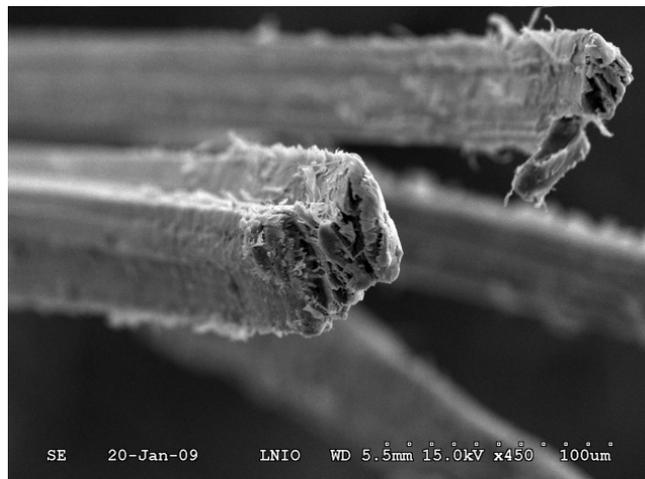


Thèse
de doctorat
de l'UTT

Florent ILCZYSZYN

Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre



Spécialité :
Systems Mécaniques et Matériaux

2013TROY0016

Année 2013

THESE

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES Spécialité : SYSTEMES MECANQUES ET MATERIAUX

présentée et soutenue par

Florent ILCZYSZYN

le 19 juillet 2013

Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre

JURY

M. C. BALEY	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Président
Mme A. BERGERET	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
Mme K. CHARLET	MAITRE DE CONFERENCES	Examineur
M. A. CHEROUAT	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Directeur de thèse
M. L. GUILLAUMAT	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
M. G. MONTAY	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Directeur de thèse

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée au sein du Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée (LASMIS) de l'Université de Technologie de Troyes (UTT). J'adresse mes remerciements à M. Manuel François directeur du laboratoire et aux membres qui le composent pour m'avoir accueilli au sein de leur équipe et permis d'effectuer ce travail de recherche.

Je tiens à remercier tout particulièrement mes directeurs de thèse, M. Abel Cherouat et M. Guillaume Montay qui m'ont encadré et apporté leur savoir et leur aide tout au long de cette thèse. Je tiens à leur témoigner ma reconnaissance pour m'avoir permis de réaliser ce travail de recherche. Je remercie aussi M. Xiao Lu Gong d'avoir orienté nos recherches et M. Shuai Jin qui a effectué ces travaux de recherche sur la même thématique et avec qui j'ai beaucoup échangé et partagé.

Cette thèse s'intègre dans un projet global MAîtrise des PROpriétés des Fibres de chanvre industriel dans le cadre de valorisations en agro-composites base polymère (MAPROFI), regroupant des acteurs de l'Université de Lille et de l'INRA de Reims ainsi que les entreprises FRD (Fibres Recherches Développement) et AFT plasturgie. Je tiens à leur témoigner ma gratitude pour leurs échanges et débats. Je remercie la société FRD pour nous avoir fourni les matériaux et les échantillons étudiés.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	1
TABLE DES MATIERES	3
ABSTRACT	5
RESUME.....	6
INTRODUCTION.....	8
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART	14
<i>Partie I . Les agro-composites</i>	<i>16</i>
<i>Partie II . Les fibres végétales et les fibres de chanvre.....</i>	<i>26</i>
<i>Partie III . Caractérisation et comportement mécaniques des fibres de chanvre.....</i>	<i>43</i>
<i>Partie IV . Les agro-composites à base polymère renforcés par des fibres naturelles comme matériaux techniques.....</i>	<i>67</i>
CHAPITRE II : COMPORTEMENT MECANIQUE DES FIBRES DE CHANVRE	78
<i>Partie I . Matériaux et méthodes.....</i>	<i>80</i>
<i>Partie II . Méthode de caractérisation géométrique des fibres de chanvre.....</i>	<i>91</i>
<i>Partie III . Comportement mécanique des fibres de chanvre.....</i>	<i>98</i>
<i>Partie IV . Influence des conditions de culture (apport d'eau supplémentaire et densité de semis plus importante).....</i>	<i>124</i>
<i>Partie V . Influence de la géométrie et des défauts naturels de la fibre sur ces propriétés mécaniques</i>	<i>145</i>
CHAPITRE III : COMPORTEMENT MECANIQUE DES COMPOSITES PP / CHANVRE.....	162
<i>Partie I . Caractérisation du comportement mécanique des composites</i>	<i>164</i>
<i>Partie II . Influence des conditions de culture et de l'année de récolte sur les propriétés mécaniques des composites</i>	<i>192</i>
<i>Partie III . Influence du processus de fabrication et des paramètres d'essai.....</i>	<i>211</i>
<i>Partie IV . Etude du comportement local à l'aide de la corrélation d'image</i>	<i>225</i>
CHAPITRE IV : MODELISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES FIBRES DE CHANVRE	257
<i>Partie I . Acquisition des données géométriques de la fibre et reconstruction 3D de la géométrie</i>	<i>260</i>
<i>Partie II . Modélisation du comportement mécanique des fibres unitaires</i>	<i>272</i>
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	302
RÉFÉRENCES :.....	308
TABLE DES FIGURES.....	316
TABLE DES TABLEAUX	326
ANNEXES:	330

Abstract

Biocomposites have some physical, mechanical, environmental and economical benefits. These materials are a composition of natural fibres or an assembly of synthetic or biopolymer matrix reinforced by natural fibres. In the near future, the utilization of this renewable material will become an important issue. In the global industrial market, this kind of material facilitates the development of natural local resources. To achieve this economical, industrial and scientific goal, a deep understanding of natural fibres reinforced polymer must be developed. Knowledge of natural fibres at macroscopic (composite), mesoscopic (fibre bundle) and microscopic (unitary fibre) is essential.

In this thesis, fibres extracted from hemp plant and biocomposites polypropylene reinforced by short hemp fibres were investigated. Some specific experimental studies coupled to numerical modelling have enabled to determine and understand their mechanical behaviour. Microscopic experimental method has enabled to characterize the unitary fibre behaviour independently of fibre bundles. Moreover fibre modelling has allowed to take into account its geometrical uniqueness.

Caused by their vegetated origins, hemp unitary fibres and bundles present a complex morphology and structure which have an impact on the mechanical properties and behaviour of natural fibres. Studies carried out took in light the effect of the growing conditions and hemp variety on the fibre mechanical properties. It showed also the influence of the fibre geometry on the characterization of properties. Additional studies revealed the mechanical behaviour of natural defects.

About the biocomposite, others optical and macroscopic experimental characterization methods was used in order to determine the behaviour of a polypropylene reinforced by hemp fibres. The imaging correlation method coupled to standard characterization testes allowed to analyse the local behaviour showing the heterogeneity of this natural material. Moreover, complementary work showed the impact of the fibre distribution on the composite behaviour at the crack and rupture time.

These thesis works are integrated in a global research and innovation project. MAPROFI project incorporate some industrials and university researchers which have different scientific expertises. The goal of this project is to pool the skills to highlight the utilisation of composites based on natural hemp fibres.

Résumé

Les agro-composites présentent de nombreux avantages physico-chimiques, mécaniques, environnementales et économiques. Ces matériaux sont un assemblage de fibres naturelles noyées dans une matrice polymère synthétique ou bionaturelle renforcée. L'utilisation de ces agro-matériaux est devenue un enjeu majeur et le sera encore plus dans un avenir proche et à long terme. Pour pouvoir atteindre cet objectif économique, industriel et scientifique, une compréhension affinée et une maîtrise pointue des fibres naturelles seules et des agro-composites doivent être développées à différentes échelles. Une connaissance à l'échelle macroscopique (composite), mésoscopique (faisceau de fibre) et microscopique (fibre unitaire) est alors indispensable.

Dans les travaux de cette thèse, les fibres extraites de la plante de chanvre et les agro-composites polypropylène – fibres courtes de chanvre ont été étudiés. Des analyses expérimentales spécifiques alliées à une modélisation numérique ont permis de déterminer et comprendre leur comportement mécanique. Des méthodes de caractérisation à l'échelle microscopique ont permis de caractériser le comportement des fibres unitaires des faisceaux. Une modélisation de la fibre a permis de prendre en compte ses particularités géométriques et d'en étudier ses effets.

De part leur nature, les fibres unitaires et les faisceaux de chanvre ont une structure, une forme et une composition complexe influençant leur comportement et leurs propriétés mécaniques. Les études menées dans le cadre de cette thèse ont montré l'influence des conditions de culture et de la variété de chanvre sur les propriétés des fibres. Elles ont aussi mis en évidence l'impact de la géométrie réelle des fibres sur leurs propriétés mécaniques. D'autres études complémentaires ont mis en lumière l'influence des défauts naturels et la taille des fibres.

Concernant les agro-composites d'autres méthodes expérimentales à la fois optiques et macroscopiques ont été utilisées pour la caractérisation de leur comportement mécanique. La méthode de corrélation d'images sous sollicitations mécaniques a mis en lumière le comportement local hétérogène du matériau pour les pièces injectées et préfabriquées, montrant ainsi la non-homogénéité des propriétés mécaniques. De plus une étude complémentaire a montré l'influence de la répartition des fibres et du processus de fabrication des composites sur l'initiation et la propagation de l'endommagement et la rupture du matériau.

Cette thèse s'inscrit dans un projet régional de recherche et d'innovation appelé MAPROFI intégrant des industriels et universitaires de différents horizons scientifiques. Ce projet a pour but de mettre en commun les compétences de chacun à la valorisation et à l'utilisation à grande échelle des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre.

Introduction

Les matériaux nouveaux sont depuis toujours un axe de recherche et de développement des civilisations et plus récemment des sociétés modernes. Le développement des matériaux s'est accéléré au siècle dernier avec l'entrée dans l'ère industrielle et la croissance exponentielle de la métallurgie et la sidérurgie pour la fabrication de pièces industrielles et de structures de masse. Les acteurs de ce secteur ont toujours œuvré pour allier fiabilité, performance et coût permettant l'accès aux matériaux innovants au plus grand nombre. Au milieu du 20^{ème} siècle sont apparus les matériaux synthétiques comme les plastiques plus faciles à mettre en œuvre, plus légers et moins coûteux. Néanmoins, ces matériaux de part leurs propriétés mécaniques limitées à certaines applications, ne peuvent pas remplacer les métaux. Toujours à la recherche de matériaux à hautes performances techniques, les hommes ont allié les performances des métaux au faible coût et la légèreté des plastiques en créant les composites. Ces matériaux d'une ère nouvelle sont initialement des thermoplastiques ou thermodurcissables renforcées par des fibres présentant des propriétés hautement supérieures à celle du polymère seul.

Ces composites sont caractérisés par deux aspects principaux, économique et technique. Les composites sont des matériaux à haute performance technique avec des propriétés physiques et mécaniques intéressantes pour une fabrication et une mise en œuvre relativement aisée. Cette dernière décennie, la vision du développement industrielle a changé de direction en intégrant l'aspect environnemental dans la recherche de matériaux innovants. L'objectif de la performance technique étant atteint et au vue de la question posée aujourd'hui concernant l'environnement et l'impact de l'évolution de l'homme sur son environnement ; une problématique nouvelle se pose, à savoir, est-ce que l'homme peut continuer à évoluer tout en étant en adéquation avec le milieu dans lequel il vit ? Pour répondre à cette problématique, les chercheurs et industrielles ont cherché à utiliser des ressources végétales pour la fabrication des nouveaux matériaux. Les

agro-matériaux ou les matériaux bio-sourcés répondent aujourd'hui, en partie à ce besoin.

Le contexte de ce projet régional de recherche est la maîtrise des matières premières et des consommations d'énergie qui demeure un objectif mondial. L'allègement des structures mécaniques y contribue avec l'utilisation, entre autres, de solutions alternatives comme les nouveaux matériaux bio-sourcés renforcés avec des fibres végétales. Selon AGRiculture pour la Chimie et l'Energie (Agrice), les agro-matériaux à base de fibres végétales apparaissent comme très prometteurs à l'horizon 2030 avec un taux de croissance prévisionnel global attendu de +7%. Ainsi les utilisations de fibres végétales dans la plasturgie devraient s'établir à plus de 320000 tonnes/an, réparties entre les marchés de l'automobile, du bâtiment et de l'emballage.

Le chanvre est une plante technologique dans le sens où tous ses composants peuvent faire l'objet d'application. Les fibres de la tige (~30 % de la paille) sont employées en papeterie (papiers spéciaux), dans le textile, dans le bâtiment (isolation avec des laines de chanvre), dans des composites (composites polymère-chanvre). Le cœur de la tige (~55 % de la paille), appelé chènevotte, est utilisé dans le bâtiment, dans les litières animales et pour le paillage. Enfin, la graine (chènevis) est employée dans l'alimentation (présence d'oméga 3 et 6) et les cosmétiques. Dans la région Champagne Ardenne, l'Aube est le premier producteur européen de chanvre.

Comparativement aux fibres de verre ou de carbone, l'élaboration de fibres végétales ne demande que peu d'apport énergétique, leur faible masse volumique permet de réduire les impacts environnementaux liés au transport et leur biodégradabilité permet d'offrir des solutions avec peu d'impact sur l'environnement en fin de vie.

L'incorporation de fibres végétales à base de cellulose (coton, lin, chanvre, jute, sisal, kenaf, coco, bois...) dans des matériaux plastiques thermoplastiques ou thermodurcissables en remplacement des fibres de verre ou de carbone est un concept déjà industrialisé et commercialisé. Ces composites sont utilisés dans des objets variés de l'industrie. Ces applications répondent au souci de la préservation de l'environnement. Le renforcement des matières plastiques à l'aide de fibres végétales diminue les problèmes d'élimination, car les matériaux renforcés par des fibres végétales sont plus faciles à recycler que ceux renforcés par des fibres de verre ou de

carbone. Les agrocomposites polymère et fibres végétales peuvent être broyés et réinjectés sur plusieurs cycles de vie. Les agro-composites entièrement biosourcés pourront à l'avenir être éliminés lorsque certains verrous technologiques seront levés.

Les agro-composites sont un assemblage de matériaux entièrement naturels ou partiellement bio-sourcés composés d'une matrice pouvant être un biopolymère et de renforts d'origine végétale ou animale. Pour pouvoir les utiliser dans des secteurs variés comme le bâtiment, l'automobile, l'aéronautique, le sport ou autres, il est indispensable de connaître et maîtriser leurs propriétés physico-chimiques, mécaniques et environnementales. Pour répondre aux cahiers des charges sévères qui leurs sont fixés, ces matériaux doivent notamment posséder une bonne tenue aux sollicitations mécaniques (statique, fatigue et choc) et sous certaines conditions environnementales. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne les pièces automobiles. Lors de l'utilisation des pièces mécaniques en composite à fibres végétales dans une voiture, ces pièces sont soumises à des sollicitations mécaniques et à des variations de température et d'humidité, répétées durant leur service, conduisant à une dégradation des propriétés mécaniques et à du vieillissement accéléré des fibres végétales et donc de l'agro-composite.

La morphologie de la fibre de chanvre n'est pas largement étudiée dans la littérature. La caractérisation de son comportement mécanique est également très important puisqu'elle permet de mieux appréhender son utilisation en tant que renfort dans un composite. De plus, lorsqu'on étudie les fibres végétales, différents paramètres doivent être pris en compte pour estimer leurs propriétés mécaniques. Certains de ces paramètres sont différents d'une fibre à une autre, au sein d'une même espèce de fibre et même dans un même faisceau de fibres. C'est à cause de cette variabilité des données que la modélisation du comportement des fibres ou des faisceaux est un axe de recherche important.

Cette thèse a pour objectif de caractériser à l'échelle macroscopique, mésoscopique et microscopique le comportement de l'agro-composite polypropylène / chanvre et du renfort seul. Elle s'appuie sur les connaissances en caractérisation expérimentale et en simulation numérique des laboratoires de l'UTT permettant de comprendre et d'analyser son comportement. Cette étude permettra de définir suivant les

applications envisagées, la meilleure fibre à introduire dans les composites. En outre, elle pourra alimenter une base de données bio-matériaux pouvant être implémentée dans des logiciels de simulation et ainsi augmenter la probabilité d'un emploi futur. Cette thèse s'oriente suivant quatre axes de recherche. Le premier est de déterminer parmi plusieurs plantes soumises à différentes conditions de culture et pour différentes variétés de chanvre laquelle produit les fibres les plus intéressantes. Le deuxième axe est de développer et compléter les connaissances existantes sur le comportement mécanique des fibres de chanvre. Un troisième axe est d'identifier les propriétés et de caractériser le comportement d'un agro-composite polypropylène renforcé par des fibres de chanvre et un quatrième axe consiste au développement et à la réflexion d'outils expérimentaux et numériques permettant la caractérisation de ce type de matériau.

Dans une première partie sera présentée une synthèse bibliographique de la littérature scientifique. Cette étude a orienté les travaux exposés dans ce mémoire. Dans une deuxième partie, une étude sur les fibres de chanvre sera détaillée montrant le comportement mécanique des fibres unitaires et des faisceaux de chanvre, l'influence des conditions de culture et de la variété du chanvre sur les propriétés mécaniques des fibres, l'impact de la géométrie de la fibre sur la détermination de ces propriétés. La troisième partie est dédiée à l'agro-composite, dans lequel seront exposés le comportement mécanique du composite, l'influence du type de renfort utilisé, les mécanismes de rupture et d'endommagement ainsi que le comportement local engendré par la nature hétérogène de ce type de matériau renforcé. Enfin une quatrième partie portera sur la modélisation statistique du comportement des fibres de chanvre et la prise en compte des incertitudes des propriétés mécaniques dans la modélisation. Dans cette dernière partie seront aussi présentées les méthodes de modélisation appliquées à la caractérisation des fibres.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART	14
<i>Partie I. Les agro-composites</i>	16
I.1 Généralités sur les agro-composites	16
I.2 Les enjeux	18
I.3 Exemples d'application	18
I.4 Les propriétés mécaniques	23
<i>Partie II. Les fibres végétales et les fibres de chanvre</i>	26
II.1 Les fibres végétales	26
II.1.1 De la plante à la fibre	26
II.1.2 Morphologie des fibres végétales	30
II.1.3 Processus de défibrage des fibres végétales libériennes	31
II.1.4 Constitution chimique des fibres végétales	32
II.1.5 Avantages et inconvénients de renforts en fibres végétales	34
II.1.6 Caractéristiques mécaniques des fibres végétales	37
II.2 Les fibres de chanvre	39
II.2.1 Propriétés des fibres de chanvre	40
II.2.2 Domaine d'application du chanvre	41
<i>Partie III. Caractérisation et comportement mécaniques des fibres de chanvre</i>	43
III.1 Caractérisations des fibres de chanvre	43
III.1.1 Paramètres influençant les propriétés mécaniques des fibres	43
III.1.2 Caractérisation physique, et morphologique des fibres	44
III.1.3 Eprouvettes de traction et essais mécaniques	51
III.2 Propriétés géométriques et mécaniques des faisceaux de chanvre	53
III.2.1 Diamètre et densité des faisceaux	53
III.2.2 Comportement mécanique des faisceaux	54
III.3 Caractérisation des fils de chanvre	56
III.3.1 Propriétés physiques des fils de chanvre	56
III.3.2 Comportement et propriétés mécaniques des fils de chanvre	57
III.4 Caractérisation des fibres unitaires de chanvre	59
III.4.1 Les défauts naturels dans les fibres	62
III.4.2 Conditions de culture des plantes et impact sur les fibres	62
III.4.3 Localisation et géométrie de la fibre dans la plante	63
III.4.4 Propriétés d'absorption d'humidité des fibres unitaires	64
III.5 Modélisation du comportement des fibres de chanvre	65
<i>Partie IV. Les agro-composites à base polymère renforcés par des fibres naturelles comme matériaux techniques</i>	67
IV.1 Propriétés mécaniques des agro-composites PP – fibres végétales	68
IV.2 Influence du taux de fibres dans les agro-composites	69
IV.3 Influence de l'orientation des fibres dans la matrice	71
IV.4 Recyclabilité des agro-composites	72
IV.5 Propriétés d'absorption d'humidité des agro-composites	73
IV.6 Impact de la température d'injection sur l'agro-composite	75
IV.7 Conclusion	75

Partie I . Les agro-composites

I.1 Généralités sur les agro-composites

L'utilisation des composites est de nos jours incontournable dans le monde industriel (aéronautique, automobile, bâtiment, produits de consommation courante) et ce depuis environ trente ans. La tendance à venir en matière de nouveau matériau est le développement d'agro-matériaux renforcés par des fibres végétales qui apparaissent très prometteurs. Une croissance de 7300% est prévue à l'horizon 2030 selon l'ADEME. L'utilisation des fibres végétales dans la plasturgie pourrait s'élever à plus de 320 000 tonnes / an.

Un agro-matériau est un matériau constitué totalement ou partiellement de ressources renouvelables comme par exemple le bois, l'amidon, la cellulose,... Les exemples d'agro-matériaux sont les revêtements et isolants naturels pour le bâtiment, les emballages en carton ou encore les agro-composites encore peu utilisés dû au manque de connaissance scientifique les concernant. Un agro-composite ou composite bio-sourcé est un assemblage de matériaux constitué d'une matrice, de renfort et d'additifs / charges qui présente des avantages écologiques et environnementaux certains dus au caractère renouvelable de ces composants et à leur possible biodégradabilité.

Les bio-renforts peuvent être des fibres naturelles. Celles-ci sont initialement neutres vis-à-vis de leurs émissions de CO₂, car leur dégradation ne produit qu'une quantité de dioxyde de carbone égale à celle que la plante a absorbée lors de sa croissance. Sous l'appellation « fibre naturelle » sont regroupées :

- 1) les fibres végétales (cellulosiques)
- 2) les fibres animales (protéiniques)

Les biopolymères sont des polymères biodégradables et / ou d'origine naturelle. En fin de vie, la pièce pourra être broyée et les déchets introduits dans un compost pour dégradation. Confortés par les notions d'écoconception, les biopolymères ont pour vocation à se substituer aux polymères thermoplastiques de grande diffusion (polyoléfines, PVC, PS) afin de faciliter le recyclage et la gestion de fin de vie des matériaux. Parmi les biopolymères on trouve :

- des polymères micro-biens : ils sont secrétés par des micro-organismes après fermentation de matières premières naturelles comme le glucose, le sucrose d'acide gras (exemple du PHA polyhydroxyalcanoate).
- des polymères issus des plantes : les plus connus d'entre eux sont l'amidon, la cellulose et la lignine.
- des polymères produits par polymérisation chimique d'entités biologiques tels que les polymères polylactiques. L'acide lactique est produit par fermentation de sucres (betteraves, pommes de terre, maïs) mais peut être également synthétisé chimiquement.
- des polymères synthétiques biodégradables, exemple du PCL par polymérisation.

Les techniques de fabrication des biocomposites sont identiques à celles utilisées pour les composites renforcés par des fibres synthétiques. Toutefois la température de mise en forme de ces composites ne doit pas dépasser 220°C qui correspond à la température de dégradation de la cellulose et de la fibre unitaire. Une étude parue en 2009 a montré l'influence de la température sur les fibres de chanvre [PLA09]. Autres études plus anciennes avaient déjà mis en évidence la dégradation thermique des fibres naturelles en générale comme le jute et lin qui est une plante proche de celle du chanvre [GAS01]

I.2 Les enjeux

L'utilisation des fibres naturelles comme renfort présente certains enjeux pour :

- valoriser une ressource locale : les composites à fibres végétales ouvrant de nouveaux débouchés aux produits issus de l'agriculture,
- développer des matériaux et des technologies prenant en compte les impacts sur l'environnement et leur capacité à être intégrés dans une démarche d'éco-conception,
- valoriser un matériau, potentiellement recyclable en fin de vie [DUI08],
- son aspect économique, hormis la mise en place de moyen de production des fibres végétales et de fabrication des composites renforcés par des fibres végétales, le coût brut des fibres végétales est inférieure à ceux des fibres synthétiques,
- sa disponibilité, en mettant en place une culture contrôlée de la ressource, il est possible d'avoir un approvisionnement saisonnier et en quantité.

I.3 Exemples d'application

Les matériaux d'origine végétale sont variés et depuis toujours utilisés. Le bois a été employé pour la fabrication du papier ou encore les fibres de coton pour la fabrication de matières textiles. En 1839, Charles Goodyear (1800-1860) inventa par erreur le caoutchouc largement utilisé de nos jours pour la fabrication de pneus, par le procédé de vulcanisation [GEN06]. Ce procédé consiste à mélanger du caoutchouc à haute température avec du soufre, obtenant ainsi un caoutchouc résistant à d'importante variation de température. Les premiers composites plastiques renforcés par des fibres végétales ont fait leur apparition en 1908, où ces dernières étaient associées à une résine phénolique à base de coton ou de papier pour la réalisation de

tubes et panneaux électroniques [BAL05]. Un autre exemple qui est l'acétate de cellulose en cette même année 1908 a été utilisé pour la fabrication de film photographique [ETI12]. En 1910, Henry FORD (1863-1947) expérimenta l'emploi de matériau provenant du monde agricole pour la fabrication d'automobiles. Il a essayé de nombreuses ressources comme le blé, le soja et le chanvre. Une résine de gluten de blé renforcée par des fibres d'amiante a été conçue pour la confection des boîtiers de protection du ressort de démarrage de la Ford T modèle de 1915. La farine de soja étant composée principalement de 50% de protéine et 50% de cellulose, Henri Ford a montré un intérêt majeur pour la transformation du soja en plastique. A cette farine, il mélangea d'autres matières végétales comme la farine de bois, le lin et le chanvre, pour former un composé constitué de 70% de cellulose d'origines variées avec 10 à 20% de farine de soja. A partir 1941, Henri Ford lança la voiture « plastique », nom donné à la création de voitures fabriquées avec des matières plastiques d'origine végétale. Même si sa voiture plastique ne s'est pas vendue, les matières plastiques sont devenues plus communes et les plastiques provenant de ressources renouvelables ont été oubliés jusqu'à cette dernière décennie.

Dans les années trente, un matériau composé de tissu de coton plongé dans une résine phénolique, permettait la fabrication d'engrenages et de cames. Ce matériau résistant à l'eau a été aussi employé pour la réalisation des poupées de winch (voir Figure I.2) qui sont encore aujourd'hui disponibles.

Ces dernières années, les composites à base de fibres végétales commencent à émerger dans différents secteurs industriels (Tableau I-1). Mercedes-Benz utilise pour son modèle « classe A », un composite renforcé par des fibres de lin et de sisal pour la fabrication des garnitures intérieures de portières (voir Figure I.1), des dossiers de sièges, de l'habillage du coffre, ... [BLE95], [BLE99] et [WIT94]



Figure I.1 : Habillage intérieur de portière de voiture en lin / polypropylène [BAL05]



Figure I.2 : Winch de bateau de plaisance dont la poupée est constituée d'un composite renforcé par des fibres de coton [BAL05]

Depuis seulement quelques années, l'utilisation des agro-composites et notamment les composites polymères renforcés par des fibres de chanvre et de lin se sont fortement diversifiés comme en font état des articles issus de la presse web. R. Bourghriet dans un article de 2009 paru sur le site actu-environnement.com intitulé « *Fibres végétales : de nouvelles applications prometteuses émergent* » fait un état de l'utilisation des fibres de chanvre dans différents secteurs industriels français comme l'automobile et le bâtiment. PSA Peugeot utilise depuis 2009 des pièces composites renforcées par des fibres de chanvre pour les rétroviseurs de la Peugeot 2007. De plus à l'horizon 2015, l'objectif visé est d'utiliser des matériaux verts à hauteur de 30% des composants polymère dans une voiture, actuellement ce taux est de l'ordre de 7%. Le chanvre peut être aussi utilisé pour la fabrication de bâtiment et maisons éco-sourcés où le chanvre peut être employé comme isolant sous forme de laine pour remplacer les laines de verre couramment utilisées.

Tableau I-1 : Exemples d'application des composites renforcés par des fibres de lin et de chanvre (source ADEME, 2005) [ERN05]

Applications	Fibres courtes lin	Chanvre
Papier et pulpe	45%	80%
Composites (automobiles)	6%	15%
Construction et matériaux d'isolation	2%	4,5%
Geo- et agrotexiles	0,5%	<1%
Linge de maison et habillement	20%	0%
Applications traditionnelles (cordes...)	2%	<1%
Exportation hors UE	24.5%	<1%
Total	60,000-70,000 t	22,000-25,000 t

Source: Nova Institut, lin 1999 et chanvre 2002 en Europe (source EIHA)

D'autres applications plus variées ont été envisagées comme pour la fabrication d'instrument de musique comme une guitare sèche dont la majorité des pièces sont fabriquées en agro-composite dans le but de remplacer le bois pour ce types de produits manufacturés. Les propriétés mécaniques en statique et dynamique, les propriétés acoustiques ainsi que la faisabilité du processus de fabrication des agro-composites permettent d'envisager l'implantation de ce matériau dans ce domaine [PHI09].



Hawaiian Koa : fibres de Koa Hawaïen, Flax : fibres de Lin, Carbon fibre : fibres de carbone

Figure I.3 : Guitares sèches en composites renforcés par des fibres végétales et de carbone [PHI09]

De nos jours, l'emploi des agro-composites dans le domaine du loisir commence à émerger notamment pour la fabrication de vélo de course [FRA09] ou de raquette de tennis [RAF09] où l'armature est fabriquée en agro-composites renforcé par des fibres de lin.

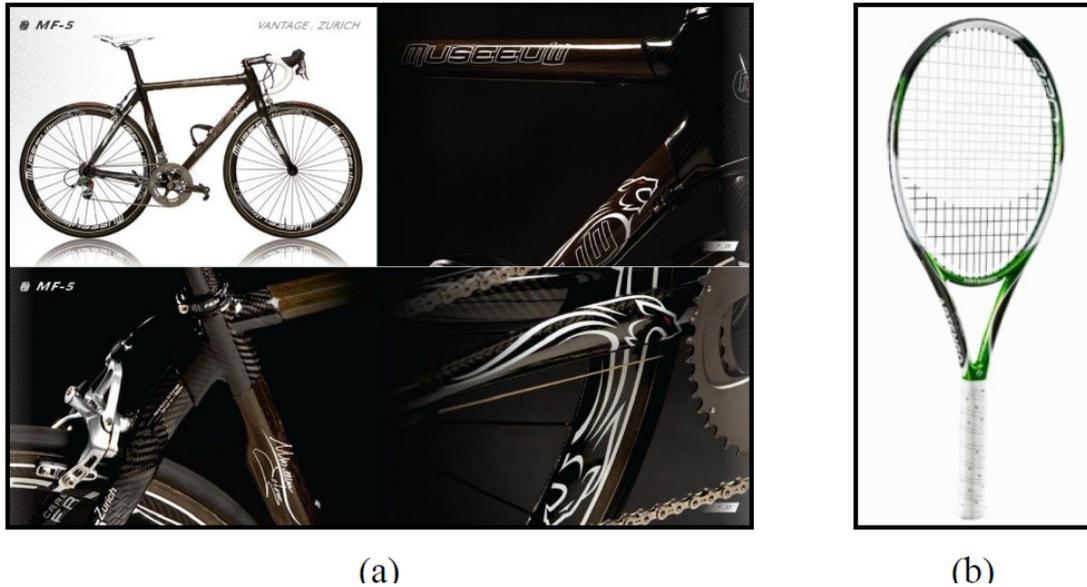


Figure I.4 : Matériels de sport fabriqués en agro-composite renforcés par du Lin : vélo de course Museeuw MF-5 (a) [FRA09] et raquette de tennis Artengo 820 (b) [RAF09]



Figure I.5 : Exemples de diverses applications pour l'emploi des fibres de chanvre et de lin

(a) : éolienne nouvelle génération actuellement en étude, construite en agrocomposite lin

(b) : produits de consommation courante

(c) : secteur du design utilisant des agrocomposites

(d) : marché du packaging prometteur pour l'implantation d'agromatériaux

Un site internet (<http://www.mastersoflinen.com/>) qui regroupe de nombreux communiqués de presse liés aux matériaux utilisant du lin et du chanvre, met en évidence la diversité des applications actuelles et des perspectives qui sont envisagées (Figure I.5).

I.4 Les propriétés mécaniques

Diverses études ont été menées pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux biosourcés. Par exemple les travaux de [BAL05] comparent les caractéristiques mécaniques d'un composite verre / epoxy et d'un composite lin / epoxy. Un composite renforcé par des fibres de lin présente un rapport propriété / densité beaucoup plus intéressant (Tableau I-2). Le Tableau I-3 montre que les composites renforcés par des fibres de chanvre ont des propriétés mécaniques intéressantes comparées à d'autres composites renforcés par des fibres végétales.

Tableau I-2 : Comparaison des propriétés mécaniques d'un composite epoxy/verre et epoxy/lin [BAL05]

Exemples de propriétés mécaniques mesurées sur des éprouvettes renforcées de fibres unidirectionnelles de verre et de lin				
Caractéristiques	Matériau			
	Verre/époxy		Lin/époxy	
	Propriétés absolues	Propriétés spécifiques	Propriétés absolues	Propriétés spécifiques
Densité (g/cm ³)	1,87	1	1,35	1
Module d'Young longitudinal (GPa)	35	19	24	17,7
Résistance en traction longitudinale (MPa)	900	481	325	240
Résistance en traction transverse (MPa)	25	13	15	11
Résistance en compression longitudinale (MPa)	650	348	92	68
Résistance au cisaillement interlaminaire ILSS (MPa)	80	43	15	11
Tenue à l'impact Charpy (kJ/m ²)	280	150	60	44

(1) Matériaux réalisés par pultrusion avec un pourcentage de fibres de 50 % en volume.

Tableau I-3 : Comparaison des caractéristiques mécaniques renforcées par différentes natures de fibre [BAL05]

Exemples de propriétés mécaniques de composites polypropylène/fibres végétales					
Propriété des matériaux composites	Nature des fibres				
	Kenaf	Coir	Sisal	Chanvre	Jute
	Densité des fibres				
		1,25	1,33	1,48	1,46
Module d'Young en traction..... (MPa)	6 890	1 250	5 360	6 850	3 620
Contrainte à rupture traction..... (MPa)	27,5	10	33,3	52,1	26,4
Module d'Young en flexion..... (MPa)	2 210	640	1 670	4 950	2 720
Contrainte à rupture tenue au flexion..... (MPa)	27,8	26,7	24,7	53,9	34,3
Choc Charpy.....(kJ/m ²)	14,1	21,7	26,9	25,9	15,3

(1) Matériaux transformés par compression à 180 °C (5 bar), avec un taux massique de 40 % et des fibres courtes (fibres coupées) aléatoirement dispersées dans un plan.

Tableau I-4 : Résistance mécanique et module d'Young pour des composites PP, PLA renforcés par des fibres de lin, de kenaf ou de chanvre

Agro-composite (% en masse)	σ_{max} (MPa)	E (MPa)	
Chanvre / PP (20/80)	29	15000	[ELK13]
Chanvre / PP (40/60)	36	4200	[BER08]
Chanvre / PLA (20/80)	60	7500	[ISL10]
Chanvre / PP (30/70)	29,7	4580	[BOU11]
Lin/PP (30/70)	29	5000	[OKS03]
Lin / PLA (20/80)	49,2	5060	[BAX08]
Lin / PLA (30/70)	53	8300	[OKS03]
Kenaf / PLA (30/70)	130,5	13000	[OCH08]

Le Tableau I-4 montre des exemples de résistance mécanique et de module d'Young pour des agro-composites à base Polypropylène (PP) ou acide polylactique (PLA) renforcés par des fibres de lin, kenaf ou de chanvre. Cette liste n'est pas exhaustive car les propriétés mécaniques de ces composites dépendent de nombreux paramètres qui peuvent influencer ces propriétés comme l'agent de couplage, le processus de fabrication, le pourcentage de renfort pour ne citer seulement quelques exemples. Globalement, les composites renforcés par des fibres de kenaf ont de meilleures propriétés que les composites renforcés par des fibres de lin et de même ceux-ci ont en général de meilleures propriétés que les agro-composites renforcés par des fibres de chanvre. Le PLA a une résistance mécanique et un module d'Young qui sont plus

élevés que le PP, ainsi les composites à base de PLA ont des propriétés plus importantes que les composites à base de PP.

Partie II . Les fibres végétales et les fibres de chanvre

Les fibres végétales peuvent être utilisées dans la fabrication de matériaux composites dans lesquels elles peuvent jouer le rôle de charge/additif et/ou de renfort. Dans ce cas leurs caractéristiques intrinsèques, physiques, mécaniques et chimiques conditionnent les propriétés du composite final et définissent leurs domaines d'application.

II.1 Les fibres végétales

II.1.1 De la plante à la fibre

Il est possible de définir les fibres et de les classer selon leurs origines dans la plante.

Les fibres se divisent en quatre groupes :

- Les fibres végétales provenant de la graine
- Les fibres végétales provenant de la tige ou du tronc
- Les fibres végétales provenant des feuilles
- Les fibres végétales provenant de l'enveloppe du fruit

Dans cette étude bibliographique seront essentiellement présentées les fibres libériennes provenant de la tige de la plante.

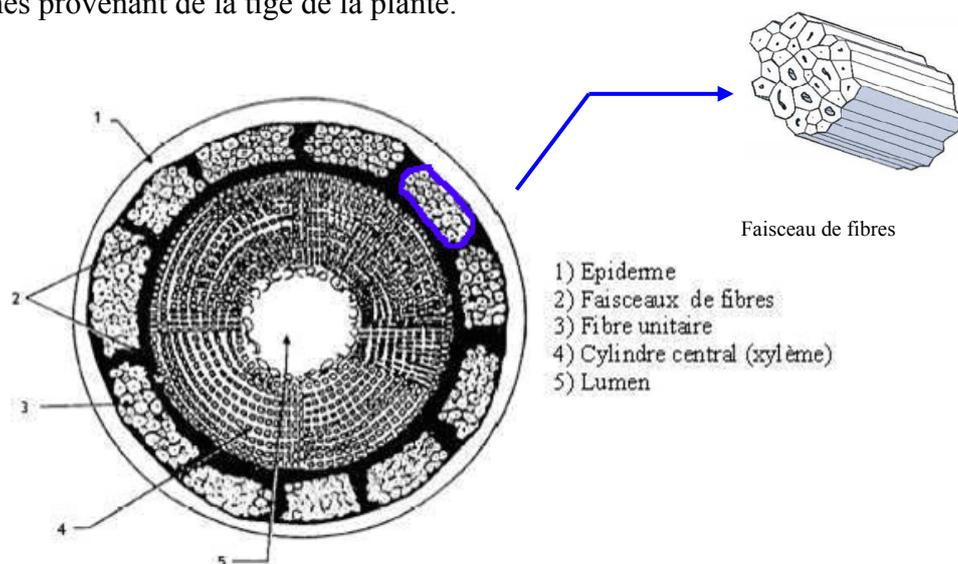


Figure I.6 : Vue macroscopique de la section transversale d'une tige de lin [LI08]

Une fibre unitaire également nommée fibre élémentaire, est une cellule fibreuse unitaire qui associée à d'autres, forme un faisceau de fibres (voir Figure I.7 et Figure I.8).

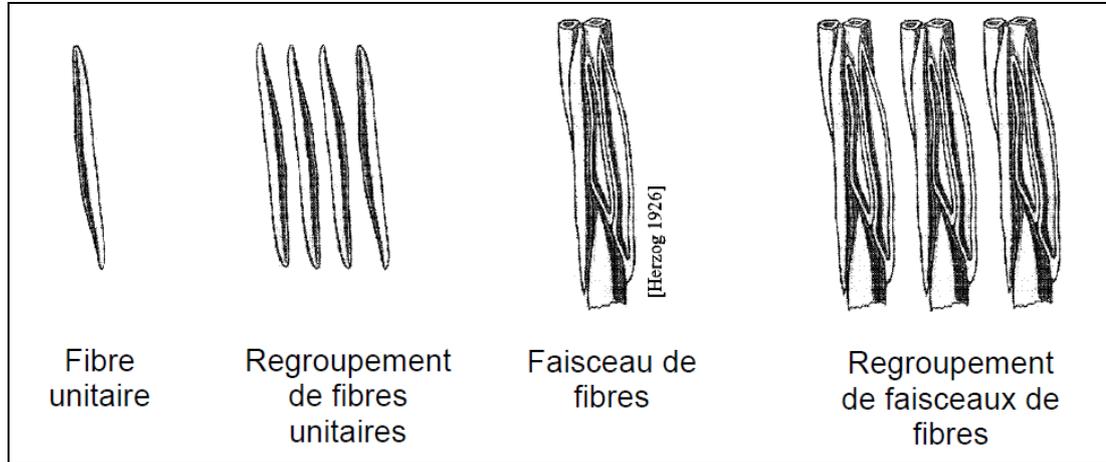


Figure I.7 : Fibres unitaires et faisceaux [MUS99]

Les fibres libériennes (cas du chanvre et du lin) sont extraites d'une partie de la tige appelée faisceau, situé dans la paroi secondaire de la tige de la plante. L'agencement des constituants du lin et du chanvre est similaire. La structure des végétaux est constituée de quatre polymères principaux : la cellulose, l'hémicellulose, les pectines et la lignine (Tableau I-5).

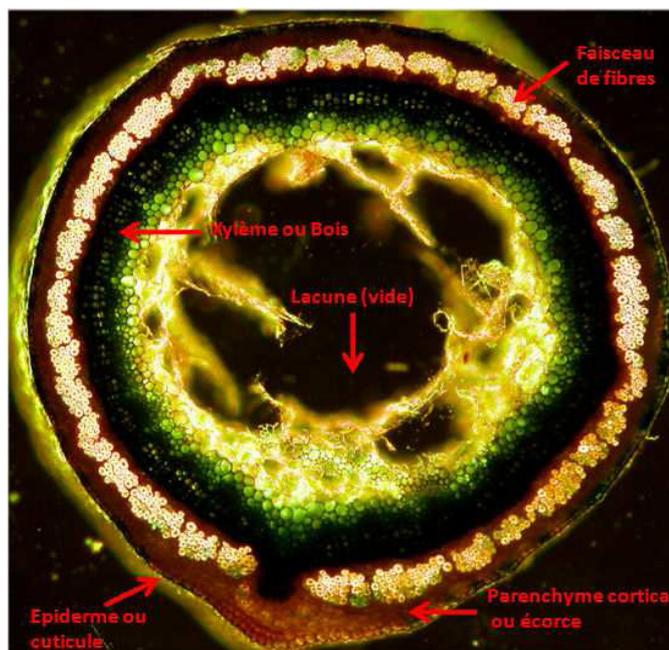


Figure I.8 : Microscopie de la section d'une tige de lin

Lorsque la plante a atteint son état de maturité celle-ci est récoltée. La tige (tronc) est séparée des feuilles et des graines. Les tiges de chanvre sont ensuite déposées aux champs pour initier le processus de rouissage. Il existe différents types de rouissage : rouissage à terre, à l'eau, chimique ou enzymatique [MEI11]. Après que le taux d'humidité soit redescendu à un taux équivalent à 11%. Les tiges subissent différentes opérations d'extraction (décortication, séparation et affinage) qui permettent d'obtenir : des amas de faisceaux, des faisceaux, des granulats (chènevottes) qui sont des fractions de la partie centrale de la tige appelés communément bois et des poudres (Figure I.9). Une explication des différents processus manuel et mécanique sera donnée par la suite.

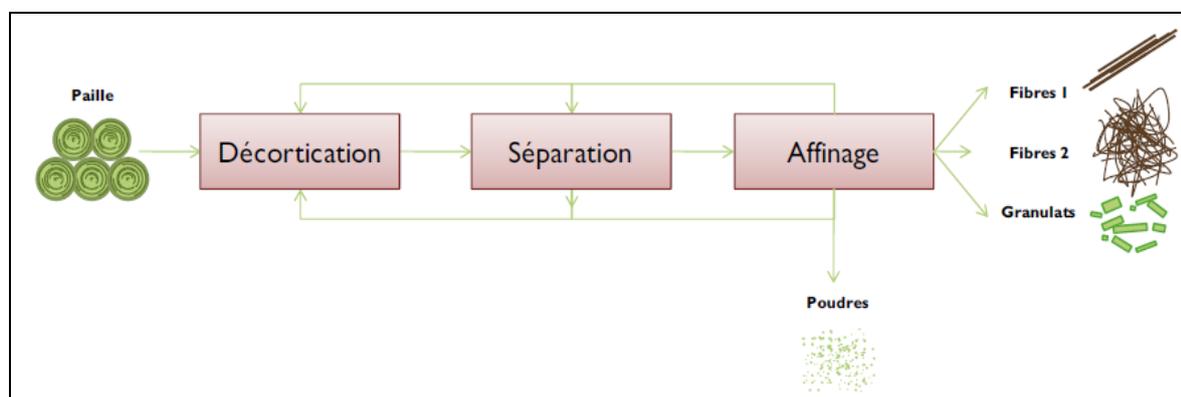


Figure I.9 : Processus d'extraction des fibres végétales [MEI11]

La fibre unitaire est extraite de la tige de la plante après plusieurs opérations d'extraction (Figure I.10 et Figure I.11). L'opération de *teillage* permet d'obtenir un faisceau de fibre. Après l'opération de *peignage*, une fibre dite technique est obtenue avec un diamètre compris entre 50 et 100 μ m. De cette fibre technique sont extraites les fibres unitaires avec un diamètre compris entre 20 et 50 μ m ; elles-mêmes composées de méso-fibrilles et de micro-fibrilles.

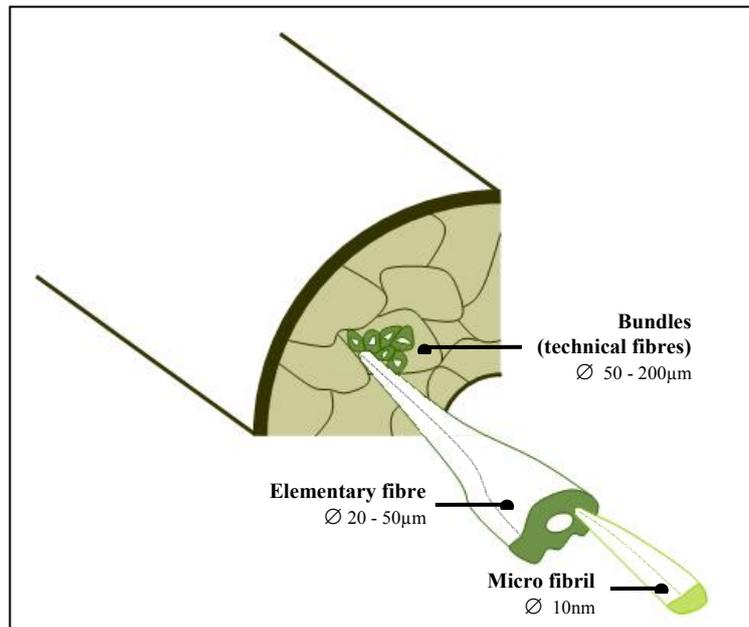


Figure I.10: fibre végétale à l'échelle macro, méso et microscopique

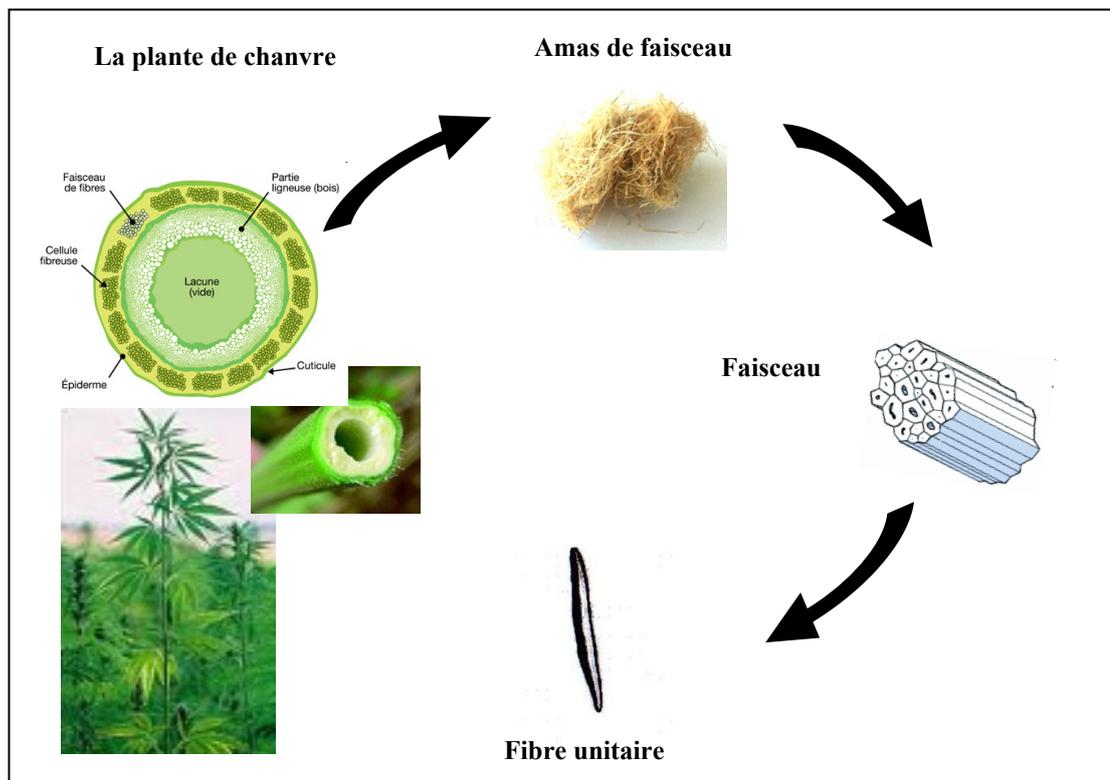


Figure I.11: Schéma à différentes échelles de la plante et de la fibre de chanvre

II.1.2 Morphologie des fibres végétales

Il existe deux modèles pour représenter les fibres, le premier est un modèle où on considère la fibre comme une superposition concentrique de plusieurs couches de nature différente (Figure I.12), le deuxième est géométrique considérant la fibre comme un agencement de micro-fibrilles

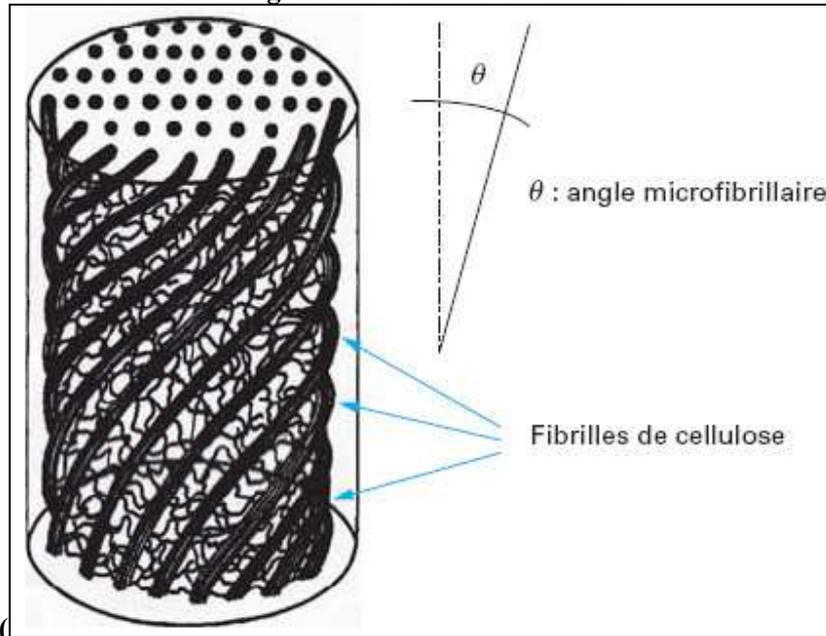


Figure I.13). Une fibre élémentaire est l'assemblage de plis composites (Figure I.12), composée de plusieurs parois distinctes : la paroi primaire, la paroi secondaire elle-même divisible en trois couches distinctes (la couche S2 la plus épaisse, est celle qui conditionne le comportement de la fibre) et d'une lamelle mitoyenne formant la zone de transition entre les fibres. Ce type d'assemblage confère un comportement anisotrope aux fibres.

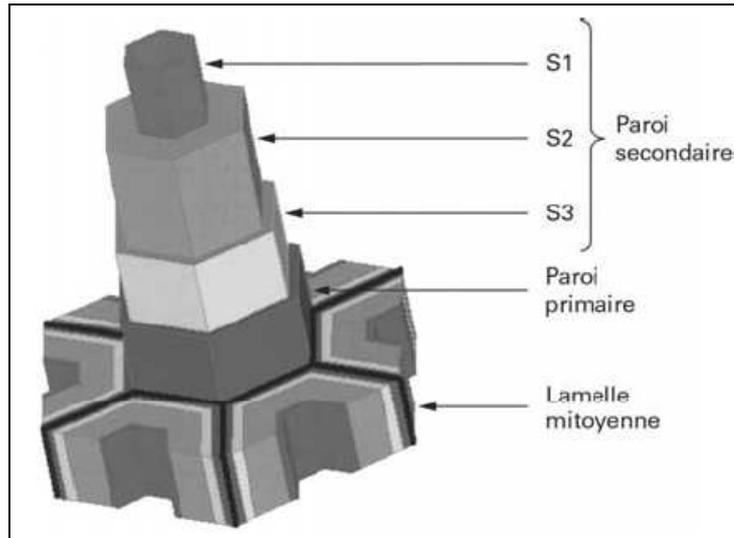


Figure I.12 : Modélisation d'une fibre végétale dans un faisceau [SIL08]

La paroi secondaire a une épaisseur d'environ $10\mu\text{m}$. Elle est constituée majoritairement de cellulose, donnant aux fibres une excellente rigidité et une bonne tenue. Le caractère micro-fibrillaire de la paroi secondaire montrée en

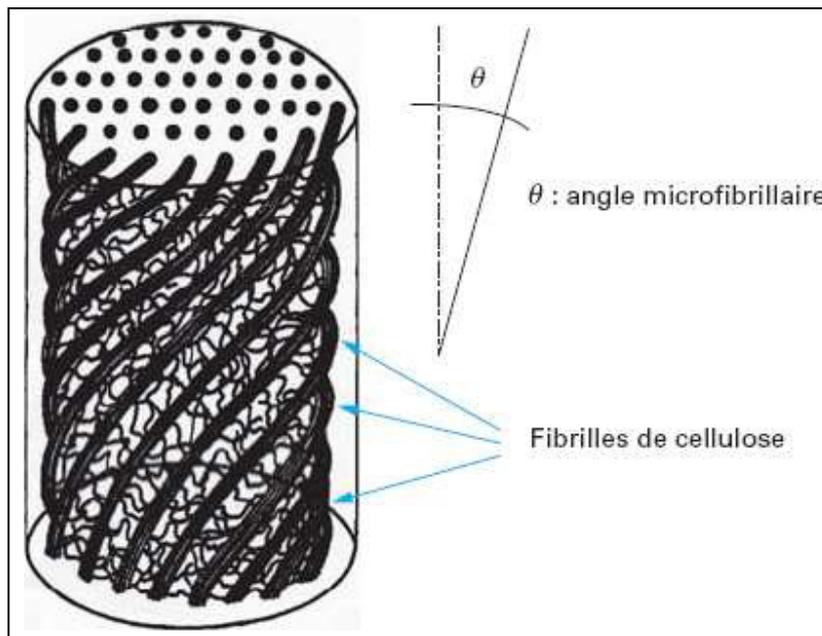


Figure I.13, est comparable à un composite renforcé par des fibres avec une orientation particulière. L'angle d'enroulement micro-fibrillaire est compris entre 6° et 45° (6° pour les fibres de chanvre et 45° pour les fibres de noix de coco) pour la paroi S2. Cet angle joue un rôle important sur le comportement mécanique et plus précisément sur la déformation à faible charge.

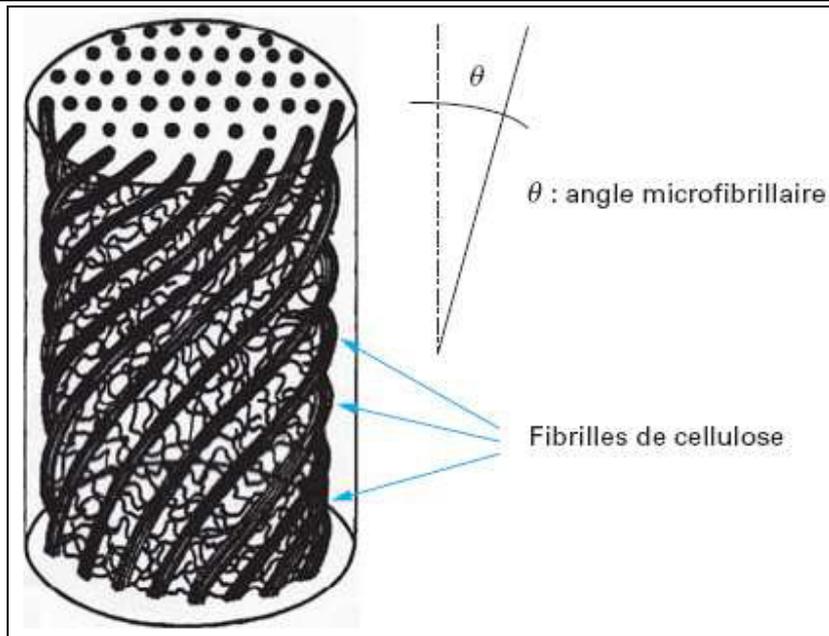


Figure I.13 : Modélisation simplifiée d'une fibre végétale [BAL05]

II.1.3 Processus de défibrage des fibres végétales libériennes

Ce processus est couramment employé pour récolter la paille de chanvre contenant la partie fibreuse. L'obtention de cette matière première a lieu lorsque la plante a atteint sa maturité. Le chanvre est alors récolté par fauchage et placé à même le sol dans le champ, c'est la mise en andain. Avec le temps et de manière naturelle se produit le rouissage qui permet d'éliminer les pectines contenues dans la fibre rendant celle-ci dépourvue de protéine et donc protégée des mites ou autres rongeurs. Le rouissage est l'alternance d'un mouillage et d'un ensoleillement. Après que la paille atteigne un taux d'humidité d'environ 20% permettant le défibrage, elle est stockée dans un lieu aéré minimisant la dégradation et la prolifération de la moisissure. A partir de cette paille, deux processus de défibrage peuvent être envisagés : un processus manuel ou un processus industriel thermomécanique.

- **Processus manuel :**

Ce processus est qualifié de manuel car l'opération de défibrage est réalisée à la main ; aucun moyen technique ou solution chimique n'est utilisé. La paille rouie est trempée un certain temps variant en fonction de la taille des tiges dans l'eau. Cette opération permet la séparation de la chènevotte, de la partie fibreuse et de l'épiderme. La partie fibreuse se présente sous forme de conglomérat de faisceaux.

Toujours après une phase d'humidification, à partir de ces faisceaux, il est possible d'extraire des fibres techniques et unitaires. Une fois défibrées, les fibres sont séchées à la température ambiante plusieurs jours pour ramener le taux d'humidité à un taux normal et stable. Ce processus est fastidieux et demande du temps, ainsi il n'est pas possible d'obtenir des quantités de fibres suffisantes pour une utilisation industrielle. Pour palier à ce problème un autre processus peut être envisagé, le défibrage thermomécanique.

- **Processus thermomécanique (industriel) :**

Ce processus est qualifié d'industriel car il emploie des moyens techniques permettant de défibrer aisément de grandes quantités de fibres utilisables à l'échelle industrielle. Différents processus thermomécaniques peuvent être utilisés employant différents moyens techniques ou différents paramètres de défibrage. Il est difficile de donner un processus normalisé car chaque industriel, laboratoire ou institut technique utilisera un processus qui lui permet d'obtenir la taille et la qualité de fibres souhaitées. De plus ces processus sont souvent protégés par brevet et difficile d'accès. Ce processus consiste généralement à passer successivement la paille de chanvre entre des rouleaux de plusieurs dimensions et chauffés pour séparer la bois (chènevotte) de la partie fibreuse. Ce processus a un inconvénient majeur, les faisceaux obtenus peuvent contenir des morceaux de l'épiderme. De plus ce processus a tendance à endommager les fibres.

II.1.4 Constitution chimique des fibres végétales

Une fibre végétale est assimilable à un composite renforcé par des micro-fibrilles de cellulose (Figure I.14) disposées en spirale, maintenues par une matrice de biopolymères (lignine, pectine, hémicellulose).

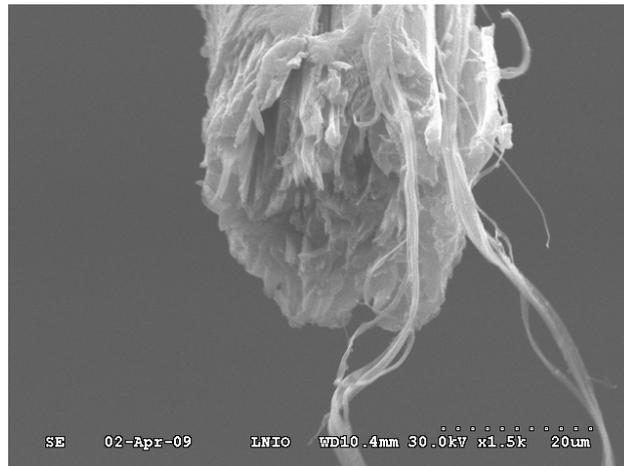


Figure I.14 : Microscopie (MEB) de la section d'une fibre de chanvre montrant la structure fibrillaire (UTT)

Tout d'abord la cellulose forme des chaînes hautement structurées appelées microfibrilles présentant une certaine cristallinité. Ces microfibrilles sont liées entre elles par des liaisons faibles de type hydrogène ou de Van Der Waals. La cellulose est l'élément structurel de base de la fibre apportant sa rigidité. Elle constitue la charpente de la paroi [BIN11] [MAY08].

Ensuite l'hémicellulose se compose de différents sucres contenant des groupes hydroxyles permettant des liaisons hydrogènes avec la cellulose. Elle a pour but de souder les microfibrilles entre elles. Elle a aussi un pouvoir d'interaction avec la lignine, jouant ainsi le rôle d'interface avec la cellulose. L'hémicellulose possède des propriétés hydrophiles induisant des caractéristiques de retrait et de gonflement hydriques importantes pour les fibres végétales [FAR12].

La lignine joue un rôle de maintien pour la cellulose et apporte de la solidité à la paroi secondaire qui devient ainsi très résistante en compression. Dans la paroi primaire et la lamelle mitoyenne la lignine n'est présente qu'en petite quantité où elle contribue à la cohésion des faisceaux de fibres. Les pectines sont une substance amorphe qui n'est présente que dans la paroi primaire et la lamelle mitoyenne, assurant la cohésion entre les fibres unitaires. L'ensemble de ces constituants joue un rôle plus ou moins important sur le comportement global des fibres végétales. La répartition massique des principaux constituants pour différentes fibres est montrée dans le Tableau I-5 :

Tableau I-5 : Composition chimique de fibres végétales (travaux de Mc Dougall) [SIL08]

Fibre	Composition des fibres (en %)			
	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Pectine
Coton	83	5	-	-
Lin	65-70	10-16	2,9	2-4
Chanvre	67	16,1	4	-
Jute	55-64	12-18	12-33	0,2
Kénaf	55-59	18-20	6,8-8	4,5-5
Ramie	68,6	13,1	0,6	-
Sisal	54-66	12	7,3	0,8
Abaca	63,2	19,6	5,1	-
Bambou	48	23	19	-
Bois	83	5	19-26	0

II.1.5 Avantages et inconvénients de renforts en fibres végétales

Les fibres végétales présentent de nombreux avantages qui les rendent attractives pour une application industrielle, mais elles ont aussi de nombreux inconvénients, détaillés (Tableau I-6). Les fibres végétales ont un avantage économique certain, leur coût de production est beaucoup plus faible que pour les fibres synthétiques. Par exemple, il est environ 2 à 3 fois plus faible que celui des fibres de verre et 20 fois moins important que celui des fibres de carbone (Tableau I-7).

La faible densité des fibres végétales de l'ordre de 1,5 g/cm³, soit une densité correspondant à 60% celle des fibres de verre ou encore 83% celle des fibres de carbone ; est une autre caractéristique avantageuse pour leurs utilisation comme renfort (Tableau I-8).

Tableau I-6 : Avantages et inconvénients des fibres végétales

Avantages	Inconvénients
Faible coût	Fort comportement hydrophile
Propriétés mécaniques spécifiques importantes	Faible stabilité dimensionnelle
Biodégradabilité	Biodégradabilité
Non abrasif	Faible tenue thermique (< 230°C)
Bilan CO2 faible	Comportement anisotrope
Demande peu d'énergie pour être produite	Variation de la qualité dépendant des conditions de croissance de la plante
Pas de résidu après incinération	Demande un contrôle pour une application industrielle
Non irritant lors de la manipulation des fibres	Renfort discontinu
Bonne isolation thermique et acoustique	
Ressource renouvelable	
Faible densité	

La densité des fibres végétales est influencée par sa teneur en cellulose. Plus le pourcentage de cellulose est important plus sa densité sera élevée. La présence de lumen au centre de la fibre explique en partie leur faible masse volumique. La taille du lumen et sa proportion sont difficiles à quantifier car il se trouve à l'intérieur de la fibre. Cependant une étude de la rigidité de la fibre par nano-indentation a permis d'évaluer son diamètre de l'ordre de quelques micromètres pour les fibres de lin [BOU10].

Tableau I-7 : Prix indicatif des fibres végétales et synthétiques (en €/Kg)

	Prix des fibres utilisées comme renfort		
	Fibres végétales	Fibre de verre	Fibre de Carbone
Prix (€/Kg)	0,5 – 1,5	2 – 3	20

Tableau I-8 : Densité des fibres végétales, de verre et de carbone

	Densité des fibres utilisées comme renfort		
	Fibres végétales	Fibre de verre	Fibre de Carbone
Densité (g/cm ³)	1.5	2.5	1.8

La biodégradabilité est un autre avantage des fibres naturelles, en effet celles-ci sont facilement dégradables dans un environnement naturel [SAT09] [WAN09] par attaque bactérienne, par hydrolyse ou par oxydation biologique (attaque enzymatique) [KRA03]. De plus, en mettant en place une culture contrôlée de la plante, il est possible d'avoir une ressource facilement disponible [MEI12].

Les inconvénients majeurs d'une fibre végétale sont sa faible tenue thermique (<220°C) qui est un problème pour une utilisation avec certains polymères et son fort comportement hydrophile dû à sa composition chimique (partie II.1.4) [FAR12]. Lors de la mise en œuvre d'agro-composite, ces fibres sont imprégnées dans une matrice qui peut être un polymère pouvant entraîner un gonflement engendrant un changement de géométrie mais aussi de structure interne. Les fibres peuvent ainsi perdre de leurs propriétés mécaniques mais aussi leur pouvoir renforçant. De plus cette caractéristique est un problème puisque les fibres sont peu résistantes à un environnement hautement humide.

A l'instar des fibres synthétiques, les fibres naturelles ont une capacité d'absorption de l'humidité, et cela peut influencer les propriétés mécaniques. Il a été constaté que pour une augmentation de l'humidité lors du conditionnement, la raideur se voit diminuer alors que la contrainte et la déformation à rupture augmentent. Quand le taux d'humidité augmente les liaisons intermoléculaires d'hydrogène dans la paroi cellulaire sont rompues, entraînant une certaine mobilité des chaînes composant le polymère. Il est important de préciser que ce phénomène est vrai seulement pour les fibres végétales comme le chanvre, le lin ou encore le coton alors que le phénomène inverse est constaté pour les fibres naturelles non-végétales comme la laine et la soie. [HO08]. Cette faible tenue en température des fibres végétales auront pour conséquence, une influence des processus de mise en forme des composites renforcés par ses fibres sur les propriétés du produits finis.

II.1.6 Caractéristiques mécaniques des fibres végétales

De part leur caractère naturel, les caractéristiques mécaniques des fibres végétales présentent une forte dispersion. Le Tableau I-9 montre quelques exemples de caractéristiques mécaniques pour des fibres végétales comparées aux fibres synthétiques. La dispersion est due en partie à la taille et la géométrie des fibres testées. Une fibre testée aura des tailles différentes parfois correspondant à une fibre unitaire et parfois à un faisceau. Les fibres unitaires et les faisceaux ont des propriétés différentes [MUN07]. Ainsi en fonction de la fibre testée, des dispersions pourront être relevées. Comme il a été montré précédemment, la composition et la teneur en cellulose changent en fonction de la nature de la fibre. La cellulose apportant la rigidité aux végétaux, si celle-ci diffère, les propriétés seront alors différentes. D'autres facteurs influençant les propriétés mécaniques des fibres naturelles seront listés par la suite (partie III.1.1). Pour une même plante, le taux de cellulose d'une fibre à l'autre peut varier, la position de la fibre dans la tige contribue aussi à des propriétés différentes (partie externe ou interne ou encore partie basale ou haute).

Tableau I-9 : Exemple de caractéristiques mécaniques pour des fibres végétales et synthétiques [SIL08]

Fibre	Densité (g/cm ³)	Contrainte maximum en traction (MPa)	Module d'Young (GPa)	Déformation maximum en traction (%)
Fibres végétales				
Chanvre	1,45 – 1,55	300 – 900	25 – 60	2 - 5
Bois	0,3 – 1.1	80 – 200	8 – 15	-
Lin	1,54	600 – 2000	12 – 85	1 – 4
Sisal	1,45	350 – 700	9 – 21	3 – 7
Coton	1,5 – 1,6	287 – 597	5,5 – 12,6	7 – 8
Jute	1,44	393 – 773	26,5	1,5 – 1,8
Fibres synthétiques				
Verre	2,54	2000 – 2400	72 – 73	3
Carbone	1,7 – 1,9	3500	230	1,5

**les propriétés mécaniques des fibres naturelles citées ci-dessus sont des propriétés caractérisées en traction exceptée pour la densité. Méthode de caractérisation détaillée dans la partie III.1.3*

II.2 Les fibres de chanvre

Le chanvre est une plante annuelle qui est cultivée partout dans le monde mais principalement dans l'union européenne (Figure I.15). Elle regroupe quatre espèces, chacune adaptée à un climat différent. Selon les espèces la taille de la plante varie entre 1,5 et 4 mètres. Le chanvre est plus connu sous le nom de *Cannabis Sativa*. Les cultures légales de chanvre en Europe et plus spécifiquement en France, proviennent d'espèces génétiquement sélectionnées pour leur très faible taux en composés psychotropes (THC). On l'appelle alors le chanvre industriel.

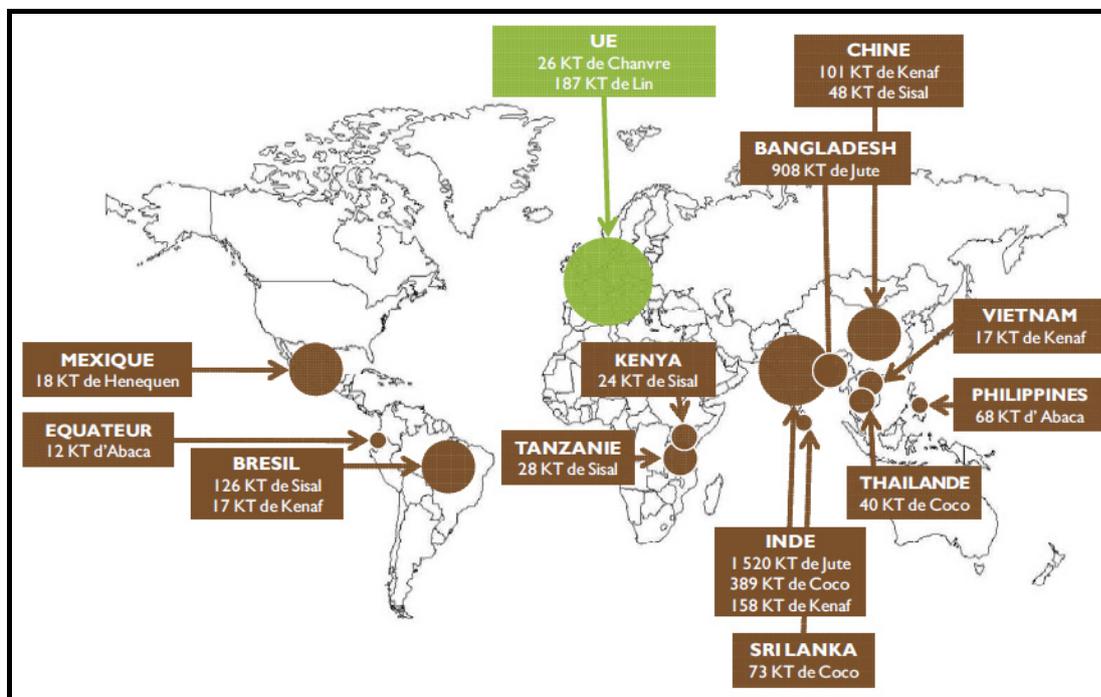


Figure I.15 : Production mondiale de fibres végétales [MEI11]

En France, la culture du chanvre a connu son apogée dans les années 1950. En 1960, la superficie des champs cultivés a diminué considérablement du fait de l'émergence des fibres synthétiques. Mais après 1970, le chanvre a retrouvé un regain d'intérêt grâce à l'ouverture de cette plante au marché papetier. Le chanvre est principalement cultivé en Champagne-Ardenne, soutenue par la Chanvrière de l'Aube qui est une coopérative d'agriculteurs. Le chanvre est semé fin mars ou début avril. La culture ne demande pas d'apport supplémentaire de pesticides. La plante a besoin d'être arrosée en juin pour la croissance de la tige et en août au moment de la floraison. Dans la

région de la Champagne-Ardenne, les besoins en eau sont satisfaits par les précipitations annuelles. La récolte a lieu en septembre. Une première récolte à la moissonneuse batteuse permet de récupérer les graines, suivie d'une deuxième récolte à l'aide d'une faucheuse qui permet d'obtenir la paille qui elle-même fournira les fibres.

II.2.1 Propriétés des fibres de chanvre

Les caractéristiques des fibres de chanvre sont présentées dans le Tableau I-10. La longueur est de 8 à 14mm pour un diamètre d'environ 20 μ m. La teneur en cellulose est de 67% conférant une rigidité dépassant les 30GPa pour certaines variétés de chanvre. La résistance en traction est très variable montrant la forte dispersion des propriétés mécaniques des fibres de chanvre.

Tableau I-10 : Caractéristiques des fibres de chanvre [MOH05]

Propriétés	
Longueur (mm)	8.3 – 14
Diamètre (μ m)	17 – 23
Rapport entre la longueur et le diamètre	549
Densité (g/cm ³)	1,5
Angle micro-fibrillaire (°)	6.2
Taux d'humidité (%)	12
Teneur en cellulose (%)	67
Résistance en traction (MPa)	310 – 750
Résistance en traction spécifique (MPa)	210 – 510
Module d'Young (GPa)	30 – 60
Module d'Young spécifique (GPa)	20 – 41
Déformation à rupture (%)	2 – 4

La résistance mécanique et le module d'Young des fibres de chanvre sont assez diverses et dépendent de la nature et de la variété de chanvre comme le montre le Tableau I-11. La contrainte maximum varie de 300 à 900 MPa en moyenne avec un module d'Young évoluant de 25 à 60 GPa.

Tableau I-11 : Exemple de propriétés élémentaires (résistance mécanique et module d'Young) pour des fibres de chanvre

Fibre de chanvre	σ_{\max} (MPa)	E (GPa)
[BER08]	514	24,8
[DAS13]	697	28,3
[DUV11]	788	45
[MOH05]	310-750	30-60
[MUN07]	450	25
[MOY11]	550	26,0
[PLA09]	285	14,4
[ROM04]	943	57

II.2.2 *Domaine d'application du chanvre*

Deux domaines d'application du chanvre sont actuellement en pleine essor pour les composites thermoplastiques :

- Le transport (exemple : l'automobile)
- Le bâtiment

Concernant le secteur automobile, il existe deux procédés de production des composites à matrice polymère renforcée par des fibres de chanvre.

- Les composites thermoplastiques injectés, le plus souvent à base de polypropylène PP renforcé par 30% en masse de fibres permettent d'obtenir des pièces de différentes formes comme les accoudoirs, les rétroviseurs ou encore les bouchons de réservoir.
- Les mats non-tissés, mélangeant des fibres de chanvre avec des fibres synthétiques, sont obtenus par thermo formage pour obtenir des pièces d'intérieures pour l'automobile (comme exemple les tableaux de bord, intérieure de portière).

