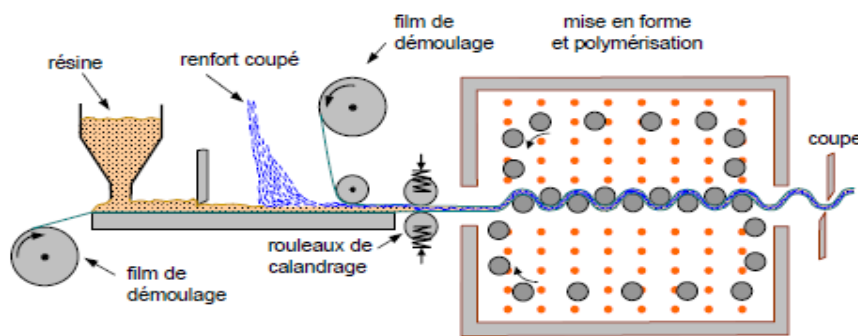


Figure I.19 : moulages en continu de panneaux ondulé. [22]

1.4.7 Bilan

La figure I.20 ci-dessous, propose un comparatif des principaux procédés utilisés pour la mise en forme des composites à fibres longues et matrices thermodurcissables. Deux critères sont étudiés : la qualité des pièces (qui va de pair avec les coûts de fabrication) et la vitesse de production (que l'on adapte à la taille des séries).

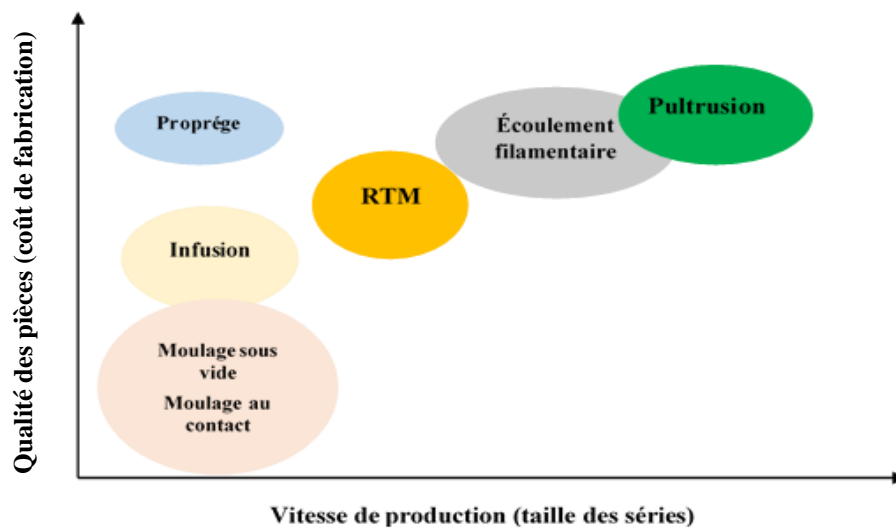


Figure I.20 : Récapitulatif des principaux procédés de mise en forme des composites à fibres longues et matrices thermodurcissables.[22]

La partie gauche de la figure correspond aux procédés manuels, qui sont relativement lents et adaptés aux petites séries ; par ordre de qualité et de coût croissants, on distingue le moulage au contact (avec ou sans vide), l'infusion et l'utilisation de pré-imprégnés. La partie droite correspond aux procédés automatisés ; les techniques de production en continu (pultrusion et enroulement filamentaire) offrent à la fois une bonne qualité et une vitesse élevée, mais nécessitent de lourds investissements qui les réservent aux grandes séries, tandis que la RTM se situe à mi-chemin entre les procédés continus et les procédés manuels tels que l'infusion. De plus, comme nous l'avons vu, d'autres critères tout aussi importants sont à prendre en compte dans le choix d'un procédé : la taille et la géométrie des pièces, les directions de renfort souhaitées.

1.5 Domaines d'application

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer d'où leurs domaines d'application [23] :

- Électricité et électronique,
- Bâtiment et travaux publics,
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- Santé (instrumentation médicale),
- Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf, aviron...).

Ainsi on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

1.6 Conclusion

Pour chaque famille de matériaux composites, nous venons de voir qu'il existe plusieurs types de procédés de mise en forme ; ces procédés consistent tous à mettre en place les fibres et à mouler la matrice autour des fibres, le mode de dépôt et de solidification variant en fonction du type de matrice.

Le choix de l'un ou l'autre de ces procédés dépend naturellement du niveau de qualité attendu et du nombre de pièces à produire, mais pas seulement : la taille et la géométrie de la pièce, la disposition et l'orientation des renforts (que l'on choisit en fonction du chargement) rentrent également en compte. Tous les procédés ne permettent pas d'obtenir toutes les formes de pièces ou de renforts, et ce de façon encore plus marquée qu'avec les matériaux traditionnels ; le choix du procédé doit être effectué très en amont, lors de la conception de la pièce.

Chapitre II

GÉNÉRALITÉS SUR LES FIBRES VEGETALES

2.1 Introduction

Les matériaux composites renforcés par des fibres végétales sont en cours de développement et leurs applications sont encore limitées mais ils sont amenés à jouer un rôle dans le domaine de l'industrie future, notamment dans le domaine de la construction.

L'introduction des fibres naturelles dans des matrices polymères peut apporter des avantages notoires par rapport aux fibres traditionnellement utilisées dans les composites (comme les fibres de verres). Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. Elles peuvent être classées selon plusieurs critères, leur nature chimique, leur longueur, leur origine...etc. [24].

2.2 Définition des fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine :

- ❖ les fibres végétales qui comprennent : [25]
 - les fibres provenant des poils séminaux de gaines (coton kapok).
 - les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie).
 - les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille) d'enveloppes de fruits (noix de coco).
- ❖ les fibres animales qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et sécrétions telle que la soie.
- ❖ les fibres minérales telles que le basalte.

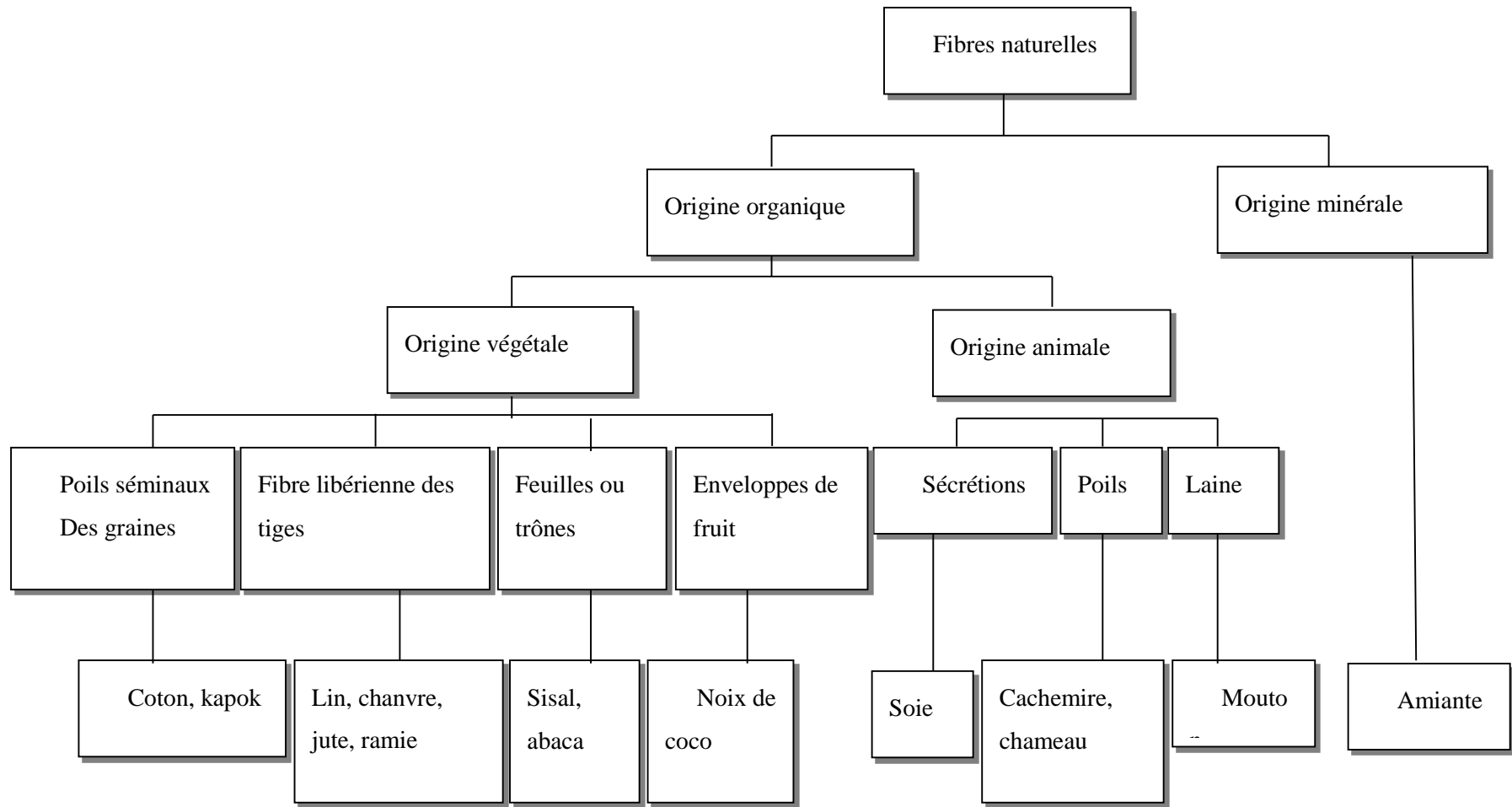


Figure II.1: Classification des fibres naturelles.

2.3 Fibres végétales

2.3.1 Définition de la fibre végétale

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [26].

2.3.2 Classification des fibres végétales

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance. a s'avoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface.

A. Les Fibres de Feuilles

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides.

Les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont la fibre de sisal, d'Henequen et d'abaca.

B. Les Fibres de Tiges

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes.

Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Elles sont par la suite séparées individuellement par un défilage. Les fibres, une fois séparées, sont utilisées dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et béton.

Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de kenaf, et de chanvre.

C. Les Fibres de Bois

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments.

D. Les Fibres de Surface

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autres le Cotton et la noix de coco. Les fibres de coco ont donné de bons résultats pour la résistance à la flexion du ciment de fibre. [26]

2.3.3 Les différents renforcements à base des fibres végétales

Dans la nature il y a plusieurs plantes végétales, qu'on peut utiliser comme des renforts au niveau de la matrice composite. Il y a :

2.3.3.1 *Le chanvre*

Le chanvre est une fibre libérienne, tout comme le lin, le kenaf, le jute et la ramie. Les plantes de cette famille présentent toutes des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses. La France est le premier producteur en Europe pour la production de chanvre, sont généralement transformées en textiles (tapis et vêtements) et en produits industriels comme des géotextiles, de la toile anti-érosion, du renfort de composite et du remplissage. A cause de sa grande solidité et de son intérêt économique. [27].



Figure II.2 : La plante de chanvre et les fibres de chanvre.

2.3.3.2 *Le lin*

Le lin est une plante annuelle qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie qu'en Europe. La fibre de lin vient des tiges de la plante mais aussi de l'huile extraite des graines. L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée, en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. Le lin peut être utilisé comme substitut au coton. Cette fibre est utilisée pour fabriquer des papiers fins comme les papiers à cigarette ou le papier Bible.



Figure II.3 : La plante du lin et les fibres de lin. [27]

2.3.3.3 Le Coton

Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut. Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie et mêmes d'Europe (Espagne). Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters. [27].

Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. Elle est utilisée pour des papiers dits de luxe. Elles sont également utilisées pour les papiers fiduciaires et principalement pour les billets de banques, papiers pour lesquels la caractéristique essentielle est la résistance au pliage. Cette fibre est i beaucoup utilisée dans le domaine du textile.



Figure II.4 : Les fibres naturelles de coton.

2.3.3.4 L'Abaca

L'Abaca ou chanvre de Manille est un bananier textile (Musacées) qui pousse aux Philippines : les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudo tronc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, pour des rabanes, des nappes, des stores ou des vêtements. La fibre d'Abaca a une longueur de 6 mm pour un diamètre de 22 μm . Elle est utilisée principalement dans la composition des papiers filtres, des sachets de thé. Ce sont des papiers poreux demandant une bonne résistance. [27].



Figure II.5 : La plante de l'abaca et les fibres de l'abaca.

2.3.3.5 Le Kenaf

Le kenaf est une plante herbacée dont la tige peut atteindre 3 m de haut. Il se trouve principalement dans les régions tropicales et en Amérique du Sud. La production de kenaf en Europe est rare. Elle est destinée uniquement pour le domaine papetier. La longueur moyenne

des fibres (1,5 mm) est comprise entre celle des fibres de feuillus et celle des fibres de résineux [26].



Figure II.6 : La plante de Kenaf avec ses fibres.

2.3.3.6 *Le Sisal*

Le sisal est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2 m de long. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ces fibres est de 3mm.



Figure II.7 : La plante de Sisal avec ses fibres.

2.3.3.7 *Le coco*

Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien. On utilise plutôt dans des pièces spacieuses. [26]



Figure II.8 : Les fibres naturelles de la plante du coco.

2.3.3.8 *Palmier dattier*

Le palmier dattier il a un stipe solitaire de couleur marron ou gris qui atteint jusqu'à 20 mètres de hauteur et 60 cm de diamètre à l'âge adulte. Leur couronne se compose de plus d'une centaine de feuilles pennées qui mesurent plus de 5 mètres de longueur. Le pétiole peut mesurer jusqu'à un mètre, et est recouvert d'épines sur ses bords. Les folioles sont de couleur verte. Elles sont étroites, rigides et disposées de manière irrégulière sur le rachis. Les types les plus connus sont : Deglette Nour, Dokar, Elghers (appellation locale).

2.3.3.9 *Alfa*

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes. Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête, le désert commence. Herbe d'Afrique du nord et l'Espagne, appelée aussi spart ou sparte. Elle fait partie la de famille des graminacées. Elle est employée dans la fabrication de sparterie, des cordages, des espadrilles, des tissus grossiers, des papiers d'imprimerieetc.



Figure II.9 : Les fibres d'alfa.

2.3.3.10 *Le Jute*

Le jute est une plante buissonnante originaire du sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh. Les fibres utilisées en papeterie sont les déchets de culture et de filature. La tige atteint une hauteur de 4 à 6 m avec un diamètre d'environ 3 cm.. Les caractéristiques de ces fibres sont généralement assimilées à celles du kenaf. [26]



Figure II.10 : La plante de Jute avec ses fibres.

2.3.4 Structure de la fibre végétale

La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de microfibrille cellulosiques en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d’une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaison hydrogène et covalentes à la lignine.

La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l’axe de la fibre et disposée en couche superposée dans le sens radiale. Ces différentes couches qui forment la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire. Ces dernières bordent un lumen de diamètre variable suivant l’espèce. La paroi secondaire est composée de trois couches de microfibrilles (S1, S2, S3) (Fig. II. 14).

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre sa densité et sa teneur en eau et son pourcentage d’absorption d’eau [26].

