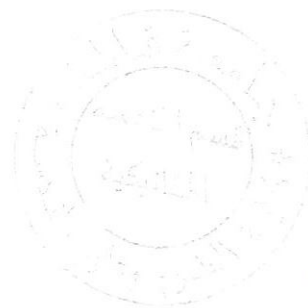


Faculté des Sciences et de l'Ingénierie

Département de G. Mécanique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

**Fabrication et caractérisation de matériaux
composite en renfort naturel (fibre de cactus)**

Option

Productique Mécanique

Par

M^r BOUAKBA Mustapha

DIRECTEUR DE THESE : BEZAZI Abderrezak M.C. Université de Guelma

Devant le jury :

PRESIDENT : OUELAA Nouredine Pr Université de Guelma

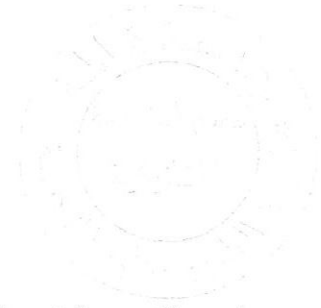
EXAMINATEURS : REDJEL Bachir Pr Université de Annaba

BELBEH Ahmed M.C. Université de Guelma

YALLESE M^{ed} Athmanne M.C. Université de Guelma

Année 2008

RÉMERCIEMENTS



Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Monsieur le Docteur BEZAZI Abderrezak, pour la confiance et l'attention qu'il m'a accordés tout au long de ce travail, son aide et son sens de la motivation m'ont été très utile pour mener à terme ce travail.

J'adressé également mes remerciements les plus vifs à Monsieur le Pr. OUELAA Nouredine, Professeur à l'université de Guelma pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de soutenance.

Je remercie aussi Monsieur le Professeur Pr. REDJEL Bachir, Professeur à l'université d'Anna ba, Dr.YALLESE M^{ed} Athmanne Maître de conférence à l'université de Guelma, et BELBAH ahmed Maître de conférence à l'université de Guelma qui ont accepté d'être examinateurs de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement mes collègues et tous mes aimes sur tout ; Mr. BOUKHAROUBA Wahid, MDDORE Khales , et KEBABSA TAREK .

Résumé

La recherche de nouveaux matériaux est l'objectif primordial des industriels du point de vue intérêt à la fois technologique, économique et écologique. Pour cela, plusieurs travaux ont été menés sur les matériaux composites à renfort naturel. Dans ce cadre, l'utilisation de la fibre de cactus comme renfort et une résine polyester est adoptée dans l'étude que nous avons menée dans ce mémoire de magister. Une nouvelle méthode d'extraction de la fibre du cactus a été proposée ; elle consiste à un enfouissement du troc du cactus dans la terre pendant 15 jours. En premier lieu nous avons déterminé les caractéristiques chimiques de la fibre. Ensuite, une caractérisation mécanique des composants sous chargement monotone en traction et en flexion est réalisée. L'étude en fatigue concerne seulement les composites en fibre de cactus/polyester sous chargement cyclique en flexion 3-points. Les mécanismes d'endommagements après chargement statique et cyclique en été mis en évidence. Par ailleurs, une étude théorique par éléments finis en utilisant le logiciel ANSYS a été développée pour des chargements monotones en traction et en flexion. Les résultats expérimentaux sont en bonne concordance avec ceux obtenus par ANSYS.

Abstract

The search for new materials is the primary objective of the industrial point of view of the interests of technological, economic and ecological. To archive this interest, several works have been carried out on composite materials reinforced by natural fibres. In this context, the use of cactus fibre to reinforce a polyester resin was adopted in the investigations conducted in this Magister memory. A new method of fibre cactus extracting has been proposed; it consists with a entering of cactus trunk on the soil (earth) during 15 days. First we determined the chemical characteristic of the fiber. Then, a characterization of mechanical components under monotone loading tensile and bending is achieved. The fatigue cyclic investigations concerns only composites cactus fibre/polyester under flexural loading. The damage mechanisms after a static and cyclic loading have been highlighted. A theoretical finite element investigations using ANSYS software has been developed for tensile and bending under monotonous loading. The experimental results are in good agreement with those obtained by ANSYS.

ملخص

البحث عن المواد البديلة هو مطلب الصناعات الحديثة، من الناحية البيئية و الاقتصادية والتقنية. و لهذا عدة أعمال أنجزت كلها درست الصفائح المركبة بالألياف الطبيعية. في هذا العمل استعملنا ألياف الصبار و لصائق ال polyester . لقد قدمنا طريقة جديدة للاستخراج الألياف من أشجار الصبار، و المتمثلة في دفن جذوع الصبار لمدة 15 يوما. في بداية الأمر شخصنا الألياف كيميائيا و أتبعناها بدراسة ميكانيكية لمختلف مكونات هذه المادة الجديدة و ذلك كان في الشد و الانحناء 3-ركائز، ثم أجرينا تجربة الإجهاد الانحناء 3-ركائز على المادة المركبة فحسب. وكذلك أنماط التشوه التي حدثت بعد تجارب السكون و الاجهاد قد وضعت في الحسبان. المحاكات الرقمية بواسطة ANSYS أعطت نتائج جد ممتازة مقارنة مع النتائج المحصل عليها تجريبيا.

Quelques notations

ρ : Densité [g/cm^3].

m : masse en (g)

σ_{rupture} : Contrainte à la rupture [MPa].

σ_f : Contrainte en flexion [MPa].

$\varepsilon_{\text{rupture}}$: Déformation à la rupture [%].

d_{rupture} : Déplacement à la rupture [mm].

E_L : Module de Young longitudinal [MPa].

E_T : Module de Young transversal [MPa].

E_{LT} : Module de Young en cisaillement [MPa].

E_f : Module de Young en flexion [MPa].

ν_{LT} : Coefficient de poisson.

ST1 : Stratifiés cactus/polyester ayant l'orientations des fibres dans le sens du chargement.

ST2 : Stratifiés cactus/polyester ayant des fibres dans l'orientations perpendiculaire du chargement.

ST3 : Stratifiés cactus/polyester ayant des fibres orientés par 45° .

r_d : niveau de chargement.

d_{max} : Déplacement maximal [mm].

d_{moy} : Déplacement moyen [mm].

d_r : Déplacement à la rupture [mm].

F/F_0 : Perte de charge [%].

V_f : Fraction volumique des fibres [%].

N_5 : 5% de perte de charge.

N_{10} : 10% de perte de charge.

N_{50} : 50% de perte de charge.

E_d : Energie dissipée [mj/cm^{-3}].

Introduction générale

✓ A l'heure actuel les développements industriels sont accompagnés par de nouvelles générations de matériaux et parmi eux on trouve les matériaux composites dont l'évolution et l'emploi augmente de plus en plus ces dernières années. L'industrie moderne s'oriente donc vers des produits de moindre coût possible, plus performant, ou bien les deux à la fois. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique (matières recyclées ou/et biodégradables).

✦ L'utilisation des fibres naturelle associé aux polymères, dans la conception des matériaux composites permet d'associer un matériau résistant, léger, disponible, non abrasif et de faible coût. Ces combinaisons peuvent prendre diverses formes que ce soit des mélanges, des stratifiés ou autres produits d'ingénierie. Ces types de fibres sont apparus concurrent des fibres de verre ou des fibres synthétiques dans des composites à matrice polymères renforcés par des fibres. Dans ce projet de mémoire de magister on se propose d'étudié les composites a fibre naturel vue les avantages déjà précité.

Le chapitre 1 concernent une étude bibliographique sur les différentes fibres végétales, qui ont fait déjà l'objet d'étude de plusieurs auteurs, et leurs propriétés usuel, et les principaux avantages et inconvénients de ces fibres comme renforts de matériaux composites, qui reste un frein au développement industrielle. La fibre de Cactus est choisie dans notre étude.

le second chapitre expose une nouvelle méthode d'extraction des fibres de cactus, ainsi que leur morphologie. De plus, une description de la technique d'élaboration du composite polyester-fibre de cactus ainsi que le matériel utiliser pour cette étude et les méthodes expérimentales sont présentés dans ce chapitre.

Le troisième chapitre sera consacré à l'analyse des résultats des travaux expérimentaux effectués pour la détermination des caractéristiques mécaniques du composite à renfort naturel, en statique et en fatigue cyclique.

En fin, le dernier chapitre présentera une simulation numérique par le logiciel ANSYS pour avoir une idée sur les champs de contraintes et les champs de déformations.

Etat de l'art

I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons une synthèse bibliographique sur les différents types de fibres végétales, qui ont fait déjà l'objet d'étude de plusieurs auteurs, vu leurs intérêts écologique, économique et mécanique dans les différents domaines industriels, tel que l'industrie d'automobile, papeterie ...etc.

En premier lieu nous allons donner la structure biologique de base des fibres naturelles, et leurs propriétés usuelles qui sont proches de celles des fibres synthétiques. En suite nous présentant dans tableau récapitulatif des avantages et des inconvénients des fibres comme renfort pour des matériaux composites.

Quelques méthodes de mise en œuvre des composites en utilisant les techniques de moulage sont présentées avec des schémas rendant facile l'assimilation de chaque technique. Enfin, nous présentant les essais qui permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques des composites, tel que l'essai de traction dans le but de déterminer le module d'Young et le coefficient de Poisson, l'essai de flexion, et les essais de fatigue qui ont pour objectif l'analyse du comportement des matériaux sous chargement mécanique cyclique, et les mécanismes de rupture qui en résulte.

I.2. Généralité sur les composites

Un matériau composite est généralement constitué d'un renfort et d'une matrice. Le renfort, le plus souvent sous forme fibreuse ou filamentaire, assure l'essentiel des propriétés mécaniques. La matrice joue le rôle de liant afin de protéger le renfort de l'environnement, de le maintenir dans sa position initiale et d'assurer la transmission des efforts. Entre le renfort et la matrice existe une zone de liaison appelée interface. Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope [BER 99].

On distinguera :

- Les matériaux composites dits de “grande diffusion” dont les propriétés mécaniques sont plus faibles mais d'un coût compatible avec une production en grande série. Ce type de composite est utilisé dans beaucoup de domaines tel que l'industrie de transport, automobile, ext.
- Les matériaux composites dits “hautes performances”, présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire assez important. Ce sont les composites généralement en fibre de carbone et de Kevlar avec une résine époxyde et ils sont employés notamment en aéronautique et en aérospatial. A leur actuel l'augmentation importante de la demande des fibres de carbone a encouragé le développement de nouvelles techniques de fabrication ce qui a permis une diminution considérable des prix.

✕ I.3. Les fibres végétales**I.3.1. Structure d'une fibre**

Les fibres végétales sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine [EGA 06]. Dans une proportion beaucoup plus faible, elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques. Contrairement aux autres composantes de fibres qui possèdent une structure amorphe, la cellulose possède une structure en grande partie cristalline. La cellulose cristalline est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé, soit environ 136 GPa à comparer au 75 GPa de la fibre de verre. Cette rigidité provient de la structure cristalline qui suit un agencement supramoléculaire hélicoïdal très ordonné. Il est important de noter que cette structure moléculaire particulière entraîne lors d'une elongation des fibres, un couplage torsion/traction qui peut avoir des conséquences sur l'interface, sur la déformation ou sur les mécanismes de rupture du composite. A l'intérieur de la fibre, les chaînes cellulosiques sont réunies en microfibrilles qui en s'agglomérant forment des fibrilles sur plusieurs couches. L'angle qui existe entre ces éléments très structurés et l'axe de la fibre conditionne la rigidité de la fibre [LO 05]. Les liaisons hydrogènes qui s'établissent le long et entre les chaînes

cellulosiques sont à la base des bonnes propriétés des fibres cellulosiques [BAR 74]. C'est ces différences, constitutives ainsi qu'anatomiques, qui donne la grande variabilité des propriétés physico-mécaniques des fibres naturelles [RYD 03].

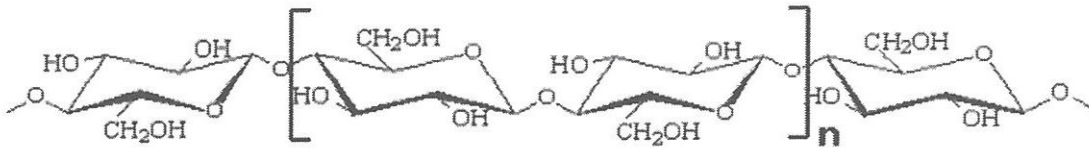


Figure I.1. Molécule de la cellulose (n répétitions du motif cellobiose).

Une fibre végétale est assimilable à un matériau composite renforcé par des fibrilles de cellulose [MOH 00]. La matrice est principalement composée d'hémicellulose et de lignine. Les fibrilles de cellulose sont orientées en hélice suivant un angle nommé angle micro fibrillaire. Habituellement, dans un matériau composite, le taux de renfort et l'orientation des fibres conditionnent les caractéristiques élastiques et les modes de rupture. De même, dans une fibre végétale, les propriétés physiques des fibres naturelles sont principalement déterminées par la composition chimique et physique, la structure, le pourcentage de cellulose, l'angle micro fibrillaire, la section et le degré de polymérisation. En simplifiant, pour un pourcentage de cellulose donné, plus l'angle micro fibrillaire sera faible et plus la rigidité et la résistance de la fibre seront élevées ; plus l'angle micro fibrillaire sera important et plus l'allongement à la rupture sera important. Le tableau I.1 présente différents types de fibres ayant différent pourcentage de cellulose, l'angle micro fibrillaire, les dimensions des fibres et le rapport d'aspect L/d (longueur/diamètre), ce rapport étant un paramètre important pour permettre le transfert de charges entre la fibre et la matrice [BAL 04].

Tableau I.1. Composition et propriétés de différentes fibres végétales [Chr 04].

Nature des fibres	% de cellulose	Angle microfibrillaire (degrés)	Diamètre (μm)	Longueur (mm)	Rapport L/d	Ref
cactus	21.6	-	-	-	-	[MAL 03]
Lin	64 - 71	10	5 - 76	4 - 77	1687	[CHR 04]
Ramie	83	7,5	16 - 126	40 - 250	-	
Chanvre	78	6,2	10 - 51	5 - 55	960	
Jute	61 - 71	8	-	25 - 200	-	
Sisal	67 - 78	20	7 - 47	0,8 - 8	100	
Noix de coco	43	45	12 - 24	0,3 - 1	35	

I.3.2. Présentations des différentes fibres végétales

- **Le cactus**

Le figuier de barbarie est une plante originaire des régions arides et semi arides du Mexique, qui a été introduite en Afrique du Nord vers le 16ème siècle [WIK 08]. C'est une plante Robuste, riche en fibres qui peut mesurer jusqu'à 5 mètres de hauteur (Figure a), avec un tronc épais et ligneux. Ses articles aplatis en forme de raquettes (cladodes) (Figure b) de couleur vert Mat, ayant une longueur de 20 à 50 cm et une largeur de 15 à 30 cm, sont couverts de petites Aréoles, d'épines.

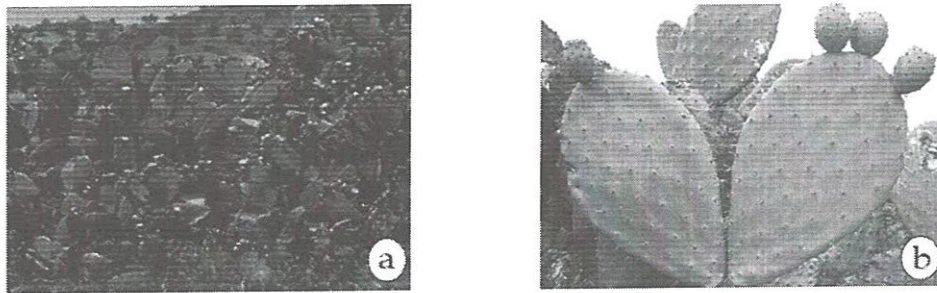


Figure I.2. *Cactus.* a) vue générale b) cladodes.

- **Le lin**

Le lin présenté en figure I.3 est une plante annuelle qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie, en Europe qu'en Afrique. 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. De plus, le rendement de cette fibre est très nettement supérieur à la production de coton (jusqu'à 2 t/an/ha) [WIK 08].

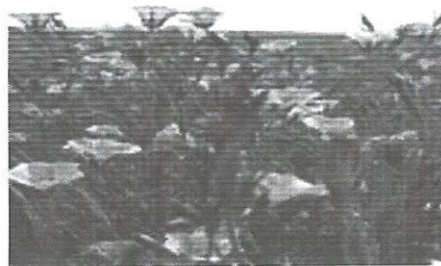


Figure I.3. *Le lin.*

Papeterie pour des papiers fins comme les papiers à cigarette ou le papier Bible. En effet, sa bonne résistance et sa longueur confèrent à ses papiers les caractéristiques mécaniques essentielles pour cette production particulière. Ces fibres sont très raffinées afin d'avoir des longueurs inférieures à 4 mm.

- **Le chanvre**

Le chanvre (figure I.4) 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 [WIK 08]. Par ses possibilités techniques, la fibre de chanvre répond à des besoins textiles traditionnels tout en ouvrant la voie à une foule d'innovations. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe, en France et en Italie.



Figure I.4. *Le chanvre.*

- **Le Coton**

Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut (figure I.5). 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 [ENC 02]. Le rendement en linters de coton est de seulement 0,05 t/ha/an. Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. En effet, les linters de coton mesurent 2 à 5 mm et ont une largeur de 18 μm . Elle est utilisée pour des papiers dits de luxe.



Figure I.5. *Le coton.*

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 aussi beaucoup utilisée dans le domaine du textile.

- **Le Kéna**

Le kéna 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 kéna en Europe est rare. Elle est destinée uniquement pour le domaine

papetier. Le rendement en fibre atteint près de 10 t/an/ha. La longueur moyenne des fibres (1,5 mm) est comprise entre celle des fibres de feuillus et celle des fibres de résineux.



Figure I.6. *Le kénaf.*

- **Le Jute**

Le jute est une plante buissonnante originaire du sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh. Le rendement en fibres est de 2 t/ha/an. Les fibres utilisées en papeterie sont les déchets de culture et de filature. La longueur moyenne des fibres est de 2 mm, avec une largeur de 20 μm . Les caractéristiques de ces fibres sont généralement assimilées à celles du kenaf.



Figure I.7. *Le jute.*

- **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.

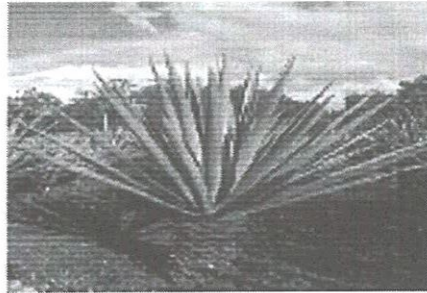


Figure I.8. *Le Sisal.*

- **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 et lorsqu'on veut mettre en avant son côté rustique.

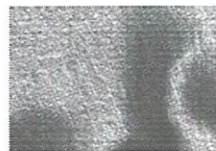


Figure I.9. *Le coco.*

Quelques exemples de tissus de fibres végétales sont présentés ci-dessous.



Chanvre



Jute



Sisal



Coton



Coco



Lin

Figure I.10. *Quelques exemples de tissus de fibres végétales.*

I.3.3. Propriétés usuelles des fibres végétales

Les propriétés usuelles des fibres végétales sont présentées dans le tableau I.2. 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.

Tableau 1.2. Les propriétés usuelles des fibres végétales [WAM 03].

Propriétés	Type de fibres								
	lin	Chanvre	Jute	Ramie	Coco	Sisal	Abaca	Coton	Fibre de verre
Densité	1,4	1,48	1,46	1,5	1,25	1,33	1,5	1,51	2.55
Résistance à la traction [MPa]	800-1500	550-900	400-800	550	220	600 -700	980	400	2400
Module d'élasticité (E) [GPa]	60-80	70	10-30	44	6	38	12		73
(E/densité) spécifique	26-46	47	7-21	29	5	29	8		29
Allongement à la rupture (%)	1,2-1,6	1,6	1,8	2	15-25	2-3	3-10		3
Absorption d'eau (%)	7	8	12	12-17	10	11	8-25		

I.3.4. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts pour les matériaux composites

Les fibres végétales constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort pour les matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent

être un frein au niveau du développement industriel. Les principaux avantages et inconvénients sont rassemblés dans le tableau I.3 [CAR 06].

Tableau I.3. *Avantages et Inconvénient des fibres naturelles.*

Avantages	Inconvénient
Faible coût	Absorption d'eau
Biodégradabilité	Faible stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de CO ₂	Mauvaise tenue en vieillissement
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Faible tenue thermique (200 à 230 °C max)
Pas de résidus après incinération	Fibres anisotropes
Ressource renouvelable	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo ...
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Renfort discontinu
Bonne isolation thermique et acoustique	
Non abrasif pour les outillages	

I.4. LES MATRICES

La matrice a pour rôle de [BAH 01]:

- lier les fibres de renforts ;
- répartir les contraintes ;
- apporter la tenue chimique de la structure ;

- donner la forme désirée au produit final.

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

- les résines thermodurcissables qui sont, en général, associées avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se ponte (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. La transformation est irréversible.
- l'emploi des polymères thermoplastiques renforcés avec des fibres courtes, et prochainement avec des fibres longues, se développe fortement. Les polymères thermoplastiques ont une structure linéaire ; ils sont mis en forme par chauffage (les chaînes se plient), et durcissent au cours du refroidissement (les chaînes se bloquent). La transformation est réversible [ALC 07].

I.4.1. Résines thermodurcissables (TD)

Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

- **les polyesters insaturés** : ce sont les résines les plus utilisées dans les applications de grande diffusion. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide + 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 [CAN 85].
- **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 [GUY].
- **les résines époxy** (ou époxydes) constituent la résine type des composites de haute performance (HP) [BAR].
- **les polyuréthanes** ont une faible viscosité qui facilite un bon remplissage du moule. D'autres résines TD sont utilisées pour des applications particulières comme par exemple la silicone (bonnes qualités électrique, thermique,

chimique), les poly-imides (composites HP pour une bonne stabilité à la température). En Europe, les composites à matrice thermodurcissable représentent 70% de la totalité des composites transformés [MAR].

Tableau I.4. *Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables non renforcées.*

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Mpa)	Module de flexion (Gpa)	Tenue à la chaleur continue(°c)
Polyester	1,2	500-650	3	120
Vinyl-ester	1,15	700-800	3,5	140
Phénolique	1,2	400-500	3	120-150
Epoxyde	1,1-1,4	500-900	3	120-200
Polyuréthane	1,1-1,5	200-500	1	100-120
Poly-imide	1,3-1,4	300-400	4	250-300

I.4.2. Résines thermoplastiques (TP)

Les résines thermoplastiques présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue mécanique et thermique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Toutefois, l'appellation «composite» n'est pas interprétée d'une manière uniforme, et certains industriels n'y incluent pas les thermoplastiques renforcés par des fibres courtes qui représentent pourtant 90% des composites à matrice thermoplastique [DES].

Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont :

- les polyamides (PA);
- les polytéréphtalates éthylénique (PET) et butylénique (PBT) ;
- les polycarbonates (PC) ;
- les polyoxides de phénylène (PPO ou PPE) ;
- les polyoxyméthylène (POM) ;

- le polypropylène (PP) est un polymère semi-technique, peu onéreux, assez stable en température, mais combustible. D'autres résines TP commencent à être utilisées pour leurs propriétés de thermo-stabilité (tenue thermique supérieure à 200°C) et de bonne tenue mécanique :
- le polyamide-imide (PAI) ;
- le polyéther-imide (PEI) ;
- le polyéther-sulfone (PES) ;
- le polyéther-éther-cétone (PEEK).

Tableau I.5. Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques (TP) non renforcées [BER 02].

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Module de flexion (Gpa)	Tenue à la chaleur continue (C°)
Polypropylène	1,1-1,2	20-30	1-1,6	85-115
Polytéréphtalate éthylénique	1,5	45-55	2,2-2,6	120
Polyamides	1,3-1,4	60-90	6-9	80-120
Polyéther-imide	1,5	105	3	170
Polyoxyméthylène	1,6	60-70	7-9	95-105
Polyoxide de phénylène	1,3	55-65	2, 4-2,6	80-105

I.5. Fabrication des stratifiés composites

I.5.1. Moulage au contact

I.5.1.1. Principe

Cette méthode de mise en oeuvre est la première à avoir été employée dans le moulage des résines polyesters insaturés renforcées. Elle est généralement pratiquée soit pour réaliser des pièces unitaires, soit pour des séries pouvant aller jusqu'à un millier de pièces par an. Le moulage au contact peut être utilisé pour la réalisation de pièces de toutes dimensions : par exemple des pièces techniques de quelques dm² aussi bien que des piscines de 150 m² de surface développée.

La méthode de moulage au contact consiste à disposer successivement sur un moule :

- un agent de démoulage ;
- un gel coat;
- une couche de résine thermodurcissable liquide ;
- une couche de renfort (verre, aramide, carbone, etc.) sous forme de mat à fils coupés ou de tissu roving, et à réaliser l'imprégnation du renfort par une opération manuelle à l'aide d'un rouleau ou d'une brosse (Figure I.11) [CAR 06].

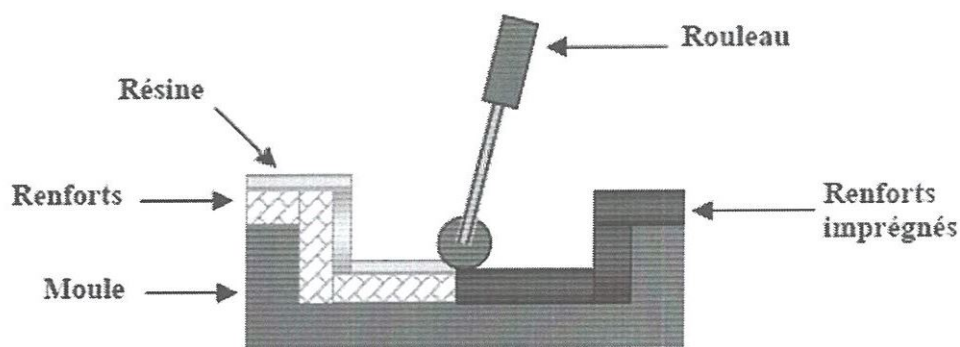


Figure I.11. Moulage au contact

I.5.2. Moulage sous vide

I.5.2.1. Principe

Le principe du moulage sous vide consiste à utiliser le vide pour permettre l'imprégnation progressive du renfort par la résine entre un moule (matrice) et un contre-moule (poinçon). Il existe plusieurs variantes du procédé de moulage sous vide qui se distinguent essentiellement par différentes conceptions des moules, principalement au niveau du poinçon, et par diverses techniques pour l'alimentation de la résine.

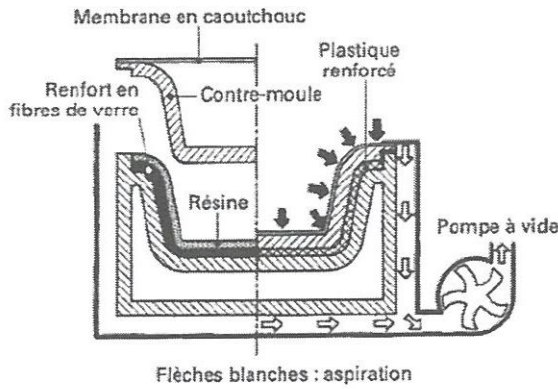


Figure I.12. Moulage sous vide ou par dépression.

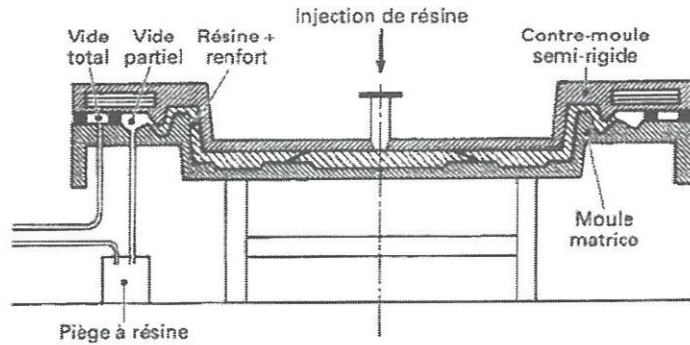


Figure 1.13. Moulage par injection sous vide.

I.5.3. Moulage par injection a basse pression de résine liquide

Ce procédé consiste à remplir l’empreinte d’un moule, rigide et fermé, par injection d’une résine en un ou plusieurs points selon l’importance et la taille de la pièce. Les renforts sont préalablement disposés à l’intérieur du moule avant sa fermeture et son verrouillage (figure I.14).

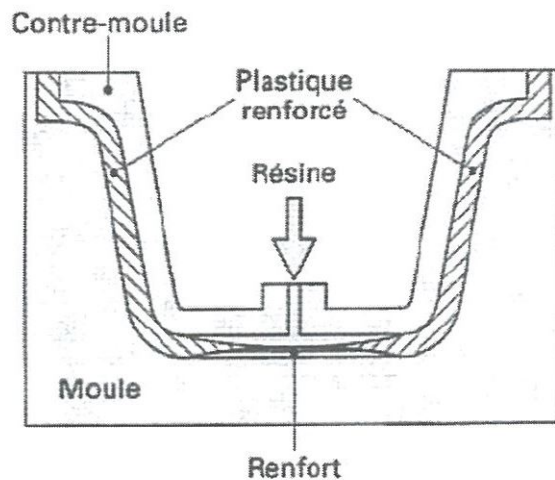


Figure I.14. Moulage par injection a basse pression de résine liquide.

I.5.4. Moulage par compression a basse pression

I.5.4.1. Principe

Ce procédé, appelé plus généralement moulage à la presse a basse pression, connu autrefois sous le nom de *moulage à la presse à froid*, repose sur le principe d’un

demi-moule fixe dans lequel sont déposés les matériaux de moule, et d'un second demi-moule en mouvement, qui vient comprimer ces matériaux pour remplir l'empreinte et former la pièce (figure I.15) [BER].