Concernant le secteur du bâtiment, le chanvre est inséré dans une matrice de ciment ou de chaux pour fabriquer des murs ou des blocs isolants. Par contre leurs propriétés mécaniques ne permettent pas de les utiliser pour fabriquer des murs porteurs, ainsi ils sont le plus souvent utilisés comme remplissage des ossatures en bois. Un autre exemple d'application sont les profilés en PVC / chanvre (50 – 50 en masse) pour fabriquer par exemple des encadrements de fenêtres. Dans ce secteur, le chanvre est souvent utilisé pour ses propriétés thermiques. En effet celui-ci est un excellent isolant, il est ainsi utilisé en remplacement des laines de verre. Dans les années et décennies à venir, des pièces plus techniques avec des caractéristiques mécaniques supérieures, pourront être réalisées pour une utilisation dans des systèmes beaucoup plus performants.

Partie III . Caractérisation et comportement mécaniques des fibres de chanvre

III.1 Caractérisations des fibres de chanvre

La caractérisation des fibres naturelles comme le chanvre nécessite une attention particulière. Plusieurs aspects sont à prendre en considération notamment la géométrie de la fibre et la composition chimique qui conduisent à des dispersions importantes des résultats. Dans les premières parties seront présentés des méthodes, outils et particularités applicables à la fois aux fibres unitaires et aux faisceaux. Par le terme fibres sont regroupés les fibres unitaires et les faisceaux. Par la suite, des parties seront dédiées spécifiquement aux faisceaux, fibres unitaires et fils.

III.1.1 Paramètres influençant les propriétés mécaniques des fibres

Les paramètres influençant les caractéristiques mécaniques des fibres de chanvre peuvent être divisés en trois groupes (listés ci-dessous) : les paramètres liés à l'état naturel de la fibre pour lesquels il n'est pas possible d'influer, les paramètres liés aux processus d'obtention de la fibre qui doivent être pris en compte lors de la caractérisation et les paramètres liés aux essais de caractérisation qui doivent être contrôlés.

- **Paramètres liés à l'état naturel de la fibre :**
 - Lieu et condition de culture
 - Taux d'humidité de la fibre
 - Défauts présents dans les fibres (coudes, zones amorphes)
 - Pourcentage de zones cristallines et amorphes
 - Composition chimique des fibres
 - Angle des microfibrilles
 - Diamètre des échantillons et variation du diamètre le long de fibre
 - Densité de la matière (présence de vide dans les fibres)
 - Position de la fibre dans la tige

- **Paramètres liés aux processus d'obtention de la fibre :**
 - Processus d'extraction des fibres
 - Conditionnement (température, taux d'humidité, ...)
- **Paramètres liés à l'essai de traction :**
 - Température d'essai
 - Longueur des fibres testées
 - Vitesse de déformation
 - Type de machine d'essai (rigidité de la machine)

Tous ces paramètres ne peuvent être pris en considération mais nous essaieront de limiter au maximum leur impact sur nos mesures.

III.1.2 Caractérisation physique, et morphologique des fibres

Les propriétés mécaniques des fibres naturelles dépendent de leurs caractéristiques physiques, chimiques et morphologiques comme l'angle micro-fibrillaire, le pourcentage de cellulose, la structure cristalline. Pour déterminer les propriétés mécaniques des fibres, il est nécessaire de réaliser différents tests sur des fibres. Les tests sur des fibres unitaires donnent des résultats différents de ceux caractérisés pour des faisceaux [DUV11]. Concernant les faisceaux, les essais présentent l'avantage d'être rapides et plus faciles à mettre en œuvre. Les résultats des essais sont influencés par différents paramètres (voir liste précédente).

Détermination de la densité des fibres :

La densité est une donnée importante puisqu'elle permet de définir le taux de renfort nécessaire à la résistance et la rigidité du composite final souhaité. La densité est calculée en mesurant le poids, la longueur et le diamètre de plusieurs fibres de longueur supérieure à 300 mm. La fibre est considérée le plus souvent comme étant parfaitement cylindrique. La densité donnée dans la littérature est le plus souvent de l'ordre de 1,4 à 1,7g/cm³.

Dans le cas des fibres textiles, la densité est déterminée par pycnométrie [PRA81]. La méthode par pycnométrie (gaz ou liquide) permet de mesurer le volume de gaz ou

de liquide déplacé par une masse de poudre, permettant ainsi de quantifier la densité d'un matériau poreux. Cette méthode de mesure peut être aussi appliquée aux fibres naturelles. Dans notre cas, les caractéristiques géométriques du chanvre varient en fonction de la position de la section le long du fil. Ainsi il est plus adéquat d'utiliser une densité linéique pour caractériser une fibre de chanvre. De plus, calculer une valeur moyenne de la densité linéaire permet de réduire l'incertitude de mesure d'environ 25 à 15 % pour la contrainte à rupture. L'aire de la section de la fibre peut ainsi être calculée à partir de la densité des fibres de chanvre (g/cm^3) ou de la densité linéaire ($\text{tex} = \text{g}/1000\text{m}$).

Observation morphologique et microstructurale des fibres :

La section des fibres peut être observée en utilisant un microscope électronique à balayage (SEM, Scanning Electron Microscope) ou un microscope optique. Pour les besoins de l'observation au SEM, les échantillons non-conducteurs doivent être recouverts d'une fine couche d'or en pulvérisant le système d'enduction. Cependant une autre solution est une observation SEM dite environnementale qui ne nécessite pas la métallisation des échantillons. Par contre pour réaliser une observation environnementale, les échantillons doivent être déshydratés sans pour autant endommager les échantillons ou détruire leurs structures. Les images SEM permettent de visualiser l'état de surface de la fibre, ses défauts de surface et de forme. Ce type de microscope permet aussi de faire des mesures locales de géométrie assez précises, comparées à des mesures réalisées au microscope optique donnant une erreur de l'ordre de 10-20%.

Détermination de la section des fibres :

La section d'une fibre est un paramètre important lors de la détermination de la résistance à la traction, ainsi l'erreur induite lors du calcul de l'aire de la section se retrouve dans la résistance ultime en traction, le module d'Young ou encore la limite d'élasticité R_e .

La formule (Eq. I-1) est la plus couramment utilisée pour calculer la section S_0 des fibres à section circulaire, en fonction du diamètre d_0 mesuré aléatoirement et localement.

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \quad (\text{Eq. I-1})$$

Cependant, cette formulation est vraie seulement pour des sections circulaires ou quasi-circulaires, ce qui n'est pas le cas des fibres naturelles. Ainsi plus la section présente des défauts de forme plus l'erreur sera importante. Pour réduire cette marge d'erreur, une solution proposée est de calculer la section S_c (Eq. I-2) en fonction de la valeur moyenne de plusieurs diamètres d_c (d_1, d_2, \dots) à différentes orientations formant des angles de 36° (Figure I.16).

$$S_c = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\sum_{n=1}^5 d_c}{5} \right)^2 \quad (\text{Eq. I-2})$$

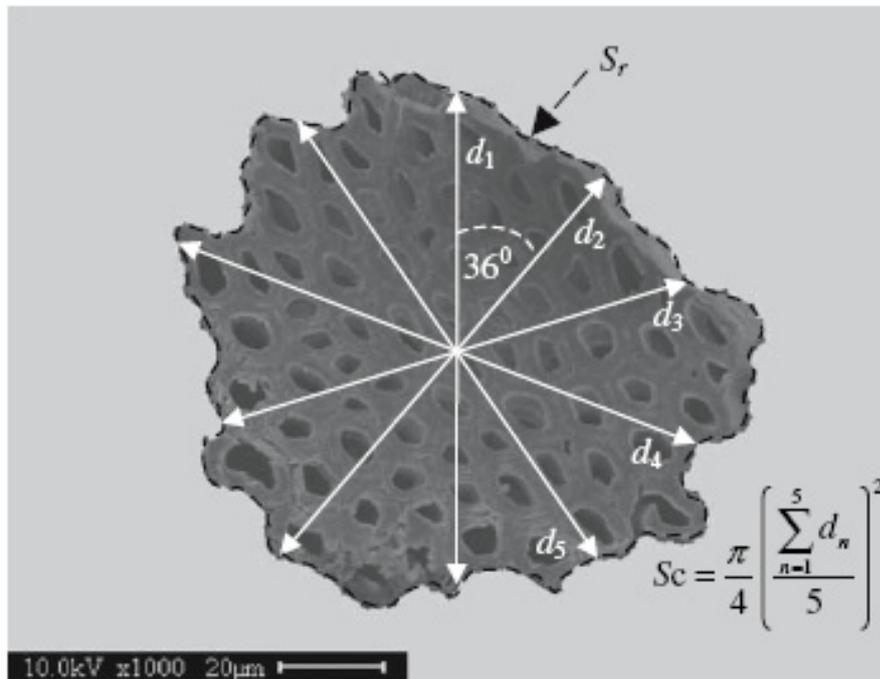


Figure I.16 : Section d'un faisceau de fibres obtenue par microscope électronique à balayage (MEB) [MUN07]

En comparant les valeurs des sections S_c à la section réelle S_r , un coefficient d'erreur noté c (Eq. I-3) peut être déterminé. Ce coefficient définit le rapport entre la section moyenne mesurée avec la section réelle.

$$c = \frac{S_c}{S_r} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\sum_{n=1}^5 d_c}{5} \right)^2}{S_r} \quad (\text{Eq. I-3})$$

Des travaux de recherche montrent que le facteur d'erreur varie entre 0,92 et 0,98, ainsi la section S_c est plus petite de 4 à 8% par rapport à la section réelle S_r (Figure I.18b).

Pour déterminer l'aire de la section d'une fibre il existe aussi trois méthodes de mesure:

- **Light microscopy** (photomicroscopie) : Les microscopes optiques ou numériques permettant d'obtenir des grossissements de la fibre pour lesquels des mesures de géométrie peuvent être réalisés. Connaissant le grossissement imposé et la distance focale, toutes les mesures effectuées sur l'image grossie correspondent à des dimensions à échelle réelle.
- **LASER diffraction** (diffraction LASER) : La méthode par diffraction LASER consiste à projeter un faisceau LASER sur un objet de forme quelconque. Lorsque le faisceau rencontre un l'objet, il est diffracté. La forme de l'objet définit les directions du LASER diffracté. En projetant ces faisceaux dans un plan, il est possible d'obtenir la forme de l'objet grossis. La taille du grossissement dépend de la distance entre le plan focal et l'objet. Un éclairage LASER a l'avantage d'être un faisceau parallèle et monochromatique ainsi l'image projetée est plus nette qu'une image qui serait obtenue par diffraction de la lumière blanche.
- **scanning electron microscopy (SEM)** : La microscopie électronique à balayage SEM (ou « Scanning Electron Microscopy » SEM) est une technique puissante utilisée pour observer des échantillons de très petite taille, de l'ordre d'une dizaine de nanomètres, alors que l'utilisation des microscopes optiques se limite à l'observation de zone d'études de quelques micromètres. Cette capacité d'observation est due à l'utilisation

d'électrons au lieu de photons pour analyser l'échantillon. Ainsi l'image observée n'est pas due à un traitement optique de la lumière incidente ou transmise. Elle est fondée principalement sur la détection des électrons secondaires émergents de la surface sous l'impact d'un très fin pinceau d'électrons primaires qui balaye la surface observée et permet d'obtenir des images avec un pouvoir séparateur souvent inférieur à 5 nm et une grande profondeur de champ. L'échantillon est balayé par un faisceau d'électrons formant une sonde de taille réduite. Sur un écran vidéo, balayé en parfaite synchronisation avec l'échantillon, apparaît un point dont l'intensité lumineuse est proportionnelle au signal détecté. La totalité de l'image est constituée par le balayage complet de la zone observée. Le signal réfléchi résulte de l'interaction du faisceau avec la surface. Un SEM permet d'explorer la surface d'un échantillon afin d'obtenir des informations topographiques et/ou chimiques. Le SEM permettant l'observation d'échantillons micrométriques avec une très bonne résolution, il est possible d'avoir des mesures de dimensions notamment la taille d'une fibre relativement précise.

D'après les auteurs [MUN07], les méthodes par diffraction LASER et par microscopie électronique à balayage (SEM) sont beaucoup plus précises que la photo-microscopie. La différence des diamètres mesurés par la diffraction LASER et par la microscopie électronique à balayage (SEM) est statiquement moins importante (erreur de 10%). Les photographies obtenues par SEM sont prises après que les essais soient effectués car les fibres sont métallisées. De plus la zone dans laquelle est mesurée la section joue un rôle induisant des erreurs de caractérisation. Les fibres naturelles présentent de forte variation de géométrie et de section transversale le long de la fibre. Si on ne tient pas compte de l'intégralité de ces variations, la mesure de section sera faussée.

Une autre étude [ROM04] montre l'écart de la valeur du diamètre des fibres unitaires mesuré à l'aide deux méthodes optiques différentes. Une variation géométrique est constatée le long de la fibre et entre chaque éprouvette, ainsi le diamètre doit être mesuré pour chaque échantillon

(cette constatation est aussi applicable aux faisceaux). Le diamètre est déterminé moyennant une série de mesure effectuée le long de la fibre tout les 2,5 mm en prenant en compte les extrémités. Pour cette étude citée ici, la section des fibres est considérée circulaire. Les diamètres ont été mesurés par microscope optique ou par diffraction de la lumière (light diffraction technique). La méthode par diffraction de la lumière permet de mesurer un grand nombre d'échantillon rapidement mais induit des erreurs. Ainsi les mesures faites par microscope optique donnent des mesures se rapprochant de la géométrie réelle (Tableau I-12).

Tableau I-12 : Diamètres de fibres unitaires de chanvre mesurés par méthode optique [ROM04]

		Diamètre de fibres (μm)	
		$L_0 = 5 \text{ mm}$	$L_0 = 10 \text{ mm}$
Light diffraction technique	Moyenne	23.5	22.0
	Minimum	13.2	11.2
	Maximum	36.5	37.6
	Nombre de fibres	27	40
Optic Microscopy	Moyenne	26.1	23.5
	Minimum	14.2	12.9
	Maximum	42.0	38.8
	Nombre de fibres	27	40

Cette étude a aussi montré que la valeur du diamètre après rupture des fibres est plus faible que la valeur mesurée avant essai (Tableau I-13). La contrainte à rupture étant évaluée à partir de la section de l'éprouvette, si la section considérée pour la détermination des propriétés est approchée, une erreur de caractérisation sera alors introduite. De plus la section diminue au cours de la sollicitation.

Tableau I-13 : Valeur des diamètres mesurés après rupture pour des fibres unitaires de chanvre [ROM04]

		Diamètre de fibres après rupture (μm)	
		$L_0 = 5 \text{ mm}$	$L_0 = 10 \text{ mm}$

Light diffraction technique	Moyenne	23.4	21.0
	Minimum	13.2	13.5
	Maximum	35.5	31.8
	Nombre de fibres	27	40
Optic Microscopy	Moyenne	24.6	20.9
	Minimum	14.2	10.4
	Maximum	34.7	29.6
	Nombre de fibres	27	40

III.1.3 Eprouvettes de traction et essais mécaniques

Les fibres naturelles ont un rapport diamètre sur longueur faible, ainsi des paramètres d'essais adaptés à ce type d'échantillon doivent être utilisés comme une longueur de fibre pas trop grande, une vitesse de sollicitation petite pour décrire avec justesse le comportement mécanique ou encore un système de maintien des fibres dans les mors adaptés permettant une transmission intégrale des efforts sans endommager la fibre.

Les fibres sont collées à une armature en papier coupée en son milieu avec une longueur d'ajournement correspondant à la longueur de jauge. Pour chaque type de fibres un nombre conséquent d'éprouvettes doivent être testées pour obtenir une description statistique des incertitudes de mesures viables. Le diamètre de ces éprouvettes est mesuré à différentes orientations. Ensuite les éprouvettes sont conditionnées pendant une semaine à taux d'humidité relatif de 60% et à une température de 20°C. Après ce conditionnement, le taux d'humidité dans les fibres est de 6 à 8%. La plupart des échantillons sont obtenus par un processus de « décortication » sauf pour les fibres de kénaf, lin et chanvre, obtenus par rouissage.

Les essais de traction des fibres végétales suivent la norme ASTM D 882 et ASTM D 3379-75, préconisant l'utilisation d'une machine de traction standard avec une vitesse d'avance de 1 mm/min. Les éprouvettes qui se sont rompues au niveau des extrémités ne sont pas prises en compte. Pour les tests sur des fibres unitaires, une cellule de force beaucoup plus sensible doit être utilisée, au maximum de 0,5 N alors que pour les faisceaux, une sensibilité de 10N est suffisante. Une méthode de montage spécifique est employée pour permettre le montage, l'alignement et le maintien de la fibre.

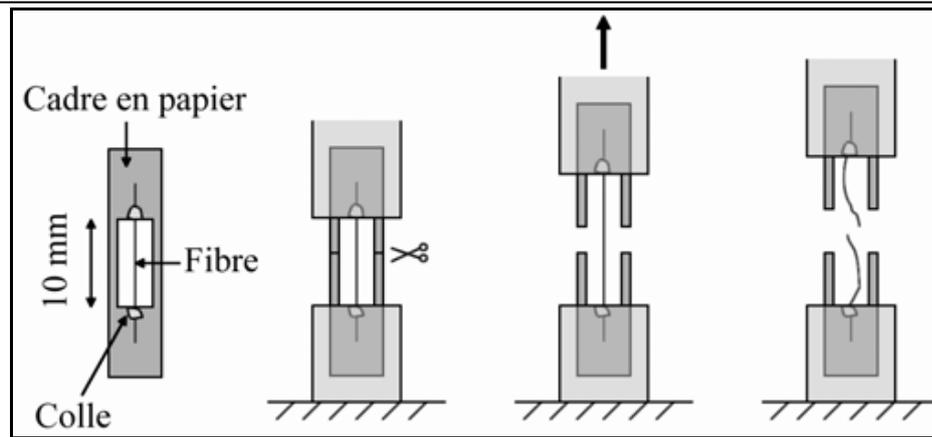


Figure I.17 : Schéma de montage des fibres [CHA07]

Les fibres sont temporairement fixées avec du ruban adhésif sur une feuille percée en son milieu d'un trou de 10 à 20mm (Figure I.17). Ensuite deux points de colle époxy (colle dure avec une rigidité supérieure aux fibres) sont déposés pour maintenir de manière permanente la fibre. Une fois la colle polymérisée, l'éprouvette montée sur la machine d'essai est coupée en son milieu avant essai.

III.2 Propriétés géométriques et mécaniques des faisceaux de chanvre

Les travaux de caractérisation ont permis de déterminer le comportement et les propriétés mécaniques, la géométrie et la morphologie des faisceaux selon les protocoles d'essais décrits précédemment (ASTM D 882 et ASTM D 3379-75).

III.2.1 Diamètre et densité des faisceaux

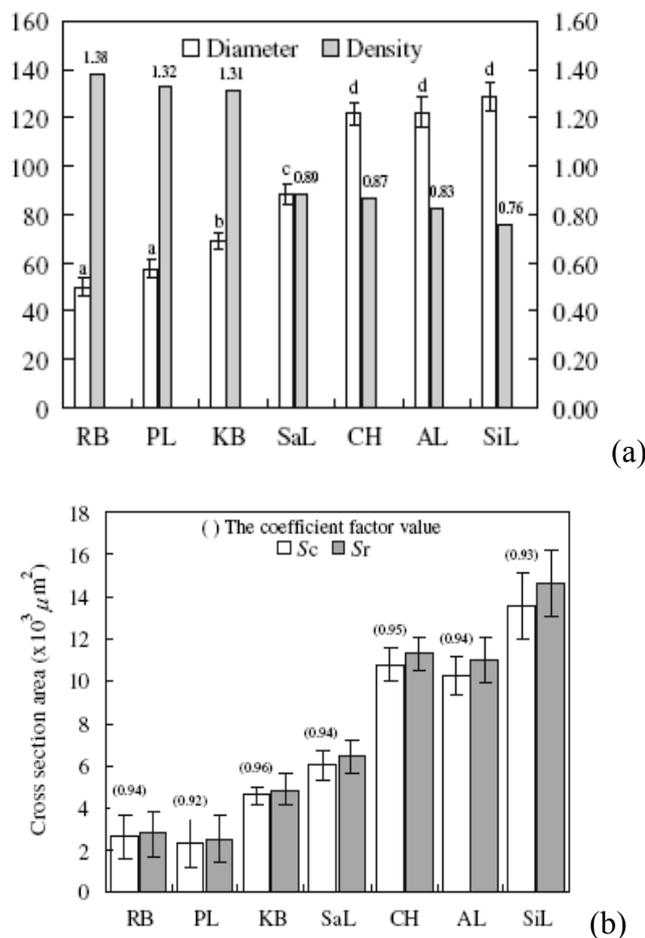
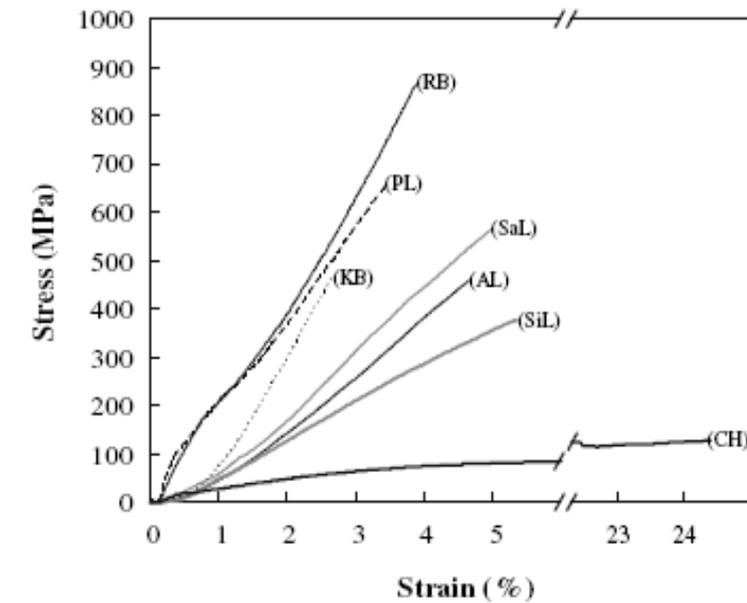


Figure I.18 : Diamètre (μm), densité (g/cm³) (a) et aire de la section transversale (b) pour différentes fibres naturelles [MUN07]

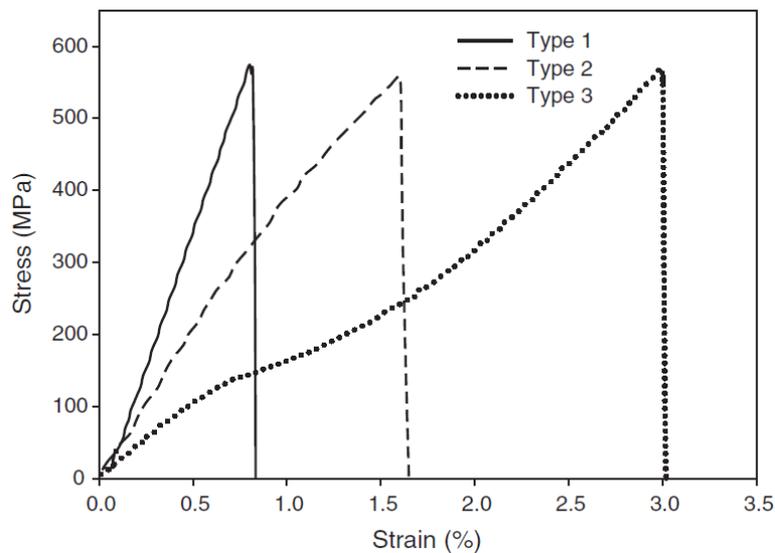
Error bars show 95% confidence intervals of mean diameters. Bars marked with different letters are significantly different by Tukey's test ($P < 0.05$). RB, ramie bast fiber; PL, pineapple leaf fiber; KB, kenaf bast fiber; SaL, sansevieria leaf fiber; CH, coconut husk fiber; AL, abaca leaf fiber; SiL, sisal leaf fiber

Les mesures faites par [MUN07] montrent que la densité des faisceaux diminue avec l'augmentation de la section des faisceaux. Pour les faisceaux, le diamètre commence à 50 μ m et peut atteindre des valeurs supérieures à 150 μ m. La densité des faisceaux naturelles varie de 0,76 pour les fibres d'abaca allant jusqu'à 1,38 g/cm³ pour la ramie (Figure I.18).

III.2.2 Comportement mécanique des faisceaux



(a)



(b)

Figure I.19 : Comportement mécanique pour différents faisceaux de fibres végétales [MUN07] (a) et comportements mécaniques typiques d'un faisceau de chanvre (3 courbes types : types 1 , 2 et 3 [DUV11](b)

Les essais de traction montrent que les faisceaux de fibres naturelles et de chanvre ont un comportement linéaire ou quasi-linéaire en traction (Figure I.19). Cela montre que l'évolution de la force est quasi linéaire à la déformation mettant en évidence le comportement élastique des faisceaux. En début de sollicitation les éprouvettes présentent un comportement non linéaire où la contrainte n'est pas proportionnelle à la déformation, ceci peut s'expliquer par le fait que toutes les fibres qui composent le faisceau ne soient pas tendues avant le début des essais. A mesure que les faisceaux sont mis en tension, la rigidité du faisceau augmente [SOB12].

La Figure I.20 montre que le diamètre du faisceau mesuré a une influence sur la contrainte à rupture ainsi que sur la rigidité des fibres naturelles. Plus le diamètre des fibres est grand, plus les propriétés de celles-ci diminueront [MUN07] et [DUV11].

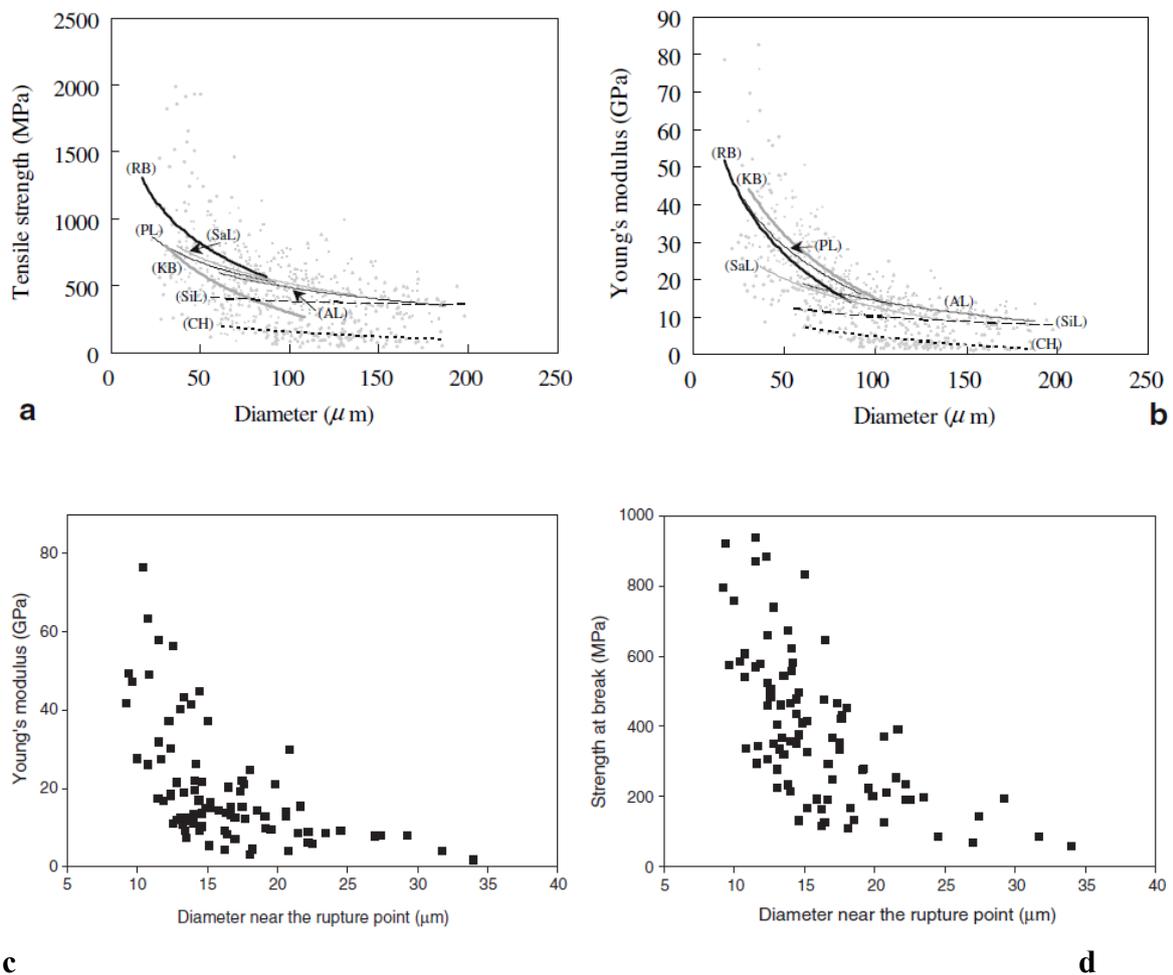


Figure I.20 : Evolution de la contrainte à rupture et de la rigidité pour différentes fibres végétales en fonction du diamètre des faisceaux [MUN07] (a et b) et spécifiquement pour le chanvre [DUV11] (c et d)

III.3 Caractérisation des fils de chanvre

Les fils sont un arrangement d'un grand nombre de fibres tressées. Le tressage est une opération qui consiste à enrouler les fibres par rapport à l'axe du fil dans le but d'obtenir une résistance supérieure à celle de la fibre seule. L'augmentation de la résistance est la conséquence de l'augmentation de la pression de contact entre les fibres qui augmente l'adhérence et la résistance interfaciale.

Les fils de chanvre tressés ont une densité linéique de 46,5 +/- 1,1 et 52,9 +/- 2,5 tex (avec 1 tex = 1g/1000m) [MAD07]. L'avantage des fils textiles est qu'ils sont plus faciles à monter sur une machine d'essais. Ils sont plus faciles à caractériser techniquement. Cependant les mécanismes mis en jeu (interaction, frottement) rendent les interprétations difficiles.

III.3.1 Propriétés physiques des fils de chanvre

Les fibres ont une structure hétérogène, ainsi l'aire de la section varie en fonction de la position le long de la fibre et l'angle d'enroulement des fibres autour de l'axe. Les diamètres mesurés pour les fils de chanvre sont de 220 à 240 μ m. Dans le cas des fils, deux sections sont distinguées : la section apparente (fibre plus espace de vide entre les fibres) et la section absolue (fibres seulement). En comparant ces deux aires, il est possible de déterminer un degré de compacité qui est de 0,65 à 0,86 pour les fils de chanvre. Les fibres libériennes dont les fibres unitaires de chanvre présentent une certaine compacité due à la présence de lumen. Le degré de compacité est étendu car certaines fibres unitaires auront un lumen et d'autres n'auront pas ou peu. Mais si on prend un exemple de fibre unitaire [BOU10], pour une fibre avec un diamètre de 30 μ m qui présente un lumen avec un diamètre de 5 μ m, le degré de compacité serait de 0,16 mais si le lumen a une proportion plus ou moins importante, ce degré serait plus grand ou plus petit. Mais de manière générale le degré de compacité des fibres de chanvre est plus faible que celui des fils. Il a été constaté qu'il existe une relation linéaire entre l'aire totale cumulée de la section et le nombre de fibres (voir Figure I.21). Ceci montre que l'aire moyenne calculée pour les fils ne change pas ou peu en fonction de la position le long de la fibre.

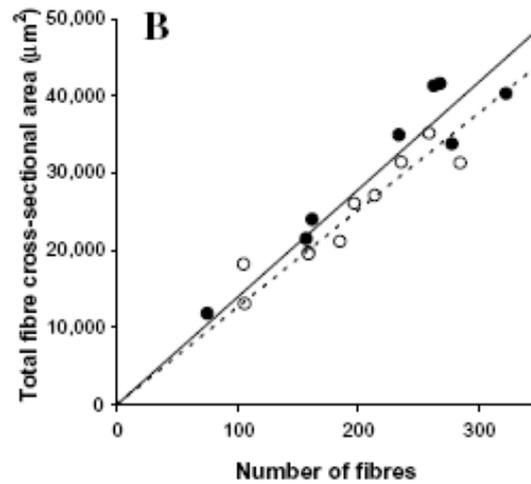


Figure I.21 : Evolution de la section d'un fil de chanvre en fonction du nombre de fibres que contient le fil [MAD07]

III.3.2 Comportement et propriétés mécaniques des fils de chanvre

Le comportement mécanique des fils de chanvre (Figure I.22) montrent la présence d'une forte non-linéarité au début de la sollicitation. La pente de la courbe augmente jusqu'à atteindre une valeur seuil qui représente la rigidité du fil. Il a été constaté que la déformation dans la partie non-linéaire est assez variable entre chaque échantillon. La contrainte maximum relevée au moment de la rupture est en moyenne de 658 ± 98 MPa (46,5 tex) et 481 ± 58 MPa (52,9 tex). La zone linéaire de la courbe de traction peut être expliquée par le fait que la structure du fil a tendance à ne plus être torsadée. Ainsi, un certain déplacement est requis avant que toutes les fibres soit sous tension et commencent à être sollicitées.

Tableau I-14 : Valeurs de différents paramètres mécaniques en fonction de la température d'essai et du taux d'humidité lors du conditionnement [MAD07]

Mechanical properties of the two hemp yarn types

Yarn type	Process temp. (°C)	Conditioning hum. (% RH)	Apparent stiffness (GPa)	Ultimate stress (MPa)	Strain at ultimate stress
He47	None	65	13.2 ± 2.1	658 ± 98	0.059 ± 0.007
	180		14.5 ± 2.5	621 ± 61	0.061 ± 0.009
	200		14.8 ± 2.2	568 ± 56	0.051 ± 0.007
	220		12.0 ± 1.5	572 ± 67	0.057 ± 0.006
He53	None	35	10.6 ± 2.2	481 ± 58	0.064 ± 0.014
		65	9.3 ± 1.3	581 ± 63	0.081 ± 0.009
		85	9.0 ± 1.0	618 ± 54	0.115 ± 0.024
		100 ^a	6.3 ± 0.9	636 ± 95	0.172 ± 0.020

Data are means \pm stdvs. with a sample size of 10. Results in bold are for unprocessed yarn samples conditioned at 65% RH.

^a The yarn samples were submerged in water before testing.

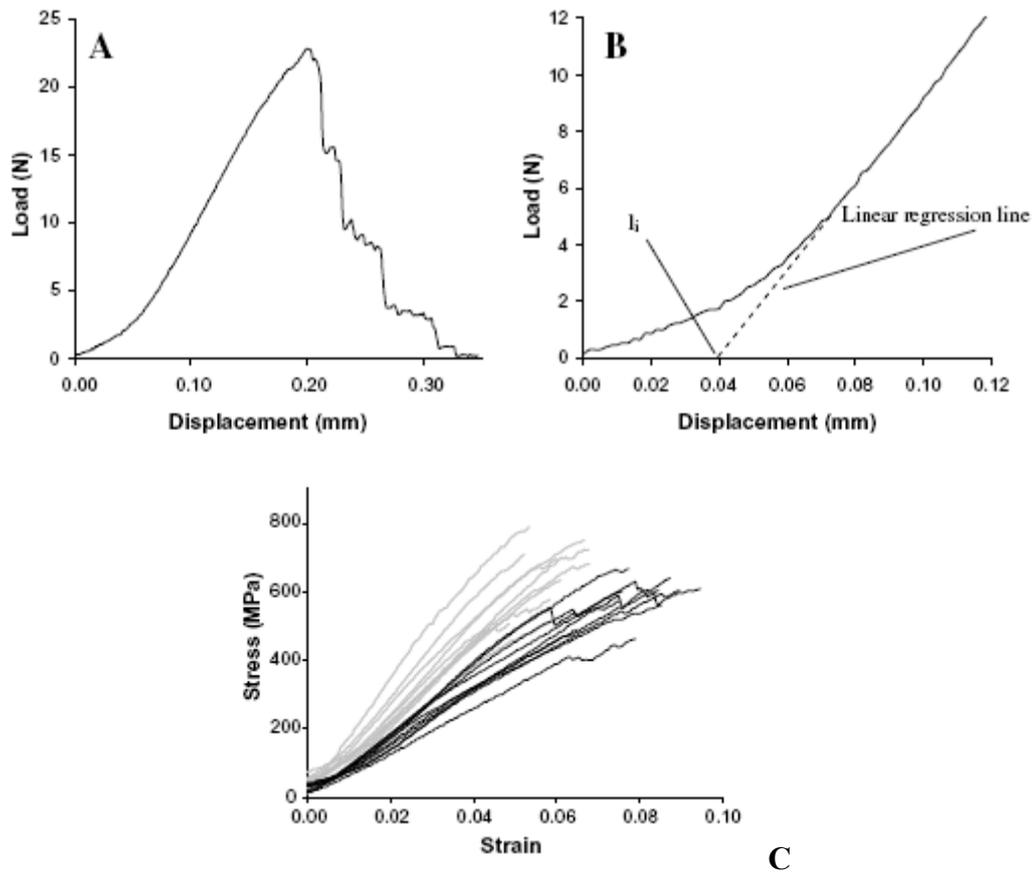


Figure I.22 : Comportement mécanique pour des fils de chanvre : Courbe de traction (A), Grossissement de la courbe de traction montrant le comportement initialement non linéaire et (C) Contrainte – déformation pour des fils avec des densités linéaires respectivement de 46,5 (gris) et 52,9 (noir) tex [MAD07]

La rigidité apparente mesurée des fils de chanvre est de l'ordre de 9 à 15 GPa. Ce qui est beaucoup plus faible que la raideur reportée dans la littérature de l'ordre 25-60 GPa pour les fibres seules (Tableau I-9). La contrainte à rupture comprise entre 580 et 660MPa, est dans l'étendue de mesure moyenne pour des fibres de chanvre de 300 à 900MPa [BER08], [DAS13], [DUV11], [MOH05], [MUN07], [MOY11], [PLA09] et [ROM04]. Une étude complémentaire de Thygesen Anders [THY07] montre l'influence que peut avoir l'utilisation de fils dans les composites. Les résultats de l'étude ont montré que la résistance et la rigidité des composites sont meilleures pour des composites renforcés par des fils (étude réalisée pour le même type de chanvre). De plus, cette étude a permis de vérifier que ce phénomène se répète quelque soit le pourcentage de renfort introduit dans la matrice.

Deux paramètres influencent plus ou moins les caractéristiques mécaniques des fils de chanvre, la température d'essai et le taux d'humidité lors du conditionnement. Il a

été constaté que la température d'essai avait un impact sur la rigidité et la déformation à rupture et la contrainte à rupture qui chute de 658 à 570 MPa pour une température de 220°C (Tableau I-14). Ces résultats corroborent ceux relevés dans la littérature démontrant que les propriétés en traction des fibres naturelles exposées à des variations thermiques, sont diminuées [HO08].

III.4 Caractérisation des fibres unitaires de chanvre

Ces dernières années beaucoup de chercheurs ont orienté leurs travaux de recherche sur la caractérisation des fibres végétales. Les propriétés mécaniques des fibres unitaires étaient encore peu connues, il y a de cela une dizaine d'années. Aujourd'hui des résultats ont été publiés approfondissant les connaissances sur les fibres végétales comme renforts dans les composites. Une série d'essais de traction sur des fibres unitaires de chanvre a été menée mettant en évidence le caractère mécanique de ces fibres [ROM04]. Les essais de traction donnent l'effort nécessaire à la tension de la fibre en fonction du déplacement de la traverse. A partir de la géométrie de l'éprouvette, la contrainte en traction en fonction de la déformation longitudinale est calculée. Le comportement mécanique des fibres unitaires de chanvres est montré sur la Figure I.23.

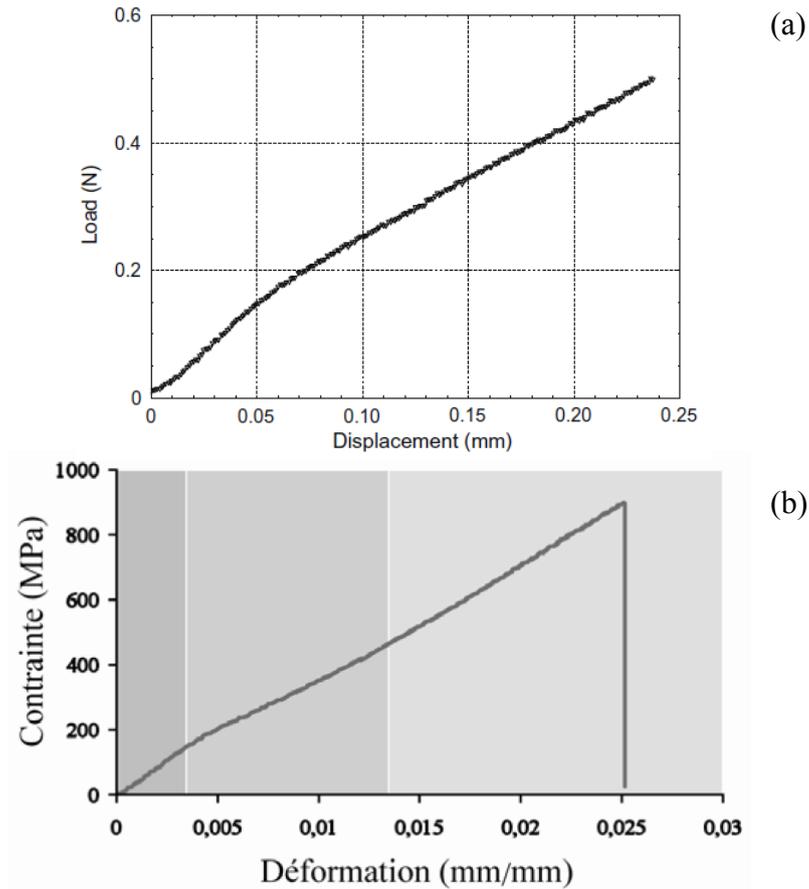


Figure I.23 : Courbes typiques force – déplacement pour les fibres unitaires de chanvre [PLA09] (a) et comportement mécanique d’une fibre unitaires de lin (b)

Trois zones remarquables peuvent être identifiées, une zone où le comportement est non linéaire et deux zones où le comportement est linéaire. Dans la première zone remarquable, l’effort de traction supporté par les fibres varie non linéairement avec le déplacement. Ce comportement est dû au fait que les micro-fibrilles et les zones amorphes ne sont pas parfaitement alignées. La deuxième zone correspond à un comportement visco-élastoplastique de la fibre et dans la troisième celle-ci a un comportement purement élastique. La contrainte à rupture et le module d’Young sont déterminés comme suit :

Contrainte à rupture :

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A_r} \quad (\text{Eq. I-4})$$

Avec F_r la force de traction à rupture en Newton et A_r la section après rupture en mm^2 .

Module d'Young :

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{\Delta F * L_0}{A * \Delta L} \quad (\text{Eq. I-5})$$

Avec $\Delta \sigma$ la variation de contrainte en MPa, $\Delta \varepsilon$ la variation de déplacement, ΔF la variation de l'effort de traction en N, L_0 la longueur de référence en mm, A la section transversale moyenne des fibres en mm² et ΔL la variation de déplacement en mm.

Tableau I-15 : Propriétés mécaniques des fibres unitaires de chanvre [ROM04]

		27 échantillons	
		Contrainte à rupture (en MPa)	Module d'Young (en GPa)
Light diffraction technique	$L_0 = 5 \text{ mm}$	948±403	66±20
	$L_0 = 10 \text{ mm}$	943±498	57±13
Optic Microscopy	$L_0 = 5 \text{ mm}$	1110±409	55±18
	$L_0 = 10 \text{ mm}$	970±502	50±13

Les propriétés mécaniques des éprouvettes dépendent de la longueur de fibre testée. Lorsque la longueur de l'éprouvette augmente, la contrainte à rupture et le module d'Young sont diminués (Tableau I-15).

Un autre paramètre qui influence les propriétés mécaniques est la longueur de la fibre testée (

Tableau I-16). Plus la fibre est longue plus le nombre de défauts contenus dans celle-ci est important, diminuant les propriétés mécaniques. Dans le cas de jute, cette diminution importante est de plus de 20% [THI04].

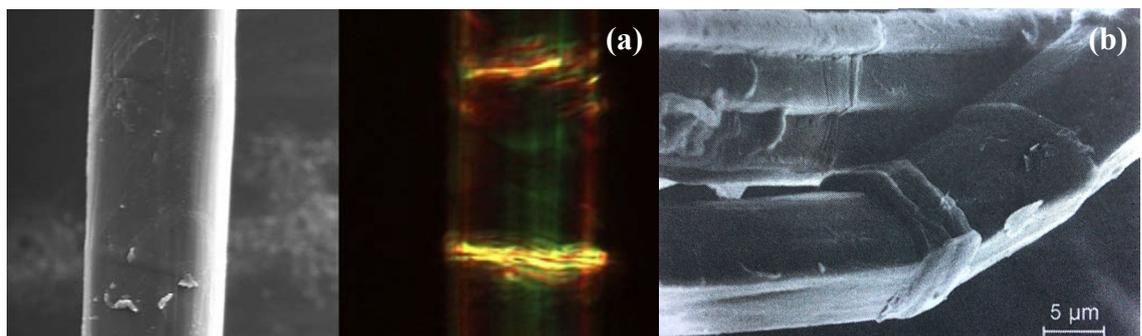
Tableau I-16 : Propriétés mécaniques des fibres de jute pour différentes longueurs de fibres [THI04]

Tensile strength of jute fibres

Gauge length (mm)	Tensile strength \pm SD ^a (MPa)	Specific tensile strength (MPa/g cm ⁻³)
5	770 \pm 243	550
10	629 \pm 228	449
15	610 \pm 198	436
20	582 \pm 223	416

^a SD, standard deviation.*III.4.1 Les défauts naturels dans les fibres*

Les défauts naturels existent sous deux formes : (i) défauts structuraux (dislocations) et (ii) les défauts de forme (coudes et nœuds). Les défauts de forme sont visibles à l'échelle microscopique alors que les défauts structuraux peuvent être visibles sous une lumière polarisée (Figure I.24). A travers ces nombreux travaux, Thygesen [THY05, THY06 et THY08-1] a quantifié les dislocations et montré la variabilité de la taille de ces défauts, qui présentent une forte variation de leur longueur et de leur nombre. De plus ces défauts se répètent à un intervalle donné déterminé par les méthodes optiques.



(a) dislocation, image extraite des travaux de Thygesen [THY06] et (b) nœud : photographie de Lampke T. Technische Universität Chemnitz, 2001, p.64

Figure I.24 : Défauts naturels (dislocations et nœuds) des fibres végétales*III.4.2 Conditions de culture des plantes et impact sur les fibres*

Lors de leur culture, les plantes sont soumises aux aléas climatiques et aux conditions de culture. Le plus souvent ces conditions ne peuvent être contrôlées et diffèrent d'une année à l'autre. Les dislocations se forment dans le chanvre de manière naturelle sans être forcément soumis à des conditions spécifiques et extrêmes. Cependant des extra-dislocations peuvent se former causées par une exposition répétée à des conditions venteuses et de sécheresse [THY08-2]. La taille maximum des dislocations est alors agrandie alors que la distance entre les défauts diminue. Ayant pour principale conséquence, la diminution de la résistance mécanique des fibres [AND09]. La densité des défauts contenue dans la fibre change aussi les propriétés mécaniques, notamment la résistance mécanique [BAL04].

La date et l'année de récolte jouent aussi un rôle, si la plante est récoltée à maturité ou non, les cellules fibreuses n'auront pas la même morphologie et probablement pas les mêmes propriétés mécaniques. Les études de Schäfer [SCH06] montrent que la hauteur et le diamètre de la tige ne sont pas les mêmes entre du chanvre récolté en 1998 et 1999 et entre du chanvre récolté à maturité ou non. Cette différence se constate aussi pour la cellule unitaire pour laquelle la section transversale n'est pas la même. De plus cette étude montre que la géométrie de la fibre est aussi impactée par la densité de semis.

III.4.3 Localisation et géométrie de la fibre dans la plante

La partie fibreuse où sont extraites les fibres n'est pas homogène dans l'ensemble de la plante. La localisation dans la plante de chanvre a un impact sur les propriétés mécaniques de la fibre [CHA09]. La contrainte et la déformation à rupture et le module d'Young changent en fonction de la position de la fibre dans la plante. Les fibres provenant de la partie centrale de la plante ont une meilleure résistance et une rigidité plus élevée que les fibres extraites du haut et du bas de la plante. La morphologie des fibres aussi change. Les fibres ayant les plus petits diamètres se trouvent dans la partie basse de la tige pour des diamètres de cellules inférieures à 15 μm et pour des diamètres supérieurs à 15 μm , la tendance inverse est constatée. La considération et la justesse avec laquelle la section transversale est déterminée influence sur les propriétés mécaniques caractérisées [THO11], induisant des erreurs non-négligeables sur l'analyse des caractéristiques mécaniques.

III.4.4 Propriétés d'absorption d'humidité des fibres unitaires

Pour les fibres naturelles, il a été montré que la capacité d'absorption de l'humidité dépend de la distribution de la masse et des composants de la paroi cellulaire [FAR12] [ROU12] [WAN09]. Dans les fibres de chanvre, le composant qui a la plus grande capacité d'absorption est l'hémicellulose suivie de la cellulose et de la lignine. Ainsi une forte présence de cellulose et une faible contenance d'hémicellulose dans les fibres de chanvre explique ce comportement hydrophile.

Les agro-composites par contre gardent une certaine stabilité dimensionnelle et hydromécanique car les fibres ne sont pas toutes en contact avec l'eau, le polymère protège les fibres de l'humidité.

La Figure I.25 montre que plus l'humidité relative de conditionnement augmente, plus les échantillons absorbent de l'eau. De plus, après un certain temps de conditionnement (à partir de 300min) la masse normalisée de la fibre tend vers une valeur seuil, ainsi la prise en eau des fibres unitaires n'est pas infinie dans le temps. Certains problèmes se posent notamment lors de la fabrication de l'agro-composite mais aussi pour l'utilisation des fibres végétales et de chanvre dans un environnement fortement humide.

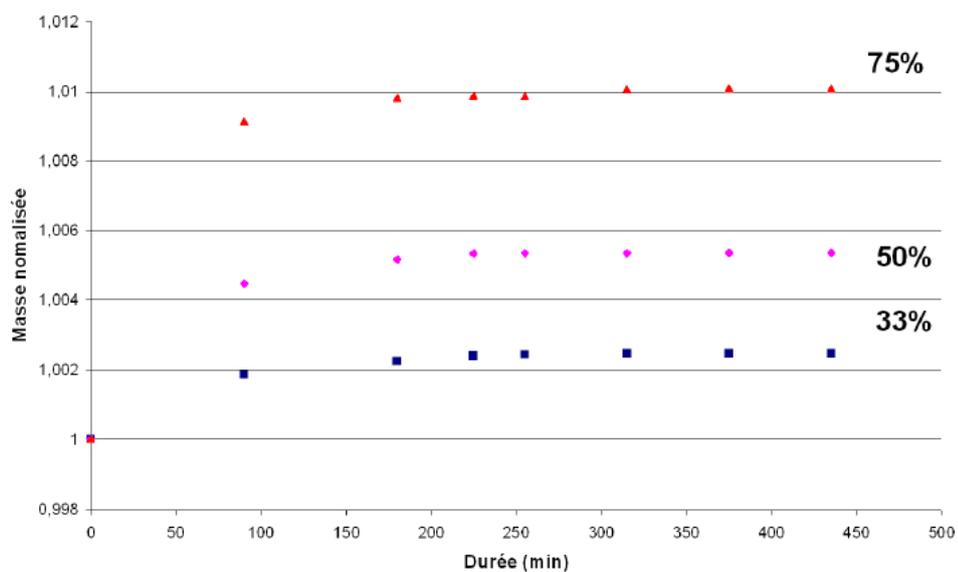


Figure I.25 : Masse normalisée tenant compte de la teneur en eau des fibres unitaires de lin à différents taux de conditionnement [ROU12]

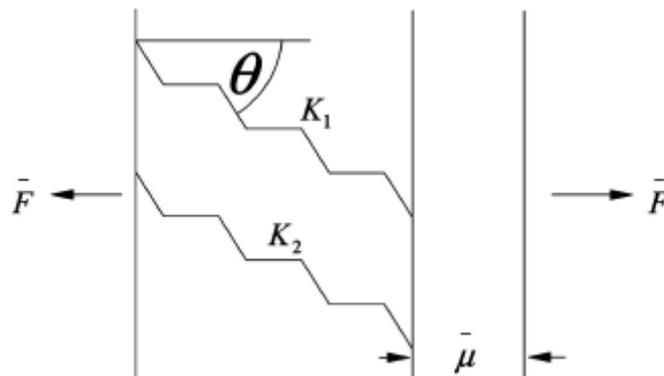
III.5 Modélisation du comportement des fibres de chanvre

Certains comportements mécaniques des fibres naturelles comme le comportement élastique à l'échelle micro-fibrillaire ont été modélisés, les travaux de Charlet sur le lin en montre un exemple [CHA07]. Il existe une relation entre l'angle micro-fibrillaire et le module d'Young des fibres. La rigidité des fibres est influencée par l'angle d'enroulement des fibres cristallines (θ) et la concentration des zones non-cristallines (zone amorphe) dans les fibres. La variation de l'angle des micro-fibrilles affectent les propriétés mécaniques des fibres notamment les propriétés en traction.

La théorie, extraite des travaux de Bodig and Jayne [BOD82], présentée ci-après permet d'estimer la raideur des fibres végétales (Figure I.26). Cette théorie se base sur l'hypothèse que les déformations sont uniformes. La rigidité est modélisée par un ensemble de ressorts liés entre eux parallèlement recevant ainsi le même déplacement causé par l'application d'un effort F défini comme un ensemble de force engendrant le déplacement :

$$F = F_c + F_{nc} \quad (\text{Eq. I-6})$$

Avec F_c représente les forces appliquées sur la zone cristalline et F_{nc} les forces appliquées sur la zone non-cristalline de la fibre.



K_1 et K_2 sont les rigidités respectives des fibrilles 1 et 2

Figure I.26 : Schématisation du comportement élastique des fibrilles de la deuxième paroi cellulaire [BOD82]

La raideur est alors équivalente à :

$$k = \frac{F}{u} = \frac{F_c + F_{nc}}{u} = \sum k_i \quad (\text{Eq. I-7})$$

Les micro-fibrilles sont orientées d'un angle θ correspondant à l'enroulement des micro-fibrilles autour de l'axe de la fibre suivant à la direction de la force F . Les efforts qui apparaissent dans chaque ressort sont obtenus en faisant le produit des raideurs et de la composante du déplacement qui est parallèle à l'orientation des micro-fibrilles.

$$\overline{F}_i = k_i \cdot \overline{u} \cdot \cos \theta_i \quad (\text{Eq. I-8})$$

La force totale appliquée dans l'axe de la fibre nécessaire pour engendrer un déplacement est la somme des forces longitudinales appliquées sur chaque zone cristalline.

$$\overline{F} = \sum F_i \cdot \cos \theta_i \quad (\text{Eq. I-9})$$

Soit,

$$\overline{F} = \overline{u} \cdot \sum K_i \cdot \cos^2 \theta_i \quad (\text{Eq. I-10})$$

Ainsi la raideur total du système dans l'axe de la fibre est donnée par :

$$\overline{k} = \sum K_i \cdot \cos^2 \theta_i \quad (\text{Eq. I-11})$$

Ou encore :

$$E_F = E_S \cdot \cos^2 \theta \quad (\text{Eq. I-12})$$

Avec, E_F la rigidité totale de la fibre et E_S la rigidité des micro-fibrilles.

En considérant que la fibre soit composée d'une partie cristalline et d'une partie non-cristalline, la rigidité effective peut être calculée en utilisant la loi des mélanges, soit :

$$E_F = V_c E_c \cdot \cos^2 \theta + V_{nc} E_{nc} \quad (\text{Eq. I-13})$$

Kulkarni [KUL83] a relevé un module d'élasticité de la zone cristalline et non-cristalline respectivement de 45 GPa et 3 GPa. Des vérifications de cette modélisation ont été faites pour des fibres végétales de bananes, les résultats obtenus avec le modèle et ceux mesurés expérimentalement correspondent parfaitement.

Partie IV . Les agro-composites à base polymère renforcés par des fibres naturelles comme matériaux techniques

Les fibres détaillées précédemment sont utilisées comme renfort dans les composites. L'utilisation de ces fibres pour la fabrication de matériaux présente un avantage écologique et économique certain [JOS04]. Les agro-matériaux sont moins coûteux pour l'environnement que les matériaux métalliques et synthétiques traditionnels (Tableau I-17). Cependant utiliser ces fibres pour remplacer les fibres de verre ou de carbone est une question d'actualité.

Tableau I-17 : Coût en énergie non renouvelable pour la fabrication de fibre de verre et de lin [JOS04]

Nonrenewable energy requirements (MJ/kg)			
Glass fiber mat ^a		Flax fiber mat ^a	
Raw materials	1.7	Seed production	0.05
Mixture	1.0	Fertilizers	1.0
Transport	1.6	Transport	0.9
Melting	21.5	Cultivation	2.0
Spinning	5.9	Fiber separation	2.7
Mat production	23.0	Mat production	2.9
Total	54.7	Total	9.55

^a données extraites de [JOS04] qui a repris les résultats de [DIE99], le taux de fibres est de 30% en masse.

Est-ce les fibres végétales peuvent remplacer les fibres de verre et être utilisées dans la fabrication de pièces mécaniques et industrielles ? Cette question a été posée par [BAL04-2], [BOD07], [FAR12], [LIL00], [PLA09-2] et [WAM03]. Pour y répondre des études ont été menées pour caractériser et déterminer les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des agro-composites.

IV.1 Propriétés mécaniques des agro-composites PP – fibres végétales

Des essais de caractérisation en traction et en flexion des composites bio-sourcés assemblant du polypropylène avec des fibres végétales montrent le pouvoir renforçant des fibres. Comme le montre le graphique suivant (Figure I.27 et Figure I.28), hormis la fibre de coco, la résistance mécanique et le module d'élasticité du composite sont supérieurs à ceux du polypropylène seul (Tableau III-6 et Figure I.28). Par exemple pour le chanvre, la résistance en traction est de l'ordre de 50MPa et le module d'élasticité en traction est de 7GPa. Soit une résistance multipliée par deux et un module d'élasticité multiplié par 6 pour un taux de fibres de 40% en masse. D'autres études ont fait état de ces caractéristiques mécaniques [AZW13] et [SOB12].

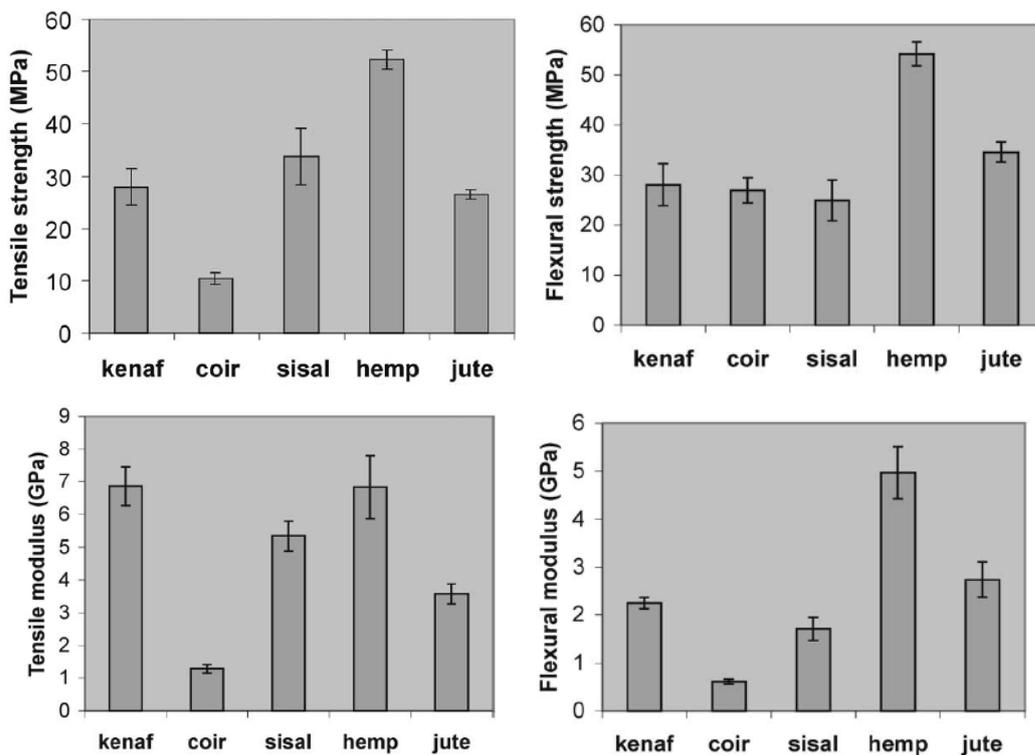


Figure I.27 : Propriétés mécaniques d'agro-composites polypropylène renforcés par 40% en masse de fibres végétales de différentes natures [WAM03]

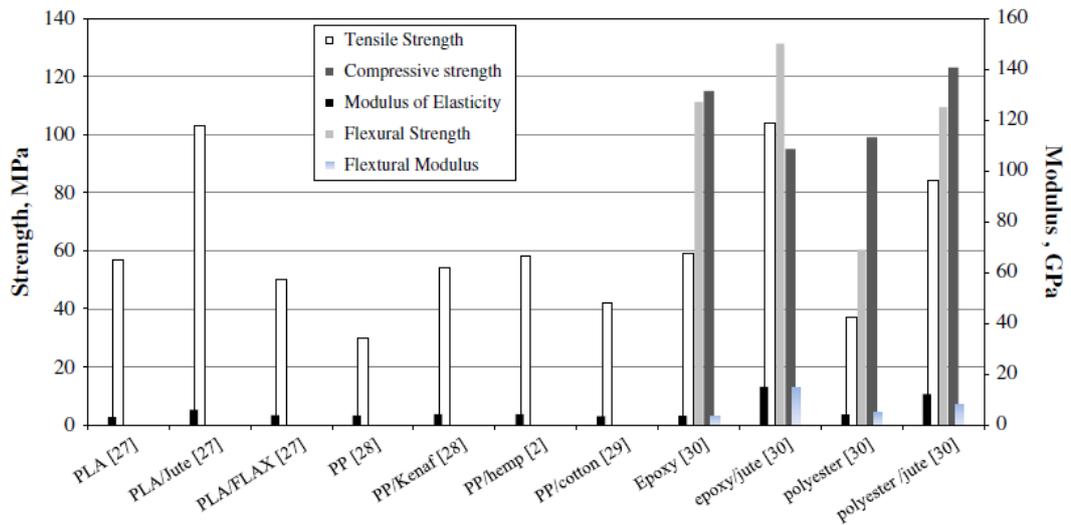


Figure I.28: Résistances mécaniques et modules d'élasticité pour différents agro-composites [SHA13]

Comme le montre la Figure I.28, ce pouvoir renforçant est généralisé à d'autres matrices comme le PLA, l'époxy ou encore le polyester. La résistance mécanique en flexion et en traction est multipliée et le module d'élasticité est aussi amélioré même si l'augmentation est moins significative.

IV.2 Influence du taux de fibres dans les agro-composites

Les propriétés des agro-composites ou des composites renforcés par des fibres de verre ou de carbone dépendent du taux de renfort. La contrainte à rupture et le module d'élasticité en traction augmentent lorsque le taux de renfort est plus important. Le seuil maximum de renfort est environ de 50%, après ce seuil la contrainte et le module n'augmentent plus et suivent une asymptote horizontale.

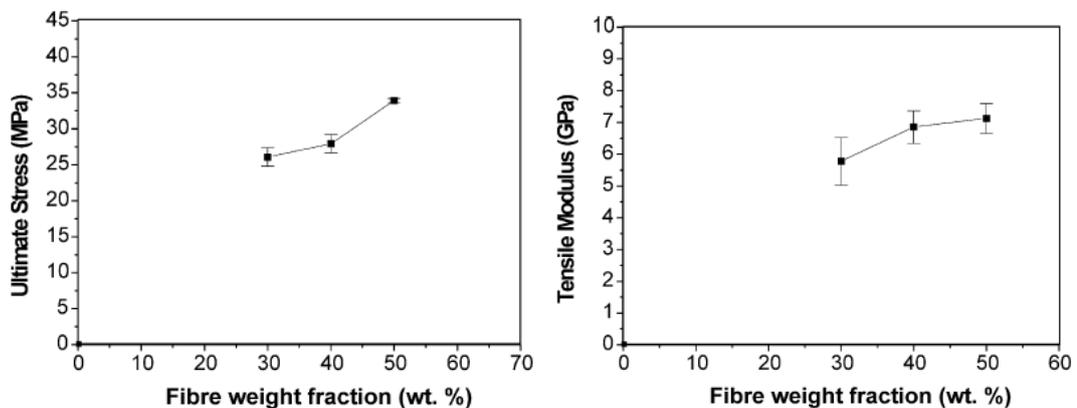


Figure I.29 : Propriétés mécaniques d'un agro-composite en fonction du pourcentage massique de renfort (fibre de kenaf) [WAM01]

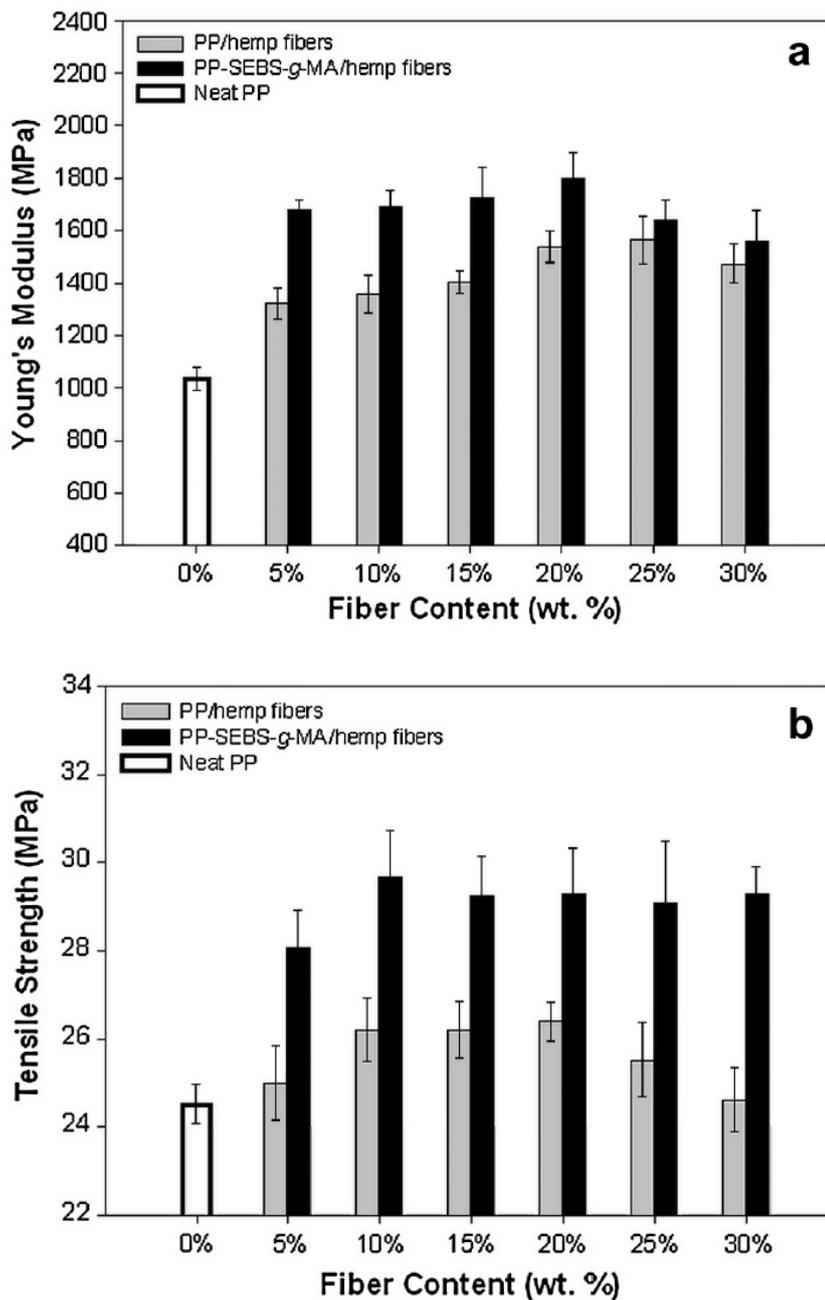


Figure I.30 : Propriétés mécaniques d'un agro-composite en fonction du pourcentage massique de renfort (fibre de chanvre) [ELK13]

Comme le montre la Figure I.30, le pourcentage de fibre injecté dans le polypropylène influence les propriétés mécaniques. [ELK13] a montré qu'augmenter le pourcentage améliore les propriétés mécaniques. Dans ce cas là, à partir de 20% les propriétés tendent à être stables même à diminuer comme pour la résistance en traction qui chute pour un taux de renfort massique supérieur à 20%.

IV.3 Influence de l'orientation des fibres dans la matrice

La plupart des agro-composites sont renforcés par des fibres courtes réparties aléatoirement ayant des propriétés relativement identiques quelle que soit la direction d'étude. Cependant certains agro-composites avec une orientation de fibre préférentielle, ou renforcés des fibres tissées ou filées (fibres pour lesquelles les fibres courtes ou longues sont filées pour obtenir un fil plus homogène et avec une meilleure résistance à la traction), présentent des propriétés mécaniques anisotropes qui dépendent de l'orientation des fibres. Une étude de Herrera-Franco [HER04] réalisée sur un composite polyéthylène (HDPE) avec des fibres de « henequen » fibres de sisal, montre l'influence de l'orientation des fibres sur ces propriétés mécaniques. Cette étude a montré le pouvoir renforçant maximum des fibres dans la direction longitudinale (fibres s'orientant dans le sens d'écoulement de l'injection ou sont positionnées dans une direction préférentielle) et quasiment négligeable dans le sens transversal (Figure I.31).

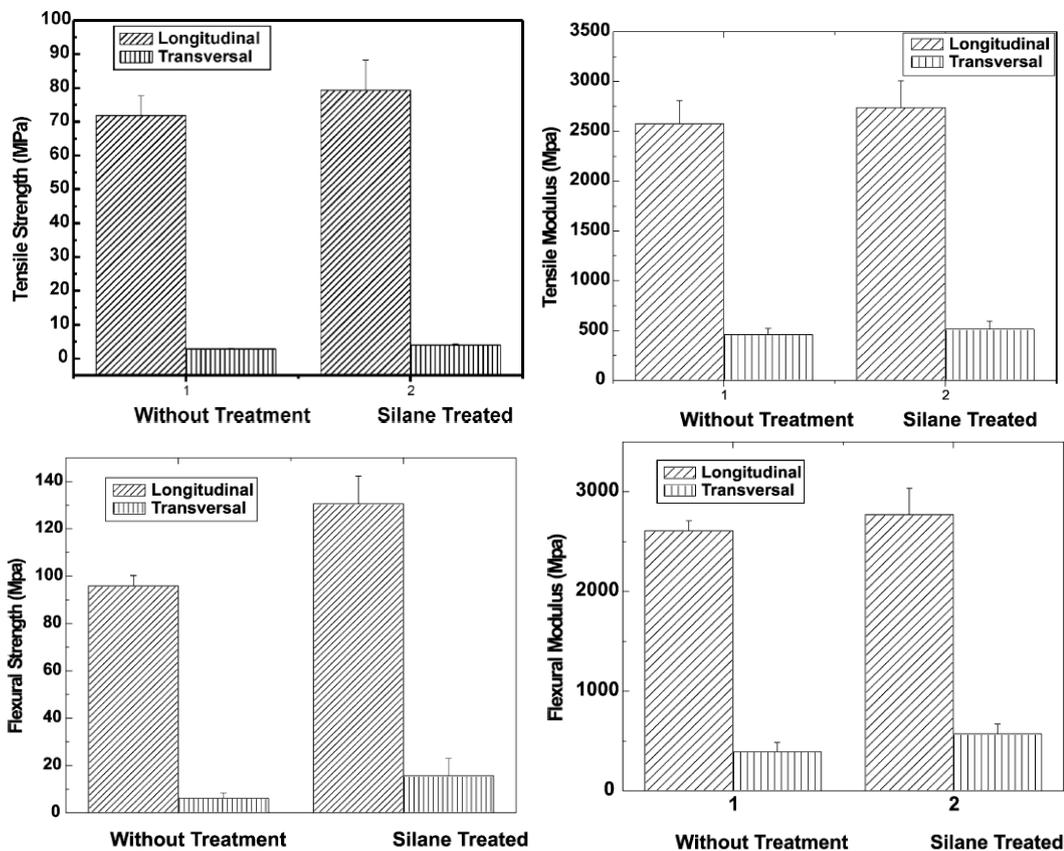
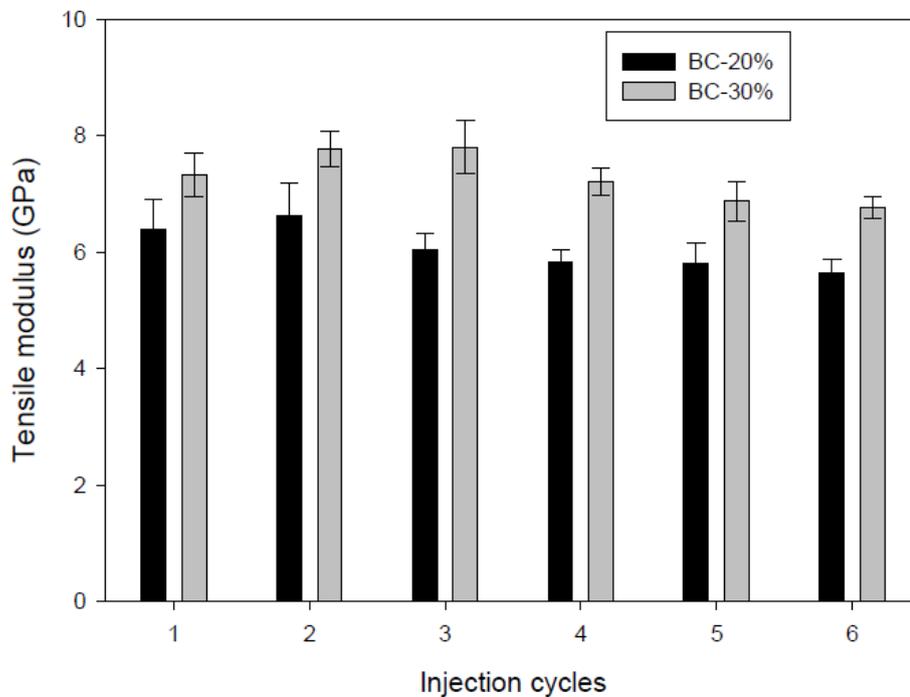


Figure I.31 : Propriétés mécaniques longitudinale et transversale d'un agro-composite polyéthylène (HDPE) avec des fibres "henequen" (46wt%) [HER04]

IV.4 Recyclabilité des agro-composites

Les agro-composites ont la particularité d'être facile à recycler par un processus de broyage et de compoundage suivi par une réinjection. Différentes études d'Antoine le Duigou [DUI08] montrent la recyclabilité des agro-matériaux après plusieurs cycles de recyclage. Une étude, dont les résultats sont montrés ci-après met en évidence l'impact des cycles de recyclage sur les propriétés d'un biocomposite lin / PLA poly(l-lactide). Le module d'Young est peu impacté par les cycles de recyclage. A l'inverse la contrainte à rupture est diminuée par deux voire trois après six cycles de recyclage. Le recyclage a pour conséquence le broyage des fibres. Les fibres injectées sont des fibres courtes, ainsi après broyage l'apport de rigidité par les fibres broyées change peu. Par contre le broyage répété et le re-compoundage a pour effet d'altérer l'interface existante entre les fibres et la matrice, diminuant la cohésion fibre / matrice. De ce fait la résistance à la rupture après plusieurs cycles de recyclage chute pour tendre vers la résistance de la matrice seule [SAT09].