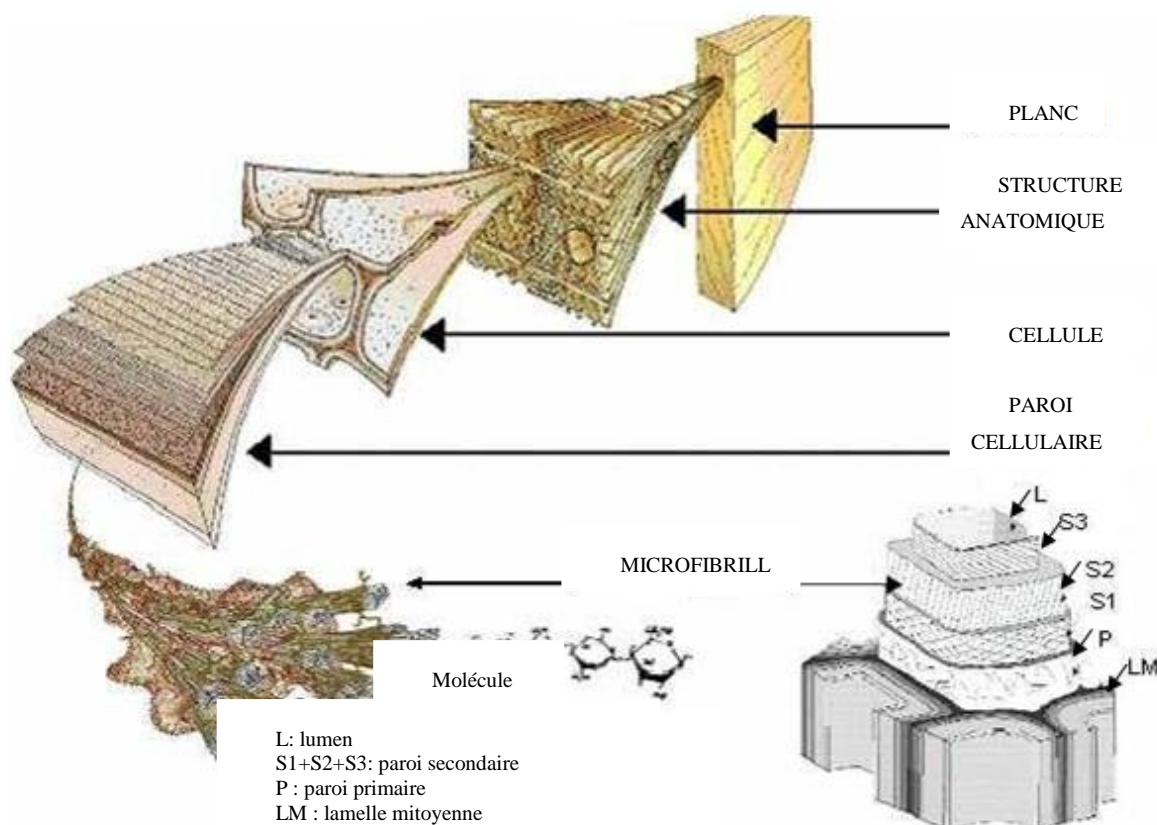


Figure II.11 : Structure du bois (observations multi échelles).

2.3.5 Propriétés usuelles des fibres végétales

2.3.5.1 Propriétés chimiques des fibres végétales

La composition chimique varie d'une plante à une autre et dépend de l'espèce, de l'âge de la plante, des conditions climatiques, de la composition du sol et de la méthode d'extraction utilisée.

Les différents constituants des fibres végétales sont [26] :

- **La Cellulose** : C'est la principale composante des fibres végétales. C'est un polymère naturel du premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne de fibres en cellulose.

- **Hémicellulose** : L'hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres.

- **Lignine** : La lignine constitue la colle qui lie les fibres végétales entre elles ainsi que leurs parois. C'est un polymère tridimensionnel.

- **Les pectines** : Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois). Elles jouent le rôle de ciment intercellulaire et contribuent à la cohésion des tissus végétaux.

- **Extractibles** : Ce sont des molécules de faible masse molaire qui remplissent la lumière des cellules. Ils représentent 2 à 5 % de la masse sèche. La plupart de ces extractibles sont solubles dans l'eau ou des solvants organiques, d'où leur dénomination. La composition en extractibles varie en fonction de l'essence considérée et influe sur la couleur et l'odeur. Il s'agit de tanins, de pectines, de sucre et d'autres composés [26].

Tableau II.1 : Composition chimique de quelques fibres végétales.

Fibre naturelles	Cellulose %	Hémicellulose %	Lignine %	Pectine %	Graisses %	Eau %
Chanvre	70-74	17.9-22.4	3.7-5.7	0.9	0.8	6.2-12
Lin	71	18.6-20.6	2.2	2.3	1.7	8-12
Jute	61-71.5	13.6-20.4	12-13	0.2	0.5	12.5-13.7
Coton	85-90	5.7	-	0-1	0.6	7.85-8.5
Sisal	66-78	10-14	10-14	10	2	10-22
Kenaf	45-57	21.5	8-13	3-5	-	-

2.3.5.2 Propriétés Mécaniques des Fibres Végétales

Et elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité. Le tableau présente les propriétés usuelles des fibres végétales. On remarque que la plupart des fibres présentent des propriétés proches de celles des fibres synthétiques (verre, aramide, carbone...). La production de ces fibres est relativement importante [28].

Tableau II.2 : Les propriétés usuelles des fibres végétales.

Propriété	Type de fibres						
	Lin	chanvre	jute	coco	sisal	abaca	coton
Densité	1,4	1,48	1,46	1,25	1,33	1,5	1,51
Résistance à la traction (MPa)	800-1500	550-900	400+800	220	600-700	980	400
Module d'élasticité (GPa)	60-80	70	10-30	6	38	-	12
Allongement à la rupture (%)	1,2-1,6	1,6	1,8	15-25	2-3	-	3-10

2.3.5.3 Propriétés physiques des fibres végétales

Généralement une fibre végétale est caractérisée par son diamètre, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau [28].

2.3.5.4 Autres propriétés spéciales sur les fibres végétales

La fibre végétale contient plusieurs propriétés fondamentales qui définissent le comportement de la fibre, tels que [29].

- Bonne isolation thermique.
- Bonne absorption des vibrations.
- Bonne isolation acoustique.
- Fibres moins abrasives.

2.3.6 Etat de l'art sur les fibres de l'étude

Le jute, fibre d'or en plein essor. Naturelle, révolutionnaire et à haute valeur ajoutée, la fibre de jute fait rêver. Surnommée "fibre d'or" et déjà bien installée dans la fabrication des emballages et du géotextile, elle fait progressivement son apparition dans l'univers des écomatériaux, comme alternative à la fibre de verre.

2.4 Pourquoi la fibre de jute ?

Les principaux types de fibres naturelles utilisés dans les matériaux composites sont le lin, le chanvre, le jute, le kenaf et le sisal en raison de leurs propriétés et de leur disponibilité. L'utilisation de fibres de jute pour le composite présente de nombreux avantages. Tout d'abord, a des caractéristiques de bois comme c'est une fibre libérienne. Le jute a des propriétés

spécifiques élevées, une faible densité, un comportement moins abrasif à l'équipement de traitement, une bonne stabilité dimensionnelle et une innocuité.

Le jute est renouvelable, polyvalent, non abrasif, poreux, hydroscopique, viscoélastique, biodégradable, combustible et réactif. La fibre a un rapport d'aspect élevé, un rapport résistance / poids élevé et de bonnes propriétés d'isolation.

Le textile de jute est un produit respectueux de l'environnement à faible coût et est abondamment disponible, facile à transporter. Les produits de jute biodégradables et à bas prix fusionnent avec le sol après avoir servi à nourrir le sol. Étant fait de cellulose, à la combustion, le jute ne génère pas de gaz toxiques. Certains pourraient considérer une partie de ces propriétés comme des inconvénients, tels que biodégradables et combustibles, mais ces caractéristiques fournissent un moyen d'élimination prévisible et programmable difficile à atteindre avec d'autres ressources.

2.4.1 Résistance de jute comme matériau de renfort pour le composite [30]

- Le jute est biodégradable et réapprovisionne les nutriments de la terre.
- Le jute ne présente aucune menace pour l'environnement car il n'émet pas de gaz toxiques ni de produits chimiques nocifs.
- Le jute ne causera pas de problèmes comme les matières synthétiques dans les cycles de gestion des déchets en émettant des gaz dangereux lors de l'incinération des sites d'enfouissement.
- Le jute rend le composite solide et durable, dont la manipulation est plus facile.
- Disponibilité abondante de fibre de jute.

2.4.2 Faiblesse du jute en tant que matériau de renfort pour composite [30]

État humide, généralement plus de 60% d'humidité peut réduire la résistance à la traction de la fibre de jute

- Le contact acide ou l'atmosphère peut réduire le lustre ainsi que la résistance à la traction.
- Les liaisons de pectine et de lignine héritées dans le jute brut peuvent pourrir ou dégrader la qualité de la fibre de jute. Cependant, cette faiblesse peut être surmontée par un rouissage, un lavage, un processus de séchage et une modification de la fibre de jute.

2.4.3 Utilisation de jute pour fabriquer des composites comme substitut du bois

Le schéma ci-dessous donne des voies de traitement possibles qui conduisent aux produits composites pouvant provenir de chaque fraction de la plante de jute. La plante entière (feuilles, bouillon, moelle, racines) peut être utilisée directement pour produire des composites structuraux et non structuraux et peut être utilisée en combinaison avec des thermoplastiques

pour produire des pellets qui peuvent être extrudés en une grande variété de produits. En utilisant toute la plante, des processus tels que le rouissage, la séparation des fibres, la purification des fractions, etc. peuvent être éliminés, ce qui augmente le rendement total du matériel végétal et réduit les coûts associés à l'isolement de la fraction. La plante peut être fractionnée en types de fibres et chaque type utilisé pour différents composites. En utilisant le sous-produit du procédé d'isolation à fibres longues, par exemple, le coût global de l'utilisation de fibres longues est réduit.

Une illustration en image de la structure de fibre de jute est donnée par la figure II.12.

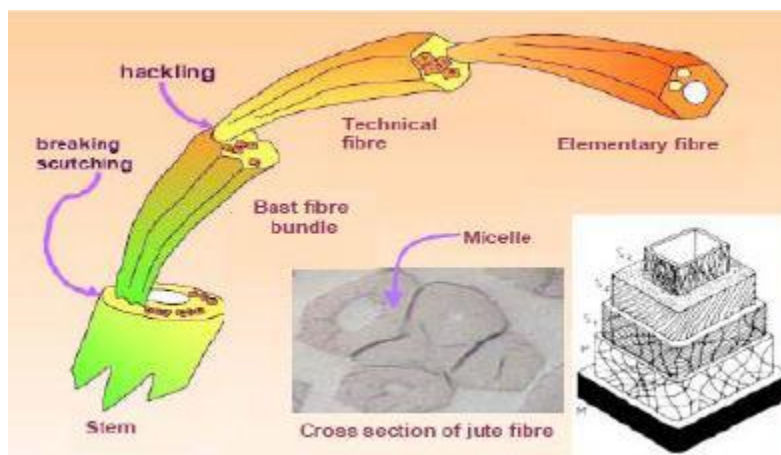


Figure II.12 : Structure de fibre de jute. [13]

Les principaux constituants de la fibre de jute sont donnés par le tableau II.3.

Tableau II.3 : Composition chimique de la fibre de jute. [30]

Les composants	%
Cellulose	60-62
Hémicellulose	22-24
Lignine	12-14
Autre	1-2

La fibre de jute possède une résistance spécifique et une rigidité modérément élevée. Par conséquent, il convient comme renforcement dans une matrice de résine polymère. Cependant, il présente une variation considérable du diamètre avec la longueur des filaments individuels. Les propriétés de la fibre dépendent de facteurs tels que la taille, la maturité et les méthodes de traitement adoptées pour l'extraction de la fibre. Les propriétés telles que la densité, la résistivité électrique, la résistance à la traction et le module initial sont liées à la structure interne et à la composition chimique de la fibre.

▪ Caractéristiques du Jute

Les caractéristiques morphométriques, ainsi d'autres caractéristiques, notamment mécaniques sont données par le tableau II.4.

Tableau II.4 : Caractéristiques de fibre de jute.

Propriété	Jute
Longueur de cellule ultime, L (mm)	0.8 à 6.0
Largeur de cellule ultime, B (mm)	10 à 25 μ m
Rapport longueur/largeur, (L/B)	110
Finesse (denier)	15 à 35
Ténacité (gm/denier)	3 à 5
Allongement à la rupture (%)	1.0 à 1.8
Densité	1.46
Degré de cristallinité	55 % à 60%
Angle d'orientation	7° à 9°
Rigidité à la flexion	3.0 à 5.0
Récupération de l'humidité (%) à 100%	36

2.5 Généralité sur les bétons polymères

Pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques et permettre une bonne durabilité des bétons de résine renforcés ou non tout en satisfaisant les exigences économiques qui se rapportent au coût du produit fini, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'optimisation de la formulation du BP par la diminution de la fraction massique de la résine et/ou par le remplacement ou l'ajout d'une partie du squelette granulaire par d'autres composantes, conférant aux bétons des qualités meilleures en abaissant le prix du matériau du produit fini .

2.5.1 Définition du béton polymère

Le béton polymère est un matériau composé de différents types d'agrégats. Ces derniers sont liés par des résines de polyester pour assurer la solidité de chaque réalisation [31].

Cette combinaison se complète, pour les bétons préfabriqués, d'agrégats de silice, de quartz et de résines de polyester stable.

Preuve de sa performance, le béton polymère a déjà obtenu de très nombreuses certifications de qualité auprès d'organismes du bâtiment comptant parmi les plus réputés [31].

2.5.2 La composition principale d'un béton polymère

Le béton de résine (polymère) est formé par un squelette granulaire (les agrégats) et un liant polymère (résine) parfois thermoplastique mais dans la plupart des cas thermodurcissable [32].

a) Le liant (la résine)

Les polymères sont des structures ayant une architecture le plus souvent linéaire ou tridimensionnelle constituée par l'enchaînement covalent de plusieurs unités chimiques de répétitions ou motifs unitaires appelées monomères possédant une ou plusieurs fonctions chimiques potentiellement réactives. Le nombre et la nature de ces fonctions permet de déterminer ce que l'on appelle la fonctionnalité du monomère, c'est-à-dire le nombre de liaisons qu'un monomère peut établir avec d'autres monomères lors de la réaction chimique appelée polymérisation.

La différence entre un polymère et une grosse molécule quelconque provient de cette répétition de molécules identiques ou similaires constituant une chaîne ou une portion de chaîne. Les polymères peuvent être fabriqués à partir d'un seul type de monomère (on parle alors d'homo polymère, comme par exemple le polystyrène), ou bien à partir de plusieurs types [33].

b) Les agrégats

Ils forment le squelette du béton et ils jouent donc un rôle très important dans la composition et la fabrication des bétons en général et le béton de résine en particulier. Ils influent les propriétés mécaniques et physiques du produit fini.

Les agrégats utilisés dans la plupart des cas sont des sables de quartz de granulométrie différente. Le gravier utilisé (0,2 à 16 mm) et en partie le sable (0,1 à 0,7 mm) sont considérés comme des agrégats à granulométrie supérieure tandis que la farine (0,1 à 0,3 mm) et les particules encore plus petites (< 0,1 mm) sont considérées comme des agrégats fins.