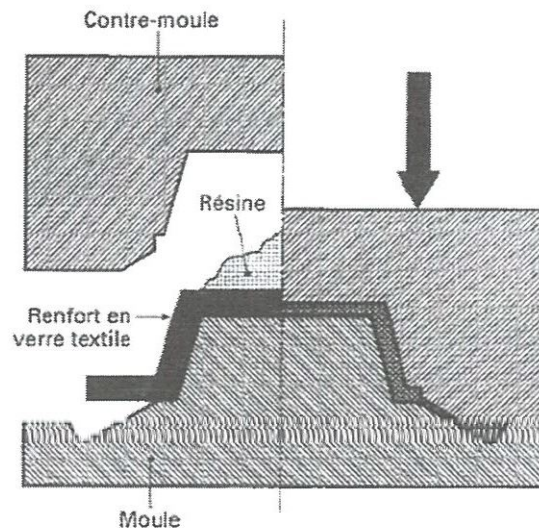


Figure I.15. Moulage à la presse à basse pression.

* I.6. Caractérisation des composites stratifiés

I.6.1. Essais de traction

Essais qui permettent de déterminer la loi de comportement contrainte-déformation dans une direction donnée. Les caractéristiques habituelles que l'on en déduit sont le module d'Young, le coefficient de Poisson, ainsi que la contrainte et l'allongement relatifs aux points singuliers de la loi de comportement (limite de linéarité, coude, charge maximale, rupture, etc.).

I.6.2. Essais de flexion

Les essais de flexion sur composites font l'objet de plusieurs normes tel que T 57-105, T 57-302, ASTM D 790, JIS K 7074 et ISO 14125. Ces essais sont largement utilisés dans les milieux industriels en raison de leur simplicité. Cependant, la flexion n'engendre pas un état de contrainte simple (ou pur) au sein des matériaux testés : les contraintes de traction sont maximales dans la partie convexe, les contraintes de compression sont maximales dans la partie concave et les contraintes de cisaillement

sont maximales sur l'axe neutre de l'éprouvette. De ce fait, en fonction de l'élanement de l'éprouvette (rapport de l'épaisseur sur la distance entre appuis) qui gouverne le rapport contraintes normales (traction/compression)/contraintes de cisaillement et en fonction des résistances en traction, compression et cisaillement du matériau, l'un ou l'autre des trois modes de rupture peut être obtenu. Deux configurations peuvent être retenues pour les essais : la flexion trois points et la flexion quatre points.

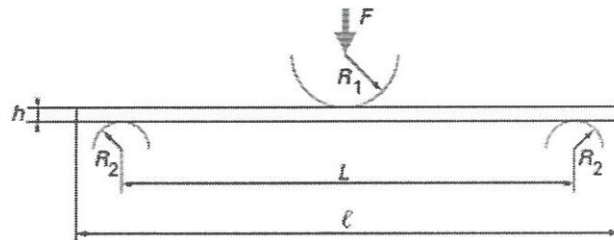
- Les essais de flexion trois points sont menés dans des conditions précisées dans la figure I.16 et sur des éprouvettes rectangulaires, la théorie des poutres permet d'exprimer :

— la contrainte normale de flexion :

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

— la contrainte de cisaillement inter-laminaire maximale :

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



[Rayon de pannes (mm)]	
R_1	5 - 0,2
R_2 pour $h \leq 3$ mm	2 - 0,2
R_2 pour $h > 3$ mm	5 - 0,2

h = épaisseur de l'éprouvette

Figure I.16. Essai de flexion trois points, selon EN ISO 14125.

Le module de flexion :

$$E_f = \frac{L^3 F}{4bh^3 w} \quad (I.3)$$

— la déformation en surface :

$$\varepsilon = 6 \frac{wh}{L^2} \quad (I.4)$$

Avec : F la charge [N], L distance entre appuis [mm], h épaisseur [mm], b largeur [mm], w flèche de l'axe neutre.

Pour éviter l'influence des contraintes de cisaillement (sur la déformée et les mécanismes de rupture) qui se superposent aux contraintes normales de flexion, on utilise quelquefois la méthode de flexion quatre points pour laquelle l'effort tranchant est nul dans la zone des contraintes maximales. La figure I.17 présente le montage d'essai utilisé, sachant que les diamètres des appuis sont les mêmes que ceux retenus en flexion trois points. Comme précédemment pour la flexion trois points, la contrainte, le module et la déformation dans ce cas s'expriment par :

$$\sigma_f = \frac{FL}{bh^2} \quad (I.5)$$

$$E_f = \frac{0,21 L^3 F}{bh^3 w} \quad (I.6)$$

$$\varepsilon = 4,7 \frac{wh}{L^2} \quad (I.7)$$

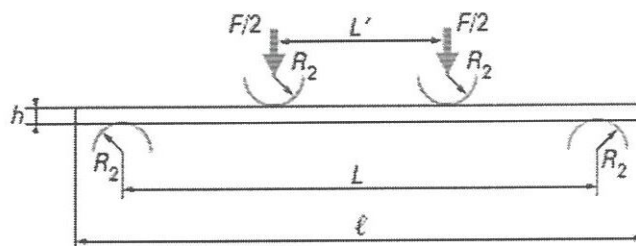


Figure I.17 : Essai de flexion quatre points, selon EN ISO 14125.

Avec les mêmes notations que précédemment et bien que cet essai semble séduisant a priori, d'autant plus que la charge est répartie en deux points au lieu d'un seul, ce qui réduit les risques de poinçonnage, il présente certains inconvénients :

- il nécessite d'utiliser un capteur de déplacement pour mesurer la flèche (la mesure du déplacement du plateau mobile de la machine ne convient pas) ;
- les flèches à la rupture sont très importantes (1 à 2 cm), ce qui nécessite une correction pour le calcul des contraintes ;
- la rupture intervient apparemment dans la zone centrale par délaminage, ce qui semble contradictoire puisqu'il n'y a pas d'effort tranchant; en fait, ce type de rupture, qui apparaît surtout pour les renforts unidirectionnels, est dû à un flambement des fibres dans la partie comprimée [KRA].

1.6.3. Fatigue des matériaux composites

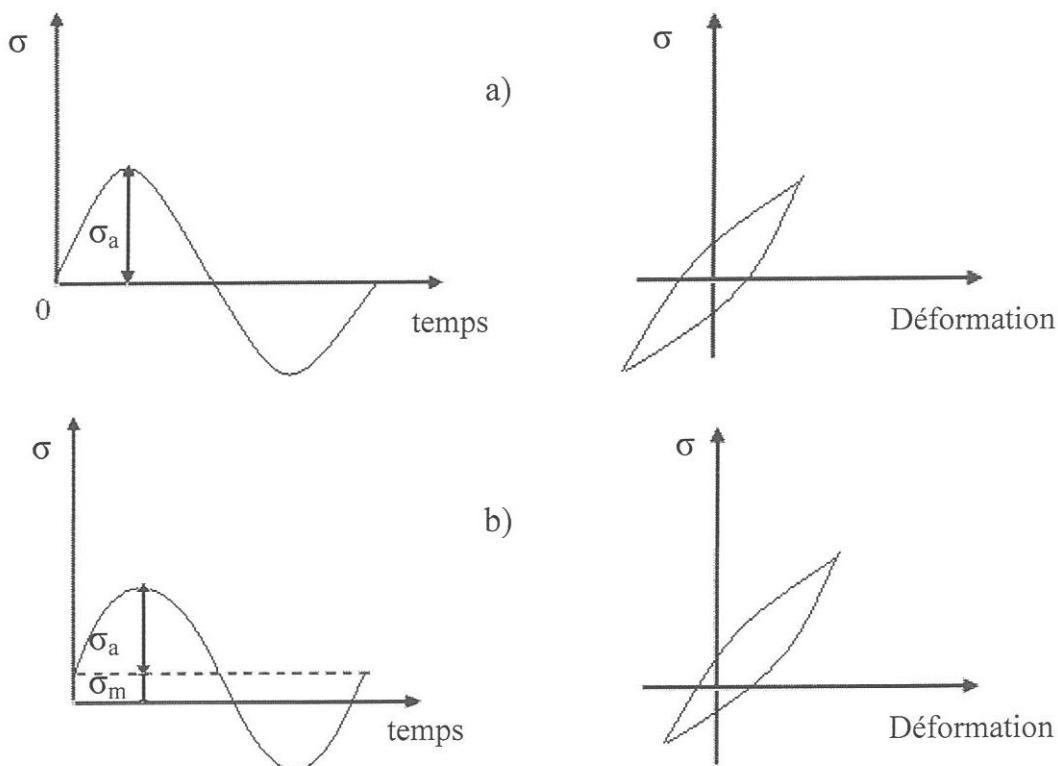
Une différence essentielle entre les métaux et les composites réside dans leur comportement respectif en fatigue. Les métaux cassent usuellement par initiation et propagation de fissure d'une manière qui peut être prédite par la mécanique de la rupture. Les composites présentent plusieurs modes de dégradation tels que le délaminage, la rupture des fibres, le dérangement de la matrice, l'apparition de vides, la rupture de la matrice, la rupture du composite. Une structure peut présenter l'un de ces modes ou plusieurs et il est difficile a priori de dire celui qui va prédominer et produire la rupture [CHR 99].

Les études de fatigue ont pour objectif d'analyser le comportement des matériaux sous chargement mécanique cyclique. Pour bien comprendre le phénomène, il est important d'identifier les bases physiques du mécanisme d'endommagement. Par définition, l'endommagement par fatigue des matériaux est le résultat de la modification des propriétés consécutives à l'application de cycles répétés d'efforts et/ou de déformations, qui conduisent à une rupture prématurée de la structure; et cela pour des amplitudes de sollicitations souvent bien inférieures à la limite élastique du matériau. L'endurance est alors définie comme la capacité de résistance à la fatigue du matériau [PER 06].

1.6.3.1. Fatigue et endurance

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux consécutifs à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux [YUN 05]. Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle, σ , par la valeur moyenne de la contrainte, σ_m , et par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. On est parfois conduit à distinguer la composante alternative σ_a de la composante statique σ_m . Ainsi, selon les valeurs relatives de ces deux composantes, on distingue les essais sous sollicitation (figure I.18) [BAT 97] :

- | | | |
|---|---------------------------|--------------|
| • Alternée symétrique (figure I.18a) | $\sigma_m = 0$ | $R = -1$ |
| • Répétés (figure I.18b) | $\sigma_m = \sigma_a$ | $R = 0$ |
| • Alternée dissymétrique (figure I.18c) | $0 < \sigma_m < \sigma_a$ | $-1 < R < 0$ |
| • Ondulée (figure I.18d) | $\sigma_m > \sigma_a$ | $0 < R < 1$ |



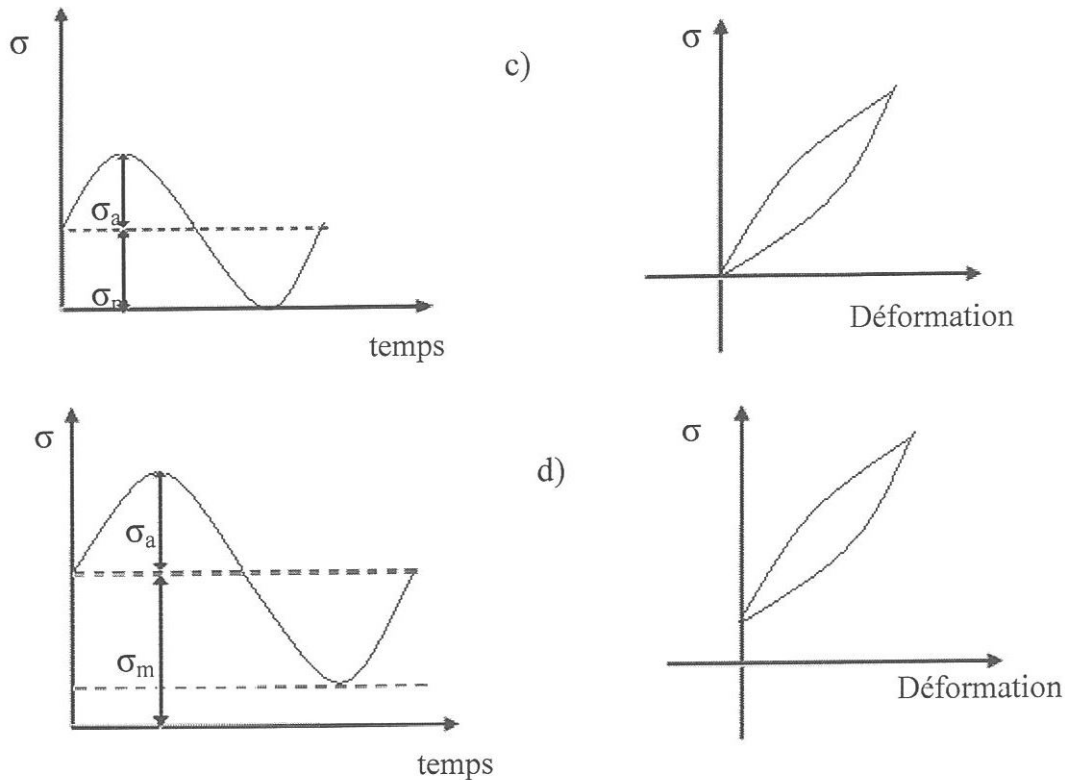


Figure I.18. Différents cas de sollicitation ; effort-temps, effort-déformation.

1.6.3.2. Mécanismes de rupture par fatigue

1.6.3.2.1. Mécanismes initiaux

a) Ruptures des fibres

Il existe dans un composite une certaine quantité de fibres faibles qui vont se rompre dès les premiers cycles de fatigue. Bien que marginales sur la quantité globale de fibres, elles peuvent être le point de départ d'une évolution ultérieure du dommage. Au cours de la sollicitation, les fibres reprennent les efforts transférés par la matrice et se rompent lorsque leur déformation à la rupture est atteinte. Cela a pour effet d'engendrer des contraintes de cisaillement au niveau, de la liaison fibre/matrice. La résistance en cisaillement de l'interface étant faible au regard de la sollicitation macroscopique, la rupture de la liaison fibre/matrice intervient et provoque une décohésion de la matrice autour de la fibre [JOC 02].

b) Rupture de la matrice

La matrice, ayant comme principale fonction de transférer les efforts aux fibres, pour ce faire elle doit supporter les déformations imposées au composite. La rupture de la matrice se traduit par des fissurations transverses à la direction des efforts lorsque sa déformation admissible est atteinte. Les fissurations matricielles sont aussi largement influencées par la présence de défauts (porosités, microfissures) et/ou l'absence locale de renforts : ces zones sont le siège de concentrations de contraintes à partir desquelles les fissures vont pouvoir s'initier puis se propager [CHI 08].

c) Décohésion de l'interface Fibre/Matrice

Au niveau de l'interface, des défauts initiaux existent. Ce sont des décollements pouvant résulter d'une mauvaise imprégnation des fibres par la résine. Dans ces conditions, la cohésion entre fibre/matrice n'est localement plus assurée ce qui conduit, lors de l'application du chargement, à des défibrages sans fissuration de la matrice [ARB 05].

1.6.3.3. Evolution des dommages

L'évolution de l'endommagement dépend de la nature des mécanismes de rupture initiaux et de leur progression mais aussi des éventuelles interactions entre eux. Autrement dit, la rupture finale par fatigue d'un composite résulte souvent d'une combinaison de plusieurs modes d'endommagement susceptibles d'interagir entre eux. La rupture en fatigue des composites est donc un phénomène complexe. De nombreux paramètres interviennent comme : la nature du chargement, l'architecture des renforts, la présence de défauts, la qualité de la matrice et de l'interface fibre/matrice [ARB 05*]. Toutefois, on distingue deux modes d'endommagement principaux :

- le premier concerne la rupture des fibres faibles de la distribution statistique. Les surcharges sont alors répercutées sur les fibres voisines, entraînant localement des concentrations de contraintes. Avec l'augmentation du nombre de cycles, l'endommagement se développe préférentiellement à partir de ces zones affaiblies [MOE 03]. La dégradation découle finalement de la rencontre de ces régions endommagées.

- le deuxième mode traduit des fissurations locales de la matrice intervenant à partir des zones pauvres en fibres et/ou de défauts présents initialement (porosités, microfissures). La progression de cette fissuration nécessite peu d'énergie en raison des fortes concentrations de contraintes en front de fissure. Il en résulte une macro-fissure qui va croître jusqu'à la rupture [TAT 08].

Dans le suivi de l'endommagement en fatigue, il est courant de tracer l'évolution de la rigidité, à déformation imposée, en fonction du nombre de cycles de fatigue N (figure I-19). La rigidité est caractérisée par le rapport F/F_0 , F étant l'effort mesuré au cours de l'essai et F_0 l'effort initial [ADD 08].

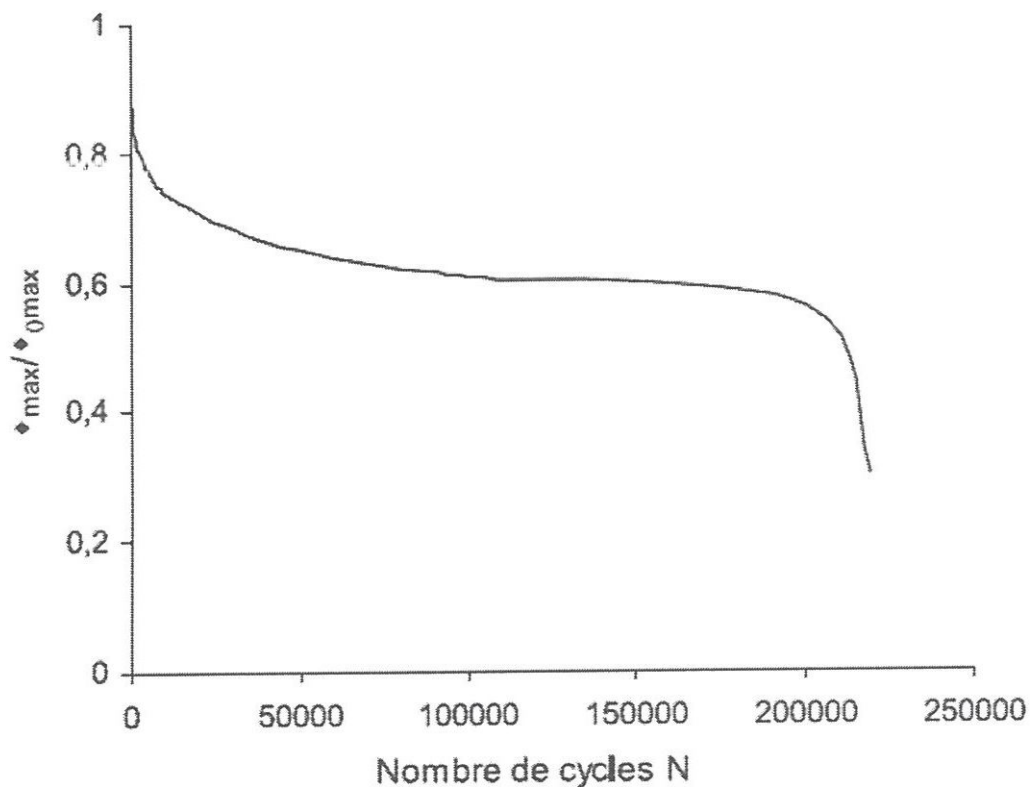


Figure I.19. Évolution de la contrainte en fonction du nombre de cycles [ASS 06].

Pour déterminer les performances des matériaux en fatigue, différents critères de la durée de vie (N_s , N_3 , N_5 , N_{10} et NR) sont considérés dans la littérature à partir des courbes donnant l'évolution de la charge en fonction du nombre de cycles. Le critère le plus sévère est celui qui caractérise par la valeur N_s qui correspond au nombre de cycles à la fin du domaine linéaire. Les critères N_3 , N_5 et N_{10} correspondent respectivement à des chutes de 3 %, 5 % et 10 % de la rigidité par rapport à sa valeur initiale. Le critère NR correspond au nombre de cycles à la rupture

complète de l'éprouvette lorsqu'elle est atteinte. En faisant varier le niveau de sollicitation, il est possible de tracer des courbes de Wöhler représentant la déformation imposée en fonction du logarithme du nombre de cycles N_{10} (figure I.20) [FOI 88].

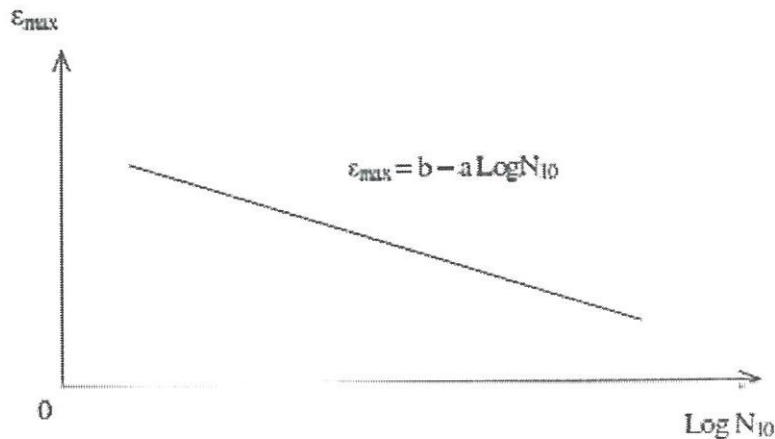


Figure I.20. Courbe d'endurance de Wöhler exprimée en fonction de la déformation.

Pour les composites, il est judicieux de raisonner à partir de la déformation qui est une variable indépendante des constituants. Les courbes de Wöhler sont généralement exprimées par des relations linéaires permettant de décrire leurs évolutions. Elles sont de la forme [PER 06]:

$$\varepsilon_{\max} = b - a \log N_{10} \quad (\text{I.8})$$

Avec, a et b deux constantes caractéristiques du matériau qui traduisent la dépendance linéaire décroissante de la déformation imposée vis à vis de la durée de vie.

I.7 Position du problème et techniques adoptées

L'idée d'utiliser des fibres végétales dans le domaine de la construction est très ancienne; on peut encore aujourd'hui observer dans des enduits à la chaux anciens des renforts constitués par des brins de paille. Cependant, au cours du temps, ces techniques sont peu à peu tombées en désuétude soit du fait de problèmes techniques rencontrés soit avec l'émergence de nouveaux matériaux. La transformation de résine polyester en matériau composite renforcé par des fibres végétales (fibre de cactus), et la

détermination de leurs caractéristiques mécaniques (en statique et en fatigue cyclique), est l'objet de cette mémoire de Magister.

De nombreuses techniques de fabrication des composites sont citées dans la littérature telles que le moulage au contact, Moulage par injection a basse pression, et le moulage a base pression. La disponibilité de la technique de moulage à base pression dans laboratoire LMS dirigera notre choix vers cette technique pour fabriquer des stratifiés composites (cactus/polyester).

Pour définir le module de Young, et le coefficient de poisson, et aussi pour connaître la charge ultime de ce nouveau matériau des essais de traction monotone sont préconisé.

La majorités des pièces mécaniques subissent des sollicitations de flexion dynamique où statique, le choix des essais de fatigue cyclique en flexion 3-points correspond à plusieurs facteurs, telles que :

- il est assez simple à mettre en œuvre
- permet de donner beaucoup d'informations sur les matériaux testés ; comparativement à l'essai de fatigue cyclique en traction, il ne nécessite pas le collage des étalons, ainsi il élimine le risque de rupture prématurés sous les mors ; sous l'effet de concentration de contrainte.
- un faible coût pour réaliser les essais
- le temps est court par apport à l'essai de fatigue cyclique en traction car le matériau est fortement sollicité en flexion.

Chapitre II

Techniques expérimentales

I-1. Introduction

Dans ce chapitre les différentes techniques expérimentales utilisées pour l'analyse de notre matériau d'étude seront présentées comme suit :

- Extraction des fibres de cactus,
- Caractérisation chimique de la fibre extraite
- Détermination de la densité de la fibre
- Fabrication des plaques composites cactus/polyester
- Description des conditions d'essais mécanique statique (traction, flexion 3-points statique) et de fatigue cyclique en flexion 3-points.

II-2. Extraction de la fibre

L'objectif de tous les chercheurs est de comment faire l'extraction des fibres à partir de la source végétale, sans perdre les propriétés physicochimique, par une méthode économique [MUR 05]. Plusieurs méthodes sont utilisées dans ce domaine, l'une d'elles consiste à immerger l'échantillon dans l'eau tel qu'est l'extraction de la fibre de date, d'autres utilisent des solutions chimiques comme les alcanes [MAL 03]. Dans notre étude nous avons utilisé les vieilles raquettes figure II.1. pour avoir la quantité maximale des fibres [ROD 07].

La raquette de cactus est composée de plusieurs couches ou paquets du tissu de fibre, séparés entre elles par une matière organique appelée oxalate de calcium jouant le rôle de matrice figure II.2 [MAU 06].



Figure II.1 : *Vielles raquettes de cactus (plus de 50 ans)*

Oxalate de calcium

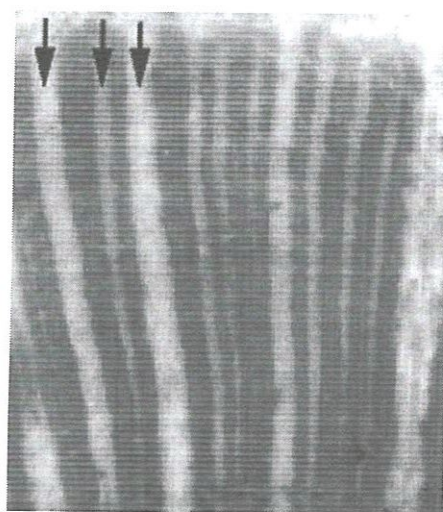


Figure II.2. *Coupe longitudinale du tronc de cactus observé au microscope.*

Pour séparer les couches de tissu du liant (oxalate de calcium) et donc obtenir l'extraction de la fibre nous avons utilisé une nouvelle méthode qui consiste à l'enfouissement du tronc dans la terre sous une profondeur de 30 cm pendant 15 jours, ceci permet de favoriser la fermentation de l'oxalate de calcium, rendant l'extraction des couches facile comme le montre la figure II.3. Ensuite la fibre est lavée à l'eau et séchée à l'air libre et le tissu obtenu est présenté dans la figure II.4.

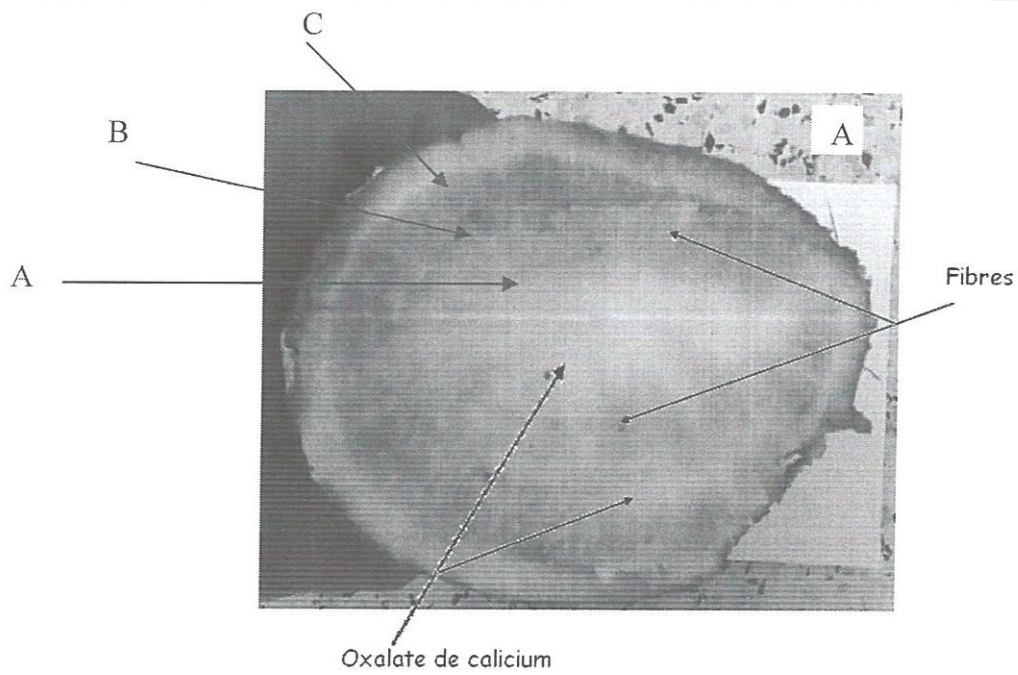


Figure II.3 : Coupe transversale d'un tronc de cactus, a) avant l'enfouissement, b) après 15 jours de l'enfouissement, c) séparation des couches de tissu.



Figure II.4. Fibres de cactus obtenue.

II.3. Morphologie de tissu de cactus

La figure II.5 montre que le tissu de cactus est formé d'un réseau cellulaire ramifié conçu de deux corps, le premier a une forme hexagonale de cotes aléatoires, le deuxième est un corps secondaire inclus dans le premier [MAU 06], capable d'actives des divisions cellulaires qui ajoutent de nouvelles cellules [BOU 06] et qui joue le rôle de renforcement [KAH 02].