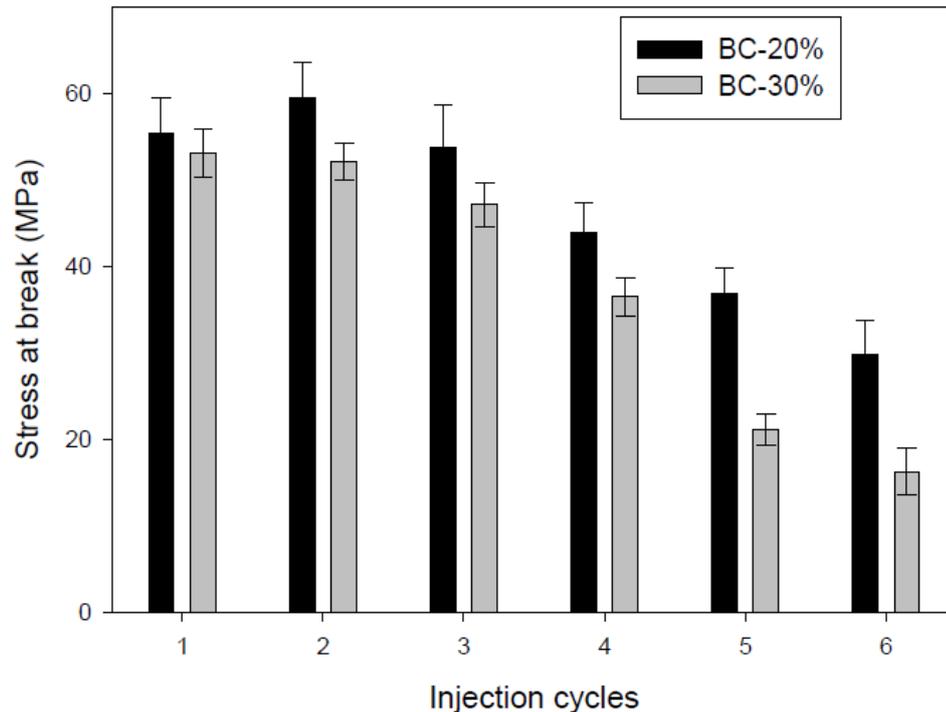
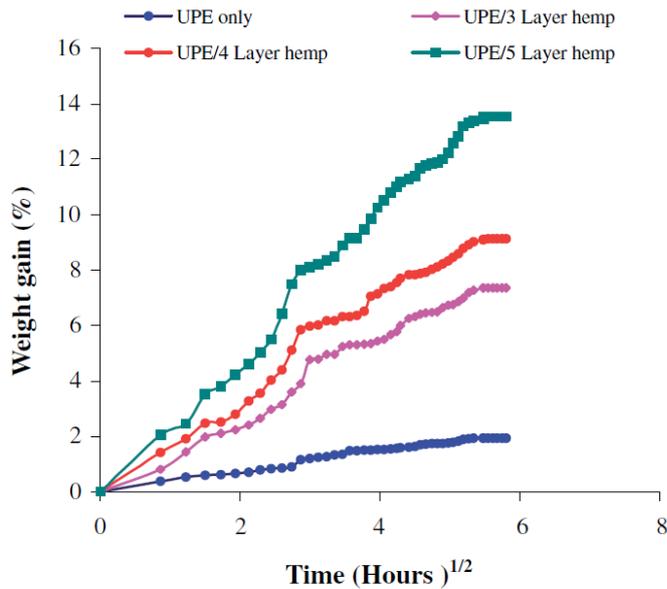


Figure I.32 : Propriétés mécaniques des agro-composites PLA/lin à 20% et 30% pour plusieurs cycles de recyclage [DUI08]

IV.5 Propriétés d'absorption d'humidité des agro-composites

De part leur nature végétale, les fibres naturelles sont hydrophiles. Des études [ATH09] ont cherché à savoir si cette propriété était répercutée sur les composites ou si elle était estompée par l'injection des fibres dans la matrice. [DHA06] a montré l'effet d'absorption d'eau sur les propriétés mécaniques d'un composite polyester insaturé avec des fibres de chanvre. La Figure I.33 montre le gain en poids d'un agro-composite soumis à un milieu environnement humide. Ce gain en poids est quantifié en mesurant le pourcentage d'augmentation massique d'un volume de composite donné par rapport à sa masse initiale dans le temps soumis à un environnement humide. Plus le temps augmente, plus le gain en masse sera important. Pour un temps d'absorption identique, l'agro-composite absorbe beaucoup plus d'eau que le polyester seul. L'impact de l'humidité est de plus amplifié à haute température causé par une dégradation par absorption d'eau plus significative. L'exposition des bio-composites à l'humidité a pour conséquence une chute des propriétés en traction et flexion causée par une dégradation de l'interface fibre-matrice.

La Figure I.34 met en évidence l'influence des propriétés d'absorption des agro-composites (cas du polyester/chanvre) avec des taux de fibres différents sur la résistance mécanique. Les composites avec un taux de 15 et 20% et qui sont soumis à un environnement humide perdent de leur résistance mécanique. A l'inverse pour des taux de 10 et 25%, la résistance est plus importante. Ceci démontre que le comportement hydrophile des fibres influence le comportement des agro-composites dans un environnement humide.



Composite renforcé par différentes couches de renforts, les exemples présentés ci-dessus montrent des composites polyester/chanvre avec 3, 4 et 5 couches.

Figure I.33 : Gain en poids en fonction du temps d'absorption [DHA06]

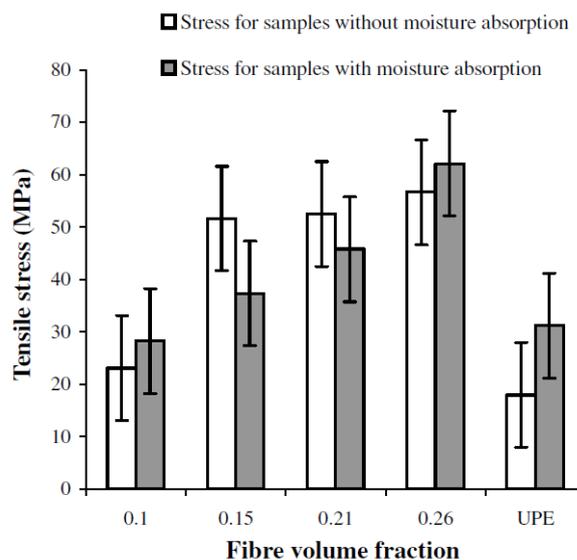


Figure I.34 : Résistance en traction en fonction de la fraction volumique de fibres de chanvre avec et sans absorption d'eau [DHA06]

IV.6 Impact de la température d'injection sur l'agro-composite

Les fibres végétales étant composées essentiellement de cellulose, leur résistance à des températures élevées est faible. La cellulose se dégrade fortement à 200-230°C. Mais les fibres perdent leur propriétés mécaniques notamment leur rigidité à des températures beaucoup plus faibles de l'ordre 50°C [HO08]. Ainsi les processus de mise en forme des composites réalisés à plus de 150°C peuvent influencer les propriétés des agro-composites. Les fibres de lin après injection ont un module d'élasticité deux fois inférieur à celui de la fibre avant injection [BOU10] (Tableau I-18).

Tableau I-18 : Module de traction et dureté de fibres de lin avant et après processus de mise en forme [BOU10]

Materials	Number of indents	Longitudinal modulus E_L (GPa)	Hardness H (MPa)
Epoxy matrix	49	3.24 ± 0.11	157 ± 13
PLLA matrix	49	4.86 ± 0.22	289 ± 24
Virgin Hermes fibres	304	18.4 ± 1.9	527 ± 79
Hermes fibres after film stacking	368	12.65 ± 1.3	280 ± 46
Hermes fibres after injection moulding	241	9.78 ± 2.37	246 ± 82

IV.7 Conclusion

Cette première partie a mis en avant une partie des travaux réalisés jusqu'à aujourd'hui dans le domaine des agro-composites polypropylène renforcés par des fibres de chanvre. Un premier chapitre a présenté les agro-composites dans un contexte général. Un deuxième chapitre a été dédié aux fibres naturelles et aux fibres de chanvre, décrivant leurs particularités morphologiques, leurs constitutions et leurs particularités spécifiques pour une utilisation comme renforts. Un troisième chapitre était dédié au comportement et aux propriétés mécaniques des fibres de chanvre (fibres unitaires, faisceaux et fils), cette partie avait pour objectif de synthétiser de manière non exhaustive, la littérature étant assez étendue sur ce sujet, les différentes connaissances sur la caractérisation et le comportement mécanique. Le dernier chapitre traite les particularités propres aux agro-composites PP – Chanvre.

Cette synthèse bibliographique a montré la capacité des fibres végétales de chanvre à être utilisées comme matériau ou comme renfort dans les composites pour diverses applications allant de l'utilisation comme matériaux de construction, ou encore comme matériaux pour la fabrication de pièces industrielles.

Leur coût à la fois économique qui est très faible et environnemental qui a peu d'impact sur l'environnement est un avantage pour vouloir les utiliser à l'avenir à grande échelle.

De plus la fibre végétale a des propriétés mécaniques, chimiques et physiques intéressantes. Sa résistance mécanique et sa rigidité permettent de l'utiliser pour renforcer des pièces polymères. Leur tenue thermique et leur pouvoir isolant sont appréciés pour être utilisés dans le bâtiment.

Une autre particularité des fibres de chanvre est leurs facilités à les transformer et à les mettre en œuvre ne nécessitant dans la majorité des cas aucun processus chimique lourd comme c'est le cas avec des matériaux synthétisés. Cependant leur hydrophilie et leur faible tenue à un environnement humide ou très sec sont des inconvénients majeurs dont faut tenir compte.

Des études ont montré la capacité à employer ces fibres comme renfort dans les agro-composites. Cependant pour pouvoir implanter et optimiser leur utilisation, il est nécessaire de se poser certaines questions comme par exemple comment déterminer au plus juste les propriétés optimales des fibres ?, ou encore quels sont les facteurs qui peuvent dégrader ou améliorer ces propriétés ?

D'autres questionnements sont à poser concernant le comportement des fibres injectées dans un agro-composite, la nature du pouvoir renforçant des fibres en fonction de leur variété et de la culture de celles-ci, le comportement local et leur rupture.

De plus pour pouvoir permettre l'utilisation de ces fibres, il est nécessaire de déterminer des modèles de prédiction précis pour permettre aux ingénieurs et industriels d'intégrer ces matériaux dans la recherche et le développement de produits existants ou nouveaux.

Les travaux de cette thèse présentés par la suite ont pour but d'apporter certains éléments de réponse.

CHAPITRE II : Comportement mécanique des fibres de chanvre

CHAPITRE II : COMPORTEMENT MECANIQUE DES FIBRES DE CHANVRE	78
<i>Partie I. Matériaux et méthodes</i>	80
I.1 Les matériaux	80
I.1.1 Fibres de chanvre	80
I.1.2 Les agro-composites PP – chanvre	81
I.2 Les processus de fabrication des agro-composites	82
I.2.1 Processus de fabrication du PEP	82
I.2.2 Processus de fabrication de l'IFTS	83
I.3 Les méthodes de caractérisation.....	84
I.3.1 Echantillons de caractérisation des fibres de chanvre	84
I.3.2 Essai de traction des fibres de chanvre	86
I.3.3 Essai de caractérisation en traction des agro-composites.....	87
I.3.4 Essai de caractérisation en flexion des agro-composites.....	89
<i>Partie II. Méthode de caractérisation géométrique des fibres de chanvre</i>	91
<i>Partie III. Comportement mécanique des fibres de chanvre</i>	98
III.1 Caractérisation du comportement mécanique des fibres unitaires.....	98
III.1.1 Données géométriques des fibres unitaires	98
III.1.2 Comportement mécanique	99
III.1.3 Propriétés mécaniques	102
III.2 Caractérisation du comportement mécanique des faisceaux de chanvre	107
III.2.1 Données géométriques des faisceaux de fibres	107
III.2.2 Comportement mécanique	108
III.2.3 Propriétés mécaniques	109
III.3 Comparaison des propriétés mécaniques fibres / faisceaux.....	111
III.4 Essais de charge / décharge en traction uniaxiale des fibres et faisceaux.....	116
III.4.1 Charge et décharge d'une fibre unitaire (zone élastique).....	117
III.4.2 Charge et décharge d'une fibre unitaire (zone élastique et zone plastique)	119
<i>Partie IV. Influence des conditions de culture (apport d'eau supplémentaire et densité de semis plus importante)</i>	124
IV.1.1 Données géométriques.....	125
IV.2 Caractérisation des fibres unitaires.....	127
IV.3 Caractérisation des faisceaux	133
IV.4 Comparaison fibre /faisceau.....	138
<i>Partie V. Influence de la géométrie et des défauts naturels de la fibre sur ces propriétés mécaniques</i> 145	
V.1 Influence de la géométrie de la fibre	145
V.1.1 Cas de la fibre unitaire	145
V.1.2 Comparaison des résultats	149
V.2 Influence des défauts naturels sur le comportement mécanique d'une fibre unitaire	156
V.3 Conclusion	159

Partie I . Matériaux et méthodes

Dans cette partie seront présentés les matériaux caractérisés et utilisés au cours de la thèse, les processus de mise en œuvre de ces matériaux ainsi que les différentes méthodes de caractérisation. Par la suite un rappel succinct sera fait en début de chaque partie utilisant tels matériaux ou telles méthodes. Au total six types de chanvre ont été employés regroupant deux variétés de chanvre et trois conditions de cultures différentes. Les agro-composites énumérés dans cette thèse ont été fabriqués par injection directe ou à partir de compounds injectés avec les six types de fibres.

I.1 Les matériaux

I.1.1 Fibres de chanvre

Les fibres de chanvre (unitaires et faisceaux) étudiées dans ce mémoire sont au nombre de six, récoltées en 2009, trois conditions de culture pour deux variétés de chanvre : 1) une variété de chanvre standard (Fedora F17) et 2) une variété de chanvre proche de la première variété standard mais qui fournit une quantité de fibres plus importante (Savita S27). Chaque variété a été soumise à des conditions de culture différentes : une condition de culture standard, une condition pour laquelle il y a eu un apport d'eau supplémentaire c'est-à-dire une irrigation plus importante et plus fréquente au cours de la croissance de la plante de chanvre et une dernière condition pour laquelle la densité de semis est deux fois plus importante (100 Kg/h) que la densité de semis pour la condition de culture standard (50 Kg/h). Les dénominations pour les fibres de chanvre sont les suivants : variété de chanvre standard (type A), variété produisant plus de fibres (type B). Dans le cas des fibres la dénomination est e+numéro (les différentes dénominations sont détaillées dans le Tableau II-1). Les plantes de chanvre nous ont été fournies par la société Fibres Recherches Développement (FRD). Elles sont extraites des fibres cultivées dans l'Aube et récoltées en 2009.

Tableau II-1 : Types de chanvre étudiés

		Chanvre standard (type A)		Chanvre produisant plus de fibres (type B)	
Conditions de culture	Standard	e40 (type1)		e14 (type 4)	
	Apport d'eau supplémentaire	e46 (type 2)		e20 (type 5)	
	Densité de semis plus importante	e12 (type 3)		e62 (type 6)	

1.1.2 Les agro-composites PP – chanvre

Les composites étudiés sont au nombre de six. Ils sont un assemblage d'une matrice polymère en polypropylène renforcée par des faisceaux de fibres de chanvre extraits thermo-mécaniquement. Chaque composite représente un type de renfort / chanvre (détaillé précédemment). Les processus de fabrication de ces agro-composites sont détaillés dans la partie suivante. La dénomination pour les composites est c+numéro (le numéro étant le même en fonction de la condition de culture de la plante de chanvre comme pour la dénomination des fibres (Tableau II-2)).

Tableau II-2 : Différents composites étudiés

		Composite renforcé par les fibres de type A	Composite renforcé par les fibres de type B
Conditions de culture	Standard	c40	c14
	Apport d'eau supplémentaire	c46	c20
	Densité de semis plus importante	c12	c62

I.2 Les processus de fabrication des agro-composites

Six agro-composites PP renforcés par différents types de chanvre ont été étudiés. Chaque agro-composite a été fabriqué par injection selon deux processus différents : les composites mis en œuvre au PEP (Pôle Européen Plasturgie) et ceux à l'IFTS (Institut de Formation Technique Supérieure de Charleville-Mézières). Dans la majeure partie du mémoire, les résultats présentés concernent les composites fabriqués au PEP (injection à partir de compounds). Cependant dans certaines parties seront aussi montrés les résultats pour les composites fabriqués par injection directe des fibres et du PP à l'IFTS.

I.2.1 Processus de fabrication du PEP

Avant l'injection des éprouvettes d'essais, un compound a été fabriqué au laboratoire. Ce compound est un assemblage d'une matrice polypropylène avec des fibres courtes de chanvre ayant une longueur inférieure à 2mm. Le taux massique de fibres est de 30% pour 65% de PP. Un agent de couplage le PPMA à hauteur de 5% a été utilisé pour améliorer l'interface entre les fibres et la matrice. Peu d'information supplémentaire nous ont été donnée sur le processus de fabrication ou les propriétés de l'agent de couplage par la société Fibre Recherche Développement. Ce compound a été ensuite injecté par pression dans un moule pour obtenir la forme des éprouvettes. Ce processus est un procédé classique des polymères par extrusion

mono vis. Le débit d'injection est de $30\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$ pour une vitesse de rotation de la vis de $60\text{ tr}.\text{min}^{-1}$. La température en sortie de buse est de 180°C avec quatre paliers. Des informations complémentaires sur le processus d'injection sont données dans le Tableau II-3.

Tableau II-3 : Paramètre du procédé d'injection du PEP

Paramètres d'injection (PEP)	Données
Température fourreau	160 - 180°C
Vitesse rotation vis	$60\text{ tr}.\text{min}^{-1}$
Débit d'injection	$30\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$
Temps de maintien	18s
Pression du maintien	400 bars
Temps de refroidissement	20 s

I.2.2 Processus de fabrication de l'IFTS

A l'IFTS, les fibres et le PP ont été mélangés au moment de l'extrusion à l'intérieur de la vis sans fin (Figure II.1). Le dosage des fibres et du PP s'est fait manuellement et aucun agent de couplage n'a été employé. Ce processus a pour avantage de moins endommager les fibres mais par contre ne permet pas un contrôle du dosage en fibres entraînant une mauvaise répartition dans le composite.

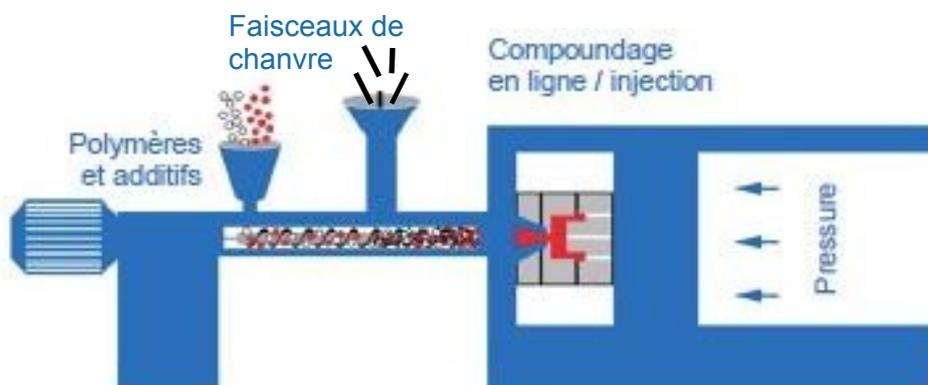


Figure II.1 : Schéma du processus d'injection direct de l'IFTS

I.3 Méthodes de caractérisation

I.3.1 Echantillons de caractérisation des fibres de chanvre

Les fibres végétales en générale et les fibres de chanvre en particulier présentent des géométries complexes et non-standards. Les fibres de chanvre unitaires et faisceaux montrent un rapport longueur sur diamètre très faible. Ce rapport est de l'ordre de 0,3 à 0,5%. Pour pouvoir caractériser ce type de matériau présentant ces spécificités, il est nécessaire d'utiliser un processus de caractérisation adapté aux . Ainsi un protocole d'essai a été défini, celui-ci est présenté dans laPartie II. Ce protocole s'inspire d'essais de traction employé dans la littérature pour caractériser des fibres naturelles (lin et chanvre).

Les fibres testées ont été montées sur un support en papier ajouré en son milieu, schématisé sur la Figure II.2. Ces dimensions géométriques ont été définies pour permettre la mise en place et le maintien du support sur les mors de la machine de traction. La longueur de l'espace vide (longueur L_1) correspond à la longueur de jauge.

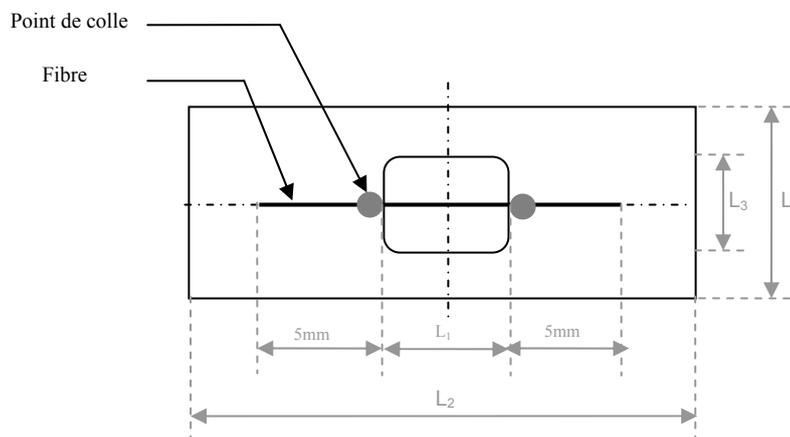


Figure II.2 : Support et montage des fibres

Pour les essais nous avons pris une longueur L_1 de 10mm correspondant à la longueur de fibre testée. Les longueurs L_2 , L_3 et L_4 ont été fixées respectivement à 60, 6 et 10mm. Les fibres unitaires ont été obtenues par un défibrage manuel qui n'est pas censé détériorer les fibres alors que les faisceaux de fibres ont été obtenus par

défilage thermomécanique. Le défilage manuel consiste dans un premier temps à extraire les faisceaux de fibres de la tige et de l'épiderme, puis dans un deuxième temps à séparer les fibres unitaires entre elles. Pour améliorer le défilage, les fibres ont été humidifiées. Cette humidification permet de casser les liaisons cellulose – pectine / lignine qui lient les fibres entre elles. Après avoir séparées les fibres, un temps de séchage a été nécessaire pour permettre à la fibre de revenir à un taux d'humidité normal correspondant au taux d'humidité d'essai. Le défilage thermomécanique est un défilage qualifié d'industriel puisqu'il permet d'obtenir un grand nombre de fibres mais qui ne permet pas de contrôler la qualité de celle-ci. Ce procédé de défilage thermomécanique consiste à passer les tiges de chanvre à travers deux rouleaux chauffés. Ces tiges sont préalablement séparées des feuilles et des graines de la plante de chanvre.

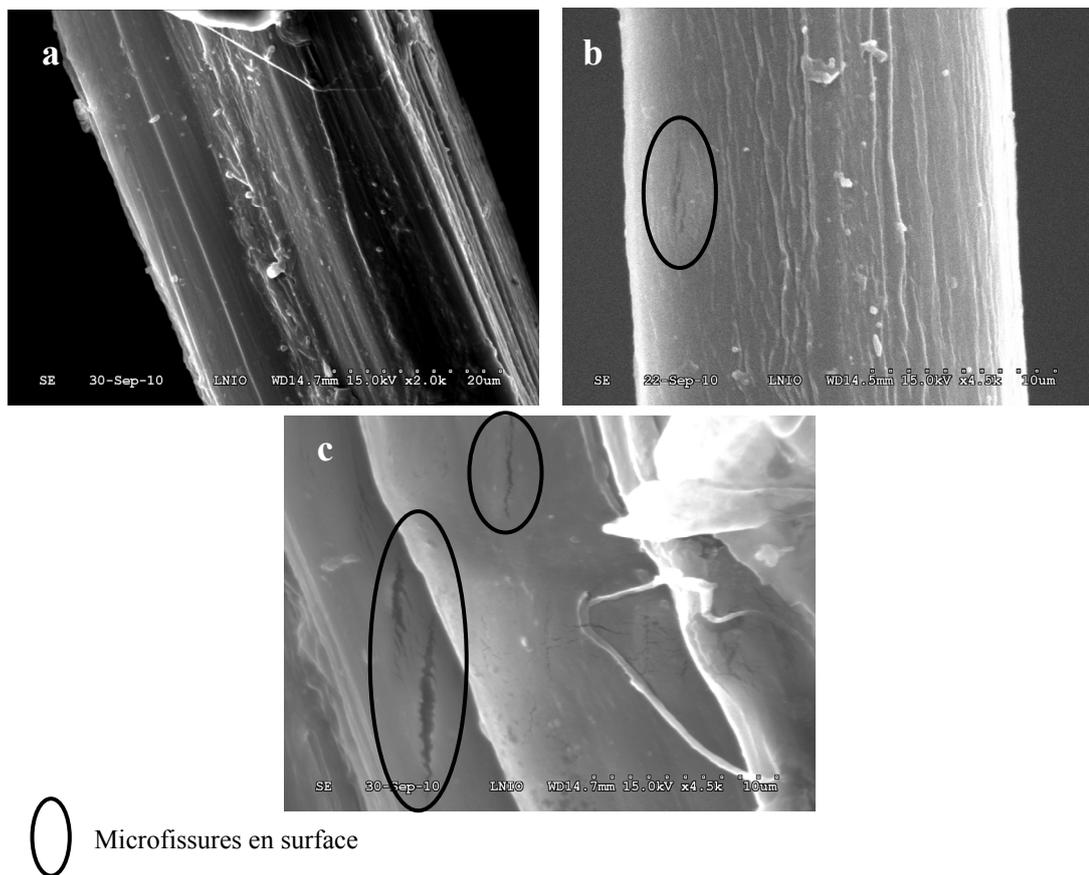


Figure II.3 : Microscopies de la surface d'une fibre de chanvre défilé manuellement a) et thermo-mécaniquement b), c)

L'inconvénient de ce défilage est qu'il ne permet pas d'obtenir des fibres unitaires, de plus ce défilage a tendance à endommager les faisceaux de fibres. Des

microfissures apparaissent sur la surface des fibres (Figure II.3b et c), alors qu'avec un défibrage manuel aucun défaut de ce type n'est constaté (Figure II.3a).

I.3.2 Essai de traction des fibres de chanvre

Les essais de traction ont été réalisés à l'aide d'une machine de micro-traction (Figure II.4), qui a pour particularité de permettre la mise en tension d'éprouvette de petite taille avec une vitesse d'avance de la traverse de l'ordre de $1\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Avec ce type de machine, les erreurs de mesure liées à la rigidité de la machine peuvent être négligées.

Deux cellules de force de 100 et 200N avec une sensibilité 1/100 et 1/50 de Newton ont été utilisées pour tester à la fois les fibres et les faisceaux.

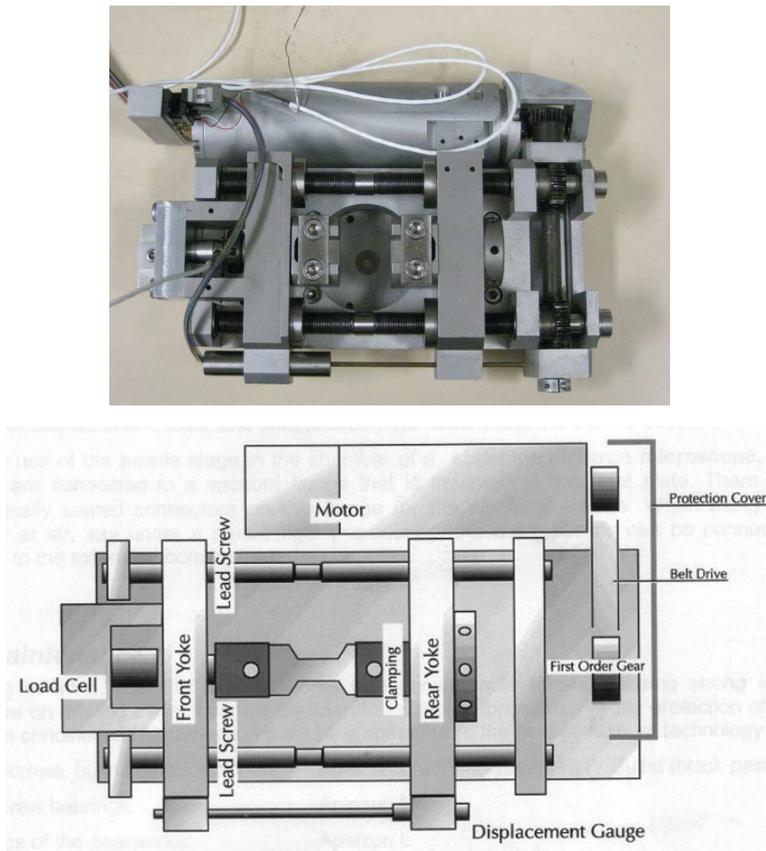


Figure II.4 : Photo et schéma de la machine de micro-traction

I.3.3 Essai de caractérisation en traction des agro-composites

Les essais de traction uniaxiale pour les composites PP- chanvre ont tous été réalisés sur une machine de traction verticale à double colonnes (Instron 4411), avec une cellule de force de $\pm 5\text{kN}$. La vitesse de sollicitation de la traverse est de $1\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Les essais ont été réalisés sous une température ambiante contrôlée de $22,5^\circ\text{C}$. Les principales caractéristiques des essais de traction sont présentées dans le Tableau II-4. Les essais de caractérisation en traction uniaxiale permettent de mesurer la force qu'oppose le matériau à sa déformation en fonction du déplacement de la traverse de la machine. En tenant compte de la théorie de la mécanique des milieux continus, il est possible de déterminer le comportement en traction des composites.

Tableau II-4 : Caractéristiques des essais de tractions

Caractéristiques des essais de traction	
Capacité de la cellule de force.....(N)	+/- 5 kN
Sensibilité de la cellule(N)	1/10
Vitesse d'avance de la traverse.....(mm/min)	0,5 à 30
Vitesse d'acquisition des données.....(pts/sec)	10
Force à t_0(N)	0
Déplacement à t_0(mm)	0
Température de l'essai.....($^\circ\text{C}$)	22,5

Essai de caractérisation en traction :

Les essais de traction mesurent l'évolution de la force de traction en fonction du déplacement. A partir de ces données, il est possible de déterminer le comportement mécanique des agro-composites polypropylène renforcés par des fibres de chanvre. Les propriétés mécaniques comme la résistance mécanique, la déformation à la rupture et à la contrainte maximum, ainsi que la rigidité du matériau sont calculées à partir de la courbe de traction. La contrainte de traction (Eq III-1) au cours de l'essai équivaut à :

$$\sigma_{xx}(t) = \frac{F_{traction}(t)}{S} \quad (\text{Eq. II-1})$$

Avec $\sigma_{xx}(t)$, la contrainte de traction dans l'axe longitudinale x au cours de l'essai

$F_{\text{traction}}(t)$, la force de traction mesurée lors de l'essai de traction

S , la surface de la section transversale de l'éprouvette testée

La déformation de l'éprouvette est le rapport entre l'allongement, mesuré lors de l'essai et la longueur initiale avant déformation (Eq III-2).

$$\varepsilon_{xx}(t) = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\Delta L(t)}{l} = \frac{\Delta L(t)}{L_0} \quad (\text{Eq. II-2})$$

Avec $\varepsilon_{xx}(t)$, la déformation longitudinale suivant l'axe x

$\Delta L(t)$, l'allongement de l'éprouvette au cours de l'essai

L_0 , la longueur initiale de l'éprouvette testée

Dans la partie élastique du comportement du matériau l'évolution de la force de traction est proportionnelle au déplacement imposé. Considérant la loi de Hooke (1678), il est possible de déterminer le module d'élasticité du matériau ou Module d'Young E comme suit (Eq III-3) :

$$\sigma_{xx} = E\varepsilon_{xx} \Leftrightarrow E = \frac{F_{\text{traction}} \cdot L_0}{S \cdot \Delta L} \quad (\text{Eq. II-3})$$

Dans le cas d'une sollicitation uniaxiale, en tous points matériels, les contraintes tangentielles sont nulles (Eq III-4).

$$\tau_{xy} = \tau_{xz} = 0 \quad (\text{Eq. II-4})$$

Pendant l'essai de traction la longueur de l'éprouvette augmente et sa section diminue. Des mesures montrent que cette contraction est proportionnelle à l'allongement et est définie par (Eq III-5) :

$$\left(\frac{l - l_0}{l_0} \right) = -\nu \left(\frac{L - L_0}{L_0} \right) \quad (\text{Eq. II-5})$$

Exprimée avec les déformations, la relation devient (Eq III-6) :

$$\varepsilon_{yy} = -\nu \varepsilon_{xx} \quad (\text{Eq. II-6})$$

Les essais de traction permettent de déterminer les propriétés mécaniques suivantes :

- Le module d'Young E en MPa.
- La contrainte à rupture $\sigma_{rupture}$ au point B en MPa :

$$\sigma_{rupture} = \frac{F_{rupture}}{S}$$

- La contrainte maximum σ_{max} qui caractérise la résistance du matériau au point A en MPa : $\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S}$

- La déformation à rupture $\epsilon_{rupture}$ qui est la déformation du matériau au moment de sa rupture totale (point B) : $\epsilon_{rupture} = \frac{\Delta L_{rupture}}{L_0}$

- La déformation à la contrainte maximum $\epsilon_{maximum}$ qui définit la valeur de la déformation du matériau au moment la contrainte est maximum (point A) : $\epsilon_{max} = \frac{\Delta L_{max}}{L_0}$

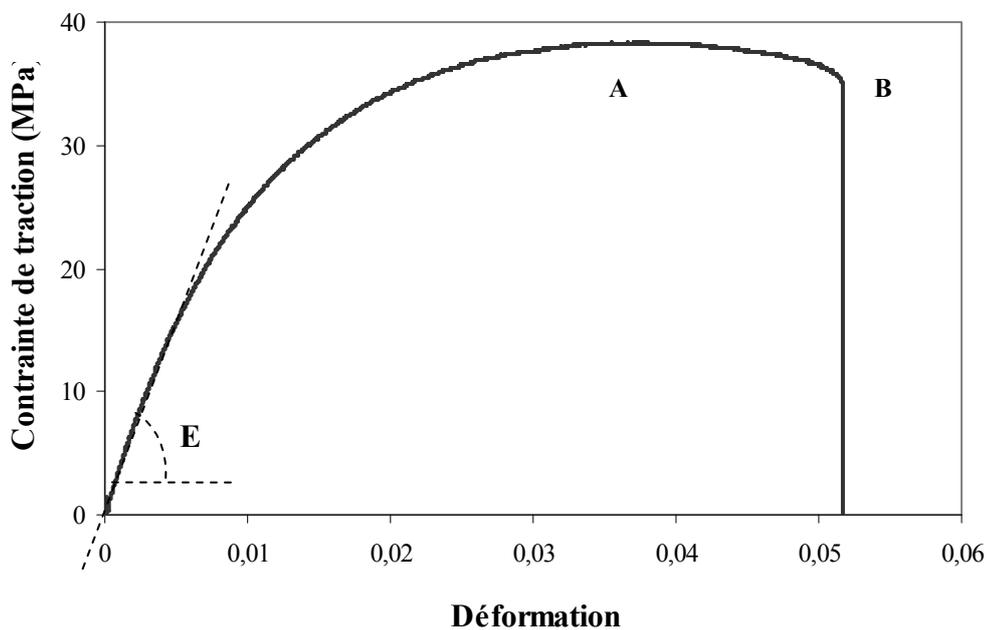


Figure II.5 : Courbe contrainte - déformation en traction d'un matériau composite

1.3.4 Essai de caractérisation en flexion des agro-composites

Les essais de flexion 3 points ont été réalisés sur la même machine (Figure II.6). La vitesse de sollicitation est de $1\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. La distance entre les appuis est de 80mm. En tenant compte de la théorie de la mécanique des milieux continus, il est possible de déterminer le comportement mécanique en flexion des composites.

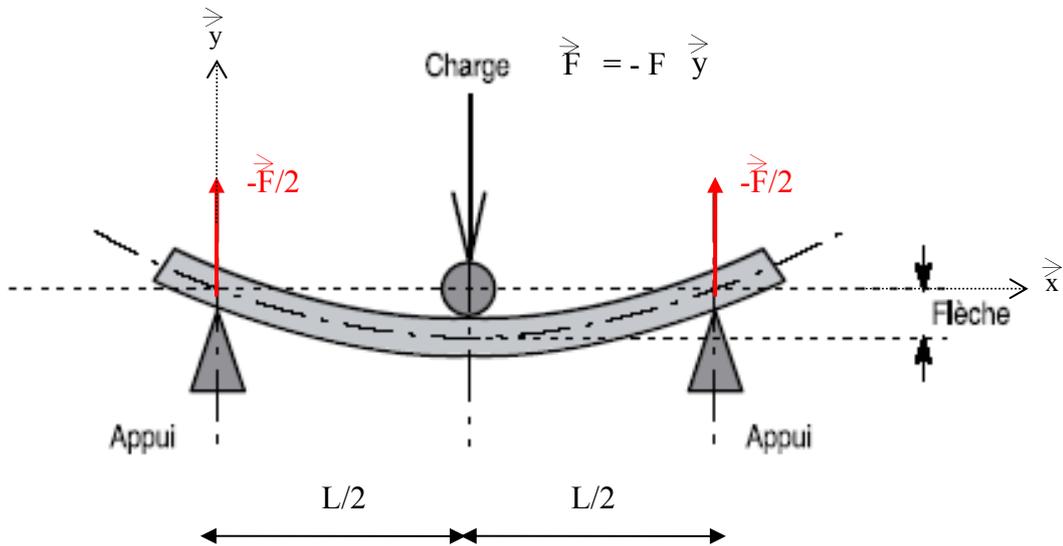


Figure II.6 : Schéma d'une poutre soumise à de la flexion 3 points

La contrainte de flexion est dépendante de la position suivant la hauteur de l'éprouvette et est égale à :

$$\sigma = 3 \cdot \frac{FL}{bh^3} \cdot y \quad (\text{Eq. II-7})$$

où b est la largeur et h la hauteur de la section transversale de l'éprouvette.

Soit la contrainte de compression ou de traction maximale en $x = L/2$ et $y = h/2$:

$$\sigma = \frac{3}{2} \cdot \frac{FL}{bh^2} \quad (\text{Eq. II-8})$$

La déformée est égale à $u_{y(x=L/2)} = -\frac{FL^3}{4Ebh^3}$. Soit le module d'élasticité en flexion 3

points vaut :

$$E = -\frac{FL^3}{4u_y bh^3} \quad (\text{Eq. II-9})$$

Partie II . Méthode de caractérisation géométrique des fibres de chanvre

Les fibres de chanvre sont extraites d'une ressource naturelle et par conséquent présentent une section non-circulaire et non-constante. Le diamètre varie le long de la fibre, ainsi le profil de la fibre n'est pas constant comme le montre la Figure II.8. De plus la section transversale de la fibre n'est pas circulaire, le diamètre change en fonction de l'orientation angulaire considérée, comme le montre la photo MEB de plusieurs fibres de chanvre (Figure II.7).

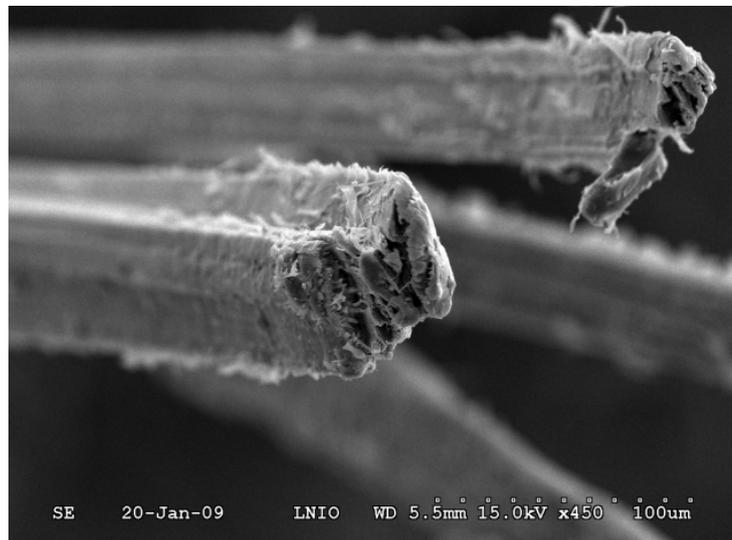


Figure II.7 : Photo MEB (microscopie à balayage électronique) de plusieurs fibres de chanvre au point de rupture

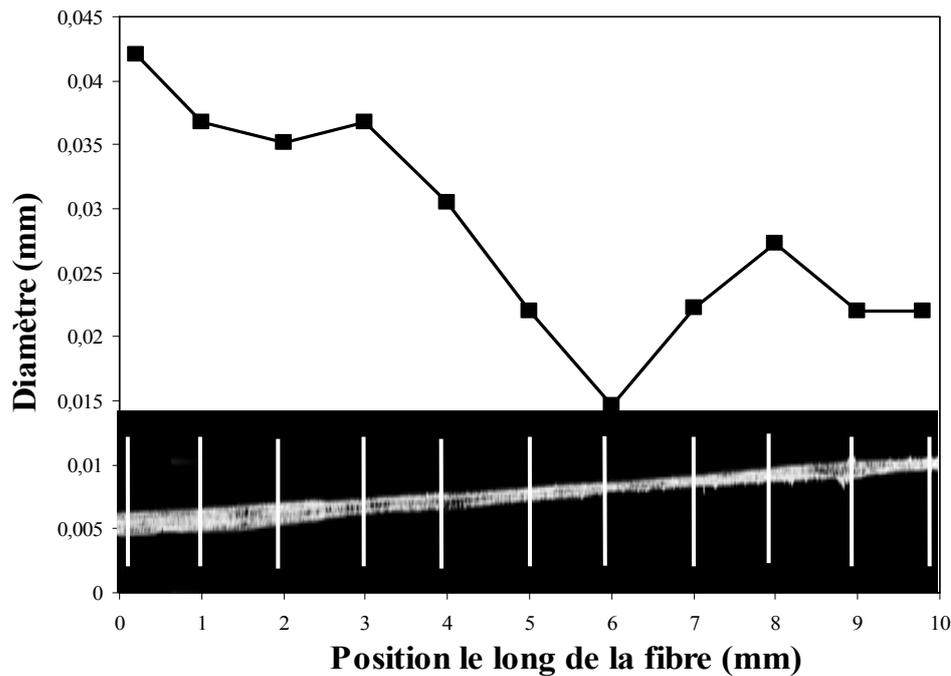


Figure II.8 : Evolution du diamètre d'une fibre unitaire en fonction de la position le long de la fibre

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer le diamètre et déterminer la section transversale (1) la méthode de diffraction de la lumière utilisée par C.Romão [ROM04], (2) la méthode de mesure par microscope électronique utilisée par L.Y. Mwaikambo [MWA06], (3) la méthode de mesure locale du diamètre le long de la fibre pour laquelle la section est définie comme étant circulaire utilisée par R.Schledjewski [SCH06-2].

Ces différentes méthodes ne sont pas assez précises et présentent deux inconvénients :

- (i) certaines méthodes sont une moyenne de mesures locales qui ne peuvent pas prendre en compte toutes les variations et les particularités du profil de la fibre
- (ii) les autres méthodes ne tiennent pas compte de la non-circularité de la section transversale.

Ainsi les propriétés mécaniques, comme le module d'Young et la contrainte longitudinale seront déterminées avec une certaine imprécision introduisant une incertitude de mesure. Le but de notre méthode de mesure est de déterminer avec précision la géométrie réelle du profil de la fibre. Par la suite ces mesures pourront être exploitées pour le calcul de propriétés mécaniques des fibres de chanvre. Ainsi une méthode de mesure de la section transversale des fibres et de détection du profil

de la fibre a été développée. Cette méthode consiste à prendre plusieurs photos pour différentes orientations angulaires de la fibre (Figure II.9). Un total de cinq images sont prises à 0° , 36° , 72° , 108° et 144° (Figure II.10).

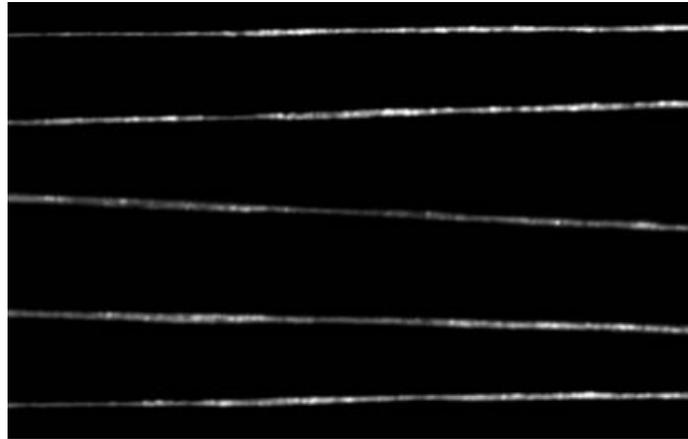


Figure II.9 : Images microscopiques d'une fibre unitaire de chanvre pour cinq orientations angulaires différentes

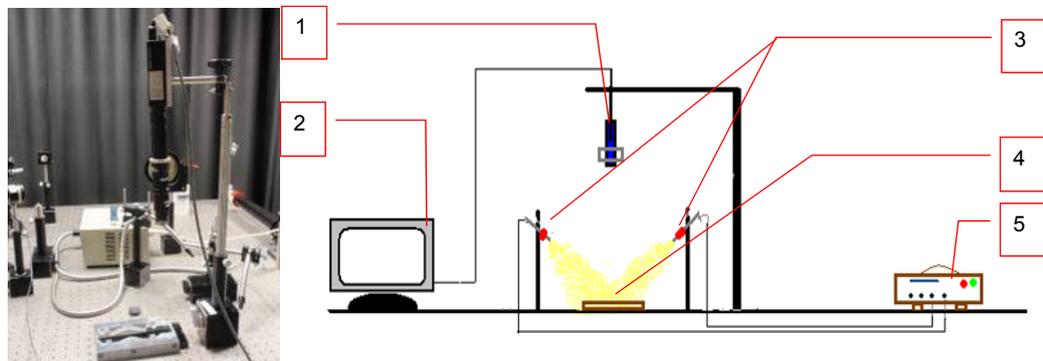
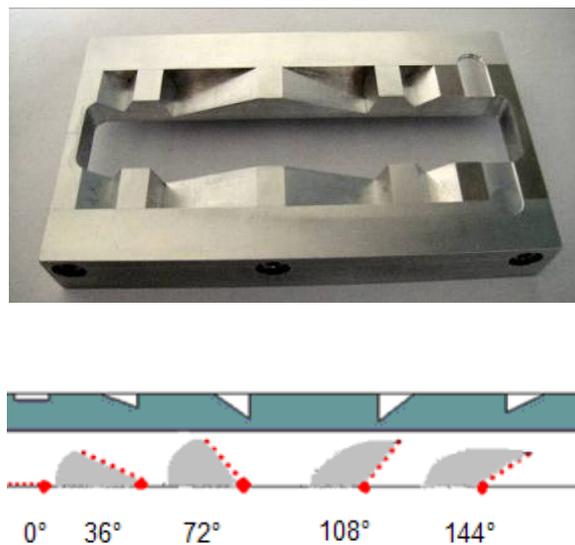


Figure II.10: Photo et schéma du système d'imagerie optique permettant d'obtenir les microscopies des fibres de chanvre, (1) camera avec un objectif ayant un grossissement ($\times 5$), (2) ordinateur, (3) lumière blanche et froide, (4) montage spécifique permettant l'orientation angulaire des fibres et (5) moniteur permettant le réglage de l'intensité de la lumière.

Pour permettre un traitement automatique des différentes photos, un programme a été développé utilisant les bibliothèques d'OpenCV. Ce programme est basé sur les principes suivants :

- a. Le premier principe consiste à déterminer le nombre de pixel qui sont contenus dans la fibre en contraste avec le nombre de pixels qui décrivent le fond (Eq. II-1) et de multiplier ce nombre par la taille d'un pixel en mètre (Eq. II-2). Si le niveau de gris d'un pixel (i) est supérieur à la valeur seuil déterminée par l'utilisateur, ce pixel (i) décrit la fibre. Par contre si le niveau de gris est inférieur au seuil, le pixel décrit le fond de l'image (Figure II.11). Ainsi l'aire de la surface de la fibre pour une image est égale à l'intégration de l'équation du profil le long de la fibre (Eq. II-3)

$$T_{photo} = n_{pixel_fibre} + n_{pixel_fond} \quad (\text{Eq. II-10})$$

$$Aire = n_{pixel_fibre} \times T_p \quad (\text{Eq. II-11})$$

où n_{pixel_fibre} est le nombre de pixels qui décrit la fibre, n_{pixel_fond} le nombre de pixels qui décrit le fond de l'image, T_{photo} le nombre de pixels contenus dans l'image et T_p la taille d'un pixel en m².

$$Aire = \int_L f(x) = \sum_{i=1}^n d_i \quad (\text{Eq. II-12})$$

où f(x) définit l'équation du profil de la fibre, L la longueur de la fibre et d_i le diamètre local pour une position le long de la fibre.

Finalement, le diamètre moyen D_i de la fibre pour une orientation angulaire est :

$$D_i = \frac{Aire}{L} \quad (\text{Eq. II-13})$$

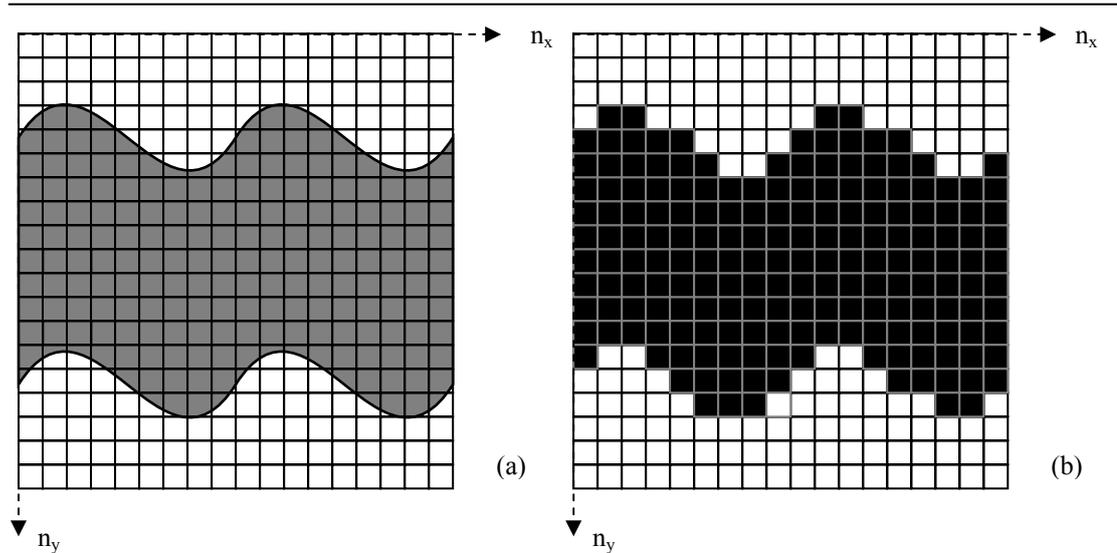


Figure II.11 : Schéma du profil d'une fibre avant (a) et après (b) le traitement d'image numérique

- b.** Le second principe est d'obtenir les coordonnées (X_p, Y_p) des points qui composent le profil maximum et minimum (Figure II.12). Pour une position le long de la fibre Y_{\max} and Y_{\min} est donné par l'équation Eq.II-5. Pour $0 < X_p < n_x$:

$$\begin{cases} Y_{\max}(x) = \text{Maximum}(Y_p(x)) & \text{for which } \text{Pixelcolor}(Y_p) > \text{threshold} \\ Y_{\min}(x) = \text{Minimum}(Y_p(x)) & \text{for which } \text{Pixelcolor}(Y_p) > \text{threshold} \end{cases} \quad (\text{Eq. II-14})$$

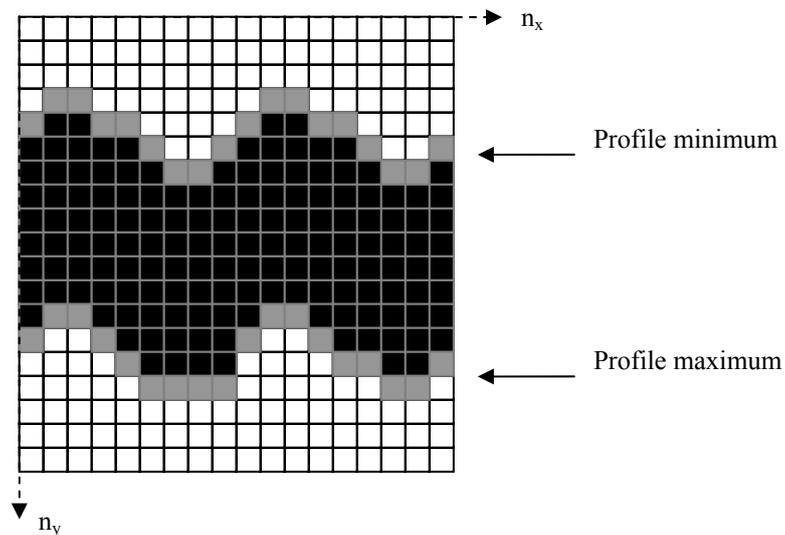


Figure II.12 : Schéma du résultat du traitement numérique d'image

Pour chaque fibre, les coordonnées du profil de la fibre le long de celle-ci sont obtenues en multipliant les coordonnées (X_p, Y_p) par la taille d'un pixel en mètre. Ainsi la géométrie de la fibre est déterminée par les coordonnées suivantes (X_p, Y_p, θ) où θ est la valeur de l'orientation de la fibre. Pour chaque orientation, le programme détermine :

1. Les coordonnées des points du profil de la fibre (Figure II.13).
2. Le diamètre moyen (D_i) (Figure II.14).
3. Le diamètre (D_{ic}) au point de rupture de la fibre.

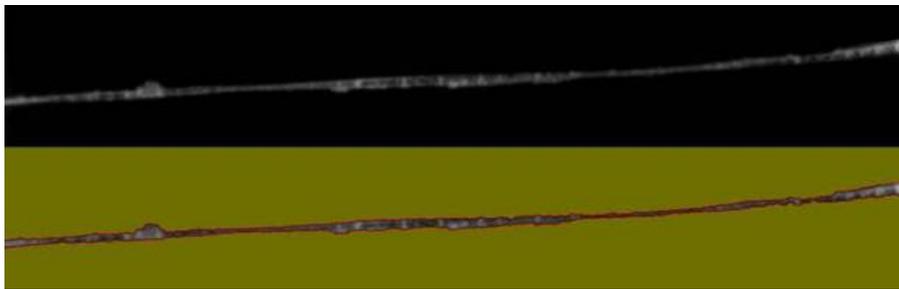


Figure II.13 : Photographie d'une fibre unitaire de chanvre avant et après traitement de l'image

A partir des données précédentes, un diamètre moyen des cinq diamètres mesurés pour chaque orientation et une section moyenne peuvent être calculés. La section moyenne de la fibre considérée circulaire est calculée comme suit : (Figure II.14 et (Eq. II-15)). D'autres modélisations plus complexes ont été envisagées et explorées (Partie V).

$$S = \frac{\pi}{4} \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^5 D_i}{5} \right) \right)^2 \quad (\text{Eq. II-15})$$

où D_i est le diamètre moyen de la fibre pour une orientation angulaire et i est le numéro de l'orientation angulaire variant de 1 à 5.

Cette méthode a plusieurs avantages : (1) conserver à posteriori un historique des mesures effectuées pour chaque fibre. Les historiques de mesures sont toutes les informations géométriques de la fibre à l'état initial avant essai. (2) connaître localement le long de la fibre une donnée géométrique et ceux même après que les

essais de caractérisation ont été menés. (3) reconstruction numérique de la fibre entière ou partielle à partir des ces données.

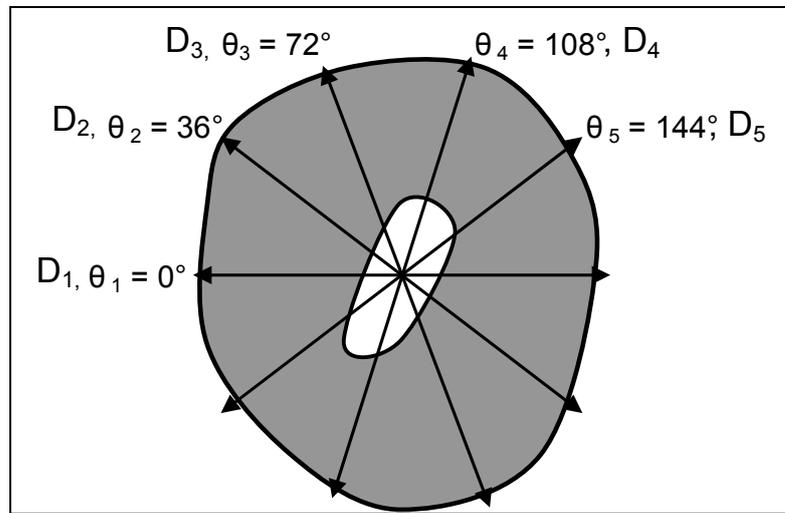


Figure II.14 : Profil de la section transverse d'une fibre unitaire et mesure des diamètres pour cinq orientations différentes

Partie III . Comportement mécanique des fibres de chanvre

Dans les parties suivantes, une étude approfondie a permis de mettre en évidence le comportement mécanique des fibres unitaires et des faisceaux de fibres de chanvre. Des essais de traction monotone et de charge – décharge ont été menés pour différentes modalités de chanvre. Ces essais ont permis de réaliser des études comparatives, mettant en lumière les différences de comportement entre la fibre unitaire et les faisceaux de chanvre, entre la fibre provenant de variété de chanvre et de cultures différentes. De plus le comportement des défauts naturels présents dans la fibre lors d'une mise en tension a été étudié. Pour finir, au regard de la géométrie complexe de la fibre, une étude a montré l'importance de la considération géométrique des échantillons sur l'évaluation des propriétés mécaniques et notamment sur leur rigidité.

III.1 Caractérisation du comportement mécanique des fibres unitaires

III.1.1 Données géométriques des fibres unitaires

En utilisant la méthode décrite précédemment, plusieurs fibres unitaires ont été mesurées. Les fibres unitaires de chanvre caractérisées dans cette partie ont un diamètre moyen qui est non-uniforme variant entre 30 et 50 μ m. La longueur de référence de la fibre testée est de 10 mm. Pour les essais suivants, une seule longueur a été étudiée. Une certaine variation du diamètre des fibres est constatée même si celles-ci sont toutes issues de la partie basale de la plante.

Tableau II-5 : Diamètres des échantillons de fibres unitaires caractérisées

Diamètre des fibres unitaires (mm)	
Echantillon 1	0,0318
Echantillon 2	0,0367
Echantillon 3	0,0506
Echantillon 4	0,0441
Echantillon 5	0,0434
Echantillon 6	0,0562
Echantillon 7	0,0318
Echantillon 8	0,0352
Echantillon 9	0,0571
Echantillon 10	0,0352
Echantillon 11	0,0512
Echantillon 12	0,0491
Moyenne	0,0446
Ecart type	0,0097

III.1.2 Comportement mécanique

La Figure II.15 montre un comportement typique en traction d'une fibre unitaire de chanvre. L'évolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation longitudinale dans l'axe de traction est quasi-linéaire jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La rupture d'une fibre unitaire est fragile, la contrainte à rupture chute instantanément après avoir atteint sa valeur maximale. En regardant de plus près le comportement mécanique d'une fibre unitaire, son comportement peut être divisé en trois parties, comme il a déjà été constaté dans la littérature pour les fibres de chanvre mais aussi pour d'autres types de fibres comme par exemple le lin [CHA07]. Ces trois parties sont la conséquence d'une variation de l'incrément de contrainte par rapport à l'incrément de déformation. Le rapport $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ n'est pas constant au cours de la sollicitation.

- La première partie (partie A, Figure II.15) est non-linéaire et représente l'alignement des micro-fibrilles constituant la fibre et la mise en tension

des défauts et des zones amorphes présents dans la fibre. Par conséquent, la rigidité de la fibre évolue de manière non-proportionnelle en fonction de la déformation et augmente lentement.

- La partie B représente un comportement élasto-viscoplastique de la fibre.
- La partie C correspond à la zone élastique du comportement de la fibre et cela jusqu'à rupture de la fibre.

De manière générale, la zone A représente un faible pourcentage de la déformation totale à rupture de la fibre, environ 5%. La zone B représente une part plus importante de la déformation de 10 à 40% en fonction de la fibre testée. Et la zone C représente la majorité de la déformation à rupture avec plus de 50% de la déformation totale. Ces deux dernières parties étant linéaires et la fibre ayant un comportement fragile, la contrainte et la déformation à rupture sont déterminées par la rigidité de la fibre.

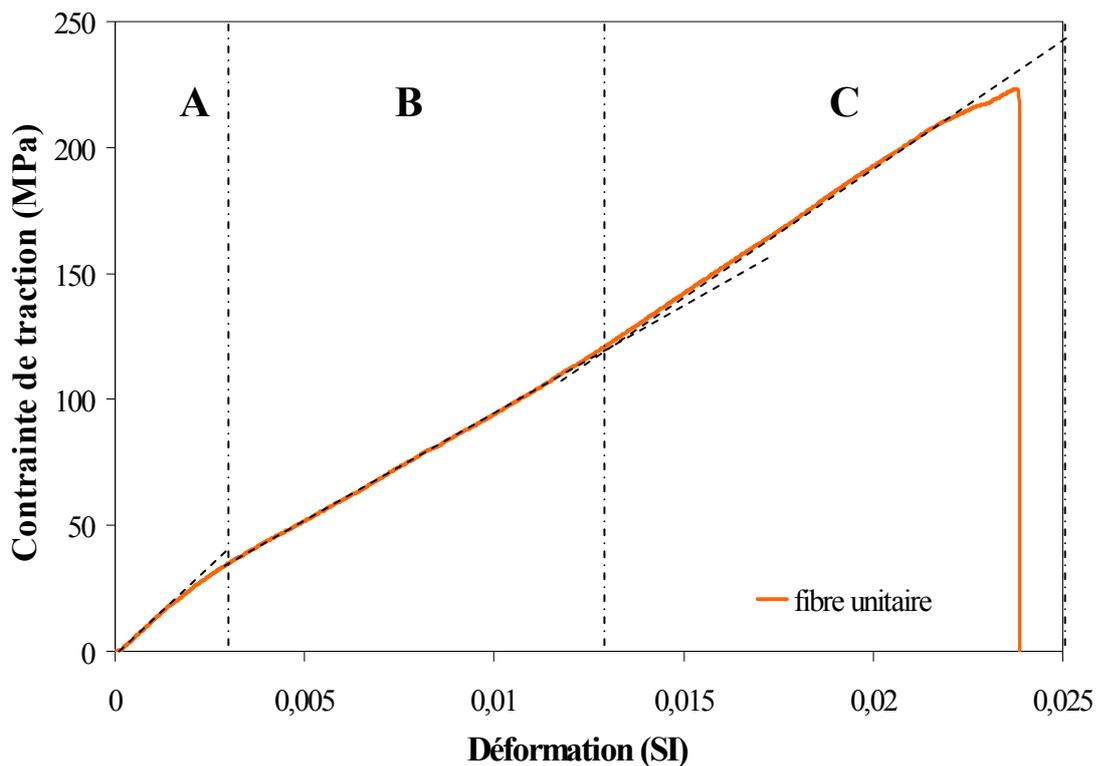


Figure II.15 : Comportement mécanique en traction des fibres unitaires de chanvre

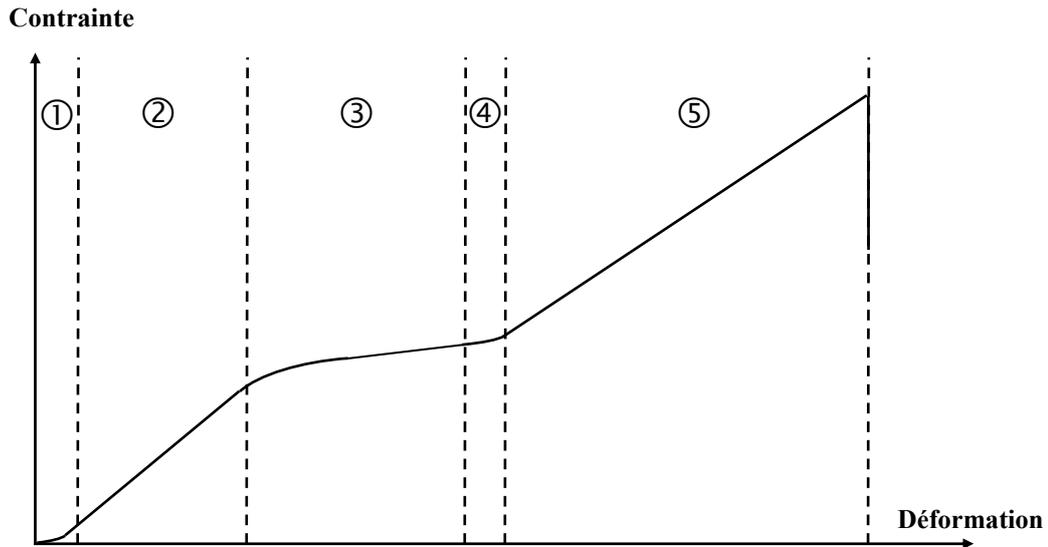


Figure II.16 : Comportement théorique des fibres unitaires de chanvre

En cherchant à mieux comprendre le comportement d'une fibre unitaire de chanvre, il est possible d'établir un comportement mécanique théorique en traction de ces fibres unitaires qui explique cette non-linéarité et ces variations de rigidité au cours de la sollicitation. Ce comportement théorique se divise en cinq parties comme le montre la Figure II.16. La partie A de la Figure II.15 peut être divisée en 2 parties correspondant à un comportement cumulé de deux phénomènes différents. La partie 1 correspond à un alignement des micro-fibrilles qui est causé par la torsion des micro-fibrilles. Les micro-fibrilles ont une orientation angulaire par rapport à l'axe de la fibre, cette orientation est définie par l'angle micro-fibrillaire [BAL05]. Lorsque les micro-fibrilles sont sollicitées en début de déformation (Tableau II-6), cet angle tend à diminuer, correspondant à un alignement. C'est pour cette raison que le comportement est non-linéaire, car la tension de l'ensemble des fibrilles n'est pas uniforme mais progressive au fur et à mesure que la fibre commence à être sollicitée. Cette angle micro-fibrillaire diminue mais n'atteint jamais une valeur nulle car les fibrilles sont en forme d'hélice, mettant en évidence qu'une micro-fibrille ne sera jamais soumise à de la traction pure mais elle sera aussi sollicitée en torsion. La partie 2 correspond à la mise en tension de la fibre se traduisant par un alignement des défauts et des zones amorphes. Dans cette partie, l'ensemble de la fibre est contraint et le comportement tend à devenir linéaire. Après avoir atteint un certain seuil de contrainte (transition entre les parties 2 et 3), la fibre s'endommage. Une rupture de l'interface entre les constituants de la fibre apparaît, le comportement à ce

moment est plastique et irréversible. Dans la partie 3, la rigidité de la fibre est plus faible que celle de la partie 2, ceci est la conséquence d'une dissipation de l'énergie de rupture interfaciale. Cette dissipation est faible car la résistance de l'interface au cisaillement est marginale. Après que les contraintes internes de la fibre se soient stabilisées (partie 4), l'ensemble de la fibre est de nouveau mise en tension jusqu'à sa rupture (partie 5). C'est dans cette cinquième partie, où la fibre atteint ses propriétés maximums, que le module d'Young et la résistance de la fibre à la rupture sont déterminés.

Tableau II-6 : Détail du comportement mécanique théorique d'une fibre unitaire de chanvre en fonction des cinq zones montrées sur le Figure II.16

①		Alignement des micro-fibrilles <i>Impossible d'atteindre $\theta = 0^\circ$ car les fibrilles sont en forme d'hélice</i>	④		Remise en tension après stabilisation
②		Mise en tension de la fibre <i>Alignement des zones amorphes</i>	⑤		Tension des micro-fibrilles
③		Endommagement interfacial <i>Chute du E (relaxation des contraintes due à une dissipation de l'énergie de rupture interfaciale). Faible chute du E car $\tau_{interfacial}$ est faible</i>			

III.1.3 Propriétés mécaniques

Des exemples de résultats d'essai de traction sont montrés en Figure II.17. La contrainte à rupture pour les fibres unitaires est de 203 ± 103 MPa. La déformation à rupture est de $1,8 \pm 0,6\%$. Le module d'Young est de 13644 ± 8158 MPa. Les essais de caractérisation ont mis en évidence une forte dispersion des propriétés mécaniques. La contrainte à rupture varie de 81 à 305 MPa, soit un écart de 224 MPa. Le module d'Young varie aussi beaucoup entre chaque échantillon testé, variant de 3590 à 17142, soit une variation de 13552 MPa. La déformation aussi montre une forte

variation puisque celle-ci évolue de 1,1 à 2,9% comme le montre le Tableau II-7. Ces différents essais montrent que le comportement mécanique est quasiment le même entre chaque fibre, les trois parties montrant une évolution de la rigidité sont présentes pour chaque essai. La variation de la rigidité est plus ou moins prononcée en fonction de la fibre testée.

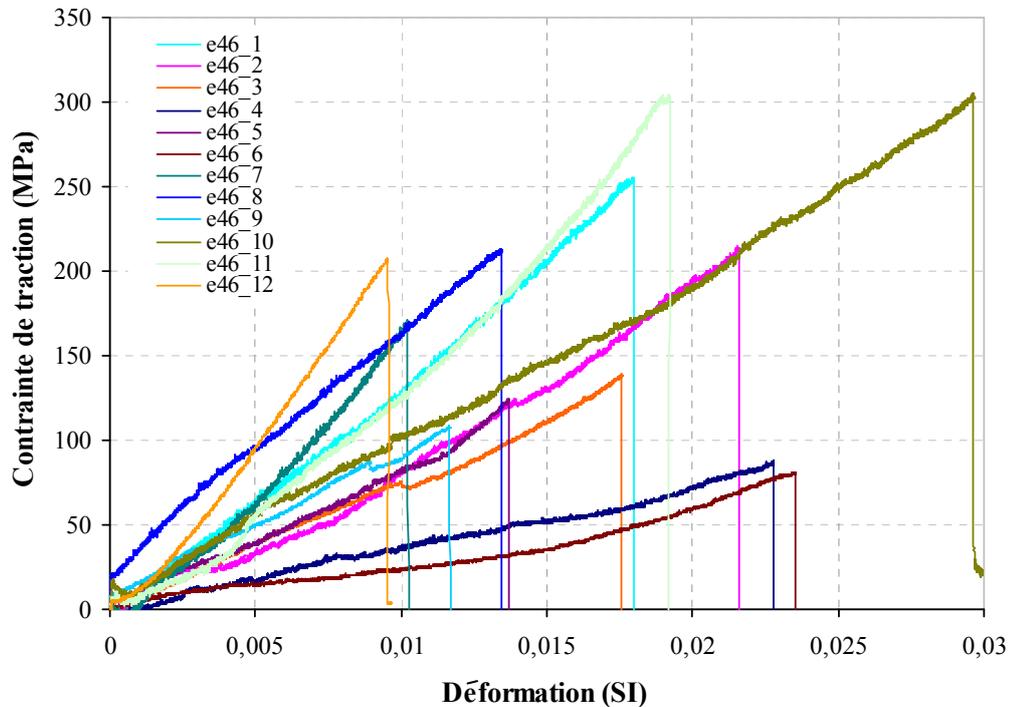


Figure II.17 : Courbes de traction pour des fibres unitaires de chanvre

Malgré que le comportement global soit identique entre chaque fibre, les propriétés mécaniques (résistance à la rupture, module d'Young et la déformation à rupture) sont différentes avec des écarts types très élevés. Ce phénomène de dispersion peut s'expliquer.

- La première explication est que les fibres de chanvre sont une matière végétale donc une donnée aléatoire sur la structure.
- La composition chimique (la cellulose) de la fibre végétale apporte la rigidité; si celle-ci n'est pas la même d'une fibre à une autre cela peut influencer la rigidité de la fibre [SIL08].
- La présence ou non d'un lumen de taille négligeable ou d'une proportion de vide importante au milieu de la fibre. Cette présence de vide peut influencer directement la contrainte à rupture car plus le lumen sera grand, plus la contrainte mesurée sera faussée puisque celle-ci ne tiendra pas

compte seulement de la matière végétale mise en tension, mais tiendra compte de lumen comme étant lui aussi sollicité. A l'inverse plus le lumen sera de faible proportion, plus la contrainte calculée sera juste. Si les fibres testées sont creusées d'un lumen cela pourrait expliquer en partie les faibles contraintes qui ont été constatées.

- De plus les fibres sont pré-contraintes lorsqu'elles sont dans la plante, le défibrage relâche ces contraintes mais des contraintes résiduelles peuvent rester dans la fibre. L'intensité de ces contraintes peut être différente d'une fibre à une autre, améliorant ou fragilisant la résistance à la rupture de celle-ci.
- La géométrie non-standard de la fibre influence les propriétés mécaniques (voir partie V.1). Des zones de concentrations de contrainte peuvent apparaître pour des profils de fibres qui présentent des variations géométriques importantes.
- La présence des défauts naturels et non-naturels influencent aussi les propriétés. Les défauts non-naturels comme les microfissures peuvent être causés par le défibrage notamment mécanique qui endommage la fibre diminuant ainsi la résistance mécanique à la rupture. Les défauts naturels ont un impact sur le comportement global de la fibre.
- Des études ont montré que les défauts naturels notamment les coudes ont un comportement différent de celui du reste de la fibre (voir partie V.2), ce qui influence aussi le comportement de celle-ci. La proportion statistique des défauts naturels pour une longueur de fibre testée n'est pas la même d'une fibre à l'autre due à sa nature, cela impacte entre autres la résistance à la rupture et la rigidité de la fibre mais aussi sa déformation à rupture. La localisation des déformations maximales de la fibre qui se produit dans la zone de rupture peut être multiple, localisée à différents endroits et d'intensités différentes. La cinquième zone (partie C) du comportement mécanique d'une fibre où le comportement est élastique montre une déformation de la fibre la plus importante. Ainsi s'il existe une forte variation du module d'Young, la contrainte et la déformation à rupture présenteront une forte dispersion.

Tableau II-7 : Propriétés mécaniques en traction des fibres unitaires de chanvre

	diamètre mm	déformation	Contrainte à rupture MPa	module d'Young MPa
E46_1	0,0318	0,0215	255	14234
E46_2	0,0367	0,0217	215	10780
E46_3	0,0506	0,0183	139	7373
E46_4	0,0447	0,0228	88	3590
E46_5	0,0434	0,0137	124	8147
E46_6	0,0562	0,0242	81	5686
E46_7	0,0318	0,0102	171	17142
E46_8	0,0352	0,0135	213	14557
E46_9	0,0571	0,0117	108	8605
E46_10	0,0352	0,0299	305	9752
E46_11	0,0512	0,0196	304	20630
E46_12	0,0491	0,0097	207	25630
Moyenne	0,0446	0,0178	203	13644
Ecart type	0,0097	0,0060	103	8158

Ces résultats montrent que la résistance à la rupture et le module d'Young caractérisés précédemment pour les fibres unitaires de chanvres sont plus faibles que ceux observés dans la littérature scientifique [MOH05]. Alors que la résistance à rupture des fibres de chanvre est usuellement de 300 à 400MPa pour des teneurs de cellulose de l'ordre de 65 à 70% (voir CHAPITRE I : ETAT DE L'ART, Tableau I-2), les essais réalisés dans le cadre de cette thèse donnent une valeur de contrainte maximum de 88 à 255MPa, soit une résistance mécanique plus faible.

Des études dans le cadre du projet MAPROFI réalisées par Eva Fernandez Tendero, concernant la caractérisation morphologique et biologique des fibres de chanvre, montrent une présence d'un vide au milieu de la fibre. Si ce vide interne appelé lumen a une taille relative trop importante par rapport à la taille de la section de l'ensemble de la fibre, les propriétés mécaniques considérant une section pleine seront sous-évaluées. Comme le montre la figure ci-dessous (photo a et b) sous coloration chimique, les tailles du lumen peuvent être très grandes au vue de la taille de la section.