Le bon choix des agrégats entraîne une augmentation du module d'élasticité, de la résistance en flexion et en compression ainsi que de la dureté.

2.5.3 Propriétés de béton polymère

Les propriétés viscoélastiques du liant polymère sont responsables du taux élevé de fluage du béton de résine, ce qui restreint quelque fois son utilisation dans la construction de charpentes. Le taux de déformation du béton de résine varie selon le type de béton polymère. Il existe une grande variété de bétons à base polymère parmi lesquelles on trouve : le béton de polyester, le béton d'époxy, le béton de résine furanique.

Le Tableau II.5 donne les caractéristiques mécaniques des différents bétons polymère.

Tableau II.5 : Propriétés mécaniques des différents types de bétons de résine et du béton de Ciment.

Type de liant	Polyméthacrylate De méthyle	Polyester	Époxyde	Résine furanique	Béton de ciment
Absorption d'eau (%)	0,05-0,60	0,30-1,0	0,02-1,0	0,20	5-8
Résistance en compression (MPa)	70-210	50-150	50-150	48-64	13-35
Résistance en traction (MPa)	9-11	8-25	14-25	7-8	1,3- 3,5
Résistance en flexion (MPa)	30-35	15-45	15-50	-	2-8
E (GPa)	35-40	20-40	20-40	-	0,15- 0,20

2.5.4 Les différentes applications d'un béton polymère :

Béton polymère est utilisé pour de nombreux types de projets de construction spécialisés. Comme d'autres types de béton, il peut être utilisé pour assembler deux composants différents ou de fournir une structure ou une base. Le matériau est utilisé dans la construction électrique ou industrielle où le béton doit durer longtemps et être résistant à de nombreux types de corrosion. [34]

2.5.5 Avantages du Béton Polymère

Le tableau II.6 présente quelques-unes des principales avantages et inconvénients des bétons polymères [35] :

Tableau II.6 : Quelques avantages et inconvénients des bétons polymères.

Les Avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Le Béton Polymère possède des caractéristiques mécaniques supérieurs à un béton classique ce qui permet d'obtenir des épaisseurs et un poids moindre par rapport à des ouvrages en béton armé, facilitant ainsi la manutention et la pose. • Excellente tenue à l'abrasion : notre coefficient d'abrasion (=1) permet de conserver les qualités hydrauliques de nos ouvrages durant des décennies. Le béton polymère est donc compatible avec des vitesses d'écoulement élevées. • Résistance totale au sel marin et au sel de déverglaçage. • 100 % étanche dans la masse 	<ul style="list-style-type: none"> • Le cout de la matière première (principalement le liant) est plus élevé (jusqu'à 8 fois), comparé à celui des bétons hydrauliques. • Ces bétons se caractérisent par une mauvaise odeur et une toxicité provenant de la partie liante du matériau c'est-à-dire la résine et le durcisseur pendant le malaxage et la mise en œuvre.

2.6 Conclusion

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique.

Les composés polymères donner les concrètes plusieurs caractéristiques qui tendent à la rendre plus sûre et plus durable que le béton ordinaire. Le béton polymère tend à être plus cher que la version traditionnelle et est mesurée plus précisément en termes de densité et de retrait.

Chapitre III

PRÉSENTATION DU CONCEPT MÉCANIQUE DE LA RUPTURE

3.1 Notions de la mécanique de la rupture

La mécanique de la rupture a été introduite par Griffith [36] vers 1920. L'objectif de la mécanique de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide de paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau. Les premiers développements théoriques d'analyse des champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure ont été entrepris par Westergaard vers 1940. Une théorie de la rupture basée sur la stabilité de la fissure valable uniquement pour les matériaux fragiles, ne tenant pas compte de la dissipation de l'énergie due à la plastification. En 1948 Irwin proposa une modification de la théorie de Griffith en incluant justement dans le bilan énergétique, l'énergie due à la plastification, pour que l'approche de Griffith soit applicable aux matériaux ductiles.

En 1956, un groupe de chercheurs de la marine américaine, ont développé le concept du taux de restitution d'énergie à partir de la théorie de Griffith sous une forme facilement exploitable par les concepteurs de structures. En 1957, s'appuyant sur les travaux de Westergaard[37],

Irwin [38] montra que les déplacements et les contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure peuvent être décrits à l'aide d'un paramètre unique relié au taux de restitution d'énergie. Ce paramètre caractérise l'état de sollicitation dans la région dans laquelle la rupture se produit, il est appelé facteur d'intensité de contrainte (FIC).

La période s'étalant de 1960 à 1980 a vu une intensification des recherches sur la rupture avec deux écoles concurrentes. D'une part, les tenants de l'approche utilisant la mécanique linéaire de la rupture et d'autre part ceux qui s'intéressaient essentiellement à la plastification qui se développe à l'extrémité d'une fissure. Pour tenir compte de l'effet de cette plastification sur les champs de contraintes et de déplacements à l'extrémité d'une fissure, plusieurs auteurs comme Barenblatt [39] proposèrent ce qu'on appelle une correction de la zone plastique. La taille de la fissure est alors augmentée de cette zone plastique pour retrouver les champs de contraintes élastiques décrits par le FIC. Plus tard, Hutchinson en 1968, Rice et Rosengren [40] développèrent un nouveau paramètre appelé intégrale J. Ce paramètre décrit parfaitement la répartition des contraintes dans les zones plastifiées.

3.2 Rupture des matériaux

Lorsqu'une pièce est soumise à des efforts d'origines variées, il existe des limites, en contraintes ou en déformations, qu'elle ne doit pas dépasser, sous peine d'endommager le matériau et de provoquer sa rupture. Suivant que l'on s'intéresse à la dégradation du matériau

d'un point de vue micro-mécanique ou macro-mécanique, deux approches peuvent être utilisées :

3.2.1 La mécanique de l'endommagement

Propose de décrire continûment la dégradation progressive du matériau due à l'apparition, à la croissance, puis à la coalescence de microfissures ou de micro-cavités présentes dans le matériau. Cette approche, Lorsque les microfissures, les microcavités créés par croissance ou par coalescence des défauts sont de taille assez grande, cette façon d'aborder le problème n'est plus valable, et il faut alors utiliser la mécanique de la rupture.[19],

3.2.2 La mécanique de la rupture

A pour objet l'étude du comportement mécanique d'un matériau en présence de fissures macroscopiques. Cela revient notamment à déterminer le champ des contraintes et des déformations au voisinage de la pointe d'une fissure. L'étude de ces champs mécaniques permettant ensuite de juger de la stabilité ou non d'une fissure. Il est également possible, comme nous le verrons par la suite, d'aborder la mécanique de la rupture à travers une étude énergétique du solide fissuré.

3.2.3 Modes de rupture

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties, appelées lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. D'après G.R. Irwin [41], on peut distinguer trois modes de sollicitations représentés par la figure III.1. Ces trois modes sont chacun définis par le mouvement des deux surfaces de la fissure l'une par rapport à l'autre. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants :

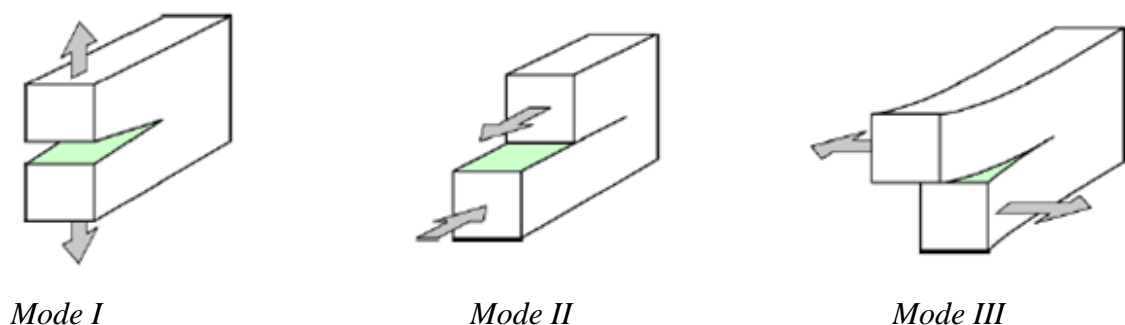


Figure III.1 : Modes de rupture.

- **Mode I** : Dit mode par ouverture (ou clivage), correspond à un écartement relatif des deux surfaces de la fissure par l'ouverture angulaire de celles-ci ;
- **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** : Dit cisaillement anti-plan, correspondant à un glissement transversal des deux surfaces de la fissure, en sens opposés, mais cette fois dans une direction parallèle au front de la fissure.

Des trois types de sollicitations, le mode I est considéré comme le plus sévère, et c'est pour cette raison que la plupart des études de la mécanique de la rupture ont été effectuées en utilisant ce mode ; cependant, une fois amorcée et pour des sollicitations mixtes ou des géométries complexes, la fissure a tendance à bifurquer, et reste donc rarement rectiligne (2D) ou plane (3D).

3.3 Mécanique linéaire et non linéaire de la rupture

Dans un matériau homogène soumis à une contrainte uni-axiale, l'effort se transmet d'un atome à l'autre en suivant des lignes de force qui sont parallèles. Dans un matériau qui possède une fissure, les lignes de force doivent contourner cette fissure, ce qui conduit à une concentration de ces lignes au voisinage de la pointe de la fissure, d'où une concentration de la contrainte dans cette région, appelée tête ou pointe de fissure. On observe deux types de rupture principaux suivant les mécanismes mis en jeu : une rupture fragile contrôlée par une contrainte normale, et une rupture ductile, précédée de déformations plastiques et contrôlée par les contraintes de cisaillement.

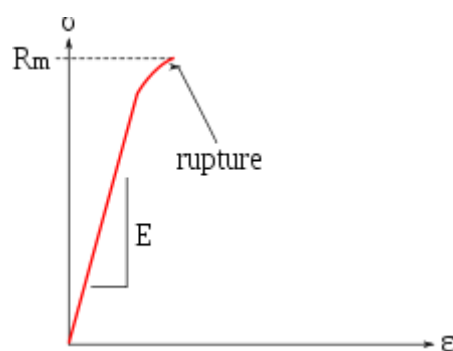


Figure III.2 : Exemple de rupture fragile.

Pour ces types de rupture, les déformations à rupture, l'énergie de rupture, les faciès de rupture sont différents.

De même, les sollicitations extérieures imposées auront une influence sur le mode 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 est précédée d'une déformation plastique importante (mécanique non linéaire de la rupture). L'aspect est granuleux, on observe souvent des cupules liées à une décohésion autour des inclusions. Dans ce cas, suivant l'étendue de la zone plastique en pointe de fissure, on différencie le cas de la plasticité confinée, de celle de la plasticité étendue, voir figure III.3.

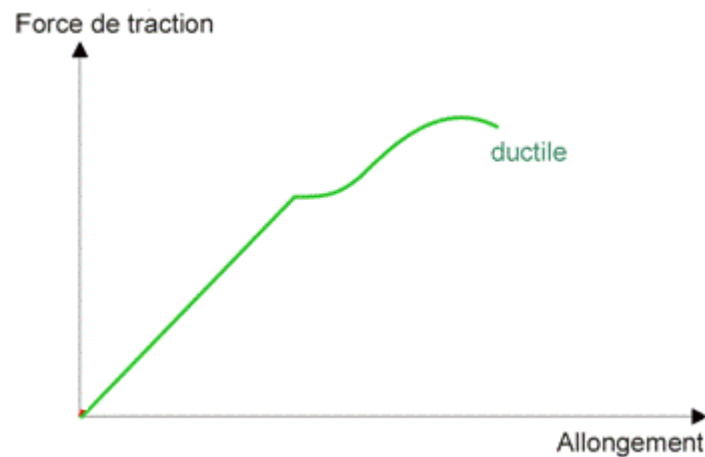


Figure III.3 : Exemple de rupture ductile.

3.4 Théorie de la mécanique de la rupture

3.4.1 Approche de Griffith

L'idée que les petites structures montrent généralement de plus hautes résistances que les plus grandes, a été reprise par Griffith dans les années 20 qui a étudié les phénomènes de la rupture du verre [42]. Il a fait les prédictions que chaque corps contient une distribution des imperfections ou des pailles et que la rupture se produit au plus grand de ces derniers. De plus grands corps ont une plus grande probabilité de contenir de plus grandes pailles et échoueront, ainsi, aux efforts inférieurs. Par ces prédictions il a présenté les notions fondamentales de la science de la mécanique de rupture. [42]

Dans le cas où la taille relative de l'axe mineur à l'axe principal est très petite, l'ellipse apparaîtrait car une fissure droite et une petite augmentation de la force appliquée au bout seraient suffisantes pour commencer une déchirure dans le matériau. En outre, il a noté que

l'augmentation de la longueur exagère l'effort important et la fissure continue à se propager de la manière caractéristique des fissures" [43].

A.A. Griffith [42] a supposé que la rupture soit un processus absorbant d'énergie et que pour propager une fissure, il faut fournir au matériau une énergie nécessaire correspondant à l'augmentation de l'aire de fissure. Il s'ensuit que l'instabilité de fissure se produisant lorsque l'énergie emmagasinée au moment de la propagation dépassera l'énergie nécessaire pour la création de nouvelles surfaces.

Si on considère un solide purement élastique d'épaisseur uniforme B, contenant une fissure elliptique de longueur «2a » soumis à un champ de contrainte axiale « σ », le changement net de l'énergie potentielle du solide (Fig. III.4) [42] :

$$W_p = \frac{\pi \cdot a^2 \cdot \sigma^2 \cdot B}{\acute{E}} \tag{3.1}$$

Avec : $\acute{E} = E(1 - \nu^2)$: Pour le cas de déformation plane.

Et $\acute{E} = E$: Pour le cas de contrainte plane.

Sachant que E est le module de Young et ν le coefficient de poisson.

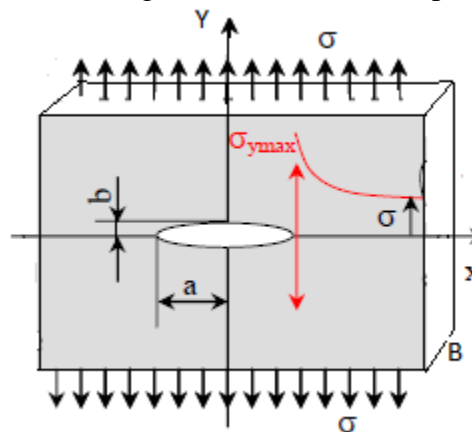


Figure III.4 : Schéma d'un solide contenant une fissure elliptique « 2a ».

$$W_s = 4 \cdot a \cdot B \cdot \gamma_s \tag{3.2}$$

Où :

γ_s : est l'énergie surfacique de rupture par unité d'aire. L'énergie totale du système est alors donnée par la formule (3.3) :

$$U = W_p + W_s = \frac{\pi \cdot a^2 \cdot \sigma^2 \cdot B}{\acute{E}} + 4aB\gamma_s \tag{3.3}$$

L'état critique pour le début de la progression de la fissure est [31] :

$$\frac{dU}{dA} = \frac{dW_p}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = -\frac{\pi \cdot a \cdot \sigma^2 \cdot B}{\dot{E}} + 2\gamma_s \quad (3.4)$$

Où :

$A=2aB$ est la surface rompue et dA dénote l'incrément d'accroissement de la fissure.