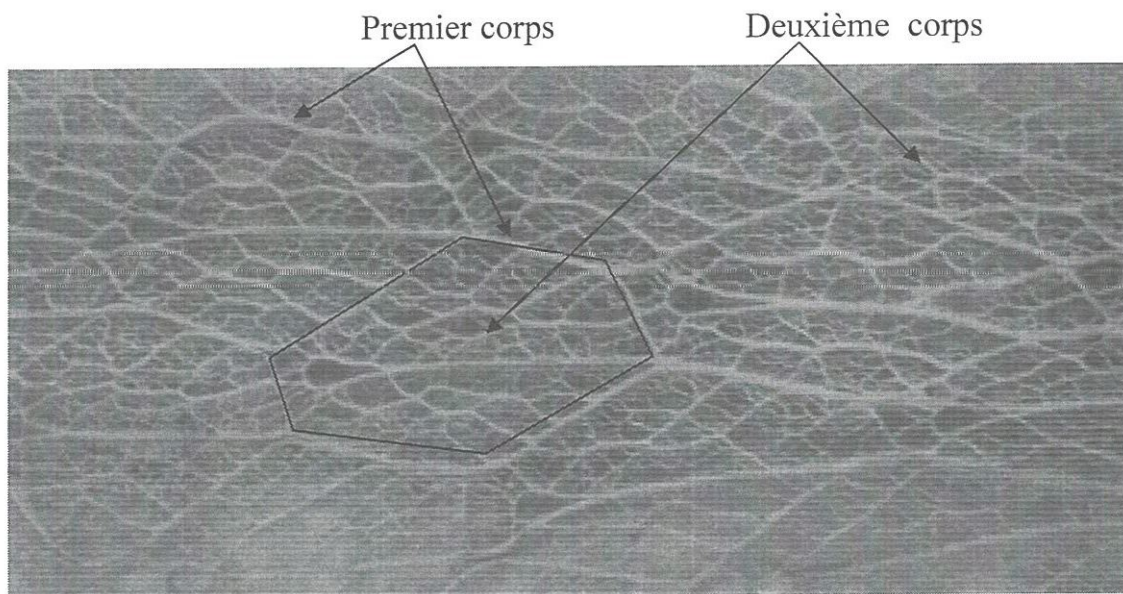
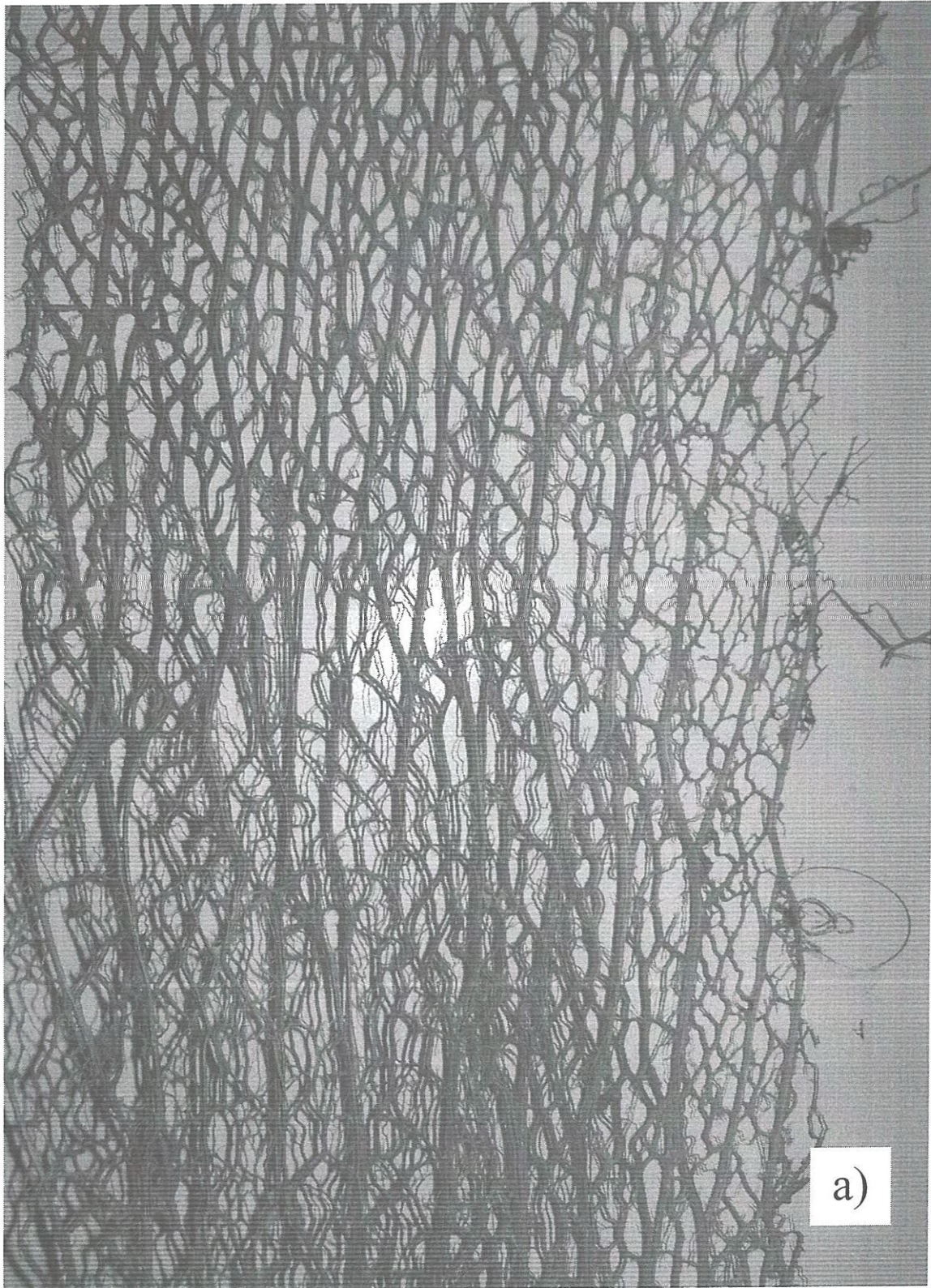
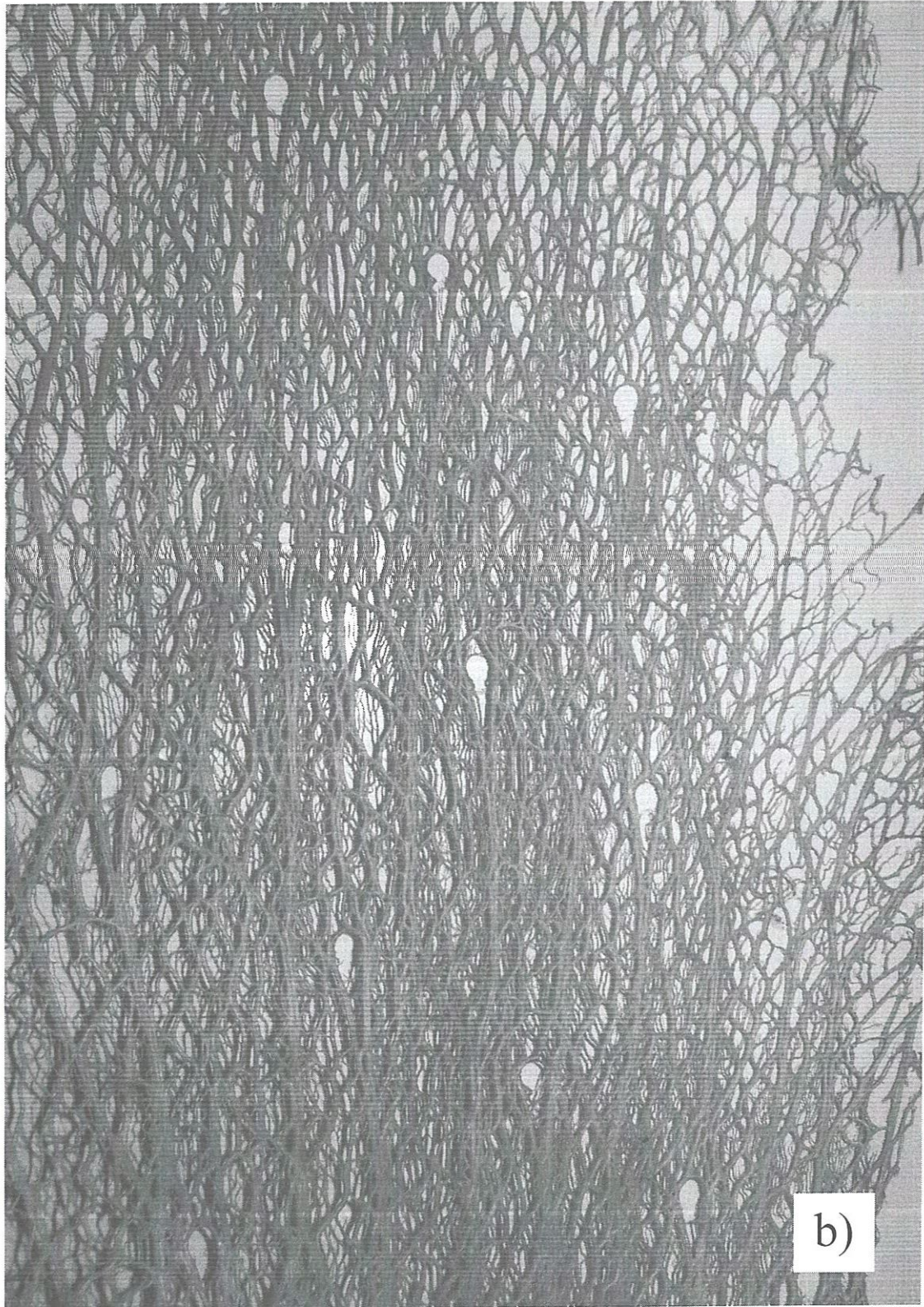


Figure II.5. Tissu de fibre de cactus extrait d'une jeune raquette.

Les figures II.6 (a, b et c) représentent des tissus extraits de différents endroits d'une raquette âgée de 50 ans, à partir desquelles on peut observer la modification de l'architecture du tissu en fonction de sa maturation. Plus en se rapproche de l'extrémité du tronc du cactus (fibre plus mure) plus le deuxième corps devient plus dense ayant des segments aussi gros que ceux du premier corps, de façon qu'il est difficile de distinguer le premier corps du deuxième.





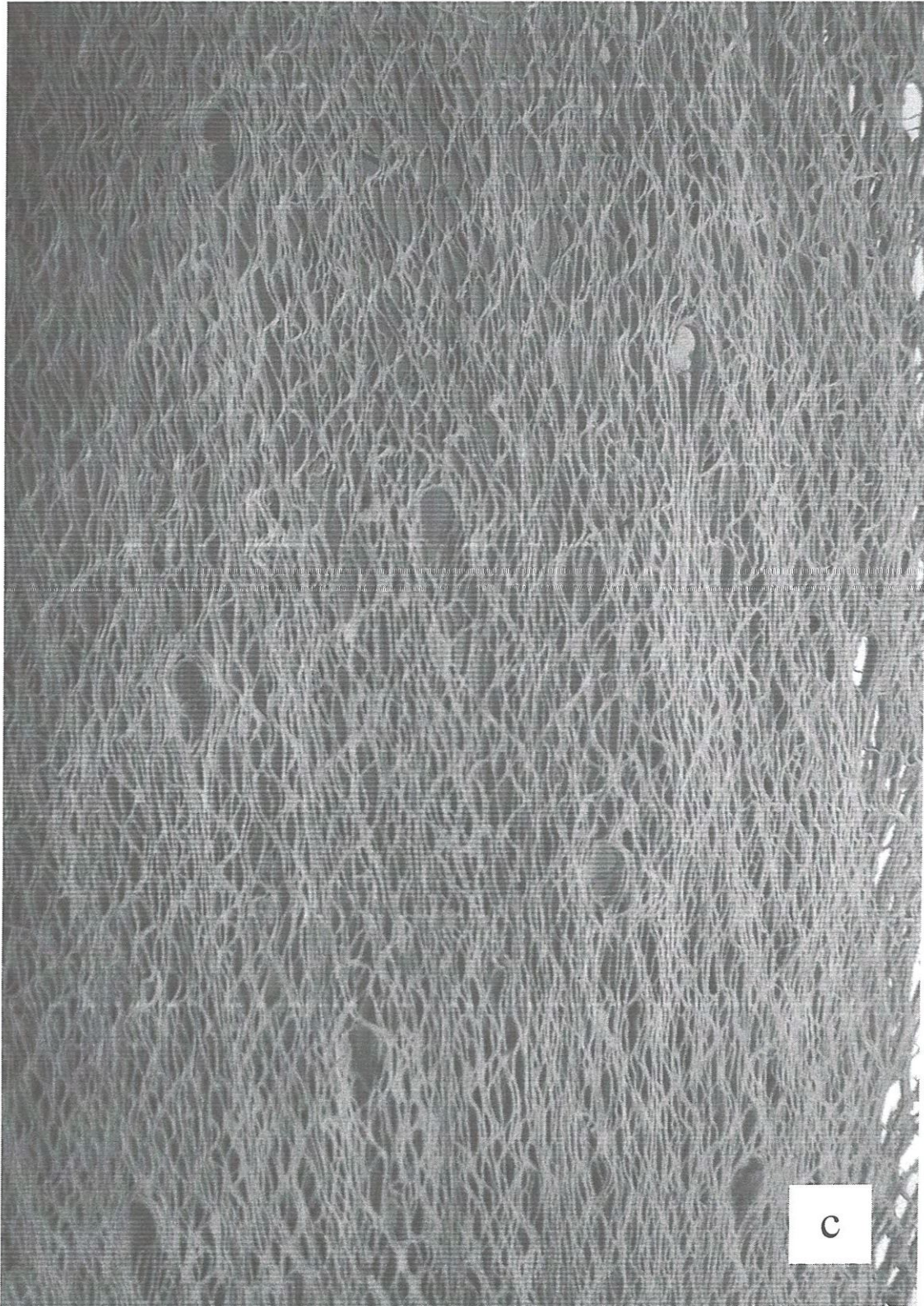


Figure II.6. *Changement de la morphologie du tissu de cactus dans un même tronc.*
a) *extrait à partir de la location la plus proche du cœur du tronc,* b) *le milieu du tronc,*
c) *la couche la plus extrême du tronc.*

II.4. Caractérisation chimique de la fibre

Pour mettre en évidence la dégradation de la fibre de cactus en fonction de la méthode d'extraction, nous étudierons par la spectrométrie infrarouge deux fibres, une fibre extraite par la méthode qui nous avons proposé, et une autre fibre extraite naturellement (a été lissée dans leur raquette jusqu'à la sécheresse de l'oxalate de calcium). Les essais en été effectué au laboratoire d'analyse industrielle et génie des matériaux de chimie université de Guelma. La figure II.7-a représente le spectre infrarouge de la fibre extraite par enfouissement, cette allure est semblable au fibres naturelles rencontré dans la littérature (fibre de bois [VAL 99]) figure II.8. Par contre la figure II.7-b montre qu'il y a un changement remarquable dans la composition chimique de la fibre extraite naturellement par rapport a la fibre extraite par la nouvelle méthode utilisés. La fibre enfouie présente les signaux caractéristiques du lignocellulose, qui incluent une large bande des groupes d'hydroxyle de cellulose (O-H) à $3271,5 \text{ cm}^{-1}$ [GAR 07], et les doubles liaisons carbonyles (C=C) correspondent à un pic de $1646,7 \text{ cm}^{-1}$ [ZHI 01]. Ces deux pics ne sont pas présents dans le spectre figure II.7b, qui montre la modification au niveau de la composition chimique de la fibre due à la méthode d'extraction des fibres.

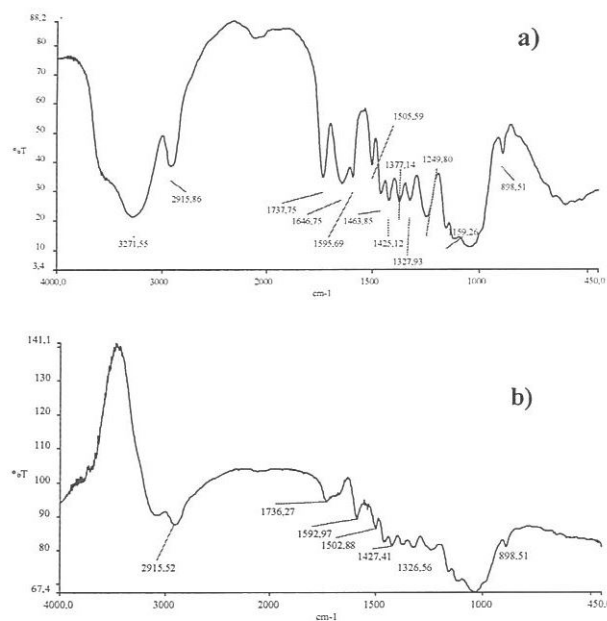


Figure II.7. Spectrométrie de la fibre de cactus.
a) fibre extraite par enfouissement, b) fibre extraite naturellement.

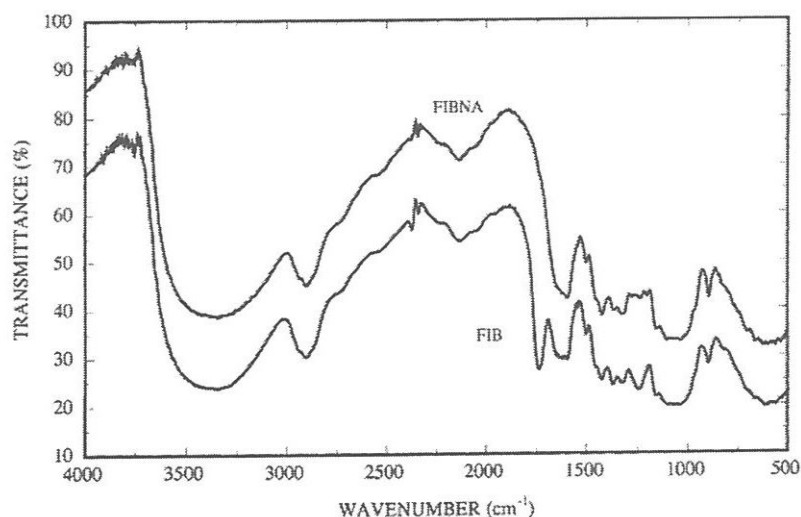


Figure II.8. Spectre infrarouge de la fibre henequèn (sisal du Mexique). FIB) fibre non traité, FIBNA) fibre traité par la solution NaOH [VAL 99].

Le spectre de la fibre traité (FIBNA) ne présente pas le pic de hémicelluloses, qui correspond à la région de carbonyle de nombre d'onde de 1750 cm^{-1} [VAL 99].

D'après la comparaison avec d'autre fibre naturelle, la fibre extraite par enfouissement reste pratiquement à l'état normal au points de vu chimique, malgré que la fibre reste dans l'oxalate fermentée pendant quelque jours.

II-5. Mesure de la densité des fibres

La mesure de la densité des fibres du cactus est réalisée sur cinq segments obtenus par différents tissus. L'avantage de la section rectangulaire des fibres permet de calculer la masse volumique d'après la formule :

$$\rho = \frac{m}{lbt} \quad \text{II.1}$$

Où : m est la masse en (g) mesuré dans Laboratoire d'analyse industrielle et génie des matériaux département de chimie université de Guelma, à l'aide d'une balance SARTORIOUS BP 221S (figure II.9), de la précision de 0,1 mg.

l, b, t : la longueur, la largeur et l'épaisseur du segment en (cm) respectivement.

Le tableau II.1 regroupe les dimensions et les masses obtenues pour chaque segment.

% en masse. Une fois les plaques réticulées, elles subissent toutes un cycle de polymérisation de 24 heures à température ambiante avant démoulage.

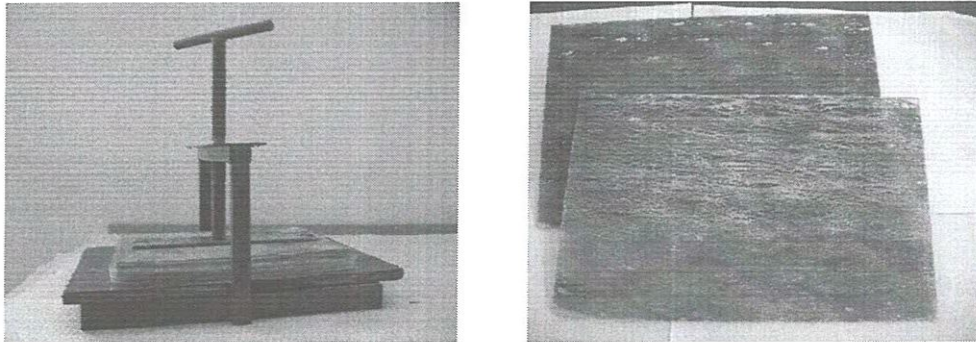


Figure II.10. a) *dispositif de fabrication* b) *plaques composites fabriquées*

Le taux massique de fibre M_f des stratifiés sont ensuite déterminés par la méthode du poids, le taux de fibre est le rapport entre la masse de renfort et la masse de la plaque. Cette mesure permet d'obtenir un taux de fibre moyen de la plaque.

II-7. Techniques expérimentales

II-7.1 Machine d'essais

Les essais de traction, de flexion et de fatigue cyclique sont réalisés sur une machine d'essai universel de type **ZWICK ROELLE Z005**, cette machine est constituée d'une cellule de charge de 5 kN et un système d'entraînement de la traverse a laide d'un moteur électrique. La machine est pilotée par un logiciel Testexpert V10.11 qui permet d'enregistrer les résultats sur un procès verbal d'essais.

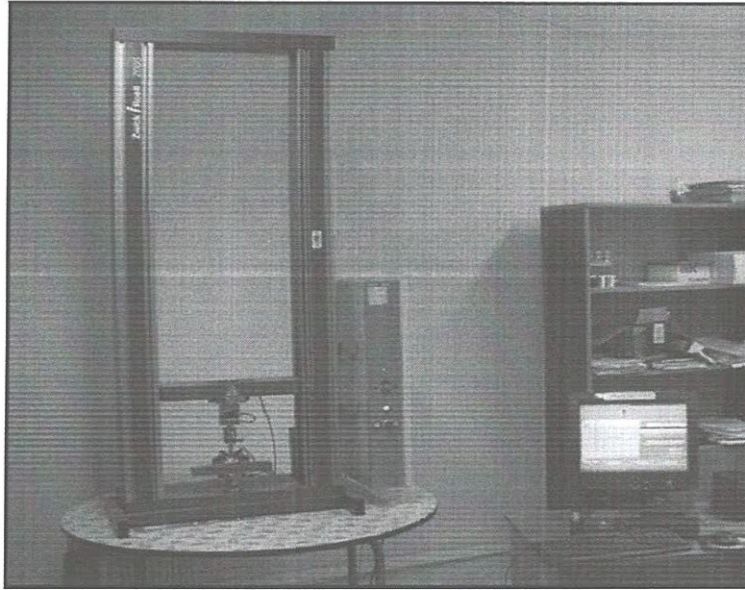


Figure II.11. Banc d'essais.

II-7.2. Essais statiques

- Les essais statiques de traction, et de flexion trois points, sont réalisés à une vitesse d'essai de 2 mm/min, sur des éprouvettes dimensionnées selon la Norme AFNOR et ASTM respectivement.
- Les éprouvettes ont été découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir des plaques de 180 mm x 300 mm.
- La norme AFNOR 57-101 a été utilisée pour dimensionner les éprouvettes de traction, le tableau II.2 présente les dimensions des éprouvettes employées dans cette étude.

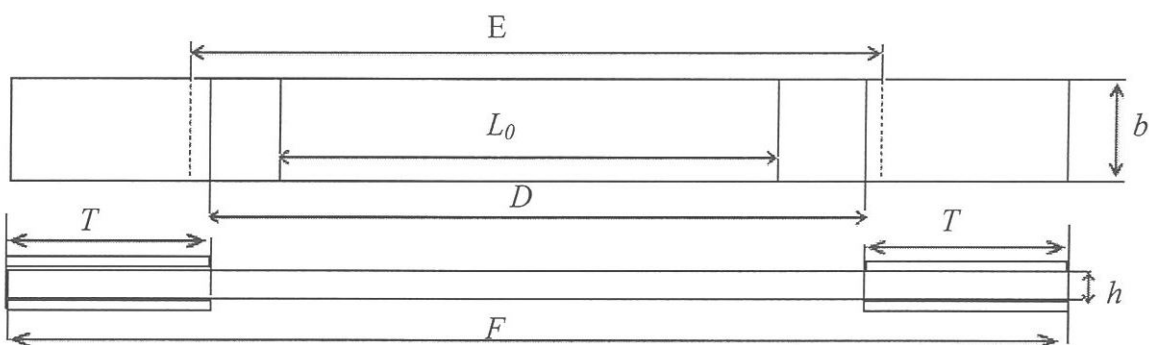


Figure II.12. Éprouvette de traction avec étalons collés.

Tableau II.3. Dimensions des éprouvettes de traction selon la norme AFNOR 57-101.

Désignation	Dimension [mm]
F : longueur totale minimal	250
h : épaisseur des éprouvettes	2 à 10
b : largeur de la partie calibrée	25 ou $50 \pm 0,5$
L_0 : longueur de référence	$100 \pm 0,5$
E : distance entre les mors	$170 \pm 0,5$
D : distance entre talons	$150 \pm 0,5$
T : longueur minimal des talons	50

- Pour les essais de flexion trois points la norme ASTM D79 est utilisée pour dimensionner les éprouvettes qui sont de dimensions : $h = 3$ mm, $L = 100$ mm, $l = 70$ mm, et $b = 20$ mm. Où h , L , l , b sont respectivement l'épaisseur, la longueur totale, entre l'appui, et la largeur d'éprouvette.

II.7.3. Essais de fatigue cyclique

Les essais de fatigue sont menés en contrôle déplacement avec une forme d'onde sinusoïdale d'une fréquence de 1,5 Hz. Le déplacement moyen (d_{moy}) est maintenu constant et égal à 50% du déplacement à la rupture en statique (d_r) (figure II.13).

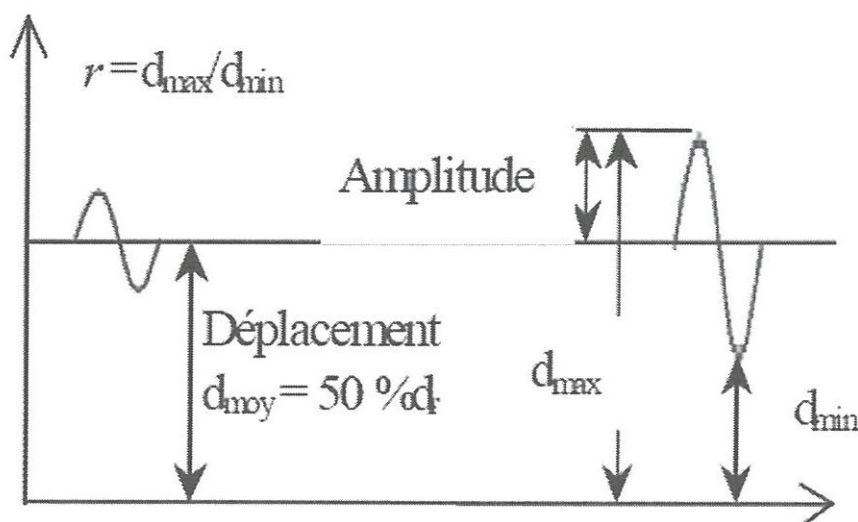


Figure II.13. Paramètres essentiels pour l'étude de fatigue cyclique.

Plusieurs niveaux de chargement r_d ($r_d = d_{\max}/d_r$) représentant le rapport du déplacement maximum au déplacement à la rupture statique sont considérés, variant de 0,95 à 0,60. Les éprouvettes testées sont identiques à celles utilisées dans le cas d'essais statiques en flexion trois points. Les paramètres d'essai sont calculés d'après les formules suivantes [BEZ 03]:

$$d_{\max} = r_d * d_{rup} \quad \text{II.2}$$

$$d_{moy} = 50\%d_{rup} \quad \text{II.3}$$

$$A = d_{\max} - d_{moy} \quad \text{II.4}$$

$$d_{\min} = d_{\max} - A \quad \text{II.5}$$

Où : r_d , d_{rup} , d_{\max} , d_{moy} , A , et d_{\min} sont respectivement le niveau de chargement, le déplacement à la rupture, le déplacement maximal, le déplacement moyen, l'amplitude et le déplacement minimal.

II.8. Conclusion

Une nouvelle technique d'extraction des fibres de cactus est utilisée ; elle consiste à l'enfouissement des troncs du cactus dans la terre ce qui favorise la fermentation de l'oxalate de calcium et par conséquent les couches de fibres deviennent faciles à séparer.

Le tissu de cactus change leur morphologie au cours de la maturation de cette plante.

Les résultats de la spectrométrie infrarouge prouvent que les fibres extraites par enfouissement, ne montre pas un changement dans leurs propriétés chimiques.

La valeur de la densité trouvée pour les fibres de cactus donne une vision sur la leur haute légèreté.

Résultats Expérimentaux

Comportement en statique et en fatigue cyclique des fibres végétales et des stratifiés de cactus/polyester sous sollicitation en traction et en flexion

III.1. Introduction

Ce chapitre décrit les travaux expérimentaux effectués pour la détermination des caractéristiques mécaniques du composite à renfort naturel, élaboré au laboratoire LMS de l'université de Guelma,, en statique et en fatigue cyclique et il s'agit donc :

- d'essais de traction statique effectuée sur le renfort en fibre de cactus pour lequel le module d'Young est déterminé ainsi que la mise en évidence de l'influence de l'architecture des fibres sur la charge à la rupture.

- d'essais de traction et de flexion 3-points statique effectuées aussi sur des composites stratifiés ayant différentes orientations de fibres, dans le but de déterminer leurs propriétés mécaniques (module de Young, contrainte et déplacement à la rupture).

- Enfin, pour déterminer la durée de vie des composites stratifiés, des essais de fatigue cyclique en flexion trois points sont menés en contrôle déplacement avec une forme d'onde sinusoïdale d'une fréquence de 1,5 Hz. Au cours de ces essais on enregistre la force en fonction du nombre de cycles dans le but de faire le suivi de la perte de charge (perte de rigidité) (F/F_0) ainsi que les boucles d'hystérésis dans le but de pouvoir déterminer l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles.

L'observation des faciès de rupture a été effectuée aussi bien après les essais statiques qu'après les essais de fatigue dans le but d'identifier les modes d'endommagement.

III.2. Résultats et discussions des essais statiques

III.2.1. Essais de traction sur la fibre seule

Les essais de traction ont été réalisés sur la fibre de cactus seule ainsi que sur les composites stratifiés cactus/polyester. Pour la fibre l'essai a été réalisé jusqu'à la rupture à une vitesse de 2 mm/min sur trois architectures différentes, obtenues pour trois zones différentes d'un même tronc du cactus ; l'extraction des fibres a été réalisé sur trois troncs différents. La figure III.1 représente les éprouvettes d'essai avec des étalons selon la norme AFNOR 57-101.