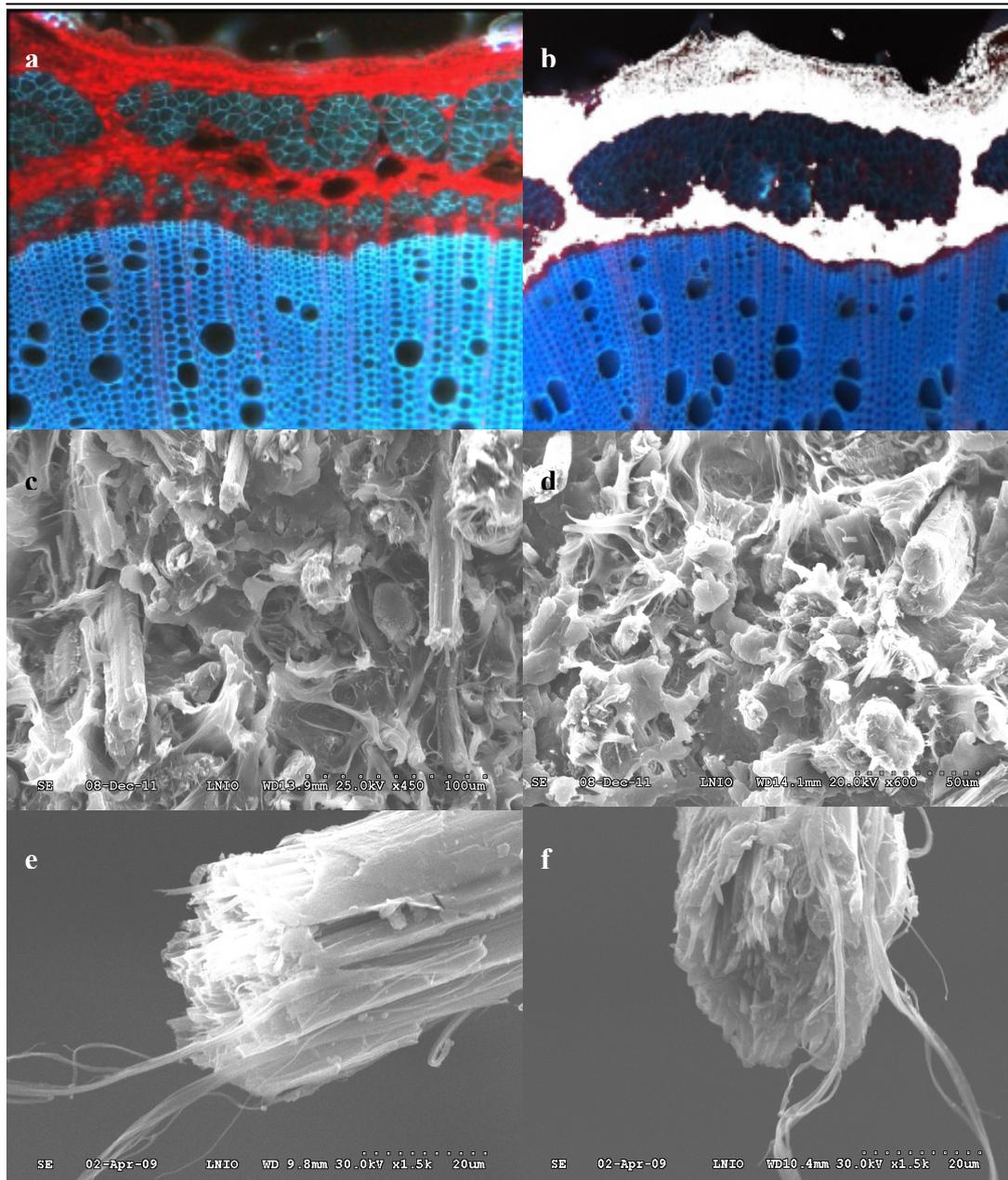


Figure II.18 : Microscopies d’une partie de la section d’une tige de chanvre (photos a et b), études réalisées par Eva Fernandez Tendero. c et d : Microscopies MEB, d’un faciès de rupture d’un agro-composite PP / Chanvre. e et f : photographie de la section transversale d’une fibre unitaire après rupture.

Cependant les fibres qui ont été caractérisées, n’étaient pas creusées d’un lumen de taille significative comme celles observées précédemment. Des microscopies MEB d’un faciès de rupture d’un composite PP / Chanvre montrent des fibres injectées avec des sections transversales sans vide au milieu. D’autres microscopies d’une fibre unitaire seule montrent des fibres sans lumen. Ainsi l’hypothèse d’un lumen de taille important diminuant les propriétés mécaniques ne peut pas être retenue. Une autre raison peut expliquer ces résultats comme la teneur en cellulose des fibres. Si la

quantité de cellulose est plus faible que le taux constaté en moyenne pour les fibres de chanvre, les propriétés élastiques des fibres seront diminuées. La vitesse de sollicitation pourrait expliquer ce rapport entre les résultats de cette étude et ceux de la littérature. La vitesse utilisée ici est de l'ordre de $1\mu\text{m.s}^{-1}$ alors que les caractérisations de la littérature utilisent des vitesses plus importantes. Mais avoir une vitesse de déformation plus faible devrait augmenter les propriétés mécaniques puisque une déformation lente permet un réagencement de la structure de la fibre, permettant à celle-ci de supporter une contrainte plus élevée. Une explication serait la présence de défauts naturels en nombre important comparé à d'autres fibres de chanvre. Mais une quantification de ces défauts dans les fibres testées n'a pu être envisagée.

III.2 Caractérisation du comportement mécanique des faisceaux de chanvre

III.2.1 Données géométriques des faisceaux de fibres

Les faisceaux en chanvre caractérisés dans cette partie ont un diamètre moyen qui varie entre 130 et 280 μm (Tableau II-8). La longueur de référence des faisceaux testés est de 10mm. Pour les essais suivants, une seule longueur a été étudiée.

Tableau II-8 : Diamètres des échantillons des faisceaux de fibres caractérisés

Diamètre des faisceaux de fibres (mm)		Diamètre des faisceaux de fibres (mm)	
Echantillon e40_4	0,288	Echantillon e46_12	0,205
Echantillon e40_5	0,136	Echantillon e46_13	0,271
Echantillon e40_6	0,262	Echantillon e46_15	0,245
Moyenne		0,235	
Ecart type		0,056	

Les dispersions mesurées pour les faisceaux et les fibres unitaires sont à peu près les mêmes avec un écart de l'ordre de 22% de la valeur moyenne.

III.2.2 Comportement mécanique

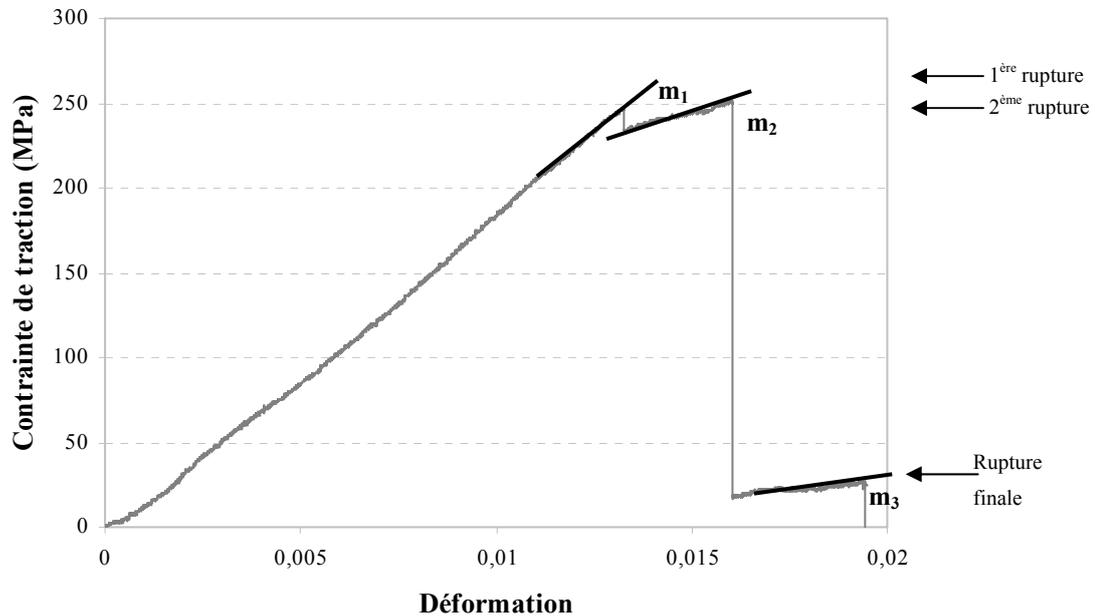


Figure II.19 : Comportement mécanique en traction d'un faisceau de fibres de chanvre

Le comportement mécanique en traction d'un faisceau peut être corrélé à celui d'une fibre unitaire (Figure II.15). Ce comportement est aussi quasi-linéaire jusqu'à rupture. Le comportement peut aussi se diviser en cinq parties, même si la différence entre les parties 3 et 5 est beaucoup moins visible pour les faisceaux, avec parfois ces deux zones confondues. Ces parties montrent aussi un changement de rigidité du faisceau au cours de la sollicitation. La première zone correspond à un alignement des fibres unitaires constituant le faisceau. La troisième partie correspond à un endommagement interfacial entre les fibres unitaires, se traduisant par une chute de la rigidité du faisceau (Figure II.19). Pour des faisceaux ayant un nombre de fibres relativement importantes (diamètre de faisceau supérieur à $200\mu\text{m}$), le comportement est ainsi ramené à seulement trois parties (zone 1,2 et 3 de la Figure II.15). Si le faisceau est composé d'un nombre suffisant de fibres unitaires, la partie 3 n'est pas visible puisque la résistance interfaciale entre les fibres unitaires est négligeable comparée à la contrainte nécessaire pour la mise en tension de l'ensemble des fibres unitaires formant le faisceau [CHA11]. Enfin dans la cinquième partie, l'intégralité du faisceau est mise en tension. C'est aussi dans cette partie que les propriétés mécaniques (contrainte à rupture, déformation à rupture et module d'Young) sont déterminées. Les faisceaux de fibres pour lesquels le diamètre est largement

supérieur à 50 μm , le comportement est linéaire avec plusieurs paliers de rupture, voir la Figure II.19. Un palier de rupture représente la rupture fragile d'une fibre ou de plusieurs fibres composant le faisceau. La rupture d'une partie des fibres diminue la rigidité du faisceau, m_1 étant supérieure à m_2 et m_2 supérieure à m_3 . (où m représente la pente de la partie linéaire de la courbe soit le module d'Young du faisceau).

III.2.3 Propriétés mécaniques

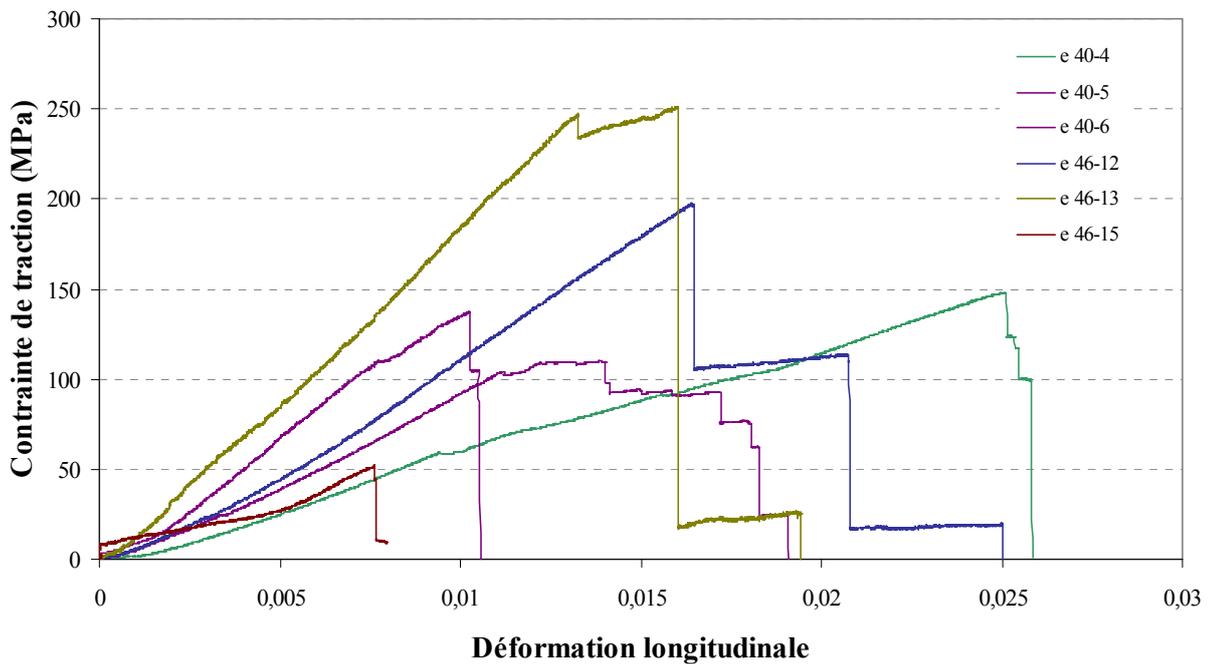


Figure II.20 : Exemple de courbes de traction pour des faisceaux de fibres de chanvre

L'évolution de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale pour plusieurs essais sur des faisceaux de chanvre est montrée en Figure II.20. Comme pour les fibres unitaires, les propriétés mécaniques des faisceaux de chanvre présentent une forte dispersion. La résistance mécanique à la traction (Tableau II-9) pour les faisceaux est de $157 \pm 49 \text{ MPa}$. La valeur du module d'Young moyen est de $9518 \pm 2157 \text{ MPa}$. Comme il a été démontré dans la partie III.2.2 précédente, les résultats concernant les faisceaux montrent un comportement mécanique qui se divise principalement en trois zones parfois cinq zones pour des faisceaux de petites tailles. Pour certains essais la troisième et la cinquième partie du comportement sont similaires, démontrant une variation négligeable du module d'Young entre ces deux

dernières parties. Comme le montre Figure II.20, la rupture des faisceaux se fait par palier.

Tableau II-9 : Exemples de propriétés mécaniques en traction des faisceaux de fibres de chanvre

Echantillon	Diamètre (mm)	Contrainte à rupture (MPa)	Déformation à la 1 ^{ère} rupture (%)	Déformation à la rupture totale (%)	E (MPa)
4	0,288	150	2,50	2,50	6530
5	0,136	143	1,00	1,03	12400
6	0,262	100	1,77	1,84	10930
7	0,205	150	1,19	1,75	10411
9	0,271	150	1,63	2,10	7780
10	0,245	250	2,06	2,92	9058
Moyenne	0,235	157	1,69	2,02	9518
Ecart type	0,056	49	0,55	0,65	2157

La dispersion des propriétés mécaniques, comme pour les fibres unitaires, peut être expliquée par les phénomènes décrits précédemment dans la partie III.1.3. Les phénomènes (composition chimiques, présence de lumen, géométrie du faisceau, présence et proportion des défauts naturels et non-naturels dans la fibre,...) qui expliquent la dispersion des fibres unitaires, se répercutent à l'échelle du faisceau. A ces différents phénomènes s'ajoute le fait que le faisceau se compose de fibres unitaires apportant la rigidité et d'une interface constituée en partie d'hémicellulose et de lignine qui a des propriétés de résistance et une rigidité plus faible que la cellulose. Ainsi pour certains faisceaux se sont les fibres constituant les faisceaux qui sont contraints, les propriétés mécaniques tendent à être celles d'une fibre unitaire. Alors que pour d'autres faisceaux c'est l'interface qui est la plus sollicitée, ainsi dans ce cas les propriétés mécaniques sont beaucoup plus faibles. Ce phénomène peut expliquer en partie cette forte dispersion des propriétés des faisceaux. Des explications de ce phénomène seront détaillées dans la partie III.3.

III.3 Comparaison des propriétés mécaniques fibres / faisceaux

Dans cette partie est présentée une étude comparative des propriétés mécaniques des fibres unitaires et des faisceaux de fibres. Les résultats montrés dans cette partie sont pour une même variété de chanvre, les fibres unitaires et les faisceaux sont extraits de la même plante (chanvre qui sera qualifié par la suite de standard). Il est important de préciser que les fibres unitaires ont été extraites manuellement alors que les faisceaux ont été extraits mécaniquement. Les faisceaux sont les mêmes que ceux utilisés pour l'injection des agro-composites testés par la suite.

		Fibre unitaire		Faisceau	
		Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Diamètre échantillons	μm	44,6	9,7	235,0	56,0
Contrainte à rupture	MPa	203	103	157	49
Déformation à 1ère rupture	%	-	-	1,69	0,55
Déformation maximum à rupture	%	1,7	0,6	2,02	0,65
Module d'Young E	MPa	13644	8158	9518	2157

Les faisceaux caractérisés ont un diamètre moyen de $234,5 \pm 55,92 \mu\text{m}$ (le diamètre a été calculé par la méthode présentée en Partie II). Les fibres unitaires provenant de la même plante de chanvre ont un diamètre de $44,66 \pm 9,71 \mu\text{m}$. Les écarts types montrent une dispersion de la valeur du diamètre des faisceaux presque six fois supérieure avec une dispersion de $\pm 55,92 \mu\text{m}$ par rapport à l'écart type relevé pour les fibres unitaires qui est de $\pm 9,71 \mu\text{m}$. Cette importante incertitude de mesure du diamètre pour les faisceaux est due au fait que les faisceaux sont caractérisés tels qu'ils sont en sortie du processus d'extraction et ne sont pas divisés à nouveau avant les essais pour obtenir des tailles uniformes. Après extraction de la tige, différentes tailles des faisceaux sont observées dues au nombre de fibres.

En fonction du nombre de fibres unitaires formant le faisceau, il est possible d'avoir des faisceaux de plus ou moins grande dimension. L'écart type du diamètre des

faisceaux représente 24% de la valeur moyenne alors qu'elle est seulement de 21% pour les fibres unitaires.

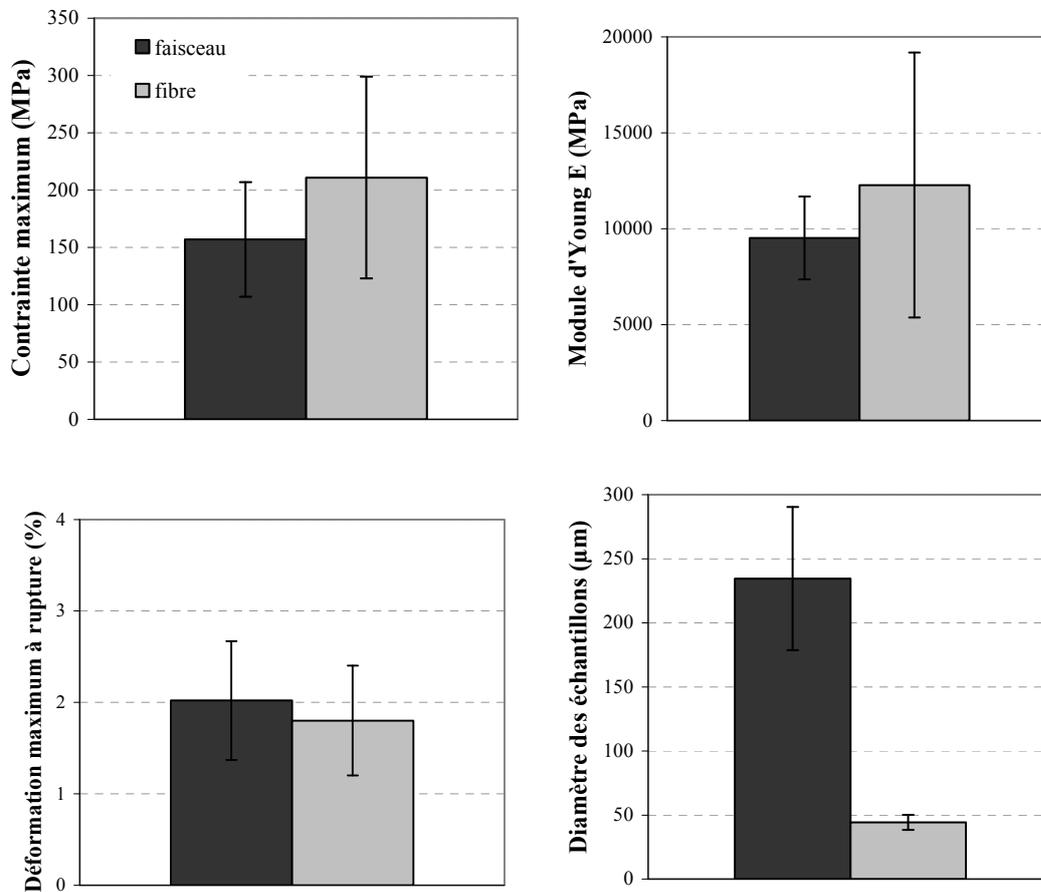


Figure II.21 : Comparaison des propriétés mécaniques en traction des fibres unitaires et des faisceaux de chanvre (variété et conditions de culture standard)

La Figure II.21 montre les propriétés mécaniques des fibres unitaires et des faisceaux. Les propriétés mécaniques des fibres unitaires sont plus grandes que celles des faisceaux. Les fibres unitaires ont une résistance à la rupture de 203 ± 103 MPa alors que pour les faisceaux, la résistance est de 157 ± 49 MPa. Cela démontre que les fibres unitaires ont une meilleure résistance que les faisceaux. Dans le cas de nos essais, les fibres unitaires présentent une contrainte maximum moyenne supérieure d'environ 25% par rapport aux faisceaux. Il est intéressant de constater que la dispersion de 31% de la contrainte maximum pour les faisceaux est plus faible que la dispersion mesurée pour les fibres unitaires qui est de 50%. Le module d'Young suit la même tendance. La valeur moyenne du module d'Young pour les fibres unitaires est de 13644 ± 8158 MPa, alors que pour les faisceaux elle est seulement de 9520 ± 2157 MPa,

soit un écart en moyenne d'environ 30%. Ainsi les fibres unitaires ont une meilleure rigidité que les faisceaux. Ces résultats montrent une déformation à rupture pour les fibres unitaires et les faisceaux similaires avec une déformation de $2,02 \pm 0,65\%$ pour les faisceaux et de $1,7 \pm 0,6\%$ pour les fibres unitaires. Cependant d'autres essais (Tableau II-14) menés sur d'autres fibres de chanvre ont montré que la déformation à rupture des fibres unitaires est plus importante, montrant une plus grande fragilité des faisceaux. Les dispersions mesurées pour la contrainte à rupture et le module d'Young sont plus petites pour les faisceaux que pour les fibres unitaires. Ainsi les propriétés mécaniques des faisceaux sont presque identiques quels que soient la taille des faisceaux et le nombre de fibres qui les composent. Cette étude comparative montre que les fibres unitaires présentent des propriétés mécaniques en traction meilleures que les propriétés mécaniques des faisceaux. Ces résultats sont conformes aux résultats trouvés dans la littérature [DUV11].

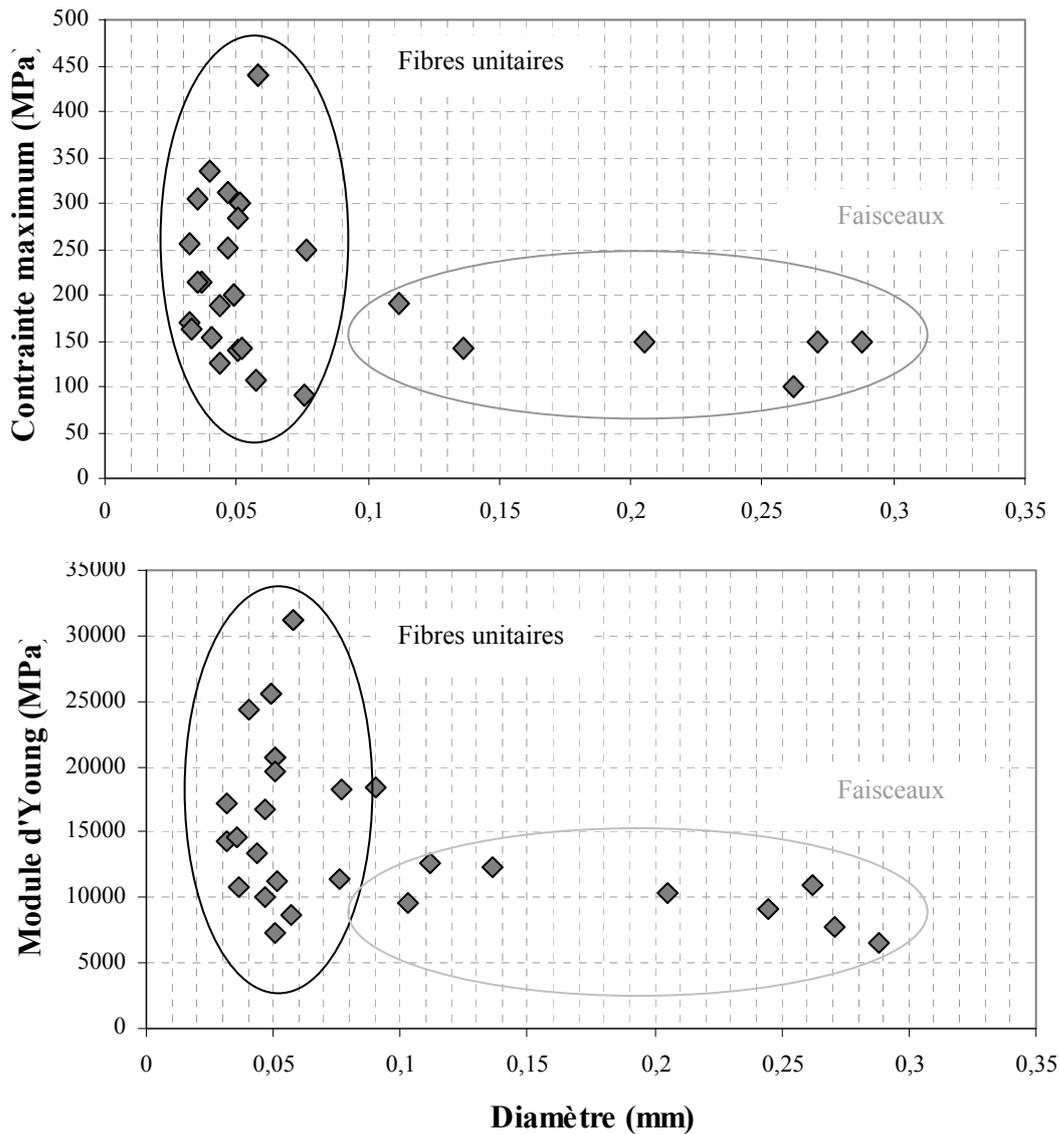
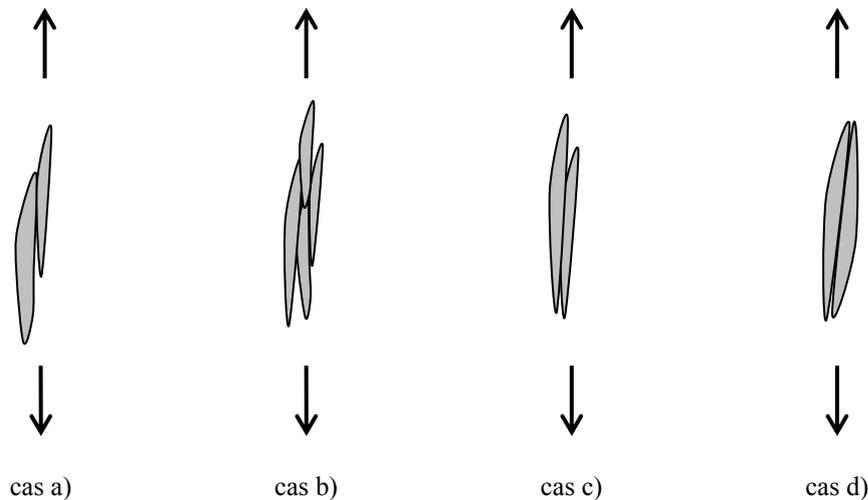


Figure II.22 : Variation de la contrainte maximum et du module d'Young en fonction du diamètre des fibres de chanvre (fibres unitaires et faisceaux)

La Figure II.22 montre l'évolution de la contrainte à rupture et du module d'Young en fonction du diamètre de l'échantillon testé. Ces graphiques montrent que les fibres unitaires ont des propriétés meilleures que les faisceaux. Plus le diamètre des échantillons augmentent plus la contrainte à rupture et le module d'Young vont diminuer. Au dessus d'un diamètre d'échantillon supérieur à 80 – 100 μ m les propriétés vont tendre vers une valeur moyenne asymptotique. Ce comportement asymptotique explique pourquoi les dispersions mesurées pour les valeurs moyennes des propriétés mécaniques sont plus faibles pour les faisceaux que pour les fibres unitaires.



cas a) : l'interface entre deux fibres est sollicitée

cas b) : les interfaces multiples entre plusieurs fibres sont sollicitées

cas c) : une partie du faisceau est mise en tension

cas d) : l'ensemble des fibres unitaires composant le faisceaux sont sollicitées

Figure II.23 : Schéma d'exemples de types de faisceaux pouvant être sollicités en traction

Les résultats précédents ont montré que pour une même variété de chanvre, les propriétés mécaniques ne sont pas les mêmes en fonction de l'échelle à laquelle le matériau est caractérisé. Les faisceaux qui ont un diamètre qui peut mesurer plusieurs centaines de micromètres sont caractérisés à l'échelle mésométrique, alors que les fibres unitaires qui ont un diamètre de l'ordre de quelques dizaines de micromètres sont caractérisées à l'échelle micrométrique. De même que si les fibres unitaires étaient caractérisées à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire à l'échelle de la microfibrille, les propriétés mécaniques seraient différentes. Les faisceaux comme les fibres unitaires sont un assemblage ou une composition de matériaux de nature végétale, ainsi les faisceaux comme les fibres unitaires sont des composites. Les fibres unitaires sont un assemblage de micro-fibrille de cellulose maintenues entre elles principalement par de l'hémicellulose et de la lignine et les faisceaux sont un assemblage de fibres unitaires. L'hétérogénéité de la structure et de la composition de la fibre de chanvre expliquent ces différences de propriétés. Lorsqu'un faisceau est caractérisé, c'est l'ensemble des ces constituants et de l'interaction entre ces constituants qui est caractérisé. Lors d'une mise en tension d'un faisceau, les fibres unitaires sont sollicitées ainsi que l'interface entre ces fibres, la résistance de

l'interface aux sollicitations notamment au cisaillement est très faible comparée aux la résistance de la cellulose à la traction [CHA10], c'est pour cette raison que les faisceaux ont des propriétés plus faibles que les fibres unitaires. Lorsqu'un faisceau est sollicité, différents cas de tension peuvent être envisagés. La Figure II.23 montre différentes possibilités de sollicitation internes du faisceau. La première possibilité (cas a) est d'avoir seulement l'interface entre deux fibres qui est sollicitées, deuxième possibilité (cas b) est d'avoir plusieurs interfaces entre plusieurs fibres unitaires qui sont sollicitées, troisième possibilité (cas c) est d'avoir une ou plusieurs fibres unitaires constituant le faisceau mais pas la totalité qui est sollicitée. Par exemple, dans le cas d'un faisceau constitué de deux fibres unitaires dont une seule est sollicitée, les propriétés mécaniques tendraient à être celle d'une fibre unitaire. Quatrième possibilité (cas d) toutes les fibres du faisceau sont sollicitées. Ces différents états de sollicitation à l'échelle du faisceau ont pour conséquence d'avoir des propriétés différentes de la fibre unitaire à l'échelle microscopique. Ces différents états de sollicitation d'un faisceau expliquent la différence de propriétés mécaniques entre les faisceaux et les fibres unitaires.

III.4 Essais de charge / décharge en traction uniaxiale des fibres et faisceaux

Des essais cycliques de charge – décharge en traction uniaxiale contrôlés en déplacement ont été réalisés pour des fibres unitaires et des faisceaux de chanvre. Ces essais ont pour but d'appréhender le comportement des fibres de chanvre dans le cas d'une charge suivie d'une décharge cyclique. L'objectif est de déterminer dans quelles zones du comportement mécanique les fibres ont un comportement élastique réversible ou plastique irréversible. Dans cette partie quatre résultats d'essais seront présentés. Deux essais de traction pour les fibres unitaires où le cycle de charge – décharge a été fait pour le premier essai seulement dans la zone C du comportement mécanique puis pour le deuxième dans la zone B et C. Deux essais de traction sur des faisceaux de fibres ont été réalisés avec aussi un cycle de charge - décharge seulement dans la zone C et puis dans la zone B et C (Figure II.24).

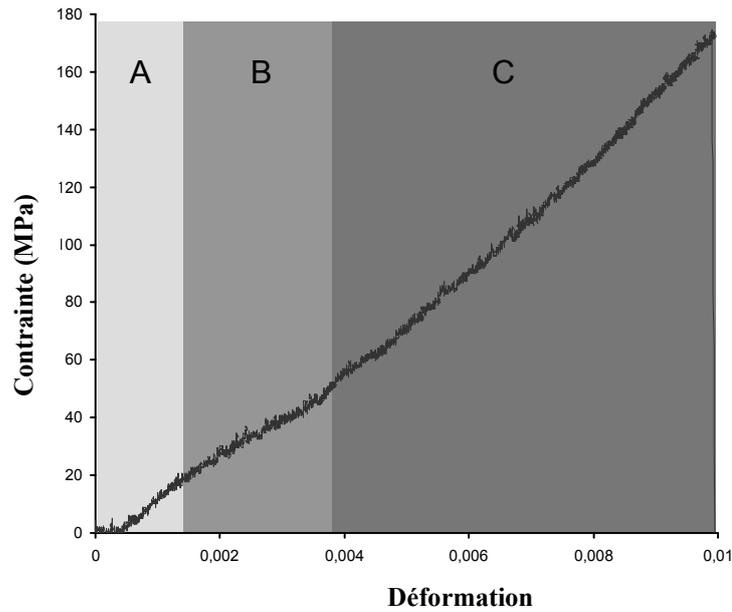


Figure II.24 : Comportement mécanique d'une fibre unitaire (courbe à 3 zones)

III.4.1 Charge et décharge d'une fibre unitaire (zone élastique)

Pour ce premier essai, le cycle de charge a été réalisé dans la partie C du comportement mécanique de la fibre et contrôlé en déplacement. Une première charge avec un déplacement de $110\mu\text{m}$ a été imposée (Figure II.25a). Ce déplacement de la traverse correspond à environ 40% de la déformation dans la dernière partie de la courbe de traction (zone C), s'en suit une décharge où le déplacement de la traverse a été ramené à une valeur correspondant au seuil de transition entre la zone B et C. Après avoir effectué un premier cycle de chargement, deux autres cycles ont été réalisés avant que la fibre se rompe. Chaque cycle correspond à un déplacement de la traverse d'environ $50\mu\text{m}$. La réponse du matériau à ce déplacement cyclique est donnée par la force de traction au cours du temps. Comme le montre la Figure II.25b, il existe une symétrie de la force de traction entre la charge et la décharge, où l'incrément de force en fonction du temps est le même au signe près. Cette symétrie met en évidence le comportement réversible de la fibre unitaire lorsque le chargement se situe dans la zone C.

De plus l'évolution de la contrainte de traction en fonction du déplacement de la traverse (Figure II.26), dans la zone C est linéaire pour la charge et la décharge. La contrainte suit le même chemin au déchargement qu'au moment du chargement. Ceci démontre l'élasticité de la fibre unitaire (dans la zone C) à partir d'un certain seuil de contrainte.

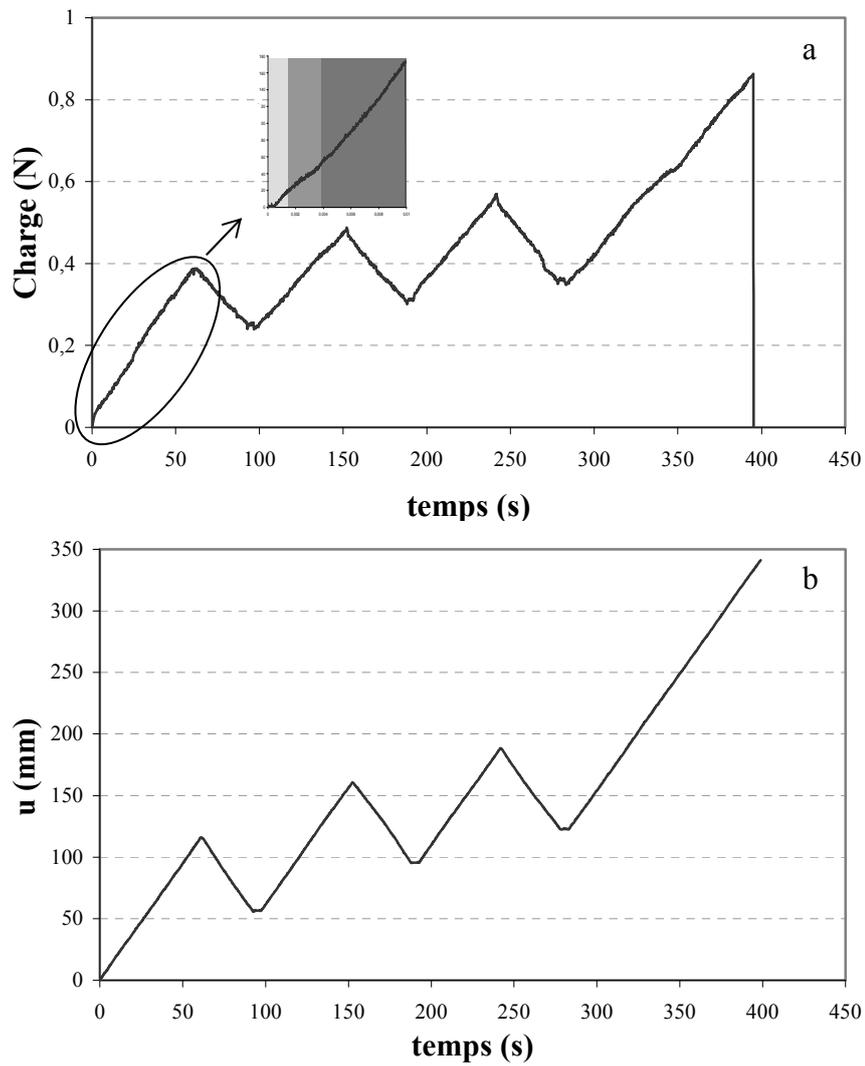


Figure II.25 : Charge (a) et déplacement (b) de la traverse pour un essai de charge / décharge (dans la zone C) en traction pour une fibre unitaire

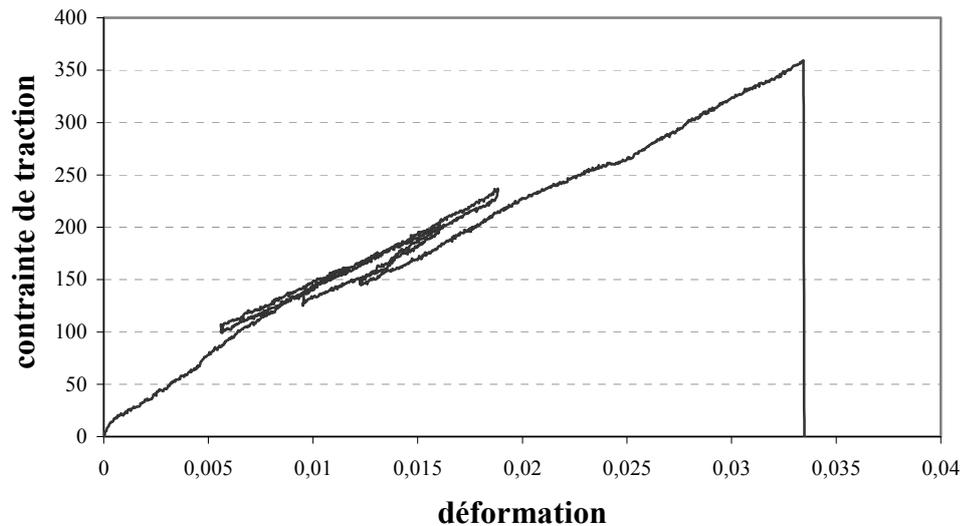


Figure II.26 : Evolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation pour un chargement cyclique charge / décharge (dans la zone c) d'une fibre unitaire

III.4.2 Charge et décharge d'une fibre unitaire (zone élastique et zone plastique)

Après avoir analysé le comportement des fibres unitaires sollicitées en charge puis décharge de manière cyclique dans leur zone de comportement élastique, des essais de charge - décharge pour l'ensemble du comportement ont été réalisés. Ci-dessous un résultat d'essais mettant en évidence un comportement généralisé de la fibre unitaire soumise à ce type de chargement cyclique est montré. Pour cet essai, quatre cycles ont été réalisés. La rupture de la fibre se produit pendant la charge du quatrième cycle (Figure II.27). Pour la première charge, un déplacement de $200\mu\text{m}$ a été imposé, correspondant à environ 60% de la déformation totale. Ensuite lors de la première décharge le déplacement de la traverse a été ramené à son état initial c'est-à-dire à $0\mu\text{m}$. Le premier cycle correspond à une charge - décharge dans la zone A, B et C. Pour les deux cycles suivants un déplacement de $120\mu\text{m}$ a été imposé oscillant entre 80 et $200\mu\text{m}$. Les deuxième et troisième cycles correspondent une charge - décharge dans la zone B et C.

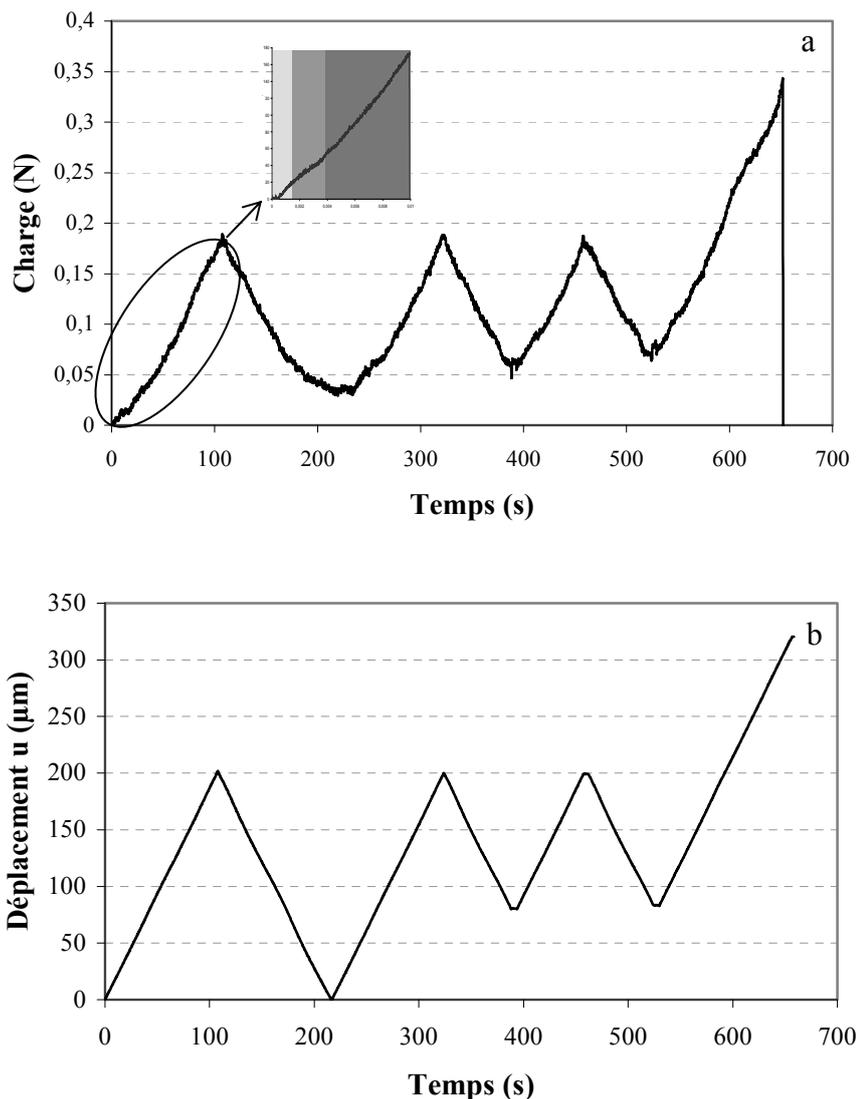


Figure II.27 : Charge (a) et déplacement (b) en fonction du temps d'essai

Comme pour l'essai précédent (partie III.4.1), le chargement et le déchargement dans la zone élastique (zone C seulement) suit le même chemin, ceci démontrant le comportement linéaire réversible d'une fibre unitaire. A l'inverse lorsque le chargement et le déchargement ont lieu dans les zones A et C combinées, le comportement de la fibre ne suit pas le même chemin. De cette étude trois phénomènes peuvent être constatés :

- **Première constatation** : lorsque le déplacement est ramené à $0\mu\text{m}$, la force ne revient pas à 0N , démontrant la plastification et le changement d'état de la

fibre. Visuellement, cette déformation irréversible se traduit par un fléchissement de la fibre (comme le montre la Figure II.28). Le fait que la force de traction ne soit pas nulle montre que des contraintes résiduelles restent dans la fibre après une déformation plastique. Concernant les deuxième et troisième cycles, où le déplacement va jusqu'à $200\mu\text{m}$ et revient à $80\mu\text{m}$, ce seuil de charge résiduelle augmente légèrement après chaque cycle passant de $0,067\text{N}$ pour le premier cycle à $0,077\text{N}$ pour le deuxième cycle. Ainsi après chaque cycle, les contraintes résiduelles causées par la déformation plastique de la fibre répétée à chaque cycle augmentent.



Figure II.28 : Photographie d'une fibre de chanvre après décharge (déplacement ramené à $0\mu\text{m}$)

- **Deuxième constatation** : après chaque cycle la force maximum pour un déplacement imposé de $200\mu\text{m}$ diminue légèrement passant de $0,183\text{N}$ pour le premier cycle à $0,175\text{N}$ représentant une chute d'environ 4%. Cette diminution montre que la fibre unitaire subit un endommagement après chaque cycle de charge puis de décharge.

La courbe suivante (Figure II.29) montre le comportement mécanique en traction de la fibre unitaire pour une sollicitation en chargement puis en déchargement cyclique avec les particularités citées au dessus. La contrainte de traction est déterminée en considérant la surface de la fibre S_0 avant

sollicitation. Comme le montre la courbe, pour le premier cycle, la charge n'est pas identique au déchargement (zone A et B), la contrainte ne suit pas le même chemin au moment de la décharge. Ainsi ce phénomène démontre le caractère irréversible du comportement mécanique d'une fibre unitaire (zone B) avant d'atteindre la contrainte seuil d'élasticité pour laquelle le comportement de la fibre devient élastique. Après un cycle de chargement, la contrainte suit le même chemin en déchargement qu'en chargement comme le montre le deuxième et troisième cycle. Cela démontre qu'après une plastification de la fibre causée par le premier chargement, la fibre devient entièrement élastique si la contrainte imposée reste au dessus du seuil d'élasticité.

- **Troisième constatation** : après un premier cycle de chargement et une plastification de la fibre, le comportement mécanique reste non-linéaire en début de sollicitation et puis devient linéaire. Cela montre que le comportement est à la fois élastique non-linéaire en début de sollicitation jusqu'à la contrainte seuil d'élasticité à partir de laquelle le comportement de la fibre devient élastique linéaire. Ce comportement particulier couplant un comportement élastique avec un comportement non-linéaire après un cycle de charge confirme que la zone B plastique du comportement mécanique d'une fibre unitaire n'est pas due à un allongement de la fibre mais causé par un phénomène d'endommagement et de rupture de l'interface entre les constituants de la fibre unitaire. Ce phénomène a été expliqué dans la partie III.1.

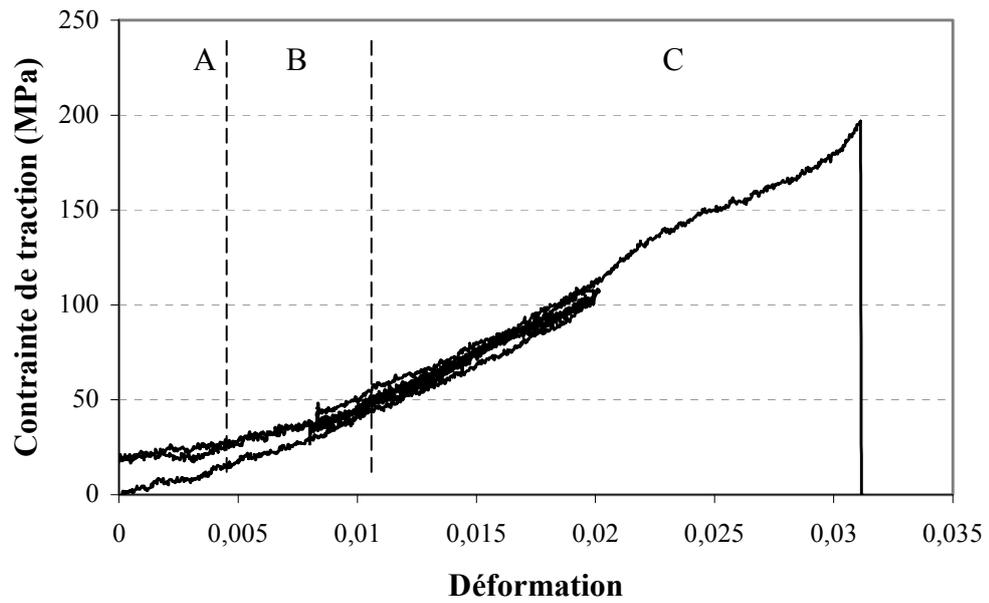


Figure II.29 : Evolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation pour un chargement cyclique charge / décharge (zone A,B et C) d'une fibre unitaire

Pour résumer, ces deux essais de charge – décharge ont démontré le comportement purement élastique de la fibre dans la dernière zone (zone C) et le comportement plastique de la fibre avant d’atteindre la contrainte seuil d’élasticité (zone B). Après un premier cycle de charge, la zone B initialement plastique devient élastique montrant un changement d’état structurel de la fibre unitaire.

Partie IV . Influence des conditions de culture (apport d'eau supplémentaire et densité de semis plus importante)

Cette étude a pour but de mettre en évidence l'influence des conditions de culture et de la variété de chanvre cultivée (Fedora et Sativa) sur les propriétés mécaniques des fibres. Des essais de traction uniaxiale ont été menés pour six types de fibres (Tableau II-11). Deux variétés de fibres de chanvre ont été testées, une variété dite « standard » (fibre de type A) et une autre variété qui est semblable à la précédente mais qui produit plus de fibres (fibre de type B). Pour chaque variété de chanvre, trois conditions de culture ont été analysées.

- La première condition est dite « standard », elle sera considérée comme la condition de référence.
- La deuxième condition de culture est l'apport d'eau supplémentaire, c'est-à-dire le chanvre a été soumis à une fréquence d'irrigation plus élevée avec une quantité d'eau plus importante.
- La troisième condition de culture est une densité de semis plus importante (deux fois supérieure par rapport à la densité de semis pour la condition standard).

Les faisceaux de fibres ont été extraits mécaniquement de la tige alors que les fibres unitaires ont été extraites manuellement. Les caractérisations des fibres de chanvre présentées dans la partie III.1.3 et III.2.3 correspondent au chanvre de type A et soumis à une condition de culture standard.

Tableau II-11: Détails des différents types de chanvre caractérisés

Chanvre classique (type de fibre A)	Chanvre produisant plus de fibres (type de fibre B)
Standard n°40 (fibre n°1)	Standard n°14 (fibre n°4)
Apport d'eau supplémentaire n° 46 (fibre n°2)	Apport d'eau supplémentaire n° 20 (fibre n°5)
Densité de semis plus importante n° 12 (fibre n°3)	Densité de semis plus importante n° 62 (fibre n°6)

IV.1.1 Données géométriques

▪ **Fibres unitaires :**

Le processus décrit dans la partie Partie II a permis de déterminer la section transversale des fibres. Les résultats de ces mesures de géométrie sont présentés dans la Figure II.30. Les fibres n°1, 2 et 6 ont un diamètre moyen d'environ 45µm. Pour les trois autres types de fibres des diamètres plus grands ont été mesurés de l'ordre de 60 µm.

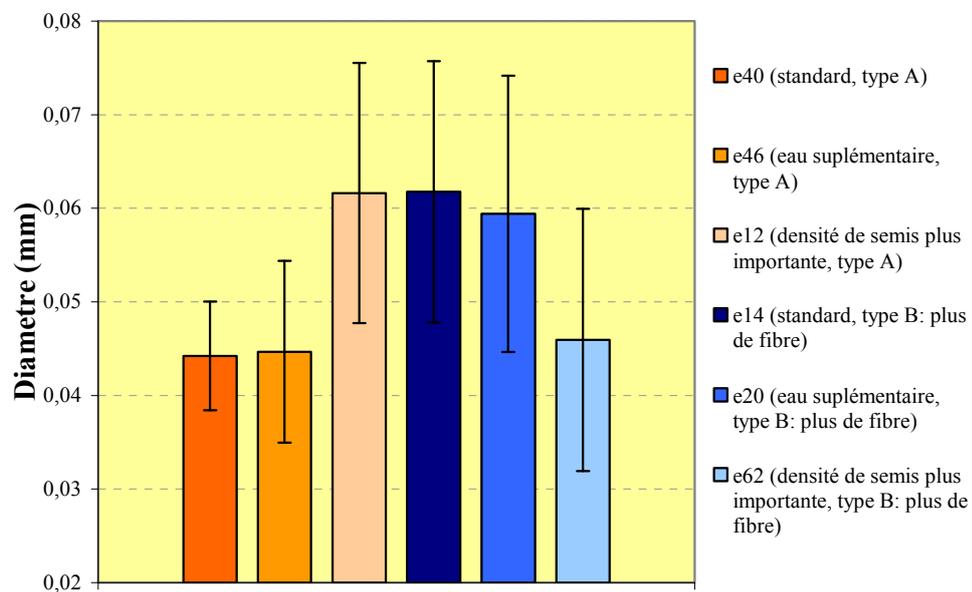


Figure II.30 : Diamètre des fibres de chanvre testées en fonction du type de culture

Ces différences de taille montrent que les fibres unitaires n'ont pas les mêmes dimensions pour un même type de fibre mais aussi d'une variété à l'autre. La dispersion autour de la valeur moyenne variant de ± 5 à $\pm 15 \mu\text{m}$ met en évidence que quelles que soient la variété et les conditions de culture, la taille n'est pas la même pour un même type. De plus, les conditions de culture ont une influence sur cette géométrie puisque les diamètres moyens mesurés varient. Dans le cas d'une variété de chanvre classique (couleurs orange), les fibres extraites de la plante avec une densité de semis plus importante ont des diamètres les plus grands. Pour la deuxième variété, une tendance inverse est constatée. Mais ces résultats seuls ne peuvent pas expliquer l'impact de telles conditions sur la géométrie et la taille des fibres unitaires.

Une étude plus approfondie sur les mesures de la taille des fibres en fonction de leur localisation dans la hauteur de la tige mais aussi dans la section transversale pourrait apporter des informations plus pertinentes sur l'influence de la culture du chanvre sur la taille des fibres.

▪ **Faisceaux de fibres :**

De même la caractérisation géométrique a permis de déterminer la valeur moyenne du diamètre des faisceaux. Comme le montre le tableau suivant (Tableau II-12), les faisceaux de fibres ont un diamètre inégal. Pour certains essais, des faisceaux de 100 μ m ont été testés alors que des essais de caractérisation avec du chanvre de nature différente et soumis à différentes conditions de culture, les diamètres moyens des faisceaux peuvent atteindre 250 μ m.

Tableau II-12 : Données géométriques des faisceaux de chanvre

	Diamètre (mm)	
	Valeur Moyenne	Ecart Type
e40 (condition standard, type de fibre A)	0,235	0,056
e46 (condition avec eau supplémentaire, type de fibre A)	0,088	0,017
e12 (condition avec une densité de semis plus importante, type de fibre A)	0,147	0,034
e14 (condition standard, type de fibre B: plus de fibres)	0,120	0,026
e20 (condition avec eau supplémentaire, type de fibre B: plus de fibres)	0,132	0,038
e62 (condition avec une densité de semis plus importante, type de fibre B: plus de fibres)	0,101	0,019

Comme pour les fibres unitaires, les faisceaux ont des diamètres qui varient en fonction de la variété de chanvre et des conditions de culture. Les faisceaux étant obtenus par processus thermo-mécanique, leurs diamètres présentent de fortes dispersions pouvant atteindre des valeurs de plus de 20%. La tendance constatée pour les fibres unitaires n'est pas la même pour les faisceaux. La condition de culture

standard pour une variété de chanvre standard donne des faisceaux avec le diamètre moyen le plus grand de 234 μ m. Pour la deuxième variété de chanvre, les différences sont moins importantes que pour les fibres unitaires avec des diamètres allant de 100 à 130 μ m. Ces données n'étaient pas suffisantes pour déduire l'influence d'une condition de culture sur les dimensions d'une fibre unitaire et elles le sont encore moins pour les faisceaux.

IV.2 Caractérisation des fibres unitaires

Dans cette partie sont présentés les résultats des essais de caractérisation pour des fibres unitaires provenant de deux types de chanvre. Comme le montre la Figure II.31, la déformation à rupture est identique quelque soit le type de chanvre. La déformation à rupture est de $2,80\pm 1,03\%$ pour le chanvre de type A et de $3,05\pm 1,28\%$ pour le type de chanvre B qui produit plus de fibres. Compte tenu de l'incertitude des mesures aucune différence n'est constatée pour la déformation à rupture. Alors que la contrainte maximum et le module d'Young changent en fonction du type de chanvre. La contrainte maximum est de 211 ± 88 MPa pour le chanvre standard alors qu'elle est de 103 ± 36 MPa pour la variété de chanvre qui produit plus de fibres. Ainsi le chanvre standard présente une meilleure résistance à la rupture que le chanvre de type B.

Le chanvre de type A avec un module d'Young moyen de 12279MPa produit des fibres unitaires trois fois plus rigides que le chanvre de type B. Ainsi le chanvre produisant plus de fibres (types B) présente des propriétés mécaniques plus faibles. Le taux de fibres contenues dans la tige influence les propriétés mécaniques. Dans le cas du chanvre, plus la quantité de fibres est importante plus la qualité (d'un point de vue mécanique) se voit diminuée.

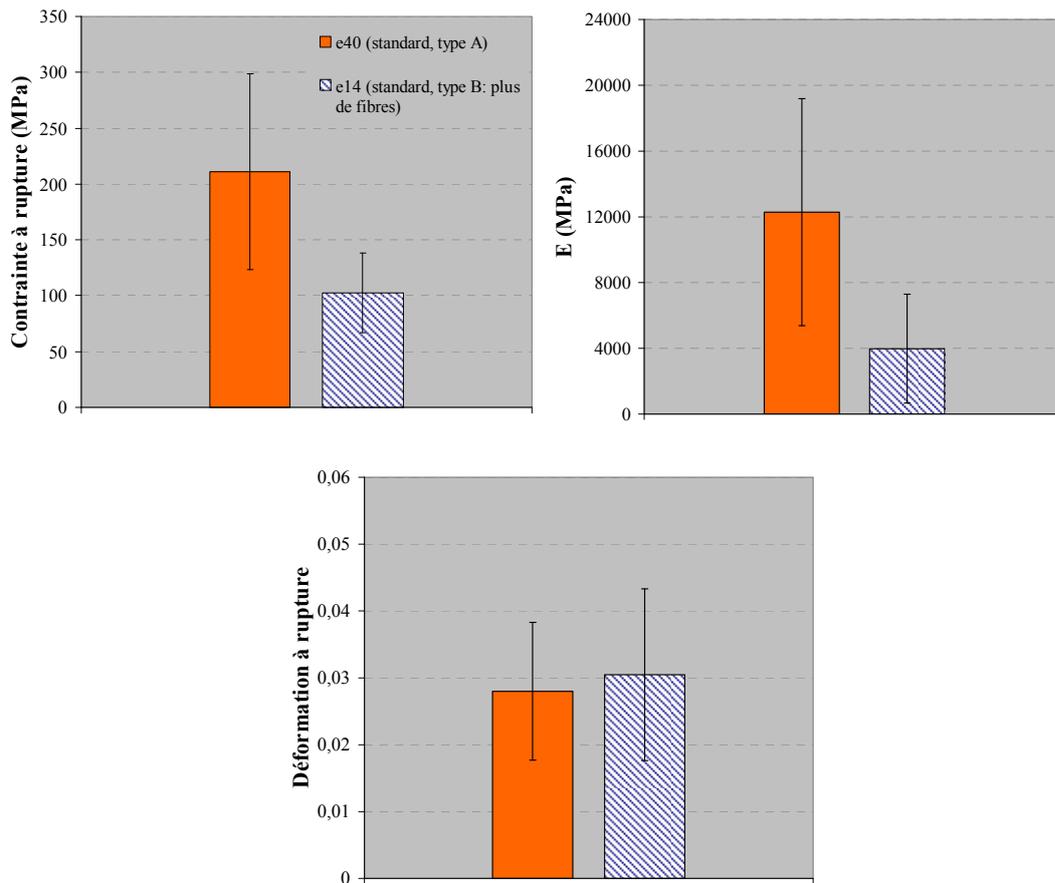


Figure II.31 : Propriétés mécaniques des fibres unitaires en fonction de la variété de chanvre

Après avoir étudié l'influence de la variété de chanvre sur les propriétés mécaniques des fibres, une étude a été menée comparant trois types de fibres soumises à trois conditions de culture différentes. Les fibres unitaires extraites de ces chanvres ont été testées en traction. Pour rappel les trois conditions de culture sont :

- **Condition de culture n° 1** : condition de culture standard où les conditions (apport d'eau, densité de semis, apport d'azote, type de sol,...) employées pour cette culture sont prises comme référence.
- **Condition de culture n° 2** : condition de culture pour laquelle l'apport en eau a été augmenté (la quantité d'eau a été multipliée par deux) par rapport à la condition de référence n°1.
- **Condition de culture n° 3** : condition de culture pour laquelle la densité de semis a été multipliée par deux par rapport à la condition référence.

Dans un premier temps, l'influence de ces conditions de cultures sur les propriétés mécaniques pour le chanvre de type A a été regardée (Figure II.32). Les résultats des essais de caractérisation ont montré que les conditions de cultures influençaient dans certains cas les propriétés. L'apport d'eau supplémentaire pour le chanvre A ne change pas la contrainte à rupture et le module d'Young mais diminue la déformation à rupture. Ainsi cultiver le chanvre avec plus d'eau n'augmente ni sa rigidité, ni sa résistance mais a tendance à fragiliser la fibre. Dans le cas de la troisième condition de culture, les résultats montrent toujours pour le chanvre A que la densité de semis a une influence sur les propriétés mécaniques. Augmenter la densité de semis a tendance à beaucoup diminuer le module d'Young, celui-ci étant divisé par trois et a aussi tendance à réduire la contrainte maximum de 25%. La déformation à rupture à l'inverse augmente d'environ 1%. Ainsi augmenter la densité de semis diminue les propriétés mécaniques mais permet à la fibre de se déformer plus avant de se rompre en augmentant sa ductilité.

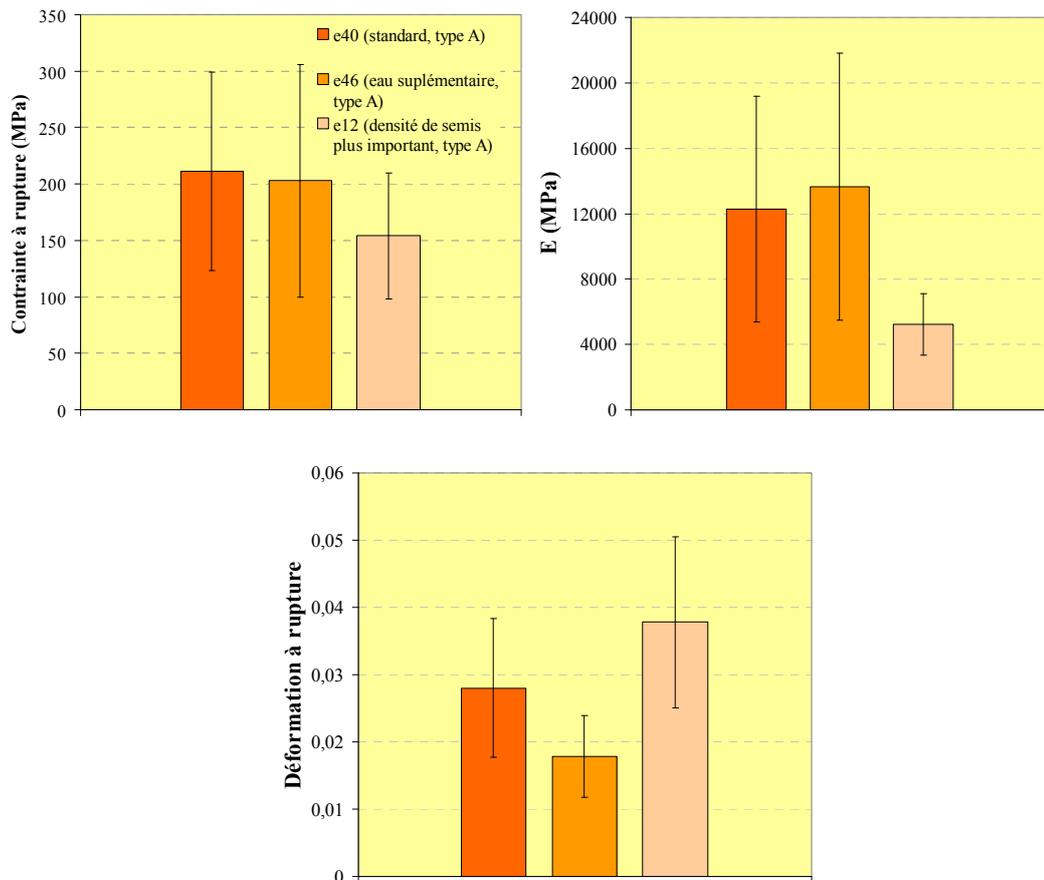


Figure II.32 : Propriétés mécaniques des fibres unitaires en fonction des conditions de cultures (variété standard, type A)

Après avoir étudié l'influence de la culture du chanvre sur ces caractéristiques pour la variété standard de chanvre, des essais complémentaires ont été menés pour le deuxième type de chanvre. Les résultats de ces essais ne montrent pas les mêmes résultats (Figure II.33). Cette fois-ci l'apport d'eau a un impact sur la rigidité de la fibre puisque le module d'Young augmente d'un peu moins de 30%. La contrainte à rupture diminue légèrement mais cette diminution n'est pas exhaustive au vue des écarts types mesurés. Comme pour le chanvre de type A, la déformation pour le chanvre B diminue avec un apport d'eau supplémentaire. La diminution est cette fois-ci supérieure à 50% passant de 3 à 1,3% de déformation à rupture. Ainsi pour une variété de chanvre qui produit plus de fibres, l'apport d'eau fragilise la fibre, influence peu sa résistance mécanique et augmente sa rigidité. Concernant l'augmentation de la densité de semis, il est difficile de conclure sur son influence puisque malgré un changement des valeurs moyennes de la contrainte à rupture, du module d'Young et de la déformation à rupture, les variations ne sont pas significatives au regard des écarts types.

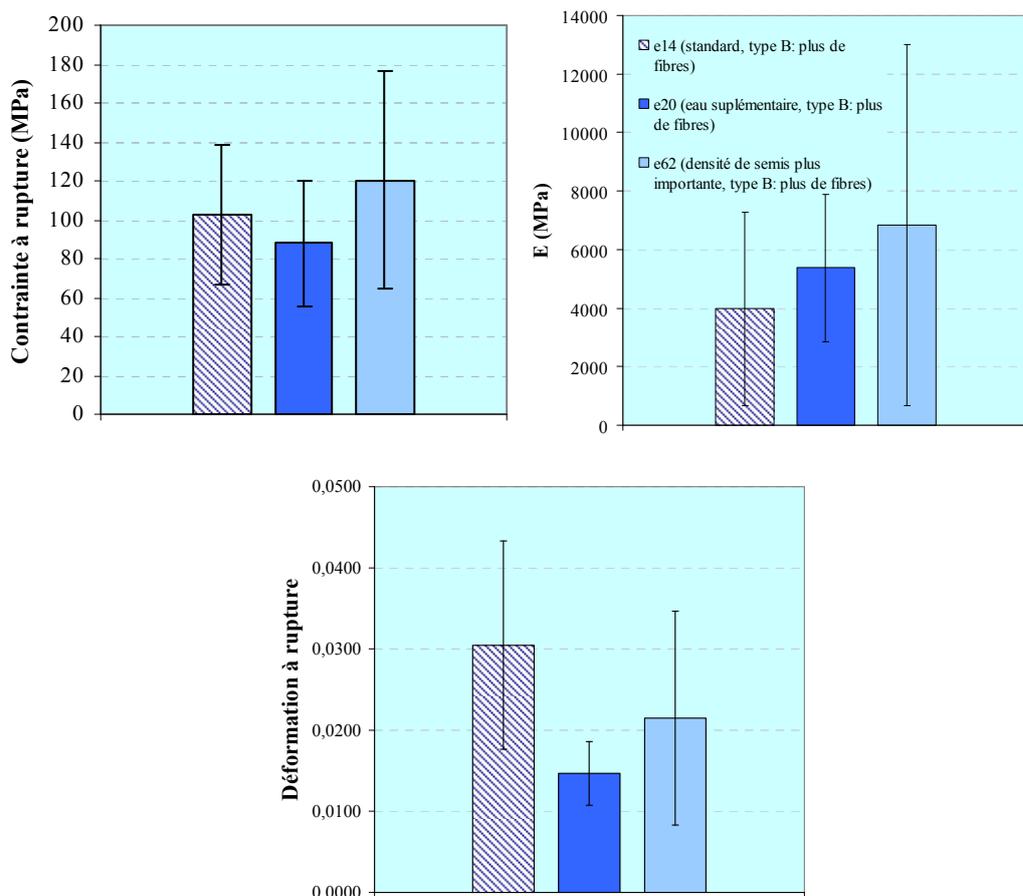
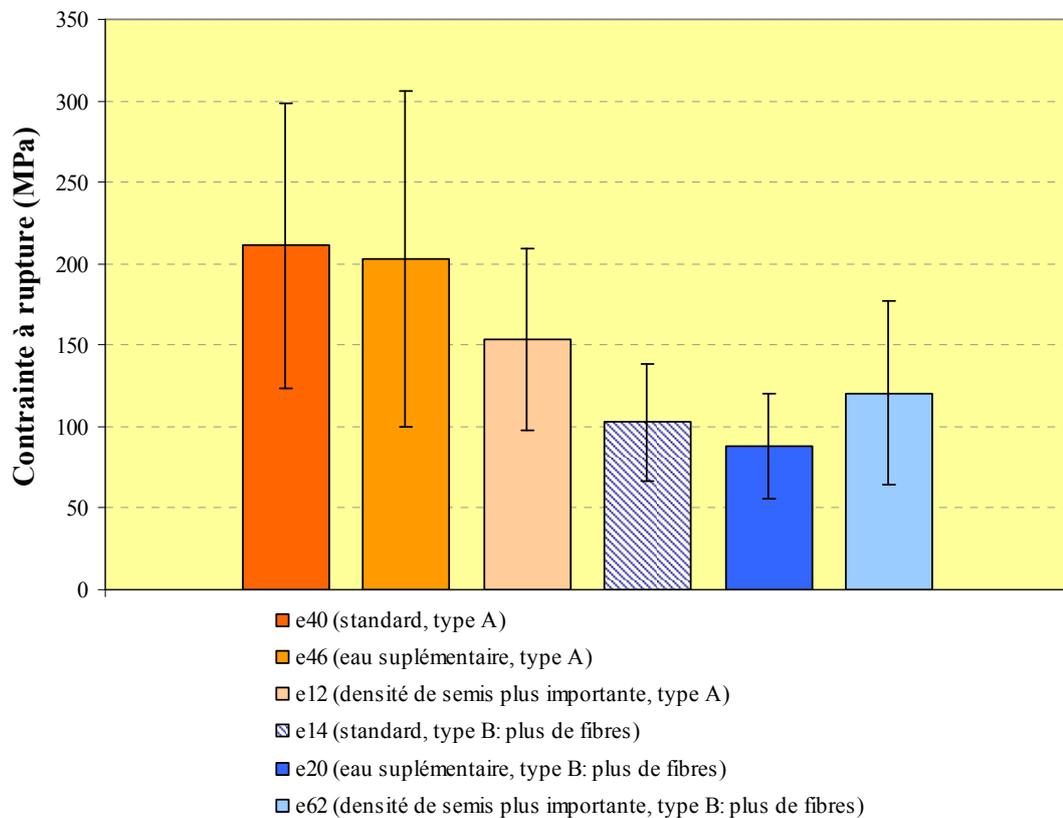


Figure II.33 : Propriétés mécaniques des fibres unitaires en fonction des conditions de cultures (variété produisant plus de fibres, type B)

Une synthèse des résultats précédents est montrée en Figure II.34 et Figure II.35. Pour résumer, le chanvre type A a des meilleures propriétés mécaniques que le chanvre de type B quelque soit les conditions de culture. Ainsi le taux de fibres contenu dans la tige influence les propriétés mécaniques. Pour la variété de chanvre B, les résultats des essais de caractérisation ne montrent pas de différence significative au vue des dispersions des résultats malgré une légère augmentation du module d'Young dû à une irrigation plus abondante en eau. Par contre pour les essais menés pour le chanvre standard A, les résultats ont montré l'influence la densité de semis sur la résistance et le module d'Young d'une fibre unitaire. Les propriétés mécaniques diminuent si la densité est multipliée par deux. Par contre l'apport d'eau supplémentaire ne change pas les propriétés. Les conditions de culture ont aussi une influence sur la déformation à rupture, l'apport d'eau fragilise la fibre puisque la déformation à rupture est diminuée pour les deux variétés de chanvre. L'augmentation de la densité de semis permet d'avoir une plus grande déformation à rupture pour le chanvre A rendant la fibre plus ductile et à l'inverse diminue la déformation à rupture pour le chanvre B rendant la fibre plus fragile.



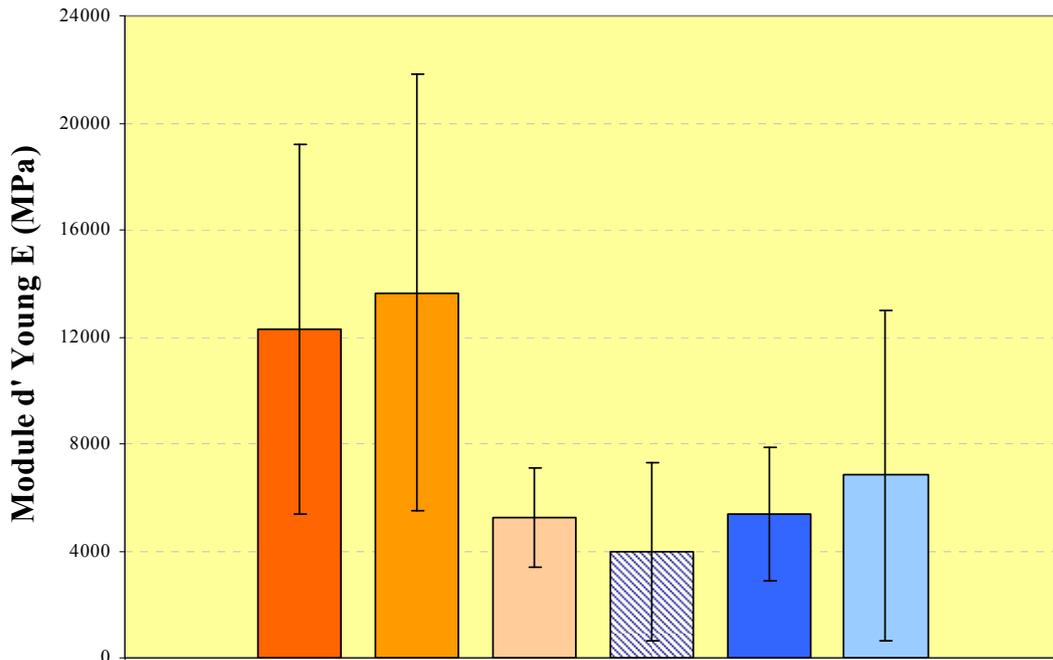


Figure II.34 : Propriétés mécaniques des fibres unitaires de chanvre en fonction du type de fibres

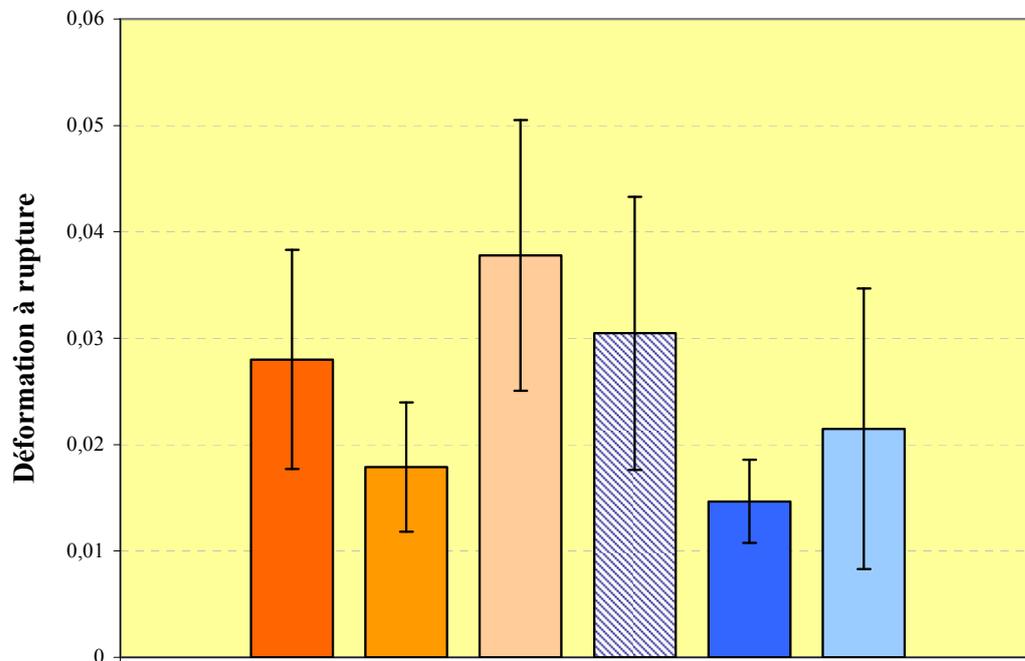


Figure II.35 : Déformation à rupture des fibres unitaires de chanvre en fonction du type de fibres

IV.3 Caractérisation des faisceaux

Après avoir caractérisé les fibres unitaires, des essais de traction sur des faisceaux de fibres pour les mêmes variétés de chanvre et les mêmes conditions de culture ont été réalisés. Les résultats suivants présentent les propriétés mécaniques pour les six types de fibres testés. Les variations des propriétés en fonction des conditions de culture constatées pour les faisceaux suivent en grande partie les mêmes tendances que celles trouvées pour les fibres unitaires. Ainsi dans cette partie, seules les différences de tendance entre les faisceaux et les fibres unitaires seront expliquées.