Notez que la superficie de deux surfaces rompues est $2A$. La contrainte critique pour le déclenchement de rupture est :

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \dot{E} \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a}} \quad (3.5)$$

Mais il y aura rupture spontanée dès que : $K = \sqrt{2E\gamma_s}$

Où K le facteur d'intensité de contrainte. Donc La contrainte critique peut être exprimée comme suit :

$$\sigma_f = \frac{K}{\sqrt{\pi a}} \quad (3.6)$$

3.4.1.1 Taux de restitution d'énergie

3.4.1.1.1 Définition de G et R

Supposons que le corps dans la figure III.1 est soumis à un chargement qui mène à la progression de la fissure. Un changement du bilan énergétique se produit d'une façon irréversible pendant la progression de la fissure. Une énergie spécifique est nécessaire pour faire propager la fissure au-delà de l'incrément dA . On peut définir R comme une résistance à la rupture : [19]

$$R = \frac{dW_s}{dA} \quad (3.7)$$

Il est nécessaire de considérer le changement d'énergie du système dû à l'incrément de rupture da de fissure surgissant des changements du travail externe et de l'énergie interne. Ceci est défini comme G, le taux de restitution d'énergie. Considérons un corps élastique de l'épaisseur uniforme B contenant une fissure de longueur soumise une force externe (F_{ext}) liée à un déplacement u. L'énergie mécanique totale du corps rompu W_p est :

$$W_p = \Phi - W_F \quad (3.8)$$

Avec Φ : est l'énergie de déformation élastique stockée ;

W_F : est le travail externe effectué par les forces externes.

En 1956, G.R. Irwin [36] a proposé d'approcher la caractérisation de la force d'entraînement pour la rupture dans les corps élastiques fissurés. Il a présenté le taux de restitution d'énergie G défini comme suit :

$$G = - \frac{dW_p}{dA} \tag{3.9}$$

Où $A=2aB$ est la surface rompue et dA dénote l'incrément d'accroissement de la fissure.

3.4.1.1.2 Expression du taux de restitution d'énergie G

Toute situation de chargement peut être considérée comme intermédiaire entre deux situations extrêmes

- Le chargement imposé
- Le déplacement imposé

Les figures III.5 et III.6 illustrent ces deux cas.

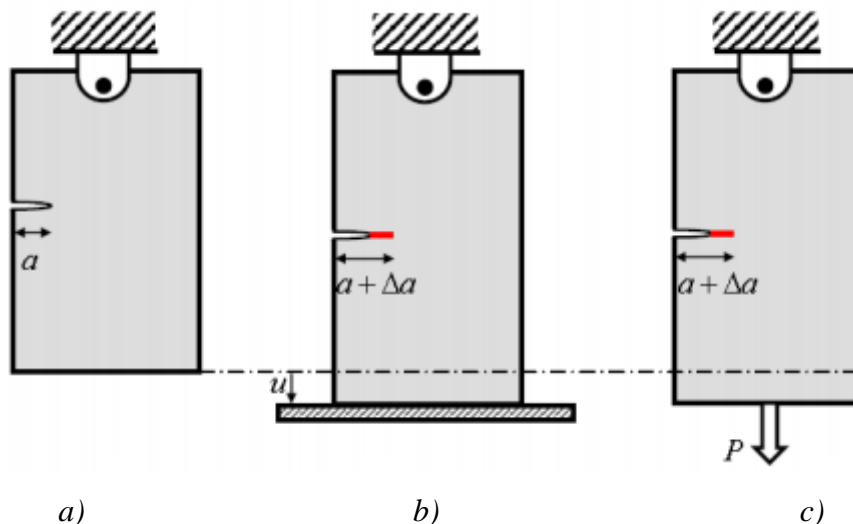


Figure III.5 : Propagation (a), déplacement (b) ou à force imposés (c).

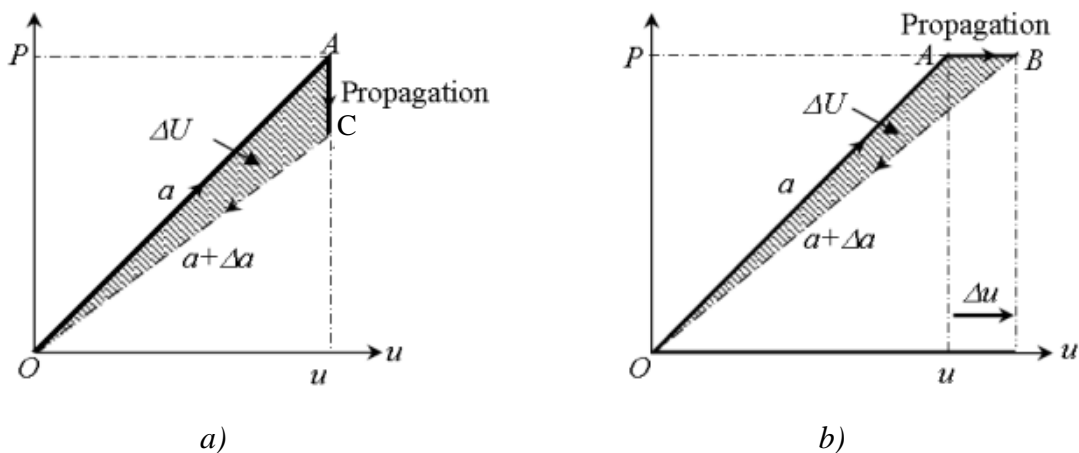


Figure III.6 : Rupture d'un corps sous : a) charge imposé, b) déplacement imposée.

3.4.1.1.3 Mesure de G dans le cas d'un effort imposé

Pour le cas d'une charge P constante, le taux de restitution d'énergie est représenté par l'aire du triangle OAB de la figure III.6a. Sous charge constante, l'éprouvette s'allonge d'un incrément Δu , ainsi le travail accompli par les forces extérieures durant l'accroissement infinitésimal de la fissure :

$$\Phi = \int_0^u P du = \frac{Pu}{2} \quad (3.10)$$

$$W_F = pu \quad (3.11)$$

Le théorème de Clapeyron des états linéaires élasto-statiques permet en résumé de dire que, le travail établi par les charges appliquées est égal au double de l'énergie de déformation élastique, $W_F = 2\Phi$ ainsi l'équation (3.10) sera dans ce cas :

$$W_p = -\Phi \quad (3.12)$$

$$\text{L'équation (3.1) sera : } W_p = -\Phi = -\frac{pu}{2} \quad (3.13)$$

Considérez un incrément de fissure de a à $a + \Delta a$, ceci cause un déplacement par accroissement de Δu sous la charge P . Le taux de restitution d'énergie pour le corps s'écrit :

$$G = -\frac{1}{B} \left(\frac{dW_p}{da} \right)_p = \frac{p}{2B} \left(\frac{du}{da} \right)_p \quad (3.14)$$

Définissant la complaisance C comme l'inverse de la rigidité ($C=u/P$), le taux de restitution d'énergie est donné par :

$$G = \frac{P}{2B} \cdot \left(\frac{du}{dC} \right)_p \cdot \left(\frac{dC}{da} \right)_p \quad (3.15)$$

En remplace u dans l'équation précédant en trouve :

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \left(\frac{dC}{da} \right)_p \quad (3.16)$$

3.4.1.1.4 Mesure de G dans le cas d'un déplacement imposé

Le déplacement imposé représenté dans la figure 2.3 ; pour le taux de restitution d'énergie G est représenté par l'aire située dans le triangle OAC. Pour un déplacement constant, u , seule l'énergie élastique peut être enregistré (W_F est égale à zéro) [[44-19].

À partir des équations 3.12 et 3.13, on conclut :

$$W_p = \Phi = \frac{Pu}{2} \quad (3.17)$$

Dans ce cas, le taux de restitution d'énergie est donné par :

$$G = -\frac{1}{B} \left(\frac{dW_p}{da} \right)_u = -\frac{u}{2B} \left(\frac{dP}{da} \right)_u \quad (3.18)$$

Définissant la complaisance C comme l'inverse de la rigidité ($C=u/P$), le taux de restitution d'énergie est donné par :

$$G = -\frac{u}{2B} \left(\frac{dP}{dC} \right)_u \left(\frac{dC}{da} \right)_u \quad (3.19)$$

$$\text{Donc : } G = \frac{P^2}{2B} \cdot \left(\frac{dC}{da} \right)_p \quad (3.20)$$

L'avance de la longueur de la fissure mène à une diminution nette du taux d'énergie de d'une quantité :

$$\delta\Phi|_u = -\frac{u\delta P}{2} \quad (3.21)$$

D'après ce qui précède, le taux de restitution d'énergie est indépendant du type de chargement. Ainsi dans un chargement à déplacement imposé ou à effort imposé, le taux de restitution d'énergie s'écrit :

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \left(\frac{dC}{da} \right) \quad (3.22)$$

La définition de G reste valide pour la déformation élastique linéaire et non-linéaire du matériau. G est en fonction de la charge (ou de déplacement) et de la longueur de la fissure critique du matériau. Le critère de Griffith pour le déclenchement de rupture dans un solide fragile (Equ. 3.5) peut être reformulé en termes de G tels que

$$G = \frac{\Pi \sigma_f a}{E'} = 2\gamma_s \quad (3.23)$$

Remarque :

Pour le cas où $G > R$, une partie de l'énergie disponible sert d'énergie de séparation, l'excès d'énergie se transforme en énergie cinétique et la propagation de la fissure peut devenir instable. Dans le cas contraire, si à tout moment $G = R$, on assiste à une propagation stable de la fissure et la rupture est dite contrôlée [44-19].

3.4.1.2 Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture

La solution de Westergaard-Irwin-Williams [44] pour les contraintes et les déplacements au voisinage de la pointe de la fissure est donnée par :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_R}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \dots \quad (3.24)$$

Où : σ_{ij} est le tenseur de contrainte,

K_R : facteur d'intensité de contrainte suivant le mode I de rupture. Il dépend de la longueur de la fissure, de la géométrie et des forces appliquées,

r : est la distance radiale de la fissure,

f_{ij} : est une fonction de θ , l'angle du plan de la fissure.

$$K_R = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.25)$$

La figure III.7 représente la variation de la contrainte devant la pointe de la fissure, la solution de Westergaard [44] implique que les contraintes approchent l'infini si r tend vers zéro (la singularité), le facteur d'intensité de contrainte K est donc un constant qui permet de mesurer la singularité des contraintes à r et θ donnés.

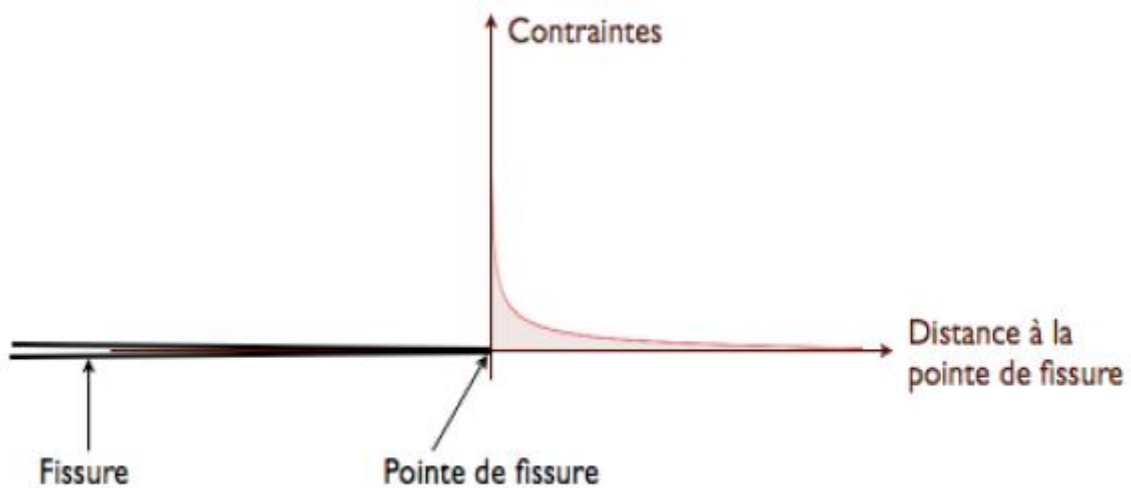


Figure III.7 : La variation de facteur d'intensité de contrainte.

La remarque la plus importante. [33] c'est que toutes les neuf composantes du tenseur de contrainte, ainsi que toutes les composantes du tenseur des déformations, sont entièrement définies par un seul constant, K autrement dit, si K est connu pour une situation donnée, toutes les contraintes et les déformations à la proximité de la pointe de la fissure peuvent être calculées à partir de l'équation (3.24).

3.4.2 Approche énergétique

La propagation de fissure est un phénomène d'énergie selon la théorie de Griffith. L'énergie consommée c'est la différence entre l'état énergétique du système avant et après fissuration.

Irwin [44] a montré que les approches énergétiques et celles basées sur l'intensité de contrainte sont équivalentes, 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 avec les facteurs d'intensité de contrainte :

$$G = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} \quad (3.26)$$

k_I et k_{II} sont les facteurs d'intensité de contrainte en mode mixte (I et II respectivement). Toutes les analyses ci-dessus, pour la mécanique de la rupture ne sont strictement valables que pour des matériaux isotropes, qui se comportent d'une manière parfaitement linéaire élastique. Quand il y a une petite quantité de déformation plastique à la pointe de la fissure la mécanique linéaire de rupture (LEFM linear elastic fracture mechanics) donne une bonne approximation du comportement de ces matériaux.

3.4.2.1 Facteur d'intensité de contrainte

La société américaine pour tests des matériaux (ASTM) sous la norme E399 [14], propose une possibilité pour déterminer le facteur (KIC). Et ce, en utilisant une variété d'éprouvettes fissurées par fatigue. La norme (ASTM) propose l'emploi d'éprouvette Traction Compacte « Compact Tension » (CT) (Fig. III.8a) ou l'éprouvette fissurée en Flexion Trois Points (SENB) (Fig. III.8b).

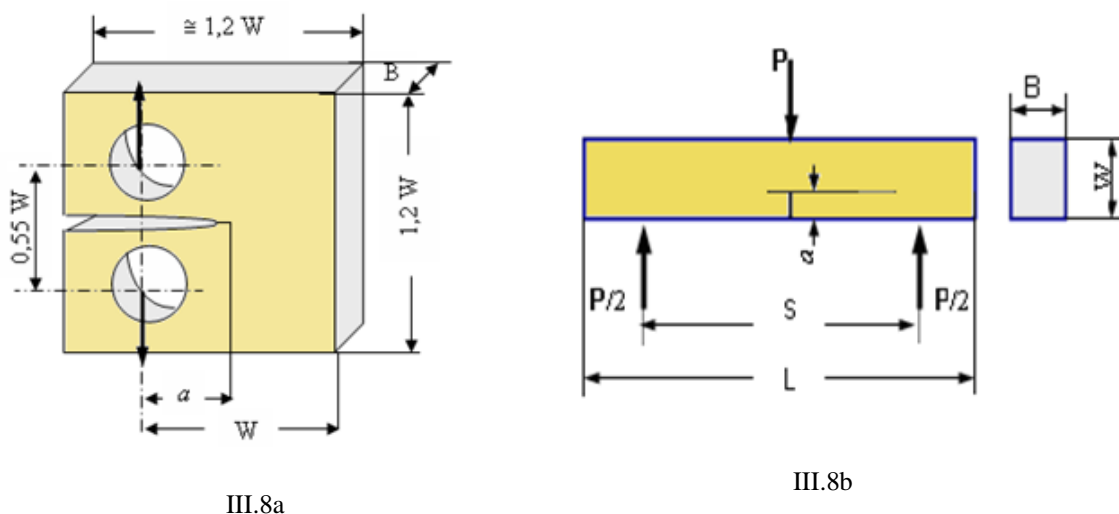


Figure III.8 : Éprouvettes proposées par ASTM en mode I.