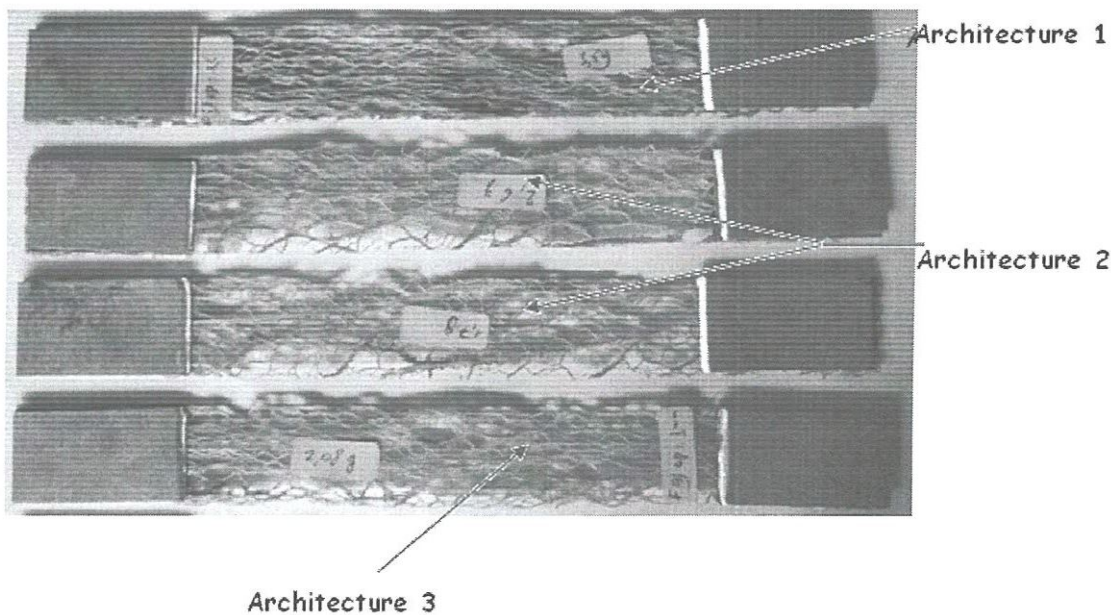


Figure III.1. *Éprouvettes d'essai en fibre de cactus.*

La figure III.2 représente la courbe charge-déplacement type de la fibre de cactus, la forme de la courbe est semblable à celle observée pour des fibres naturelles

telle que le Lin [AND 05] et le cactus [MAL 03] rencontré dans la littérature et présenté dans la figure III.3.

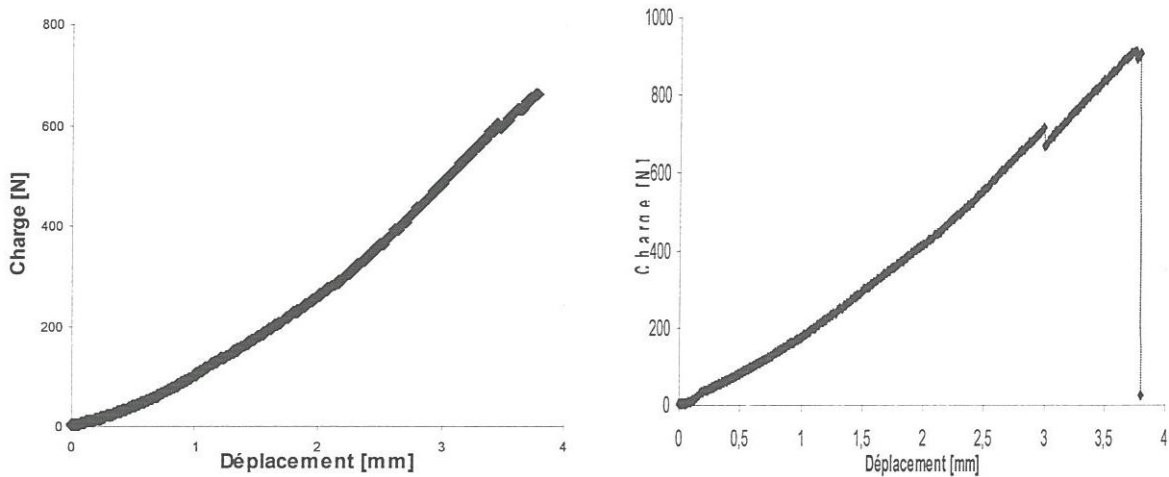


Figure III.2. Courbe type Charge Déplacement de la fibre de cactus.

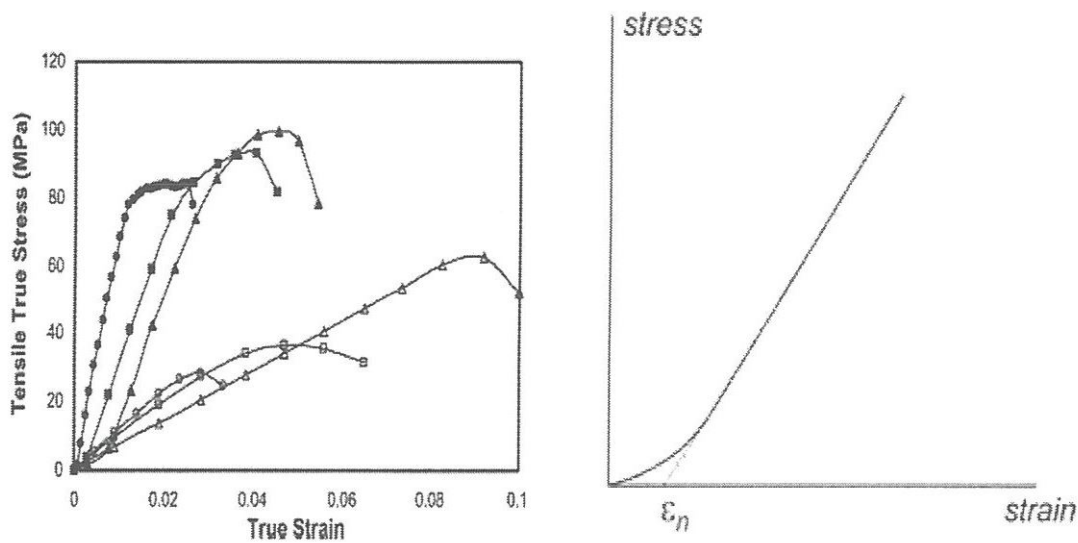


Figure III.3. Courbe type de la fibre de lin contrainte déformation.
a) fibre de lin [AND 05]. b) fibre de épais de cactus [MAL 03].

Le comportement charge-déplacement jusqu'à la rupture de la fibre de cactus est caractérisé par une seule phase linéaire avec comme même des discontinuités qui corresponde à la rupture de quelques cellules dans quelques éprouvettes testées.

La figure III.4 représente les courbes contrainte-déformation des éprouvettes testées. Les contraintes et les déformations sont calculées par les expressions.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{III.1})$$

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l} \quad (\text{III.2})$$

D'après les résultats obtenus de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation pour les trois tissus de fibre de cactus (figure III.4) on constate que l'architecture 1 possède le meilleur comportement. Ce comportement est due au faite que les fibres de l'architecture 1 sont présent dans une partie externe d'un tronc ce qui confer au tissus de cactus des cellules plus petite et donc assez dense comparativement au l'architectures 2 et 3 prise respectivement au milieu et au centre du tronc (voir figure II.5 chapitre 2). Le tableau III.1 illustre les propriétés mécaniques des trois architectures testées. Le module d'élasticité est calculé d'après la norme ASTM à une ponte entre [0,5 à 1] % de la déformation.

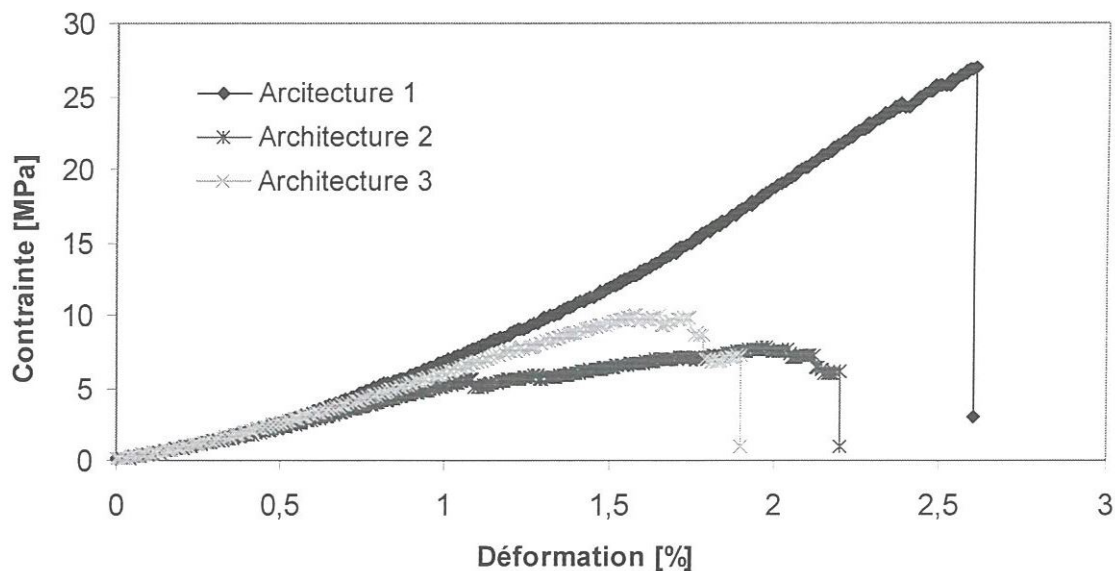


Figure III.4. Courbe expérimental Contrainte-Déformation pour les trois architectures.

Les modes d'endommagement de tissu de cactus testé en traction, sont représentés dans la figure III.5. Les architectures 2 et 3 présentent des ruptures dirigées par un angle d'environ 40 degrés, cet angle est dû à la rupture des cellules les moins denses. Par contre, le premier tissu montre une rupture différente qui est caractérisée par la ramification des fibres et aussi l'égalité des cellules formant le tissu de cactus.

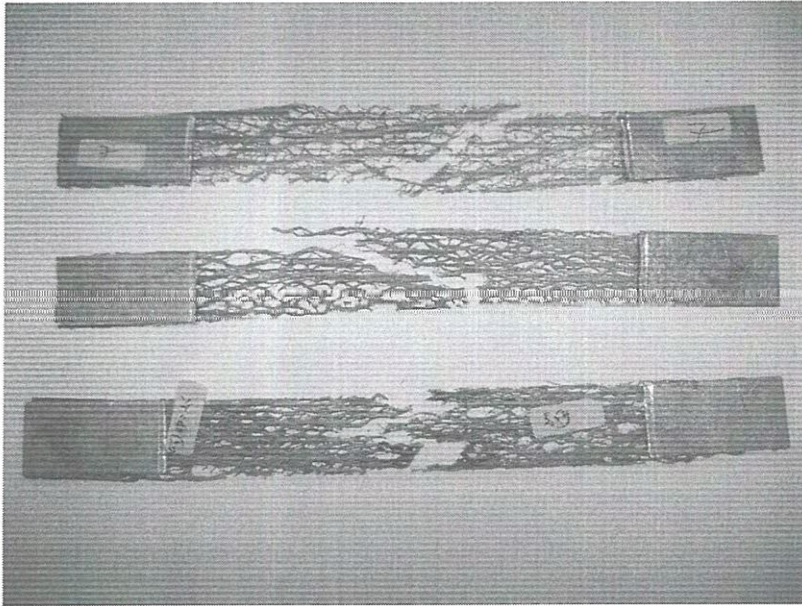


Figure III.5. Ruptures du tissu de cactus.

Tableau III.1. Propriétés mécaniques en traction axiale de tissus de cactus.

	σ_{rupture} [MPa]	$\varepsilon_{\text{rupture}}$ [%]	E_L [MPa]
Architecture 1	27	2,60	1100,45
Architecture 2	7,75	2,20	585,47
Architecture 3	10	1,90	705,93
Fibre de cactus [MAL 03]	27,30	2,90	1168

Où : σ_{rupture} , $\varepsilon_{\text{rupture}}$ et E_L sont respectivement la contrainte et la déformation à la rupture et le module longitudinal en traction axial.

D'après le tableau III.1 on remarque bien que les propriétés mécaniques varient en fonction de l'architecture du tissu, rappelant que la modification de l'architecture

est due la maturation de la plante. Il est important de signalé aussi que les résultats obtenus de l'architecture 1 sont en bonne concordances avec les travaux de Mohanaty et al [MAL 03] dans le cas cladode de Maroc, ces résultats ont été obtenues après un traitement alcalin de la fibre nettoyer par chlorite, a une 0% de humidité.

Les résultats présentés sur la figure III.6a du module de Young obtenu par des essais de traction réalisée sur les fibres, en fonction des trois locations A, B, et C du tronc de cactus, représentant respectivement l'extrémité, le milieu, et la location la plus proche du cœur du tronc montre que le module varie en fonction de la location de l'extraction de la fibre. Le module de Young augmente avec la maturation de la plante du cactus ceci est en bonne concordances avec les travaux de Niklas [NIK 99] figure III.6 b, qui montre dans son travail (réalisé sur trois plantes différentes), qu'il y a une existence de la variation du module de Young des fibres en fonction de la maturation de la plante.

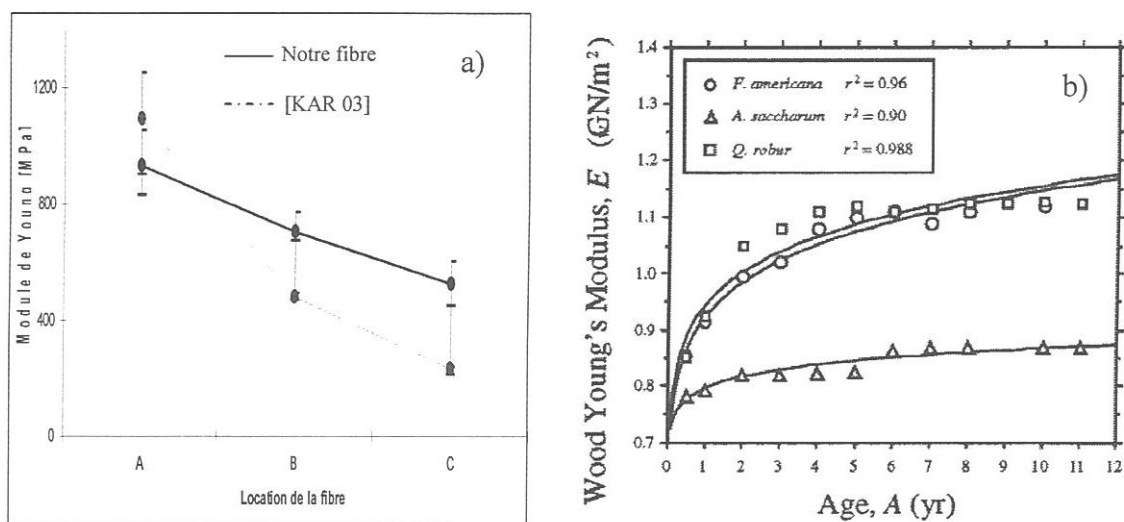


Figure III.6. a) Variation du module en fonction de la position de fibre dans un même tronc de cactus ; b) Module de Young des fibres naturelle en fonction de leur maturation [KAR 99].

La courbe en trait discontinu c'est un travail réalisé par Niklas et al, dans le cas des fibres de cactus de l'USA, ils sont utilisés différents endroits d'extraction de tissu, pour vérifier la variation de module de Young de tissu en fonction de la location [KAR 03].

III.2.2 Essai de traction sur les composites stratifiés (cactus/polyester)

Les essais de traction ont été effectués jusqu'à la rupture des éprouvettes à une vitesse de 2 mm/min et les dimensions des éprouvettes sont préparées selon la Norme AFNOR 57-101 où $L = 250$ mm, $b = 25$ mm et $h = 2,5$ mm sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur des éprouvettes testées. Alors que la longueur entre les mors l choisi pour ces essais est de 145 mm et la longueur des étalons est égale à 25 mm.

Les essais de traction statique sont prise dans trois direction des fibres : où les éprouvettes sont découpées, dans le sens des fibres, dans la direction perpendiculaire et dans l'orientation de 45° par rapport à la direction de tissu de cactus. La fraction volumique des fibres (V_f) est prise 25% ceci est en concordance avec la littérature [THI 05] et [SIN 03].

III.2.2.1 Essai de traction dans le sens des fibres

La figure III.7 représente une courbe type de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation, cette évolution se déroule en une seule phase caractérisée par une augmentation linéaire de la contrainte en fonction de la déformation. Le module longitudinal a été calculé d'une pente entre (0,5 à 1) % de déformation et les principales caractéristiques obtenues sont regroupées dans le Tableau III.2.

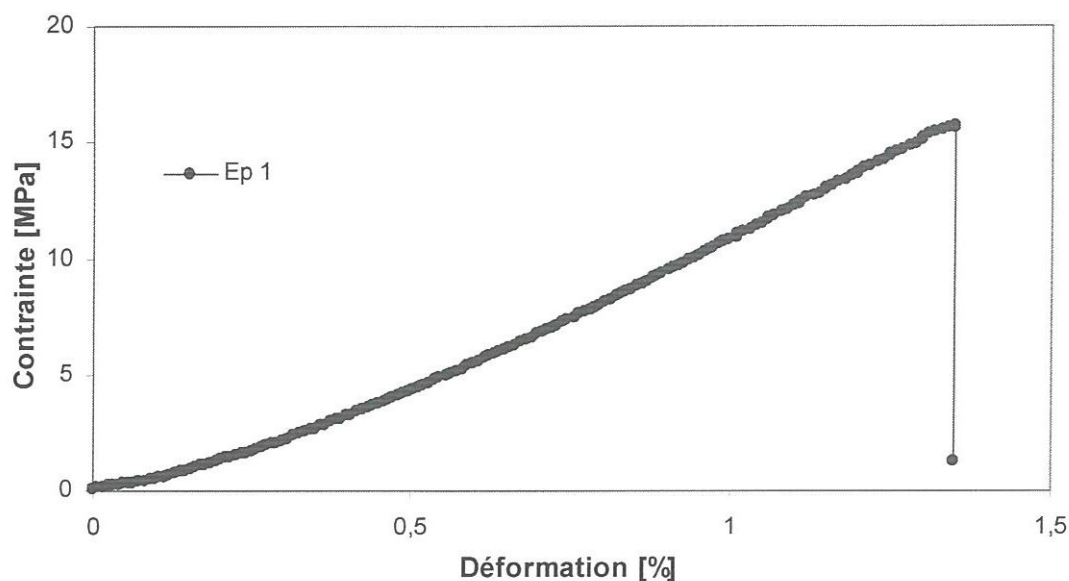


Figure III.7. Courbe de comportement mécanique d'un composite stratifié (cactus/polyester) sollicité en traction dans le sens de fibre.

Malgré que les éprouvettes soient découpées d'une même plaque les résultats obtenus (module de Young, contrainte déformation) se caractérisent par des dispersions entre les différentes éprouvettes testées (Figure III.8). L'origine de ces dispersions observée pour le module d'Young est liée par la forte anisotropie de la fibre [ARB 05] et aussi liée à la fraction volumique de la fibre dans la matrice [BEN 06], qui est un facteur incontrôlable vu la morphologie du tissu étudié. Alors que la dispersion dans les valeurs des contraintes et des déformations, peut être liée directement aux cavités dans la matrice, et la variété de l'architecture des fibres [RUI 02].

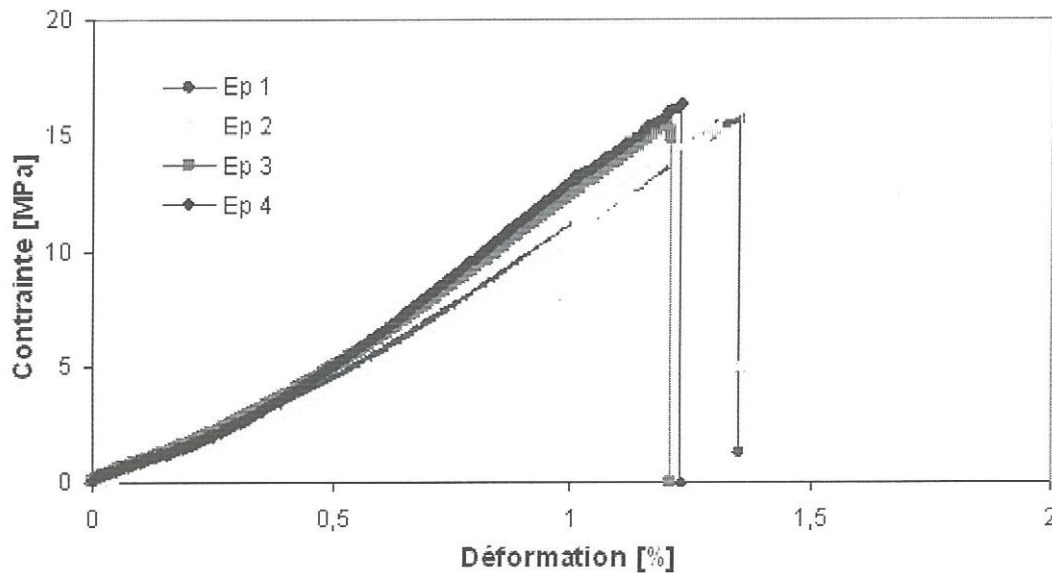


Figure III.8. Courbe Contrainte-Déformation d'un composite en renfort naturel (fibre de cactus) à une $V = 25\%$, sollicité en traction (sens de fibre).

Tableau III-2. Propriétés mécaniques en traction dans la direction de la fibre d'un composite stratifié (cactus/Polyster).

Eprouvette	σ_{rupture} [MPa]	$\varepsilon_{\text{rupture}}$ [%]	E_L [MPa]
1	15,71	1,35	1361,1
2	15,73	1,35	1351,3
3	15,40	1,21	1559,7
4	16,28	1,23	1631,7
moyenne	15,78	1,29	1476,0

Où : σ_{rupture} , $\varepsilon_{\text{rupture}}$ et E_L sont respectivement la contrainte et la déformation à la rupture et le module longitudinal en traction axial.

III.2.2.2 Essai de traction des composites stratifiés (Cactus/Polyester) dans le sens perpendiculaire à l'orientation des fibres

La figure III.9 montre les résultats expérimentaux des essais de traction pour le composite cactus/polyester chargés dans la direction transversale de la fibre. La variation de la contrainte/déformation est caractérisée par une droite jusqu'à la rupture brutale de l'éprouvette. La dispersion des valeurs de contrainte et de la déformation à la rupture, est à l'origine de la morphologie de tissu et aussi les défauts au sien des éprouvettes testés. Le module transversal a été calculé par une pente entre (0,5 à 0,1) % de déformation.

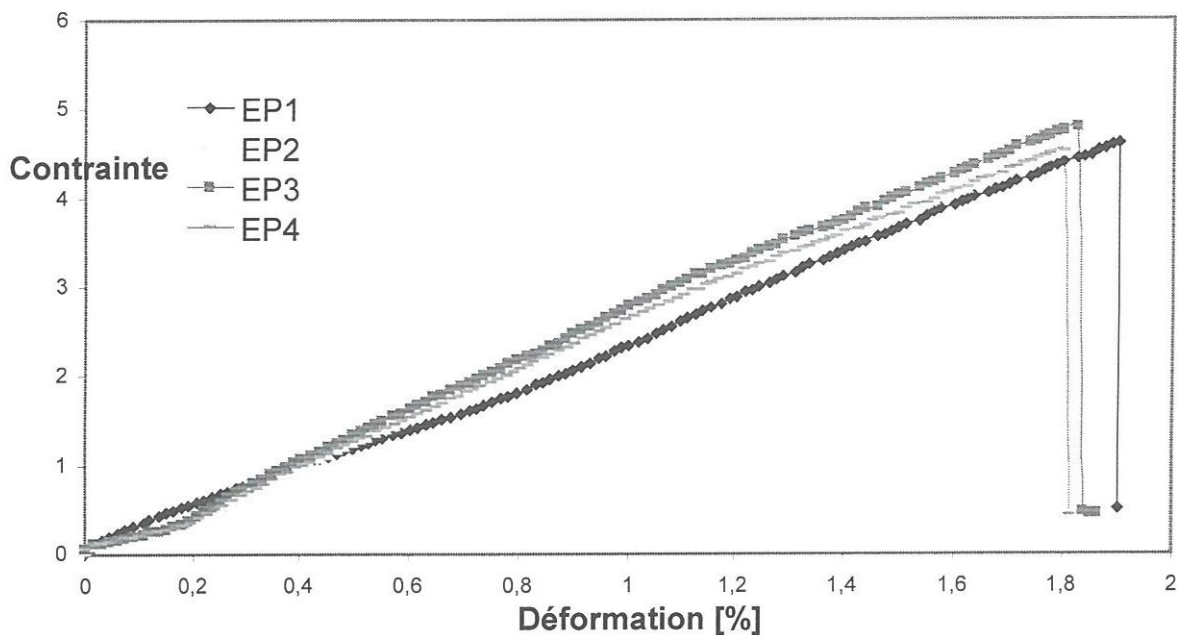


Figure III.9. Courbe Contrainte-Déformation d'un composite cactus/Polyester sollicité en traction dans la direction perpendiculaire à l'orientation des fibres.

Le tableau III.3 regroupe les propriétés mécaniques d'un composite cactus/polyester dont la direction de chargement de traction est perpendiculaire à l'orientation des fibres.

Tableau III.3. Propriétés mécaniques en traction d'un composite cactus/Polyester sollicité en traction dans la direction perpendiculaire à l'orientation des fibres.

Eprouvette	σ_{rupture} [MPa]	$\varepsilon_{\text{rupture}}$ [%]	E_T [MPa]
1	4,71	1,90	227,0
2	4,52	1,81	273,3
3	4,53	1,81	290,6
4	4,80	1,82	275,5
moyenne	4,64	1,86	266,6

Les résultats de E_T et de E_L permettent de calculé le coefficient de poisson selon la formule suivante :

$$\nu_{LT} = \frac{E_T}{E_L} \quad (\text{III.3})$$

ν_{LT} de ce matériau est égal à 0,18.

III.2.2. 3. Essai de traction des éprouvettes composite orientées à 45°

Le but de cet essai est la détermination du module de cisaillement, les essais ont été effectués dans les mêmes conditions sur cinq éprouvettes jusqu'à la rupture. La figure III.10 représente les courbes contrainte/déformation des éprouvettes testées. Le comportement de ce type de stratifiés ST3 est linéaire jusqu'à la rupture donc semblable au comportement des stratifiés ST1 et ST2. Par contre la contrainte est maximale dans le cas des composites ST1 est égal à 15,78 MPa, cette valeur supérieur 3 fois à la contrainte de rupture des starifiés ST2, les stratifiés ST3 caractérisé par une valeur de contrainte qu'est supérieur à la valeur de ST2 par 1 MPa. Les déformations à la rupture enregistrés pour les stratifiés ST2 sont plus important à celle enregistrés pour ST1 et ST3.

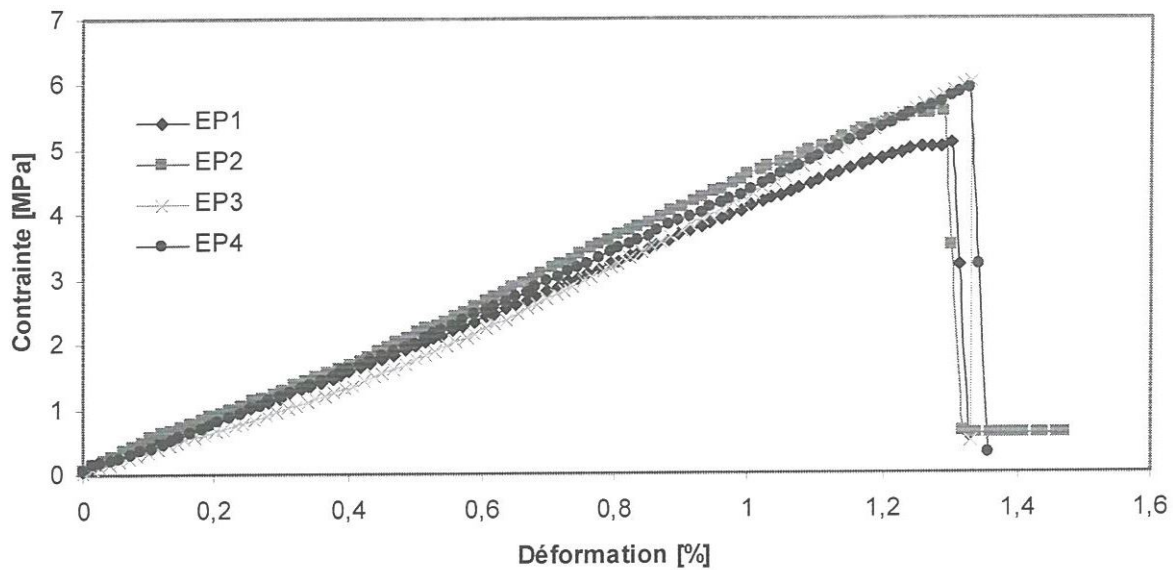


Figure III.10. Courbe Contrainte-Déformation d'un composite cactus/polyester ayant les fibres orientées à 45° sollicité en traction.

Le tableau III.4 regroupe les propriétés mécaniques d'un composite cactus/polyester polyester ayant les fibres orientées à 45° sollicité en traction.

Tableau III.4. Propriétés mécaniques en traction des stratifiés ST3.

Eprouvette	σ_{rupture} [MPa]	$\varepsilon_{\text{rupture}}$ [%]	E_{LT} [MPa]
1	5,07	1,30	428,1
2	5,58	1,29	419,3
3	6,03	1,33	418,8
4	6,03	1,33	434,8
moyenne	5,68	1,32	426,0

III.2.2. 4. Mode d'endommagement des éprouvettes sollicitées en traction monotone

La figure III.11 représente la rupture des éprouvettes testée en traction monotone pour les trois types de composites ayant différentes orientations du tissu. Le mode d'endommagement des stratifiés ST2 et ST3é (figure III. b et c) est favorisé par la décohésion entre les joints du tissu, qu'ils ont l'endroit la plus faible dans le tissu de cactus. La rupture des éprouvettes testées au sens des fibres, présente un complexe endommagement lié à la ramification des fibres comme montre la figure III.11 a.