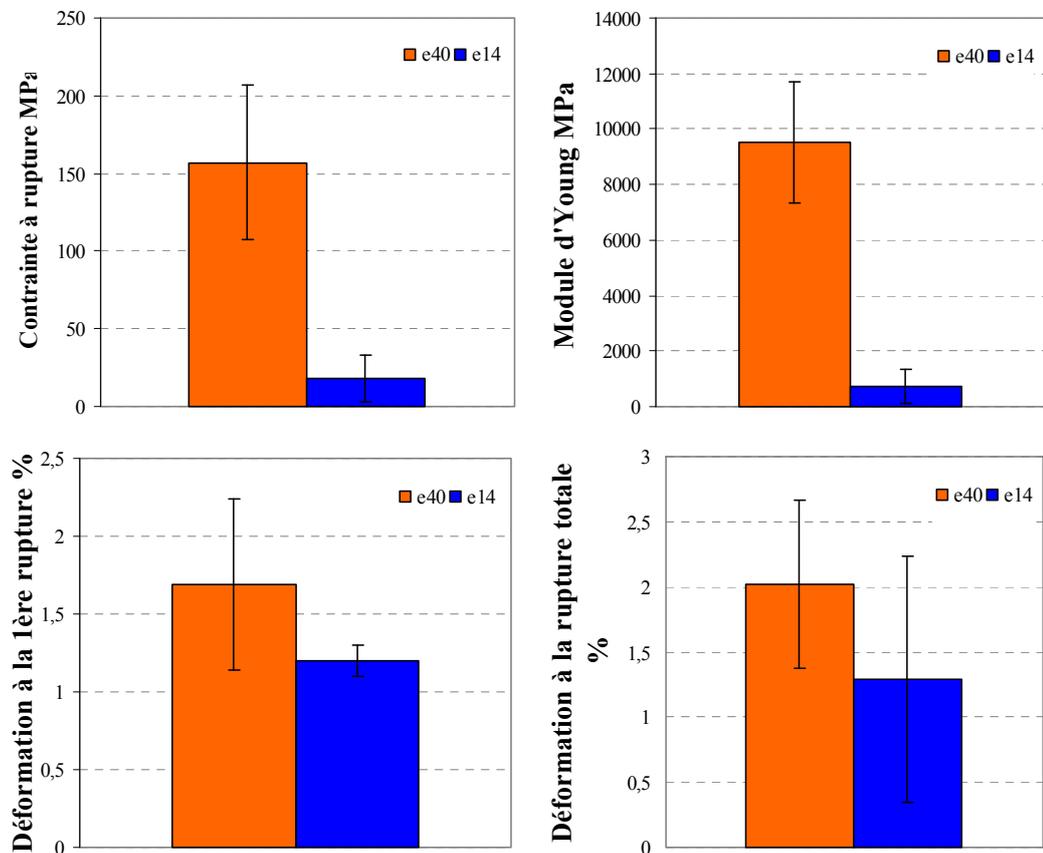


Figure II.36 : Propriétés mécaniques des faisceaux de chanvre pour deux variétés de chanvre

La Figure II.36 compare les résultats obtenus pour les deux variétés de chanvre et soumis à la même condition de culture (condition de culture n°1). Comme pour les fibres unitaires, les faisceaux n'ont pas le même comportement d'une variété de chanvre à l'autre. La contrainte à rupture et le module d'Young sont beaucoup plus faibles pour le chanvre B que pour le chanvre A. La contrainte à rupture pour les

faisceaux de chanvre standard A est de 157 ± 50 MPa alors qu'elle n'est seulement de 18 ± 15 MPa pour les faisceaux de chanvre B. Les faisceaux de chanvre A ont un module d'Young de 9520 ± 2157 MPa alors que pour les faisceaux de chanvre B le module d'Young est de seulement 739 ± 632 MPa.

En comparant ces résultats avec ceux obtenus pour les fibres unitaires (Figure II.31), les écarts de propriétés entre les deux types de chanvre sont beaucoup plus importants pour les faisceaux que pour les fibres unitaires. Dans le cas des faisceaux, la variation des propriétés n'est pas seulement la cause du changement de variété de chanvre, mais est aussi une conséquence de la structure composite des faisceaux. Entre deux variétés de chanvre, la structure et la composition chimique des fibres unitaires qui composent le faisceau ainsi que l'interface et l'agencement des fibres unitaires dans le faisceau ne sont pas les mêmes d'une variété à une autre.

Pour le chanvre type A standard (Figure II.37), l'apport d'eau supplémentaire change les propriétés mécaniques du faisceau, ce qui n'était pas le cas pour la fibre unitaire. La contrainte à rupture chute d'environ 25% alors que le module d'Young augmente de plus de 2000MPa. Cela montre qu'une condition de culture ne peut avoir aucune influence sur les fibres unitaires et pourtant changer les propriétés des faisceaux composés par ces mêmes fibres unitaires, en modifiant l'interface et l'agencement des fibres. Pour la troisième condition de culture (densité de semis plus importante), les résultats des faisceaux suivent les mêmes tendances que celles constatées pour les fibres unitaires. Les essais ont montré aussi que la déformation à la première rupture et à la rupture totale du faisceau chute lorsqu'un apport d'eau supplémentaire ou une augmentation de la densité de semis est appliquée. L'apport d'eau supplémentaire rend plus fragile le faisceau ainsi que l'augmentation de la densité de semis contrairement à ce qui a été constaté pour la fibre unitaire.

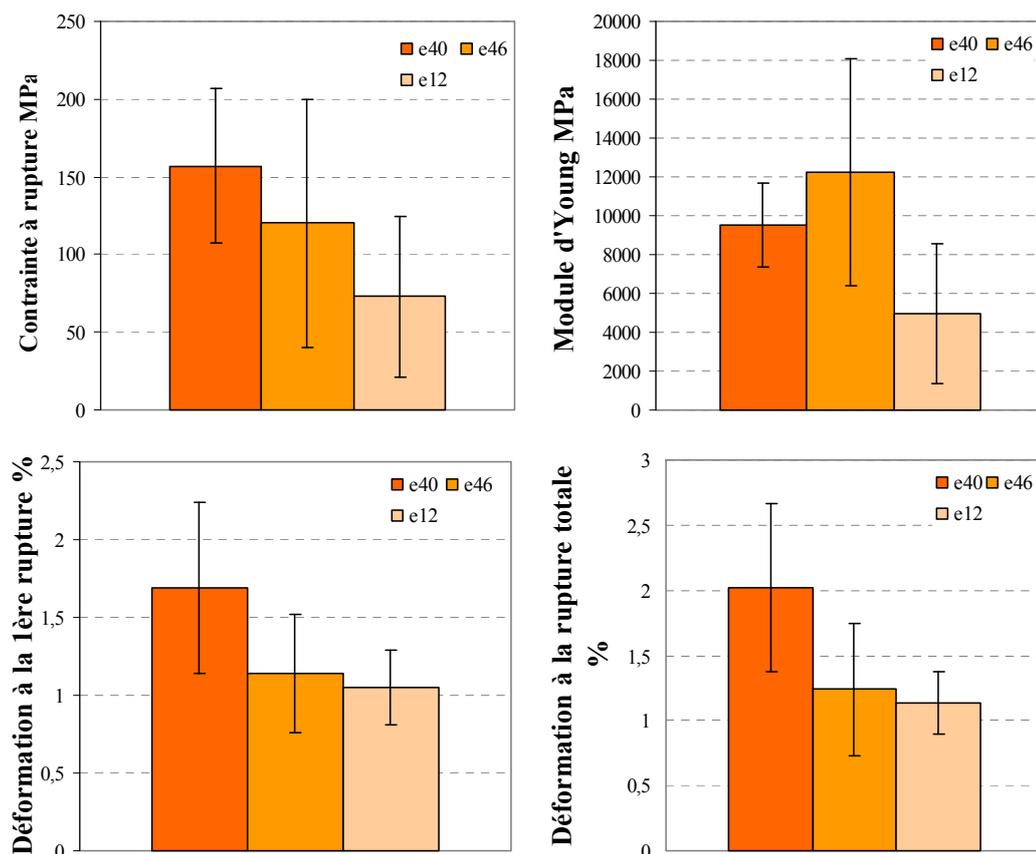


Figure II.37 : Propriétés mécaniques des faisceaux de chanvre pour différents conditions de culture (variété de chanvre A)

Pour les faisceaux de chanvre type B qui produit plus de fibres, augmenter la densité de semis permet d'obtenir des faisceaux avec des propriétés mécaniques plus intéressantes (Figure II.38) alors que ce n'était pas le cas pour les fibres unitaires. Les valeurs moyennes des propriétés mécaniques pour la condition de culture standard et pour la condition de culture n° 2 étant faibles, il n'est pas possible d'interpréter et de déterminer s'il y a une différence tout en étant objectif. Les déformations à la première rupture et rupture totale sont identiques, ainsi pour le chanvre B les différentes conditions de culture n'influent pas sur la déformation du faisceau.

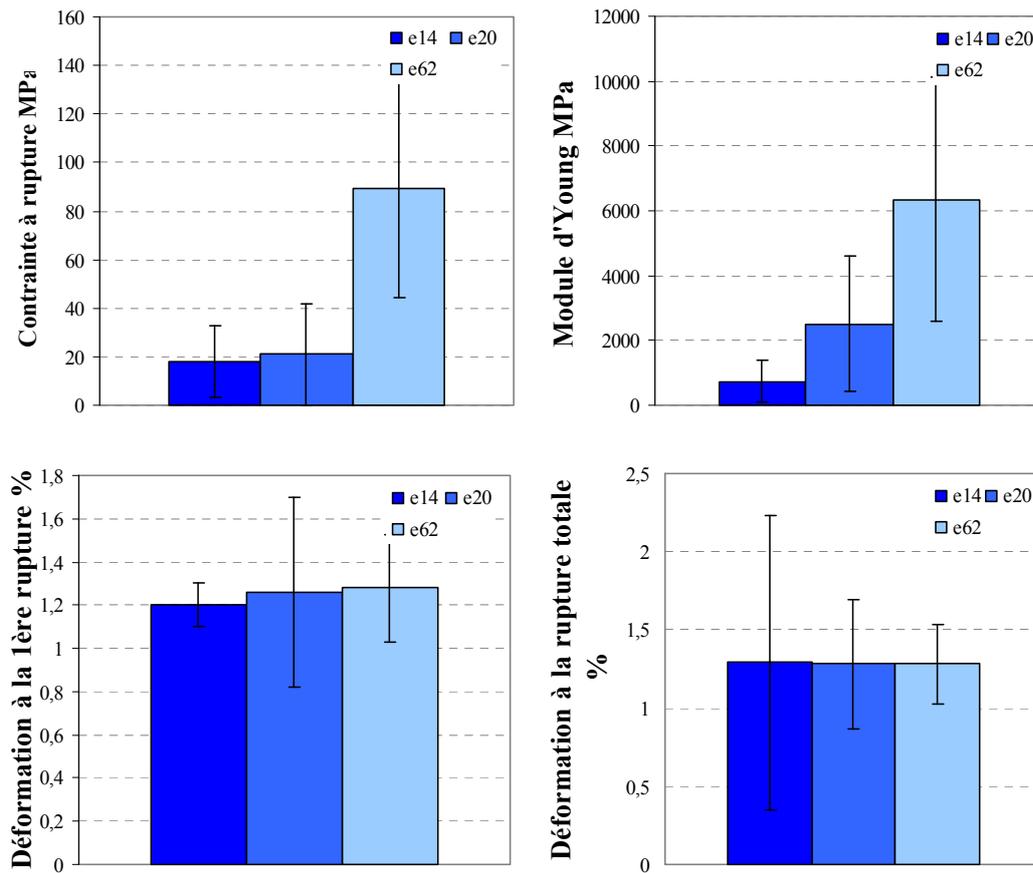


Figure II.38 : Propriétés mécaniques des faisceaux de chanvre pour différents conditions de culture (variété de chanvre B)

La Figure II.39 est une synthèse des propriétés mécaniques (contrainte à rupture, module d'Young et déformation à la première rupture ou à la rupture totale) pour des faisceaux de fibres de deux variétés de chanvre et soumis à différentes conditions de culture. Comme pour les fibres unitaires, les faisceaux de chanvre standard type nA ont de meilleures propriétés mécaniques que les faisceaux provenant du chanvre type B. Ainsi la teneur en fibre dans le chanvre influence les propriétés à la fois des faisceaux et des fibres unitaires. Les faisceaux qui ont les moins bonnes propriétés mécaniques sont les faisceaux extraits du chanvre type bB et soumis aux conditions de culture standard et à un apport d'eau supplémentaire. Contrairement aux fibres unitaires, les faisceaux de chanvre type B soumis à une densité de semis plus importante voient leurs propriétés augmentées.

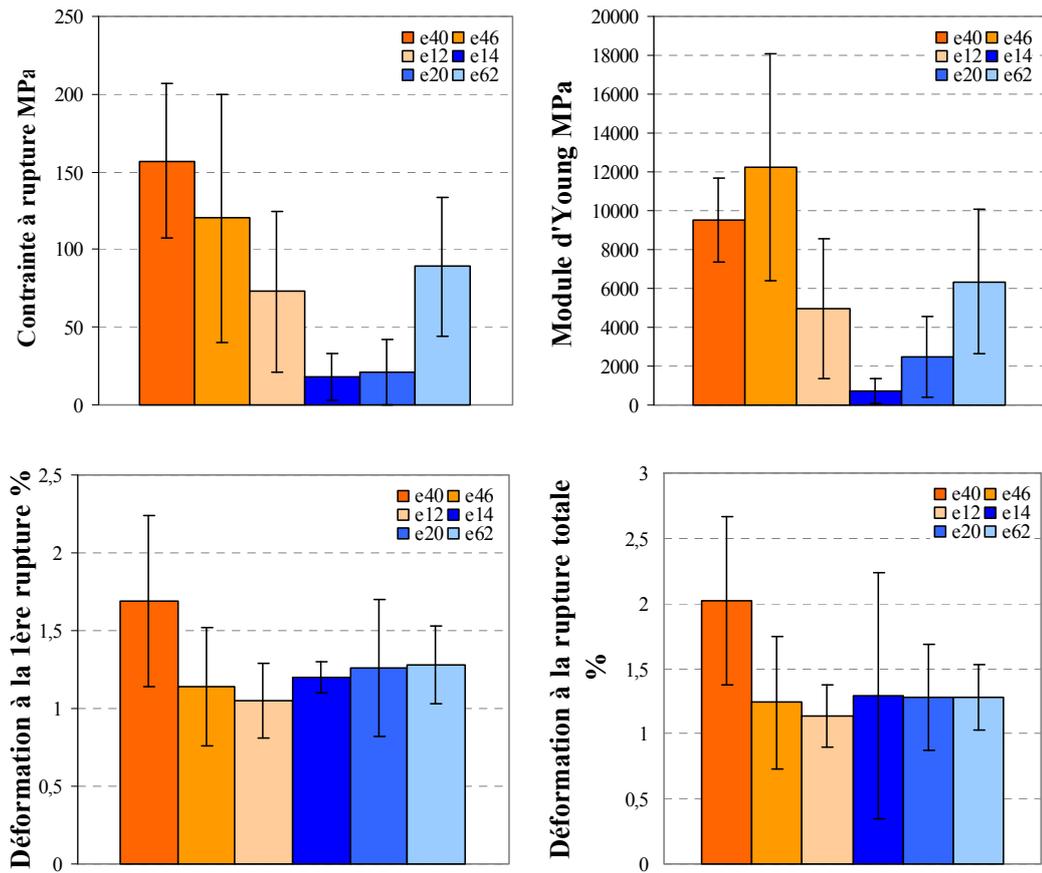


Figure II.39 : Propriétés mécaniques des faisceaux de chanvre pour différents types de chanvre

Concernant le chanvre de variété A, les propriétés des faisceaux de fibres sont fortement influencées par un changement de conditions de culture. Une irrigation supplémentaire en eau a pour conséquence de diminuer la résistance des faisceaux et à en augmenter leur rigidité.

Doubler la densité de semis a pour effet de diminuer la résistance de 50% et le module d'Young de 25%. Ainsi chercher à augmenter le rendement de production des faisceaux et par analogie celui des fibres unitaires en augmentant la densité de semis ou en cultivant des variétés de chanvre produisant des quantités de fibres plus importantes est néfaste pour la qualité mécanique des fibres. De plus augmenter l'apport en eau lors de la culture de la plante n'aura pas d'effet significatif sur l'amélioration des propriétés puisqu'elle a peu d'impact sur les fibres unitaires, voir même les fragilisent. Pour les faisceaux cet apport d'eau a pour effet de diminuer la résistance et d'augmenter légèrement la rigidité. Pour conclure les conditions de culture standard sont suffisantes et permettent d'obtenir des fibres de chanvre de bonnes qualités.

IV.4 Comparaison fibre /faisceau

Les tableaux suivants présentent les propriétés mécaniques des fibres unitaires et des faisceaux extraits de plantes de chanvre soumis aux six conditions de culture décrits précédemment. Les comparaisons réalisées pour un même un même type de chanvre peuvent être généralisées aux autres conditions de culture (Tableau II-13 et Tableau II-14).

Tableau II-13 : Propriétés mécaniques des fibres unitaires et des faisceaux en fonction du type de fibre

Echantillon	Diamètre (µm)	ET (µm)	Contrainte maximum (MPa)	ET (MPa)	Module d'Young E (MPa)	ET (MPa)
e40 <i>Faisceaux</i>	234,5	55,9	157	50	9520	2157
<i>Fibres unitaires</i>	44,2	5,8	211	88	12279	6905
e46 <i>Faisceaux</i>	87,9	16,8	120	80	12227	5824
<i>Fibres unitaires</i>	44,7	9,7	203	103	13644	8158
e12 <i>Faisceaux</i>	146,6	34,3	73	52	4988	3607
<i>Fibres unitaires</i>	61,6	13,9	154	56	5524	1856
e14 <i>Faisceaux</i>	120,0	26,3	18	15	739	632
<i>Fibres unitaires</i>	61,8	14,0	103	36	3978	3308
e20 <i>Faisceaux</i>	132,3	32,8	21	21	2512	2079
<i>Fibres unitaires</i>	59,4	14,8	88	32	5375	2517
e62 <i>Faisceaux</i>	100,6	19,4	89	44	6360	3752
<i>Fibres unitaires</i>	45,9	14,0	120	56	6833	6177

Tableau II-14 : Déformation à rupture pour les fibres unitaires et les faisceaux en fonction du type de fibre de chanvre

Echantillon		déformation à la 1 ^{ère} rupture (%)	ET (%)	déformation à rupture totale (%)	ET (%)
e40	<i>Faisceaux</i>	1,69	0,55	2,02	0,65
	<i>Fibres unitaires</i>			2,8	1,3
e46	<i>Faisceaux</i>	1,14	0,38	1,24	0,51
	<i>Fibres unitaires</i>			1,7	0,6
e12	<i>Faisceaux</i>	1,05	0,24	1,14	0,24
	<i>Fibres unitaires</i>			3,8	1,27
e14	<i>Faisceaux</i>	1,2	0,1	1,29	0,94
	<i>Fibres unitaires</i>			3	1,28
e20	<i>Faisceaux</i>	1,26	0,44	1,28	0,41
	<i>Fibres unitaires</i>			1,5	0,4
e62	<i>Faisceaux</i>	1,28	0,25	1,28	0,25
	<i>Fibres unitaires</i>			2,1	1,3

Les diamètres des faisceaux sont 2 à 3 fois supérieures à ceux des fibres unitaires exceptés pour les échantillons e40, où le rapport entre la taille des fibres unitaires et des faisceaux est de 5 (Figure II.36).

Quels que soient la variété de chanvre et le mode de culture, les fibres unitaires ont un module d'Young plus grand que les faisceaux de quelques centaines à plusieurs milliers de MPa. Les explications de ce phénomène ont été abordées dans la partie III.3. La résistance à la rupture des fibres unitaires est elle aussi plus grande par rapport à la résistance des faisceaux. L'influence des conditions de culture observée pour les fibres unitaires sont les mêmes pour les faisceaux, c'est-à-dire que la plante de chanvre qui produira des faisceaux avec les meilleures propriétés mécaniques produira aussi des fibres unitaires avec les meilleures propriétés. A l'inverse une plante de variété différente ou soumise à d'autres conditions de culture pourra produire à la fois des faisceaux et des fibres unitaires ayant des propriétés mécaniques beaucoup moins intéressantes (Figure II.42).

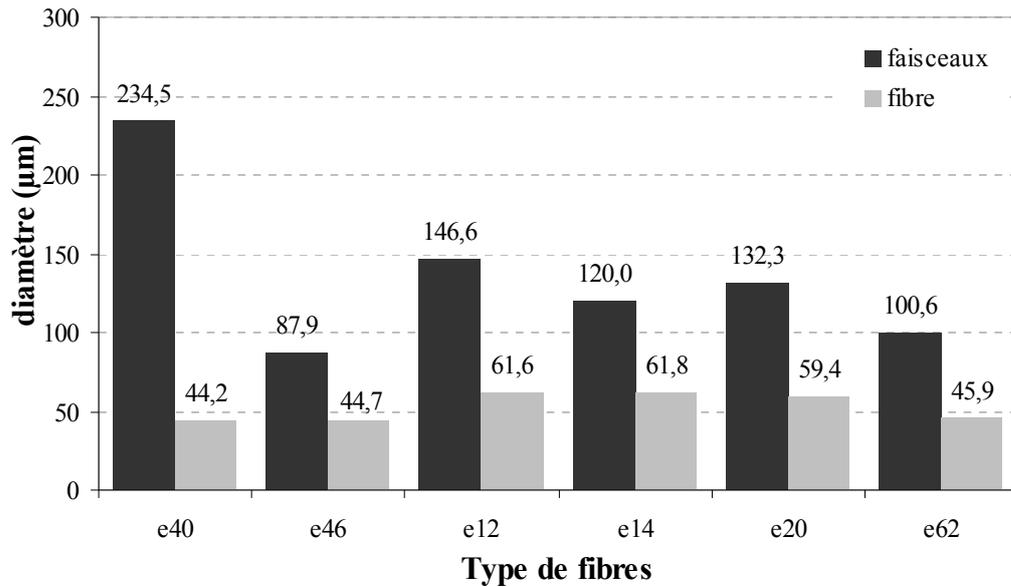


Figure II.40 : Diamètres des échantillons caractérisés (fibres unitaires et faisceaux) en fonction de la variété de chanvre et des conditions de culture

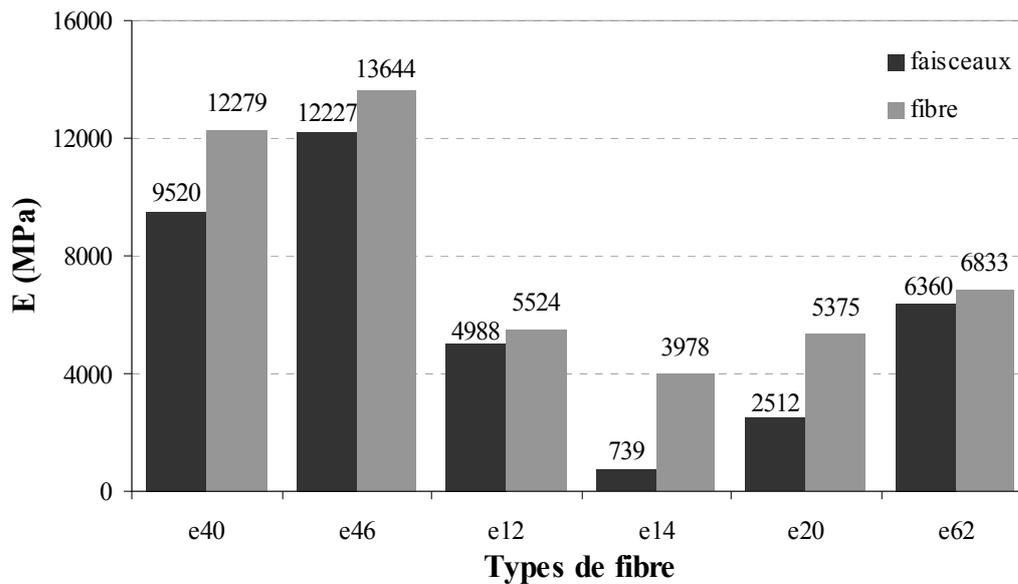


Figure II.41 : Comparaison du Module d'Young entre les faisceaux et les fibres unitaires de chanvre en fonction de la variété et des conditions de culture

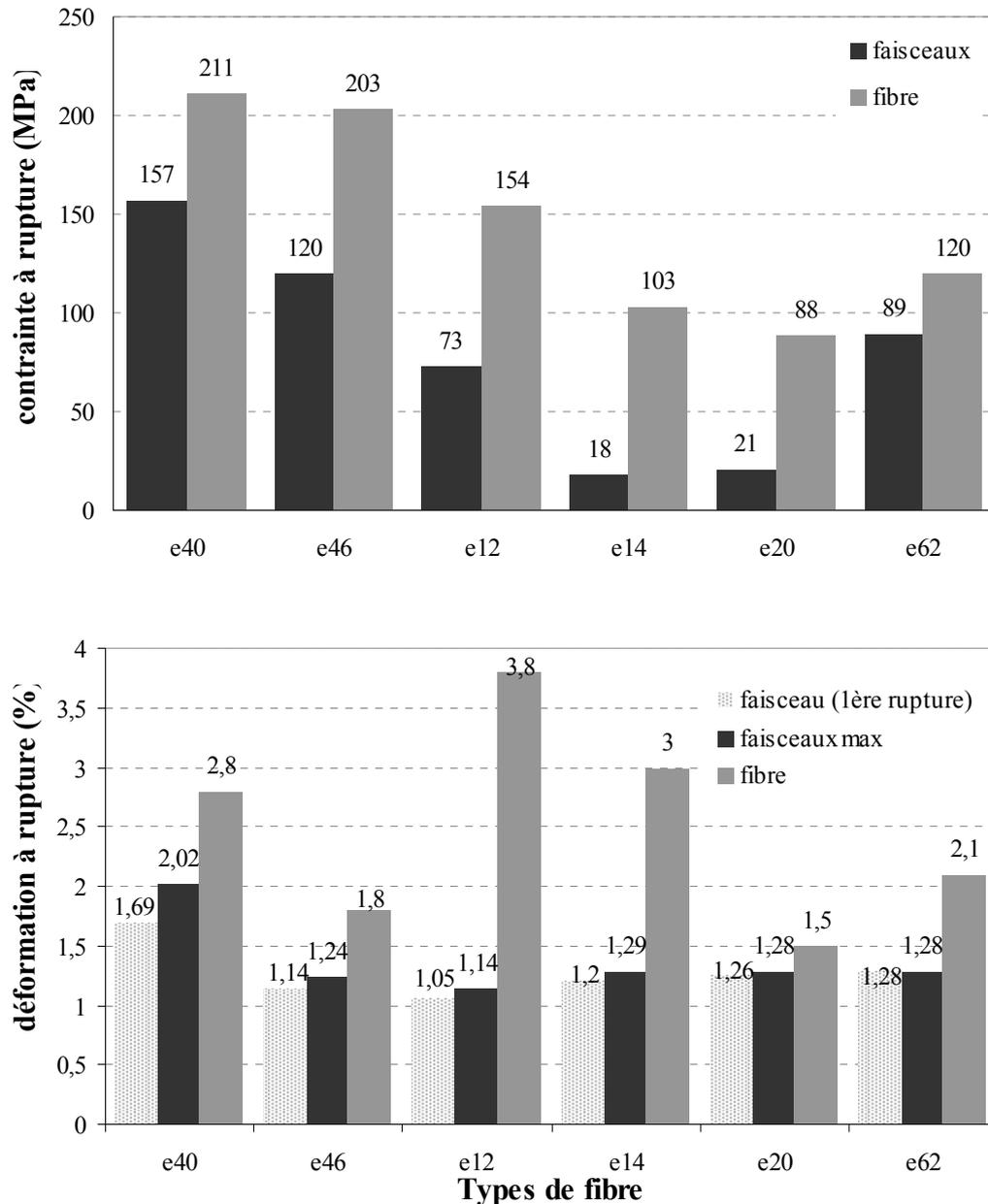
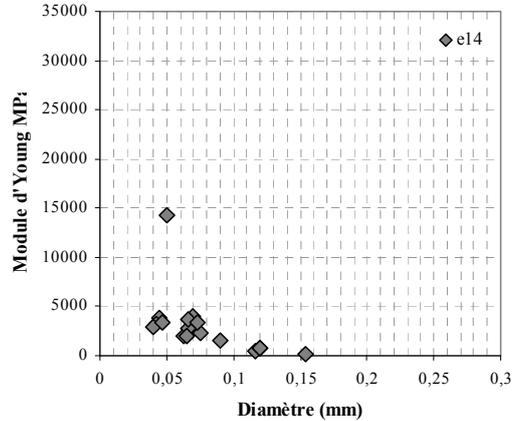
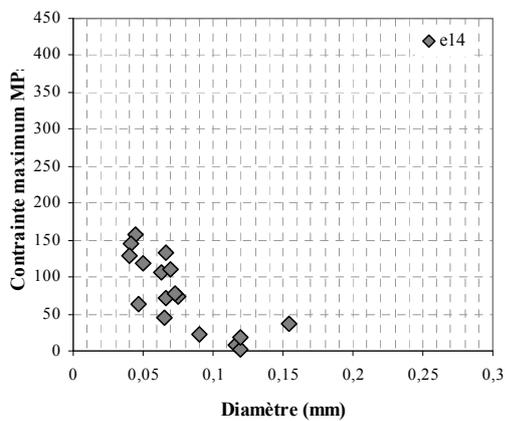
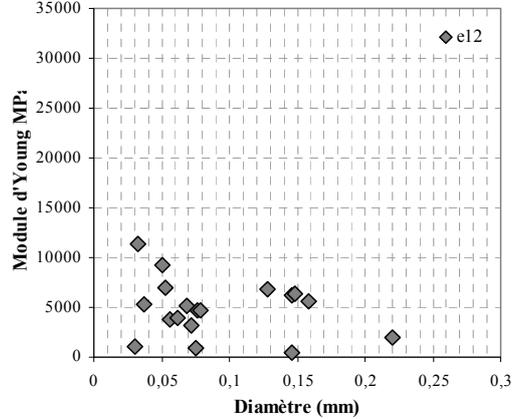
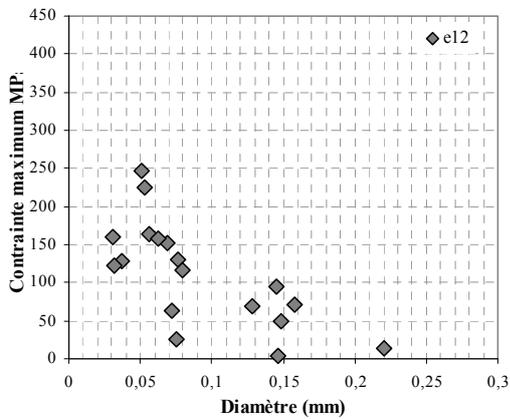
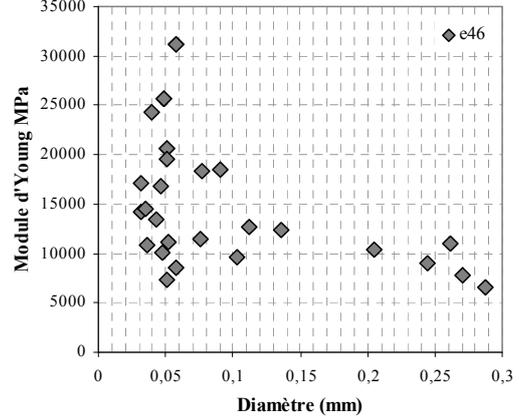
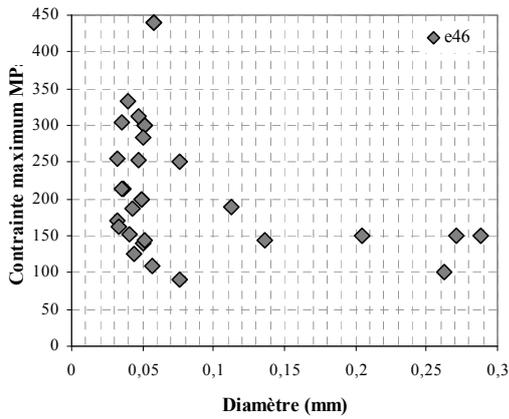
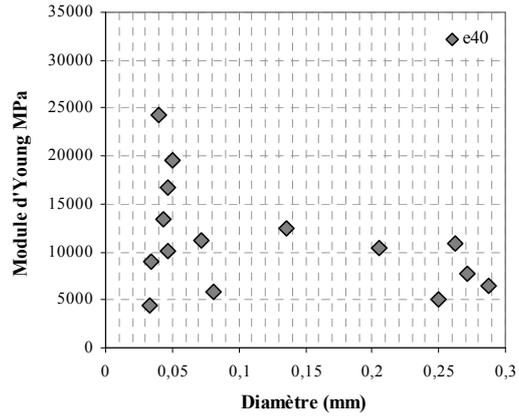
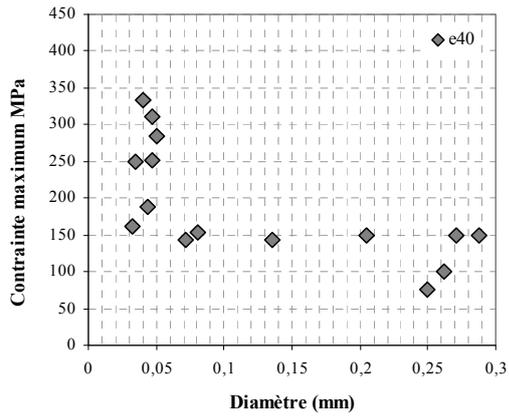


Figure II.42 : Comparaison de la contrainte et de la déformation à rupture pour les faisceaux et les fibres unitaires de chanvre

Comme expliqué dans la partie III.3, les propriétés mécaniques des fibres de chanvre ne sont pas les mêmes pour les faisceaux de fibres et les fibres unitaires. La contrainte maximum et le module d'Young tendent à diminuer lorsque la taille de la fibre augmente pour tendre vers une valeur asymptotique. Cette constatation est généralisée quelles que soient la variété de chanvre et les conditions de culture comme le démontre la Figure II.43.



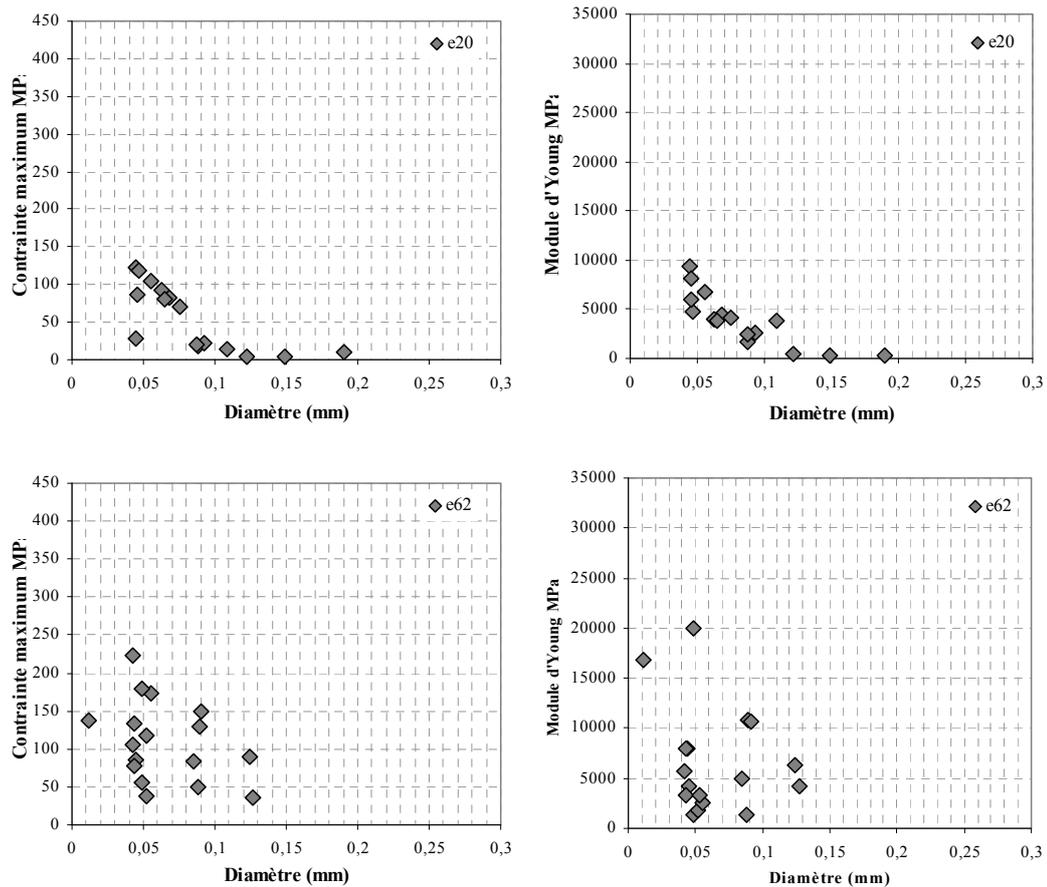


Figure II.43 : Variation de la contrainte maximum et du module d'Young en fonction du diamètre des fibres de chanvre pour les six modalités de culture

Les tendances observées comme la variation des propriétés mécaniques entre les fibres unitaires et les faisceaux corroborent avec celles de la littérature [CH07], [DUV11], [MUN07] et [ROM04]. Les fibres unitaires présentent des propriétés mécaniques plus intéressantes que celles des faisceaux. D'autres tendances sont identiques comme la variation à la fois du module d'Young et de la contrainte à rupture en fonction de la taille de la fibre. Plus la fibre est composée de fibres unitaires, plus ces deux propriétés seront diminuées pour tendre vers des valeurs asymptotiques. Néanmoins en fonction de la variété et des conditions de culture, cette évolution n'est pas la même. Premièrement, dans certains cas, nous pouvons constater que la dispersion est plus significative comme pour les fibres avec une densité de semis alors que cette dispersion est moins importante pour les autres conditions de culture (standard et apport d'eau supplémentaire), cela se vérifie pour les deux variétés de chanvre. Ainsi comme montré précédemment pour la variété de chanvre standard, une densité plus importante avait tendance à diminuer les

propriétés mécaniques et cette diminution peut s'expliquer par le fait que les fibres unitaires tendent avoir des propriétés mécaniques similaires aux faisceaux. Deuxièmement, la diminution ne suit pas la même pente pour tous les types de fibre. Excepté les résultats pour les échantillons e62 qui présentent une dispersion plus importante, la pente est plus grande pour la variété de chanvre standard (A) que pour la variété qui produit plus de fibre (B). Lorsque qu'une condition de culture ou une variété de chanvre diminue les propriétés mécaniques de la fibre unitaires et des faisceaux, les dispersions des propriétés des fibres unitaires et des faisceaux augmentent (exemple du e62) et la pente est plus importante donnant une chute plus progressive (différence entre les variétés A et B). Ces deux phénomènes montrent que les propriétés des fibres unitaires tendent à être celles des faisceaux.

Partie V . Influence de la géométrie et des défauts naturels de la fibre sur ces propriétés mécaniques

Dans cette partie est étudiée l'influence de la géométrie et des défauts naturels sur la caractérisation mécanique des ces fibres de chanvre. La même fibre est modélisée de cinq manières différentes.

V.1 Influence de la géométrie de la fibre

Pour pouvoir étudier l'influence de la géométrie de la fibre sur ces propriétés mécaniques, cinq études ont été réalisées en considérant différentes géométries de fibres avec certaines hypothèses de simplification géométrique (section circulaire, non-circulaire, uniforme le long de la fibre, ...) ou en considérant la géométrie réelle. Ci-dessous est présenté un court descriptif des méthodes de modélisation géométrique. La partie V.1.1 détaille ses différentes hypothèses géométriques.

V.1.1 Cas de la fibre unitaire

Méthode 1 : Cette méthode considère la section de la fibre comme étant circulaire et constante dans la longueur de celle-ci. La valeur de la section est calculée à partir de la moyenne des diamètres D_i déterminés pour cinq orientations de la fibre à 0° , 36° , 72° , 108° et 144° (Figure II.44).

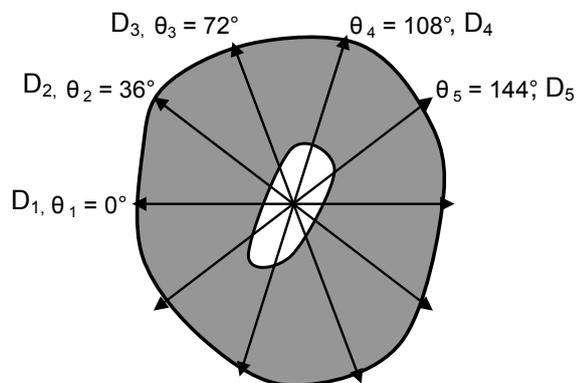


Figure II.44 : Profil de la section transversale d'une fibre unitaire et mesure des diamètres pour cinq orientations

Méthode 2 : Cette méthode considère la section comme étant constante le long de la fibre mais tient compte de la non-uniformité de la section. Pour cela la section est décrite par une forme polygonale et est déterminée à partir des diamètres moyens D_i . La valeur de la section polygonale est déterminée en utilisant une discrétisation par éléments finis (Figure II.45).

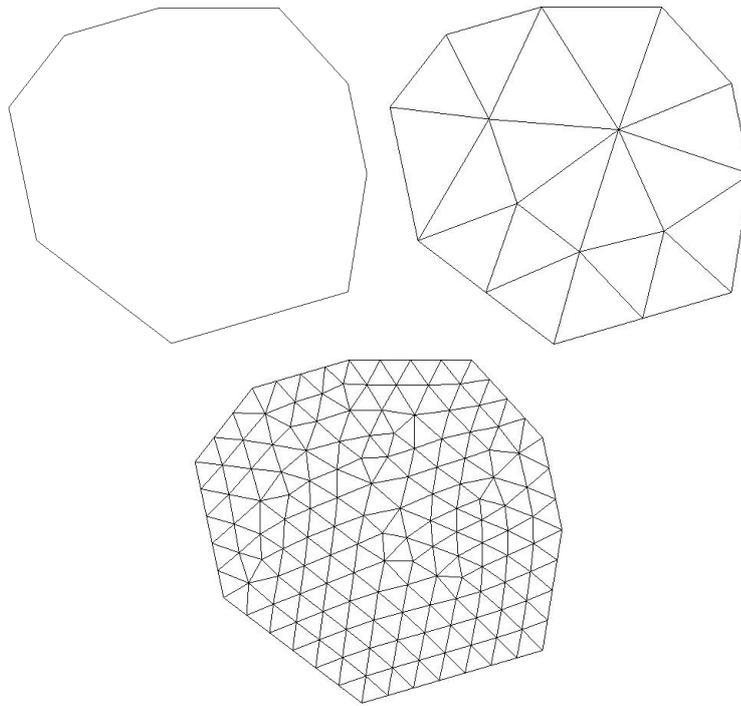


Figure II.45 : Profil de la section polygonale discrétisée en éléments finis

Méthode 3 : Cette méthode tient compte de la non-uniformité de la section de la fibre suivant sa longueur. Pour cela la section est déterminée dans la zone locale où la rupture se produit. La valeur de la section est déterminée à partir de la moyenne des diamètres D_i déterminés pour cinq orientations de la fibre à 0° , 36° , 72° , 108° et 144° à l'endroit où la rupture se produit (Figure II.46).

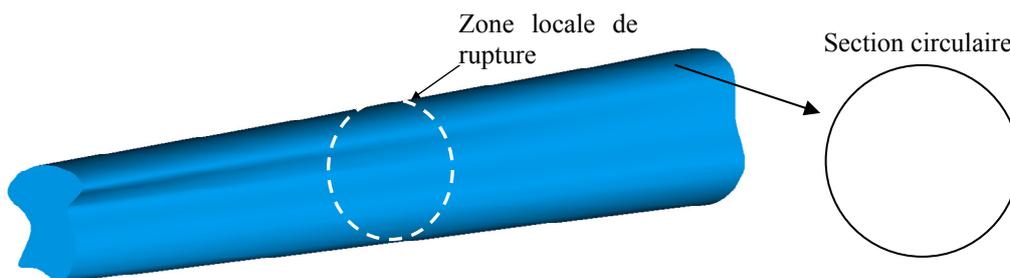


Figure II.46 : Profil circulaire de la section localisée au point de rupture

Méthode 4 : Cette méthode comme la précédente méthode considère la section dans la zone locale où se produit la rupture, cependant la section n'est plus considérée comme circulaire mais comme non-uniforme. La valeur de la section polygonale dans la zone de rupture a été déterminée en utilisant une discrétisation par éléments finis (Figure II.45 et Figure II.47).

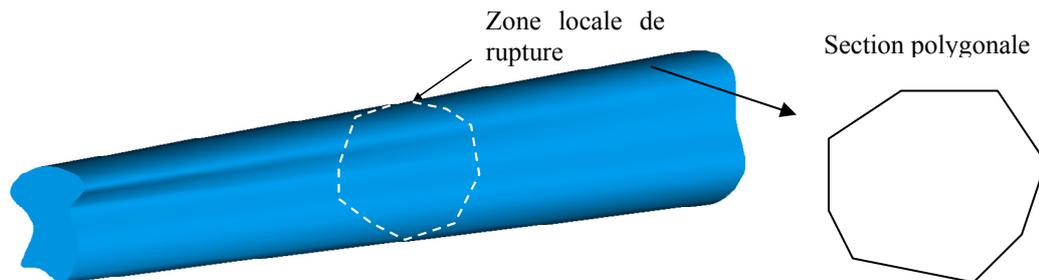


Figure II.47 : Profil polygonale de la section de la fibre au point de rupture

Méthode 5: Cette méthode tient compte de la non-uniformité de la section et sa variation suivant la longueur de la fibre. Un modèle géométrique 3D a été généré utilisant les données géométriques de la fibre obtenues par le traitement d'images (Figure II.48). Ce modèle couplé à un calcul par la méthode des éléments finis et d'optimisation, a permis d'approximer les propriétés mécaniques de la fibre considérant sa géométrie réelle. Ici une reconstruction numérique 3D de la fibre est faite.

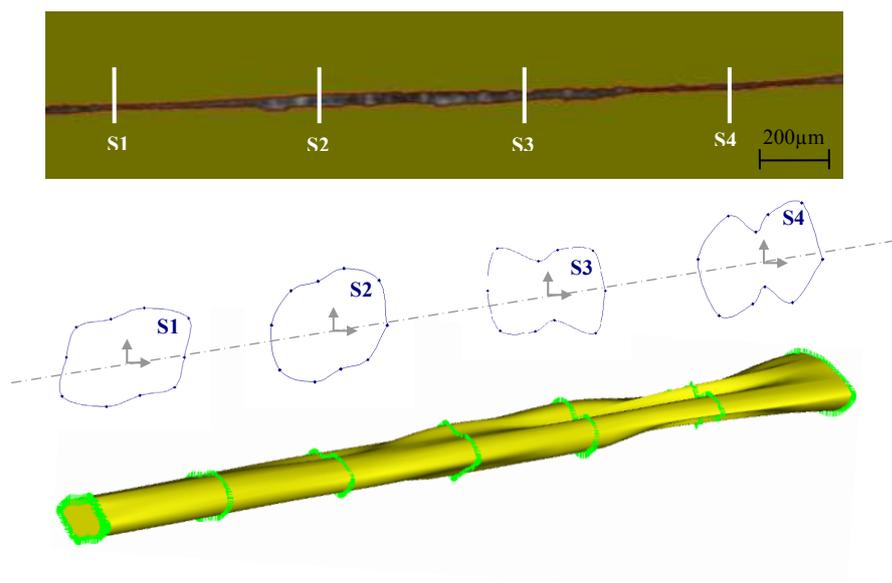


Figure II.48: Modèle 3D d'une fibre unitaire

Une méthode inverse d'optimisation numérique (méthode des simplex) couplée à la méthode des éléments finis (solveur Abaqus) a été utilisée pour déterminer les paramètres matériaux comme le module d'Young. Le comportement mécanique des fibres de chanvre peut être considéré comme linéaire. Le principe de la méthode inverse pour identifier les propriétés matériaux est d'incrémenter itérativement les constantes matériaux du modèle élément finis de la fibre testée, dans le but de faire correspondre la force résultante calculée numériquement avec la force mesurée expérimentalement. Les constantes matériaux qui minimisent l'erreur entre la force calculée et la force mesurée sont considérées comme la solution optimum. La minimisation de l'erreur est réalisée par le processus d'optimisation qui minimise une fonction scalaire appelée la fonction objective (Eq.II-16). Un exemple de fonction objective est la somme de termes au carré comme la formulation des moindres carrés ou encore des normes. En considérant la fibre comme ayant un comportement isotrope, un modèle de comportement élastique unidirectionnel déterminé à partir des données expérimentales a été défini et considéré comme la solution initiale au problème.

$$\text{Fonction Objective} = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_1^m \left(1 - \frac{f_{ical}(\eta_{ical})}{f_{i\text{exp}}(\eta_{i\text{exp}})} \right)^2} \quad \text{(Eq. II-16)}$$

Où $f_{i\text{exp}}$ est la valeur expérimentale de la force du déplacement η_i , f_{ical} est la force correspondante calculée et m est le nombre de données expérimentales.

Une fonction objective de ce type nécessite l'emploi de la méthode de Nelder Mead simplex (Matlab). L'identification de paramètres matériaux est effectuée par le couplage de cette précédente méthode avec le calcul par éléments finis sous Abaqus. La méthode d'optimisation Nelder Mead est basée sur les travaux de Spendley [SPE62]. Cette méthode est sensible aux conditions initiales. Cependant elle est la plus adaptée à notre problématique de caractérisation. La contrainte de traction et la déformation élastique longitudinale sont définies comme suit:

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{S_{\text{fibre}}} = E\varepsilon(t) \quad \text{et} \quad \varepsilon(t) = \frac{u(t)}{L_1} \quad \text{(Eq. II-17)}$$

Où $F(t)$ est la force de traction en fonction du temps, S_{fibre} la section transversale, $u(t)$ est le déplacement en fonction du temps, L_1 est la longueur initiale et E le module d'élasticité déterminé par régression linéaire de la courbe de la force en fonction du déplacement.

V.1.2 Comparaison des résultats

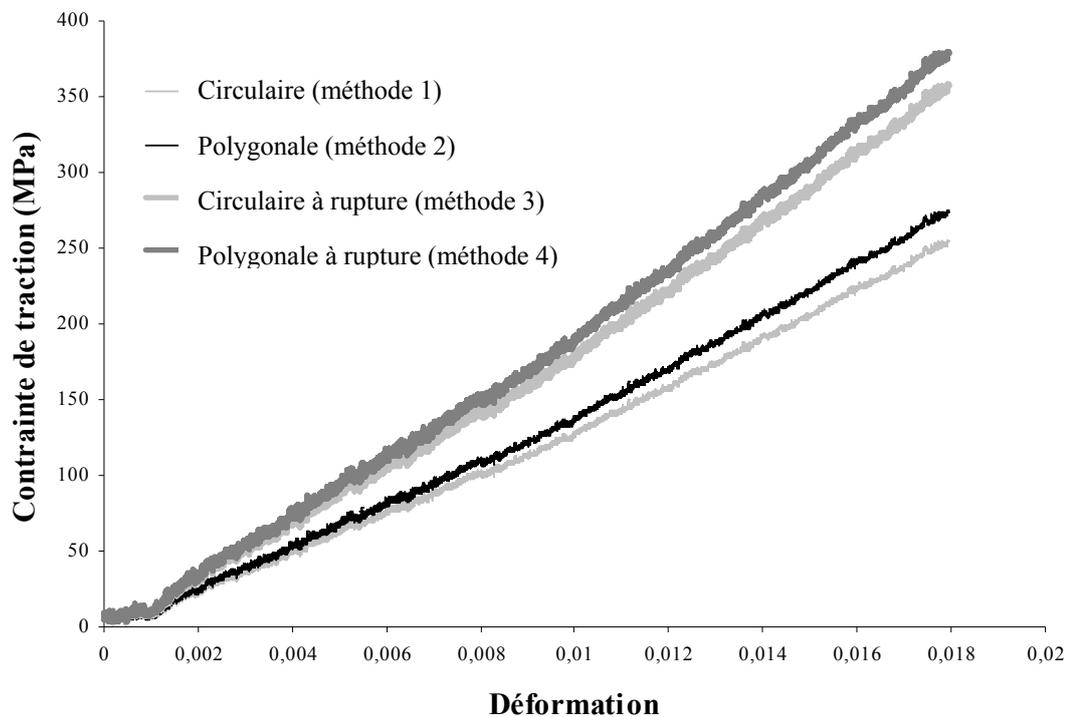


Figure II.49 : Contrainte de traction en fonction de la déformation longitudinale déterminée pour les méthodes 1 à 4

Dans le but de déterminer les propriétés mécaniques des fibres de chanvre, les cinq méthodes de modélisation de la géométrie de la fibre présentées auparavant (partie V.1.1) ont été utilisées. La déformation longitudinale ne sera pas influencée par la considération géométrique de la fibre parce qu'elle ne dépend pas de la section des fibres. Alors que la contrainte de traction et plus précisément la résistance à rupture, ainsi que le module d'Young qui sont des paramètres intrinsèques à la géométrie, seront influencés par la considération géométrique (Figure II.49).

La valeur moyenne de la section de la fibre considérant une section transversale circulaire le long de la fibre (méthode 1) est de $1.464 \times 10^{-3} \pm 0.681 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ et considérant la section comme étant polygonale est de $1.370 \times 10^{-3} \pm 0.642 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ (méthode 2). La valeur moyenne de la section circulaire et polygonale considérant la section comme étant celle de la zone de rupture est respectivement de $0.925 \times 10^{-3} \pm 0.350 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ et $0.873 \times 10^{-3} \pm 0.334 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$. Ainsi la différence de la valeur de la section transversale entre la méthode 1 et 2 est de 6,4%, entre les méthodes 1 et 3 est de 36,8% et entre la méthode 1 et 4 est de 40,4% (Figure II.50 et Tableau II-15).

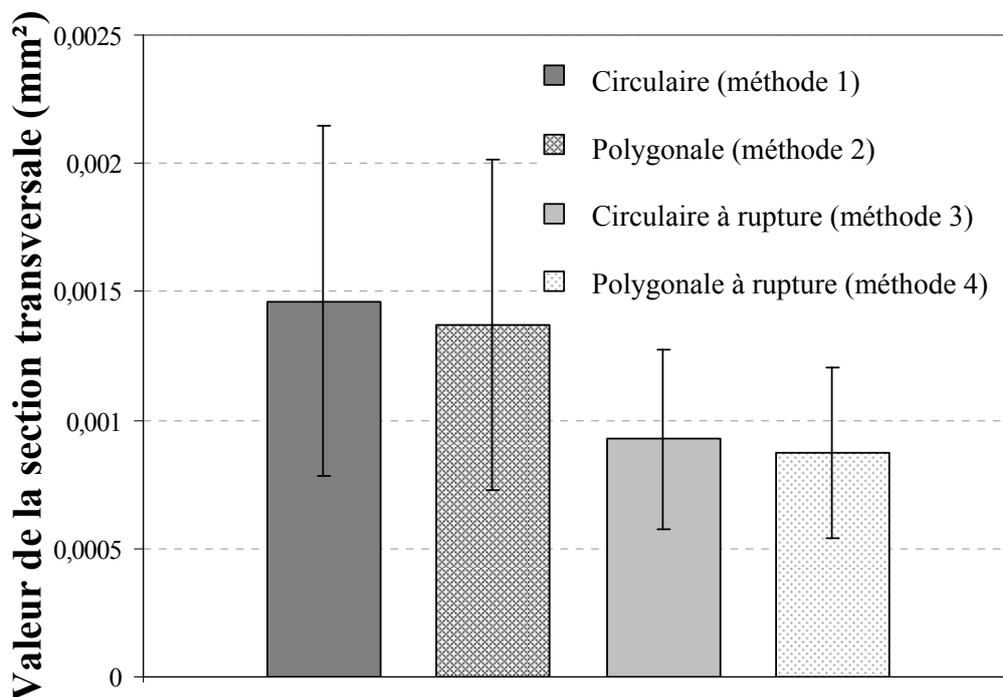


Figure II.50 : Valeur de la section de la fibre considérée par les différentes méthodes

Les résultats présentés en Figure II.49 montrent la contrainte de traction en fonction de la déformation longitudinale pour différentes considérations géométriques de la section de la fibre. L'estimation et le calcul de la section impactent sur le comportement mécanique puisqu'en fonction des hypothèses géométriques qui sont faites de la fibre le comportement mécanique change. Une légère variation du comportement est constatée entre les méthodes « circulaire » et « polygonale ». A l'inverse, un écart beaucoup plus important est mesuré entre les méthodes dites « globale » et « locale ». Le profil de section circulaire donne une erreur d'estimation de la valeur de la section de 6% comparée à la valeur de la section considérée comme polygonal. Ainsi considérer la section comme étant non-circulaire

permet d'obtenir une meilleure représentation de la géométrie de la fibre. Considérer la géométrie comme étant une section moyenne représentative de l'ensemble de la fibre ou une section locale prise dans la zone de rupture, donne une différence de valeur de section de 36,6%.

La contrainte maximum est d'environ 170 ± 75 MPa avec l'hypothèse simplifiée d'une section circulaire moyenne (méthode 1) et 182 ± 80 MPa quand la section est modélisée comme étant polygonale (méthode 2). La contrainte maximum caractérisée avec l'hypothèse d'une section locale circulaire ou non-circulaire déterminée dans la zone de rupture (méthodes 3 et 4) est respectivement de 252 ± 116 MPa et 268 ± 125 MPa (Tableau II-15). Les résultats montrent que l'endommagement critique et la rupture de la fibre se produisent dans une zone où la section est plus petite que la valeur de la section moyenne de l'ensemble de la fibre. Ainsi il existe un phénomène de concentration de contraintes localisées à l'endroit de la rupture qui la favorise.

Tableau II-15 : Propriétés mécaniques des fibres unitaires de chanvre pour différentes modélisations de la géométrie de la fibre

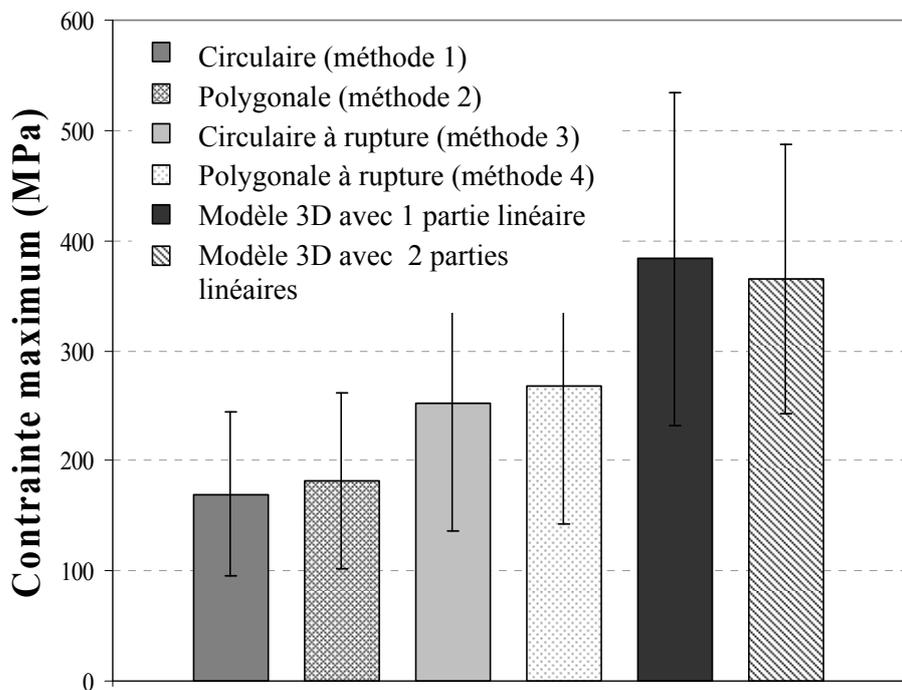
	Section transversale de la fibre (mm ²)		Contrainte maximum (MPa)		Module d'Young (MPa)	
	Valeur Moyenne	Ecart type	Valeur Moyenne	Ecart type	Valeur Moyenne	Ecart type
Méthode 1	1.464×10^{-3}	0.681×10^{-3}	170	75	9515	4218
Méthode 2	1.370×10^{-3}	0.642×10^{-3}	182	80	10749	4701
Méthode 3	0.925×10^{-3}	0.350×10^{-3}	252	116	15620	6538
Méthode 4	0.873×10^{-3}	0.334×10^{-3}	268	125	16544	7069
Méthode 5a	-	-	383	152	12808	5085
Méthode 5b	-	-	365	122	16879	5401

Méthode 5a : modèle de comportement élastique à une partie linéaire et méthode 5b : modèle de comportement élastique à deux parties linéaires.

Les mêmes interprétations que précédemment peuvent aussi être faites pour la contrainte maximum (Figure II.51). La différence de la valeur de la contrainte maximum calculée avec les méthodes 1 et 2 est d'environ 7%, avec les méthodes 1 et 3 de 48,2% et enfin avec les méthodes 1 et 4, elle est de 57,6%. Les résultats montrent que considérer la section transversale comme uniforme et circulaire, donne

une erreur de 6,7% pour la contrainte moyenne maximum par rapport aux méthodes qui tiennent compte de la non-circularité de la fibre (méthodes 2 et 4). Lorsqu'on compare les méthodes de modélisation géométrique dites « globales » (méthodes 1 et 2) et « locales » (méthodes 3 et 4), l'erreur commise pour la détermination de la contrainte maximum atteignant 47,8% est supérieure à l'erreur commise sur la mesure de la section de la fibre qui est de 36,6%. La comparaison des modules d'Young caractérisés avec les différentes méthodes (méthodes 1 à 4) montre que l'erreur commise pour la détermination du module d'Young est plus importante que pour la contrainte maximum. La différence de la valeur du module d'Young entre la méthode 1 et 2 est de 12,9%, entre la méthode 1 et 3 est de 64,2% et entre les méthodes 1 et 4 est de 73,9%.

Faire l'hypothèse d'une section uniforme circulaire (méthode 1) donne une erreur d'estimation de la valeur du module d'Young de 7% comparée à un profil de section considéré comme uniforme et polygonal (méthode 2). La modélisation géométrique globale (méthodes 1 et 2) comparée aux méthodes locales 3 et 4, donne un écart de la valeur de 55,8%.



(a)

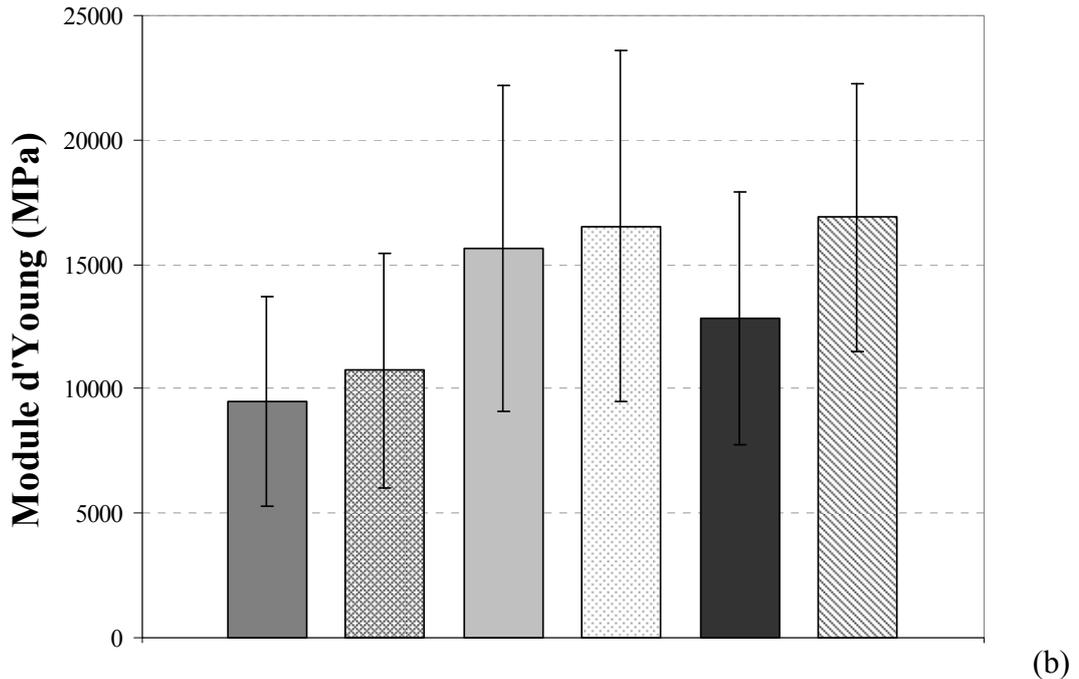


Figure II.51 : Contrainte maximum (a) et module d'Young pour différentes modélisations de la géométrie de la fibre

En conclusion, que ce soit la valeur de la section, la contrainte maximum ou le module d'Young, il existe des dispersions importantes des valeurs caractérisées en fonction des hypothèses géométriques (comparaison entre les méthodes 1 et 2, 3 et 4). Cet écart est dû à l'approximation géométrique qui est faite de la section de la fibre. Cette étude montre que faire l'hypothèse d'une section circulaire et uniforme dans la longueur de la fibre sous-estime les propriétés mécaniques de 7%. Représenter la section de la fibre par une forme polygonale est plus précis que de la considérer comme circulaire. Cela permet de prendre en compte l'évolution du diamètre en fonction de l'orientation angulaire de la fibre.

Au point de rupture de la fibre, la section est 36,6% plus petite que dans l'ensemble de la fibre, la contrainte maximum est 4,8% plus grande. Le module d'Young caractérisé en tenant compte de la section dans la zone de rupture est 55,8% plus élevé comparé à une section déterminée comme une section moyenne de l'ensemble de la fibre. Ainsi considérer la section comme homogène circulaire ou polygonal le long de la fibre ne permet pas de prendre en compte la géométrie réelle de la fibre unitaire. Par conséquent les zones de concentration de contraintes engendrées par la

variation de la section de la fibre au niveau de la zone de rupture ne peuvent être détectées. Ces résultats démontrent la nécessité de tenir compte de la géométrie réelle de la fibre même aussi compliquée soit elle pour caractériser les propriétés mécaniques des fibres unitaires et aussi des faisceaux de fibres. C'est pour cette raison que par la suite, nous avons proposé une modélisation complète en 3D de la fibre.

Concernant les deux dernières méthodes qui tiennent compte du modèle géométrique réel de la fibre, le module d'Young a été déterminé en utilisant une méthode d'optimisation numérique (partie IV). Pour ces deux méthodes 5a et 5b, la section est considérée comme étant non-circulaire et non-uniforme suivant la longueur de la fibre. Comparée aux méthodes 1 à 4, les modélisations ne tenaient pas compte de cette variation de géométrie de la fibre dans sa longueur. La courbe de traction numérique (force en fonction du déplacement longitudinale) qui tient compte du profil réel de la fibre, a été ajusté à la courbe de traction expérimentale. Les courbes sont ajustées en réduisant l'erreur entre les deux courbes (une sous-partie sera consacrée dans la partie IV au processus d'optimisation ainsi qu'à la méthode de modélisation 3D de la fibre). Deux cas de modélisation du comportement mécanique d'une fibre unitaire ont été étudiés. Dans le premier cas d'étude, le comportement jusqu'à rupture de la fibre est considéré comme étant élastique linéaire (méthode 5a) et dans le second, le comportement a été choisi comme élastique non-linéaire (méthode 5b).

La contrainte maximum observée en appliquant les méthodes 5a et 5b est respectivement de $383 \pm 152 \text{MPa}$ et $365 \pm 122 \text{MPa}$ (Tableau II-15). Ces deux méthodes donnent les valeurs de contraintes maximales les plus importantes. Cette dernière étude montre qu'il y a le long de la fibre, des zones où la section est plus petite que la section mesurée dans la zone de rupture. La rupture ne se produisant pas dans la zone où la section est la plus faible, cela démontre que la rigidité de la fibre peut différer d'une localisation à une autre le long de la fibre. Par exemple la rupture peut se produire dans des zones où des défauts naturels sont présents ou encore dans des zones où il y a des résidus des composants qui forment le faisceau (résidus de fibres adjacentes, résidus d'hémicellulose ou de lignine). La valeur de la contrainte maximum calculée avec un modèle de comportement à une partie linéaire est presque

identique à celle déterminée avec un modèle à deux parties linéaires. Modéliser le comportement mécanique d'une fibre unitaire avec deux parties linéaires réduit la déviation statistique des valeurs observées, donc la méthode 5b permet de déterminer avec une meilleure précision la contrainte maximum de traction. Les méthodes 5a (modèle à une partie linéaire) et 5b (modèle à deux parties linéaires) donnent respectivement un module d'Young de 12808 ± 5085 MPa et 16879 ± 5401 MPa. Ainsi le module d'Young calculé avec la méthode 5a est inférieur au module d'Young déterminé considérant la section dans la zone de rupture (méthode 4). Cela montre qu'un modèle à une partie linéaire n'est pas suffisant pour décrire exactement le comportement d'une fibre unitaire. A l'inverse, le modèle de comportement non-linéaire donne une valeur moyenne du module d'Young légèrement supérieure à la valeur moyenne obtenue avec la méthode 4 modélisant la section de la fibre comme étant la section de la zone de rupture et polygonale. Prendre en compte la géométrie 3D réelle de la fibre permet de réduire la déviation de la valeur du module d'Young de 7069MPa pour la méthode 4 à 5401MPa pour la méthode 5b. Ainsi tenir compte de la variation la section le long de la fibre considérant celle-ci comme non-homogène permet de caractériser avec une meilleure précision les propriétés mécaniques.

L'erreur (supérieure à 70%) commise pour déterminer le module d'Young et la contrainte maximum entre la méthode 1 (section homogène) et la méthode 5 (géométrie réelle 3D, section non-circulaire et non-uniforme le long de la fibre) montrent que l'hypothèse la plus simple qui consiste à ne pas tenir compte de la variation de la géométrie de la fibre (méthode 1) sous-estime les propriétés mécaniques de manière importante. Pour conclure cette étude, considérer la section comme étant polygonal dans la zone de rupture (méthode 4) est suffisant pour déterminer les propriétés élastiques mécaniques comme le module d'Young mais insuffisant pour estimer exactement la résistance à la rupture de la fibre.

V.2 Influence des défauts naturels sur le comportement mécanique d'une fibre unitaire

Certains défauts sont présents naturellement dans les fibres végétales et de chanvre comme les coudes, les dislocations, les zones amorphes,... Ces défauts par définition ont une structure différente de celle de la fibre. La question est de savoir si ces défauts influent sur le comportement de l'ensemble de la fibre et quel est son degré d'impact. Dans cette dernière partie est présentée une étude montrant l'influence d'un défaut de type coude sur le comportement mécanique d'une fibre unitaire. Pour cela l'évolution d'un coude et de dislocations ont été suivis lors d'un essai de traction. Des images d'un défaut localisé ont été prises au cours de l'essai de traction permettant de suivre l'évolution du défaut, à l'aide d'un microscope optique.

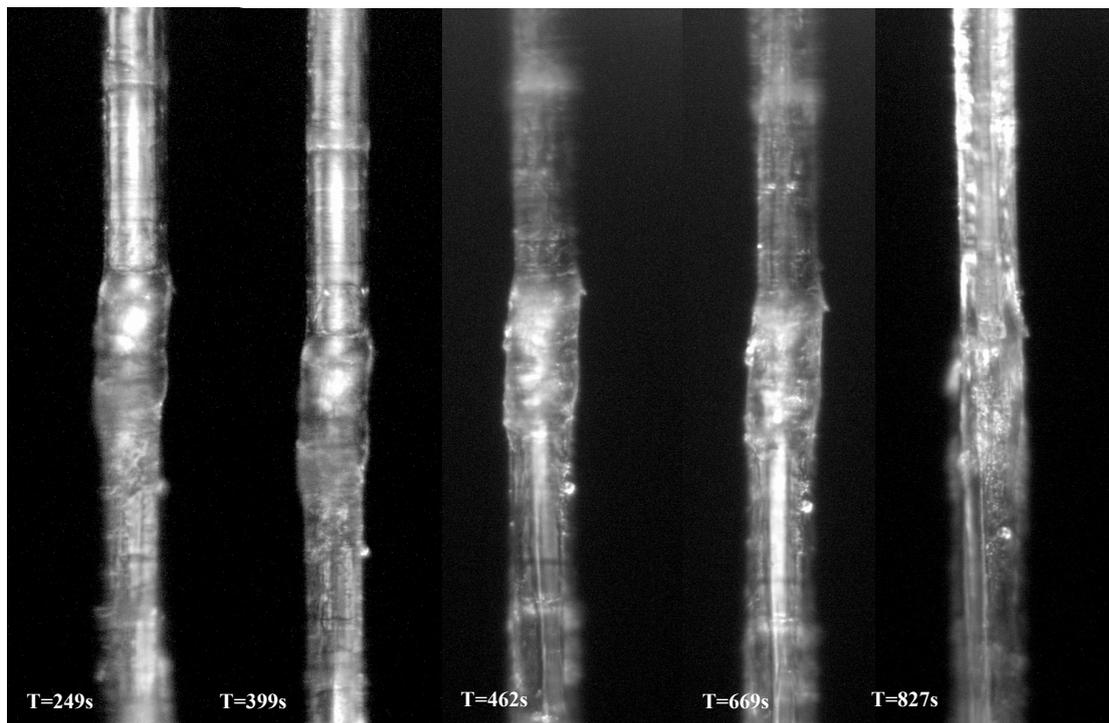


Figure II.52 : Microscopies d'un défaut coude prises au cours d'un essai de traction

La Figure II.52 montre l'évolution d'un coude au cours d'un essai de traction. Ces microscopies montrent que la structure du défaut change au cours de la sollicitation. Avant un temps d'essai de 462s, le défaut change peu visuellement. A partir d'un

temps de 669s le coude commence à s'estomper et tend à disparaître à $T=827s$. Ainsi à partir d'une certaine déformation locale, la structure du défaut change de manière irréversible et tend à s'agencer de la même manière que le reste de la fibre. Pour quantifier ce comportement particulier, des mesures de déformations localisées au niveau du défaut ont été réalisées.