La relation principale du facteur K_R , pour une éprouvette fissurée de dimensions finies et sollicitée par une contrainte uniaxiale en mode I, est la suivante :

$$K_R = Y\sigma\sqrt{a} \quad (3.27)$$

Le paramètre Y est un facteur de correction de la géométrie, représenté souvent en fonction du rapport a/W (longueur de la fissure sur la largeur de l'éprouvette). Dans le cas des matériaux fragiles, lorsqu'on fait accroître la contrainte appliquée, la rupture brutale survient à l'instant où K_R atteint une valeur critique K_{IC} . Donc au moment de la rupture, on a :

$$K_{IC} = Y\sigma_F\sqrt{a_c} \quad (3.28)$$

a_c : est la taille de défaut critique ;

σ_F : est la valeur de la résistance à la rupture de l'éprouvette.

3.4.2.2 Equivalence entre G_R et K_R

G.R. Irwin [33] a montré que K_R est relié à G_R . Cette relation est donnée par

$$G_R = \frac{K_R^2}{E} \cdot f(\nu) \quad (3.29)$$

E : est le module de Young

$f(\nu) = 1$ en contrainte plane (plaque mince)

$f(\nu) = (1 + \nu^2)$ en déformation plane (plaque épaisse)

À la différence de A.A. Griffith, G.R. Irwin ne limite pas le terme "G" à la seule énergie thermodynamique de surface mais l'étend à tous les mécanismes qui peuvent contribuer à l'extension de la fissure (microfissuration, plasticité...) [37].

3.4.2.3 Paramètres de rupture des matériaux orthotropes

Les paramètres de rupture relatifs aux éprouvettes de Traction Compacte (CT) pour un matériau orthotrope ont requis une attention particulière. La ténacité des composites stratifiés se calcule pour chaque test en utilisant l'approche des facteurs d'intensité de contrainte. Cette méthode a été utilisée précédemment par d'autres chercheurs pour la détermination de la ténacité à la rupture intra-laminaire des composites en utilisant des essais de traction compacte, applicable pour un matériau isotrope, le facteur critique d'intensité de contrainte pour une charge de rupture P , est donnée par la forme analytique suivante [19] :

$$K_R = \frac{P}{B\sqrt{W-a}} Y(\alpha) \quad (3.30)$$

Où

B : est l'épaisseur de l'échantillon, α est la profondeur de l'entaille relative ($= a_0 / W$) et $Y(\alpha)$, donnée par l'équation 3.31, est la fonction polynomiale formulée par J. E. Srawley [45] :

$$Y(\alpha) = \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} \cdot (0.886 + 4.64 \cdot \alpha - 13.32 \cdot \alpha^2 + 14.72 \cdot \alpha^3 - 5.6 \cdot \alpha^4) \quad (31)$$

Pour une plaque orthotropique uni-axiale avec une fissure soumise au mode d'ouverture, le taux de restitution d'énergie de Griffith, G_R , est liée au facteur critique d'intensité de contrainte comme suit [33] :

$$G_R = \frac{K_R^2}{\sqrt{2 \cdot E_x \cdot E_y}} \cdot \sqrt{\sqrt{\frac{E_x}{E_y}} + \frac{E_x}{2 \cdot G_{xy}} - \nu_{xy}} \quad (2.32)$$

Où

E_x , E_y , ν_{xy} et G_{yx} sont les caractéristiques élastiques effectives du composite.

Bien que les tests de rupture sur les éprouvettes (SENB) ne fournissent pas une totalité d'informations sur le comportement à la rupture du matériau composite (courte longueur rompue), ce type d'éprouvette demeure un outil appréciable pour la confirmation d'un ensemble de prédictions relatives à la rupture des matériaux : [14]

- Effet de l'épaisseur du matériau ;
- Effet du rapport a/W ;
- Effet du rayon du fond de fissure ;
- Effet d'orientation des fibres.

Les valeurs du facteur d'intensité de contrainte K_R , et du taux de restitution d'énergie G_R (Courbes-R), sont tracées en fonction de l'accroissement de la fissure. Ces courbes sont calculées à partir des données expérimentales en utilisant les équations 3.29- 3.31 (éprouvettes CT) Les valeurs intrinsèques de la résistance K_{I-ini} , G_{I-ini} correspondent à l'énergie de l'amorçage de la fissure dans le stratifié. Après l'initiation de la fissure, les courbes continuent de s'accroître pour atteindre un plateau. Ce dernier correspond à l'énergie nécessaire pour que la zone endommagée atteigne sa taille maximale, [14].

Chapitre IV

PARTIE EXPERIMENTALE

Nous présentons dans ce chapitre les caractéristiques et techniques expérimentales des matériaux utilisés pour l'élaboration des bétons composites stratifiés, ainsi que les essais exécutés.

4.1 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude sont :

- ❖ La résine polyester insaturé.
- ❖ La silice.
- ❖ Les fibres de jute.
- ❖ Marbre.

4.1.1 Résine

Les résines polyester s'adaptent bien à la transformation des composites à usage naval et présentent les propriétés générales suivantes : une bonne facilité de mise en œuvre de la résine liquide (imprégnation des renforts), une copolymérisation rapide par rapport aux époxydes, de bonnes propriétés mécaniques et isolantes, et peuvent aussi être colorées. La réaction est exothermique et la résine passe successivement de l'état liquide à l'état de gel puis à l'état de solide infusible (Figure. IV.1). La température de la résine augmente à partir du point de gel pour atteindre un maximum (entre 80 et 130°C) et redescend ensuite à température ambiante. Le point important de la copolymérisation est le temps de mise en œuvre qui correspond au temps de transformation de la résine avant qu'elle ne se gélifie [39].

La résine polyester insaturée c'est la résine la plus utilisée dans l'élaboration des matériaux composites. On trouve deux types de résine polyester :

- ❖ Polyester insaturée isophtalique.
- ❖ Polyester orthophtalique.

Dans notre cas, nous avons utilisé la résine polyester orthophtalique vu sa bonne aptitude à résister [39].

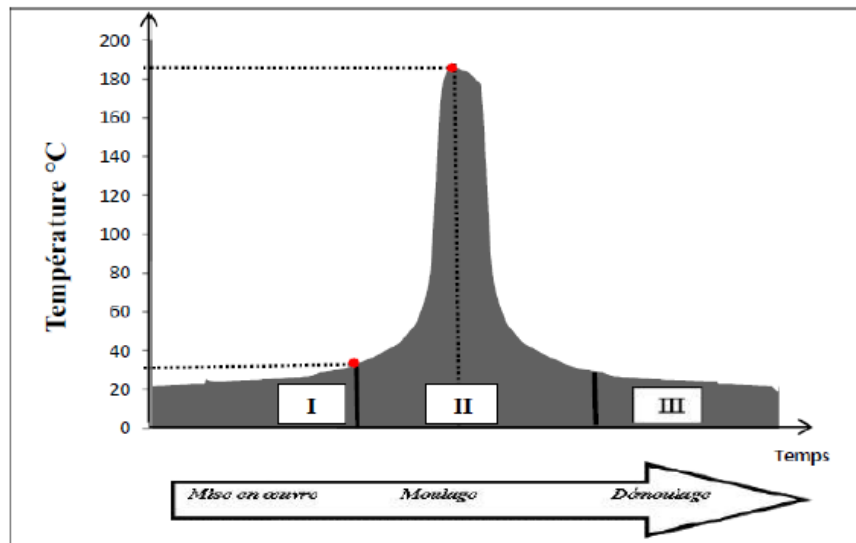


Figure IV.1 : Cycle de polymérisation de résine polyester (isophtalique).

4.1.2 Silice

Le sable de silice ou sable de quartz est Tamisé, traité par lavage, classé en fonction de sa granulométrie puis séché (Fig.IV.2). Il est de la région ouest Algérien.

Le traitement des sables s'effectue selon les différentes étapes suivantes : [39]

- ❖ Extraction mécanisée sélective,
- ❖ Homogénéisation,
- ❖ Criblage,
- ❖ Lavage et classification granulométrique.
- ❖ Attrition.
- ❖ Essorage.
- ❖ Réduction et stabilisation finale de l'humidité (dewatering).
- ❖ Séchage lorsque la définition du produit le nécessite.

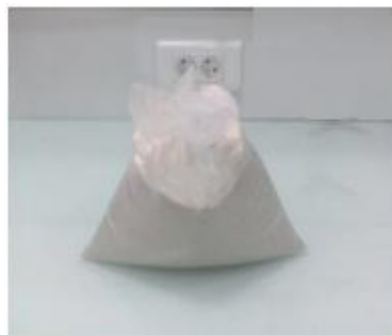


Figure. IV.2 : Silice.

4.1.3 Fibres de jute

Découpage : on découpe les fibres de jute en longueur des fibres de (400×400×20) mm (Figure. IV.3) en angle (60°,45°,90°,55°,30°).

Nous avons repassé nos plis de tissus de Jute en utilisant un fer à repasser, Cette technique a pour but d'obtenir de plis repassés pour faciliter le moulage [46].

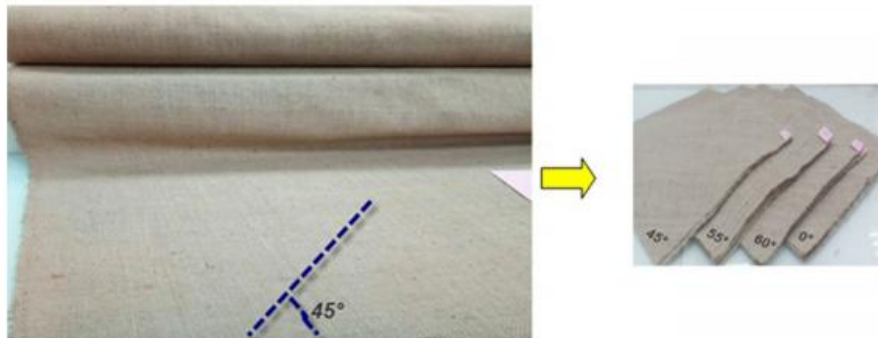


Figure IV.3 : Fibres de jute coupées (Après préparation).

La fibre de jute est constituée de 80 à 87 % de cellulose, le reste est de lignine. La longueur est de 1 à 5 mm et le diamètre est de 20 à 25 μm . Elle résulte de l'assemblage d'une dizaine ou plus de fibres élémentaires à section polygonale avec une ouverture centrale. Ces fibres sont ensuite tressées ou filées pour former les brins [47].

La transformation des fibres jute en fil passe par différentes opérations :

- Ouverture du jute.
- Ensimage : projection d'une émulsion d'huile dans l'eau sur le jute servant à humidifier les fibres et de permettre un meilleur glissement des fibres les unes sur les autres.
- Obtention des fibres de longueur régulière par cardage.
- Parfaire le parallélisme des fibres par étirage.
- Filage et mise en forme en Rolls.

Les principales caractéristiques physiques des fibres de jute sont présentées dans le Tableau. IV.1.

Tableau. IV.1: Principales caractéristiques physiques des fibres de jute [47] .

Caractéristiques physiques des fibres de jute	
Longueur de la fibre[mm]	2.5
Masse volumique g.cm ⁻³	1.48-1.50
Reprise en humidité (20°C-65% HR) [%]	16-18
Taux d'absorption d'eau [%]	25.4
Ténacité à sec [N.Tex ⁻¹]	0.3-0.6
Pert de Ténacité au mouillée (%)	Gain de 15-25
Résistance aux UV	Moyenne
Résistance aux micro-organismes	Moyenne

4.1.4 Le filler utilisé (marbre)

Le marbre est une roche métamorphique dérivant par écrasement, élévation de température de roche calcaire composé de calcite et de couleur blanche à l'état pur [48]. Les caractéristiques physiques de ce filler (marbre) sont présentées au tableau IV.2.

Tableau. IV. 2 : Caractéristiques physiques du marbre.

Propriétés physiques	Fine marbre
Masse volumique apparent (g.cm ⁻³)	0.83
Densité	2.67

4.2 Techniques expérimentales

4.2.1 Choix des éprouvettes

Pour refléter l'effet d'orientation des plis de tissu de jute sur le comportement en traction statique, nous avons élaboré cinq plaques stratifiées dont les plis de tissus de jute sont orientés selon cinq directions soit 90°,45°, 60°,55°,30° (Voir tableaux IV.3)

Tableau IV.3 : Différentes stratifiées élaborées.

Orientations	Compositions	Désignations
45°	[±45/BP/±45]	BP-45
90°	[±90/BP/±90]	BP-90
60°	[±60/BP/±60]	BP-60
55°	[±55/BP/±55]	BP-55
30°	[±30/BP/±30]	BP-30

BP : Béton polymère silice/marbre/résine.

4.2.2 Élaboration des plaques en Béton Polymère

La technique utilisée dans ce travail est le moulage au contact. Le moulage au contact est le procédé le plus utilisé pour la mise en œuvre des composites. Le moulage est réalisé à température ambiante. On met de la cire démoulant pour faciliter le démoulage de nos plaques stratifiées.

Dans un premier temps, on procède au moulage de deux plis de tissu de jute par la technique de moulage au contact. Dans la deuxième étape, nous avons malaxé la silice, dans un taux de 20% de résine et 20% marbre. Le mélange obtenu est versé dans le moule pour l'obtention de la deuxième couche (Béton polymère en polyester/silice/marbre).

En dernier, nous avons réalisé la troisième couche qui est similaire à la première couche (Composite Polyester / fibres de jute) [39]. En fin nous avons obtenu un matériau stratifié (voir Fig. IV.4).