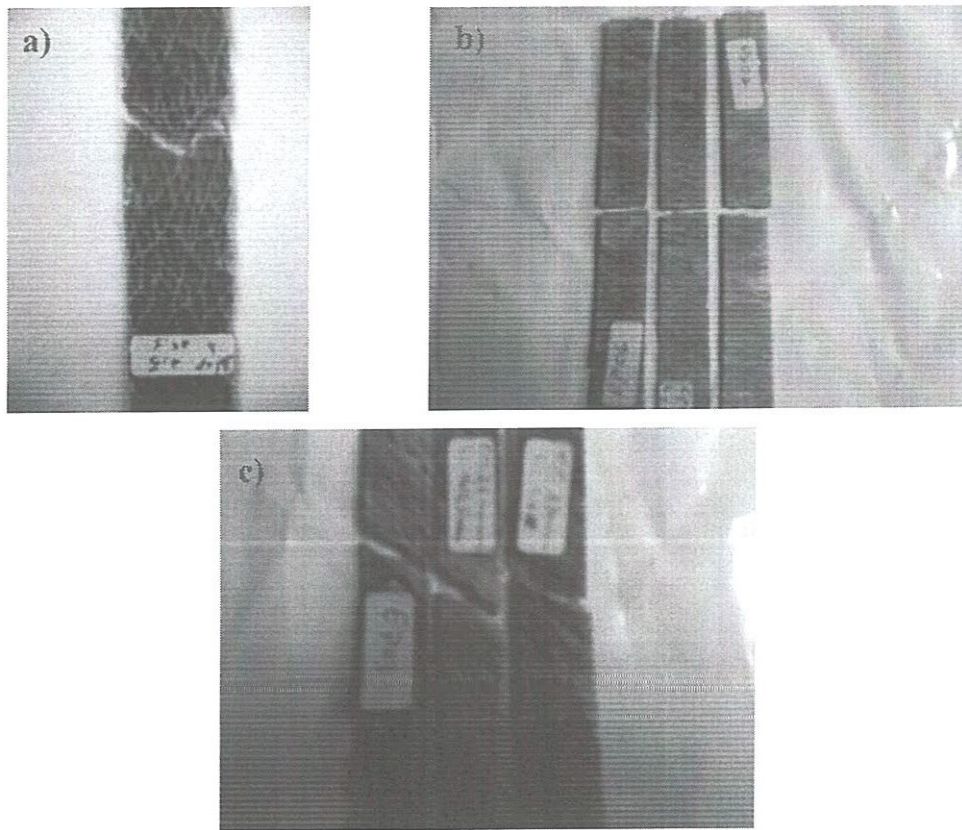


Figure III.11. Rupture d'éprouvette sous sollicitation de traction monotone.
a) stratifiés ST1 ; b) stratifiés ST2 ; c) stratifiés ST2

III.3 Essai de flexion 3 points

Dans le cas des essais de flexion seule les stratifiés ST1 en été testé sur au moins cinq éprouvettes, avec une vitesse d'essai de 2 mm/min. Les éprouvettes figure III.12 ont été découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir de plaques de 180 mm x 300 mm selon la norme ASTM D79. Ces éprouvettes sont de dimensions : $h = 3$ mm, $L = 100$ mm, $l = 75$ mm et $b = 20$ mm. Où h , L , l , b sont respectivement l'épaisseur, la longueur totale, la distance entre appuis et la largeur des éprouvettes.

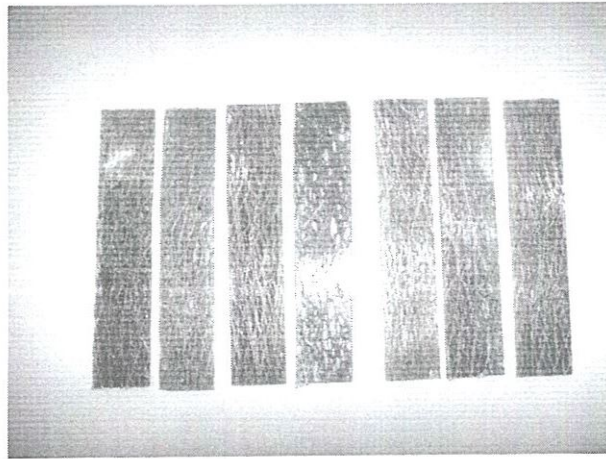


Figure III.12. Les éprouvettes d'essai de flexion.

III.3.1 Résultats et discussions

La Figure III.13 représente le comportement mécanique charge/flèche d'un composite cactus/polyester avec une fraction volumique $V_f = 25\%$ sollicité en flexion 3-points.

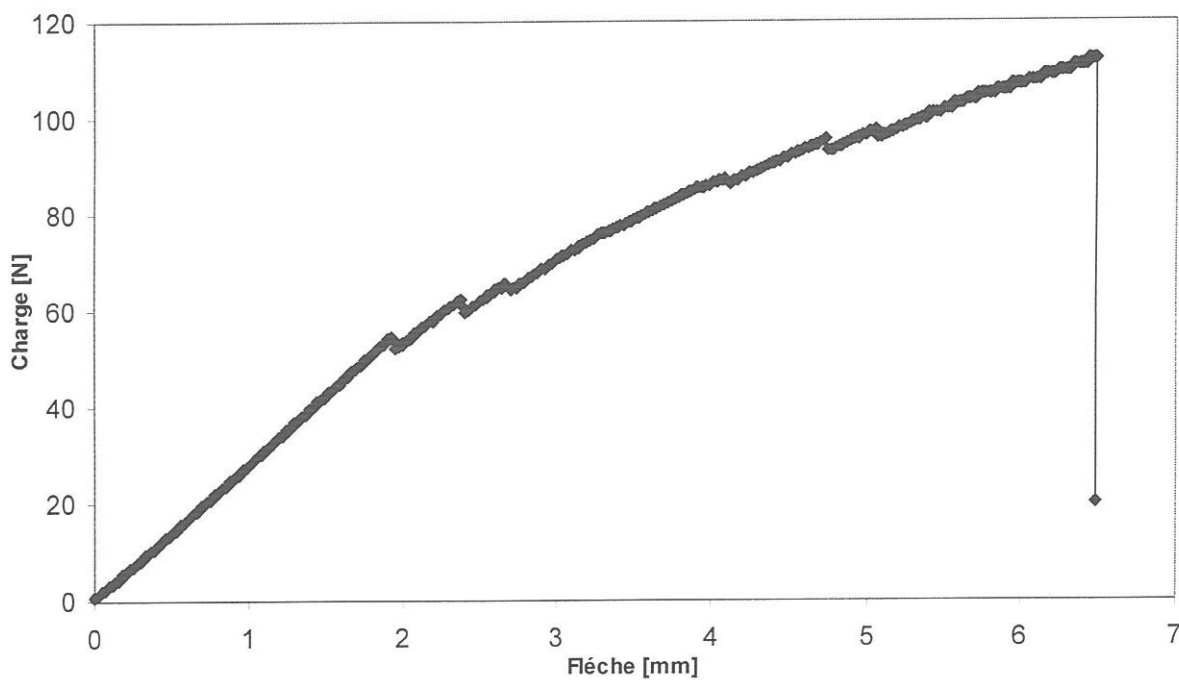


Figure III.13. Courbe type Charge-Flèche d'un composite cactus/polyester, sollicité en flexion 3 points.

La courbe charge/flèche de ce type de composite se caractérise par un comportement linéaire jusqu'à une flèche de 2 mm correspondant à l'initiation des

fissures au niveau de la matrice (résine). Une image obtenue au microscope à partir d'une éprouvette chargée à 60% de la flèche à la rupture (Figure III.14), montre des petites fissurations au niveau de la matrice. L'augmentation de la charge provoque le développement des fissures et un comportement en escalier de la courbe charge/flèche est enregistré jusqu'à la rupture brutale de l'éprouvette. Ce type de comportement est similaire à celui de Hepworth et Smith dans le cas de composite en fibre de tendon animal [HEP 02].

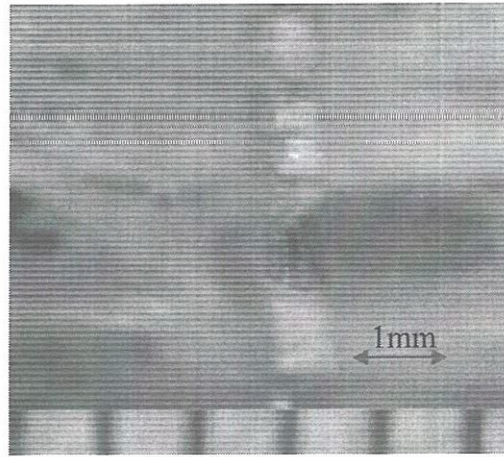


Figure III.14. *Éprouvette chargée à 60% de la flèche à la rupture observée par un microscope optique à un agrandissement de 20 fois.*

La figure III.15 représente les courbes contrainte/déplacement des éprouvettes testées ; la contrainte et le module de flexion sont calculés d'après les formules [UMA 97] :

$$\sigma_f = \frac{3 FL}{2 bh^2} \quad (\text{III.4})$$

$$E_f = \frac{L^3 F}{4bh^3 w} \quad (\text{III.5})$$

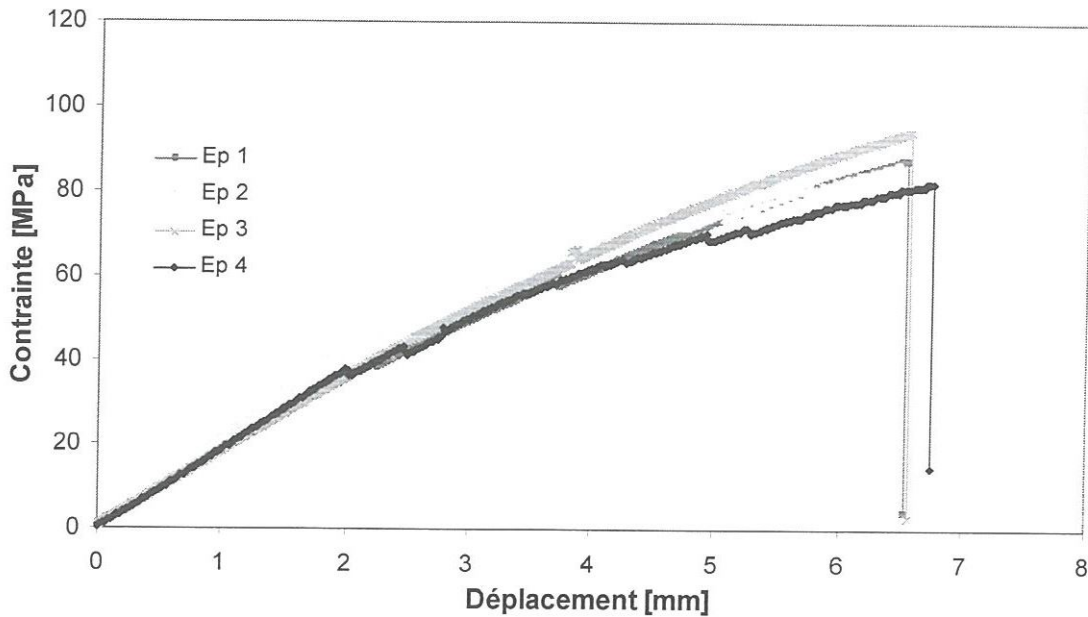


Figure III.15. Courbes contrainte-déplacement d'un composite a cactus/polyester, sollicité en flexion 3 points

Les propriétés mécaniques de toutes les éprouvettes testées en flexion trois points sont regroupés dans le tableau III.5, les résultats obtenus montrent qu'il existe une variation dans les propriétés à la rupture (contrainte/flèche) ainsi qu'une faible variation dans le module d'élasticité. La dispersion enregistrer pour la contrainte et le déplacement à la rupture en flexion trois points, est fortement liée à la variation de l'architecture des fibres, et aussi le volume sollicité c'est-à-dire des endroits les plus pauvre en fibres dans les éprouvettes testées. La dispersion observée pour le module en flexion est généralement liée à l'anisotropie de la fibre comme sa a été déjà expliqué précédemment pour les essais de traction.

Tableau III.5. Propriétés mécaniques en flexion trois points d'un composite cactus/polyester à une $V_f = 25\%$.

Eprouvette	σ_{rupture} [MPa]	d_{rupture} [mm]	E_f [MPa]
1	86,50	6,53	8329,5
2	86,41	6,49	8463,1
3	94,43	6,57	8262,5
4	82,40	6,74	8246,3
moyenne	87,45	6,6	8325,1 \pm 5

III.3.2 Faciès de rupture en flexion 3-points monotone

L'observation des faciès de rupture des éprouvettes sollicitées en flexion 3-points sous chargement statique est présentée sur la figure III.16. L'analyse de ces faciès montre que l'endommagement du matériau est favorisé par la rupture de la matrice, suivi par la rupture des fibres. Par contre l'observation microscopique, montre qu'il n'existe presque pas une décohésion fibre-matrice.



Figure III.16. *Faciès de rupture des éprouvettes testée en flexion 3 points statique*

III.4. Essais de fatigue cyclique d'un composite cactus/polyester en flexion 3-points

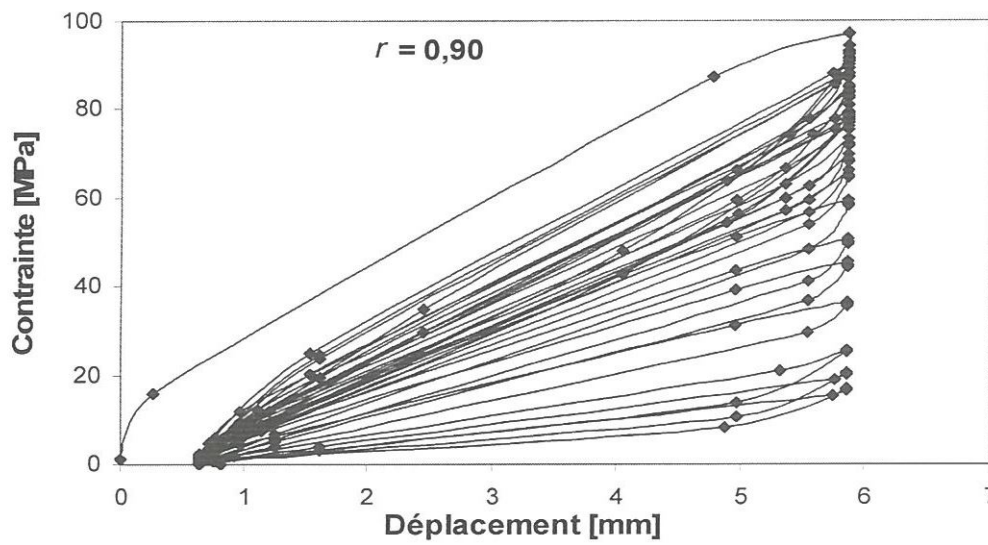
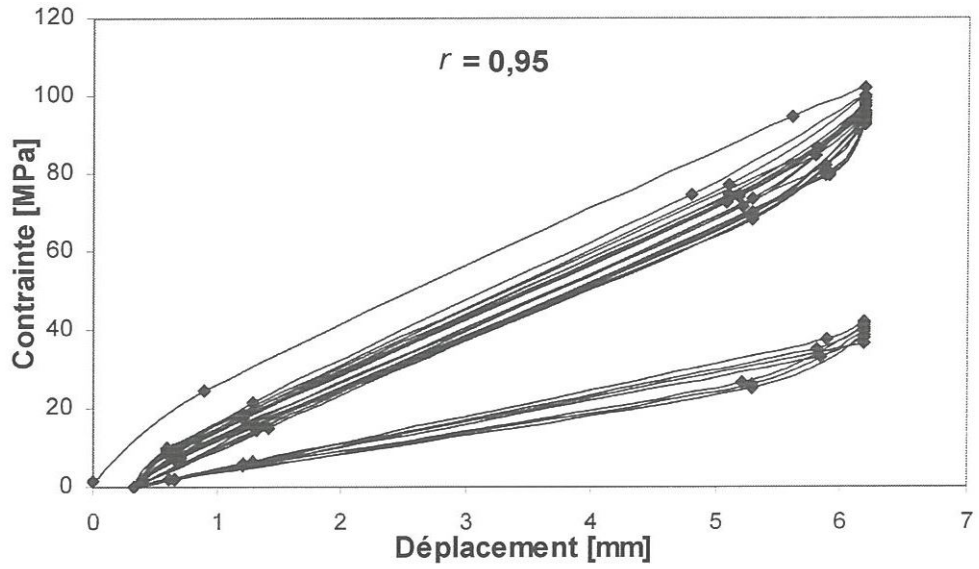
Les essais de fatigue sont menés en contrôle déplacement avec une forme d'onde sinusoïdale d'une fréquence de 1,5 Hz. Le déplacement moyen (d_{moy}) est maintenu constant et égal à 50% du déplacement à la rupture en statique (d_r). Plusieurs niveaux de chargement r_d ($r_d = d_{\text{max}}/d_r$) représentant le rapport du déplacement maximum (d_{max}) au déplacement à la rupture statique (d_r). Plusieurs niveaux de chargement variant de 0,95 à 0,60 sont considérés. Les éprouvettes testées sont identiques à celles utilisées dans le cas d'essais statiques.

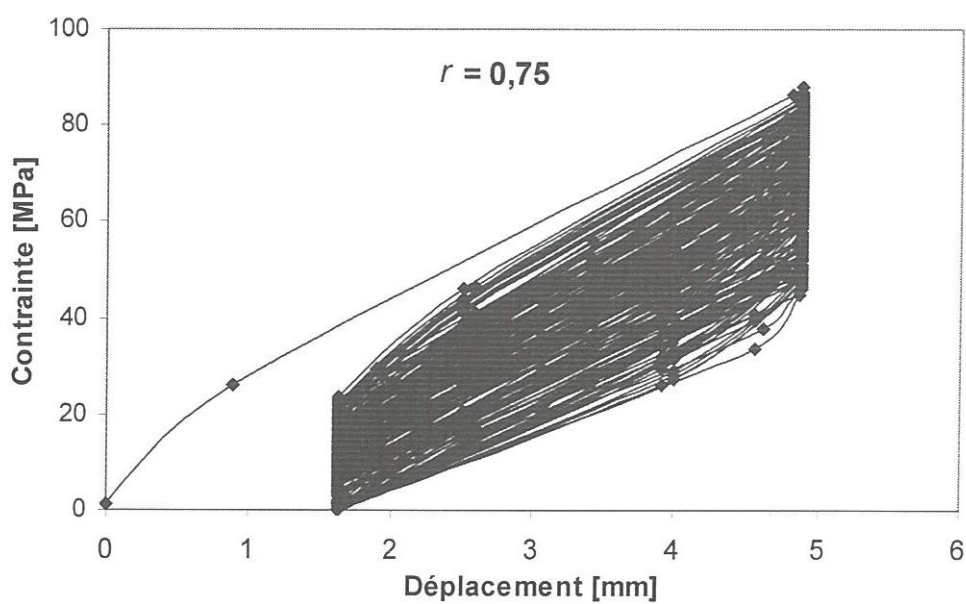
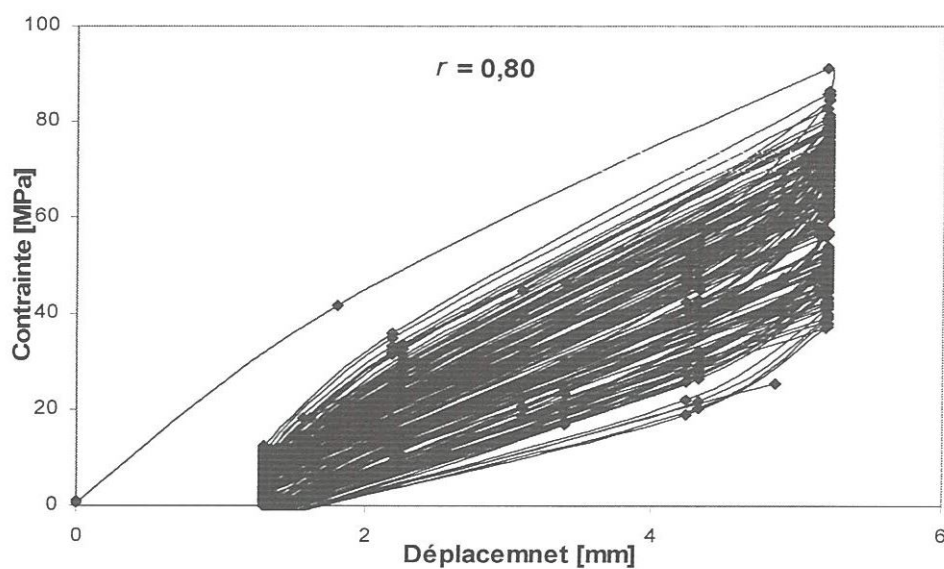
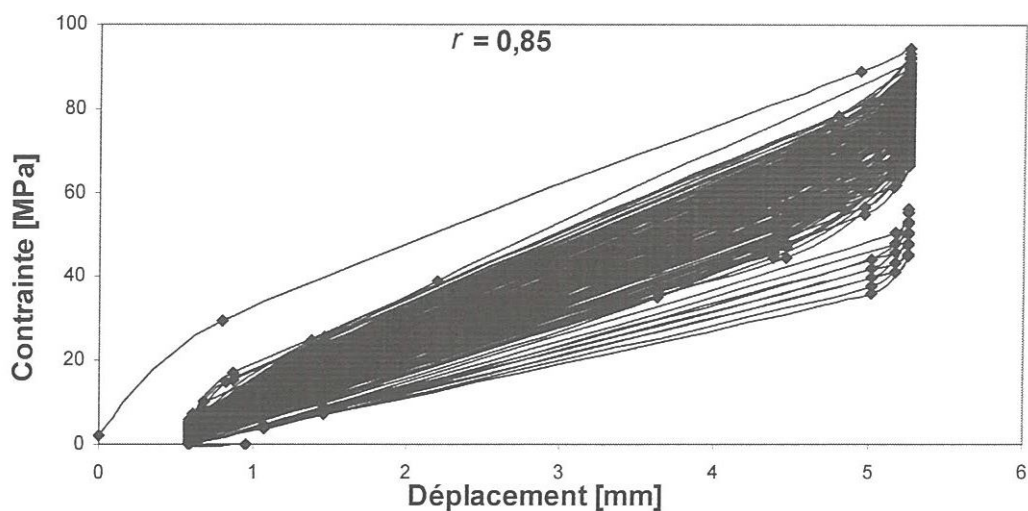
III.4.1. Résultats des essais de fatigue

III.4.1.1. courbes de hystérésis

Les Figures III.17 montrent les courbes contrainte déplacement avec les boucles d'hystérésis d'un composite cactus/polyester pour différent niveau de chargement (r_d). On remarque bien que pour un niveau de chargement donné, la contrainte maximale dans les boucles d'hystérésis diminue avec l'augmentation du nombre de cycles.

Pour bien exploité les résultats obtenu des Figures III.17 il est nécessaire d'extraire plusieurs courbes séparar et les analysées.





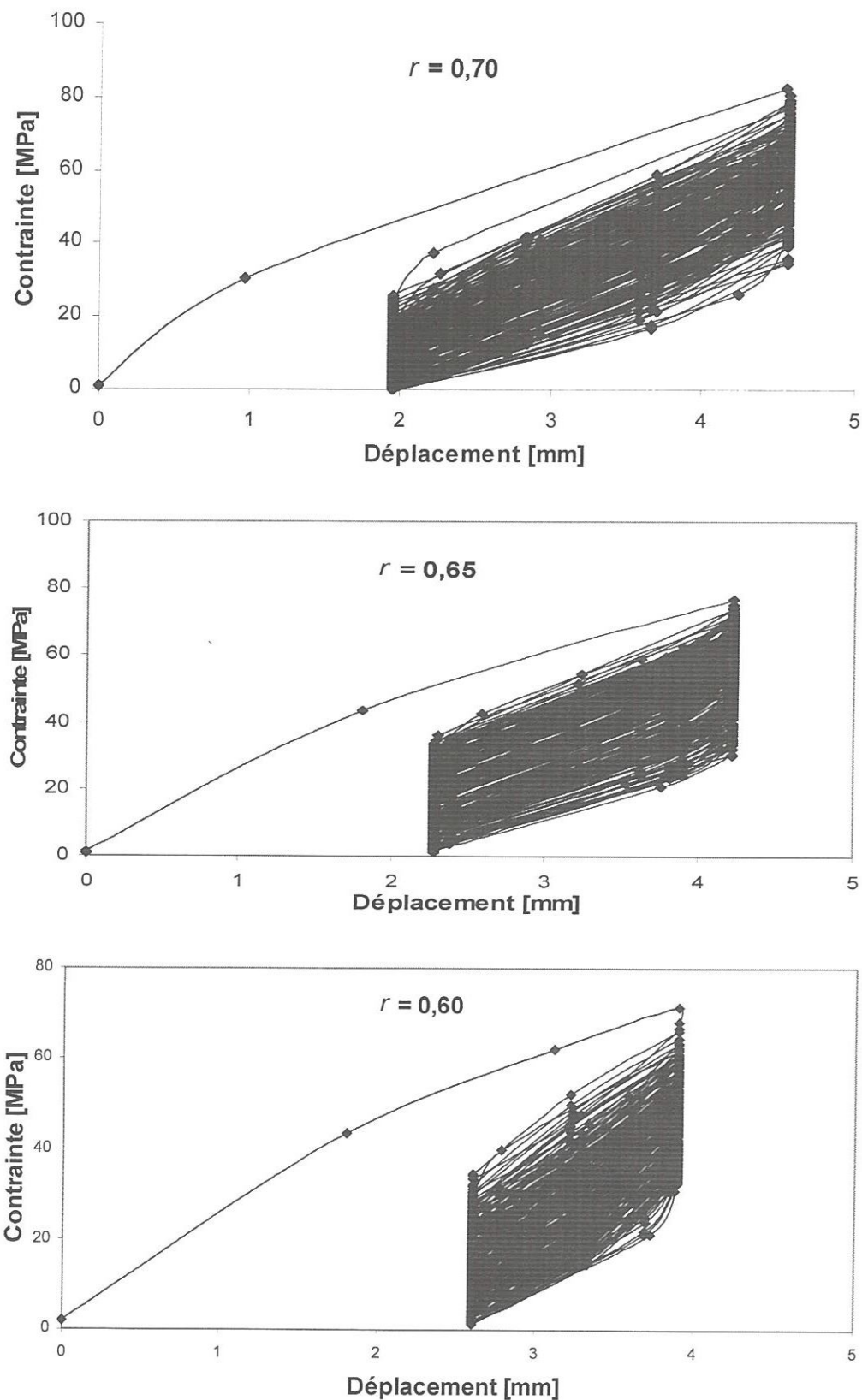


Figure III.17. Courbes de hystériser pour les différents niveaux de chargement (r_d).

III.4.1.2. Perte de charge

Le suivi de la perte de rigidité constitue une des méthodes les plus utilisées pour suivre la progression de l'endommagement par fatigue des composites [BEZ 03]. Au cours de ces essais, nous avons enregistré l'évolution de la force en fonction du nombre de cycles N . La force maximale F est normalisée à celle obtenue lors du premier cycle F_0 .

Les résultats obtenus montrent que l'évolution de la perte de charge jusqu'à la rupture des éprouvettes testées (figure III.18), se déroule en trois phases :

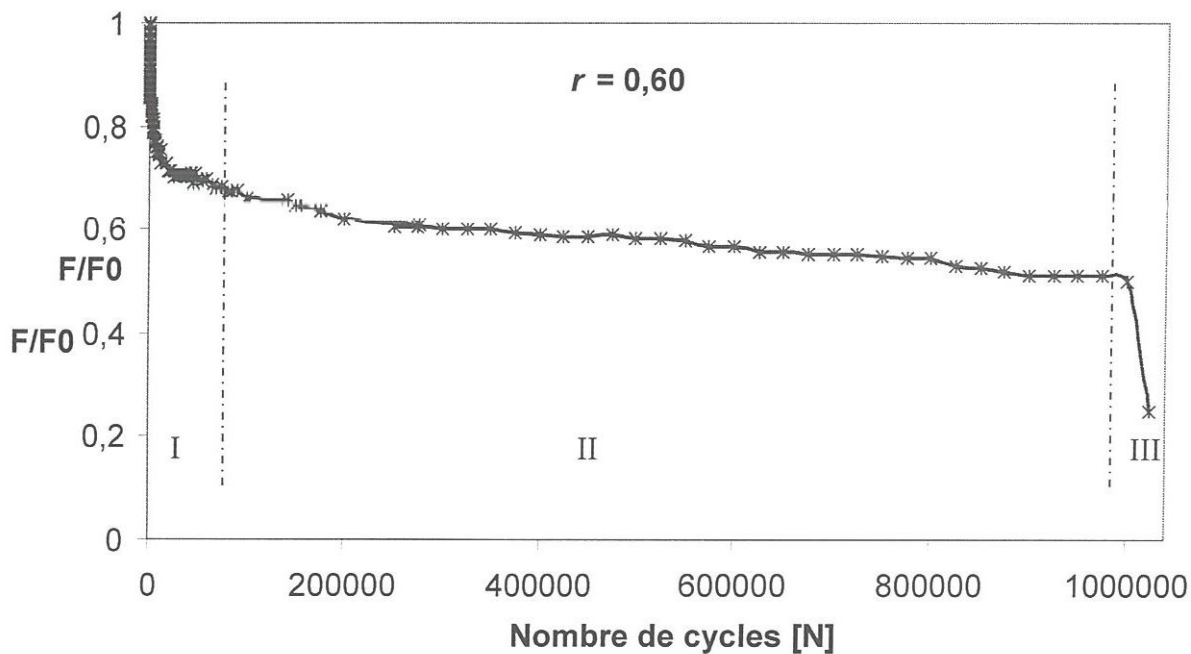


Figure III.18. Perte de charge F/F_0 en fonction du nombre de cycles d'un matériau composite cactus/polyester pour un niveau de chargement $r_d = 0,60$.

- Dans un premier temps, une diminution brutale de la perte de charge F/F_0 se manifeste dès les premiers cycles, généralement liée à la fragilité de la matrice utilisée [PER 06].
- La deuxième phase est caractérisée par une diminution très lente, correspondant à la quasi-totalité de la durée de vie de l'éprouvette.
- La troisième phase très courte, la perte de charge s'accélère brutalement jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

La figure III.19 représente l'évolution de la perte de charge en fonction du nombre de cycles N en échelle semi-log, d'un matériau composite cactus/polyester avec une fraction volumique V_f de 25 %, pour les différents niveaux de chargement (r_d). Sur la figure Pour un niveau de chargement élevé, correspondant à une amplitude considérable, la résistance à la fatigue est très courte et la rupture total des éprouvettes est obtenu pour quelques centaines de cycles, ceci pour les niveaux de chargement ($r_d = 0.95$ ou 0.90). Cependant, pour un faible niveau de chargement correspondant à une faible amplitudes, les mécanismes de dommages sont activés avec une propagation très lente et la résistance à la fatigue est très importante. En effet, a un million de cycle la rupture n'ai que partiellement un niveau de chargement $r_d = 0,60$.