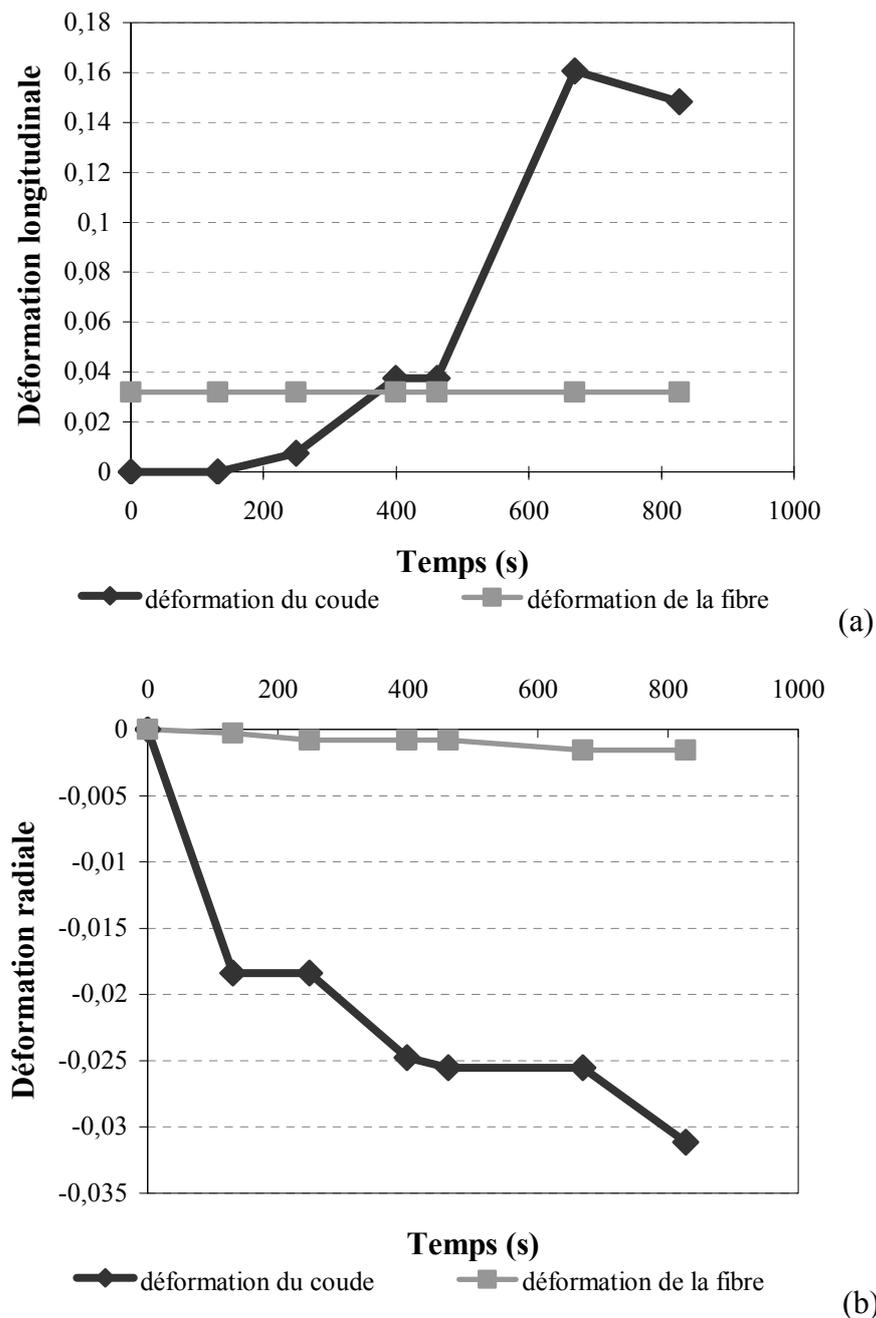


Figure II.53 : Déformations longitudinales (a) et radiale (b) d'un coude au cours de l'essai

La Figure II.53 compare la déformation radiale et longitudinale du défaut par rapport à la déformation de l'ensemble de la fibre. La déformation longitudinale de la fibre correspond à la déformation mesurée par la micro-machine de traction et la déformation longitudinale du coude est l'allongement du défaut rapporté à la longueur initiale du coude. Ces résultats montrent que la déformation longitudinale dans le défaut augmente progressivement. L'augmentation est lente en début de sollicitation jusqu'à 400s d'essai et s'accélère à la moitié de l'essai. Jusqu'à 400s la déformation du coude est inférieure à la déformation la fibre. A partir de ce temps et jusqu'à la rupture, la déformation longitudinale du défaut est plus importante que la déformation de la fibre. Avant la rupture la déformation longitudinale du coude est de l'ordre de 16% alors que la déformation du coude est seulement de 3,2%. La déformation radiale correspond à la déformation dans l'axe perpendiculaire à l'axe de la fibre et mesure le rétrécissement de la section. La déformation radiale de la fibre est mesurée localement dans une zone de la fibre proche du défaut. L'augmentation de la déformation radiale de la fibre est relativement constante au cours du temps pour atteindre une valeur de 0,16% en fin d'essais. La déformation radiale augmente rapidement jusqu'à 100s pour ensuite augmenter plus lentement. Avant la rupture, la déformation radiale du coude est de 3%.

Ainsi cette étude montre que les déformations longitudinales et radiales du coude sont beaucoup plus importantes que les déformations de la fibre sans défaut. Ceci démontre que le comportement mécanique d'un défaut naturel n'est pas le même que celui d'une fibre unitaire. Ainsi les défauts absorbent les déformations surtout en début de sollicitation.

De cette différence de comportement, deux interprétations peuvent être conclues :

- Si les contraintes dans la fibre et dans le défaut sont de même nature et d'intensité identique, alors cette différence de déformation met en évidence une différence de propriété entre la fibre et le défaut. Le défaut aurait alors une rigidité beaucoup faible que celle de la fibre.
- Si les défauts naturels ont une structure et une composition chimique similaire (la rigidité de la fibre et du défaut sont identique), alors cette différence de comportement mettrait en évidence des zones de concentration de contrainte dans la zone du défaut. Les défauts seront des zones fragiles qui favorisent l'endommagement et la rupture de la fibre.

V.3 Conclusion

Dans cette deuxième partie, des fibres de chanvre ont été caractérisées. Les résultats ont montré que les fibres unitaires ont de meilleures propriétés que les faisceaux. Des essais complémentaires sur des fibres soumises à différentes conditions de culture (conditions standards, apport d'eau supplémentaire et densité de semis plus importante) ont mis évidence l'impact des conditions de culture sur les propriétés mécaniques.

D'une manière générale, l'apport en eau supplémentaire et l'augmentation de la densité de semis diminuent la qualité mécanique des fibres cultivées. Des essais à faibles cycles de charge et décharge ont permis d'identifier et de comprendre le comportement des fibres, mettant en évidence un comportement élastique en fin de sollicitation et un comportement non-linéaire et irréversible de la fibre en début de sollicitation.

Une dernière étude, considérant différentes modélisations géométriques de la fibre ont montré l'impact de la géométrie réelle de la fibre sur sa caractérisation mécanique. Une reconstruction géométrique 3D de la fibre permet d'identifier les propriétés mécaniques avec une meilleure précision et une meilleure résolution.

CHAPITRE III : Comportement mécanique des composites PP / chanvre

CHAPITRE III : COMPORTEMENT MECANIQUE DES COMPOSITES PP / CHANVRE.....	162
<i>Partie I. Caractérisation du comportement mécanique des composites</i>	164
I.1 Comportement mécanique en traction uniaxiale	167
I.2 Comportement mécanique en flexion.....	169
I.3 Propriétés mécaniques.....	171
I.3.1 Propriétés en traction :.....	171
I.3.2 Propriétés en flexion :.....	174
I.3.3 Coefficient de Poisson	178
I.3.4 Comparaison des propriétés des fibres de chanvre, du polypropylène et du composite PP - chanvre	178
I.4 Mécanisme de rupture	179
I.5 Répartition des fibres dans la matrice.....	189
I.5.1 Répartition dans la longueur :	189
I.5.2 Répartition dans la section transversale	190
<i>Partie II. Influence des conditions de culture et de l'année de récolte sur les propriétés mécaniques des composites</i>	192
II.1 Influence des conditions de culture	192
II.1.1 Comportement en traction	192
II.1.2 Comportement en flexion	199
II.1.3 Comparaison entre la flexion et la traction	201
II.1.4 Comparaison entre un modèle micro-macro et les résultats expérimentaux	203
II.1.5 Comparaison des propriétés mécaniques entre la fibre unitaire, le faisceau et le composite	206
II.2 Influence de l'année de récolte (2009 et 2011)	207
<i>Partie III. Influence du processus de fabrication et des paramètres d'essai</i>	211
III.1 Influence du processus de fabrication du compounds	211
III.2 Effet de la vitesse de sollicitation.....	214
III.3 Effet du pourcentage de fibre	221
<i>Partie IV. Etude du comportement local à l'aide de la corrélation d'image</i>	225
IV.1 Méthode d'essais.....	227
IV.2 Etude en traction d'un composite PP-chanvre (c40)	228
IV.2.1 Déplacement longitudinal $U_y(y)$ suivant la longueur de l'éprouvette	228
IV.2.2 Variation $U_y(x)$ au cours du temps.....	233
IV.2.3 Variation $U_y(x)$ suivant la longueur de l'éprouvette	237
IV.2.4 Déplacement transversal $U_x(x)$	239
IV.2.5 Déformations locales	240
IV.3 Modules d'Young locaux et répartition des fibres dans l'éprouvette	244
IV.4 Modélisation micro macro et variation du pourcentage de fibre	250
IV.5 Détermination du coefficient de Poisson.....	252
IV.6 Conclusion	254

Partie I . Caractérisation du comportement mécanique des composites

Les fibres et les faisceaux caractérisés précédemment sont injectés dans du polypropylène pour déterminer si les différences de comportement de ces fibres se répercutent sur le composite fini. Ainsi il sera possible de déterminer quel renfort pourra être le mieux adapté à la fabrication d'un agro-composite PP / Chanvre

Le taux de fibre massique est de 30%. Dans la partie traitant de l'influence du taux de renfort, celui-ci sera précisé s'il est différent de 30%. Les éprouvettes de traction ont une section rectangulaire avec une largeur de 10mm et une hauteur de 4mm. La longueur totale des éprouvettes est de 110mm avec une longueur d'essai de 80mm.

Les éprouvettes ont été fabriquées par injection dans un moule donnant la forme de l'éprouvette. Deux processus d'injection ont été utilisés. Le premier consiste à mélanger les fibres et la matrice dans une vis sans fin d'une machine d'injection. Alors que pour le deuxième, le mélange a été réalisé préalablement à l'injection. Cette étape préliminaire consiste à créer un compound qui est la matière composite sous forme de granulés avec une longueur inférieure à 2mm. Ensuite ce compound est introduit dans la machine comme seul matériau qui est ensuite monté en température pour pouvoir être injecté.

Les processus de mise en forme sont réalisés avec un seul point d'injection à l'extrémité de l'éprouvette. La matière est ensuite poussée vers le fond du moule par pression. Les composites étudiés sont renforcés par des faisceaux de fibres ayant une taille (diamètre) différentes pouvant varier de 80 μ m à 300 μ m, comme le montre la Figure III.1. Cependant ces résultats montrent une tendance, cette mesure n'est pas précise car elle ne tient pas compte de l'orientation des fibres dans la matrice.

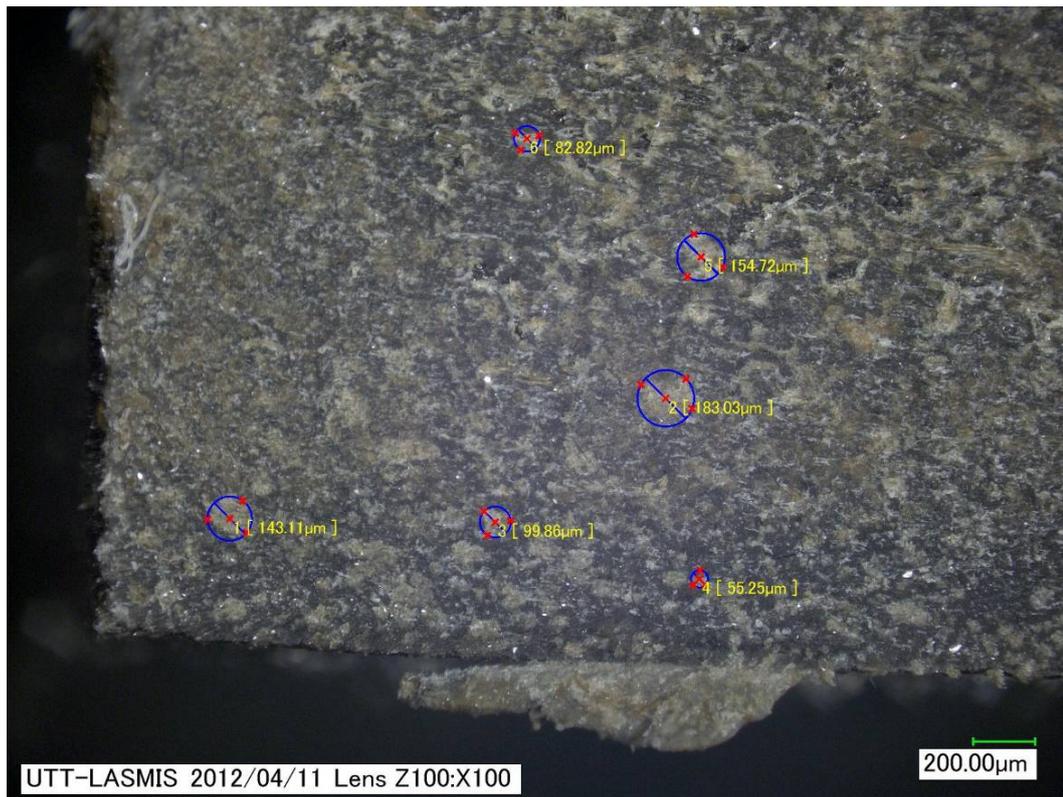


Figure III.1 : Microscopie de la section d'une éprouvette en traction (visualisation des fibres)

Les éprouvettes de traction présentent une zone en surface où la densité de fibres est très faible voire nulle (Figure III.2). Ce phénomène est appelé phénomène de coque. Cette zone de taux de renfort quasiment nulle est causée par le processus d'injection des éprouvettes et de la viscosité respective de la fibre et du PP. Le renfort et la matrice thermoplastique n'ayant pas la même viscosité, l'écoulement de la matière dans la moule sera différent, favorisant un écoulement de la fibre au cœur et un écoulement du PP en surface.

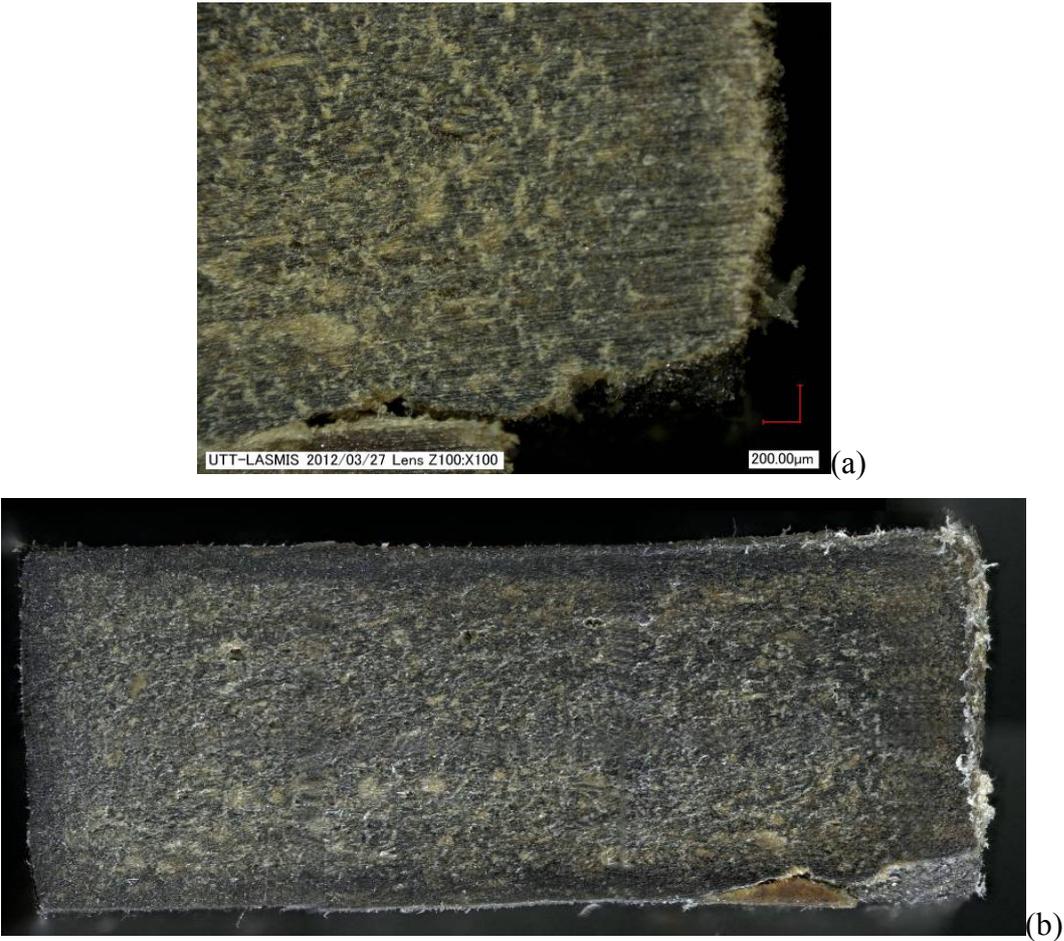


Figure III.2 : Microscopie numérique de la section transversale d’une éprouvette de traction (a : image grossie, b : image d’ensemble)

I.1 Comportement mécanique en traction uniaxiale

Les essais de traction uniaxiale d'un composite polypropylène renforcé par des fibres de chanvre montrent un comportement fortement plastique (Figure III.3). Ce comportement peut être divisé en trois parties distinctes :

- Zone 1 : L'évolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation appliquée est purement linéaire jusqu'à un seuil défini par la limite d'élasticité (R_e). Dans cette partie, la variation de contrainte $\Delta\sigma$ ramenée à la variation de déformation $\Delta\varepsilon$ permet de déterminer le module d'Young E du composite : $E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$
- Zone 2 : La variation de contrainte par incrément de déformation diminue au fur et à mesure que la déformation augmente (Figure III.3) jusqu'à devenir quasiment nul au moment où la contrainte de traction atteint sa valeur maximum (σ_{max}). Cette zone non-linéaire représente le comportement plastique du composite. Elle représente environ 70% de la déformation totale.
- Zone 3 : Après avoir atteint la contrainte maximum qui représente la résistance du matériau à une sollicitation de traction uniaxiale, le comportement mécanique du composite présente une zone de striction où la contrainte de traction diminue alors que la déformation augmente. Dans cette zone apparaissent des lignes blanches sur la surface de l'éprouvette, montrant une localisation des déformations maximales ainsi que des zones de ruptures localisées (ce phénomène sera détaillé dans la Partie I.4 et Partie IV)

Les composites PP – chanvre présentent un comportement et une rupture fortement ductile comme le montre la Figure III.3 puisque la déformation plastique représente moins de 5% (dans l'exemple cité dans cette partie celle-ci équivaut à environ 4%).

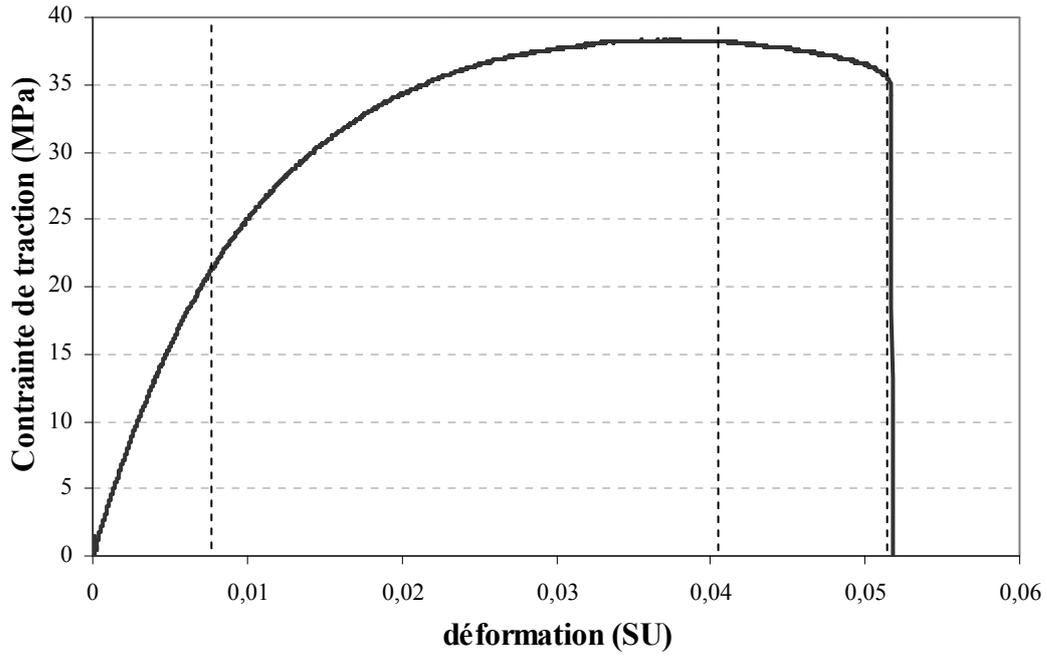


Figure III.3 : Comportement en traction d'un composite PP - chanvre

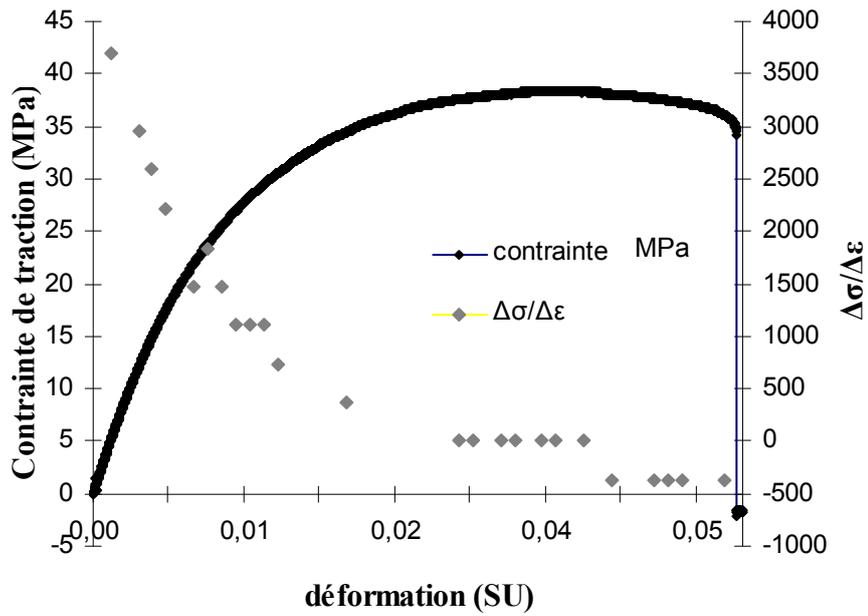


Figure III.4 : Evolution de l'incrément de contrainte $\Delta\sigma$ en fonction de la variation de déformation $\Delta\varepsilon$

I.2 Comportement mécanique en flexion

Les agro-composites PP – chanvre présentent un comportement mécanique similaire en flexion 3 points et en traction comme le montre la courbe suivante (Figure III.5).

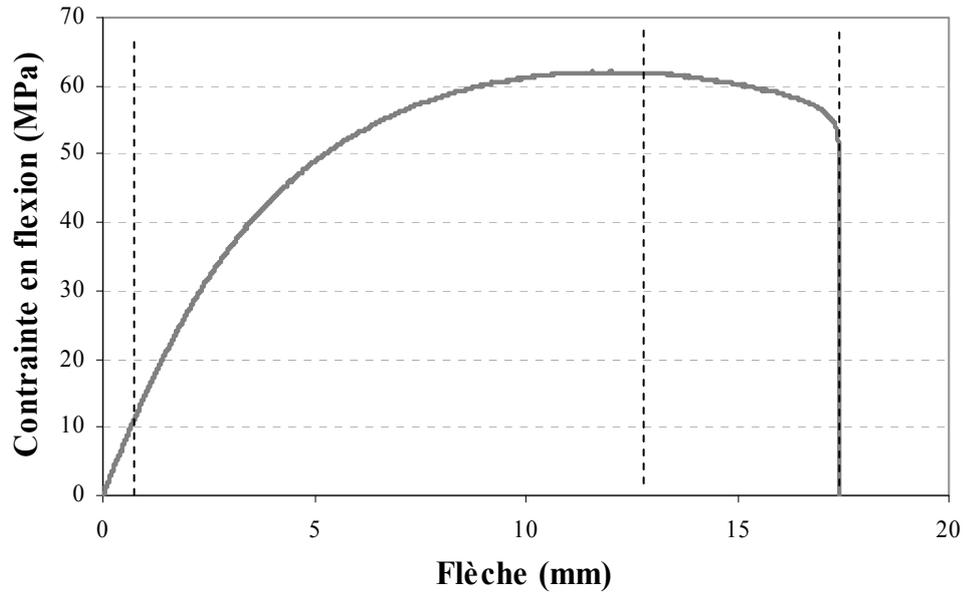


Figure III.5 : Comportement en flexion d'un composite PP - chanvre

L'évolution de la contrainte de flexion (ou force de flexion) en fonction de la flèche mesurée au milieu de l'éprouvette montre un comportement qui peut se décomposer en trois parties :

- Zone 1 : L'évolution de la contrainte de flexion est proportionnelle à la flèche imposée. Le comportement est linéaire élastique jusqu'à une contrainte seuil (R_e : limite élastique) de 6 à 7 MPa pour une flèche de moins d'un 1 mm.

Dans cette partie élastique, le module d'élasticité en flexion s'écrit

$$E = \frac{FL^3}{4u_y bh^3} . \text{ Ce module d'élasticité en flexion définit la même}$$

propriété physique que le module d'Young puisque c'est deux modules décrivent la résistance à la déformation du matériau suivant l'axe de l'éprouvette.

- Zone 2 : Après avoir atteint la contrainte seuil d'élasticité, le comportement devient plastique. L'incrément de déformation plastique en flexion diminue jusqu'à atteindre une valeur très faible au moment de la rupture, comme le montre la Figure III.6. Cet incrément diminue à vitesse constante en début de sollicitation (la contrainte diminue proportionnellement par rapport à la flèche), ensuite à environ 4% de déformation totale, cette diminution se ralentit jusqu'au moment de la rupture.
- Zone 3 : Après avoir atteint sa résistance maximum en flexion, le comportement présente une zone de striction. La contrainte de flexion diminue alors que la déformation continue de s'accroître et cela jusqu'au moment de la rupture.

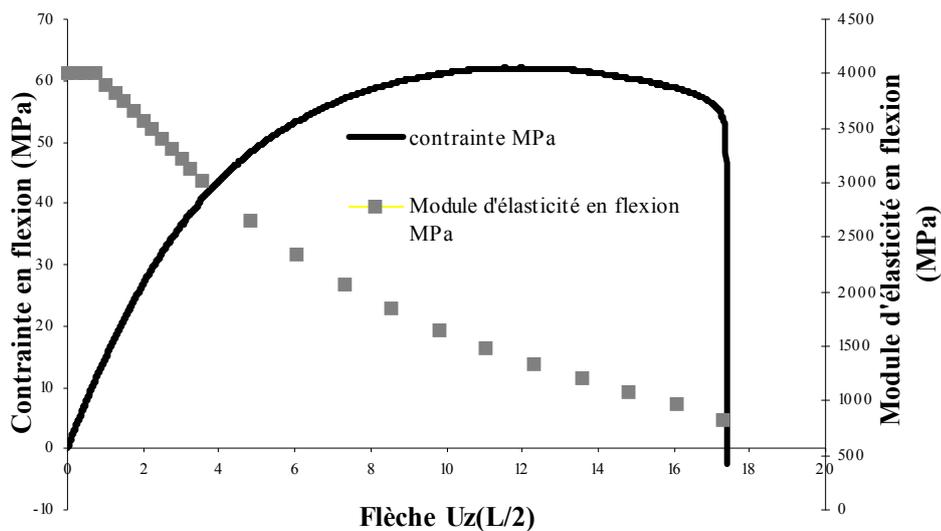


Figure III.6 : Contrainte et module d'élasticité en flexion en fonction de la flèche à $x = L/2$

I.3 Propriétés mécaniques

I.3.1 Propriétés en traction :

Les essais de caractérisation mécanique en traction uniaxiale et en flexion trois points ont permis de déterminer les propriétés mécaniques élastiques du matériau ainsi que sa résistance à la rupture en traction et en flexion. Dans cette partie sont présentées les propriétés moyennes d'un composite PP – chanvre. Au vue de l'hétérogénéité de ce type de matériau, une étude complémentaire sera menée dans le but de déterminer le comportement local et comprendre l'influence de la répartition des fibres dans le composite sur son comportement. Cette étude tient compte de la structure composite du matériau dans la caractérisation de ces propriétés mécaniques. Pour pouvoir déterminer ce comportement local, la méthode de corrélation d'images a été couplée aux essais de traction (partie IV.5). Cette méthode optique a aussi permis de calculer avec précision le coefficient de Poisson. Les propriétés présentées dans cette partie sont celles des composites renforcés par des fibres de chanvre "standard" (fibres e40 : extraite d'une variété qualifiée de standard et soumise à des conditions de culture standard pour cette plante récoltée en 2009, les détails de ces cultures ont été présentés dans la partie II).

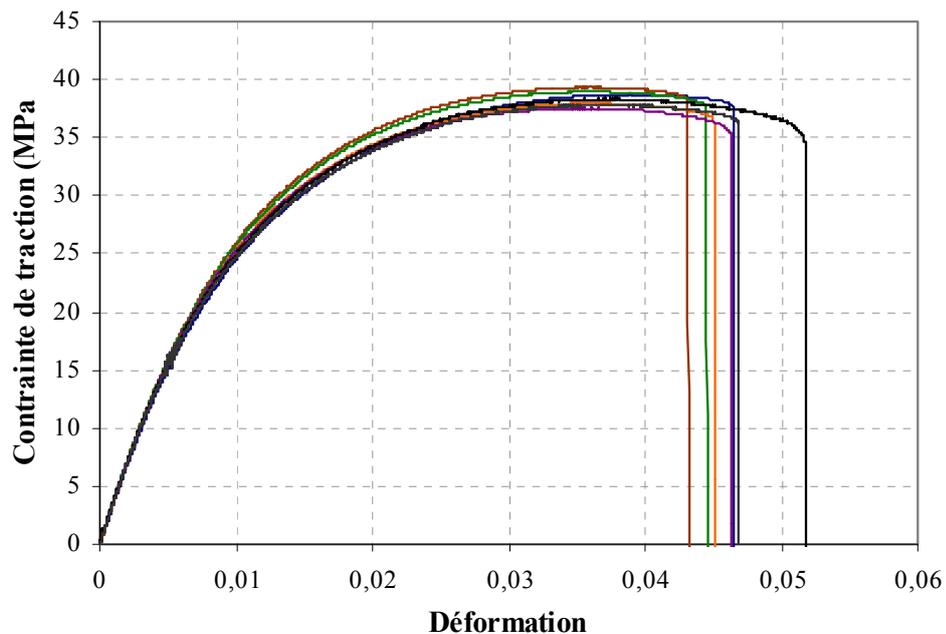


Figure III.7 : Courbes de traction pour les composites renforcés par des fibres de chanvre de type standard

Les essais de caractérisation (Figure III.7) montrent des courbes de traction similaires et quasiment identiques. Les dispersions des résultats entre chaque essai sont négligeables. Les parties élastiques se superposent, le module d'Young et la limite élastique du composite sont invariants. De légères variations de propriétés apparaissent lorsque le matériau plastifie. Plus la déformation imposée est grande c'est-à-dire plus on est proche de la rupture, plus cette différence s'accroît. La contrainte maximum présente un faible écart de l'ordre de quelques Newtons. Une différence plus importante de l'ordre de 10 à 20% a été constatée pour la déformation à rupture. Cette différence de propriétés mécaniques lorsque le matériau s'approche de sa rupture peut s'expliquer par la répartition hétérogène des fibres dans le composite et par le comportement à rupture des éprouvettes (voir les parties I.4 et I.5).

Tableau III-1 : Propriétés mécaniques en traction d'un composite PP - chanvre (fibre standard de 2009)

	Allongement à rupture (mm)	Force maxi de traction (kN)	Déformation à la rupture	Contrainte maxi (MPa)	E (MPa)	Re (MPa)	Contrainte à rupture (MPa)
Essai 1	5,54	1,549	0,0503	38,73	3367	7,77	37,57
Essai 2	5,12	1,574	0,0465	39,35	3588	6,82	38,17
Essai 3	5,07	1,559	0,0461	38,97	3598	5,99	38,17
Essai 4	5,25	1,518	0,0476	37,95	3525	6,98	36,31
Essai 5	5,18	1,502	0,0470	37,54	3420	5,81	35,13
Essai 6	5,74	1,534	0,0570	38,35	3616	5,84	34,63
Essai 7	5,15	1,514	0,0470	37,80	3540	7,15	36,07
Moyenne	5,29	1,536	0,0488	38,38	3522	6,62	36,58
ET*	0,25	0,026	0,0038	0,66	95	0,76	1,43

*ET = Ecart Type

Les propriétés données en Tableau III-1 montrent que le composite PP-chanvre testé a une résistance mécanique d'environ 38MPa pour une déformation à rupture de

l'ordre 5%. L'écart type sur la déformation à rupture équivaut à une variation de 8% de la déformation maximum moyenne.

La variation de la contrainte maximum de 1,7% est beaucoup plus faible que la variation de la déformation à rupture, montrant que les dispersions des propriétés sont plus importantes pour les contraintes que pour les déformations. La contrainte à rupture est de l'ordre de 36,5MPa, soit une variation de 3,9%, pour une déformation à la striction (Eq. III-10) de $1,22 \pm 0,34\%$ (Tableau III-2). Les propriétés élastiques du matériau, le module d'Young E et la limite d'élasticité Re sont respectivement de $3522 \pm 95\text{MPa}$ et $6,62 \pm 0,76\text{MPa}$.

Les variations mesurées des propriétés mécaniques, en début d'essai (module d'Young, contrainte maximum) est de l'ordre 2%, alors que au moment de la rupture (zone de striction), la variation des propriétés mesurées (déformation et contrainte à rupture) varie entre 4 et 8%. Cette variation des mesures plus importante montre que la rupture des éprouvettes dépend d'autres facteurs discutés dans les parties I.4 et I.5.

$$\epsilon_{\text{striction}} = \epsilon_{\text{rupture}} - \epsilon_{\text{maximum}} \quad (\text{Eq. III-1})$$

Tableau III-2 : Valeurs des déformations à Re, à la contrainte maximum, à la rupture et à la striction (traction uniaxiale)

	Déformation à			
	Déformation à Re	la contrainte maxi	Déformation à la rupture	Déformation à la striction**
Essai 1	0,0023	0,0387	0,0503	0,0115
Essai 2	0,0019	0,0359	0,0465	0,0105
Essai 3	0,0016	0,0353	0,0461	0,0108
Essai 4	0,0019	0,0358	0,0476	0,0118

Essai 5	0,0016	0,0349	0,0470	0,0121
Essai 6	0,0016	0,0374	0,0570	0,0195
Essai 7	0,0020	0,0382	0,0470	0,0087
Moyenne	0,0018	0,0366	0,0488	0,0121
ET*	0,0002	0,0015	0,0038	0,0034

*ET = Ecart Type

** (Eq. III-1)

1.3.2 Propriétés en flexion :

Les différents essais de flexion (Figure III.8) montrent un comportement en flexion identique. Les parties élastiques se superposent et la limite d'élasticité est la même. Le comportement plastique du matériau est le même jusqu'au moment où la résistance maximum en flexion est atteinte. La seule différence constatée concerne la flèche à la rupture. Pour certains essais, des écarts de l'ordre de 15% sont constatés, mettant en évidence une différence de comportement à la striction.

Les composites PP-chanvre caractérisés ont une résistance à la flexion de 61MPa pour une flèche à rupture de l'ordre de 17mm. La contrainte à rupture est plus faible d'environ 10 MPa correspondant à une différence de 17%. Les propriétés élastiques du composite sont de l'ordre de $4021,1 \pm 53,5$ MPa pour le module d'Young et de $13,8 \pm 0,3$ MPa pour la limite élastique.

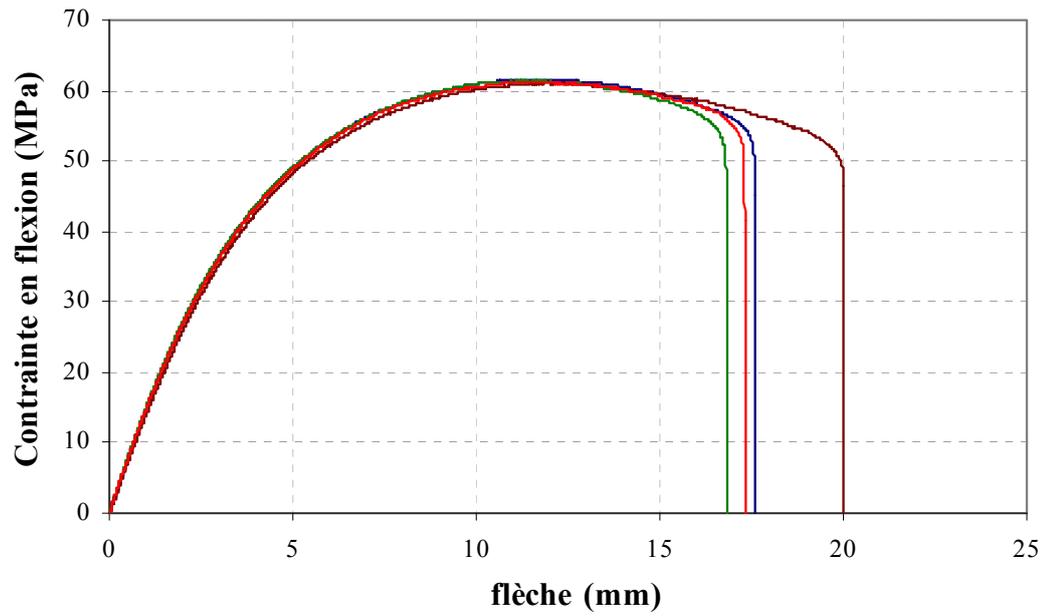


Figure III.8 : Courbe de flexion - Contraite de flexion en fonction de la flèche imposée (composite renforcé par des fibres standard)

Tableau III-3 : Propriétés mécaniques en flexion d'un composite PP - chanvre (fibre standard)

	Flèche maximum (mm)	Force maximum (kN)	Contrainte de flexion maximum (MPa)	Contrainte à la rupture (MPa)	Module d'élasticité en flexion (MPa)	Limite d'élasticité Re (MPa)
Moyenne	17,9	0,08175	61,3	50,5	4020,1	13,8
ET	1,4	0,00034	0,3	1,9	53,5	0,3

Une différence importante entre les propriétés identifiées en flexion et en traction est constatée. La contrainte maximum de flexion est 1,6 fois supérieure à la contrainte mesurée en traction. La même constatation est faite pour la contrainte à rupture qui est 1,38 fois supérieure en flexion. La différence de contrainte entre la contrainte maximum et la contrainte à rupture est légèrement plus faible d'environ 14% pour les essais de traction que pour les essais de flexion. La chute de contrainte avant la rupture présente une différence, la chute de contrainte est de 17% pour la flexion alors que pour la traction, elle est de 5%.

Le module d'élasticité en flexion et traction sont du même ordre de grandeur, de 3500 à 4000 MPa. Néanmoins, une différence de 12% est constatée entre le module d'Young mesuré en flexion et celui déterminé en traction. La limite d'élasticité mesurée est deux fois plus élevée dans le cas de la flexion que pour la traction comme le montre le Tableau III-4.

Tableau III-4 : Comparaison propriétés mécaniques en traction et en flexion

	Contrainte maximum (MPa)	Contrainte à rupture (MPa)	Chute de contrainte à rupture %	Module d'élasticité (MPa)	Limite d'élasticité Re (MPa)
Traction	38,38±0,66	36,58±1,43	4,7	3522±95	6,62±0,76
Flexion	61,3±0,3	50,5±1,9	17,6	4020±54	13,8±0,3

Ces différences de propriétés s'expliquent par le fait que les zones caractérisées entre la flexion et traction ne sont pas les mêmes. Le module d'Young déterminé en traction représente la rigidité moyenne de l'ensemble de la zone utile de l'éprouvette. Alors qu'en flexion cette même rigidité est mesurée seulement entre le point d'appui et le point d'application de la force, soit sur une longueur utile de 40mm. Pour rappel la longueur testée en traction est de 110mm et en flexion de 80mm, soit une longueur utile en traction de 110mm et en flexion de 40mm. Si le comportement du composite n'est pas homogène dans l'ensemble de l'éprouvette mais varie localement, les propriétés caractérisées seront alors dépendantes de la zone pour laquelle ces propriétés sont identifiées. Si la résistance au déplacement n'est pas la même dans les deux moitiés de l'éprouvette, lors d'un essai de flexion seul le module d'Young de plus grande valeur sera mesurée, ce qui explique pourquoi le module en flexion est plus grand qu'en traction (Figure III.9). La même réflexion est faite pour la contrainte maximum. Malgré que le même état de contrainte soit étudié, la rupture ne se produisant pas au même endroit la contrainte maximum déterminée différera. Ainsi cette différence de propriétés s'explique par l'hétérogénéité du matériau. Cette hétérogénéité a été qualifiée et expliquée en partie III (I.5 et Partie IV) de ce mémoire.

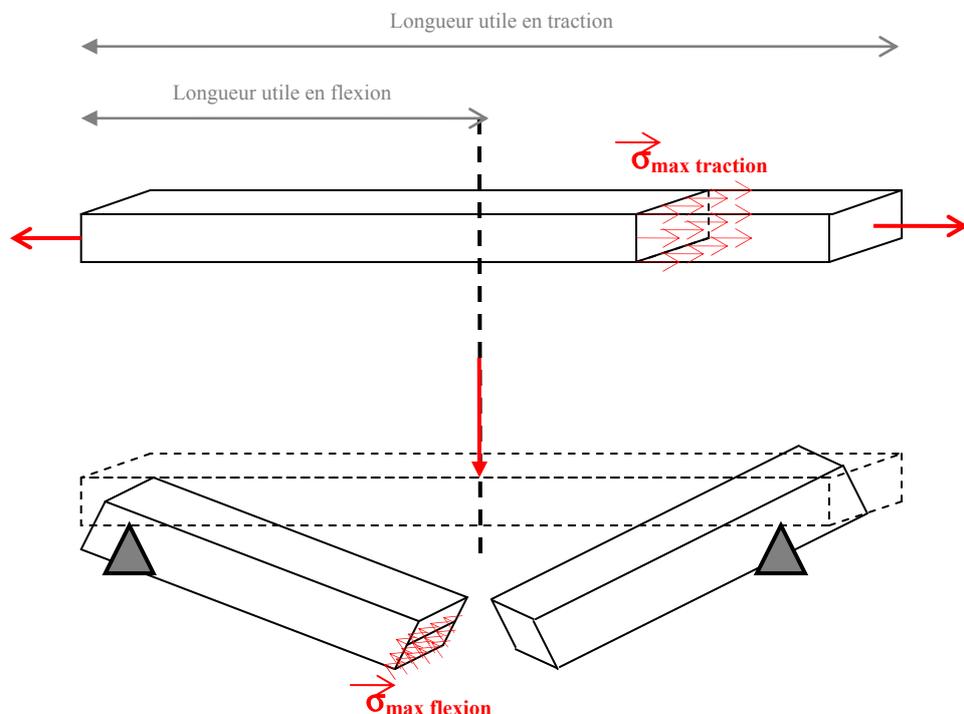


Figure III.9 : Etat de sollicitation en traction (a) et flexion (b) d'une éprouvette PP - chanvre

1.3.3 Coefficient de Poisson

La valeur du coefficient de Poisson a été déterminée en utilisant la méthode de corrélation d'images couplée aux essais de traction (voir Partie IV.5). Les valeurs du coefficient de Poisson sont illustrées dans le Tableau III-5 : Valeur du coefficient de Poisson pour le composite renforcé par des fibres de chanvre standard. Les valeurs obtenues montrent que les coefficients varient entre 0,33 et 0,39 ce qui donne une moyenne de 0,36.

Tableau III-5 : Valeur du coefficient de Poisson pour le composite renforcé par des fibres de chanvre standard

	Coefficient de Poisson (ν)
Essai corrélation 1	0,39
Essai corrélation 2	0,33
Essai corrélation 3	0,33
Essai corrélation 4	0,39
Moyenne	0,36
ET*	0,04

*ET = Ecart Type

1.3.4 Comparaison des propriétés des fibres de chanvre, du polypropylène et du composite PP - chanvre

Le composite PP renforcé par des faisceaux de chanvre présente une résistance à la traction 1,5 fois supérieure à celle du PP seule (25MPa) et un module d'Young du composite multiplié par 3. Ces résultats montrent le pouvoir renforçant des fibres de chanvre dans l'agro-composite, améliorant à la fois la rigidité et sa résistance à la traction. La déformation à rupture du polypropylène est très grande caractérisant un fort comportement visco-plastique. En y ajoutant des fibres de chanvre, cette déformation est réduite pour atteindre une valeur de 5% déterminant un comportement ductile du composite. Ainsi les fibres de chanvre renforcent le

polypropylène en améliorant ces propriétés tout en fragilisant le matériau puisque la rupture se produit beaucoup plus tôt. La fragilité est apportée par les fibres qui ont un comportement fragile.

Tableau III-6 : Comparaison des propriétés mécaniques en traction des fibres unitaires et faisceaux de chanvre, polypropylène et du composites

	Polypropylène(1)	Fibre unitaire de chanvre	Faisceau de chanvre	Composite PP - chanvre
Résistance à la traction (MPa)	25	211 ±88	157 ±50	38,38 ±0,66
Module d'Young E (MPa)	1100	1227 9±6905	9520 ±2157	3522 ±95
Déformation à rupture (%)	> 200	2,8 ±1,3	2,02 ±0,65	4,88 ±0,38

(1) vitesse d'essai de 30mm.min⁻¹

I.4 Mécanisme de rupture

Lors d'un essai de traction, des phénomènes visuellement identifiables apparaissent au cours de la sollicitation permettant d'expliquer le comportement du composite et son endommagement.



Figure III.10 : Epreuve de traction PP - chanvre à $t_0 = 0s$

La photo ci-dessus montre une éprouvette avant sollicitation, sur sa surface aucun phénomène particulier n'est remarqué, hormis les fibres courtes qui sont présentes en surface. En se déformant plastiquement le composite blanchi (Figure III.11a). Lorsque la déformation plastique atteint un certain seuil (environ 3%), plusieurs lignes blanches apparaissent (Figure III.11b). C'est au niveau de ces lignes que la rupture se produit (Figure III.11c) montrant ainsi que c'est dans cette zone que l'endommagement est maximum. Ce blanchiment est causé lors d'une forte déformation plastique du polypropylène engendrée par le réagencement ordonné des chaînes polymériques. Ce blanchiment apparaît sur toute la surface du composite (Figure III.11 et Figure III.12).

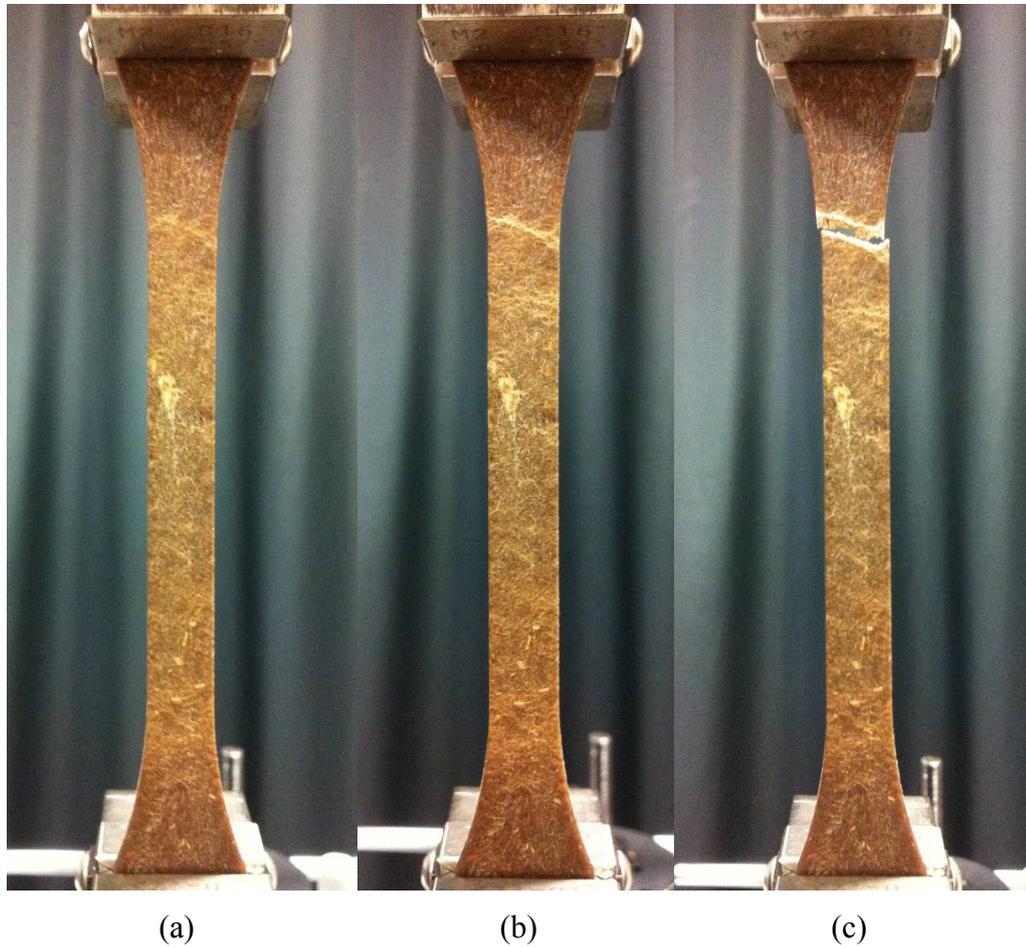


Figure III.11 : Images macroscopiques d'une éprouvette PP - chanvre au cours d'un essai de traction (face avant), (a) : à 2,51 min, (b) : à 3,29 min et (c) : après rupture

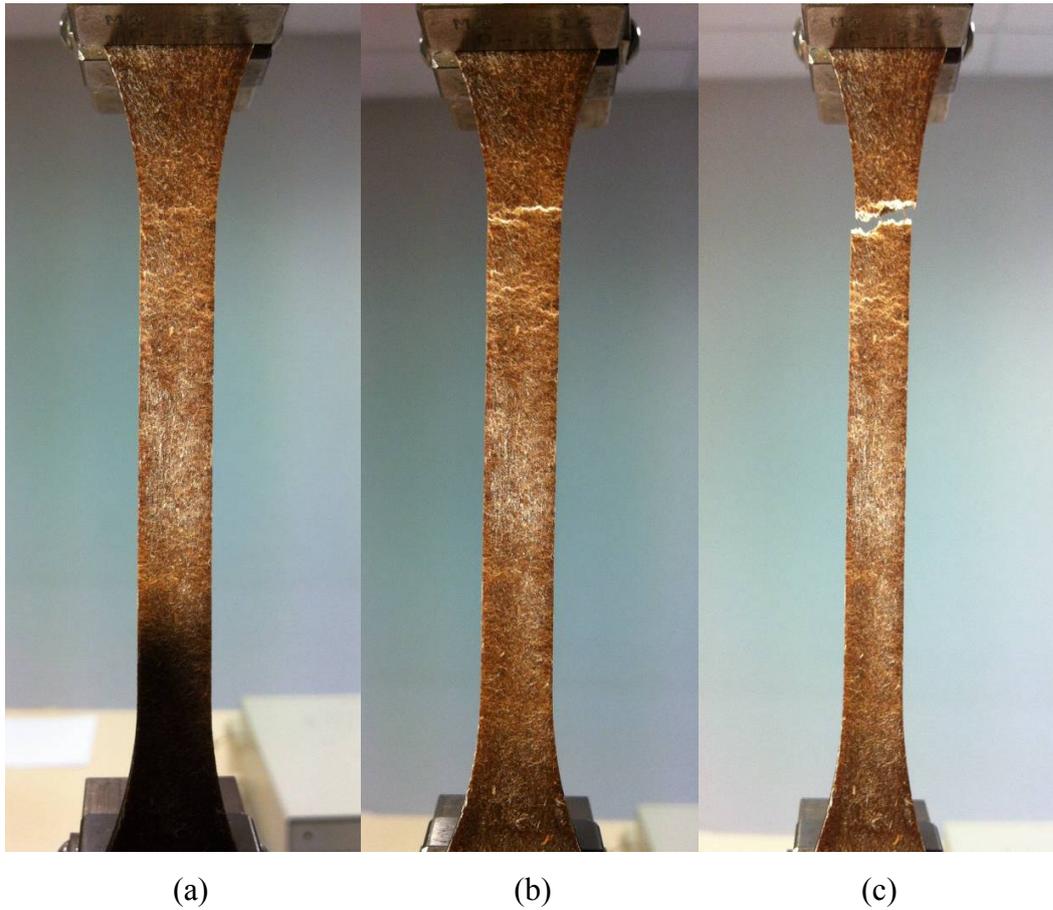


Figure III.12 : Images macroscopiques d'une éprouvette PP - chanvre au cours d'un essai de traction (face arrière), (a) : à 2,51 min, (b) : à 3,29 min et (c) : après rupture

Ce phénomène a aussi lieu au cœur du matériau (Figure III.13). Mais comme le montre cette microscopie numérique l'intégralité de la section transversale au niveau de la rupture n'est pas blanchie. Seulement la moitié de la section subit une forte déformation plastique montrant un comportement à rupture différent dans la moitié gauche de l'éprouvette comparée à celle de droite. Ce phénomène met en évidence deux comportements à rupture qui dépendent de la zone d'initiation de la rupture.

- Comportement à rupture 1 :

La rupture s'initie dans la zone fortement plastifiée (zone blanche) suite à une déformation locale plus importante et se propage jusqu'à la zone plus fragile.

- Comportement à rupture 2 :

La rupture s'initie dans la zone fragile, cette zone se rompt en premier. Ensuite le composite continue à se plastifier dans la zone de forte plastification jusqu'à la rupture intégrale.

Dans les deux cas, cela met en évidence la différence de comportement dans la largeur de l'éprouvette et confirme l'hétérogénéité du matériau.

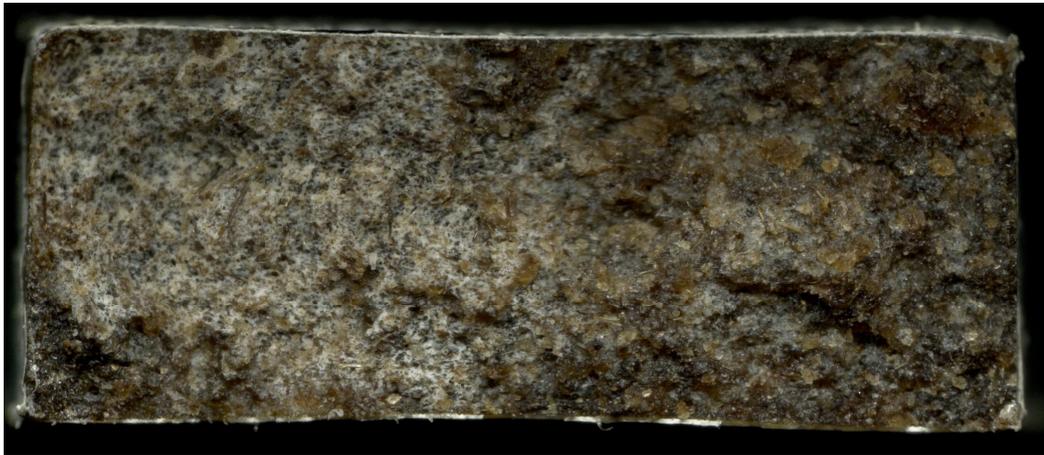


Figure III.13 : Faciès de rupture non-homogène d'une éprouvette soumise à de la traction uniaxiale

Dans certains cas particuliers, la section transversale à rupture montre un comportement homogène (Figure III.14). Mais ce comportement homogène ne peut pas être significatif puisqu'il apparaît lorsque :

- une concentration de fibre dans l'éprouvette est présente au niveau de la section à rupture.
- l'interface fibre-matrice n'est pas bonne. La résistance à rupture du composite et du PP étant assez proche, l'interface ne remplit pas sa fonction de liant.



Figure III.14 : Faciès de rupture homogène d'une éprouvette de traction soumise à de la traction uniaxiale

Dans le cas des essais de flexion, un phénomène similaire est constaté (Figure III.15). Les deux zones montrant un comportement différent apparaissent dans la hauteur de l'éprouvette. Cette fois-ci la différence de comportement n'est pas causée par l'hétérogénéité du composite mais par l'état de contrainte qui est différent, le haut de l'éprouvette est sollicité en compression (zone grise) et le bas est soumis à de la traction (zone blanche). Les deux zones ne sont pas symétriques par rapport au milieu de l'éprouvette. La fibre neutre étant ainsi décalée, le comportement n'est pas identique dans la hauteur de l'éprouvette. Ainsi ces deux dernières microscopies mettent en évidence l'hétérogénéité du composite à la fois dans sa longueur mais aussi dans sa largeur.

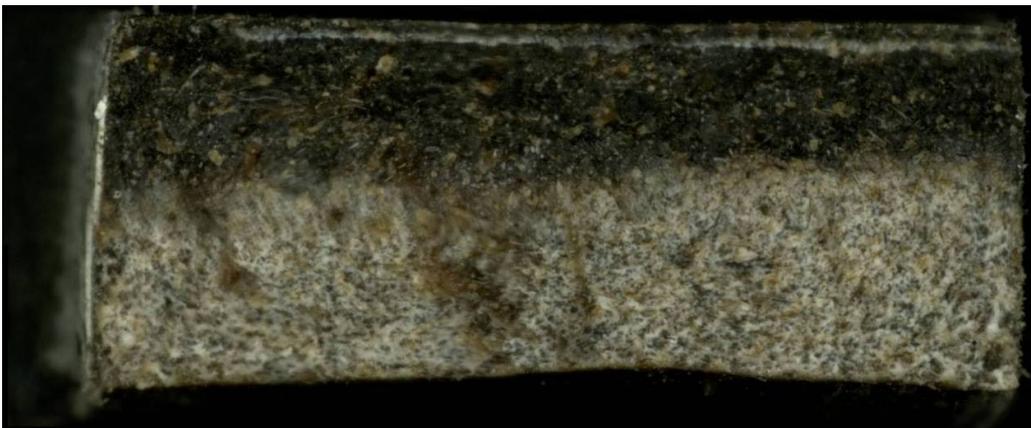


Figure III.15 : Faciès de rupture d'une éprouvette soumise à de la flexion 3 points

Par la suite la localisation de la rupture dans la longueur de l'éprouvette a été étudiée. Les figures suivantes montrent la zone de rupture pour deux processus d'injection et pour deux années de récolte de fibres différentes : processus d'injection du PEP et fibres récoltées en 2009 (Figure III.16), processus d'injection du PEP et fibres récoltées en 2011 (Figure III.17) et processus d'injection de l'IFTS et fibres récoltées en 2009 (Figure III.18).

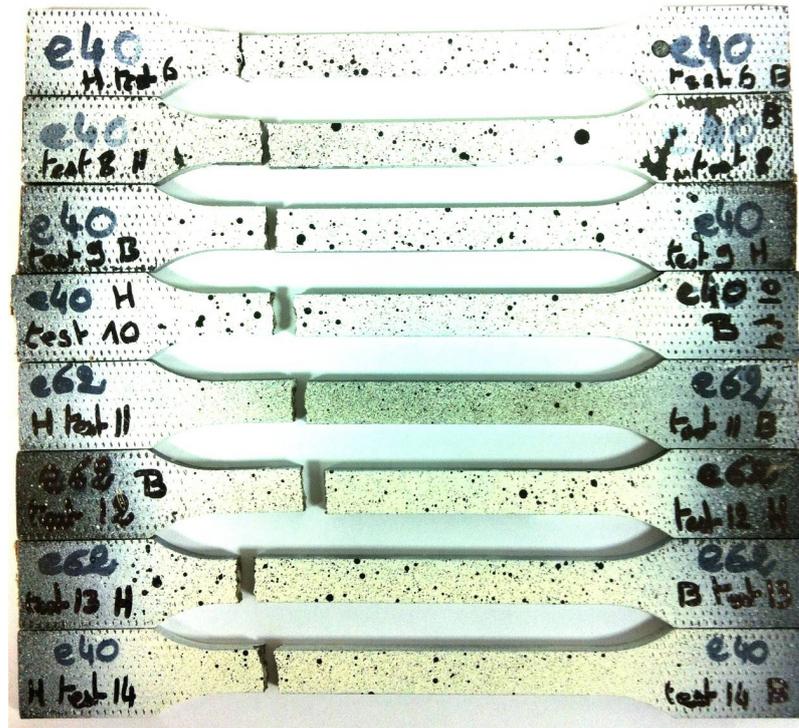


Figure III.16 : Zones de rupture des éprouvettes de traction (chanvre 2009, PEP)

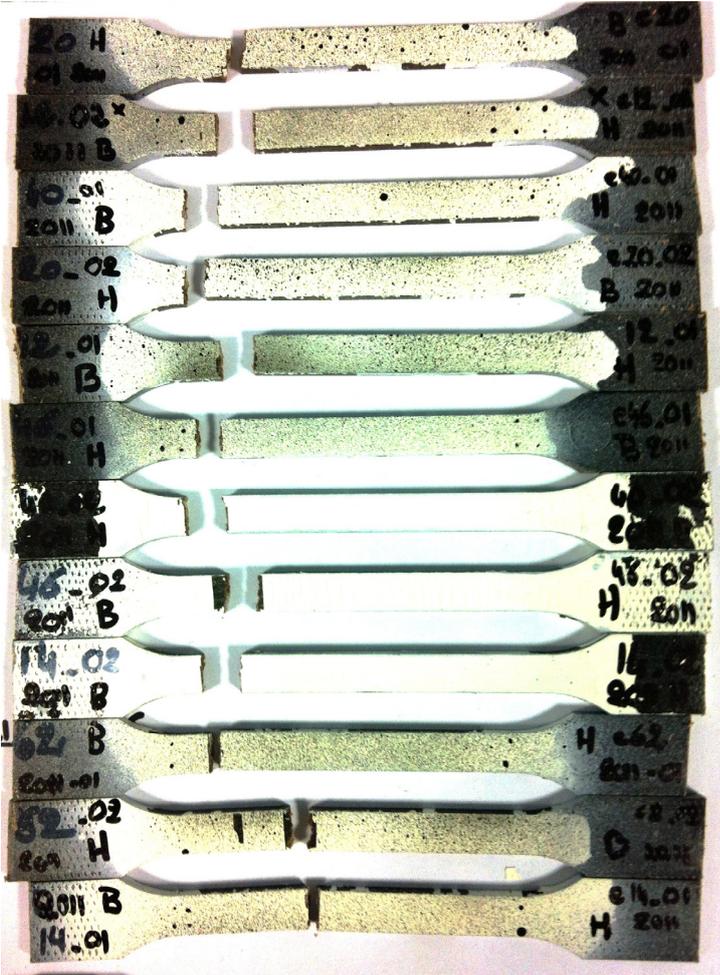


Figure III.17 : Zones de rupture des éprouvettes de traction (chanvre 2011, PEP)

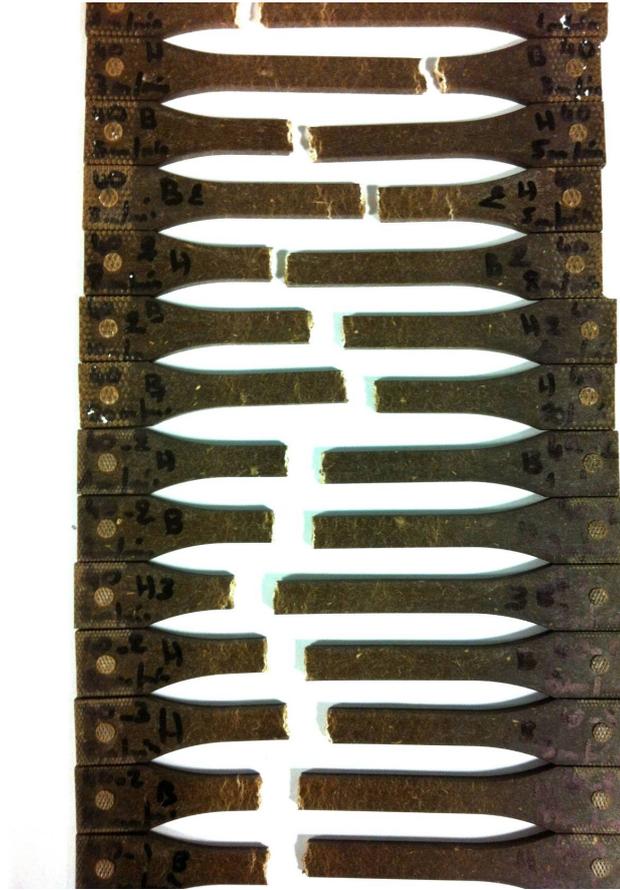


Figure III.18 : Zones de rupture des éprouvettes de traction (chanvre 2011, IFTS)

Ces résultats montrent que la rupture ne se produit pas au milieu de l'éprouvette comme attendu. Mais la rupture se localise toujours au même endroit, à gauche de l'éprouvette (cas des photographies). Cette rupture se produit toujours à l'opposée du point d'injection, à droite sur les photographies précédentes.

Une étude complémentaire a été menée en parallèle pour comprendre la raison de cette rupture. Un composite renforcé par 5% en masse de fibre de chanvre a été injecté. Ce faible taux de renfort a pour particularité de rendre visible à la lumière la concentration de fibres et la répartition des fibres dans l'éprouvette. Ainsi il est possible de mettre en relation la zone de rupture et la concentration de fibres. La Figure III.19 montre que la rupture se produit dans une zone où il y a la plus forte concentration de fibres. Ainsi les fibres fragilisent le composite. En comparant cette étude aux résultats précédents, il est possible de montrer que la rupture se produit

toujours à l'opposée du point d'injection car il y a une concentration de fibre favorisant sa rupture. La répartition hétérogène des fibres dans l'éprouvette est due au processus d'injection. En effet la viscosité des fibres de chanvre et celle du polypropylène étant différentes, l'écoulement des deux matériaux dans le moule d'injection n'est pas le même. Le polypropylène étant plus visqueux que les fibres de chanvre, les fibres auront tendance à être pousser au fond du moule alors que le polypropylène restera en entrée, proche du point d'injection.

Deux études supplémentaires ont été menées pour valider et quantifier cette répartition non-homogène des fibres dans l'ensemble de l'éprouvette (voir parties I.5 et Partie IV).



Figure III.19 : Rupture localisée des composites chanvre – PP

I.5 Répartition des fibres dans la matrice

I.5.1 Répartition dans la longueur :

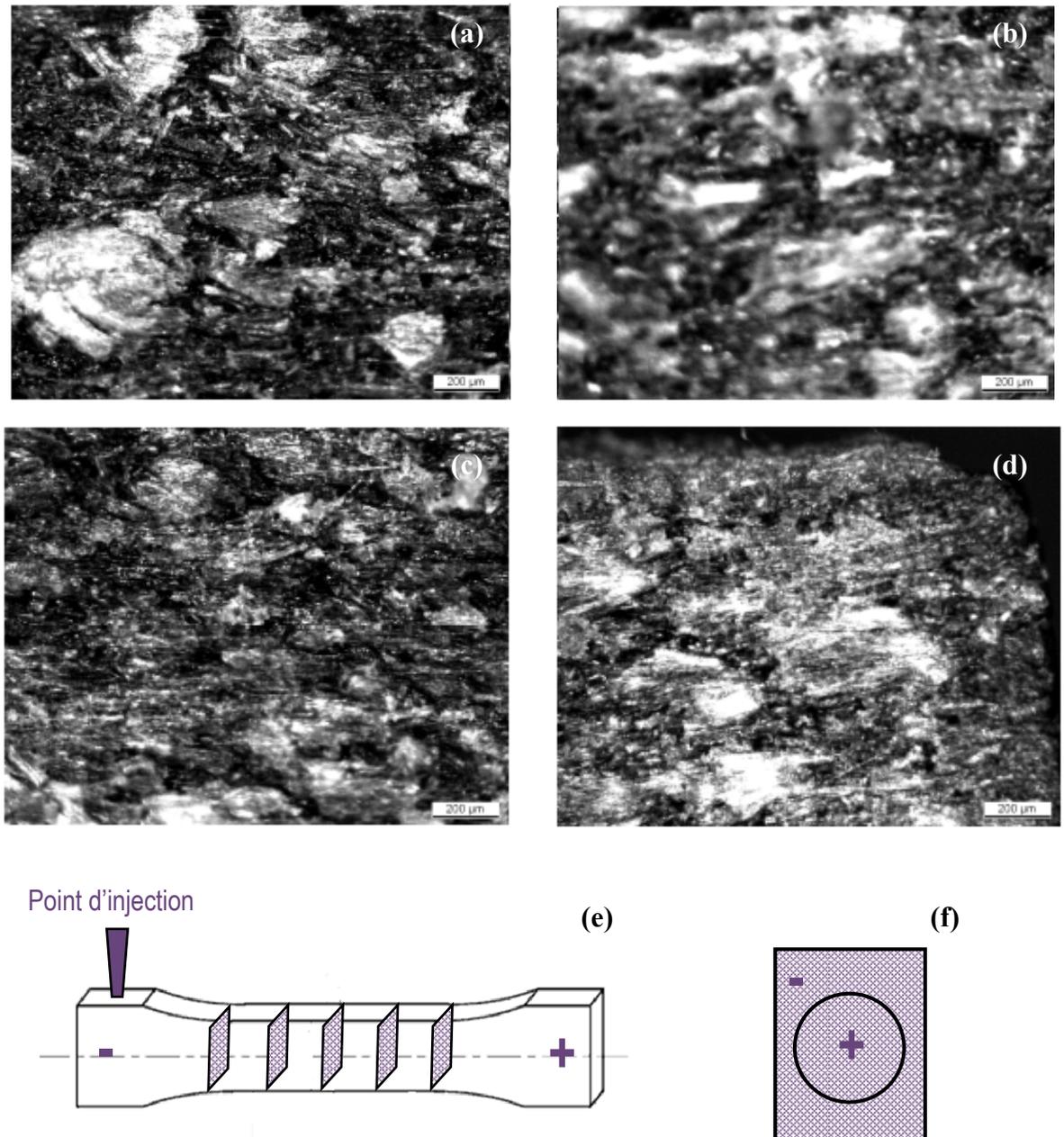


Figure III.20 : Images optiques à différentes positions le long et dans la section transversale de la fibre : (a) photo au cœur et proche du point d'injection, (b) photo au cœur et loin du point d'injection, (c) photo en surface et proche du point d'injection, (d) photo en surface et loin du point d'injection, schématisation de la répartition des fibres dans la longueur (e) et dans la section transversale (f)

Une découpe de l'éprouvette injectée dans sa longueur en plusieurs tranches a été réalisée. Cette découpe a permis de regarder la section transversale du composite à plusieurs endroits dans sa longueur. Les microscopies présentées en Figure III.20 montrent un grossissement de la section transversale au cœur et à la surface de celle-ci pour une zone proche et éloignée du point d'injection. Ces photographies montrent qu'il existe une concentration de fibres loin du point d'injection. Les mesures faites en s'éloignant du point d'injection montrent que le nombre de fibres augmente pour atteindre une valeur maximum à l'opposée du point d'injection. Ainsi cela confirme la non-homogénéité de la répartition des fibres suivant la longueur de l'éprouvette injectée et l'augmentation du nombre de fibres en s'éloignant du point d'injection.

1.5.2 Répartition dans la section transversale

La Figure III.21 met en évidence la répartition hétérogène des fibres pour une section transversale à une position donnée le long de la fibre. Ces microscopies MEB prises au centre de l'éprouvette puis dans une zone plus à gauche et plus à droite montrent la présence ou non de fibre. L'image (a) montre nettement différence de structure entre la partie gauche et la partie droite. A gauche, il y a une proportion de fibres beaucoup plus importante que dans la partie droite. Sur l'image grossie à 600 fois (b), un grand nombre de fibres sont présentes en faisceaux ou en fibres unitaires alors que l'image (c) montre la présence d'aucune fibre. Ainsi il existe aussi une hétérogénéité dans largeur de l'éprouvette.

Comme l'ont montré les études précédentes, il existe une forte hétérogénéité de la répartition des fibres dans l'ensemble des éprouvettes engendrée essentiellement par le processus d'injection utilisé pour fabriquer les échantillons.

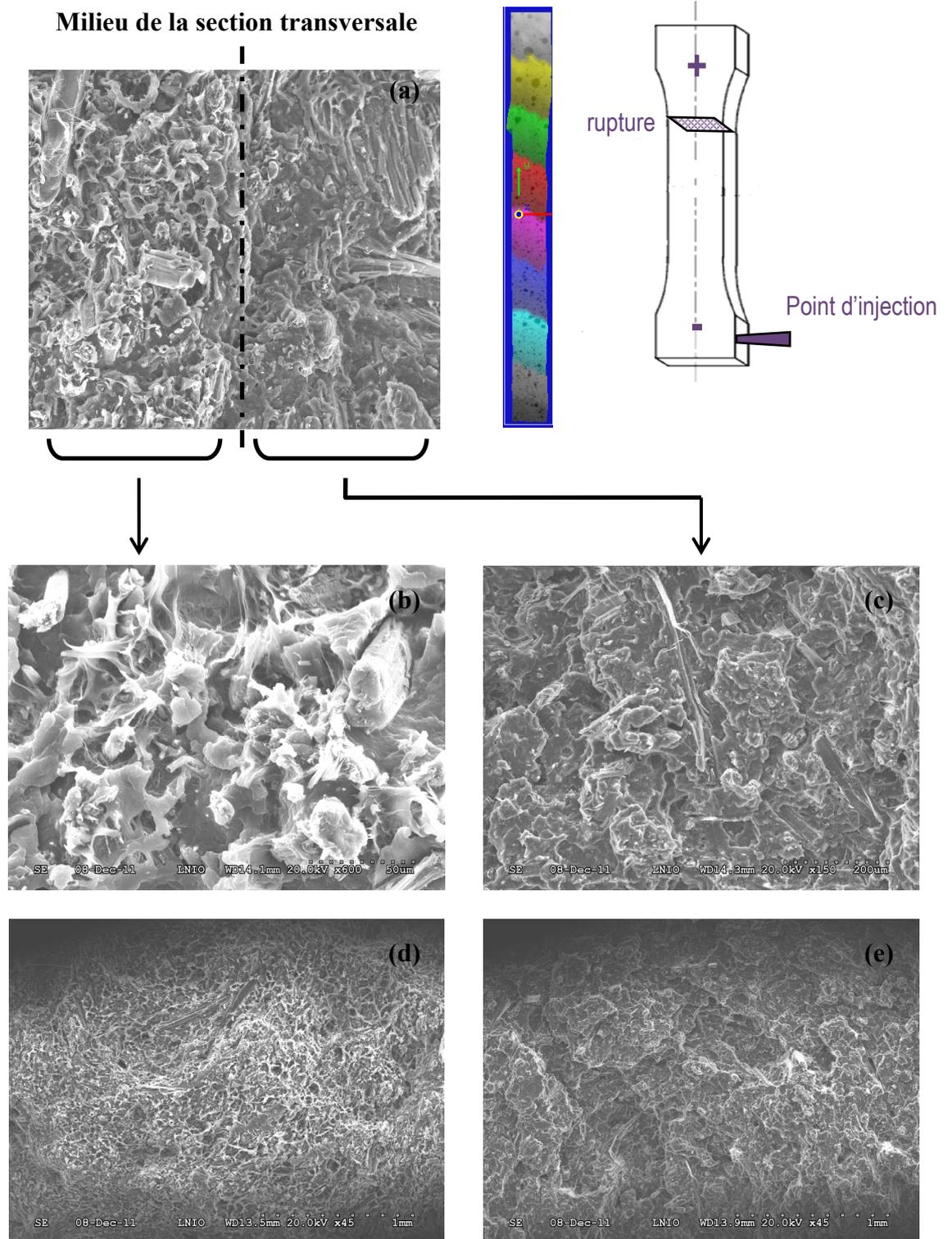


Figure III.21 : Images obtenues par balayage électronique de la zone centrale de la section transversale : (a) au milieu de la section, (b) partie gauche où il y a une concentration de fibre $\times 600$, (c) partie droite où il y a une déconcentration $\times 200$, (d) partie gauche où il y a une concentration de fibre $\times 45$, (e) partie droite où il y a une déconcentration $\times 45$

Partie II . Influence des conditions de culture et de l'année de récolte sur les propriétés mécaniques des composites

II.1 Influence des conditions de culture

II.1.1 Comportement en traction

Les fibres analysées précédemment ont été mélangées à du polypropylène. Ce sont des faisceaux extraits mécaniquement par FRD (Fibre Recherche Développement) qui ont permis d'obtenir les différents compounds. Ces compounds ont ensuite été injectés au PEP (Pôle Européen de Plasturgie).