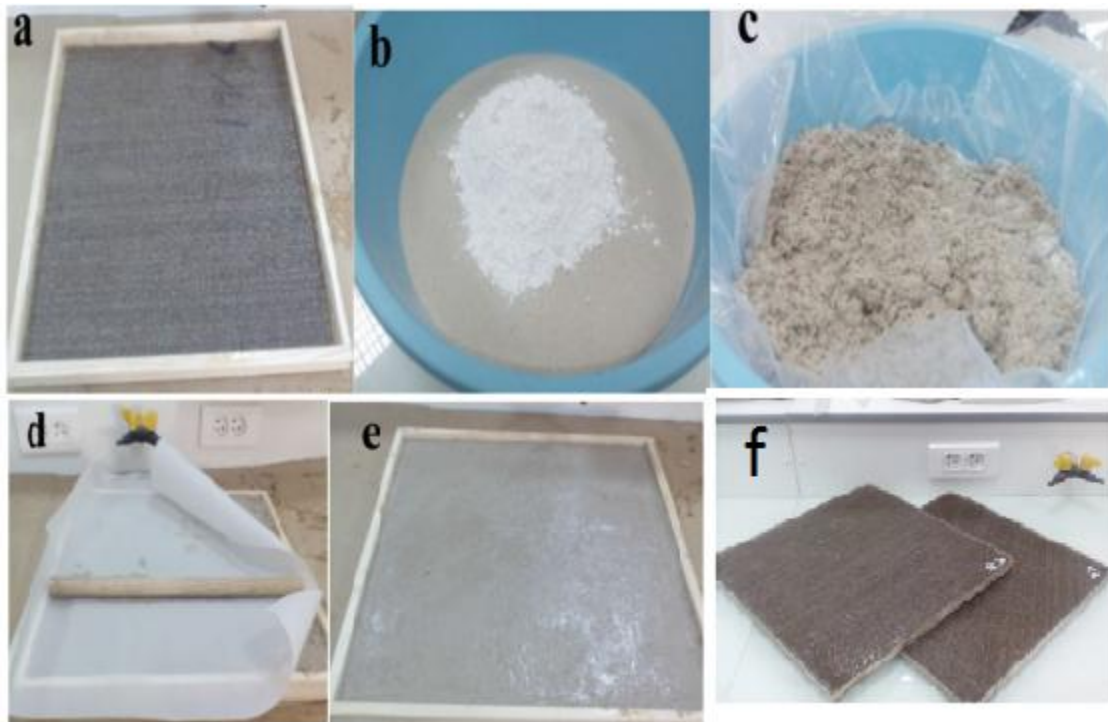


Figure IV.4: Plaque de béton polymère : polyester /silice /marbre/jute.

4.2.3 Préparation et présentation des échantillons CT

4.2.3.1 Phase de découpe en spécimen CT

La découpe est effectuée par le biais d'une tronçonneuse à table (Fig.IV.5), seize éprouvettes ont été réalisées, pour différentes orientations des fibres allant de 90, 60, 55,45 et 30 degrés.



Figure IV.5 : Découpe en spécimen CT.

4.2.3.2 Phase de polissage

Afin d'éliminer des défauts surfaciques, un polissage est plus que nécessaire, il est réalisé manuellement par un papier verre, afin d'y faciliter le travail durant cette étape, le polissage s'est effectué dans un bain d'eau.

4.2.3.3 Mesure et étiquetage des spécimens

Un étiquetage des spécimens est effectué de la manière suivante (Lettre +chiffre-chiffre)

Exemple

CT1-90

CT1 ; Échantillon 1.

90 ; l'angle d'orientations des fibres.

Des mesures de masse et de dimensions ont été réalisées.

4.2.3.4 Réalisation du perçage

Durant cette étape, la perceuse a colonne (voir Fig. IV.6) est utilisée à l'aide des forêts de différents diamètres (5mm, 8mm, 12mm, 16mm, 17 et 18 mm). L'utilisation des forêts béton est à éviter à cause des vibrations constatées, qui peuvent altérer la structure interne du béton polymère (délaminage, microfissures).

4.2.3.5 L'entaille

Pour ce faire une tronçonneuse a table est utilisée pour la réalisation de l'entaille la profondeur de l'entaille est de 42mm (voir Fig. IV.6).

4.2.3.6 Réalisation des préfissures (precrack)

La longueur minimale de la préfissure est de 0.1 B, B étant la largeur du spécimen, l'opération est effectuée à l'aide d'une scie à métaux, ayant une lame d'une épaisseur de 0.4 mm (voir Fig. IV.6).

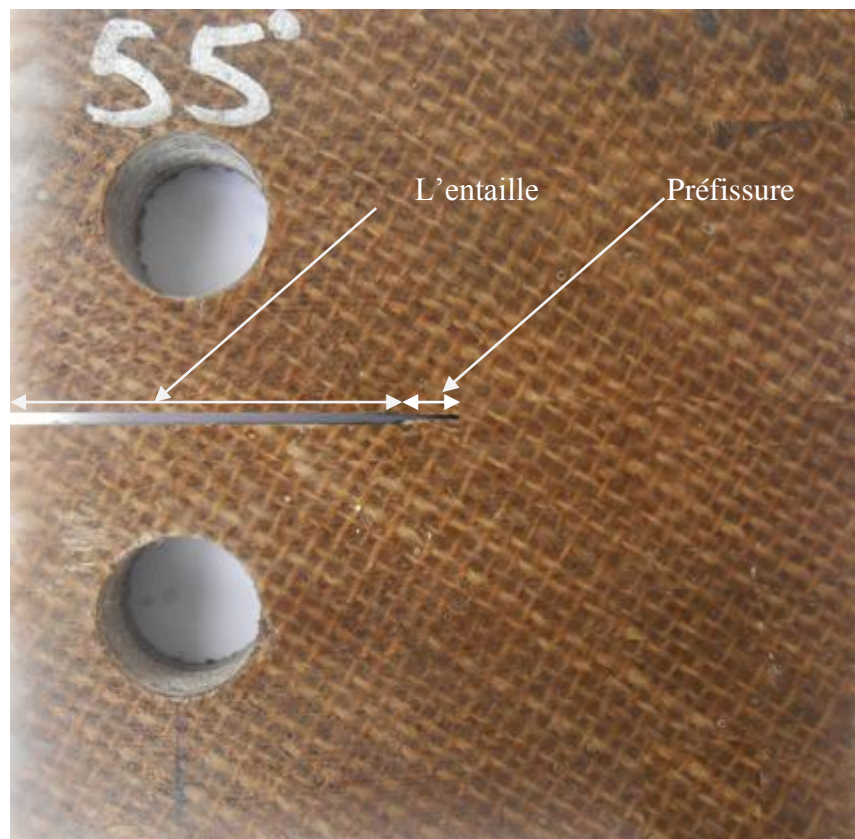


Figure IV.6 : Illustration de l'entaille et la pré fissure sur le spécimen CT.

L'ensemble des échantillons CT sont présentes dans le tableau IV.4

Tableau IV.4 : Configurations des matériaux stratifiés.

N°	Désignation	Structures (empilement)	Photographies
1	CT90	[±90/ BP /±90]	
2	CT55	[±55/ BP /±55]	
3	CT45	[±45/BP/±45]	
4	CT60	[±60/ BP /±60]	
5	CT30	[±30/ BP /±30]	

4.3 Essais mécaniques

Les essais mécaniques, menés sur la différente orientation d'éprouvettes CT, sont réalisés à température ambiante, la mesure des propriétés mécanique à la rupture des éprouvettes est effectués au niveau de laboratoire des matériaux non métallique à l'université de Ferhat Abbas de Sétif à l'aide d'une machine de traction de marque ZWICK/ROELL Z100 (Fig.IV.7), la vitesse de traverse étant maintenue constante, qui est fixée dans cette étude à 2mm/min. La machine d'essai est équipée à un capteur de force atteindre 100 KN).



Figure IV.7: La machine du test de l'accroissement de fissure.

Alors que les éprouvettes (CT) sont fixées à la machine par l'intermédiaire d'un dispositif de fixation conçu spécialement pour ce type d'éprouvettes (chapes et goupilles). La chape supérieure étant mobile par contre la chape inférieure est fixée au bâti, (Fig. IV.8). Les signaux analogiques délivrés par le capteur sont lus et sauvegardés en permanence (charge et déplacement).

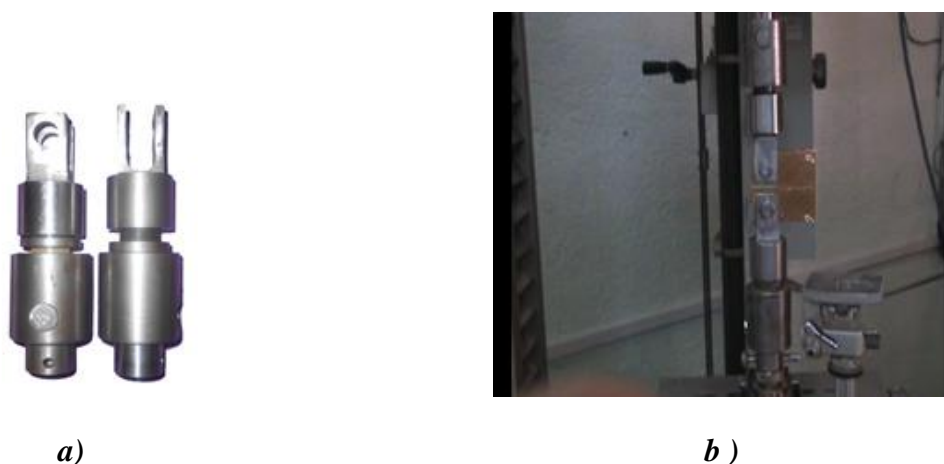


Figure IV.8 : a) dispositif de fixation, b) Essai de rupture sur les 'éprouvettes (CT).

4.4 Mesure de l'accroissement de fissure

Plusieurs techniques sont utilisées pour la détection de la prolongation de la fissure. Les exemples incluent l'émission acoustique, les ondes ultrasoniques, pénétration d'encre au fond de fissure et le changement de la complaisance de l'éprouvette avec l'accroissement de la fissure. Ces méthodes diffèrent dans leur exactitude, et sont plus ou moins adéquates pour un problème métrologique donné. De plus, il est difficile de distinguer entre la rupture de la matrice et celle des fibres lors de l'utilisation des méthodes citées ci-dessus. En revanche, la technique de Corrélation d'Image Digitale (CID) apparaît comme prometteuse. Dans cette étude, deux techniques sont utilisées pour la détermination de l'accroissement de la fissure :

- ❖ La technique de Corrélation d'Image Digitale (CID) ;
- ❖ La Méthode du Changement de la Complaisance de l'éprouvette avec l'accroissement de la fissure (MCC).

4.4.1 Technique de Corrélation d'Image Digitale CID

La CID est une méthode optique sans contact pour la mesure de déplacement et de champ de contraintes. Elle est développée principalement par M.A. Sutton et al. [49,50]. Cette technique est utilisée dans de diverses circonstances, par exemples :

- Surveillance du déclenchement d'un phénomène localisé, cas de concentration de contraintes dans un composite [51,52];
- Recherche des paramètres caractéristiques d'un matériau [53,54];
- Détermination du champ de contrainte ou de déplacement [55,56] ;
- Suivi de l'accroissement d'un défaut dans une structure (accroissement d'une fissure) [57,58].

Nous avons suivi trois démarches lors de l'application de la technique CID. Ces dernières sont : la préparation des éprouvettes, l'acquisition puis l'analyse des données.

4.4.1.1 Préparation de l'éprouvette

Le but d'adopter la technique CID dans cette étude est :

- L'analyse des séquences de rupture par le suivi de l'accroissement de la fissure le long de l'éprouvette (CT) ;
- Déterminer les accroissements de la fissure à chaque instant (t).

4.4.1.2 Acquisition des données

Pour prendre une photographie numérique de la surface engendrant le processus de rupture, un appareil photo numérique standard (*Sony*) est utilisé. La surface opérationnelle de

l'éprouvette (CT) est éclairée avec un tube fluorescent. La distance entre l'appareil photo et l'éprouvette est de 40 cm.

Le déroulement du processus de rupture est enregistré sur le disque dur par un software (Logiciel *Devis*) associé au système CID. Avant de démarrer le test de rupture, les données dimensionnelles relatives à l'éprouvette (CT) (dans notre cas longueur rompue $W-a$) sont introduites dans le logiciel. Il est à signaler que le logiciel *Devis* est conçu pour le traité des problèmes 2D, les accroissements de la fissure sont aisément obtenus. Dans notre cas, la position d'un fond de fissure à un instant (t_q) est déterminée par l'intermédiaire du logiciel *Devis*. Pour tout changement sur la photographie, prise par la technique CID durant le test à un instant (t).

4.4.2 Méthode du Changement de la Complaisance (MCC)

La MCC est un outil efficace pour déterminer l'accroissement effectif de la fissure dans un matériau composite. La complaisance peut être calculée à partir d'une courbe de charge-déplacement ($P-\delta$) [58-59], ou d'une courbe de charge-déplacement de l'ouverture de la fissure ($P-COD$) [60-61]. Dans la présente étude, nous avons utilisé la courbe ($P-\delta$) pour déterminer les complaisances.

La MCC suppose qu'une série d'éprouvettes, qui sont faites à partir du même matériel et ont la même géométrie et les mêmes dimensions, sont pré-fissurées de différentes longueurs d'entailles ($a_0, a_1, a_2 ; \dots \dots a_i$).

La figure IV.9 illustre le principe de la MCC. Entre le point O et le point A, aucun accroissement de fissure ne s'est produit au font de l'entaille. Ainsi, la courbe ($P-\delta$) est linéaire en cette région. Au point A, la fissure commence sa lente extension. Comme résultat, la courbe ($P-\delta$) commence à devenir non-linéaire. Sans doute, dans la région située entre le point O et le point A, la longueur de la fissure est constante (a_0) et l'approche de la MLER peut être directement utilisé pour calculer le facteur d'intensité des contraintes (K_R) à la pointe de la fissure [59,62]. Spécialement au point A, l'approche de la MLER convient aussi, à savoir, le K_{I-ini} peut être obtenu en insérant la charge P_A et la longueur de la fissure a_0 correspondant au point A dans une formule développée à partir la MLER. Au-delà du point A, l'approche de la MLER est considérée comme n'étant plus valable.

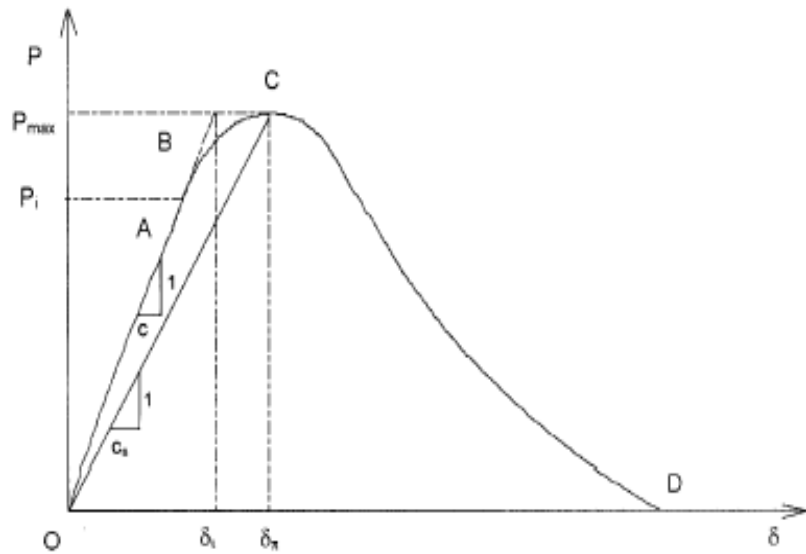


Figure IV.9 : Principe de la MCC.[54]

À partir d'un point arbitraire C sur la même courbe (P- δ), on peut tracer une ligne sécante OC (Fig. IV.8). Selon la MCC, la ligne sécante OC peut être considérée comme le segment linéaire d'une courbe de (P- δ) mesurée à partir d'une éprouvette avec une longueur initiale de la fissure a_c . De même, dans la région située entre le point O et le point C, la longueur de la fissure est constante (a_c) et l'approche de la MLER peut être directement utilisé pour calculer le Facteur d'intensité des contraintes (K_R) à la pointe de la fissure [62].