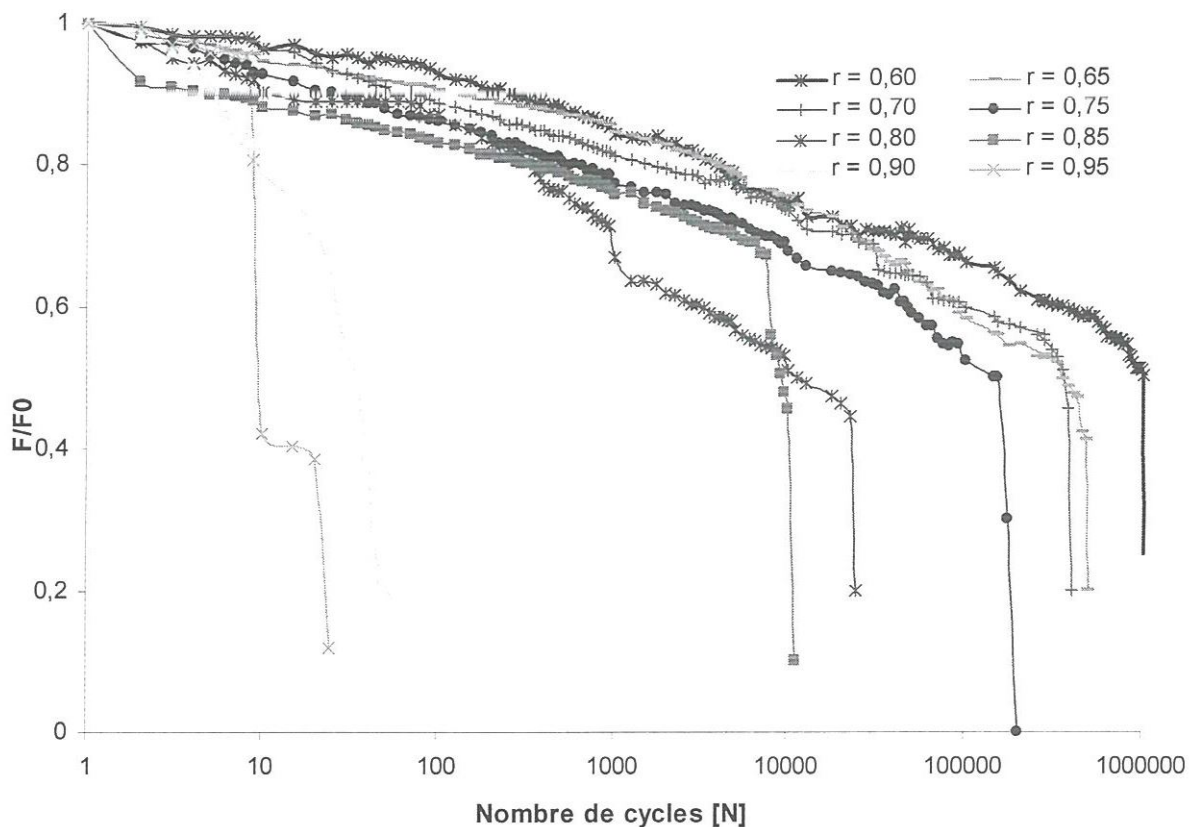


Figure III.19. Evolution de la perte de charge F/F_0 en fonction de nombre de cycles d'un composite cactus/polyester pour différents niveaux de chargement r_d .

La figure III.20 montre qu'avec le cyclage le matériau a tendance à perdre sa rigidité (F/F_0) et la vitesse de cette perte est fortement dépendante du niveau de chargement. Afin d'expliquer ce nous avons choisi les niveaux 0,80 et 0,70. Pour le niveau 0,80 la phase 1 est caractérisé par une accélération de perte de charge jusqu'à

$F/F_0 = 0,63\%$ qui corresponde à un nombre de 1750 cycles, par contre dans le niveau 0,70 la phase 1 s'arrêtera à un nombre de cycle de 1250 cycles à une perte de charge de 0,80%. Par contre dans la phase 2 les deux niveaux de chargement sont caractérisés par une diminution très lente de la perte de charge, la fin de cette phase pour les deux niveaux de chargement correspondre à un nombre de 25000 et 350000 cycles respectivement.

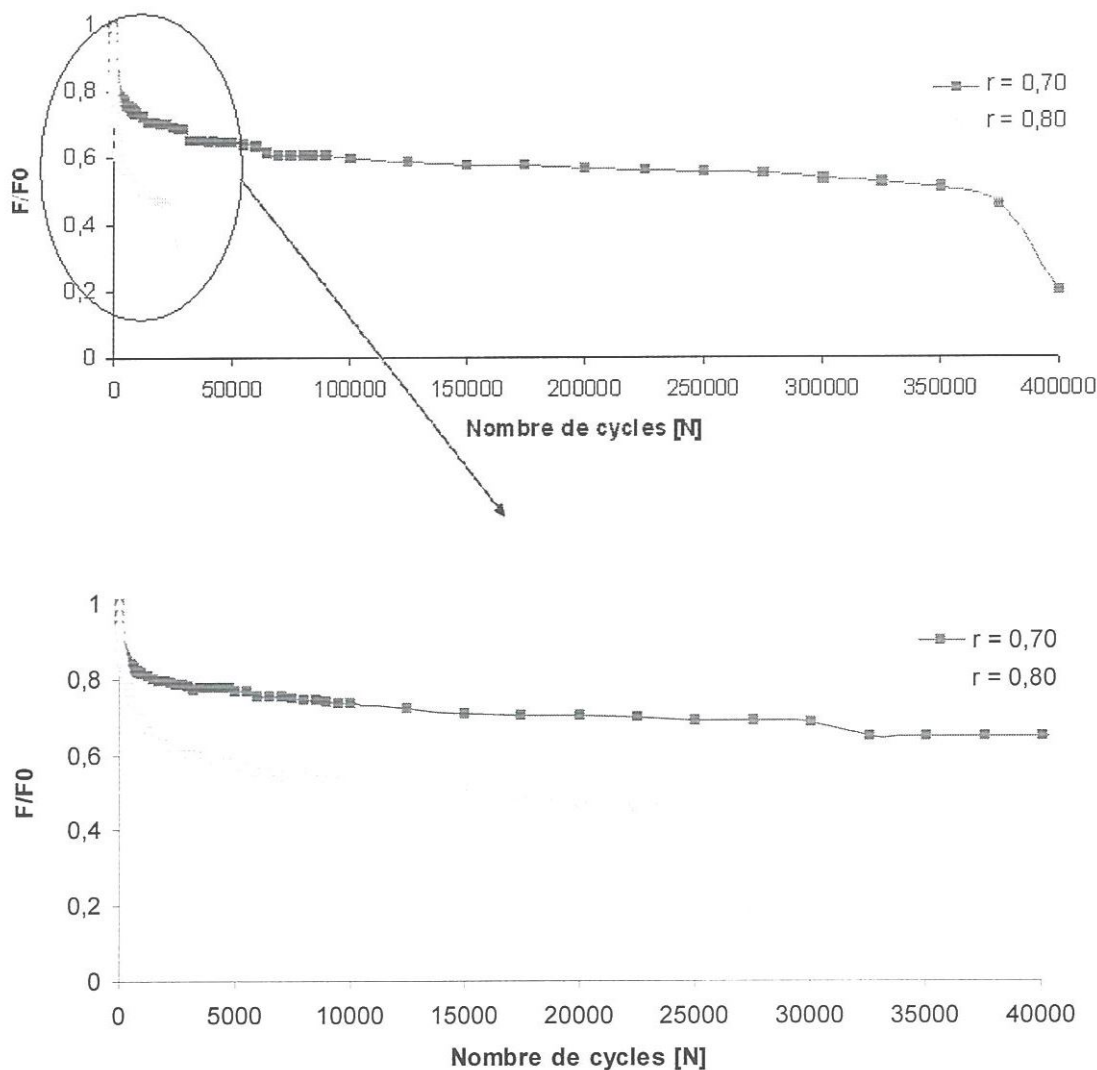


Figure III.20. Influence du niveau de chargement sur la perte de charge en fonction du nombre de cycles, pour $r_d = 0,7$ et $r_d = 0,8$.

III.4.1.3. Courbes de Wöhler

La figure III.21 représente les courbes de Wöhler en utilisant les critères de ruptures N_5 , N_{10} et N_{50} . La variation du niveau de chargement r_d en fonction du nombre de cycles N peut être décrite par une droite d'équation [BEZ 03*]:

$$r_d = 1 - K \log N \quad (\text{III.6})$$

Où : K est la pente de la droite d'endurance.

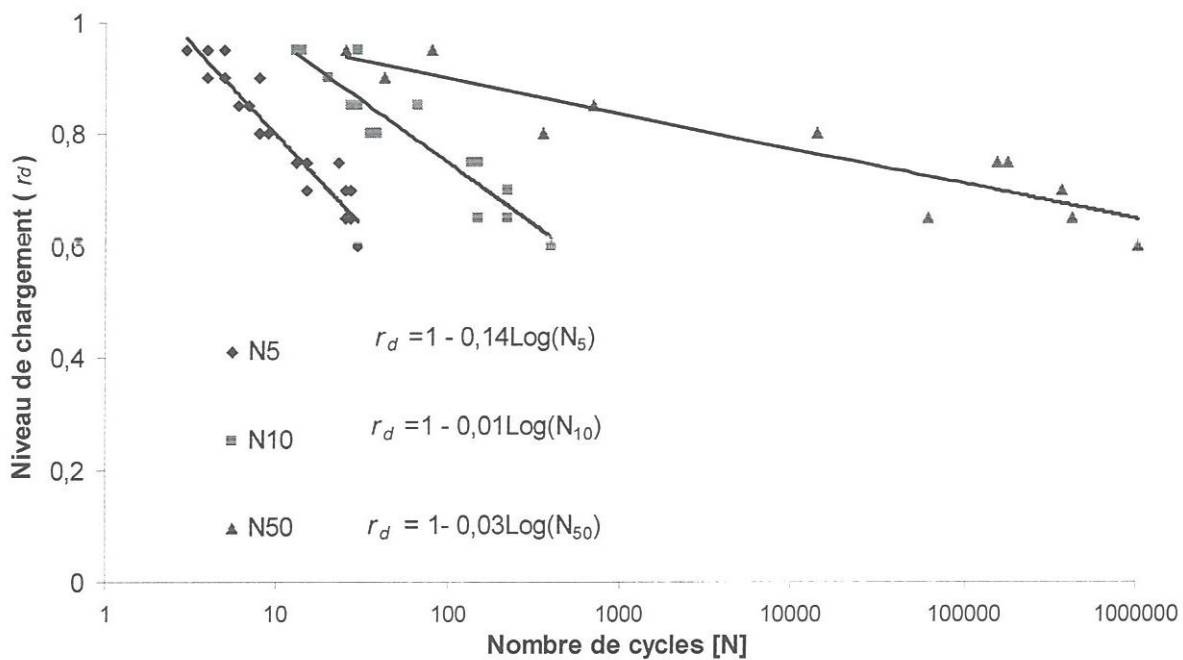


Figure III.21. Courbes de Wöhler utilisant les critères de ruptures N_5 , N_{10} et N_{50} .

Les diagrammes d'endurances donnent l'évolution du niveau de chargement (r_d) en fonction du nombre de cycles en utilisant les critères de ruptures N_5 , N_{10} et N_{50} . L'analyse des résultats obtenus, montre une dispersion des valeurs de la durée de vie. Cependant, il ressort que l'ensemble des résultats converge vers l'unité pour des faibles nombres de cycles ; ce qui montre que lorsque le niveau de chargement est voisin de celui de la rupture en statique, la rupture est obtenue dès les premiers cycles pour des niveaux de chargement élevé, par contre pour des faibles niveaux de chargement, la rupture est obtenue pour des nombres de cycles très élevés [BEZ 03**], [ASS 06].

III.4.1.4. Boucle d'hystérésis du 1er cycle pour tous les niveaux de chargement

La figure III.22 représente les boucles d'hystérésis enregistrée du premier cycle des différents niveaux de chargements utilisés. Le niveau de chargement influe sur l'endommagement du matériau du point de vue énergétique. L'énergie dissipée E_d au cours d'un cycle est égale à la surface de sa boucle d'hystérésis et sa valeur dépend du niveau de chargement. En d'autres termes E_d est importante pour les niveaux de chargement important.

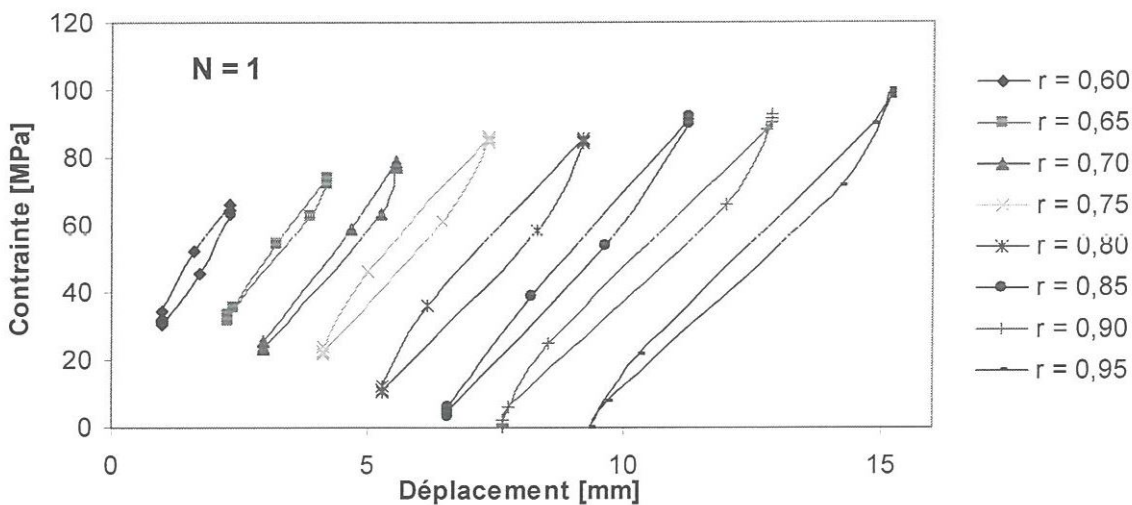
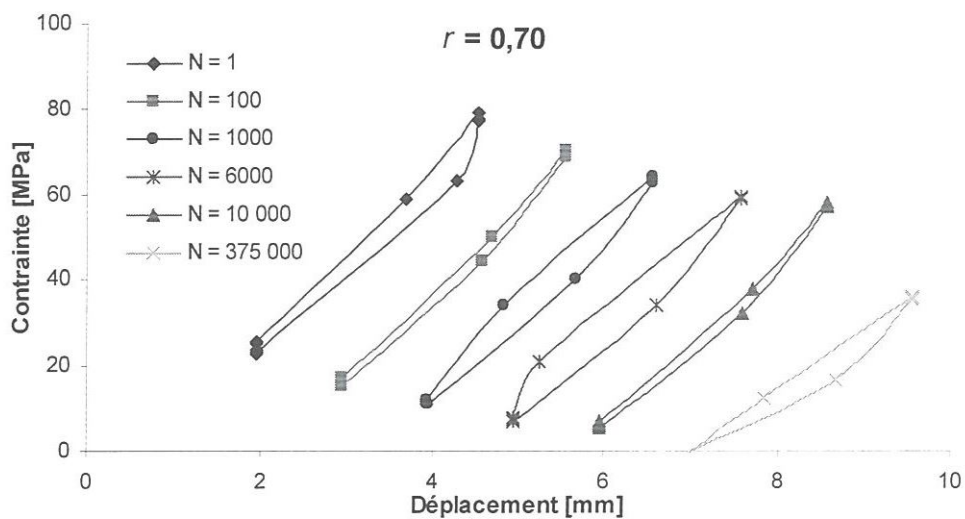
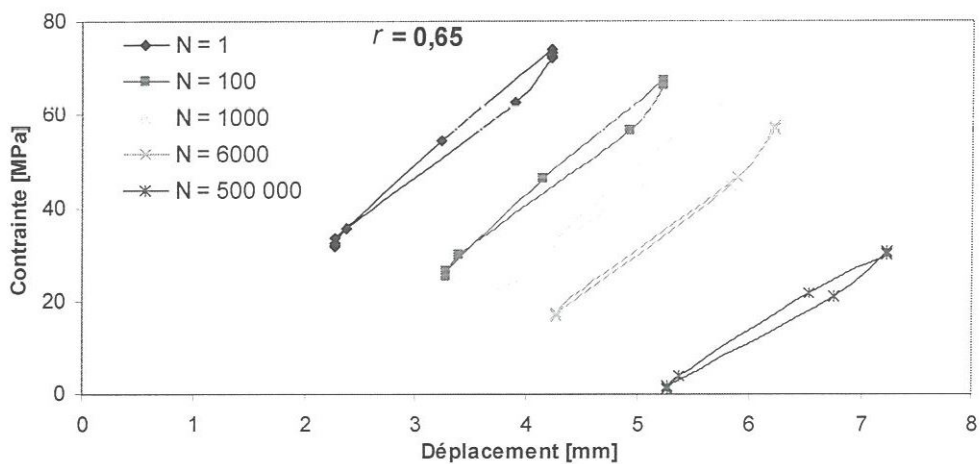
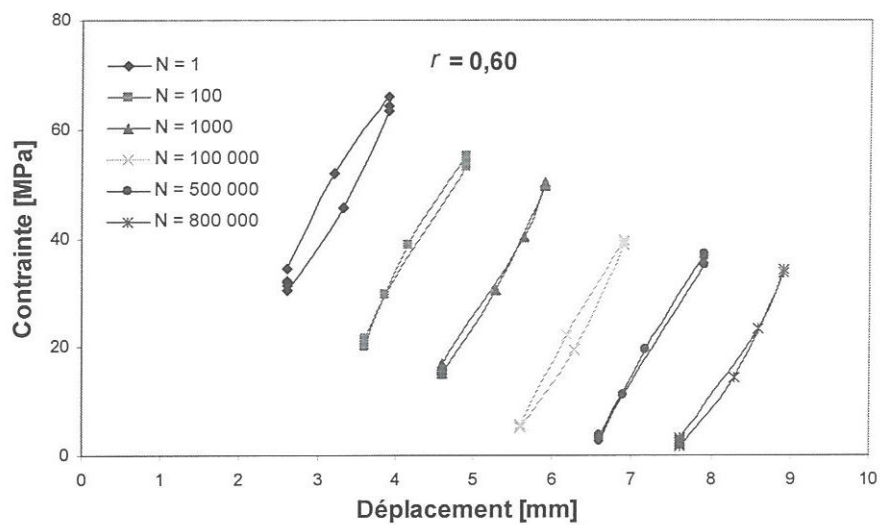
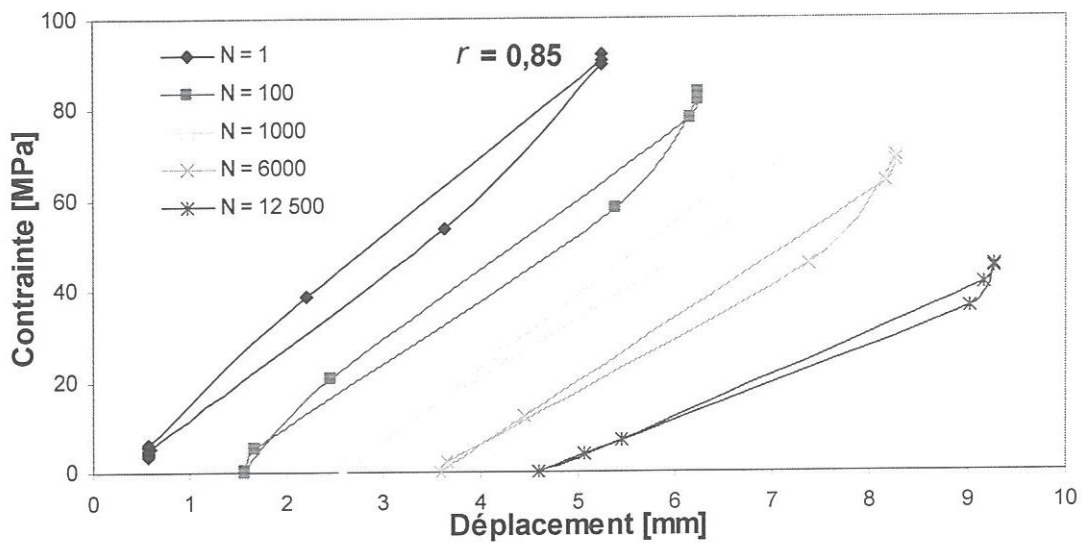
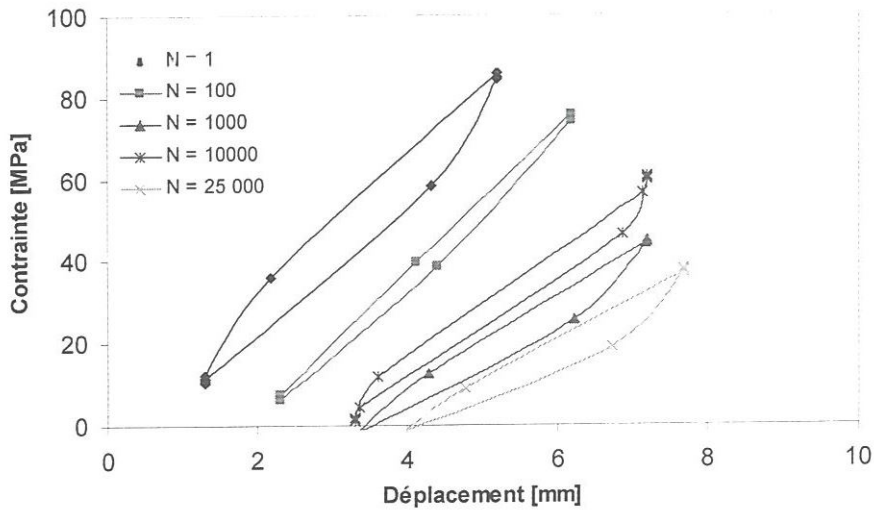
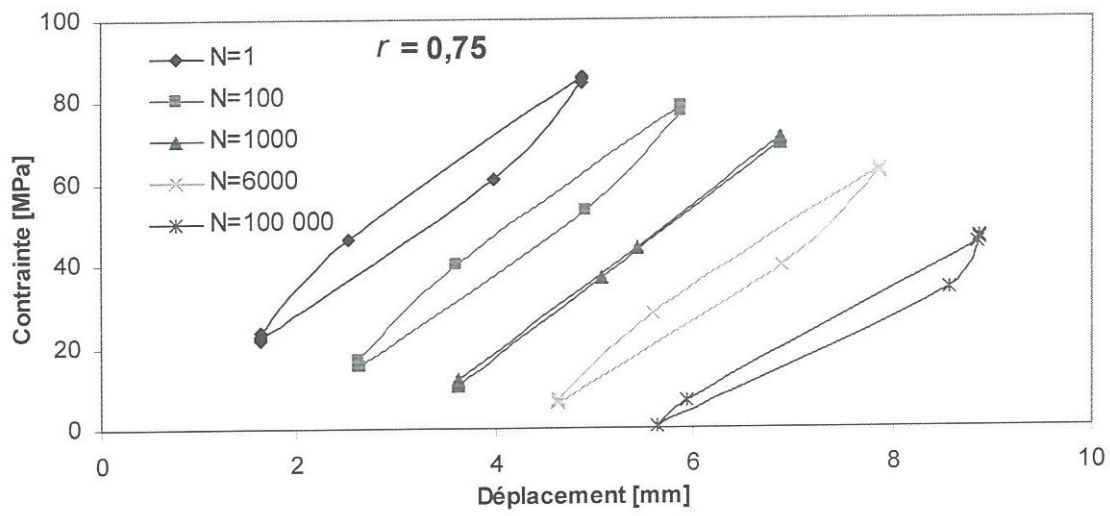


Figure III.22. Représente le premier cycle hystérésis pour tous les niveaux de chargement utilisé.

III.4.1.5. Energie dissipée

La figure III.23 montre les courbes d'hystérésis contrainte déplacement correspondant à des cycles spécifiques pour différent niveau de chargement (r_d). Chaque boucle d'hystérésis présente un pic de contrainte qui diminue au fur à mesure que le nombre de cycle croit. Il est important de noter qu'avec l'augmentation du nombre de cycle les boucles d'hystérésis en tendance à se fermer. De plus certaines boucles sont pratiquement fermées (ayant des surfaces très faible) ou l'énergie n'est presque plus dissipée ; ces boucles apparaissent après un certain nombre de cycles dans la deuxième phase de la perte de rigidité. Towo et Ansell interprète ces boucles par le changement d'angle micro fibrille de la fibre au cours de l'essai de fatigue cyclique ce qui augmente la rigidité des l'éprouvette testée [TOW 08].





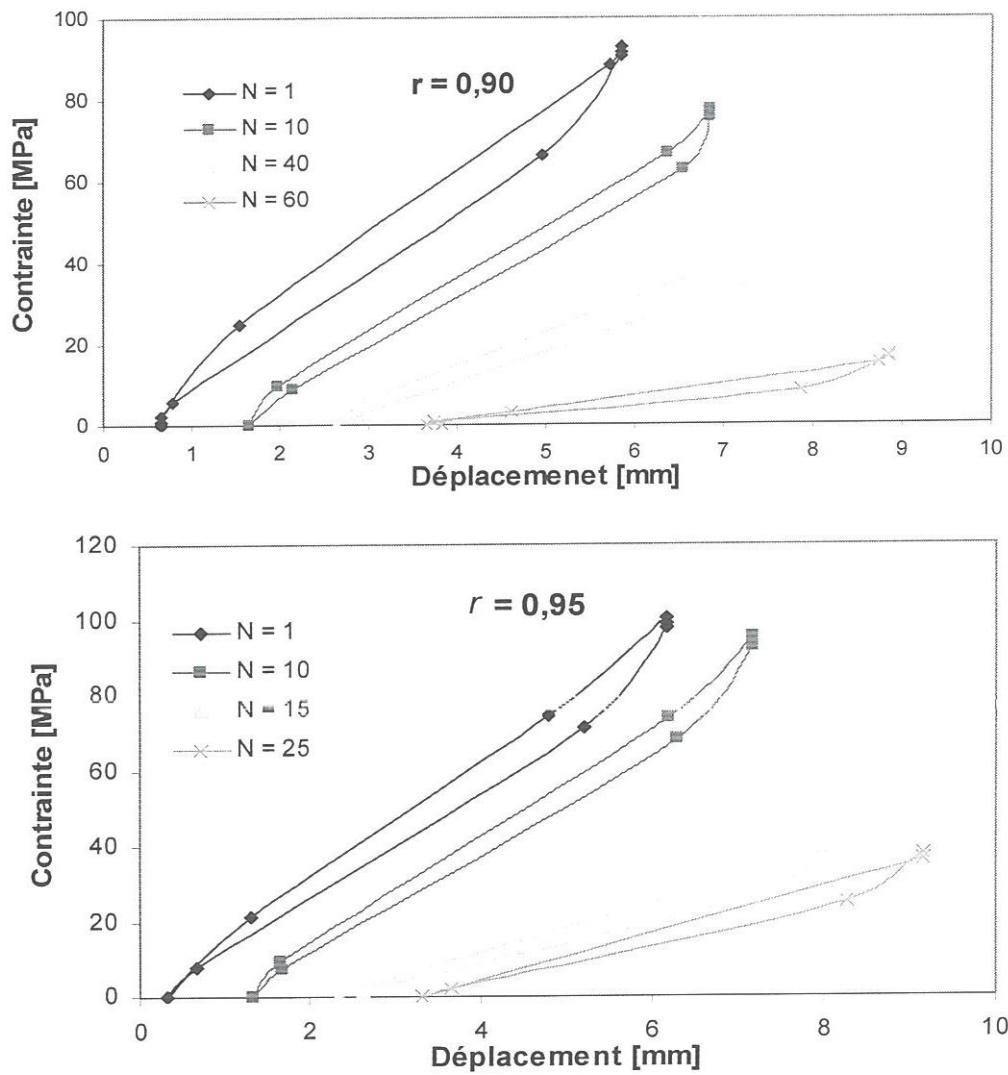


Figure III.23. Boucles d’hystérésis à des cycles spécifiques pour différent niveau de chargement (r_d).

Les boucles d’hystérésis contribuent d’une façon signifiante à la quantification de l’énergie dissipation (E_d), qui représente la surface de l’aire balayé par les courbes charge-décharge. Pour un cycle donné, l’énergie dissipée peut être calculée par la formule suivante [BEZ 07]:

$$E_d = \int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon \tag{III.7}$$

Où ε_{\min} et ε_{\max} sont respectivement les déformations minimales et maximales.

L'énergie dissipé E_d par unité de volume (mj/cm^3) en fonction du nombre de cycles N et du niveau de chargement ($r_d = 0,60, 0,75$ et $0,80$) est illustrée dans la figure III.24. Le nuage de points nous montre clairement que l'évolution de E_d en fonction de N se produit en deux stades. Le premier correspond à une dégradation brutale dès les premiers cycles, tandis que le deuxième stade est un plateau où l'énergie se stabilise et ne diminue presque plus. La présence des chutes de l'énergie E_d pour un certain nombre de cycle est expliquée par la présence de la fermeture des boucles d'hystérésis déjà signalée dans la figure III.23. L'énergie dissipé dépend fortement du niveau de chargement. Pour $r = 0,60$ on enregistre une petite valeur de $E_d = 1,05 \text{ mj}/\text{cm}^3$ pour le premier cycle, alors que pour un niveau de chargement élevé $r_d = 0,80$, elle est pratiquement 7 fois plus importante soit une valeur de $7,02 \text{ mj}/\text{cm}^3$ enregistré en premier cycle. L'intérêt accordé à la détermination de l'énergie dissipée est qu'elle permette de quantifier l'effet du niveau de chargement, et la capacité de renforcement des fibres dans la matrice.