Dans cette partie, nous cherchons à déterminer si les différences de comportement mécaniques observés pour les faisceaux se retrouvent dans le composite. Des essais de caractérisation en traction et en flexion ont été ainsi menés pour déterminer l'impact de l'apport des fibres de chanvre de différentes natures et soumises à différentes conditions de culture sur les propriétés mécaniques des composites. Pour rappel, les six types de chanvre correspondent à deux variétés de fibres qui ont été soumises à trois conditions de culture différentes (Tableau III-7)

La Figure III.22 montre l'évolution du comportement en traction des différents types de composites. Contrairement au comportement des fibres unitaires et faisceaux seuls ; quelque soit le type de fibres renforçant le composite, l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation suit la même tendance (le comportement pour un composite PP-chanvre est détaillé dans la partie I.1.).

Tableau III-7 : Description des différents types d'agro-composites analysés

Type de fibre de chanvre	Condition de culture	Variété de fibres	Numéro du composite	Couleur	Année
Type 1	Standard (non eau, 50kg/hect)	Standard (F17)	c40	Orange	2009
Type 2	Apport d'eau supplémentaire	Standard (F17)	c46	Orange clair	2009
Type 3	Densité de semis plus importante (100 kg/hect)	Standard (F17)	c12	Jaune	2009
Type 4	Standard (non eau, 50kg/hect)	Variété produisant plus de fibres (S27)	c14	Bleu foncé	2009
Type 5	Apport d'eau supplémentaire	Variété produisant plus de fibres (S27)	c20	Bleu moyen	2009
Type 6	Densité de semis plus importante (100 kg/hect)	Variété produisant plus de fibres (S27)	c62	Bleu clair	2009

La contrainte maximum varie de 35 à 40MPa pour une déformation à rupture de 4 à 5%. Comme le montre les résultats et les études précédentes, les variations constatées des déformations à rupture sont beaucoup plus importantes que les variations de la contrainte à rupture. L'important écart de la déformation à rupture n'est pas seulement causé par le type de renfort utilisé contrairement à la contrainte maximum, mais est aussi influencé par le processus d'injection des compounds et la répartition des fibres dans le composite (Partie III, I.5).

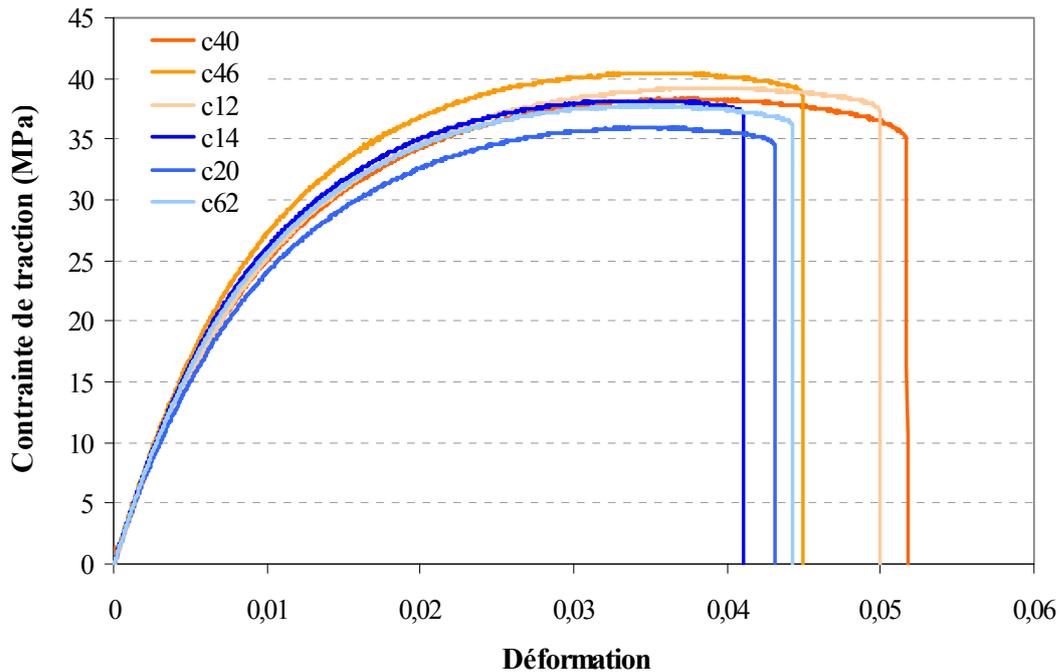


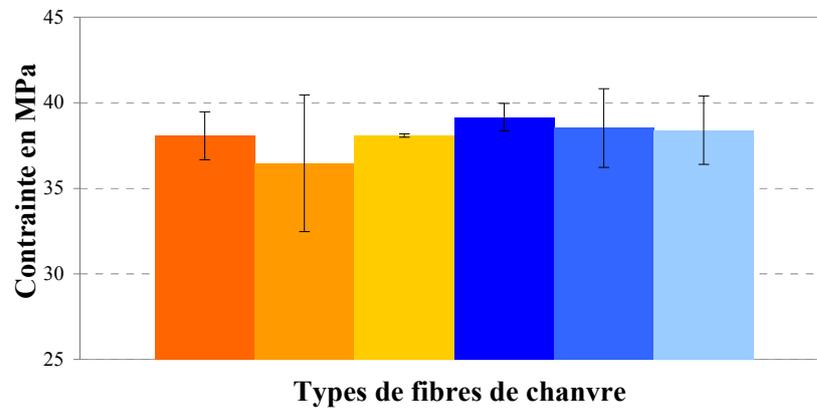
Figure III.22 : Comportement mécanique en traction des agro-composites polypropylène - chanvre pour différentes natures de fibres de chanvre (année 2009)

En analysant les valeurs moyennes des propriétés mécaniques (Tableau III-8), il est possible de conclure que les différences obtenues ne sont pas significatives. Ainsi pour les six types de fibres de chanvre utilisés comme renfort, la résistance à la traction du composite n'est pas affectée.

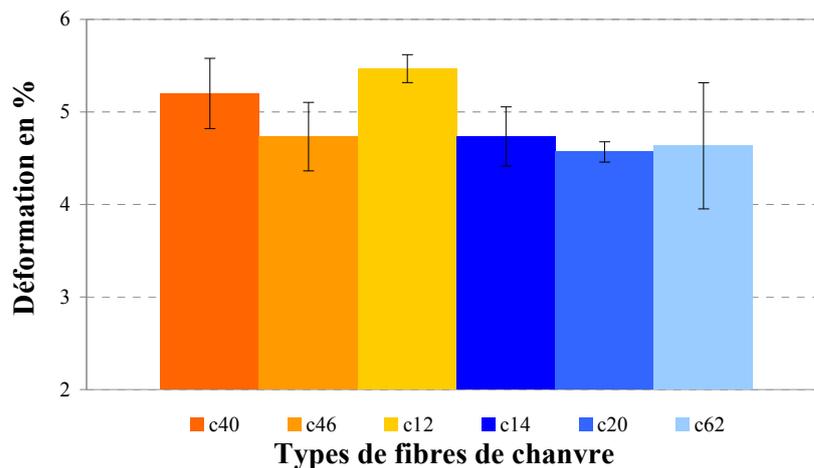
Des écarts plus significatifs (Figure III.23b) sont remarqués pour la déformation à rupture. La plus faible déformation à rupture est observée pour le composite c20 avec une déformation de $0,0456 \pm 0,0011$. Alors que la plus grande déformation à rupture est observée pour le composite c12 avec une valeur de $0,0546 \pm 0,0015$. Comme il a été expliqué précédemment cette différence de déformation à rupture n'est pas due essentiellement à la nature de la fibre utilisée mais dépend de la répartition des fibres dans le composite ainsi que du processus de fabrication (voir les parties I.5 et IV.3).

Tableau III-8 : Propriétés mécaniques d'un agro-composite PP / Chanvre pour différents types de fibres

Type	σ_{max}		$\epsilon_{rupture}$	E (MPa)	Re (MPa)	
	(MPa)	<i>ET</i>			<i>ET</i>	<i>ET</i>
40	38,4	0,7	0,0488	3522	95	6,6
46	36,5	4,0	0,0473	3697	187	6,4
12	38,1	0,1	0,0546	3530	6	6,6
14	39,2	0,8	0,0473	4074	304	6,4
20	38,5	2,3	0,0456	3733	148	6,5
62	38,0	2,0	0,0463	3715	252	7,0



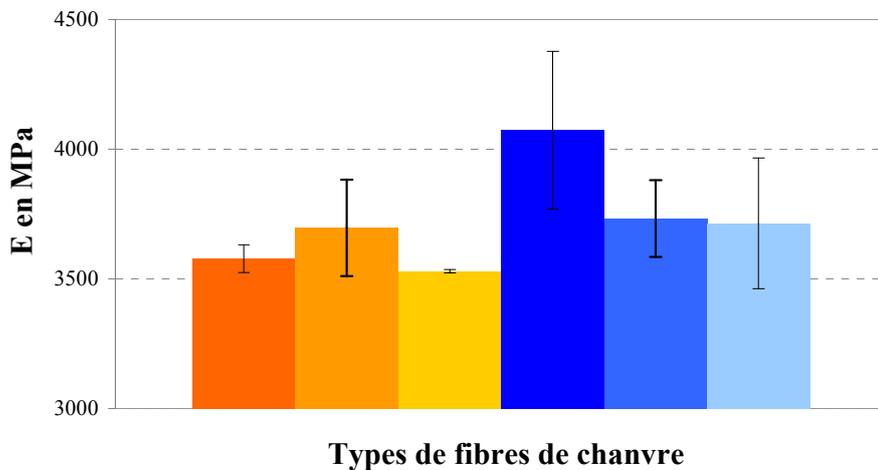
(a)



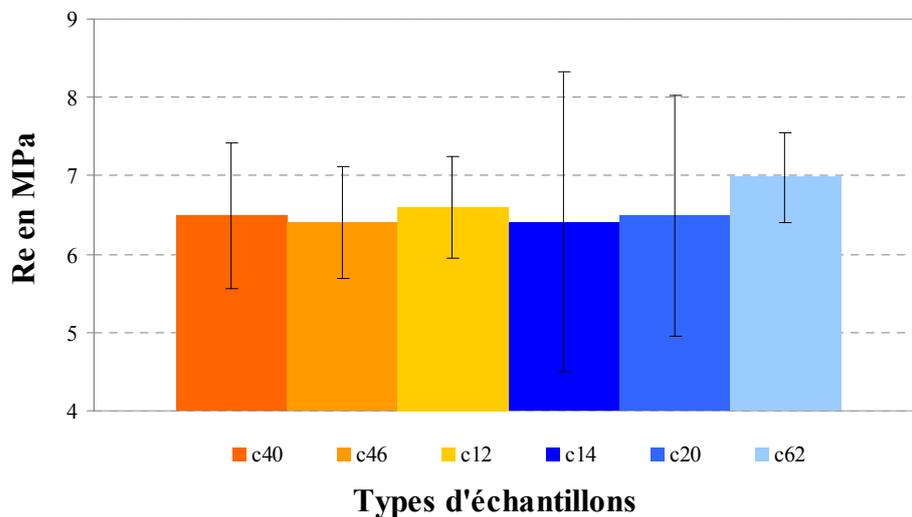
(b)

Figure III.23 : Propriétés mécaniques de résistance en traction des composites PP-Chanvre en fonction de la nature des fibres (année 2009)

Comme le montre la Figure III.24b, les mesures de la limite d'élasticité présentent des écarts types importants, montrant une forte variation de cette mesure en fonction de l'échantillon testé. La limite élastique oscille entre 6,4 et 7MPa avec des écarts types variant de 0,7 à 1,9MPa. L'élasticité du composite est surtout conditionnée à la fois par l'élasticité de la fibre et du polypropylène et par la qualité d'interface et de cohésion locale de la matrice et de la fibre. Celle-ci n'étant pas la même en tout point et pour chaque éprouvette injectée, le processus de mise en forme engendre localement des concentrations de fibres, la limite élastique ne peut être la même. La Figure III.24 montre la différence des propriétés élastiques.



(a)



(b)

Figure III.24 : Propriétés élastique en traction des composites PP-Chanvre en fonction de la nature des fibres (année 2009)

Les différents modules d'Young se situent autour de 3500 – 4000 MPa. Excepté le module d'Young pour le c14 qui est de l'ordre 4000MPa, les autres échantillons ont un module d'Young d'environ 3600MPa. Nous pouvons remarquer que l'écart type est le plus petit pour des valeurs moyennes de l'ordre de 3600MPa et nous pouvons voir aussi que si la valeur moyenne s'éloigne de 3600MPa, les écarts types augmentent (par exemple pour le c14, le E vaut 4074 ± 304 MPa ou encore pour le c62, le E vaut 3715 ± 252 MPa alors que pour les échantillons c40 le E moyen est de 3522 ± 53 MPa). Ainsi cela montre que si nous augmentons le nombre d'éprouvettes testées pour les six types de composites, l'écart type diminuerait et la valeur moyenne tendrait à être de 3600MPa. Malheureusement le nombre d'éprouvette fournit pour réaliser les essais de caractérisation était limité et nous n'avons pas pu réaliser des essais complémentaires. Ainsi même si certains résultats montrent des différences de module d'Young en fonction du type de fibres, en tenant compte des données statistiques, la rigidité du composite est la même quelque soit le type de fibres utilisées.

Premièrement, comme l'a montrée cette étude, la résistance mécanique des agro-composites est peu influencée par le type de fibres utilisées pour renforcer le composite, malgré que les fibres de chanvre ont une résistance mécanique différente significative. Cela montre que la résistance mécanique de l'agro-composite est fortement dépendante de l'interface fibre / matrice et de l'agent de couplage utilisé. Si l'interface n'est pas optimisée quelque soit le pouvoir renforçant des fibres, celui-ci sera annihilé. Ainsi il est nécessaire dans notre cas d'optimiser l'interface fibre / matrice. Deuxièmement concernant la déformation à rupture, les résultats d'essai ont montré des différences. Cependant ces différences sont dues à la répartition hétérogène et particulière des fibres dans la matrice et non à la qualité des fibres. Troisièmement, les propriétés élastiques du composites (limite d'élasticité et module d'Young) sont identiques quelque soit le type de fibres, malgré certaines différences dans les résultats constatées, causées soit par un phénomène statistique des essais ou matériau. L'agro-composite a un comportement élastique lorsque la déformation totale est inférieure à 2% et la fibre a un comportement élastique qu'à partir d'une certaine déformation seuil d'environ 0,5% et dans certain cas pouvant atteindre les 1%. Ainsi le comportement viscoplastique des fibres induit des différences de propriétés élastiques de l'agro-composite.

Cette étude comparative a mis en évidence l'impact du processus de fabrication sur les propriétés mécaniques du composite ainsi fabriqué. Les différences de propriétés que nous avons relevées sur les faisceaux en fonction des conditions de culture ne se répercutent pas sur les composites. Plus particulièrement, le composite c62 renforcé par les fibres e62 (fibres ayant les moins bonnes propriétés) est le composite qui semble être le plus résistant. En effet, les faisceaux renforçant le polypropylène présentent des différences non contestables de certaines de leurs propriétés comme la résistance à la rupture ou leur rigidité. Cette différence ne se répercute pas sur les propriétés mécaniques du composite. Ainsi d'autres facteurs interviennent dans la détermination des propriétés du compound puis de la pièce finie injectée avec ce même compound.

En première conclusion, nous pouvons dire que les différences de comportement constatées pour les faisceaux de fibres sont atténuées une fois ceux-ci injectés dans le composite. A cela, nous voyons plusieurs explications :

- La température de fabrication du compound et par la suite la température d'injection qui altère le comportement des fibres. Les fibres de chanvre par leur teneur en cellulose sont sensibles à des températures de 200°C mais aussi et surtout à des températures plus faibles d'environ 50°C [HO08]. Les fibres sont différentes avec des différences de propriétés mécaniques, de structure, de composition chimique, ainsi l'effet de la température n'aura pas la même influence d'une fibre à l'autre.
- La répartition hétérogène des fibres dans la structure qui affaiblit localement le composite. Si la rigidité du composite est localement non homogène, cela crée des zones préférentielles d'endommagement.
- Le rôle joué par l'agent de couplage qui reste méconnu, ne permettant pas un renforcement optimum des fibres dans le PP.
- Les paramètres d'injection comme le type de vis et le débit qui peuvent endommager et dégrader mécaniquement les fibres.

II.1.2 Comportement en flexion

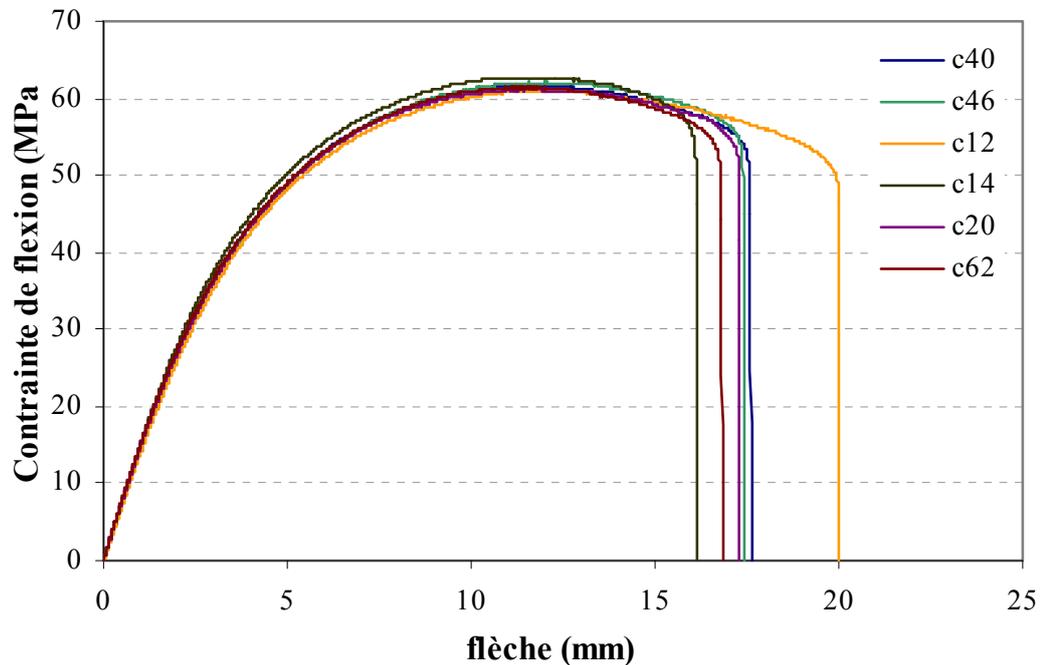


Figure III.25 : Evolution de la contrainte de flexion pour des agro-composites PP - Chanvre renforcés par différents types de chanvre récoltés en 2009

Les résultats des essais de flexion Figure III.25 montrent la même tendance que celle observée en traction. En effet quelque soit le type de fibres utilisé, le comportement global des six matériaux reste le même. Les différences très significatives de comportement identifiées sur les fibres et sur les faisceaux ne se retrouvent plus sur le composite dans le cas de la flexion. A noter qu'une légère différence comme pour les essais de traction unitaire est visible pour la flèche à rupture avec une variation de 12 à 25% (Tableau III-9). Cette différence est aussi la conséquence de l'hétérogénéité du matériau. En comparant les variations des propriétés mécaniques identifiées en traction et en flexion entre chaque composite renforcé par les six types de fibres, il est possible de constater l'influence de la variété de chanvre et des conditions de cultures sur les propriétés mécaniques en flexion. La différence sur les écarts types étant significative, il est possible de déduire une influence même petite du type de conditions de cultures sur les propriétés en flexion des agro-composites PP – chanvre. Alors que cette constatation n'est pas vérifiée pour les propriétés en traction puisque cette différence est beaucoup moins significative et même quasiment nulle.

Tableau III-9 : Propriétés mécaniques en flexion des agro-composites PP - Chanvre renforcés par différents types de fibres de chanvre (année 2009)

	Flèche à rupture (mm)	Fmax (kN)	σ_{max} (Mpa)	σ à rupture (Mpa)	E (Mpa)	Re (Mpa)
40	17,9	0,082	61,3	50,5	4020,1	13,8
46	17,1	0,080	60,0	49,8	3962,9	16,3
12	20,0	0,081	60,6	49,8	3570,4	15,4
14	15,9	0,085	64,0	55,5	4167,7	16,0
20	16,3	0,083	62,3	54,3	3999,2	13,5
62	16,8	0,082	61,4	51,6	4087,9	14,1

Comme le montre la figure suivante, la flèche à rupture et la force de flexion maximum ne suivent pas la même tendance en fonction du type de fibres utilisées. Comme pour les essais de traction, la flèche à la rupture n'est pas seulement influencée par le type de fibres mais aussi par la répartition des fibres, ce qui explique des variations plus importantes de la flèche à rupture ainsi que de la force de flexion maximum. Comme l'ont montrés les résultats des essais de traction, les fibres avec les meilleures propriétés mécaniques ne donnent pas un agro-composite avec les propriétés mécaniques en traction les plus intéressantes et cela se constate aussi pour la flexion. Mais cette tendance est encore plus accentuée en flexion. Les différences entre le comportement entre traction et flexion ont été expliquées précédemment (Figure III.9)

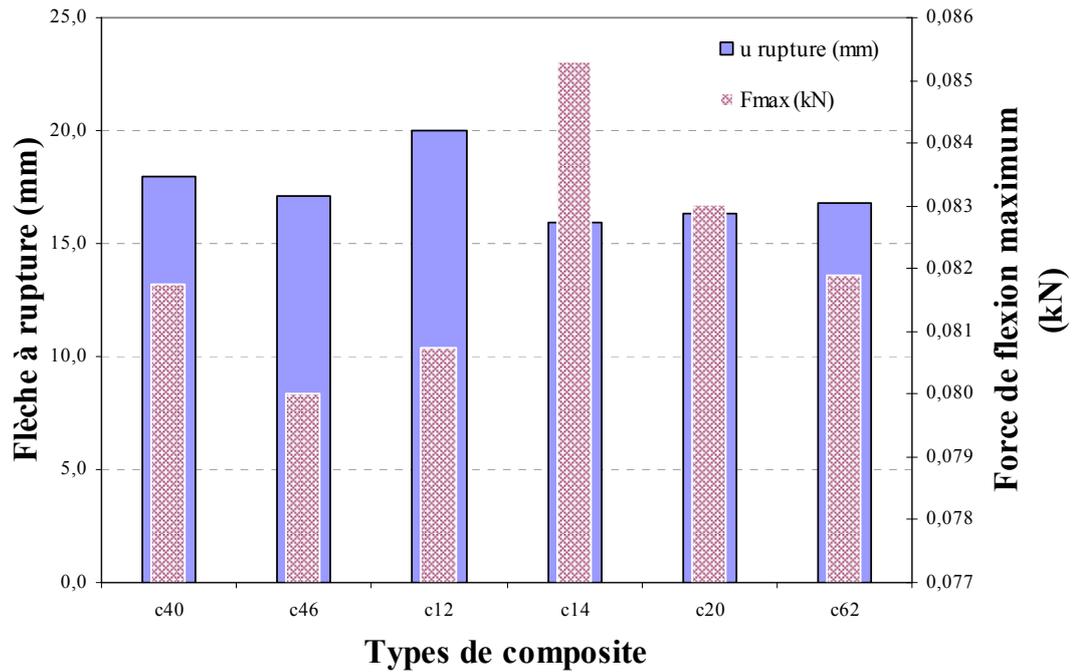
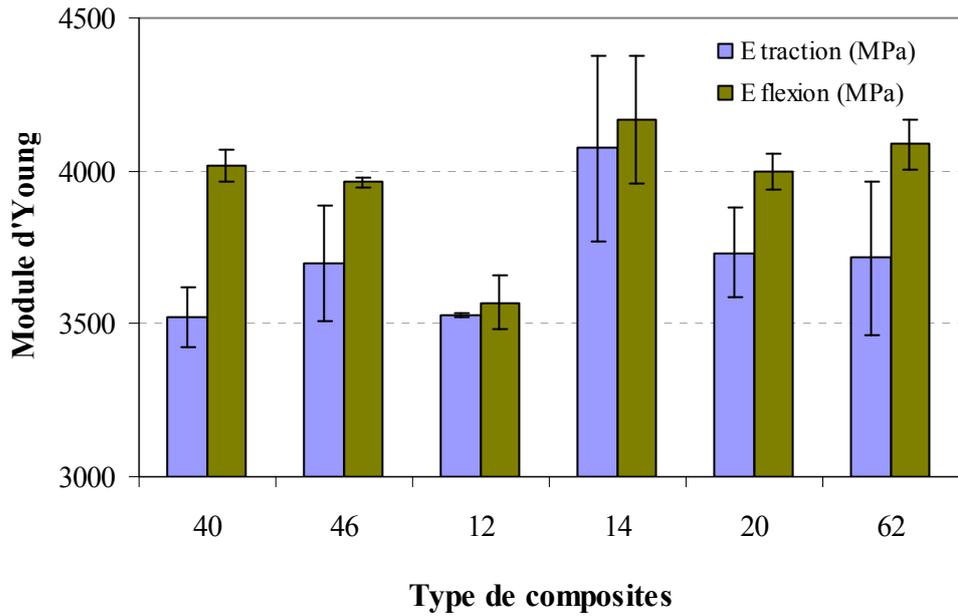


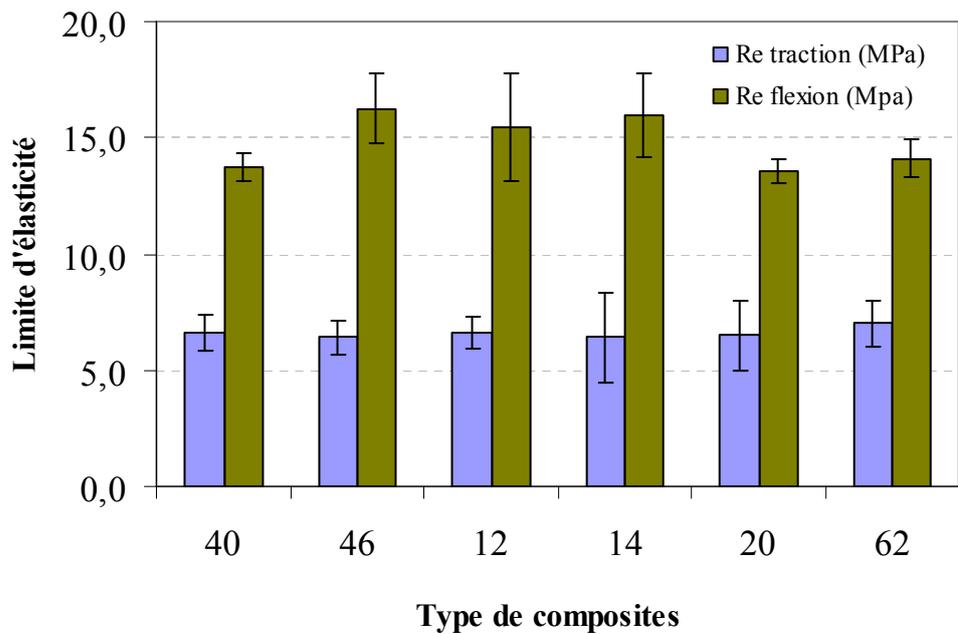
Figure III.26 : Comparaison de la flèche à rupture et de la force de flexion maximum pour des agro-composites renforcés par différents types de fibres de chanvre

II.1.3 Comparaison entre la flexion et la traction

Les résultats présentés dans la partie I.3 avaient mis en évidence la différence de propriétés mécaniques en flexion et traction des composites PP – chanvre. L'étude comparative précédente a confirmé cette tendance quelles que soient la variété de chanvre et les conditions de culture. Pour récapituler, quelque soit le type de chanvre, la limite d'élasticité est 60% supérieure et la résistance mécanique est 30% plus grande en flexion. Le module d'Young identifié est plus faible en traction. Pour certains types de fibres les écarts ne sont pas conséquents comme pour le c12 et c14 mais peuvent atteindre des valeurs plus grandes comme pour le c40. Les explications de cette différence de propriétés ont déjà été détaillées dans la partie I.3. Comme précédemment le module d'Young du composite c12 est différent mais cette différence n'est pas causée par le type de fibres mais plutôt par le processus de fabrication et la qualité de l'interface (voir la conclusion de la Partie II



(a)



(b)

Figure III.27 : Propriétés élastiques Module d'Young E (a) et limite élastique Re (b) des agro-composites en fonction des conditions de culture et de la variété de chanvre

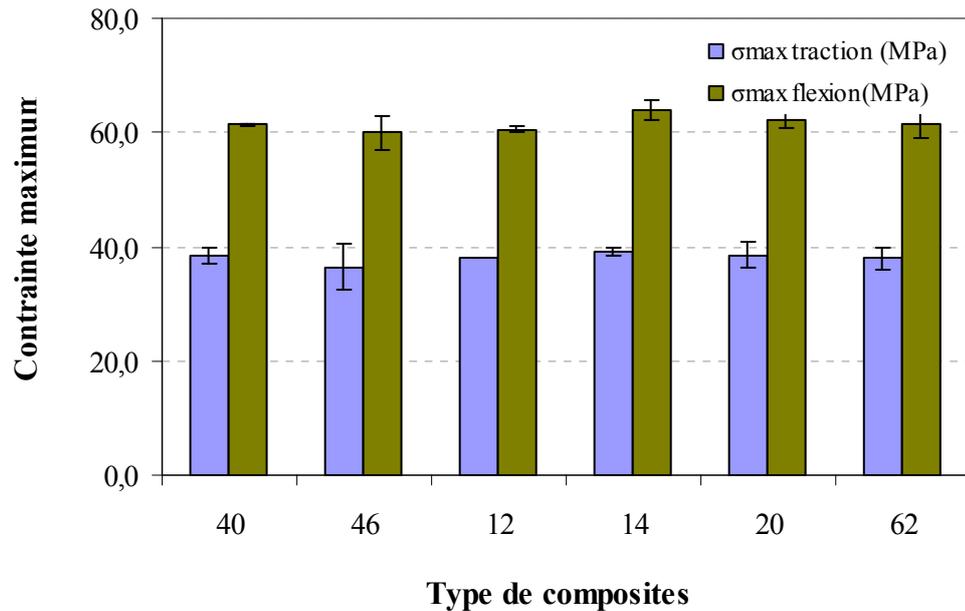


Figure III.28 : Contraintes maximum en traction et en flexion des agro-composites en fonction des conditions de culture et de la variété

II.1.4 Comparaison entre un modèle micro-macro et les résultats expérimentaux

Cette étude a permis de comparer les valeurs du module d'Young calculées par les modèles micro-macro connaissant le comportement mécanique des fibres avec celles obtenues expérimentalement. Le modèle présenté ici est celui de Voigt déterminant le module d'Young du composite comme une combinaison des modules d'Young respectifs de la matrice et de la fibre, pondérés par le pourcentage de fibres et de matrice qui constituent le composite (Eq. III-2).

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (\text{Eq. III-2})$$

Avec E_c , E_f et E_m , les modules d'Young respectifs du composite, de la fibre et de la matrice en MPa

V_f , V_m , le pourcentage volumique de la fibre et de la matrice

Le modèle de Voigt n'est pas le plus adapté dans notre cas étude car les agro-composites étudiés sont renforcés par des fibres courtes réparties aléatoirement alors

que ce modèle est utilisé pour une modélisation des composites unidirectionnels. Néanmoins ce modèle est une borne limite (limite haute) et quelque soit le modèle micro-macro utilisé, les résultats obtenus seront inférieures à ceux calculés par le modèle de Voigt. Tous les modèles employés (comme par exemple Mori Tanaka, Halpin Tsai, ...) permettent de déterminer l'évolution croissante de la rigidité du composite en fonction du pourcentage du renfort ou/et de la qualité des fibres employées. Tous les modèles montrent une croissance plus ou moins importante en fonction de la rigidité de la fibre. Dans cette étude, nous avons cherché à savoir si cette tendance est vérifiée. C'est pour cette raison que seul le modèle de Voigt a été choisi car il est suffisant pour déterminer l'influence croissante de la qualité des fibres sur les composites.

Le pourcentage de fibre en volume (Tableau III-10) est déterminé à partir du pourcentage massique par l'équation suivante :

$$V_f \% = \frac{M_f \%}{M_f \% + \left(\frac{\rho_f}{\rho_m} \right) (1 - M_f \%)} \quad (\text{Eq. III-3})$$

Avec M_f est le pourcentage massique de fibres, ρ_f et ρ_m , sont la densité de la fibre et de la matrice en g.cm^{-3}

Cette étude montre que les prédictions attendues par le modèle de Voigt ne sont pas cohérentes avec les résultats expérimentaux obtenus (Tableau III-11). Ainsi quelque soit le modèle micro-macro utilisé, aucunes modélisations ne seraient adaptées aux cas étudiés dans cette partie. Ces différences peuvent s'expliquer par plusieurs raisons:

- Non prise en compte du processus de fabrication de compounds et de la pièce injectée. Les paramètres de mise en forme comme la température, le débit, le type d'injection, le profil des vis sans fin peuvent endommager les fibres et diminuer leur pouvoir renforçant, sollicitant la fibre avant d'être injectée (torsion et cisaillement en plus de la traction).
- Atténuation des propriétés des fibres pendant le compoundage. Comme il a été expliqué précédemment les fibres sont dégradées pour des températures de l'ordre de 200°C , mais leurs propriétés mécaniques se voient diminuées

pour des températures inférieures [HO08]. Ainsi la température lors de la mise en forme peut être l'une des raisons.

- Répartition hétérogène des fibres dans la matrice, engendrant des zones d'endommagement préférentielles.
- Hypothèse simplificatrice des modèles micro-macro (fibre de forme géométrique simple et standard, interface parfaite, transmission intégrale des efforts de la matrice à la fibre, ...). Les modèles d'homogénéisation courant ne sont peut être pas adaptés aux agro-composites.

Tableau III-10 : Densité et pourcentage en fibres des composites PP- chanvre

	Densité g.cm ⁻³	Pourcentage volumique %	Pourcentage massique %
6 types d'agro-composites	1,5	30	20
PP	0,9	70	80

Tableau III-11 : Valeur du module d'Young (modèle de Voigt et donnée expérimentale)

	Module d'Young (MPa)	
	Modèle de Voigt	Donnée expérimentale
c40	2780	3219
c46	3280	3193
c12	1880	3090
c14	1028	3448
c20	1380	3255
c62	2140	3339

II.1.5 Comparaison des propriétés mécaniques entre la fibre unitaire, le faisceau et le composite

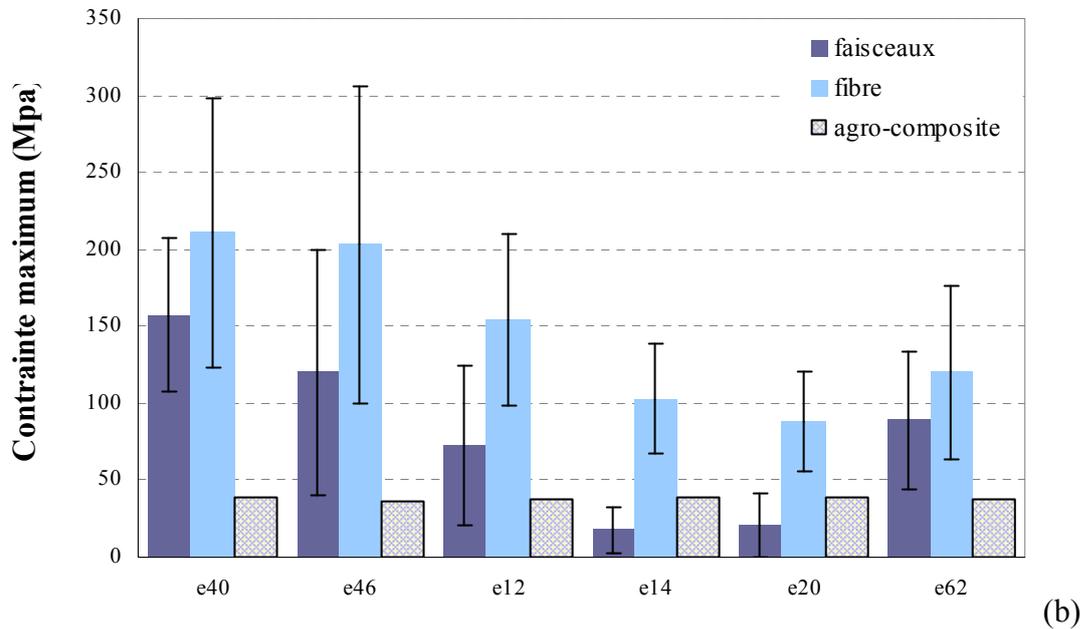
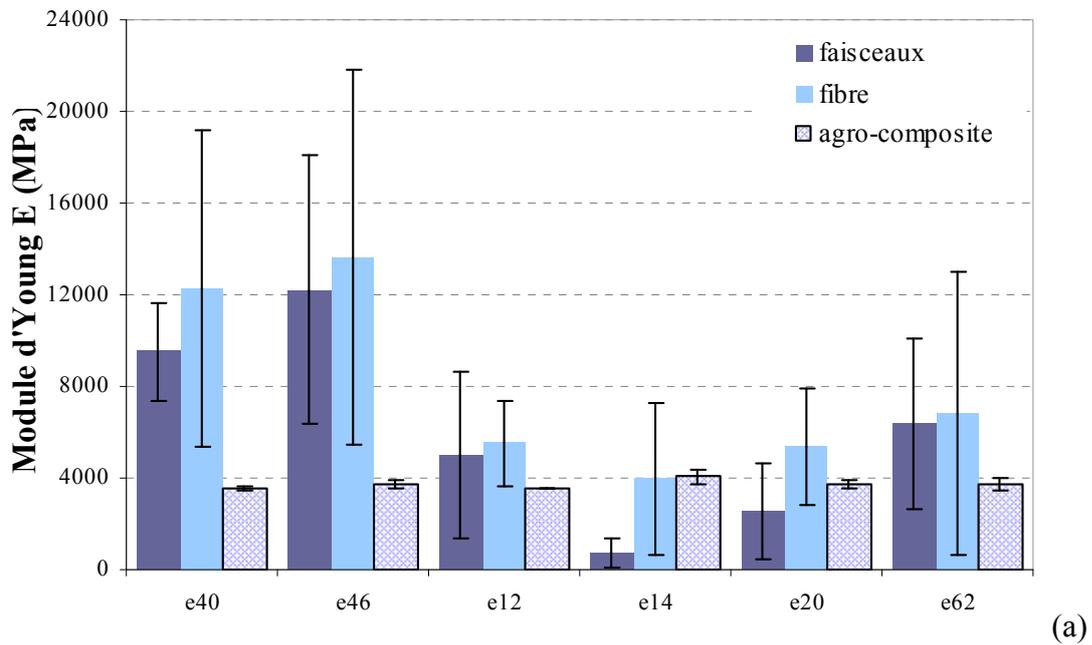


Figure III.29 : Comparaison du module d'Young (a) et de la contrainte maximum (b) entre les faisceaux, les fibres unitaires de chanvre et les composites PP – Chanvre renforcés par ces mêmes fibres

En comparant les propriétés mécaniques des fibres de chanvre avec celles des agro-composites (Figure III.29), nous pouvons constater que l'influence des conditions de culture et de la variété de fibres utilisées ne se répercute pas sur les agro-composites. La contrainte à rupture, la limite élastique et le module d'Young sont identiques à l'inverse des prédictions obtenues avec le modèle de comportement micro-macro couramment utilisé pour les matériaux composites (Tableau III-11). Ces résultats peuvent s'expliquer par l'influence du processus de fabrication et d'injection du composite et des éprouvettes. Pour rappel, premièrement, la répartition des fibres dans l'ensemble de l'éprouvette n'est pas homogène ce qui pourrait expliquer la tendance observé pour la contrainte à rupture. Deuxièmement le processus de mise en forme, notamment la température de compoundage et d'injection de 160°C peuvent altérer la fibre et ses propriétés [HO08], alignant au même niveau les propriétés des fibres quelque soit le type de fibre. Pour compléter et déterminer l'impact et l'effet de la température sur les fibres de chanvre et naturelles en général, il pourrait être envisagé de réaliser des essais expérimentaux notamment par thermogravimétrie.

II.2 Influence de l'année de récolte (2009 et 2011)

Dans cette étude, nous avons cherché à savoir si le comportement mécanique d'un agro-composite pouvait changer suivant l'année de récolte des fibres naturelles. Encore une fois, les conditions climatiques qui conditionnent le comportement mécanique ne sont pas les mêmes d'une année à l'autre. Nous n'avons pas eu la possibilité d'analyser le comportement mécanique des fibres ni des faisceaux de la récolte de 2011.

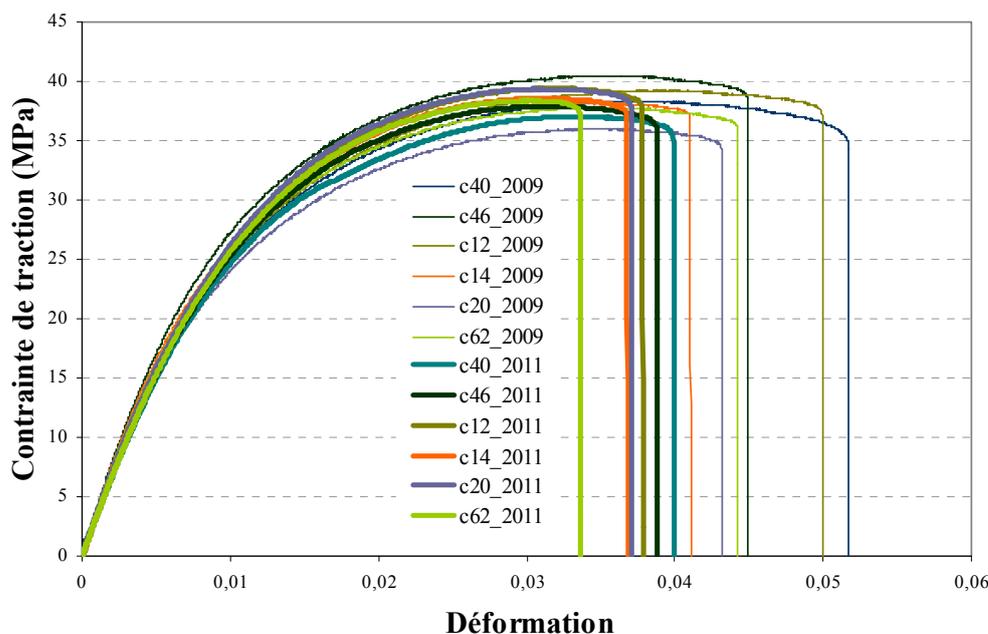
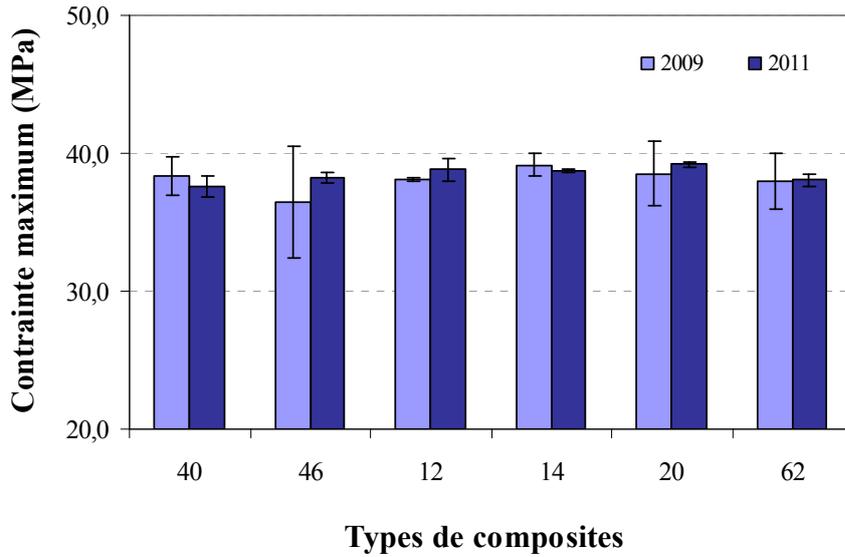


Figure III.30 : Courbe de traction en fonction de différentes conditions de culture et de variétés de chanvre récoltées en 2009 et 2011

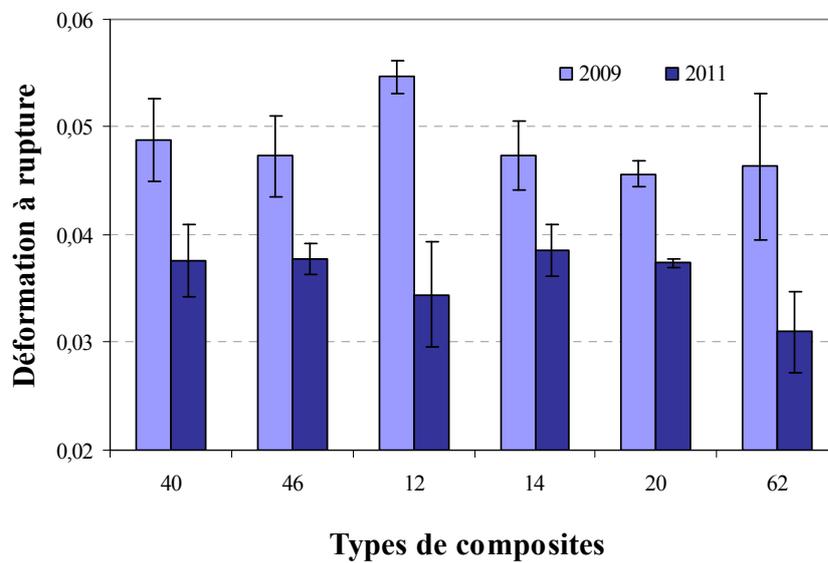
Le comportement mécanique entre ces composites (fibres de 2009 et 2011) est quasiment le même, une différence est constatée pour la déformation à rupture (Figure III.30). Pour les composites renforcés par les fibres récoltées en 2011, la déformation à rupture varie entre 3,4 et 3,9% (Tableau III-12), alors qu'elle oscille entre 4,6 et 5,5% pour les composites renforcés avec des fibres récoltées en 2009. Un écart de 1% de la déformation à rupture est constaté (Figure III.31b). La contrainte à la rupture (Figure III.31a) n'est pas influencée par l'année de culture.

Tableau III-12 : Propriétés mécaniques en traction d'un agro-composite PP / Chanvre (fibres récoltées en 2011) pour différentes natures de fibres

	σ_{\max} (MPa)	ET	$\epsilon_{\text{rupture}}$	ET	E (MPa)	ET	Re (MPa)	ET
40	37,6	0,8	0,0375	0,0033	3350	122	7,9	0,0
46	38,2	0,4	0,0377	0,0014	3406	11	7,7	2,4
12	38,8	0,8	0,0344	0,0048	3149	459	6,5	0,0
14	38,7	0,1	0,0385	0,0024	3468	2	6,5	0,7
20	39,2	0,2	0,0373	0,0004	3475	14	6,5	0,3
62	38,1	0,5	0,0310	0,0037	3311	31	7,3	0,9



(a)

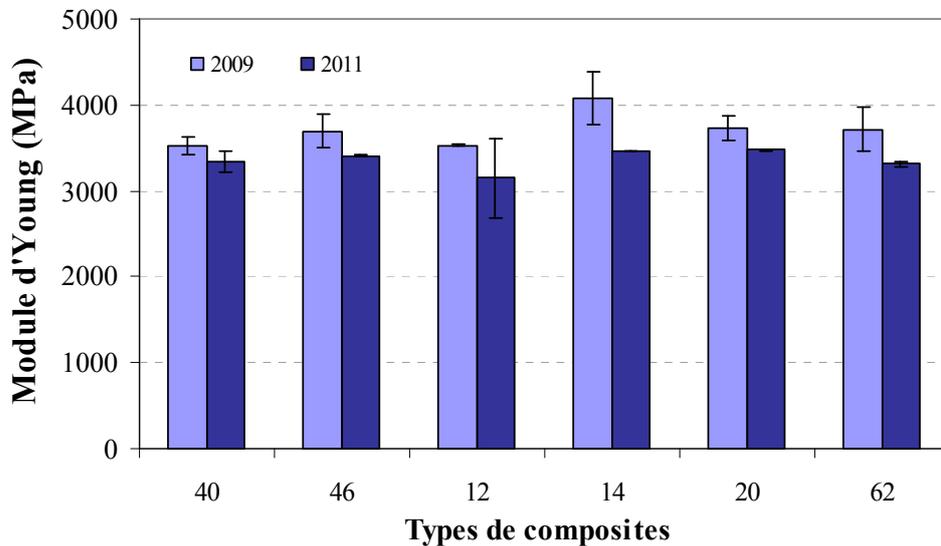


(b)

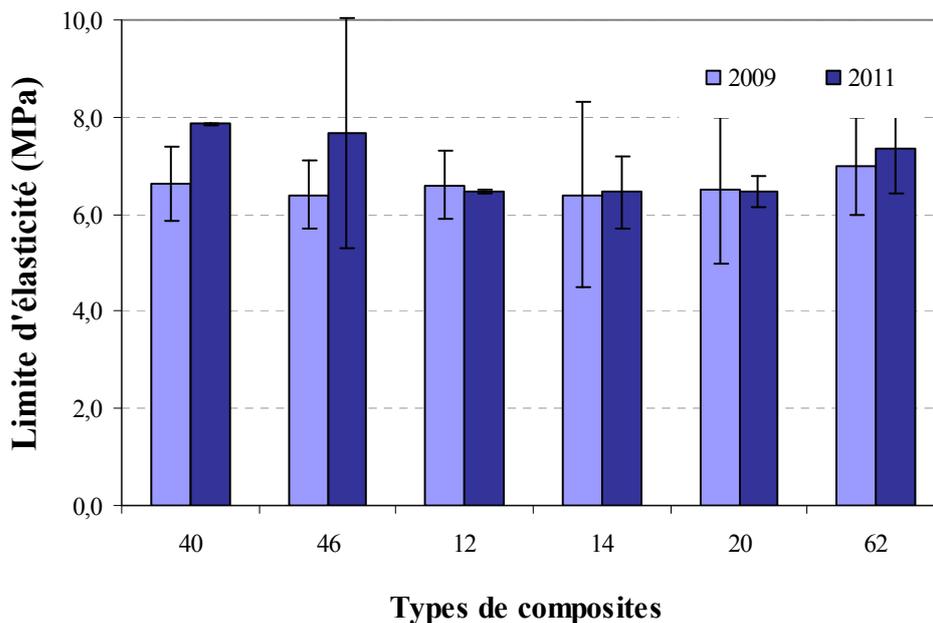
Figure III.31 : Contrainte maximum (a) et déformation à rupture (b) pour des agro-composites renforcés par différents types de fibres de chanvre récoltées en 2009 et 2011

Concernant le module d'Young, quelque soit le type de fibres (conditions de culture et variété de fibres), la valeur du module d'élasticité pour les composites renforcés par des fibres de 2009 est plus élevée avec un module de $3712 \pm 200 \text{ MPa}$ alors que les composites renforcés par des fibres de 2011 ont un module de $3360 \pm 122 \text{ MPa}$, soit un module d'élasticité supérieure de presque 10% pour les composites renforcés avec des fibres récoltées en 2009 (Figure III.32a). La limite d'élasticité (Figure III.32b) est la même pour les deux années de récolte.

Sachant que la déformation à rupture est peu influencée par les conditions de culture et le type de fibre mais est plutôt impactée par la répartition des fibres dans la matrice et la qualité de l'interface fibre –matrice, il est possible de d'affirmer que l'année de récolte n'influence pas les propriétés mécaniques des composites.



(a)



(b)

Figure III.32 : Propriétés élastiques (Module d'Young (a) et limite d'élasticité (b))

Pour conclure, nous pouvons voir que l'année de récolte n'influence pas ou peu les propriétés mécaniques du composite malgré que la nature du renfort change. La seule différence relevée concerne la déformation à rupture mais elle est causée par le processus d'injection plus que par l'année de récolte comme il a été démontré précédemment.

Partie III . Influence du processus de fabrication et des paramètres d'essai

III.1 Influence du processus de fabrication du compounds

Une dernière étude comparative a été entreprise. Elle avait pour but de comparer les propriétés mécaniques d'agro-composites PP – Chanvre renforcés par trois types de chanvre différents mis en forme par deux processus d'injection des éprouvettes de caractérisation. Nous avons cherché à voir si le processus d'injection a un effet sur les propriétés mécaniques du composite et à déterminer l'effet de l'agent de couplage. Le premier processus (réalisé par le Pôle Européen de Plasturgie PEP) consiste à fabriquer le compound sous forme de granulés pour ensuite les injecter. Le deuxième processus (réalisé par l'institut de formation technique supérieure IFTS de Charleville-Mézières) consiste à injecter les éprouvettes et réaliser le mélange du PP et des fibres de chanvre directement dans la machine d'injection. Pour le composite fabriqué au PEP, un agent de couplage (le PPMA) a été ajouté à hauteur de 5% en masse. Pour les éprouvettes provenant de l'IFTS aucun agent de couplage n'a été ajouté.

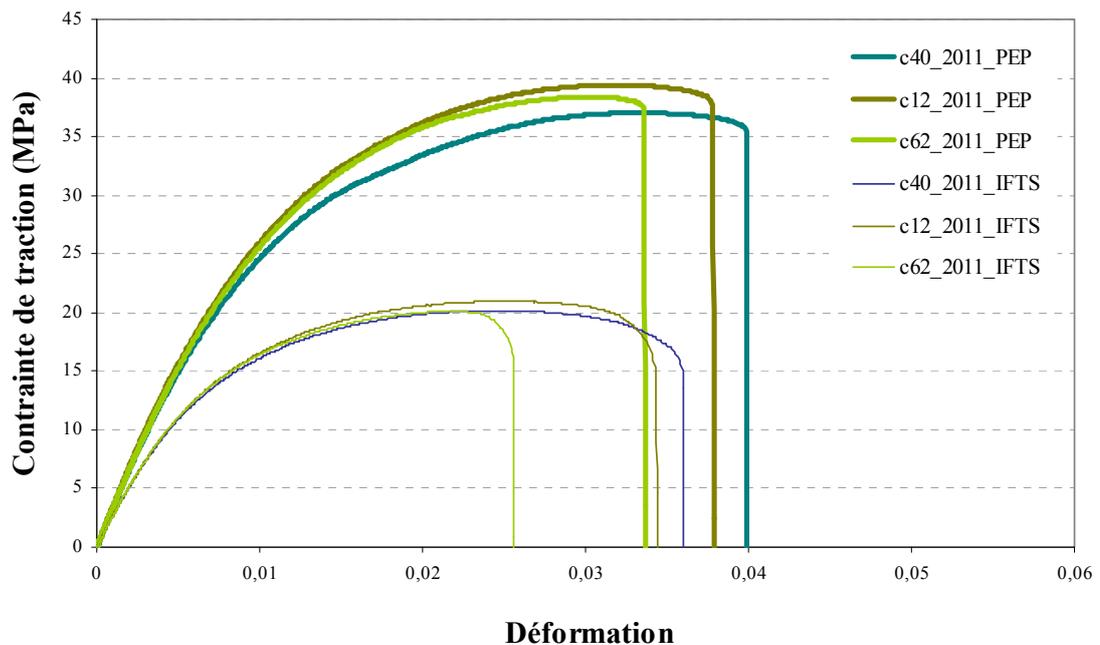


Figure III.33 : Comportement mécanique en traction des agro-composites PP - chanvre fabriqués et injectés par deux processus différents

Le comportement mécanique est différent pour les deux processus d'injection. La contrainte maximum de traction pour le deuxième processus d'injection est en moyenne de 20 MPa (Tableau III-13), soit un rapport de 2 entre la contrainte maximum pour les composites injectés au PEP et à l'IFTS.

La déformation à rupture pour les composites de l'IFTS est plus petite avec une valeur comprise entre 2,5 et 3,6%. Les propriétés élastiques (Figure III.34) sont aussi plus faibles pour les composites fabriqués à l'IFTS avec des valeurs de 2577 à 2777MPa pour le module d'Young et de 3,4 à 5MPa pour la limite d'élasticité. Cette étude démontre l'influence du processus de fabrication des composites sur la qualité des composites en terme de propriétés mécaniques. Elle met en évidence que le deuxième processus de fabrication (IFTS) qui consiste à injecter et mélanger les fibres de chanvre et le polypropylène en une seule et unique étape donne un matériau avec des propriétés moins bonnes, la contrainte maximum est deux fois plus faible, le module d'Young est 21% plus petit et la limite élastique est 42% plus faible. De plus, cette étude met aussi en évidence, l'importance de l'agent de couplage pour des composites assemblant des matières végétales avec des matériaux synthétiques. En effet, la grande différence constatée sur la résistance à rupture et la limite d'élasticité est causée en grande partie par une mauvaise interface due à l'absence d'agent de couplage. Cela se démontre par le fait que les propriétés des composites provenant de l'IFTS tendent à avoir des propriétés proches de celles du PP.

Tableau III-13 : Propriétés mécaniques en traction d'un agro-composites PP - chanvre (processus de fabrication IFTS)

	σ_{\max} (MPa)	ET	$\epsilon_{\text{rupture}}$	ET	E (MPa)	ET	Re (MPa)	ET
40	20,2	0,1	0,0360	0,0015	2645	47	3,4	0,6
12	20,4	0,6	0,0311	0,0047	2577	68	5,0	1,5
62	20,3	0,2	0,0253	0,0003	2777	53	3,6	0,0

Finalement, nous pouvons en déduire que l'agent de couplage qui n'est pas présent dans le deuxième processus (IFTS) est l'une des causes de cette diminution de propriétés. L'absence d'agent de couplage affaiblit le rôle de l'interface se traduisant par une légère perte de rigidité et une importante chute de la résistance à la rupture. L'autre cause est le processus de mise en œuvre. L'IFTS mélange les fibres avec le

PP directement au moment de l'injection induisant une moins bonne répartition des fibres. Les fibres ainsi injectées sont moins dégradées car elles subissent une seule phase d'extrusion. A l'inverse le PEP extrude le compound au moment de l'injection, les fibres ont ainsi subi deux phases de mise en forme engendrant une dégradation des fibres plus importante mais permettant une meilleure répartition de celles-ci. Dans les deux cas, chaque processus a ses points positifs et négatifs, mais il est nécessaire d'utiliser un agent de couplage pour la fabrication d'un agro-composite à base synthétique renforcé par des fibres végétales.

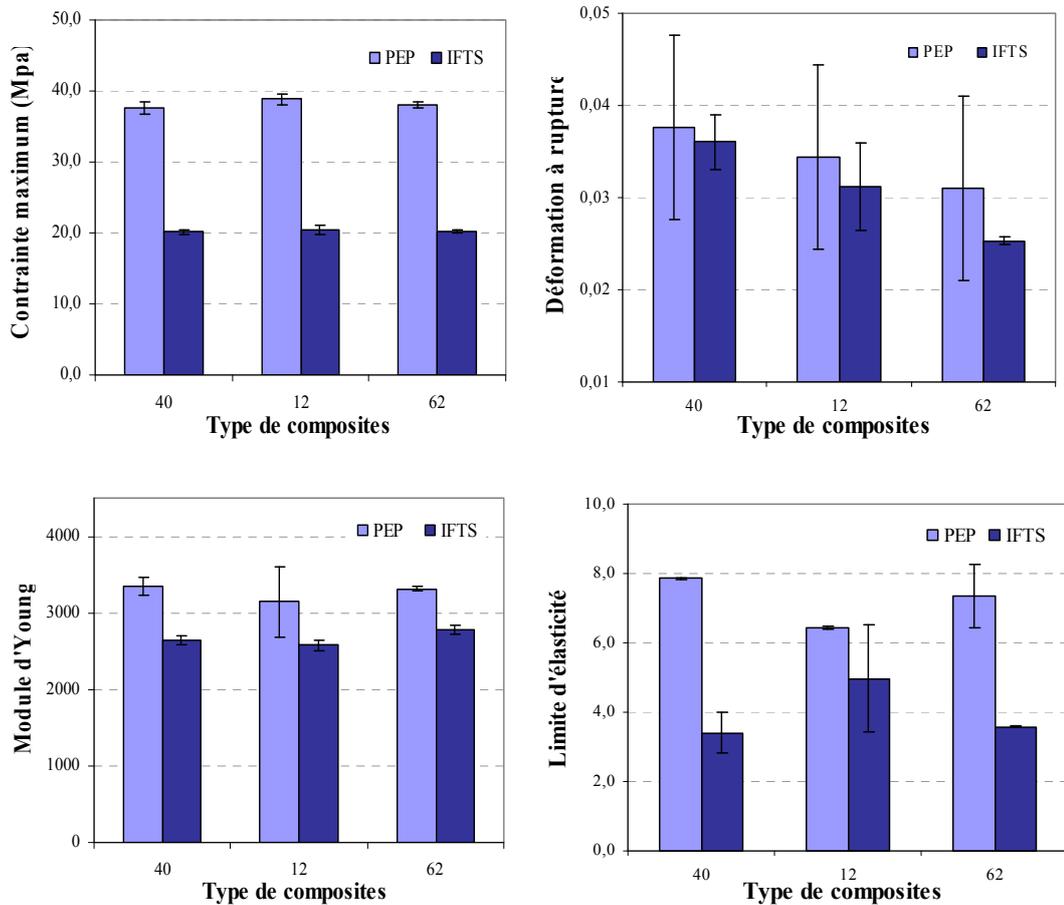


Figure III.34 : Propriétés mécaniques en traction des agro-composites PP - chanvre fabriqués et injectés par deux processus différents pour plusieurs types de fibres

III.2 Effet de la vitesse de sollicitation

Le comportement mécanique du polypropylène est très dépendant de la vitesse de sollicitation (comportement visco-élastoplastique). Nous avons cherché à voir si cette dépendance se répercutait sur le comportement de l'agro-composite. Pour cela, des essais de traction avec différentes vitesses de sollicitation (1, 3, 5, 8, 10, 20, 25 et 35 mm/min) ont été menés pour déterminer l'influence de la vitesse de sollicitation sur le comportement mécanique des agro-composites polypropylène et fibres de chanvre. Les fibres utilisées sont les mêmes fibres de chanvre mais récoltées cette fois-ci en 2011, variété de fibre standard ayant des conditions de culture dites « standard ». Les conditions d'essais sont les mêmes que celles utilisées précédemment et les éprouvettes ont une longueur effective testée de 108mm, une largeur de 10mm et une hauteur 4mm. Ces composites ont été injectés au PEP.

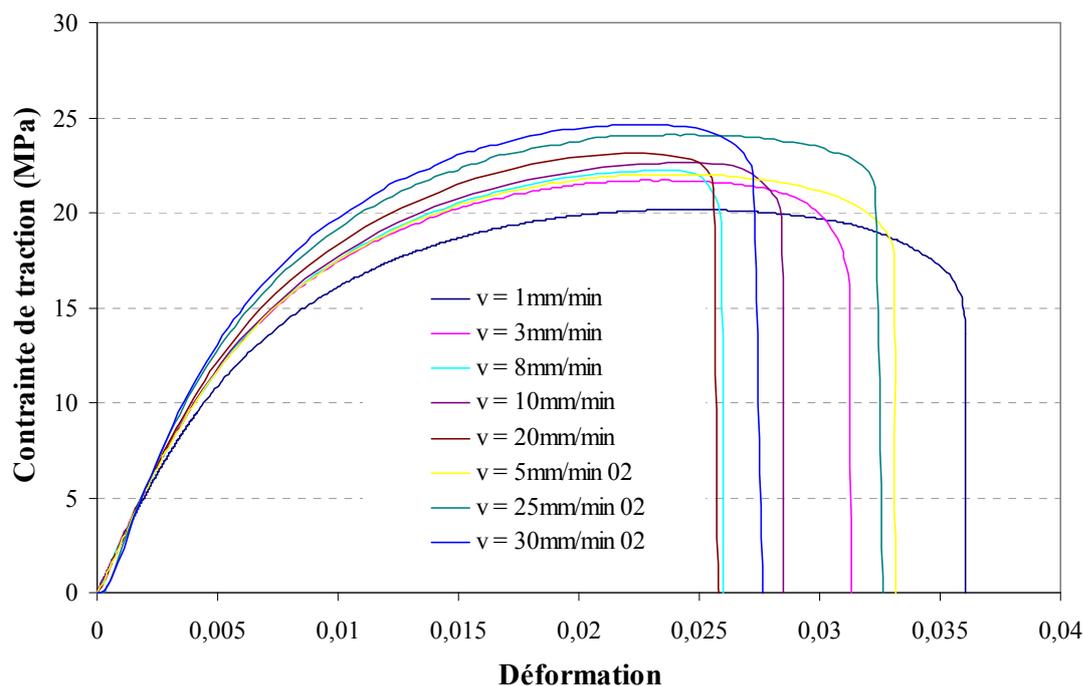


Figure III.35 : Comportement mécanique du composite en fonction de la vitesse de sollicitation

Comme le montre la Figure III.35, le comportement mécanique varie en fonction de la vitesse de sollicitation. La contrainte évolue entre 20 et 25 MPa, représentant une variation de 25%. La déformation à rupture varie aussi de 0,024 à 0,034, soit une

variation assez importante de 40%. L'évolution proportionnelle de la contrainte de traction en fonction la déformation élastique est différente, mettant en évidence une dépendance du module d'Young en fonction de la vitesse de sollicitation. La variation de la limite élastique est moins visible sur la courbe, mais comme le montre les résultats suivants, il y a une dépendance de la limite élastique à la vitesse de sollicitation (Tableau III-14).

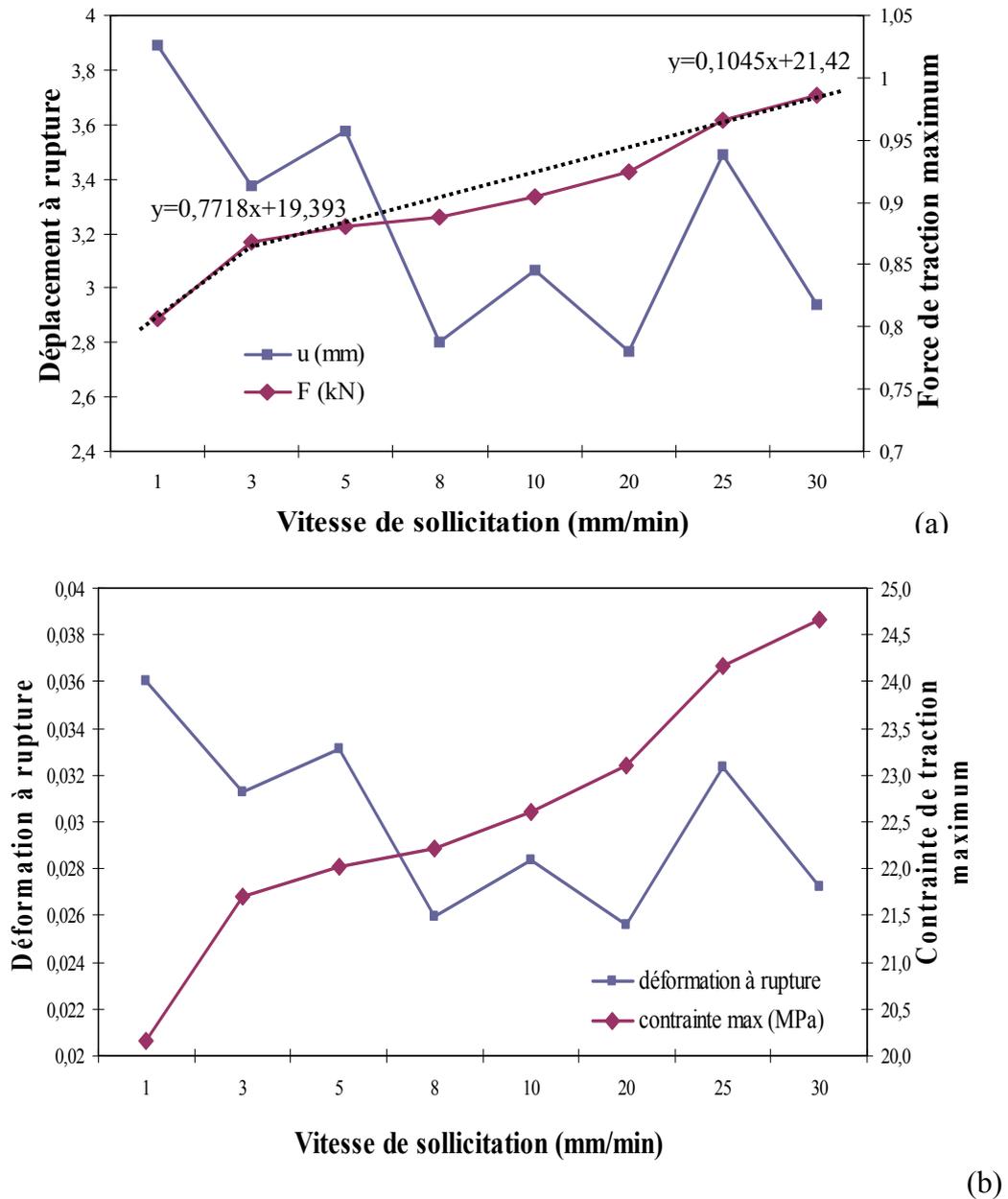


Figure III.36 : Histogramme des propriétés mécaniques en fonction de la vitesse de sollicitation : a) allongement et force de traction à rupture, b) déformation et contrainte de traction à rupture

La Figure III.36 montre l'évolution de la contrainte maximum en fonction de la vitesse de sollicitation. La contrainte augmente rapidement pour des petites vitesses (de 1 à 3mm.min⁻¹) avec un taux de croissance $\Delta\sigma/\Delta v$ de 0,7718. Alors que pour des vitesses supérieures à 3mm.min⁻¹, le taux de croissance $\Delta\sigma/\Delta v$ est plus faible avec une valeur de 0,1045. Cela montre que la résistance des éprouvettes est beaucoup plus sensible aux faibles vitesses de sollicitations (Tableau III-14).

La force maximum change en fonction de la vitesse de sollicitation comme le montre graphique suivant (Figure III.36). Elle varie de 807 à 987N pour une vitesse respectivement de 1 et 30mm.min⁻¹. Plus la vitesse de sollicitation est grande, plus la force maximum sera importante, celle-ci croit lorsque la vitesse augmente. Le déplacement à rupture est aussi dépendant de la vitesse de sollicitation. Le déplacement oscille entre 2,77 et 3,89mm autour d'une valeur moyenne de 3,24mm.

La géométrie des éprouvettes testées étant identique pour chaque essai, la contrainte et la déformation à rupture suivent la même tendance décrite précédemment. La contrainte maximum augmente lorsque la vitesse de sollicitation augmente passant pour une vitesse de 1 à 30mm.min⁻¹, représentant une amélioration de la résistance à la rupture de 22% pour vitesse de sollicitation multipliée par 30. La déformation à rupture atteint son minimum pour une vitesse de 20mm.min⁻¹ et est maximale pour une vitesse de 1mm.min⁻¹. Comme le montre ces résultats, la vitesse de sollicitation a un impact important sur la résistance en traction des agro-composites. Cette augmentation de la contrainte à rupture est la principale conséquence de l'effet de la vitesse sur le comportement mécanique du polypropylène [TEM06]. L'écart mesuré pour la déformation à rupture est deux fois plus important (41%) que l'écart constaté pour la contrainte à rupture (Figure III.36b). Cette importante différence de déformation à rupture n'est pas seulement causée par un changement de vitesse de sollicitation mais dépend d'autres phénomènes explicités précédemment comme la répartition des fibres dans l'éprouvette et la quantité locale de fibres qui n'est pas constante (voir partie I.4. Mécanisme de rupture et I.5. Répartition des fibres).

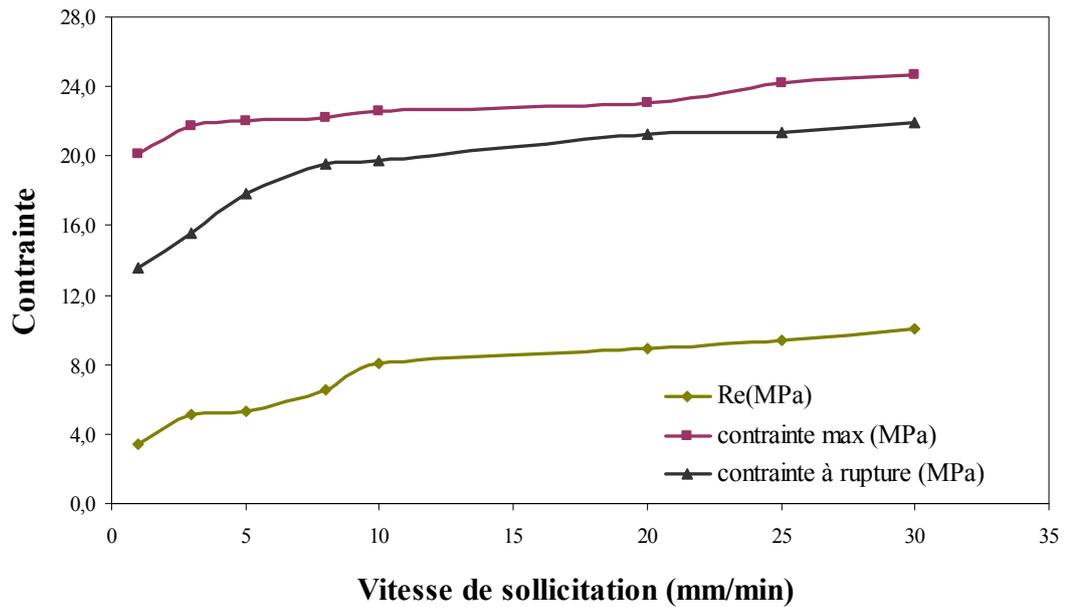


Figure III.37 : Contraintes à la limite d'élasticité R_e , à la contrainte maximum et à la rupture pour différentes vitesses de sollicitation

Tableau III-14 : Propriétés mécaniques en traction des agro-composites renforcés en fonction de la vitesse de sollicitation

	u (mm)	F (kN)	E (MPa)	R_e (MPa)	contrainte maximum (MPa)	contrainte rupture (MPa)
v = 1mm/min	3,8931	0,80658	2645	3,4	20,2	13,6
v = 3mm/min	3,3748	0,86832	2731	5,1	21,7	15,5
v = 5mm/min	3,5747	0,88081	2724	5,4	22,0	17,9
v = 8mm/min	2,7999	0,88872	2686	6,6	22,2	19,5
v = 10mm/min	3,0665	0,90443	2632	8,0	22,6	19,7
v = 20mm/min	2,7665	0,92443	2677	8,9	23,1	21,2
v = 25mm/min	3,4917	0,96641	2964	9,4	24,2	21,3
v = 30mm/min	2,9390	0,98655	2969	10,1	24,7	21,9

La Figure III.37 montre la valeur des contraintes à la limite élastique, maximum et à rupture pour différentes vitesses de sollicitation. La contrainte élastique et à rupture suivent la même tendance. La limite élastique R_e varie de 3,4 à 10,1N soit une variation de 6,7N correspondant à une augmentation de 197%. La contrainte à

rupture varie entre 13,6 et 21,9N, soit un écart de 8,3N correspondant à une augmentation de 61%. L'effet de la vitesse à un impact plus important sur la limite d'élasticité avec une augmentation de presque 200%, ensuite sur la contrainte à rupture avec une augmentation de 60% et à un impact plus faible mais relativement important sur la contrainte maximum avec une augmentation de 25%.