Sur la courbe (P- δ), une série de lignes droites OA, OB, OC, OD,etc, sont tracées dans la même coordonnée ou sont asymptotiquement superposées l'une par rapport à l'autre comme il est indiqué sur la figure IV.9. Quand le nombre de lignes droites est assez grand, une courbe lisse peut être tiré en joignant l'ensemble des points à l'extrémité des lignes droites A, B, C, D, E....., L, en commençant par le point d'origine O de la coordonnée. Il peut prévoir que cette enveloppe coïncidera avec la courbe (P- δ) mesurée d'une éprouvette possédant une fissure initiale a_0 .

Au point final du segment linéaire de n'importe quel point de la courbe (P- δ), la MELR convient. Ainsi, l'ensemble de processus de rupture avec un aspect de rupture non linéaires peut être résolu en superposant asymptotiquement une série de solutions linéaires obtenues par l'approche de la MELR (Fig. IV.10). En d'autres termes, une solution d'un point sur une courbe non linéaire (P- δ) peut être d'une manière équivalente résolue par l'approche de la MELR parce que : n'importe quel point sur la courbe (P- δ) peut être traité comme cas spécial de l'ensemble d'une série de cas linéaires. Cette prétention s'appelle aussi la prétention asymptotique linéaire de superposition [62-63].

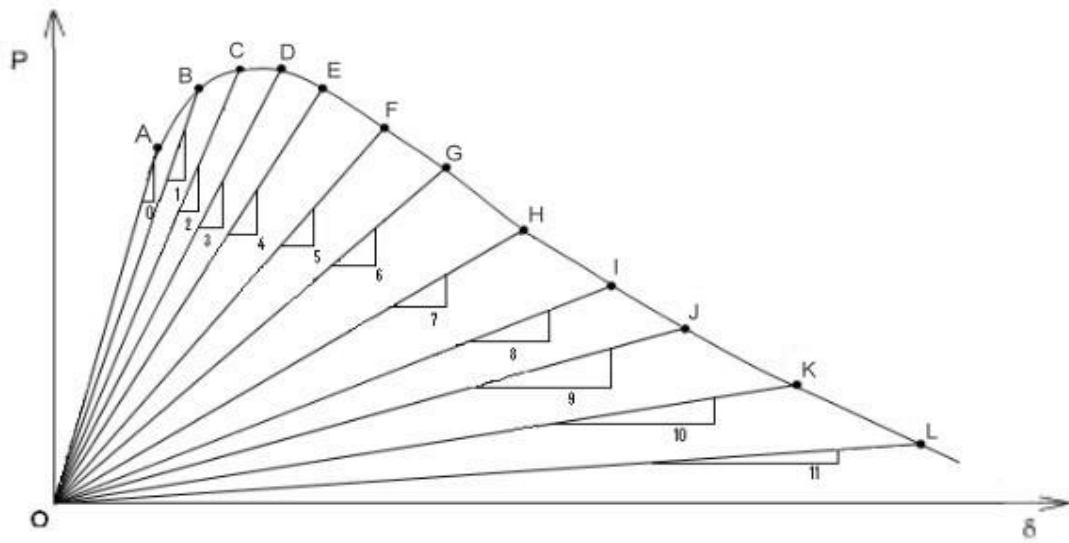


Figure IV.10 : Illustration de la MCC.

L'incrément effectif de l'accroissement de fissure pour deux cycles de (P-δ) successifs peut être calculé en employant l'expression de *Tada et al.* [64].

$$a_{n+1} - a_n = \frac{W - a_n}{2} \cdot \frac{C_{n+1} - C_n}{C_{n+1}} \quad (4.1)$$

Où

a_n, a_{n-1} : sont les longueurs de la fissure à deux cycles successifs.

$W - a_n$: est le ligament non rompu de l'éprouvette après n cycles.

Durant cette étude, la MCC est adoptée pour le calcul de l'accroissement effectif de la fissure lors de la rupture statique des éprouvettes CT.

Chapitre V

RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE V

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce chapitre, une synthèse des essais mécaniques, menés sur les bétons polymères stratifiés renforcés par les fibres végétales de jute est présentée.

V.1.Reproductibilité des expériences

Les superpositions des courbes (P- δ) relatives aux différentes d'orientations sont représentées sur la figure 5.1.

Ces résultats sont obtenus à partir d'un test de traction sur une machine de traction **ZWICK/ROELL Z100**.

La figure 5.1 présent l'évolution de la charge P(N) en fonction de déplacement(mm) sur les éprouvettes compactes tensions (CT) relative aux différentes orientations des fibres (90° - 60° - 55° - 45° et 30°).

Aussi sur la figure 5.2 ou on trouve les cas possibles du déplacement de font de fissure.

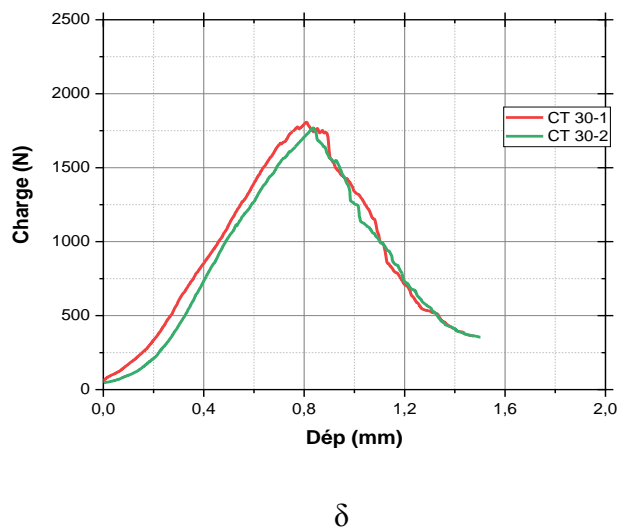
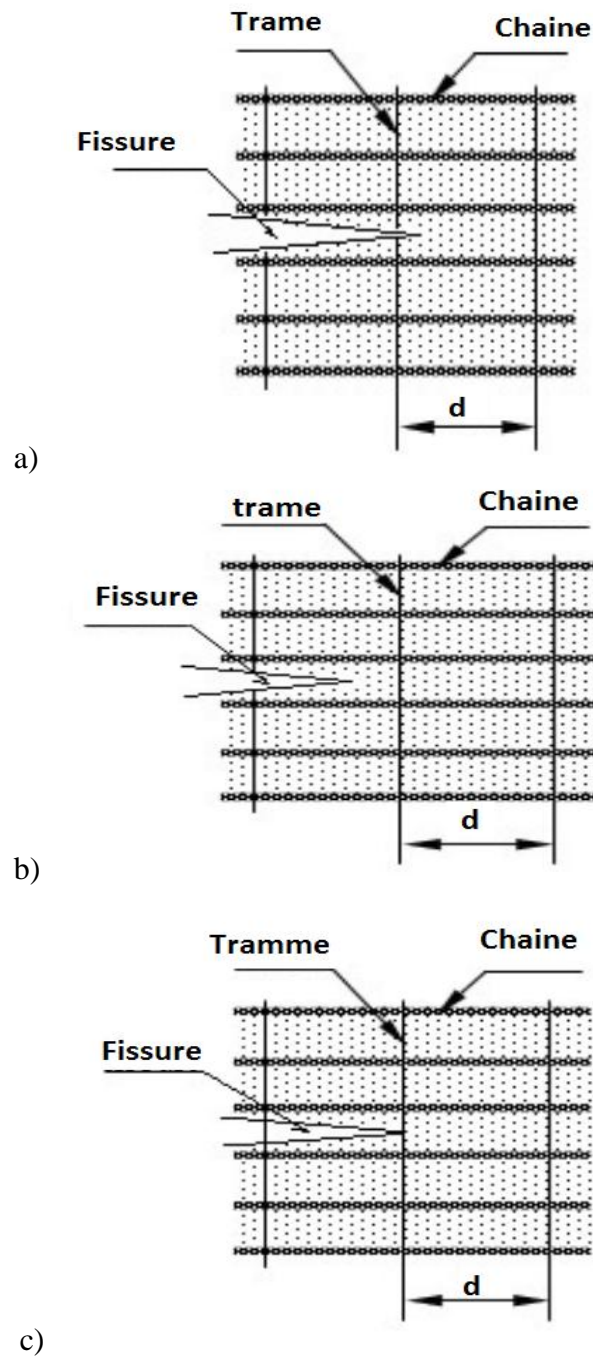


Fig. 5.1. Reproductibilité des différents stratifiés étudiés



d) Fig. 5.2. Cas possibles d'emplacement du fond de fissure dans les éprouvettes CT.

la figure 5.2 ou on trouve les cas possible du déplacement de font de fissure.

Trois cas peuvent se présenter :

- Cas 1 : fond de fissure situé juste après la trame (Fig. 5.2a).
- Cas 2 : fond de fissure située à une distance inférieure à $d/2$ de la trame (Fig. 5.2b) ;
- Cas 3 : fond de fissure confrontant directement la trame (Fig. 5.2c) ;

V.2. Analyse des courbes charge déplacement (P- δ)

L'évolution des courbes charges/déplacements (P- δ) relatives au différent orientation des fibres de jute fig.5.1 présents une allure presque similaire des courbes (P- δ) de la même classes d'orientation.

L'histogramme de la figure 5.3 représente les barres de variation de la charge maximale durant le test.

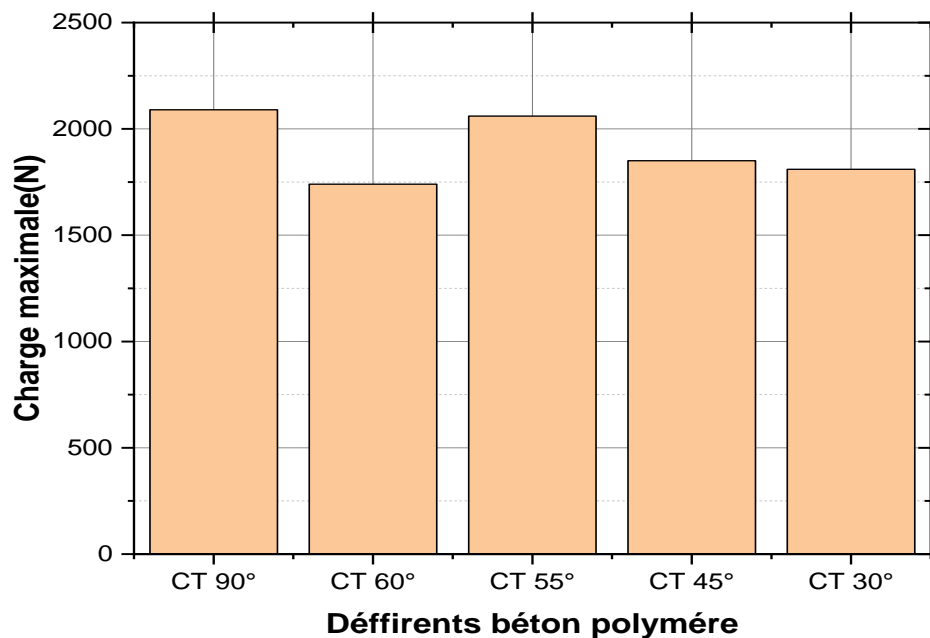


Figure 5.3 : Paramètres de traction des éprouvettes testées (Charge maximale)

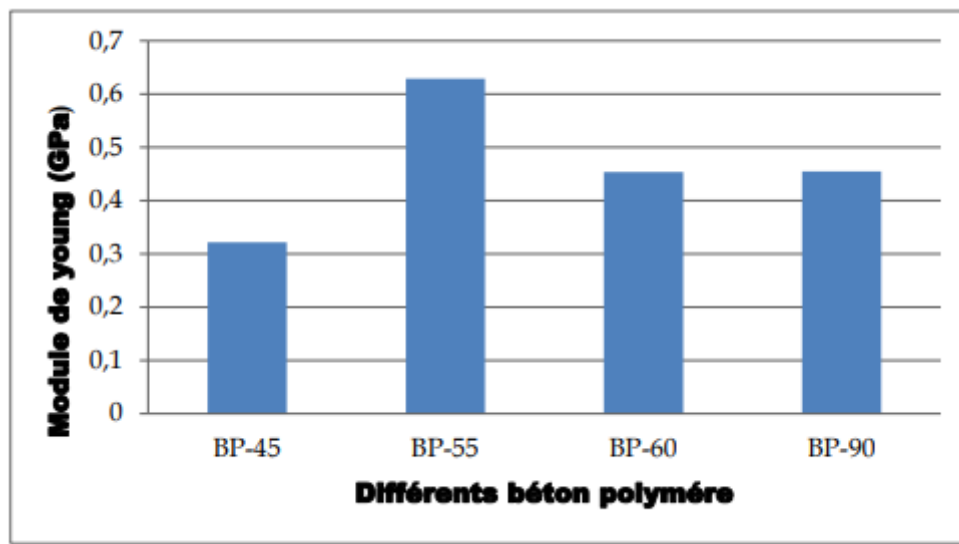
Pour pouvoir refléter l'effet du l'orientation de tissu de des jute sur le comportement mécanique des différents Bétons Polymères, nous avons dressé l'histogramme de la (**Figure 5.4**) Des améliorations en contrainte de traction des Bétons Polymères à fibres sont observées quand l'orientation de plis du jute est appliquée.

Les différents niveaux de charges déterminés à partir d'une combinaison des valeurs

obtenues par l'essai de rupture (courbe (P- δ)) et par les photos réalisées par la technique CID.

Eprouvettes	Charge (N)
	Charge maximale
CT 90°	2090
CT 60°	1740
CT 55°	2060
CT 45°	1850
CT 30°	1770,31

L'effet de l'ajoute de différentes l'orientation de plis (45°,55°,60°,90°) dans le béton polymère est représentée .le matériau BP-55 enregistre le module en traction le plus important 0,629 GPa. nous remarquons les éprouvette BP-60 et BP-90 ont le même module de young alors le même rigidité. Cette différence de rigidité entre les matériaux BP-60 et BP-45 qui l'ordre 39,75% augmentation moyenne par rapport BP-90 et BP-45 et BP-60 plus rigide.



5.1 Analyse des Courbes-R

Les Courbes-R relatives aux stratifiés fissurés étudiés) sont déterminées sous l'hypothèse d'un comportement linéaire élastique.

- Le premier niveau est une propagation stable de la fissure qui est caractérisé par une augmentation progressive en valeurs du facteur d'intensité de contrainte et le taux de restitution d'énergie
- Le deuxième niveau, est une progression selon une valeur au plateau est observée durant ce niveau.