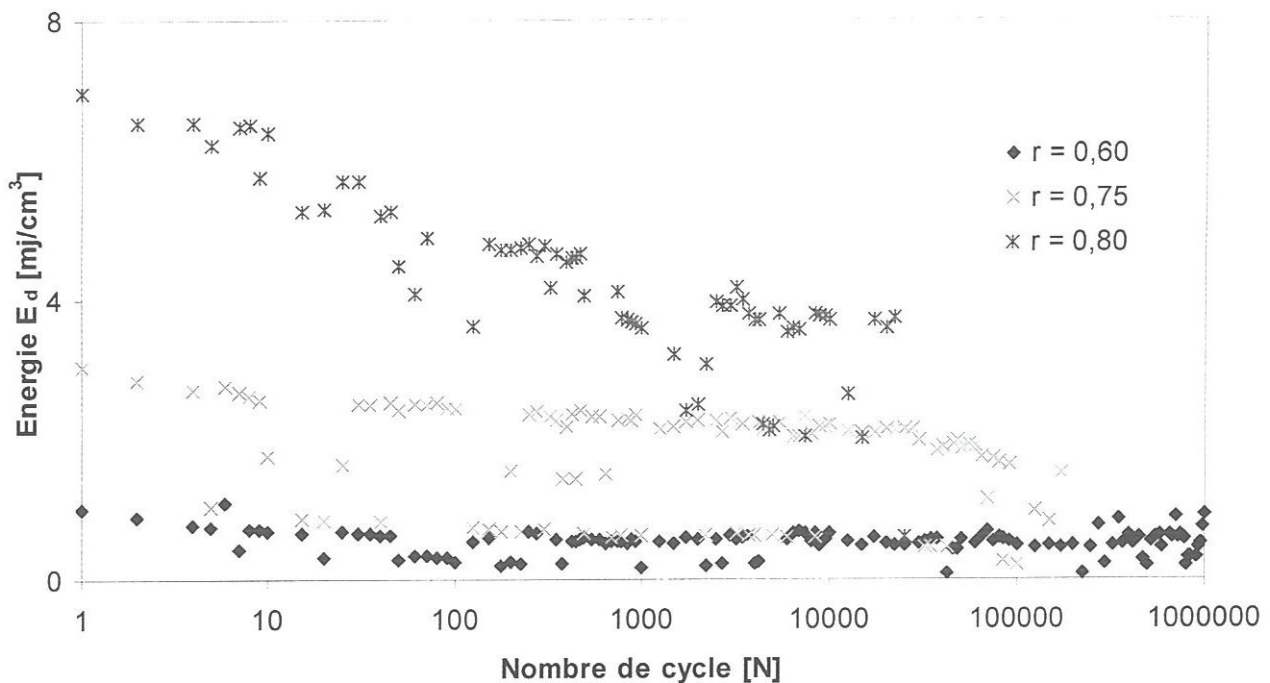


Figure III.24. Perte d'énergie E_d par unité de volume pour les niveaux de chargement (0,60, 0,75 et 0,80).

III.5. Faciès de rupture

L'observation des faciès de rupture au microscopiques des éprouvettes après avoir été sollicité à des chargements en fatigue cyclique (figure III.25 a et b) montre que la rupture du matériau passe par trois mécanismes de rupture au cours de l'essai de fatigue en flexion trois points. En premier lieu la rupture de la matrice (figure III.25a), suivie par la décohésion de l'interface fibre-matrice et en dernier lieu la rupture des fibres (figure III.25b). Par contre ce phénomène de rupture de l'interface par décohésion fibre-matrice n'existe pas dans le cas des éprouvettes sollicitées en chargement monotone comme c'est bien montré dans les faciès de rupture de la figure III.21.

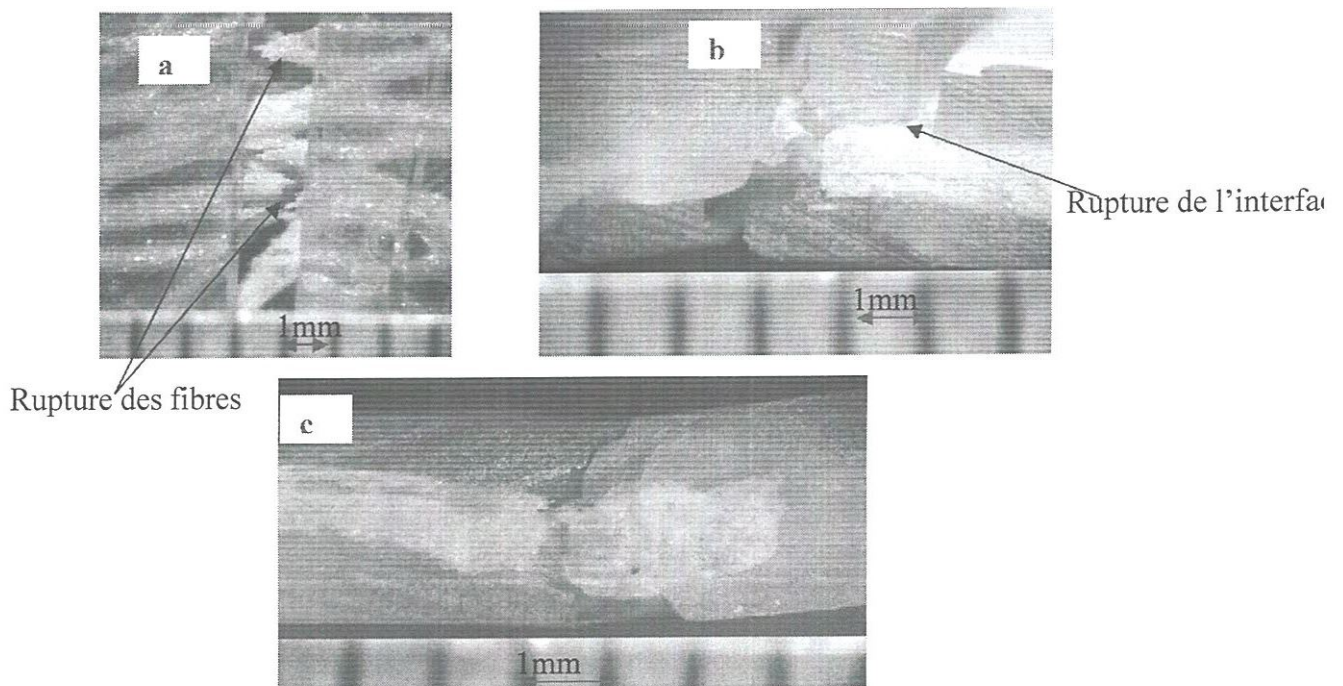


Figure III.25. *Faciès de rupture d'éprouvette sous sollicitation en flexion trois points. a et b) éprouvette sollicitée en fatigue cyclique; c) éprouvette sollicitée en statique.*

III.6. Conclusion

Les résultats statiques obtenus par l'essai de traction sur la fibre, prouvent qu'elle est anisotrope. Les essais effectués sur des architectures extraites de trois différentes locations A, B, et C, de l'extérieur à l'intérieur du tronc de cactus, montre

que les propriétés mécaniques varient en fonction de la location de la fibre et donc de sa maturité.

L'essai de traction sur les composites polyester/cactus montre que le comportement charge/déplacement est linéaire jusqu'à la rupture. Par contre, le comportement charge/flèche en flexion trois points s'effectue en deux phases : la première est linéaire, suivie par une partie non linéaire sous forme d'escalier caractérisée par l'initiation des petites fissures au niveau de la matrice.

La dispersion des résultats pour le module de Young, la contrainte et le déplacement jusqu'à la rupture en flexion et en traction, est due aux orientations et aux dimensions des segments du tissu utilisé.

Le suivi de l'endommagement en fatigue montre que la perte de charge F/F_0 jusqu'à la rupture de l'éprouvette, se déroule en trois phases : dans la première la perte de F/F_0 est brutale, elle est liée à la fragilité de la matrice utilisée, la deuxième phase est caractérisée par une diminution très lente, correspondant à la quasi-totalité de la durée de vie de l'éprouvette et enfin la perte de charge s'accélère brutalement dans la troisième phase jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette.

Les courbes de Wöhler représentent l'évolution du niveau de chargement (r_d) en fonction du nombre de cycles, en utilisant les critères N_5 , N_{10} et N_{50} , montrent une dispersion des valeurs de la durée de vie. Ces courbes montrent aussi que la rupture est obtenue dès les premiers cycles pour des niveaux r_d élevés, alors qu'aux faibles niveaux de chargement la rupture est obtenue pour des nombres de cycles élevés se rapprochant de 1 000 000 pour $r_d = 0.6$ par exemple.

Les observations des faciès de ruptures permettent de montrer l'existence des mécanismes de rupture et confirment que l'existence de la décohésion fibre-matrice est obtenue seulement pour des éprouvettes sollicitées en fatigue cyclique et non pas dans le cas de chargement monotone.

Chapitre IV

Simulation numérique

IV-1. Introduction

Une simulation numérique par éléments finis est réalisée en utilisant le logiciel de calcul de structure ANSYS v10.0. Les éprouvettes sont modélisées en 2D soumises à des sollicitations de traction et de flexion trois points, en considérant le matériau homogène et Orthotrope dont les caractéristiques mécaniques sont obtenues d'après les essais de statique en traction monotone. Les conditions de bords sont adaptées dans le sens des essais réalisés au Laboratoire.

IV-2. Description de l'élément utilisé pour le maillage

L'élément SHELL 63 est conçu pour modéliser les structures en coques épaisses. Le nombre de nœud de cet élément est égal 8 (Figure VI.1). Chaque nœud a six degrés de liberté ($U_x, V_y, W_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$). L'élément SHELL63 est capable d'être utilisé pour les calculs des contraintes pour des grands déformation, et peut être aussi utilisé pour les matériaux isotrope et orthotrope [ANS v10].

Les propriétés mécaniques du matériau utilisées dans la simulation sont obtenues expérimentalement comme suit :

$$E_L = 1476,0 \text{ MPa}, E_T = 266,6 \text{ MPa}, E_{LT} = 426,0 \text{ MPa}, \nu_{LT} = 0,18.$$

Où : $E_L, E_T, E_{LT}, \nu_{LT}$ sont respectivement le module de Young longitudinal, transversal et de cisaillement, et le coefficient du poisson.

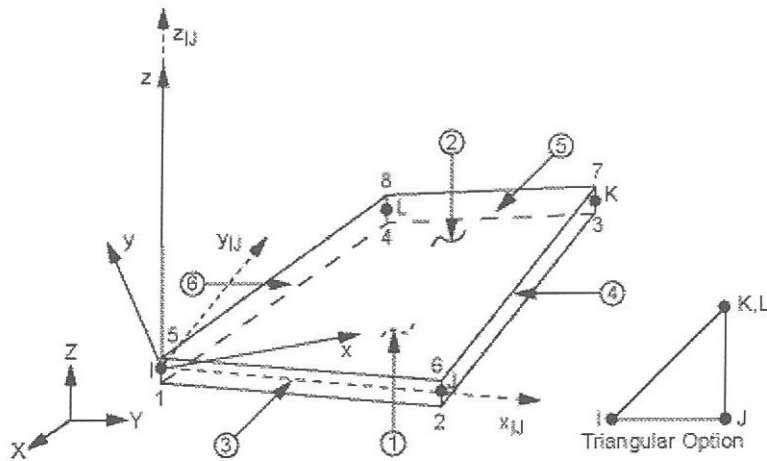


Figure IV.1. Géométrie de l'élément de maillage SHELL 63.

IV.3. Simulation de l'essai de traction

La simulation de l'essai de traction a été faite aux mêmes conditions des expériences réalisées au laboratoire. La figure IV.2 représente le champ de contrainte dans le sens de chargement σ_{xx} dans l'éprouvette simulé, les résultats de ANSYS montre une bonne concordance avec les résultats expérimentaux. En effet, la valeur de contrainte maximale σ_{xx} obtenue par ANSYS est de 15,9 MPa donc très proche de celle obtenue expérimentalement dont la valeur moyenne est égale à 15,78 MPa.

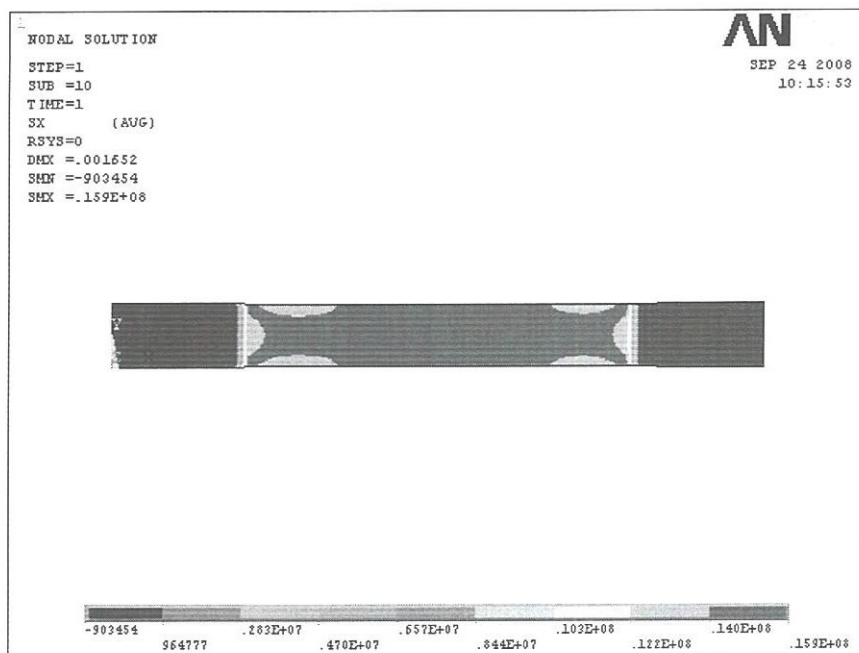


Figure IV.2. Champ de contrainte σ_{xx} dans le sens du chargement.

Les figure IV.3 et figure IV.4, montrent les champs des contraintes tangentiel σ_{yy} et de cisaillement σ_{xy} simulé pour le matériau ST1 (??). Les contraintes σ_{yy} et σ_{xy} sont maximale au niveau de la limite des étalons. A l'aide de cette simulation on peut tiré une idée sur la distribution des champs des contraintes tangentiel et de cisaillement, et aussi la location des zones les plus dangereuses ou l'initiation des fissures est favorisé.

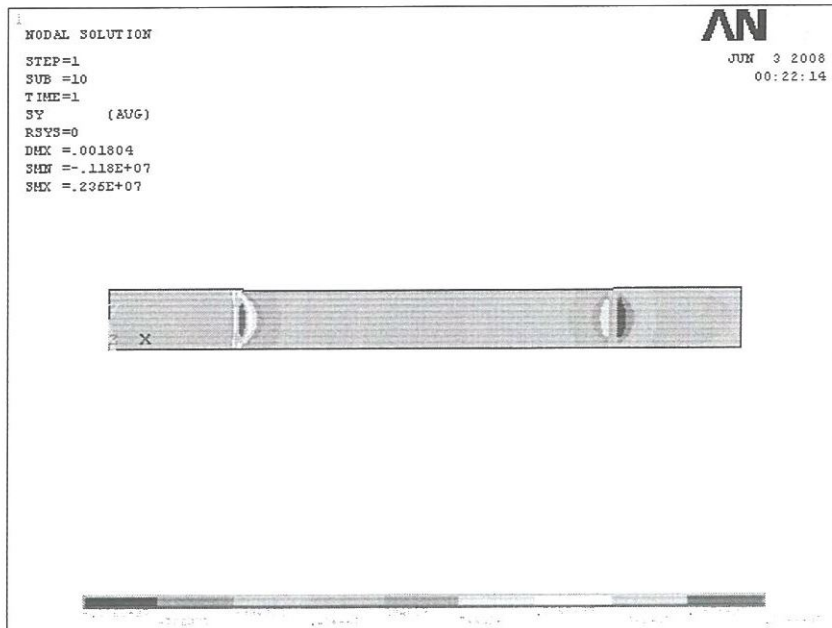


Figure IV.3. Champ de contrainte tangentiel σ_{yy} .

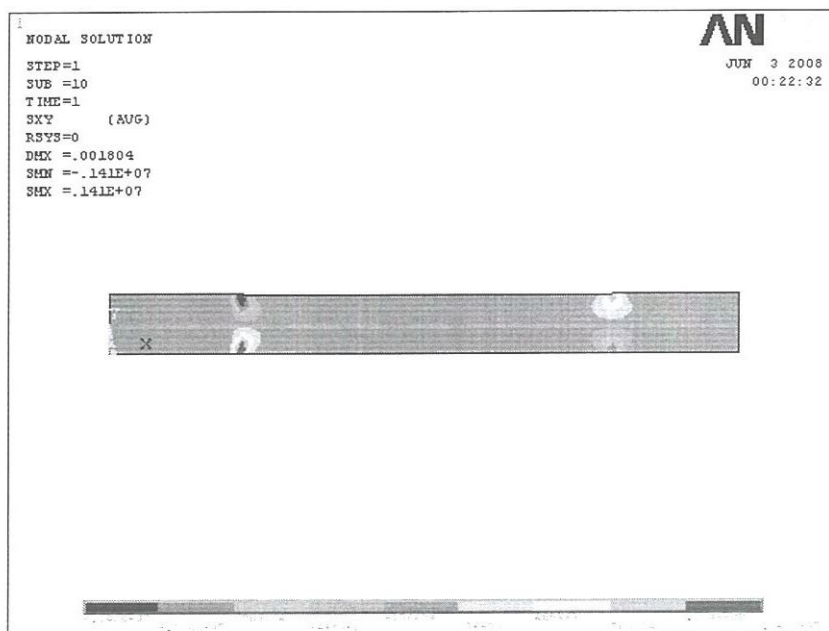


Figure IV.4. Champ de contrainte de cisaillement σ_{xy} .

La figure IV.5 représente le champ de contrainte de Von Mises, la forme de la contrainte maximale de l'éprouvette simulé, est comparable à la rupture de l'éprouvette testée en traction pour le stratifié ST1 (Figure III.11a).

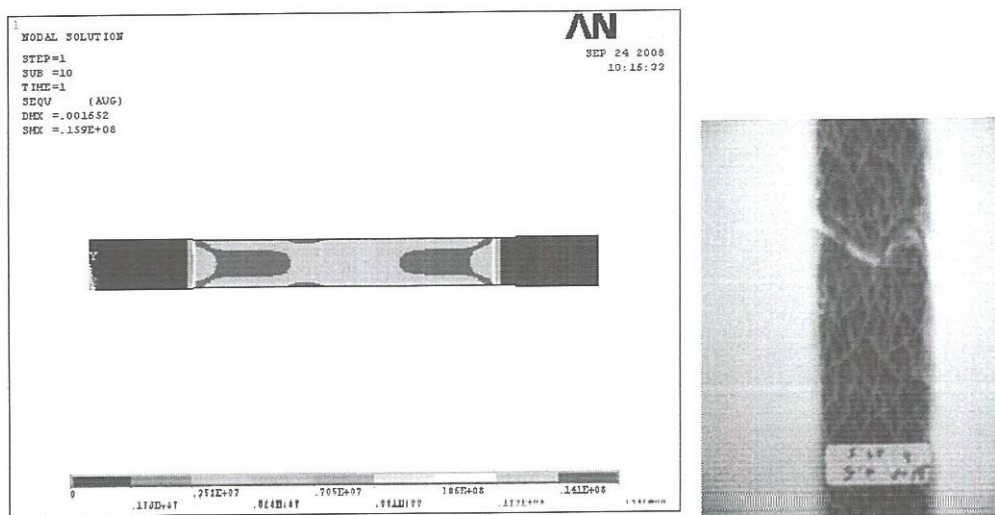


Figure IV.5. Champ de contrainte de Von Mises.

La figure IV.6 représente le champ de déformation dans l'éprouvette simulé en traction, dont la direction de la déformation est dans le sens de chargement. Ce résultat numérique est semblable aux résultats trouvés par les essais expérimentaux en traction monotone (chapitre III). Le tableau IV.1 regroupe une comparaison entre les valeurs obtenues par simulation ceux obtenues expérimentalement effectué sur le stratifié cactus/polyester ST1 dans le cas d'un chargement en traction monotone.

Tableau IV.1. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats par élément fini.

	contrainte σ_{xx} [MPa]		déformation ϵ_{xx} [%]	
	expérimental	ANSYS	expérimental	ANSYS
		15,78	15,9	1,29
Erreur en %	0,14		0,02	

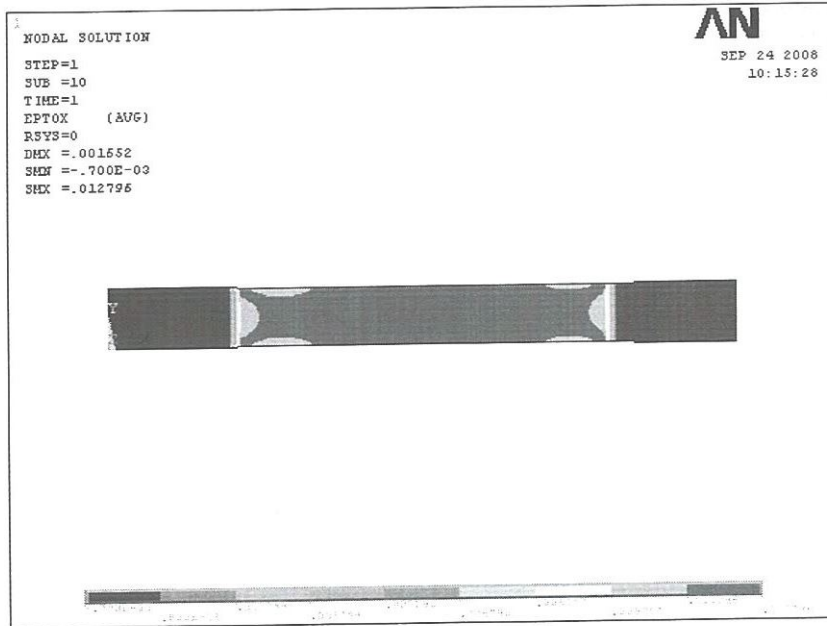


Figure IV.6. Champ de déformation ϵ_{xx} .

Les champs de déformation tangentiel et de cisaillement sont présentés respectivement dans les figures IV.7 et IV.8. Les valeurs de déformation maximale obtenue par l'MEF montre qu'il existe une petite déformation dans les directions yy et dans le plan xy de l'ordre de 0,5% et 0,43% de déformation respectivement.

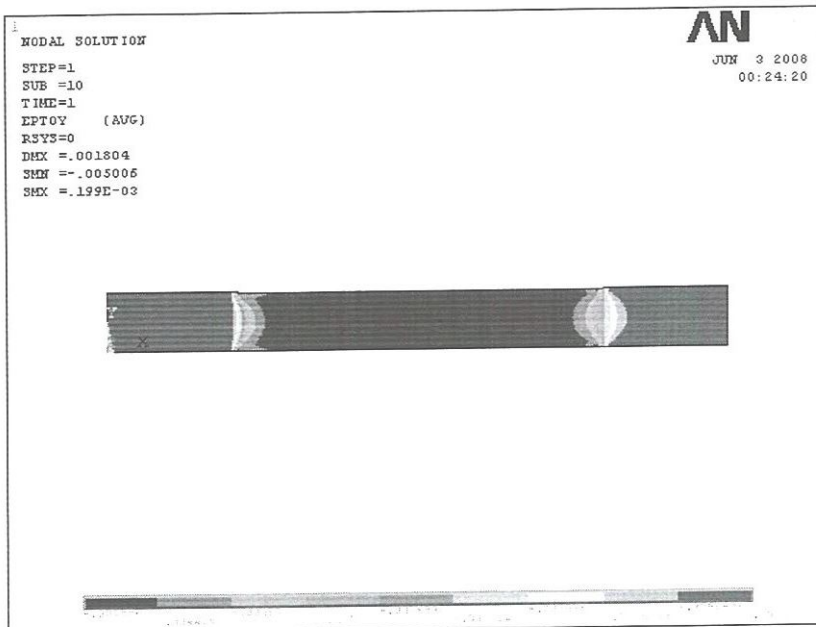


Figure IV.7. Champ de déformation ϵ_{yy} .

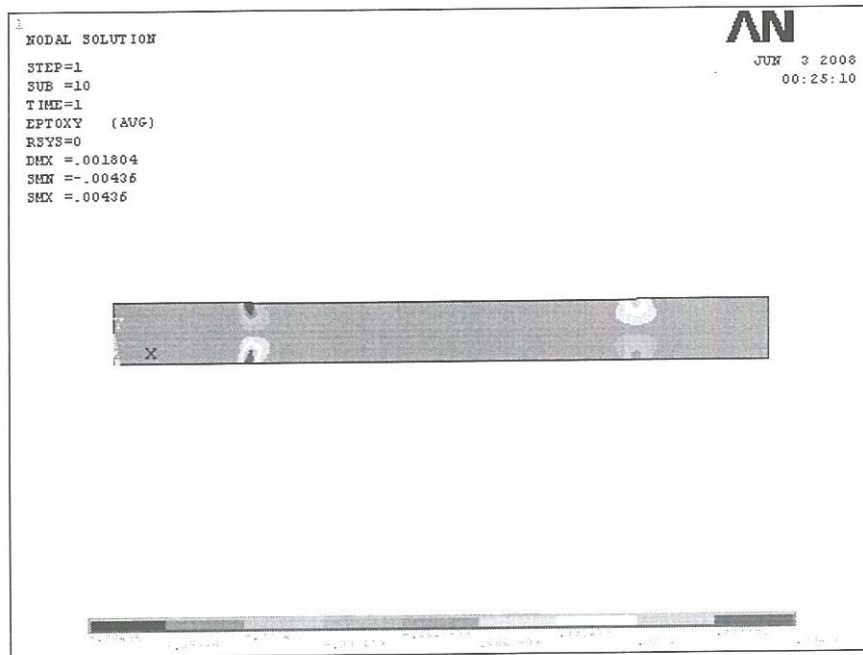


Figure IV.8. Champ de déformation ϵ_{xy} dans le plan (XY).

La figure IV.9 représente le champ de déformation de Von Mises dans l'éprouvette simulée ; elle montre que presque toute l'éprouvette contient la déformation maximale et que la distribution du champ de déformation est plus large que celui des champs des contraintes.

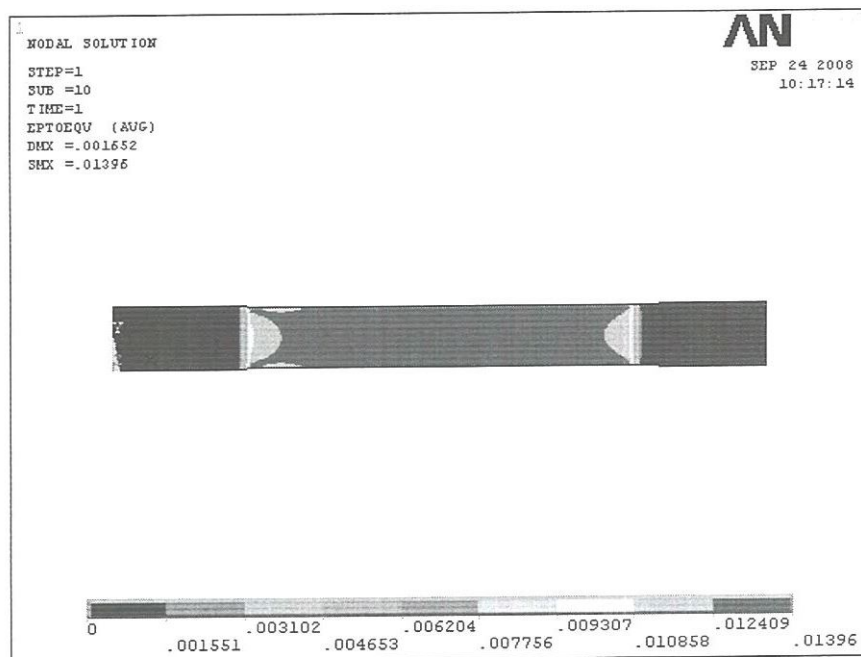


Figure IV.9. Champ de déformation de Von Mises.

IV.4. Simulation d'essai de flexion trois points

L'essai de flexion 3-points a été simulé par ANSYS en utilisant les mêmes conditions utilisées expérimentalement. La figure IV.10 représente les champs de contraintes σ_{xx} dans l'éprouvette simulée. Le champ de contrainte est maximal au voisinage du point d'application de la charge, les fibres les plus tendues sont soumises à des contraintes de traction (figure IV.10a) tan disque les plus comprimées sont soumises à une compression due à la nature de l'essai effectué (figure IV.10b).

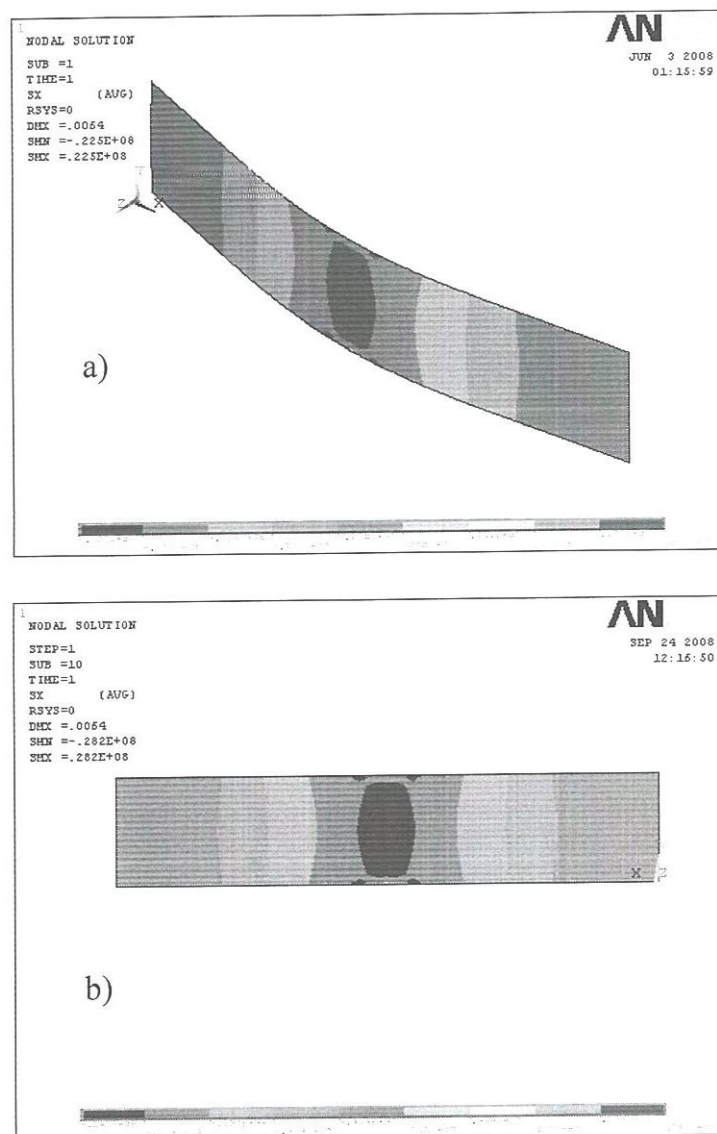


Figure IV.10. Champ de contrainte en flexion trois points dans la direction σ_{xx}
a) face dentu, b) face comprimée.