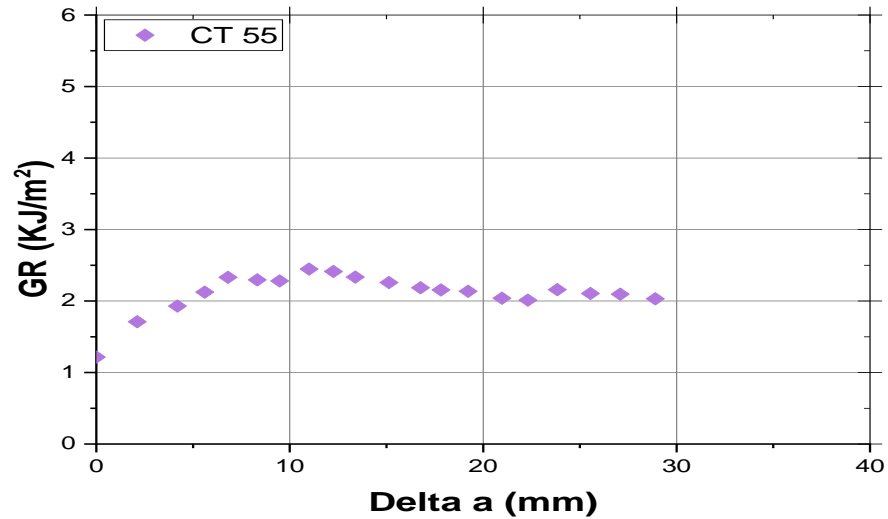


Figure V.11 : Évolution de la Courbe -R (Gr).

Le taux de restitution sur l'ensemble des éprouvettes présente un plateau stable à l'exception de de l'éprouvette CT60°, ceci est dû l'épaisseur de la partie centrale, béton polymère, qui est de 6cm.

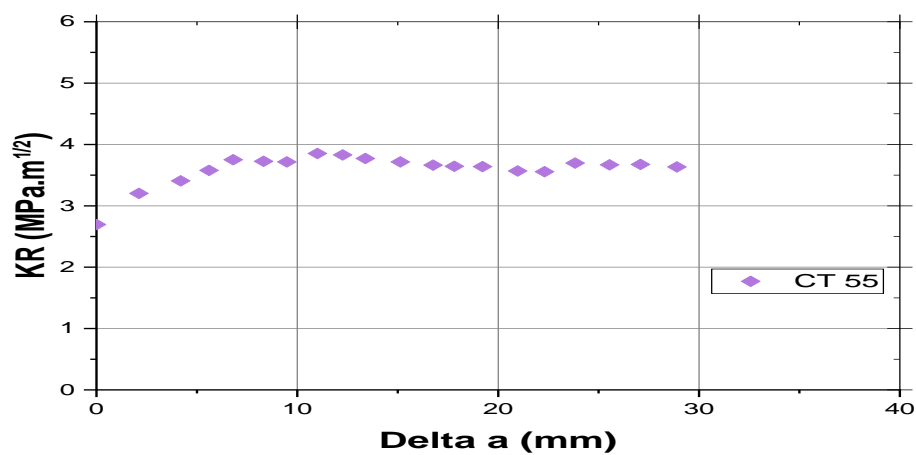


Figure V.12 : Évolution de la Courbe-R (Kr).

CONCLUSION GENERALE.

Notre travail s'intéresse à l'analyse du comportement du béton polymère stratifié à fibres végétales et déchets minéraux, et sa caractéristique en traction et flexion statiques. Les résultats des tests menés sur les différentes éprouvettes stratifiées ont un comportement linéaire élastique jusqu'à rupture. Nous avons pu déterminer les caractéristiques du béton polymère stratifié. Le résultat des tests sur les éprouvettes en béton polymère renforcé par les fibres de jute et filler de marbre ont montré que : En flexion la contrainte à la rupture dans le Béton Polymère renforcé par des fibres de jute et marbre traitées à 90° de (BP-90) enregistre la valeur la plus élevée. Cette amélioration est de l'ordre de 4,57% plus importante que celle enregistrée par le Béton polymère (BP-45). La valeur du module la plus élevée est obtenue par le composite BP-60 donné la meilleure valeur en rigidité. , la différence de rigidités entre les matériaux BP-55 et BP-45 qui l'ordre 5,95% augmentation moyenne par rapport BP-90 et BP-60 plus rigide. Les résultats des tests en traction montrent que l'éprouvette (BP-55) enregistre la valeur la plus élevée. ette amélioration est de l'ordre de 6,88% plus importante que celle enregistrée par le Béton polymère (BP-90).

Références bibliographiques

- [1] BOUGUESSIR Hamza. Contribution à l'étude de l'endommagement en statique du béton polymère a fibres minérales et végétales : approche expérimentale et numérique, thèse doctorat, Université Larbi Tebessi– Tebessa. 2019.
- [2] HAMELIN p. Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites. Techniques de l'Ingénieur, Réf : AM5615, Publié : 10 avril 2002.
- [3] LATELLI Hanane. Étude du comportement mécanique du béton polymère renforcé par des fibres végétales et déchets minéraux, mémoire master, université Mohamed Boudiaf - m'sila, 2018.
- [4] BELFERRAG Allaoua , Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes, Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016.
- [5] MAURICE Reyne. Technologies des composites, 3^{ème} édition revue et augmentée, éditions Hermès, Paris, 1998.
- [6] JEREMIE Aucher. Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable », thèse de doctorat, INSA de Rouen, France, 2009.
- [7] BOUFAIDA Zakaria. Analyse des propriétés mécaniques de composites taffetas verre/matrice acrylique en relation avec les propriétés d'adhésion des fibres sur la matrice », thèse de doctorat, , l'université de lorraine, France, 2015.
- [8] VIEIRA, M., Concrete, in: Gonçalves, M.C., Margarido, F. (Eds.). Materials for Construction and Civil Engineering. Springer, Switzerland, pp. 185-236. 2015.
- [9] BARON, J ,OLLIVIER,J. P. Les bétons, bases et données pour leur formulation. Edition Eyrolles, Paris. 522p. 1996.
- [10] LAAREJ Merad. Etude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite STM, thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Janvier 2010.
- [11] MOHAMADI Sadiika. Cour matériaux composites, 2013 – 2014, Université de Bouira.
- [12] RAGOUBI Mohamed. Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne, thèse de doctorat Université de Henri Poincare Nancy 1, 2010.
- [13] MERDAS Abde-Elghani. Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA, thèse de magister, Université des frères Mentouri-Constantine 2005 .
- [14] Cours matériaux composites : Propriétés Élastique des plis unidirectionnels approchent micromécanique, www.antoinechateauinois2000.fr
- [15] GORNET Laurent. Généralités sur les matériaux composites.
- [16] BADEL Pierre. Analyse mésoscopique du comportement mécanique des renforts tissésde composites utilisant la tomographie du comportement mécanique des renforts tissés decomposites utilisant la tomographie aux rayons X, thèse de doctorat, École Doctorale Mécanique Énergétique, Génie Civil, acoustique (MEGA)2008.

- [17] KHENFER, M. M. Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques, Thèse de docteur, université de Bordeaux, Juin 1990.
- [18] BERTHELOT, J.M. Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer New York. 1999.
- [19] ROKBI. M. Étude du comportement mécanique du stratifié polyester-fibre de verre, thèse Doctorat Sétif ,2012.
- [20] ISMANS. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés Jean-Marie Berthelot P71
- [21] GENDRE Lionel, Matériaux composites et structures composites. <http://www.si.ens-cachan.fr> , Sciences de l'ingénieur, 2011.
- [22] NGUYEN Anh Vu. Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques. Thèse de docteur, Université Deblaise Pascal – Clermont 2016.
- [23] ELALAOUI, Oussama. Optimisation de la formulation et de tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde, thèse de doctorat, université de Tunis, ELManar, février 2012.
- [24] BELKACEMI Cherifa, « étude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renforts en matière végétale », mémoire magister, université M'Hamed Bouguerra Boumerdes2006
- [25] ROUAM Kamila. Élaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles », mémoire magister, Université M'hamed Bougara -Boumerdes 2014.
- [26] YAHIAOUI Lamia. Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss)», mémoire magister, Université Ferhat Abbas ,Setif 2011,
- [27] CARMA. Glossaire des matériaux composites renforcés des fibres d'origine renouvelable », centre d'animation régional en matériaux avancés, Décembre 2006
- [28] MOKTARI Abdessamed. Influence des ajouts de fins minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibre végétales de palmier dattier, Université de Kasdi Merbah Ouargla option génie civil, novembre 2006.
- [29] BOUZOUITA Sofien. Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel, thèse doctorat, école centrale de Lyon, France, janvier 2013.
- [30] DEBIPRASAD G, KOUSIK D, PALASH P et SUBHANKAR M. Jute Composites as Wood Substitute. International Journal of Textile Science 2012, 1(6) : 84-93.
- [31] Sites d'internet : (<http://www.eti-construction.fr/le-béton-polymère-a-la-fois-leger-et-resistant-5014/>).
- [32] Sites d'internet : (<http://icommentfaire.com/maison/quelle-est-béton-polymère.html>). <http://www.aac-mo.com/qu-est-ce-que-beton-polymere.html>.
- [33] ELALAOUI Oussama. Optimisation de la formulation et de tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde, thèse de doctorat, Université de Tunis EL Manar, février 2012.
- [34] Dossier-technique-[poly composite, Le béton polymère sur mesure].
- [35] Site d'internet <http://www.aac-mo.com/qu-est-ce-que-beton-polymere.html>.

- [36] HADJ MELIANI M, AZARI Z, PLUVINAGE G et MATVIENKO YUG. The effective T-stress estimation and crack paths emanating from U-notches. *Eng Fracture Mech*2010;77(11):1682–92.
- [37] RICHARDSON DE et GOREE JG. Experimental verification of a new two parameter fracture model. *Fracture mechanics: twenty-third symposiums. ASTM STP 1189, 1993. p. 738–50.*
- [38] CHAO, Y. J et JI, W.1995. Cleavage Fracture Quantified by J and A2,"Constraint Effects in fracture: Theory and Applications Second Volume, ASTM STP 1244, eds., M. Kirk and A. Bakker, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 3-20.
- [39] ANGGIT Murdani, CHOBIN Makabe, AKIHIDE Saimoto, YOSHIKI Irei et TATSUJIRO Miyazaki. Stress concentration at stop-drilled holes and addition of holes. *Engineering Failure Analysis* 15 (2008) 810–819.
- [40] THOMAS SB, MHAISKAR MJ et SETHURAMAN R. Stress intensity factor of circular hole and inclusion using finite element method. *Theor Appl. Fract. Mech* 2000;33:73–81.
- [41] IRWIN G.R.. Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate, *J. Appl. Mech. Transactions*, 24(3):361–64, 1957.
- [42] A.A. Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Proc. Roy. Soc. Lond.*, A221, 163–97, 1920.
- [43] C.E. INGLIS. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners, *Trans. Inst. Naval Arch.*, London, 55:219-230, 1913.
- [44] NATECHE Tahar Réhabilitation et Renforcement des Canalisations sous pression en présence des défauts de surfaces THÈSE Magister 2012.
- [45] SRAWLEY J.E.. Wide range stress intensity factor expressions for ASTM E399 standard fracture toughness specimens, *Int. J. Fracture*, 12(6): 475–476, 1976.
- [46] ROKBI M. BAALI · B. · Z. E, RAHMOUNI A et LATELLI H. Mechanical properties of polymer concrete made with jute fabric and waste marble powder at various woven orientations 5 April 2019 *International Journal of Environmental Science and Technology*.
- [47] BOURAHLI Mohamed El Hadi. Caractérisation d'un composite verre / époxy », mémoire Doctorat en science, université FERHAT ABBAS-Setif 2014
- [48] LAGATTU F., BRIDIER F., VILLECHAISE P. et BRILLAUD J. In-plane strain measurements on a microscopic scale by coupling digital image correlation and an in situ SEM technique, *Mater. Charact.*, 56(1):10–18,2006.
- [49] SUTTON M.A., WOLTERS W.J., PETERS W.H., RANSON W.F, et S.R. McNeill. Determination of displacements using an improved digital correlation method, *Image Vision Comput.*, 1(3):133–139, 1983.
- [50] SUTTON M.A., CHENG M., PETERS W.H., CHAO Y. S. et MCNEILL S. R.. Application of an optimized digital image correlation method to planar deformation analysis. *Image Vision Comput.*, 4(3):143–50,1986.
- [51] LI M., ZHANG J., XIONG C.Y., FANG J., LI J.M., HAO Y. Damage and fracture prediction of plastic-bonded explosive by digital image correlation processing. *Opt. Laser Eng.*, 43(8):856–68, 2005.

- [52] GONZÁLES L et KNAUSS W.G. Scaling global fracture behavior of structures-size delaminated composites, *Int. J. Fracture*, 118(4):363–94, 2002.
- [53] CATALANOTTI G, CAMANHO P, XAVIER J. R, C. G. DÁVILA, A.T. Marques. Measurement of resistance curves in the longitudinal failure of composites using digital image correlation, *Comp. Sci. Tech.*, 70(13):1986–93, 2010.
- [54] YONEYAMA S., ORIMOTOY et AKASHIM, M. T. Automatic evaluation of mixed-mode stress intensity factors utilizing Digital Image Correlation. *Strain*, 42(1):21–29, 2006.
- [55] TAY C.J., QUAN C., HUANG Y.H., FU Y. Digital image correlation for whole field out-of-plane displacement measurement using a single camera, *Opt. Commun.*, 251 (1-3):23–36, 2005.
- [56] LAGATTU F., RIDIERF. B, VILLECHAISE P., BRILLAUD J. In-plane strain measurements on a microscopicscale by coupling digital image correlation and an in situ SEM technique, *Mater. Charact.*, 56 (1):10–18, 2006.
- [57] MOUHMI B., IMAD A., BENSEDDIQ N. et LECOMPTE D. An experimental analysis of fracture mechanisms of short glass fibre reinforced polyamide 6,6 (SGFR-PA66), *Comp. Sci. Tech.*, 69(15-16):2521–26, 2009.
- [58] ROKBI M., OSMANI H., BENSEDDIQ N. et A. IMAD. On experimental investigation of failure process of woven fabric composites, *Comp. Sci. Tech.*, 71(11):1375–84, 2011.
- [59] KARIHALOO B. L et NALLATHAMBI P. Effective crack model for the determination of fracture toughness KIC of concrete. *Eng. Fract. Mech.*, 35(4-5):637–45, 1990.
- [60] KOSTOPOULOS V., Y.P. MARKOPOULOS. On the fracture toughness of ceramic matrix composites. *Mat. Sci. Eng.A*; 250(2):303–12, 1998.
- [61] ZHANG X. et XU S. A comparative study on five approaches to evaluate double-K fracture toughness parameters of concrete and size effect analysis, *Eng. Fract. Mech.*, 78(10):2115–38, 2011.
- [62] KARIHALOO B et NALLATHAMBI P. An improved effective crack model for the determination of fracture toughness of concrete, *Cement Concrete Res.*, 19(4):603–610, 1989.
- [63] XU S. et REINHARDT H.W.. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams, *Int. J. Fracture*, 98(2):151–77, 1999.
- [64] TADA H. et PARIS P. et IRWIN G. *The Stress Analysis of Cracks, Handbook*. Del Research Corporation, 1973.
- [65] GONZALES L. et KNAUSS W.G. Scaling global fracture behavior of structures-sized laminated composites, *Int. J. Fracture*, 118(4):363–94, 2002.
- [66] ROKBI M., IMAD A. et OSMANI H. et BENSEDDIQ N. Prediction of intralaminar fracture toughness of two directional glass fiber reinforced polyester laminated composite plate, *Int. Rev. Mech. Eng.*, 1(5):487–94, 2007.
- [67] ROKBI M. et OSMANI H. Contrôle simultané de l'extension de la zone endommagée (Mode I) de la matrice polyester renforcée par des fibres de verre. 16ème Congrès Français de Mécanique, Nice, 2003.