Les figures I.V.11 et IV.12 représentent les champs des contraintes tangentiels (σ_{yy}) et de cisaillement (σ_{xy}). Le champ de contrainte tangentiel maximale est situé au voisinage du point d'application de la charge, qui est pratiquement la zone la plus probable pour l'initiation des fissures dans les essais de flexion 3-points. Les champs des contraintes en cisaillement montre des valeurs maximal aux voisinages du milieu de l'éprouvette et aussi niveaux des appuis.

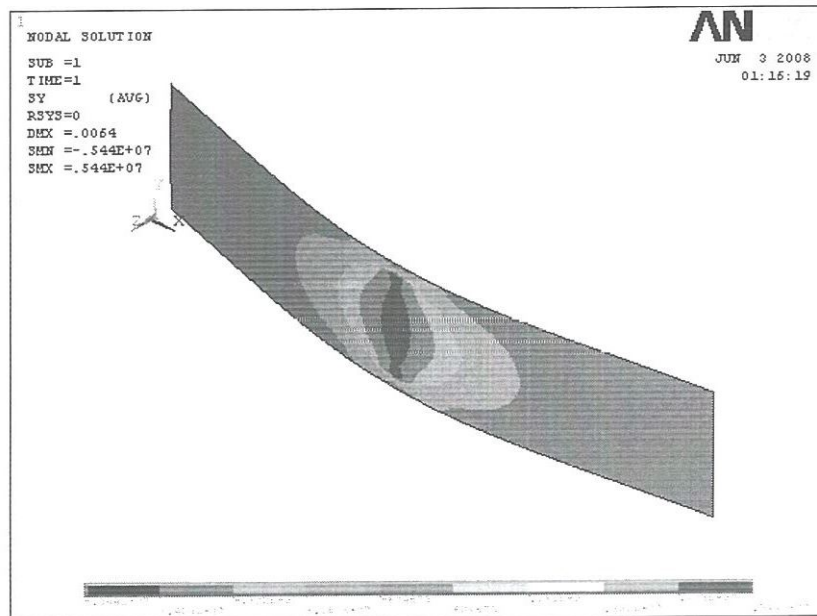


Figure IV.11. Champ de contrainte en flexion trois points dans la direction σ_{yy}

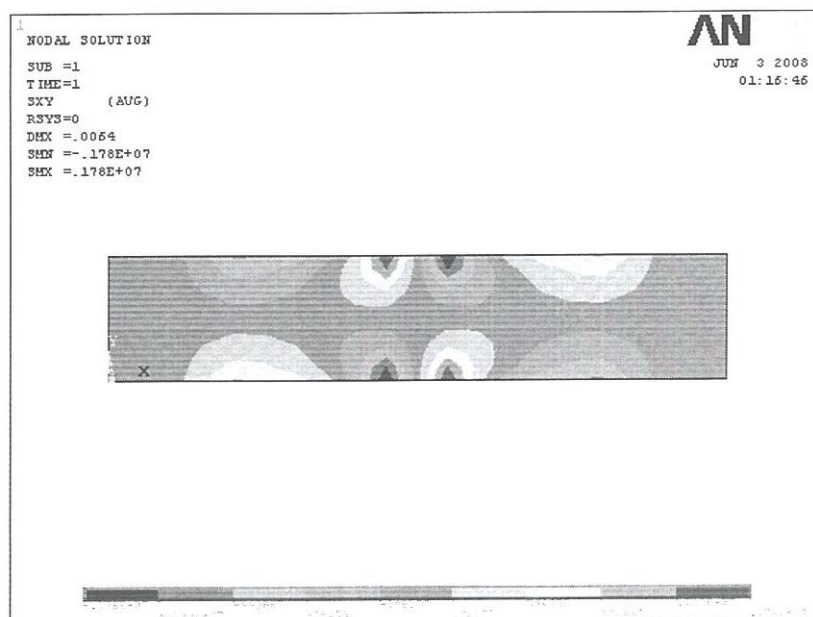


Figure IV.12. Champ de contrainte de cisaillement σ_{xy} dans le plan (XY) en flexion 3-points.

La simulation numérique des contraintes de Von Mises (figure IV.13) montre que la distribution de ces contraintes est maximale au milieu de l'éprouvette, par conséquent la propagation des fissures sera probablement dans cette zone.

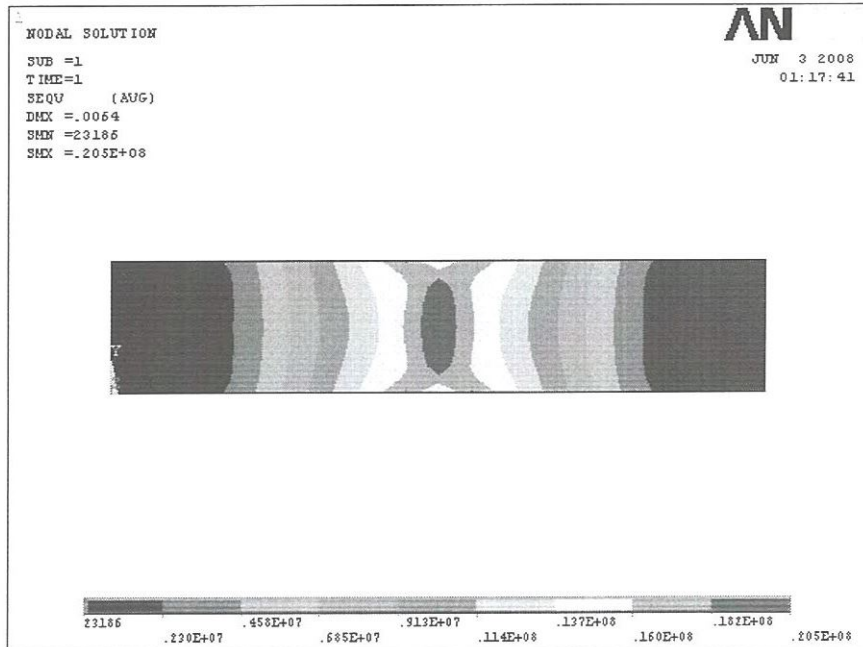


Figure IV.13. Champ de contrainte de Von Mises.

Les champs de déformations en flexion 3-points, prennent la même forme que celle des champs des contraintes mais par une bande plus large (Figure IV.14 et figure IV.17). La distribution des champs de déformations ε_{yy} présente les valeurs maximales au centre de l'éprouvette (figure IV.15) de l'ordre de 0,62 % de déformation, cette valeur ne présente que 37 % par rapport à la déformation ε_{xx} .

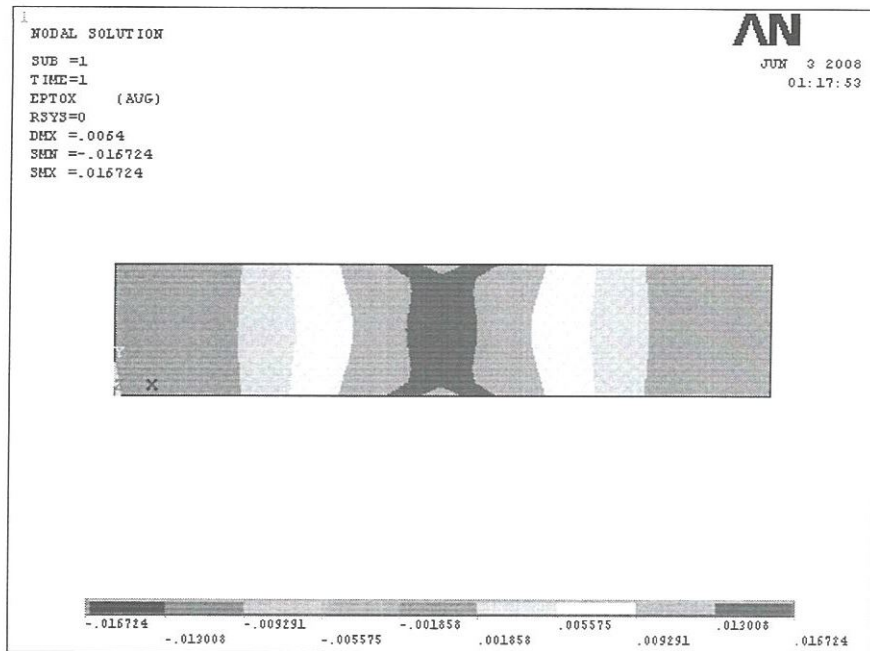


Figure IV.14. Champ de déformation ϵ_{xx} en flexion 3-points.

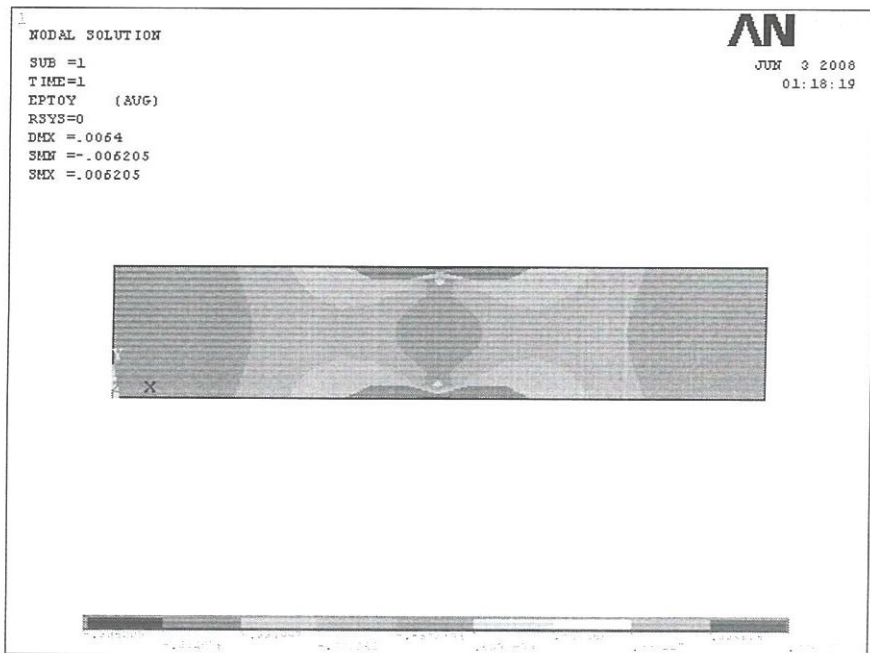


Figure IV.15. Champ de déformation en flexion trois points ϵ_{yy} .

La figure IV.16 montre la distribution des champs de déformation en cisaillement, la valeur maximale de ϵ_{xy} est égale à ϵ_{xy} 0,62 % de déformation.

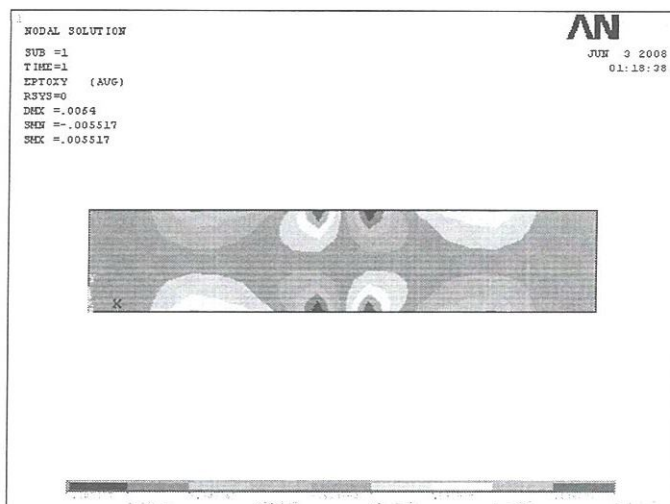


Figure IV.16. Champ de déformation en flexion trois points ε_{xy} .

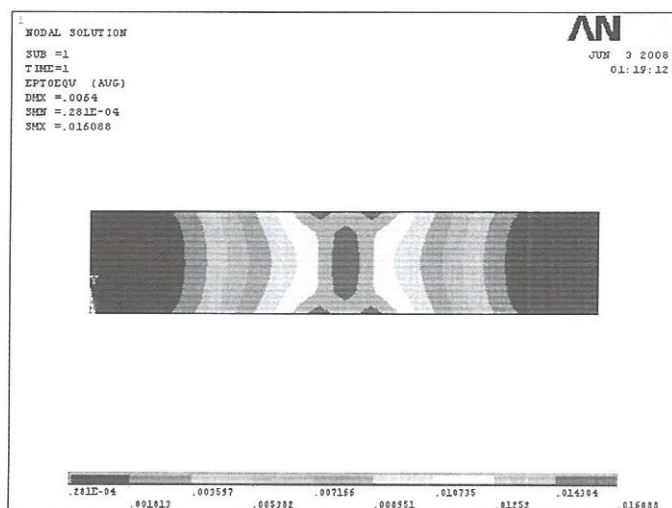


Figure IV.17. Champ de contrainte de Von Mises.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre une simulation numérique des essais de traction et de flexion sous chargement monotone sur un stratifié cactus/polyester en utilisant le logiciel ANSYS est réalisé. Les résultats obtenus montre une très bonne concordance des valeurs de simulation en comparaisons avec ceux obtenus expérimentalement. La distribution des champs des contraintes et des déformations tangentiel et en cisaillement, sont concéderez pour localiser les zones les plus chargées ou il peut y avoir l'initiation de fissure et par conséquent la rupture des éprouvettes. Les contraintes maximales de Von Mises sont semblables à l'endommagement des éprouvettes testées en traction monotone.

V. Conclusion générale

Les fibres naturelles présentent de nombreux avantages par rapport aux fibres synthétiques (faible coût, ressource renouvelable, biodégradabilité, propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)). En revanche, la mauvaise connaissance de ces fibres et notamment la caractéristique d'absorption de l'eau constituent des inconvénients pouvant être un frein au niveau de leur développement comme matériaux composite au milieu industriel. L'industrie moderne s'oriente donc vers des produits de moindre coût possible, plus performant, ou bien les deux à la fois. Dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique (matières recyclées ou/et biodégradables). Dans cette optique résulte notre contribution dans ce travail de mémoire de Magister dont les principales conclusions sont :

- Une nouvelle méthode d'extraction des fibres a été proposée et qui consiste à l'enfouissement des troncs de cactus dans la terre pendant une durée pour permettre la fermentation de l'oxalate de calcium.

- La technique de spectrométrie montre que la fibre de cactus extraite d'un tronc enfouis, conserve mieux ses caractéristiques physicochimiques, par rapport à celle obtenue d'un tronc non enfouis.

- D'après les essais effectués sur trois architectures de locations A, B, et C, allant de l'extérieur vers l'intérieur du tronc de cactus, il a été trouvé que le module d'élasticité de la fibre varie en fonction de sa location dans le tronc. En d'autres termes le module de Young de la fibre dépend de la maturité de la plante. De plus, l'architecture du tissu influence considérablement sur les propriétés mécaniques du composite cactus/polyester élaboré.

- Les résultats des essais mécaniques effectués sur la fibre de cactus, montre que ce type des fibres est anisotropie, ce qui confirment les travaux semblables fait par d'autres auteurs dans le cas des fibres naturelle. La densité de la fibre étudiée ($0,75 \text{ g/cm}^3$) est intéressante par rapport aux autres fibres végétales, par exemple elle est presque deux fois moins que celle du sisal alors qu'il est de la même espèce ($1,40 \text{ g/cm}^3$).

- D'après les différents essais (traction, flexion 3-points statique, et fatigue cyclique en flexion 3-points) réalisés sur les composites renforcés par des fibres de cactus, améliore les caractéristiques mécaniques du composite (module, résistance de traction, et la légèreté de produit final).

- Dans l'étude de fatigue cyclique, le suivi de l'endommagement montre que la perte de charge F/F_0 jusqu'à la rupture de l'éprouvette, se déroule en trois phases. Les courbes de Wöhler représentent l'évolution du niveau de chargement (r_d) en fonction du nombre de cycles sont tracé en utilisant les critères N_5 , N_{10} et N_{50} .

- L'observations des faciès de ruptures permet de montrer l'existence des mécanismes de rupture et confirme que l'existence de la décohésion fibre-matrice est obtenu seulement pour des éprouvettes sollicitées en fatigue cyclique et non pas dans le cas de chargement monotone.

- Les résultats obtenus montre une très bonne concordance entre les valeurs expérimentaux et ceux obtenus par simulation numérique développé dans le cas des essais de traction et de flexion sous chargement monotone sur un stratifié cactus/polyester en utilisant le logiciel ANSYS.

- La distribution des champs des contraintes et des déformations tangentiel et en cisaillement, sont concéderez pour localiser les zones les plus chargées ou il peut y avoir l'initiation de fissure et par conséquent la rupture des éprouvettes. Les contraintes maximales de Von Mises sont semblables à l'endommagement des éprouvettes testées en traction monotone.

VI. Bibliographies

- [AND 05]: J. Andersons , E. Sparnins, R. Joffe , L. Wallstro; Strength distribution of elementary flax fibres 2005, j of COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY, vol: 65 , p: 693–702.
- [ADD 08]: S. Adden, K. Pfleidererb, I. Solodov, P. Horst, G. Busse. Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage in textile composites using circumferential plate acoustic waves. *J Composites Science and Technology* 2008 vol: 68, p.1616–1623.
- [ANS v10]: Documentation for ANSYS v10.0.
- [ARB 05]: A. Arbelaiz, B. Fernandez, J.A. Ramos, A. Retegi, R. Llano Ponte, I. Mondragon . Mechanical properties of short flax fibre bundle/polypropylene composites. Influence of matrix/fibre modification, fibre content, water uptake and recycling
J Composites Science and Technology vol :65 (2005) p.1582–1592
- [ARB 05*]: A. Arbelaiz, G. Cantero, B. Fernaéndez, I. Mondragon ; Flax Fiber Surface Modifications: Effects on Fiber Physico Mechanical and Flax/Polypropylene Interface Properties,2005 journal of POLYMER COMPOSITES.
- [ASS 06]: Mustapha Assarar, Abderrahim El Mahi, Mohammed Khawar Farooq et Jean-Marie Berthelot; Comportment en flexion des poutres en matériaux sandwichs. 2006 ; *j de Mécanique & Industries* p : 589–593.
- [ALC 07]: José ALCORTA. Matériaux Composites, 2007 Quinzaine Technologie D'AQUITANE.
- [BAH 01]: Nadia BAHLOULI. Cours Matériaux Composites / DESS Mécanique avancée et Stratégie industrielle.
- [BAL 04]: Christophe BALEY. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, 2004, AM5 130 , Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites
- [BAR 74]: BARBARA S. VALENT AND PETER ALBERSHEIM. The Structure of Plant Cell Walls, 1974 *j Plant Physiol.* Vol : 54, p.105-108.

- [BAR]: Pierre BARDONNET. Résines époxydes Mise en oeuvre et applications, A 3 466
- [BAT 97]: Claude bathias , Jean-Paul Baïlon. La fatigue des matériaux et des structures . Editions HERMES, paris , 1997.
- [BEN 06]: Amine BENNANI ; ELABORATION, COMPORTEMENT ET DUREE DE VIE EN FATIGUE DU CAOUTCHOUC NATUREL RENFORCE DE SILICE ; thèse de doctorat soutenue le 05 avril 2006 université de Mines de Paris
- [BER 92] : J.-M. Berthelot. Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures,1992 Ed. Masson.
- [BER 02]: Louis Berreur, Bertrand de Maillard, Stanislas Nösperger. L'industrie française des matériaux composites ,2002
- [BER]: François BERBAIN et Alain CHEVALIER. Mise en oeuvre des composites Méthodes et matériels, A 3 720, Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites.
- [BEZ 03]: BEZAZI Abderrezak ; Etude théorique et expérimentale du comportement mécanique en statique et en fatigue des matériaux composites stratifiés et sandwiches en flexion 3-points, thèse de Doctorat d'Etat 2003.
- [BEZ 03*]: Abderrezak Bezazi , Abdelrahim El Mahi, Louendi Fatmi , Jean-Marie Berthelot & Boudjema Bezzazi; Influence du chargement sur le comportement et l'endommagement des stratifiés croisé en flexion 3-points. 16ème Congrès Français de Mécanique ; Nice, 1-5 septembre 2003.
- [BEZ 03**] Abderrezak Bezazi, Abdelrahim El Mahi, Jean-Marie Berthelot & Boudjema Bezzazi ; Analyse du comportement et de l'endommagement des matériaux composites sandwiches en flexion 3-points. 16ème Congrès Français de Mécanique ; Nice, 1-5 septembre 2003.
- [BEZ 07] : Abderrezak BEZAZI and Fabrizio SCARPA ; TENSILE FATIGUE OF CONVENTIONAL AND NEGATIVE POISSON'S RATIO OPEN CELL PU FOAMS. 2007; j of International Journal of Fatigue.
- [BLE 99] :BLEDZKI (AK) et GASSAN (J). Composites reinforced with cellulose based fibers.1999 j polymer Science, vol:24, p 221-274.

- [BOU 06] : Pr BOUYA D. Biologie Végétale Cormophytes (Végétaux Supérieurs) Morphologie, Anatomie, Reproduction, Adaptations. 2006, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Faculté des sciences Dhar El Mahraz Département de Biologie Fès.
- [BRO] : BROUWER, W.D. Natural Fibre Composites in Structural Components: Alternative Applications for Sisal .
- [CAR 06] : CARMA Centre d'Animation Régionale en Matériaux Avances. GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES RENFORCES DE FIBRES D'ORIGINE RENOUVELABLE 2006 .
- [CAN 85] : Pierre CANARD, Gilbert CHRÉTIEN *et* Alain ZALMANSKI. Polyesters insaturés.1985, A 3 445, Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites
- [CHI 08] : Chidong Liu, Laifei Cheng, Xingang Luan, Bin Li, Jun Zhou. Damage evolution and real-time non-destructive evaluation of 2D carbonfiber/SiC-matrix composites under fatigue loading. *J Materials Letters* 2008.
- [DES] : Jacques DESBONNET et Géraud APCHIN. Polyesters thermoplastiques PET et PBT pour injection, AM 3 376, Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites.
- [EGA 06]: Mlle Magali EGAL.STRUCTURE AND PROPERTIES OF CELLULOSE / NAOH AQUEOUS SOLUTIONS, GELS AND REGENERATED OBJECTS; Thèse de doctorat .2006 l'Ecole des Mines de Paris.
- [Eri 05] : Erik Marklund. Micromechanism Based Material Models for Natural Fiber Composites.2005
- [FOI 88] : Fiore L., Contribution à l'étude du comportement en fatigue de matériaux composites à renfort verre unidirectionnel, Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, 1988.
- [Gar 07] : G. Gardea-Hernandez , R. Ibarra-Gomez , S.G. Flores-Gallardo, C.A. Hernandez-Escobar, P. Perez-Romob, E.A. Zaragoza-Contreras.Fast

wood fiber esterification. I. Reaction with oxalic acid and cetyl alcohol. 2007; *j* of Carbohydrate Polymers

[Guy] : Guy SCHNEIDER. Résines vinylesters, A 3 450, Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites.

[HEP 02]. D.G. Hepworth, J.P. Smith. The mechanical properties of composites manufactured from tendon fibres and pearl glue (animal glue) 2002; *j* of composite part A : applied science and manufacturing vol: 33; p: 797-803

[JOC 02] : Gassan Jochen. A study of fiber and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites. *j* composites part A 2002 vol.33 p.369-374.

[KAH 02] : Zella Kahn-Jetter , Lance S. Evans, Sara Butwell. Stresses on joints of *Opuntia lac_**is*: forces necessary for mechanical failure and role of lignified xylem cells as resistance components. 2002, *j* of Environmental and Experimental Botany vol :47, p.231–237.

[KAR 99] : KARL J. NIKLAS ;THE MECHANICAL ROLE OF BARK, American Journal of Botany 86(4): 465–469. 1999.

[KAR 03] : KARL J. NIKLAS, FRANCISCO MOLINA-FREANER, CLARA TINOCO-OJANGUREN, CHRISTOPHER J. HOGAN, AND DOMINICK J. PAOLILLO; ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE RARE ENDEMIC CACTUS STENOCEREUS ERUCA AND THE RELATED SPECIES S. GUMMOSUS1, 2003 American Journal of Botany vol: 90 p: 663–674.

[KRA] : Patricia KRAWCZAK. Essais des plastiques renforcés, AM 5 405, Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites.

[LO 05]: Nordin LO, Berglund LA. Structure and Mechanical Properties of Wood-based Paper fiber/ Epoxy Composites with Different Fiber Cooking Times. *j* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005.

[MAR] :Yves MAROTEL. Polyuréthanes, AM 3 425, Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites

[MAL 03] : Mohamed E. Malainine, Alain Dufresne, Danièle Dupeyre, Mostafa Mahrouz, Roger Vuong, Michel R. Vignon. Structure and morphology of cladodes and spines of *Opuntia ficus-indica*. Cellulose extraction and characterisation. 2003, *J of Carbohydrate Polymers* vol :51 p. 77–83.

[MAU 06] : JAMES D. MAUSETH. Structure–Function Relationships in Highly Modified Shoots of Cactaceae , 2006: *J Annals of Botany* vol: 98,p.901–926,

[Mic] : Michel BIRON. Propriétés des thermodurcissables, AM 3 406, Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites

[MOE 03] : Moe Moe Thwe, Kin Liao. Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *J Composites Science and Technology* 2003, vol 63 p. 375–387.

[MOH 00] : MOHANTY (A.K), MISRA (M) et HINRICIISEN (G) Biofibres, Biodégradable polymers and biocomposites: an overview. 2000 *J Macromolecular Materials and Engineering*, 276/277, p 1-24.

[MUR 05] : K. Murali Mohan Rao, K. Mohana Rao. Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. 2005, *J of Composite Structures*.

[PER 06] : Yves Perrot ; Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène, Thèse de doctorat Soutenue le 28 Novembre 2006, université de Bretagne Sud.

[ROD 07]. M. E. Rodríguez-García & C. de Lira & E. Hernández-Becerra & M. A. Cornejo-Villegas & A. J. Palacios-Fonseca & I. Rojas-Molina & R. Reynoso & L. C. Quintero & A. Del-Real & T. A. Zepeda & C. Muñoz-Torres. Physicochemical Characterization of Nopal Pads (*Opuntia ficus indica*) and Dry Vacuum Nopal Powders as a Function of the Maturation. 2007, *J of Plant Foods Hum Nutr*, vol: 62:107–112., Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites

[RUI 02]: Ruiying Luo , Caili Yang, Jiwei Cheng ; Effect of preform architecture on the mechanical properties of 2D C/C composites prepared using rapid directional diffused CVI processes; *J of Carbon*. vol: 40 p . 2221–2228

[RYD 03] : Peter Ryden, Keiko Sugimoto-Shirasu, Andrew Charles Smith, Kim Findlay, Wolf-Dieter Reiter, and Maureen Caroline McCann. Tensile Properties of Arabidopsis Cell Walls Depend on Both a Xyloglucan Cross Linked Microfibrillar Network and Rhamnogalacturonan II-Borate Complexes¹. 2003 *J Plant Physiology* Vol : 132, p. 1033–1040.

[SIN 03]. A.C.N. Singleton, C.A. Baillie, P.W.R. Beaumont, T. Peijs. On the mechanical properties, deformation and fracture of a natural fibre/recycled polymer composite. 2003 ; *J of Composites: Part B* vol :34 ; p. 519–526

[TAT 08] : Jitendra S. Tate , Ajit D. Kelkar. Stiffness degradation model for biaxial braided composites under fatigue loading. *J composites part B* 2008 vol.39 p.548-555.

[THI 05]. Thi-Thu-Loan Doan, Shang-Lin Gao, Edith Maöder. Jute/polypropylene composites I. Effect of matrix modification 2005 ; *J of COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY*.

[Tow 08]: Arnold N. Towo, Martin P. Ansell; Fatigue of sisal fibre reinforced composites: Constant-life diagrams and hysteresis loop capture 2008, *J of COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY*, vol: 68,p: 915–924.

[VAL 99] : A. Valadez-Gonzalez, J.M. Cervantes-Uc, R. Olayo, P.J. Herrera-Franco. Effect of fiber surface treatment on the fiber–matrix bond strength of natural fiber reinforced composites; 1999; *J of Composites: Part B: engineering* vol:30 ; p:309–320.

[WAM 03] : Paul Wambua, Jan Ivens, Ignaas Verpoest; Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics. 2003 *J of Composites Science and Technology* vol : 63. p:1259–1264

[Yun 05] : Yung-Li Lee. Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice). Liver 2005.

[ZHI 01] : Min Zhi Rong, Ming Qiu Zhang, Yuan Liu, Gui Cheng Yang, Han Min Zeng. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. 2001; *j of Composites Science and Technology* vol : 61 ;p :1437–1447.

Résumé

La recherche de nouveaux matériaux est l'objectif primordial des industriels du point de vue intérêt à la fois technologique, économique et écologique. Pour cela, plusieurs travaux ont été menés sur les matériaux composites à renfort naturel. Dans ce cadre, l'utilisation de la fibre de cactus comme renfort et une résine polyester est adoptée dans l'étude que nous avons menée dans ce mémoire de magister. Une nouvelle méthode d'extraction de la fibre du cactus a été proposée ; elle consiste à un enfouissement du troc du cactus dans la terre pendant 15 jours. En premier lieu nous avons déterminé les caractéristiques chimiques de la fibre. Ensuite, une caractérisation mécanique des composants sous chargement monotone en traction et en flexion est réalisée. L'étude en fatigue concerne seulement les composites en fibre de cactus/polyester sous chargement cyclique en flexion 3-points. Les mécanismes d'endommagements après chargement statique et cyclique ont été mis en évidence. Par ailleurs, une étude théorique par éléments finis en utilisant le logiciel ANSYS a été développée pour des chargements monotones en traction et en flexion. Les résultats expérimentaux sont en bonne concordance avec ceux obtenus par ANSYS.