Comme pour la contrainte maximum, le taux de croissance $\Delta\sigma / \Delta v$ est différent pour des petites vitesses de quelques millimètres par minute à plusieurs millimètres par minute. Pour la contrainte à rupture ce taux de croissance diminue pour des vitesses supérieures à $8\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ et pour la contrainte élastique et maximum, ce taux diminue à $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. L'évolution des contraintes élastiques, maximum et à rupture est respectivement proportionnelle à la vitesse de sollicitation avec un taux de 0,7718 pour la contrainte maximum et de 0,7539 pour la limite élastique (petites vitesses). Le taux de croissance étant de 0,9024 pour la contrainte à la rupture, il est possible de conclure que la vitesse de sollicitation a moins d'impact sur la contrainte élastique que sur la contrainte à la rupture puisque le taux de croissance pour des vitesses inférieures à $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ est plus petit que le taux croissance pour la contrainte à rupture avec des vitesses inférieure à $8\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

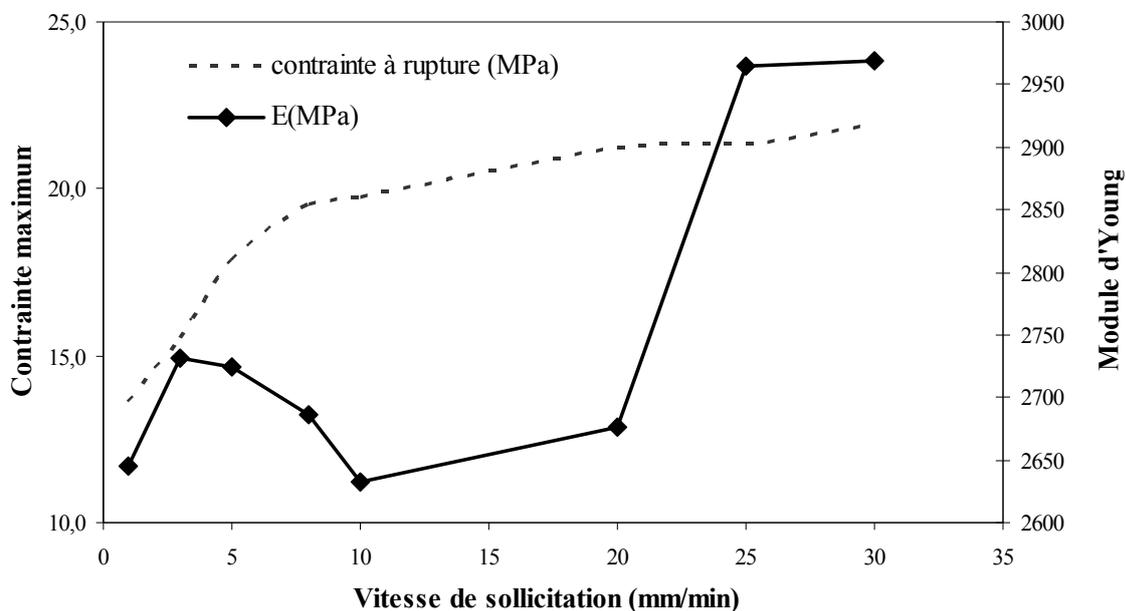


Figure III.38 : Evolution du module d'Young E en fonction de la vitesse de sollicitation

La vitesse a aussi un effet sur le module d'Young (Figure III.38). Pour des vitesses inférieures à $20\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, le module d'Young oscille autour d'une valeur moyenne

de 2683 MPa. Pour des plus grandes vitesses supérieures à $20\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, le module d'Young oscille autour de 2967 MPa. L'augmentation du module d'Young est de 284 MPa, soit une croissance de 10,6%. En dessous d'une vitesse de $20\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, la variation de module d'Young est moins importante avec une variation entre 2632 et 2731MPa, soit une variation de 99MPa correspondant à une variation de 3,7%.

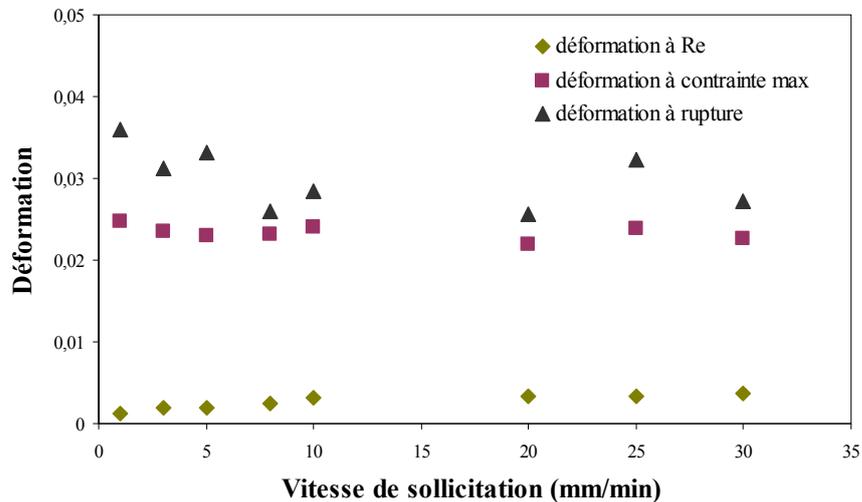


Figure III.39 : Déformations à la limite élastique, à la contrainte maximum et à rupture pour différentes vitesses de sollicitation

Comme le montre la Figure III.39 et le Tableau III-15, la déformation à la limite élastique croit de 0,13 et 0,36%, pour une vitesse de 1 à $30\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, soit une multiplication par 2,73 de cette déformation. La déformation à la rupture oscille entre 2,6 et 3,6% autour d'une déformation moyenne de 3,0%. Cette déformation à la rupture suit la même tendance à une valeur près que la déformation à la contrainte maximum oscille entre 2,2 et 2,5% autour d'une valeur moyenne de 2,3%.

L'évolution de la contrainte à limite d'élasticité suit exactement la même tendance que l'évolution de la déformation à la limite élastique (Figure III.40). C'est-à-dire que la contrainte comme la déformation à la limite élastique a un taux de croissance plus rapide pour des vitesses inférieures à $10\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Au dessus de cette vitesse, ce taux de croissance diminue et reste constant, montrant une évolution de ces deux paramètres proportionnelle à la vitesse de sollicitation.

Tableau III-15 : Valeur des déformations à la limite élastique (Re), à la contrainte maximum et à la rupture en fonction de la vitesse de sollicitation

	déformation à Re	déformation à contrainte max	déformation à rupture
v = 1mm/min	0,0012	0,0247	0,0360
v = 3mm/min	0,0018	0,0234	0,0312
v = 5mm/min	0,0020	0,0230	0,0330
v = 8mm/min	0,0024	0,0232	0,0259
v = 10mm/min	0,0030	0,0240	0,0283
v = 20mm/min	0,0033	0,0219	0,0256
v = 25mm/min	0,0033	0,0238	0,0323
v = 30mm/min	0,0036	0,0225	0,0272

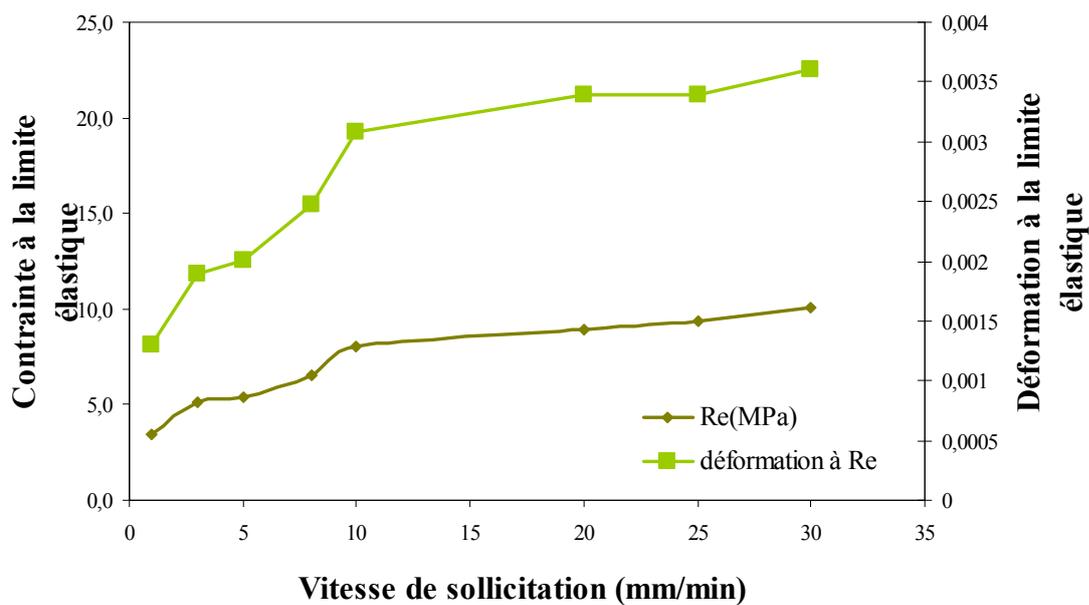


Figure III.40 : Comparaison de l'évolution de la limite élastique et de la déformation à la limite élastique en fonction de la vitesse de sollicitation

III.3 Effet du pourcentage de fibre

Dans cette partie nous avons voulu voir le rôle joué par le taux de fibres sur le comportement des agro-composites. Pour cela des essais avec différents taux de renfort (30 et 40 % en masse) ont été réalisés. Ces essais ont permis de mettre en évidence l'influence du taux de fibres sur les propriétés mécaniques des agro-composites. Les agro-composites ont été fabriqués à l'IFTS (même processus décrit précédemment). Les fibres de chanvre utilisées sont extraites d'une variété de chanvre standard avec des conditions de culture standard. Aucun agent de couplage n'a été employé.

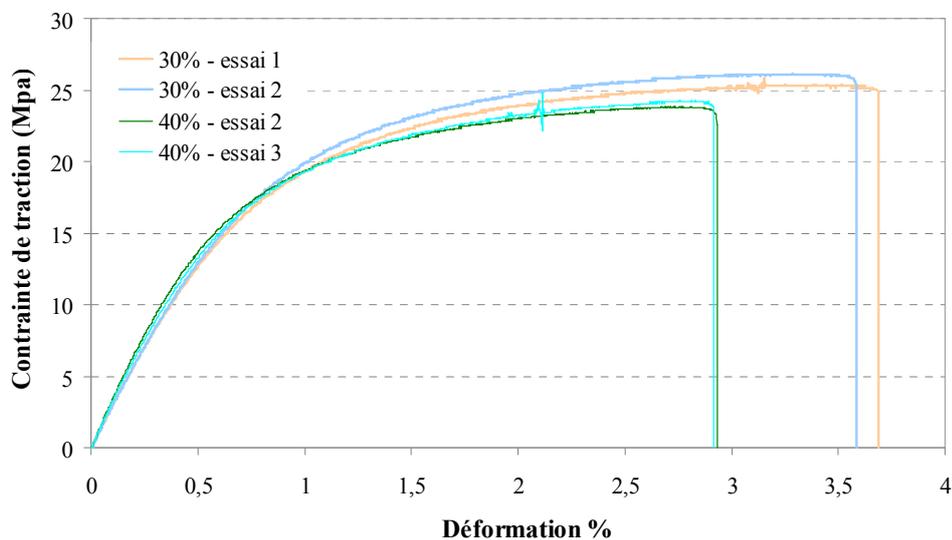


Figure III.41 : Comportement mécanique en traction en fonction du pourcentage de fibres (30 et 40% en masse)

Les essais de caractérisation avec 30 et 40% en masse de fibre montrent des comportements mécaniques différents comme le montre la Figure III.41. Dans la partie élastique, les essais avec 40% montre une augmentation de contrainte plus rapide. Par contre la contrainte à rupture et la déformation à rupture sont plus faibles pour les éprouvettes renforcées à 40%.

Tableau III-16 : Propriétés mécaniques en fonction du pourcentage de fibres (30% et 40% en masse)

	Contrainte					
	U (mm)	F (N)	Déformation à rupture	maxi (MPa)	E (MPa)	Re (MPa)
30% - essai 1	3,14	1331	0,03690	25,77	2975	3,42
30% - essai 2	3,05	1046	0,03586	26,17	2975	4,00
Moyenne	3,10	1188,5	0,03638	25,97	2975	3,71
ET	0,06	201,53	0,00074	0,28	0,00	0,41
40% - essai 2	2,49	954	0,02933	23,86	3367	4,73
40% - essai 3	2,48	991	0,02917	24,76	3273	3,83
Moyenne	2,49	972,50	0,02925	24,31	3320,00	4,28
ET	0,01	26,16	0,00011	0,64	66,47	0,64

Comme le montre le tableau précédent (Tableau III-16), le module d'Young E est plus grand pour un composite renforcé à 40% de fibres. Pour les éprouvettes à 40%, le module d'Young est de $3320 \pm 66,47$ MPa alors que pour les éprouvettes à 30%, le module d'Young est plus faible de 10% de l'ordre de $2975 \pm 0,00$ MPa soit un écart de 345 MPa. Cela montre que la rigidité du composite est dépendante de la quantité de fibre introduite dans le polypropylène [WAM01]. La rigidité des fibres (partie I.3) étant de 8 à 15 fois beaucoup plus importante à celle du polypropylène. Ainsi, plus le pourcentage de fibres introduites est important, plus le module d'Young du composite sera grand ; démontrant le pouvoir renforçant apporté par les fibres de chanvre. La limite d'élasticité R_e suit cette même tendance. La limite d'élasticité est de 3,71 et 4,28 MPa en moyenne, respectivement pour un composite avec 30 et 40% de fibre. Cela montre que l'élasticité du composite est directement liée aux fibres introduites dans le polypropylène.

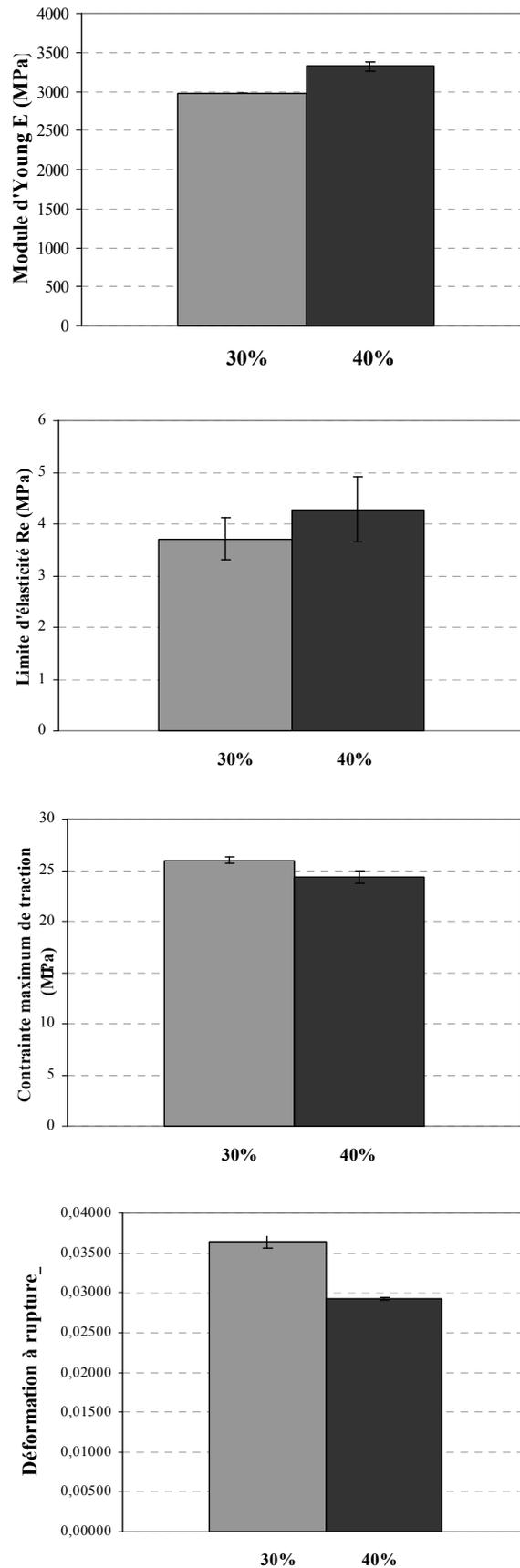


Figure III.42 : Comparaison des propriétés mécaniques entre un composite renforcé à 30 et 40%

A l'inverse, la contrainte à rupture est plus faible pour un composite à 40% avec une valeur 24,31MPa par rapport au composite à 30% avec une valeur de 25,97MPa (Figure III.42). Ainsi augmenter le pourcentage de fibre n'augmente pas forcément la résistance à la rupture du composite. Cette constatation n'est pas due pas à la fibre en elle-même, mais à la qualité de l'interface entre la fibre et le polypropylène. Si l'interface est de mauvaise qualité, augmenter la quantité de fibre dans le composite, accroît la surface de contact entre la matrice et la fibre et par conséquent la qualité de l'interface qui peut fragiliser le composite, se traduisant par une diminution de la contrainte maximum.

Cette étude a montré qu'un composite renforcé avec 40% de renfort a une plus grande rigidité, cependant la résistance mécanique est légèrement plus faible pour un composite avec un taux de renfort de 30%. Ce résultat met en évidence l'importance de l'agent couplage. Malgré un taux de renfort plus important si l'interface n'est pas optimum, un taux de renfort supérieur n'augmentera pas forcément les propriétés mécaniques, confirmant les conclusions des effets des processus d'injection l'un utilisant un agent de couplage et l'autre non.

Partie IV . Etude du comportement local à l'aide de la corrélation d'image

Les essais de caractérisation présentés ci-dessus déterminent le comportement global du composite PP-chanvre. Les éprouvettes de traction sont alors considérées comme un matériau homogène où les propriétés mécaniques dans l'ensemble de l'éprouvette ne varient pas. Le module d'Young E caractérisant l'élasticité du composite est une moyenne de la rigidité locale E_l (EQ. III-4).

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_{l_i}}{n} \quad (\text{EQ. III-4})$$

Dans le cas d'un matériau homogène où la variation du module d'Young local est négligeable, le module d'Young du matériau est identique en tous points et est défini comme :

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_{l_i}}{n} = E_l \quad (\text{EQ. III-5})$$

D'après les hypothèses de la RDM pour des déformations de faible amplitude se produisant dans le domaine élastique, les déformations locales sont identiques en tous points de l'éprouvette. Le déplacement local de chaque point matériel est alors lui aussi constant dans la largeur. Cette uniformité de la déformation élastique est vraie pour un matériau homogène mais est-ce encore le cas pour les agro-composites renforcés par des fibres de chanvre ?

Pour chaque localisation dans l'éprouvette l'état de contrainte est considéré comme étant homogène. Pour cela, deux hypothèses doivent être émises. La première consiste à considérer l'interface du matériau comme étant de bonne qualité, permettant la transmission de l'intégralité des efforts internes entre les fibres et la matrice polypropylène. Les éprouvettes testées ont subi un traitement thermo-mécanique et un adjuvant (du PP modifié) a été ajouté à hauteur de 5% pour améliorer la liaison entre la fibre végétale et le thermo-plastique. De ce fait, faire

l'hypothèse d'une interface parfaite transmettant l'ensemble des efforts mécaniques est réaliste. La deuxième hypothèse consiste à considérer le composite comme étant un milieu sans discontinuité. Des études microscopiques de la section transversale intérieure des éprouvettes (caractérisées en corrélation d'images) ont montré qu'aucune discontinuité n'était présente (partie I.5). C'est deux hypothèses étant vérifiées, les contraintes locales sont les mêmes dans l'ensemble de l'éprouvette pour lesquelles les zones locales d'étude sont assez grandes pour pouvoir déterminer un comportement moyen identique en tous points de l'éprouvette.

Considérant un état de contrainte homogène dans l'éprouvette, si les déformations locales ne sont pas identiques pour garder cet état de contrainte en tous points de l'éprouvette, la rigidité locale change. La Figure III.43 montre que pour un état de contrainte homogène donné σ_i , si les déformations locales ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) sont différentes, les modules d'Young (E_1, E_2, E_3) seront différents.

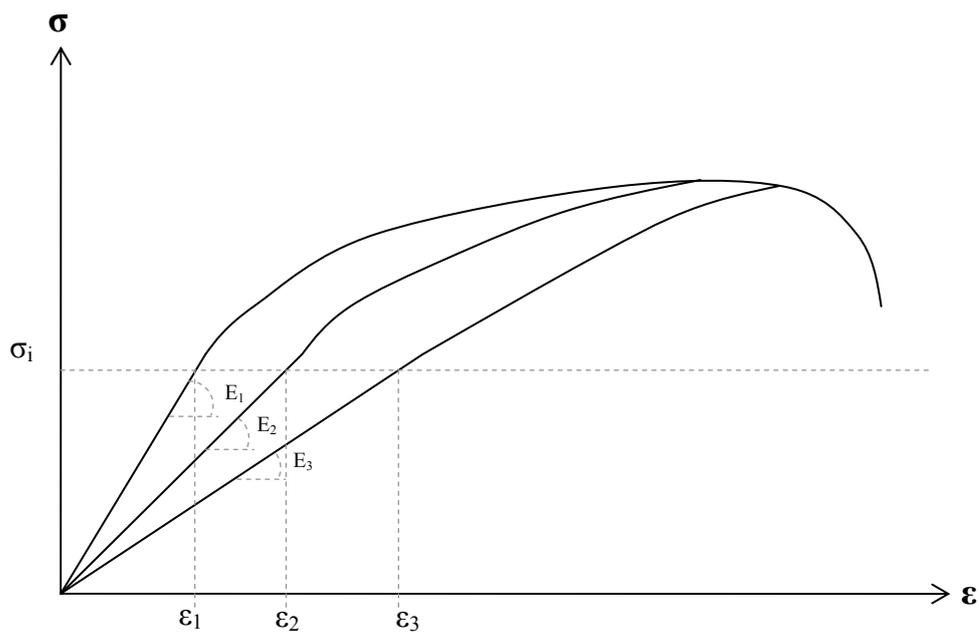


Figure III.43 : Différents comportements théoriques locaux en traction d'un agro-composite en fonction de la déformation locale

Dans cette partie sera étudié le comportement local d'un agro-composite PP/chanvre, dans le but de déterminer les propriétés mécaniques (rigidités locales) en tous points du composite et l'impact de la répartition des fibres sur le composite.

IV.1 Méthode d'essais

Pour pouvoir déterminer le comportement local d'un agro-composite, des essais de traction monotones ont été couplés à un suivi des déplacements par une technique de corrélation d'images. La corrélation d'images est une méthode optique qui permet de mesurer le champ complet des déplacements que subit une structure pendant une sollicitation. Cette technique a l'avantage de pouvoir mesurer de grands déplacements et ne nécessite pas l'utilisation d'une source LASER pour éclairer la surface de l'échantillon.

Des images macroscopiques de la zone d'étude de l'éprouvette ont été prises à différents instants au cours de l'essai. Ces images corrélées à une image de référence prise à l'instant t_0 avant la mise en tension de l'éprouvette permettent de déterminer les champs de déplacements. Pour pouvoir comparer les images entre elles, un « moucheti » qui est un nuage de points aléatoires a été appliqué sur la surface de l'éprouvette. Au cours de la sollicitation le moucheti se déforme en suivant la déformation de la surface de l'éprouvette. Ainsi le déplacement spatial d'un point du moucheti entre sa position de référence à l'instant t_0 et l'instant t_i permet de mesurer le déplacement local. En cumulant une multitude d'informations locales, il est alors possible d'obtenir une cartographie des champs de déplacements u_x et u_y (Figure III.44).

Des essais de caractérisation en traction uniaxiale ont été réalisés sur des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre. Les composites testés ont été renforcés par des fibres e40 (condition de culture standard et de variété standard). Plusieurs essais ont été réalisés pour confirmer la véracité et la répétabilité des phénomènes constatés.

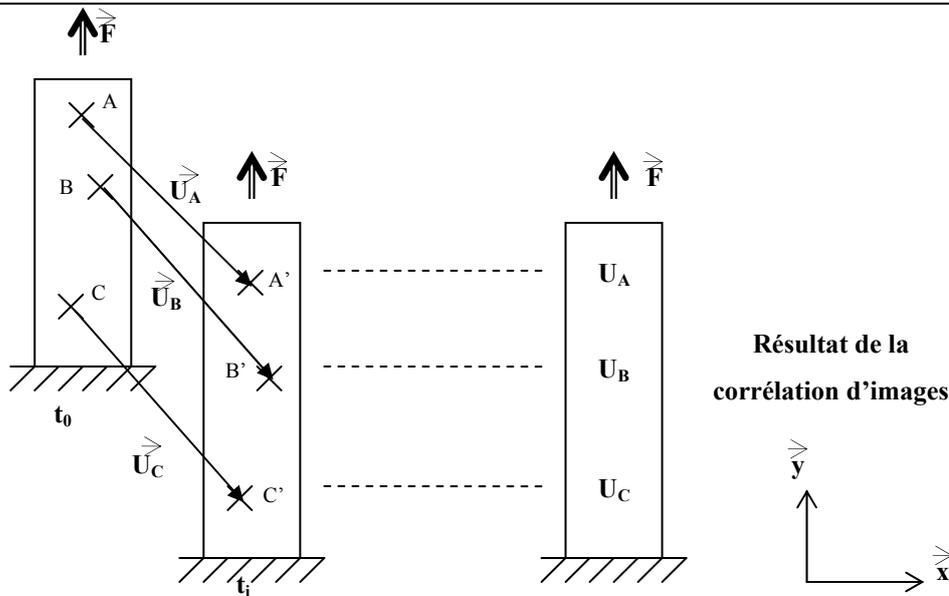


Figure III.44 : Schéma de principe de la corrélation d'images

IV.2 Etude en traction d'un composite PP-chanvre (c40)

IV.2.1 Déplacement longitudinal $U_y(y)$ suivant la longueur de l'éprouvette

Dans un premier temps, les champs de déplacement suivant l'axe de traction ont été analysés. La Figure III.45 suivante montre l'évolution du déplacement longitudinal local d'une zone proche du mors mobile de la traverse en fonction du temps. Le déplacement de la traverse correspond à la mesure donnée par la machine de traction au cours de l'essai. Le déplacement local est une mesure du champ de déplacement dans une direction pour une zone de l'éprouvette définie. Le déplacement mesuré par la machine correspond au déplacement de la traverse. La vitesse (de 0,5 ou 1 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) de déplacement de la traverse étant constante au cours de la sollicitation, ce dernier déplacement reste proportionnel au temps. Le déplacement mesuré par la corrélation d'images montre qu'à partir d'un temps de 100 secondes, le déplacement local U_y proche du mors mobile est plus petit que le déplacement de la traverse mesuré expérimentalement. En théorie les deux déplacements devraient être les mêmes. La différence constatée entre ces deux mesures s'explique par le fait que la zone locale n'est pas exactement au même niveau que le mors mobile, comme le

montre la photo suivante (Figure III.46). La zone locale définie par une jauge rectangulaire positionnée en haut de l'éprouvette est proche du mors mobile mais ne se situe pas au niveau de la traverse, ainsi le déplacement mesuré par la jauge sera inférieur au déplacement de la traverse. De plus une légère déformation de l'éprouvette dans les mors peut engendrer une différence de déplacement mesuré. Cette différence n'est pas constante au cours du temps mais augmente. La différence étant proportionnelle au déplacement de la traverse, lorsque celui augmente, la différence de mesure change suivant la même tendance.

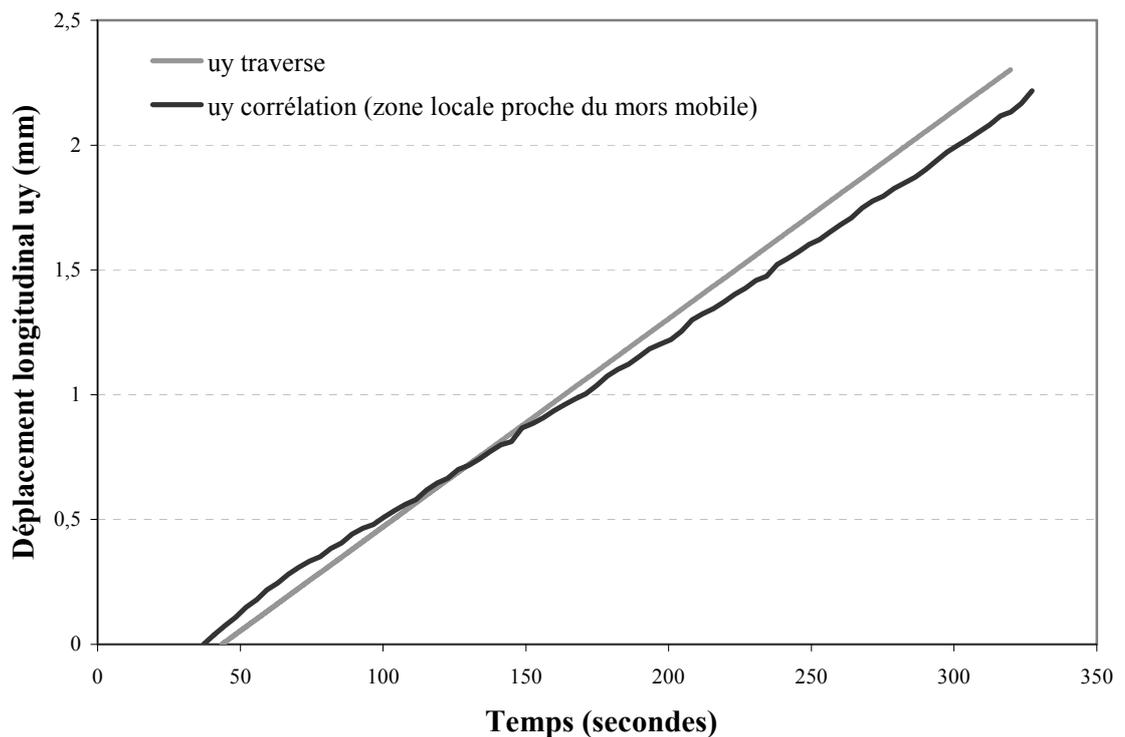


Figure III.45 : Déplacement longitudinal de la traverse et déplacement local calculé par la méthode de la corrélation d'images

L'essai de caractérisation en traction couplé à de la corrélation d'images a permis de mettre en évidence les champs de déplacements locaux dans deux directions perpendiculaires (x : longitudinale dans l'axe de traction et y : verticale dans l'axe transversal). La théorie des milieux continus dans le cas d'une sollicitation uniaxiale de type traction / compression entraînant des petites déformations dit que la déformation dans l'axe de sollicitation est constant en tous points pour des matériaux homogène.

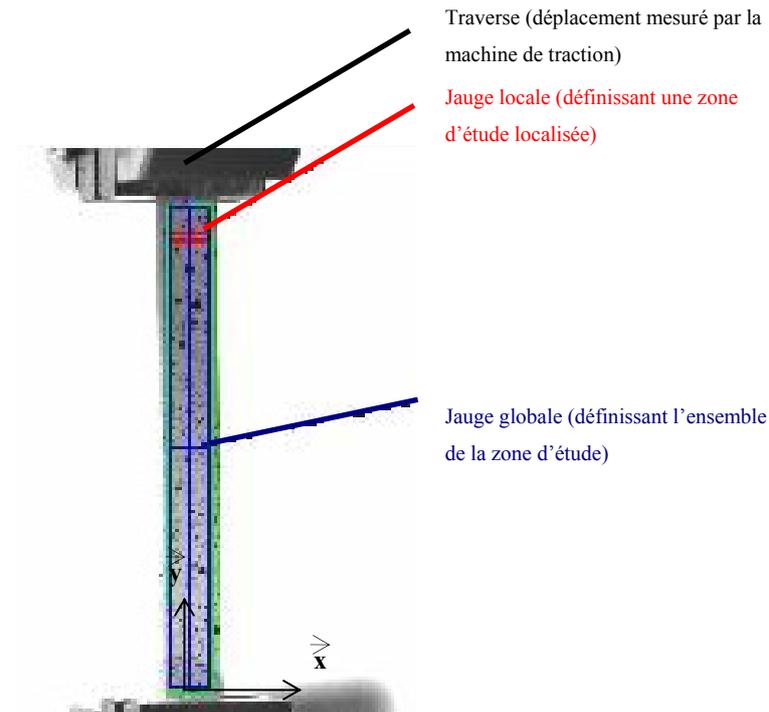


Figure III.46 : Photo d'une éprouvette sollicitée en traction couplée avec la méthode de corrélation d'images (zones d'études globale et locale)

La déformation suivant l'axe de sollicitation est définie comme :

$$\varepsilon_x = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\Delta l_{local}}{l_{local}} = \frac{\Delta L_{global}}{L_{global}}$$

Dans le cas d'un matériau homogène, la déformation doit rester identique soit $\varepsilon_x(x, y)$ constante. Ainsi le déplacement local Δl_{local} est proportionnel à la localisation du point d'étude. Le déplacement local peut être défini comme $\Delta l_{local} = \varepsilon_x \cdot l_{local} = \varepsilon_x \cdot x$.

La Figure III.47 montre l'évolution du déplacement U_y le long de l'éprouvette pour une sollicitation donnée. Ce résultat montre la proportionnalité entre le déplacement local U_y et sa localisation le long de l'éprouvette. Les déplacements mesurés proche du mors fixe tendent à être nuls. Alors que les déplacements locaux mesurés aux points proches du mors mobile tendent vers une valeur légèrement inférieure à celle du déplacement de la traverse fournie par la machine.

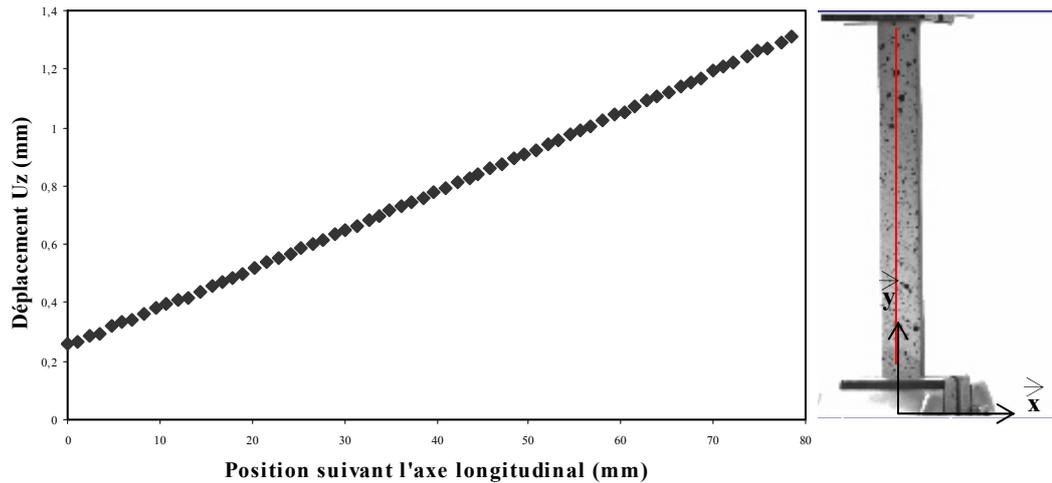


Figure III.47 : Evolution du déplacement local U_y suivant la position longitudinale y

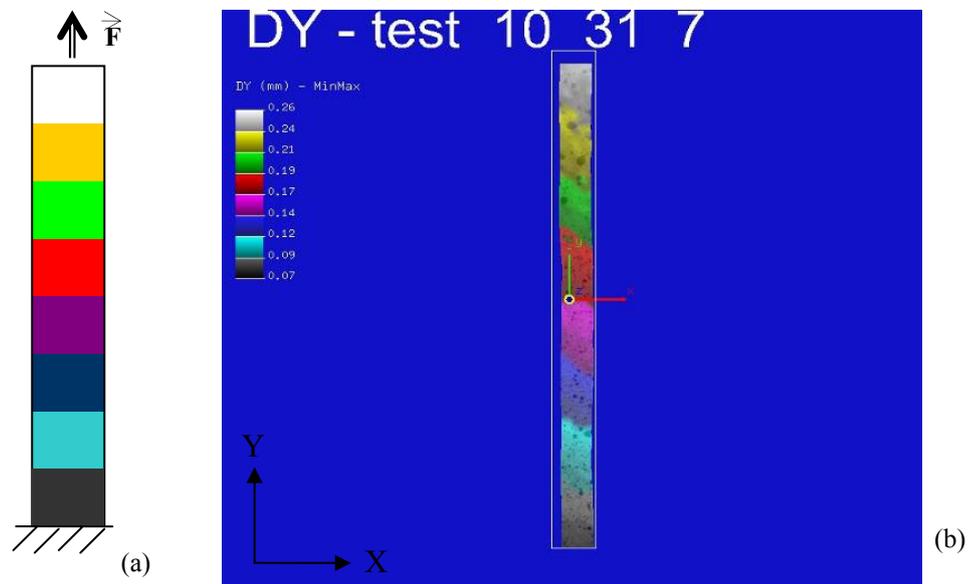


Figure III.48 : Déplacement local U_y suivant l'axe de traction en tous points de l'éprouvette : (a) champ de déplacement théorique pour un matériau homogène, (b) champ de déplacement mesuré pour un agro-composite chanvre (30% en volume) – Polypropylène injecté

Les mesures identifiées par la corrélation d'images donnent les cartographies des champs de déplacements dans une direction à un instant t au cours de l'essai. Le champ de déplacement suivant l'axe longitudinal U_y est montré en Figure III.48.

Nous constatons que le champ de déplacement longitudinal U_y n'est pas constant dans la largeur x de l'éprouvette comme le montre la Figure III.48b. Les franges de déplacement montrant l'évolution du déplacement local U_y dans l'éprouvette ne sont

pas horizontales comme pour un matériau théoriquement homogène. Ces franges sont inclinées, l'inclinaison définit la variation du déplacement longitudinal U_y dans la largeur de l'éprouvette.

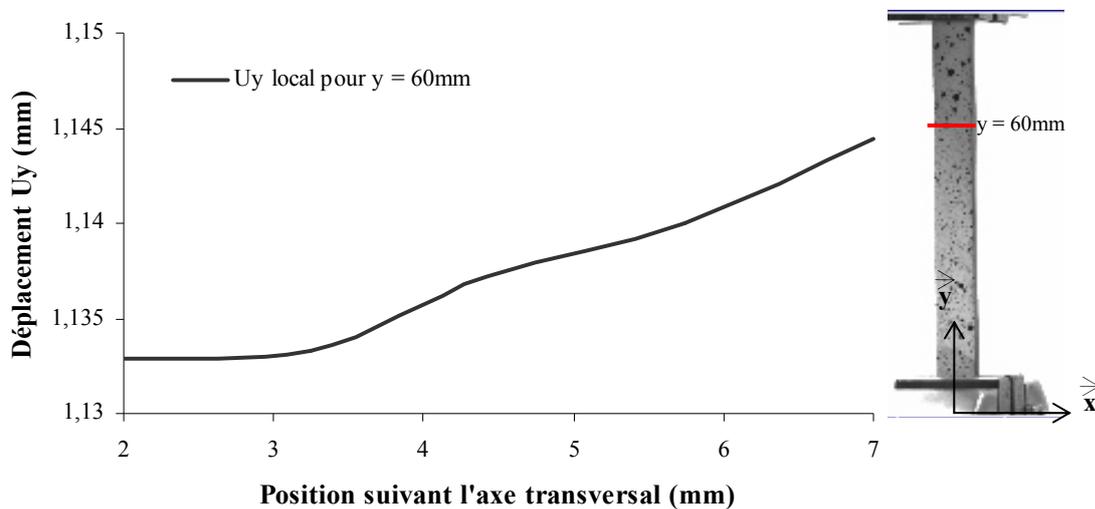
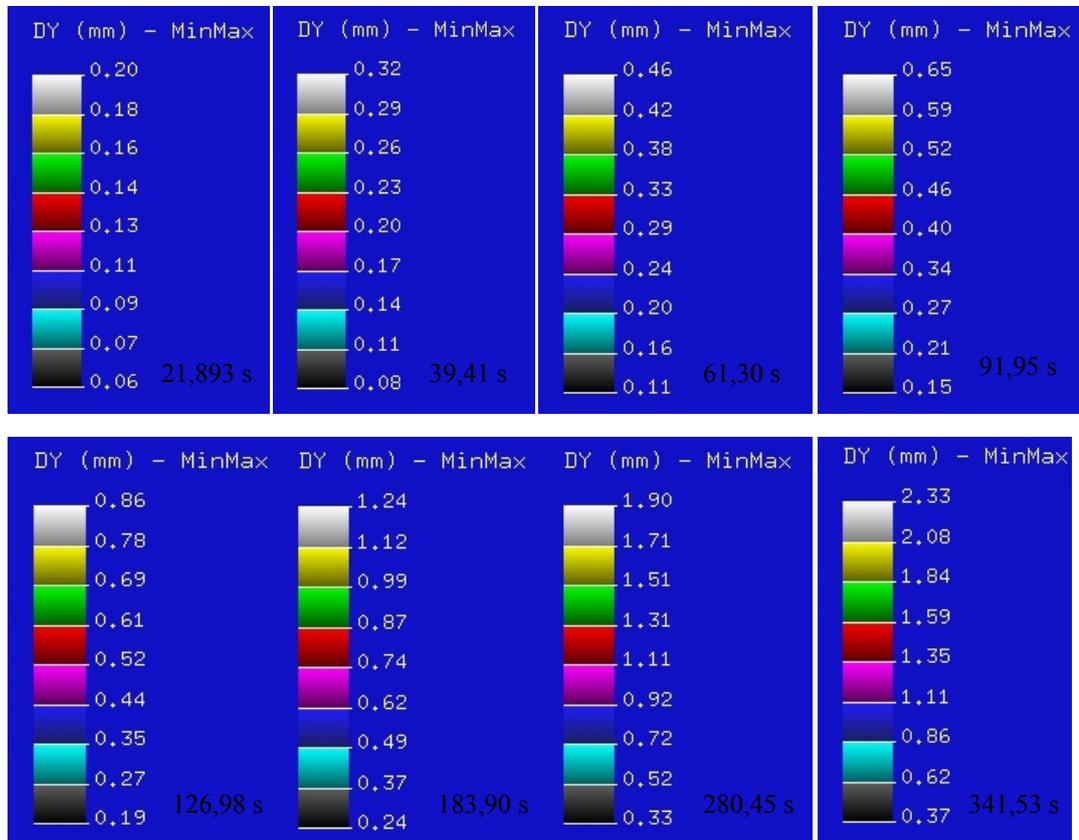


Figure III.49 : Evolution du déplacement local U_y suivant la position transversale x

Les mesures des déplacements locaux U_y suivant la position transversale montre un accroissement des déplacements suivant la largeur de l'éprouvette. Dans l'exemple cité ci-dessus, il est montré que les déplacements sont plus grands à droite qu'à gauche de l'éprouvette, passant d'environ 1,133mm pour une position x de 2mm à 1,145 pour une position de 7mm. Cette variation met en évidence le comportement hétérogène d'un agro-composite causé par une répartition non-homogène des fibres dans l'éprouvette.

IV.2.2 Variation $U_y(x)$ au cours du temps

La Figure III.50 montre l'évolution du champ de déplacement local U_y dans l'ensemble de l'éprouvette pour huit déformations différentes. Les champs de déplacement ne changent pas d'état au cours de l'essai seule son intensité augmente en fonction du déplacement. La Figure III.51 montre les déplacements longitudinaux $U_y(x)$ suivant la largeur de l'éprouvette pour $y=40\text{mm}$ pour les huit déformations précédentes. Ces graphiques mettent en évidence l'augmentation de la variation des déplacements locaux U_y suivant la largeur x de l'éprouvette au cours de l'essai. Ces résultats montrent que plus le déplacement du mors mobile augmente, plus la différence de déplacement local entre la partie gauche et droite de l'éprouvette est importante. Ainsi la différence de comportement dans la largeur de l'éprouvette s'accroît au fur et à mesure que le mors mobile se déplace. De plus, les déplacements U_y tendent à évoluer linéairement dans la largeur de l'éprouvette. Ainsi il est possible de calculer un taux d'accroissement de cette variation en déterminant le coefficient directeur de la droite passant par les points de mesures.



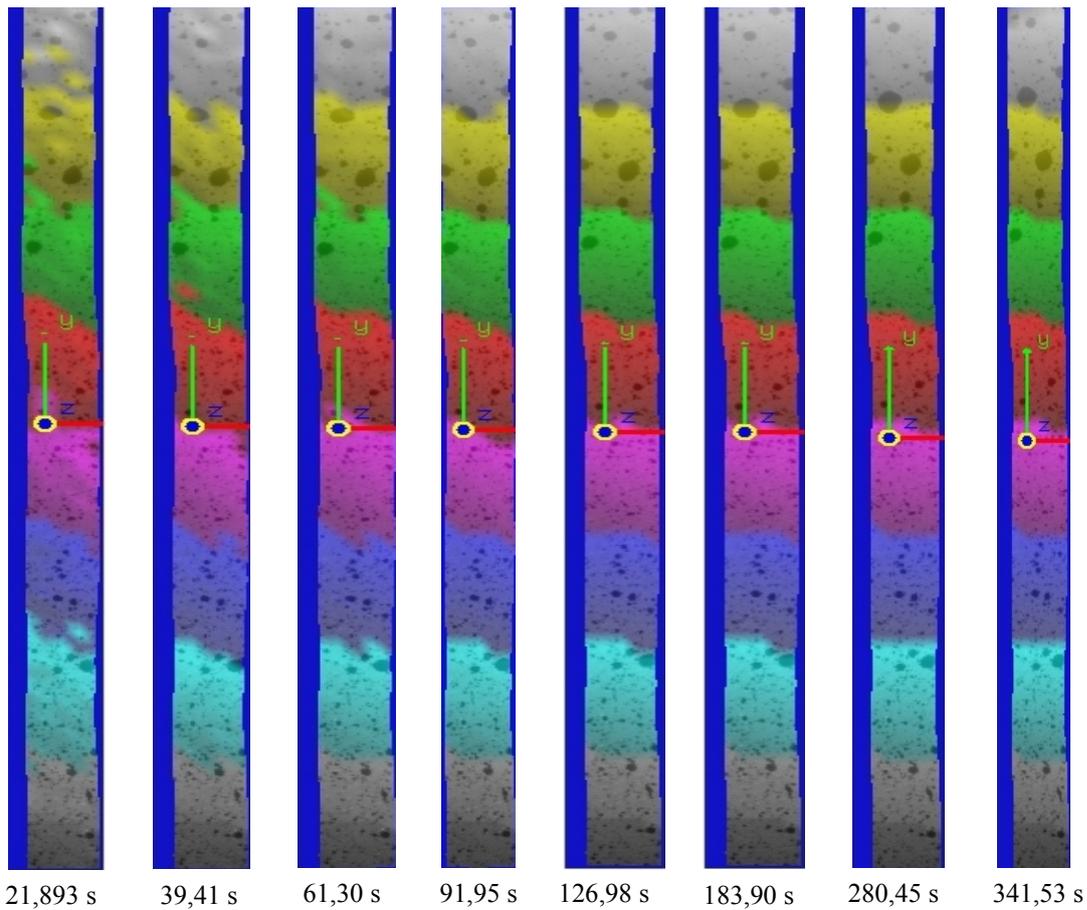
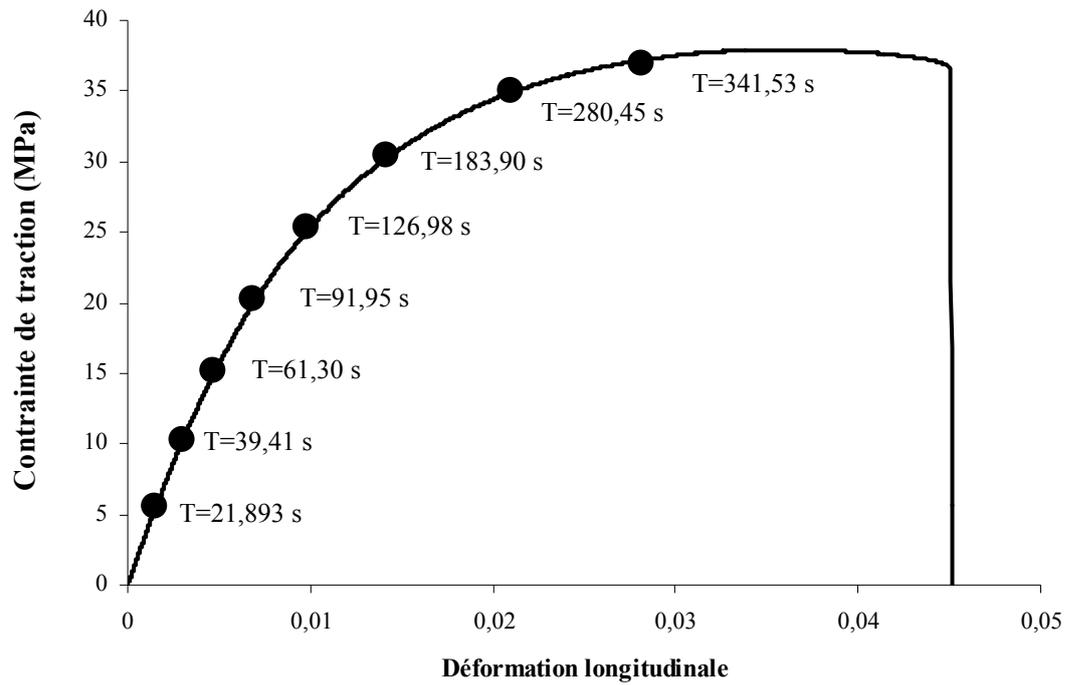


Figure III.50 : Déplacements locaux U_y à différents moments et correspondance avec la courbe de traction

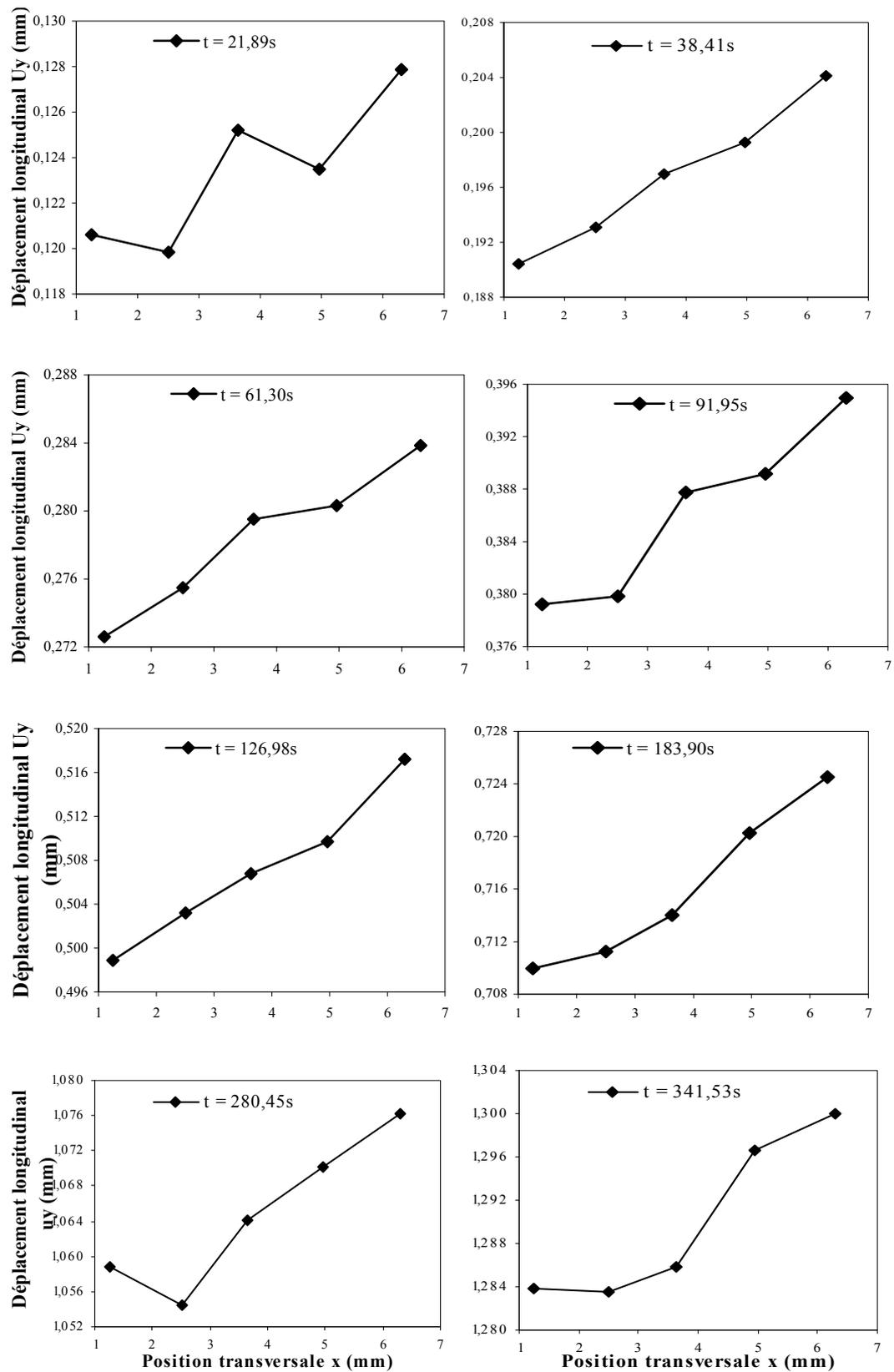


Figure III.51 : Déplacement local U_y suivant la largeur transversale x pour une position longitudinale donnée ($y=40\text{mm}$)

Le taux de variation ou d'accroissement du déplacement U_y est la valeur de la variation de l'inclinaison du déplacement $U_y(x)$ (pentes des droites, Figure III.51). La Figure III.52 montre la variation du taux d'accroissement des déplacements U_y suivant la largeur de l'éprouvette en fonction du temps d'essais. Comme le montre ces résultats, ce taux augmente au cours du temps passant de $1,5E-03$ à $4E-03$ et la vitesse d'accroissement de ce taux n'est pas constante. La variation de déplacement U_y augmente rapidement au début d'essai. Ensuite la vitesse d'accroissement chute avec une augmentation de cette variation plus lente. Le temps à partir duquel la diminution de vitesse d'accroissement apparaît correspond au temps pour lequel le comportement du composite devient plastique. Ainsi en fonction du comportement mécanique du composite le taux de variation n'est pas le même. Lorsque le comportement est élastique la différence de déplacement U_y entre la partie gauche et droite de l'éprouvette augmente rapidement et de manière constante alors que lorsque le comportement devient plastique, la variation de déplacement augmente plus lentement.

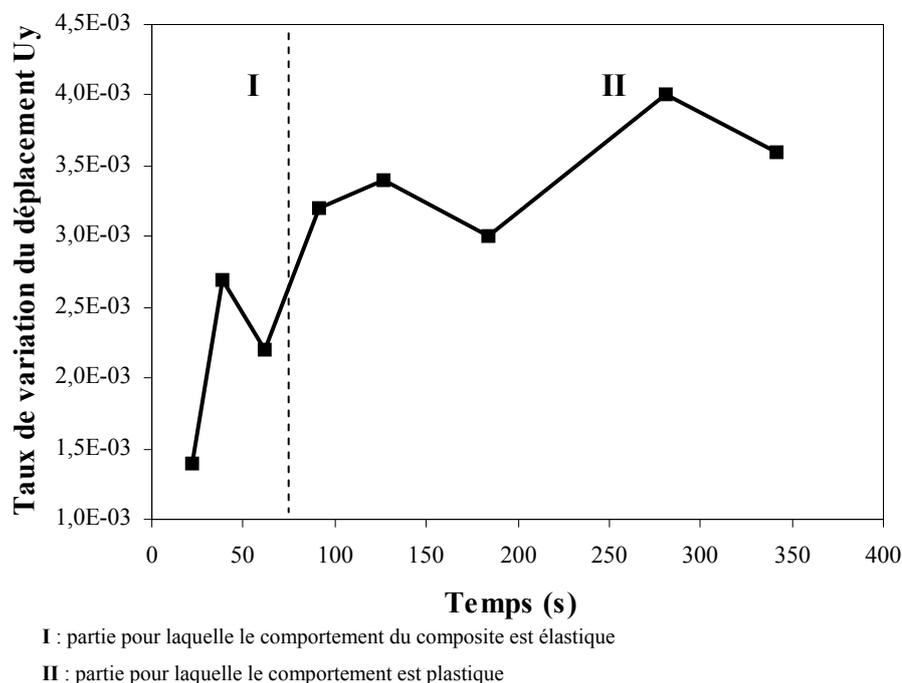


Figure III.52 : Evolution du taux d'accroissement du déplacement local U_y au cours de l'essai

IV.2.3 Variation $U_y(x)$ suivant la longueur de l'éprouvette

Après avoir étudié, la variation du déplacement local U_y suivant la largeur de l'éprouvette et son évolution dans le temps au cours d'un essai, il est intéressant de regarder la variation de ce même déplacement suivant la longueur de l'éprouvette et regarder si les phénomènes constatés précédemment sont encore présents. Dans l'exemple montré ci-dessous, à un temps d'essai de 196s, le déplacement moyen mesuré suivant la largeur de l'éprouvette change en fonction de la position longitudinale y , passant d'un déplacement moyen U_y d'environ 0,334 à 0,846mm pour une position y respective de 20 et 80mm.

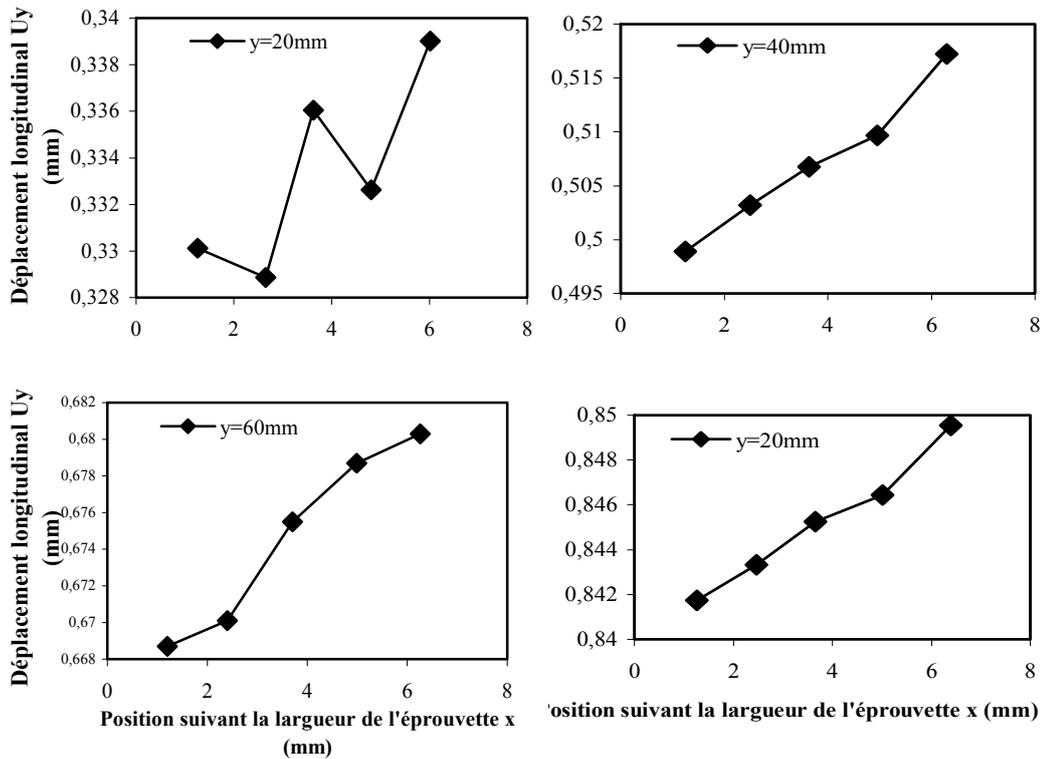


Figure III.53 : Variation du déplacement longitudinal U_y suivant la largeur x de l'éprouvette pour des positions y données (temps d'essais est de 196s)

La variation de déplacement $U_y(x)$ change en fonction de la position dans la longueur de l'éprouvette ($y=20, 40, 60$ et 80mm) mais n'est pas croissante (Figure III.54). La différence de déplacement est minimum pour $y = 20$ et 80mm , points proches des mors alors qu'elle est maximum en $y = 40\text{mm}$ point central de l'éprouvette. Ces résultats montrent que l'écart de déplacement U_y dans la largeur de l'éprouvette est minimum dans les zones proches des mors qui sont des zones où les déplacements locaux U_x sont limités par le serrage l'éprouvette dans les mors et est maximum au milieu de l'éprouvette, zone la plus éloignée des mors. Ainsi cela confirme que le maintien et le serrage de l'éprouvette dans les mors empêche le déplacement de l'éprouvette, atténuant de ce fait la non-homogénéité des déplacements U_y locaux dans la largeur de l'éprouvette.

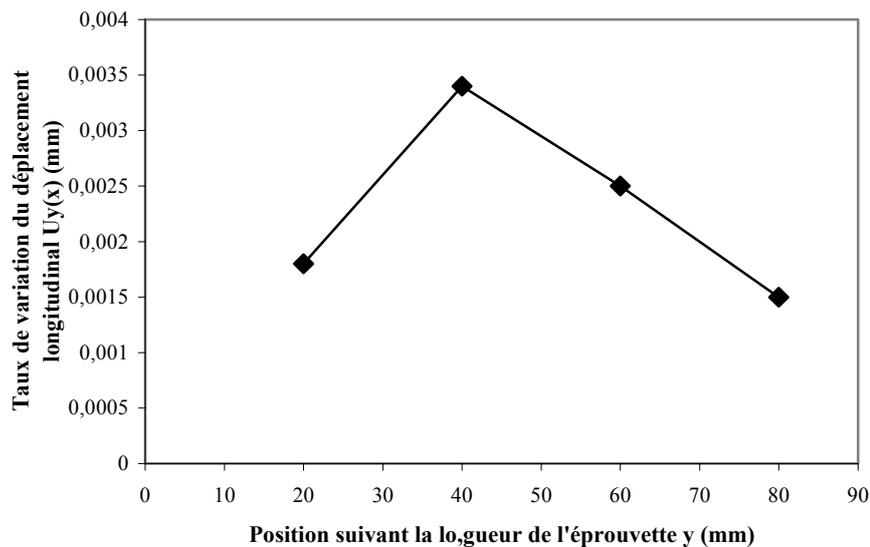


Figure III.54 : Taux de variation du déplacement longitudinal $U_y(x)$ suivant la largeur de l'éprouvette x pour différentes positions y

Pour conclure, l'ensemble des résultats montrent une forte hétérogénéité du déplacement dans la partie élastique et qui s'estompe en plasticité. En début de sollicitation, cette hétérogénéité est essentiellement due à une répartition non-homogène des fibres. En grande déformation, cette mauvaise répartition est effacée par la déformation elle-même et par des débuts d'endommagement locaux du composite.

IV.2.4 Déplacement transversal $U_x(x)$

Les déplacements transversaux U_x dans la largeur de l'éprouvette ont été mesurés (Figure III.55). Comme le montre la figure suivante, ce déplacement négatif, met en évidence le rétrécissement de section. A l'extrémité le déplacement est maximum et minimum au centre, expliquant le rétrécissement de section de l'éprouvette.

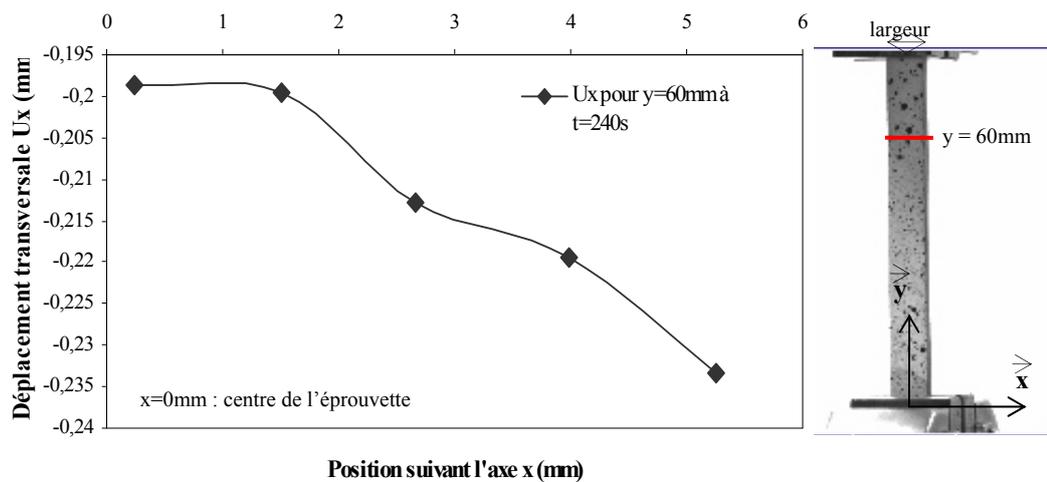


Figure III.55 : Déplacements transversaux $U_x(x)$ dans la moitié de la-largeur de l'éprouvette

IV.2.5 Déformations locales

Après avoir étudié les déplacements locaux, nous allons nous intéresser aux déformations locales induites par ces déplacements.

La déformation longitudinale ϵ_{yy} définie comme suit (Eq III-15) évolue de la même manière au cours du temps que la déformation mesurée avec la corrélation d'images (Figure III.46). Nous constatons une évolution des déformations dans l'ensemble de l'éprouvette dites globales quasi-identiques entre les deux moyens de mesures (mesures machine : déplacement de la traverse et corrélation d'images)

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{u_i - u_j}{y_i - y_j} \quad \text{(Eq. III-6)}$$

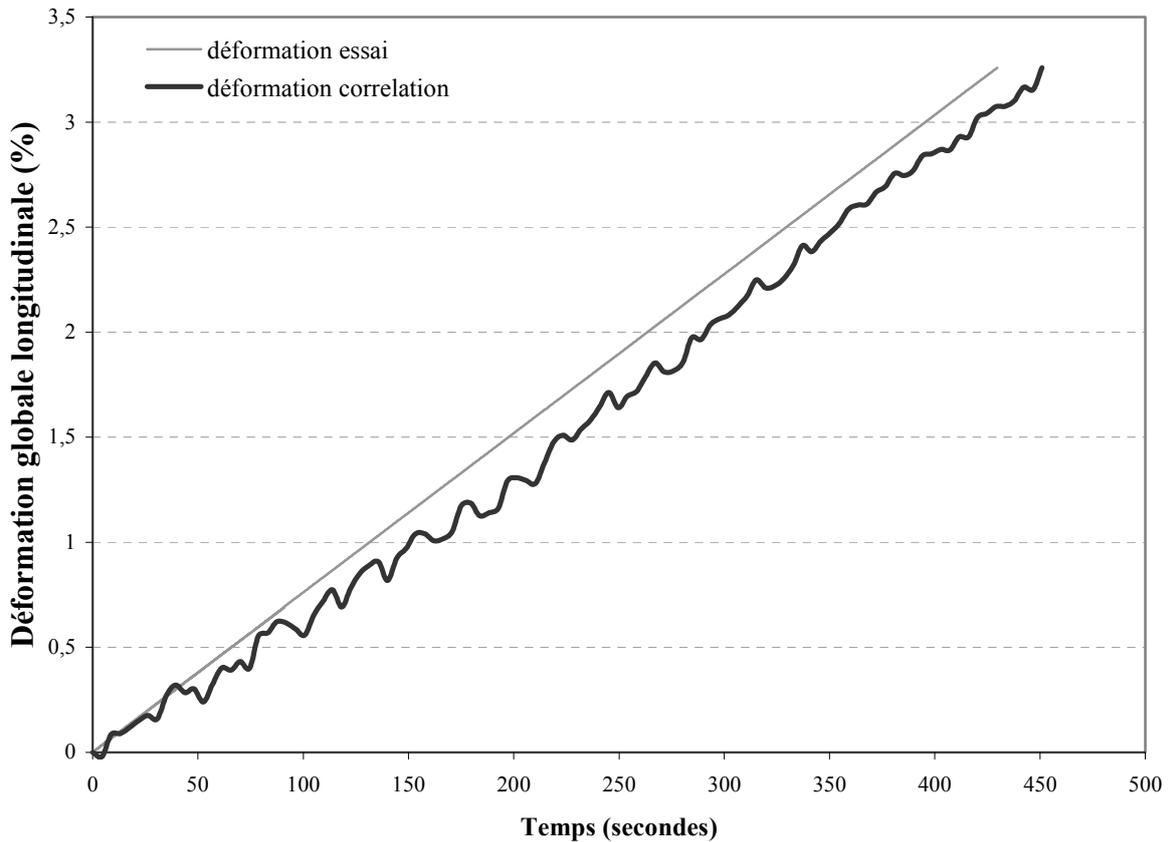
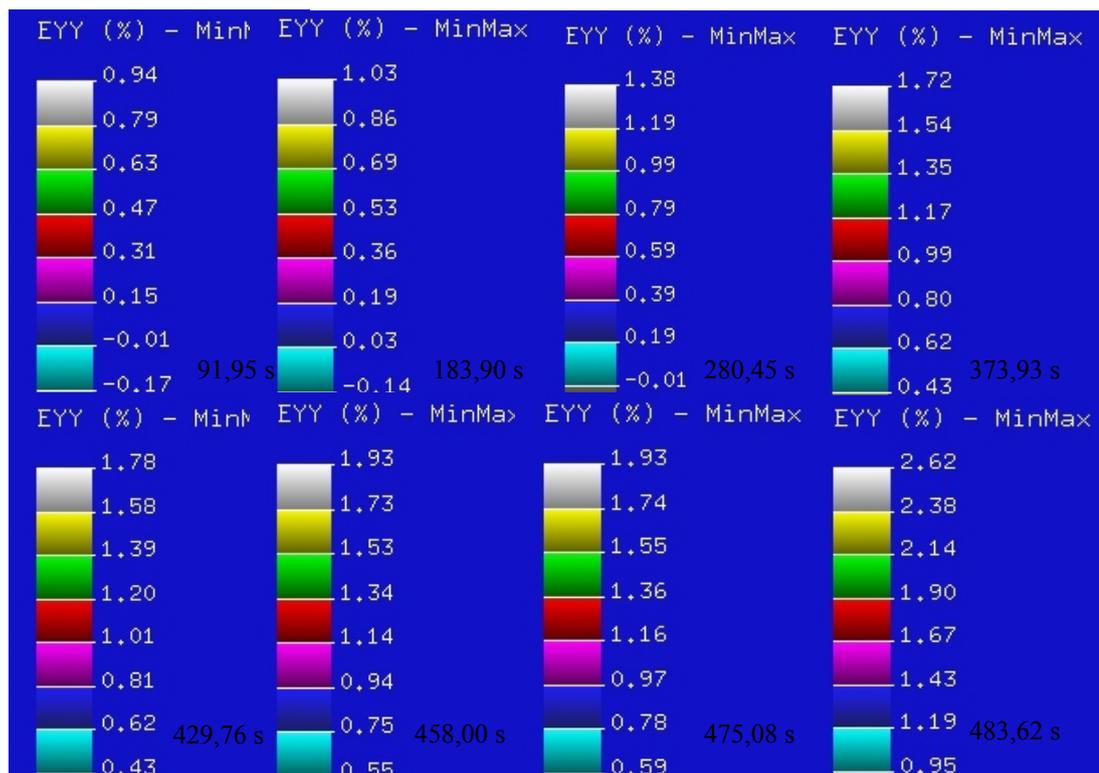


Figure III.56 : Evolution de la déformation longitudinale ϵ_{yy} au cours de l'essai (déformations calculées à partir du déplacement de la traverse et de la corrélation d'images)

La Figure III.57 montre l'évolution du champ de déformations locales ϵ_{yy} dans l'ensemble de l'éprouvette à différents instants. Les résultats suivants mettent en évidence l'apparition de déformations locales qui deviennent non-homogènes à partir d'un certain niveau de sollicitation. Lorsque les sollicitations appliquées sont faibles, le comportement du matériau étant purement élastique, les déformations sont homogènes dans l'ensemble de l'éprouvette. C'est seulement à partir d'une certaine déformation plastique qu'une hétérogénéité des déformations apparaît. Comme le montre la figure suivante, pour un temps d'essais de 91s correspondant à une déformation globale d'environ 0,6%, les déformations ϵ_{yy} sont homogènes, la différence de la valeur des déformations dans l'éprouvette n'étant pas significatif. Lorsque la variation de contrainte devient faible par rapport à la déformation du matériau, comme le montre les résultats à un temps d'essai de 183 et 280s, les différences de déformations dans l'ensemble de l'éprouvette sont visibles.



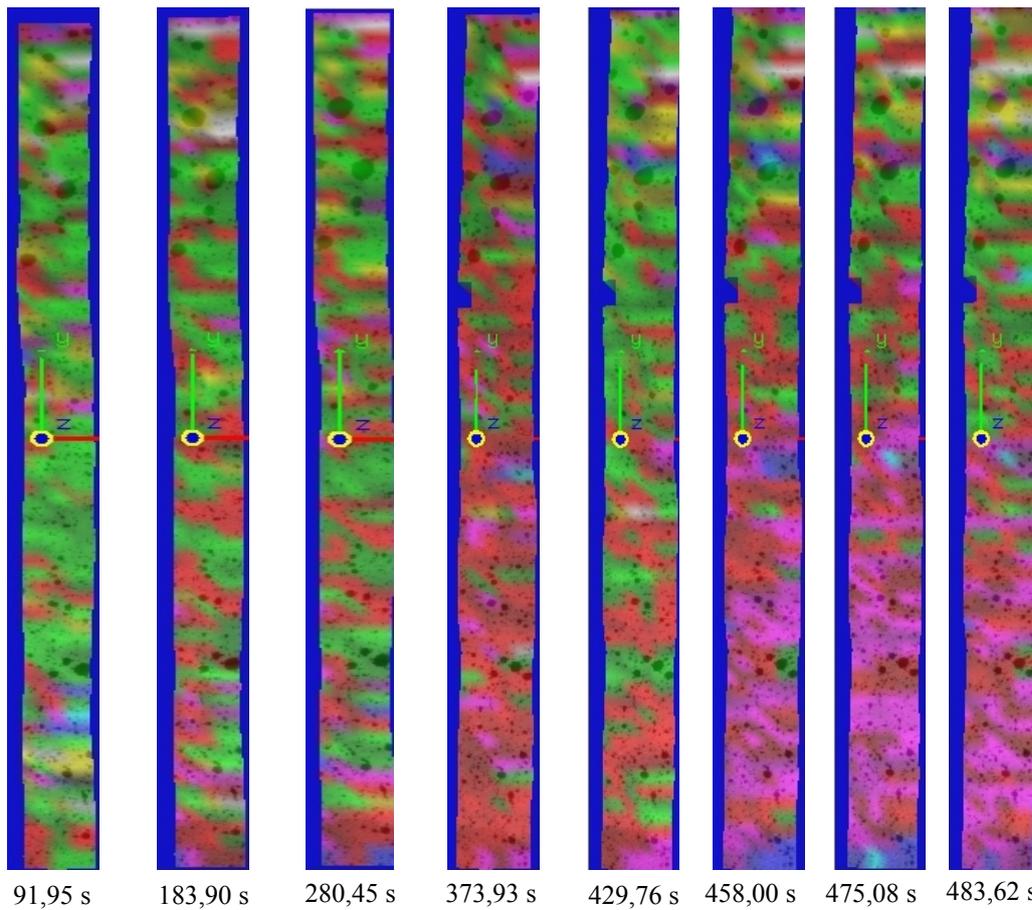
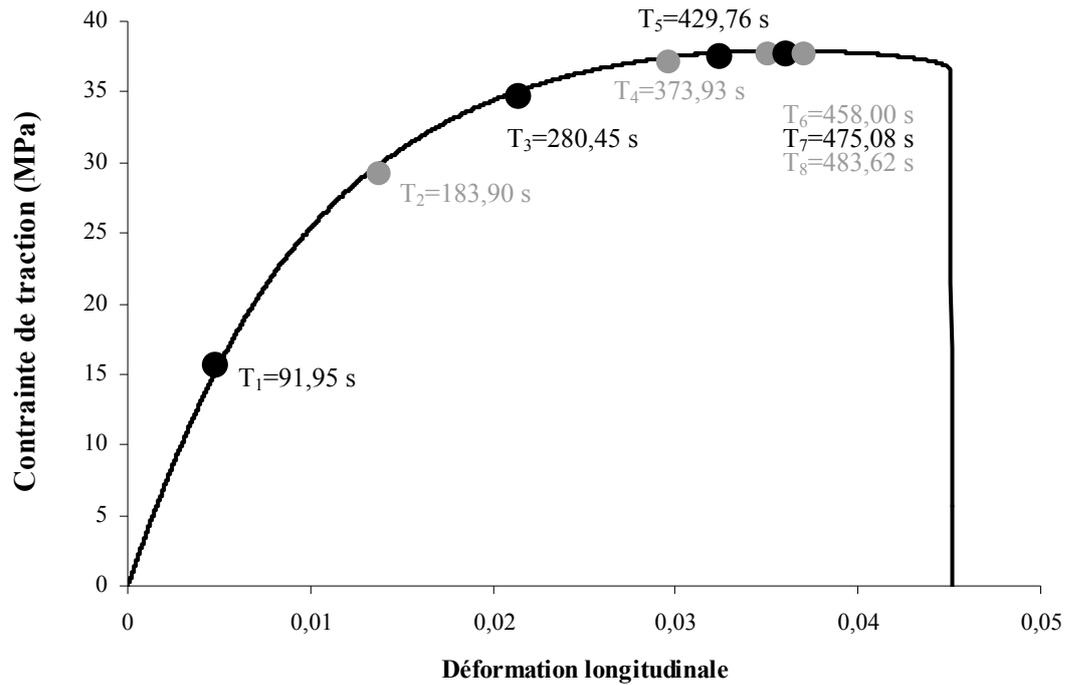


Figure III.57 : Déformations locales ϵ_{yy} à différents temps d'essai et correspondance avec la courbe de traction

Lorsque la contrainte de traction se rapproche de la contrainte maximum, la variation de déformation dans l'éprouvette devient maximale. Les résultats ont montré que les déformations locales maximums se concentraient dans la moitié (haute dans l'exemple cité ici) de l'éprouvette. Dans le reste de l'éprouvette (moitié basse), les déformations sont beaucoup plus faibles, comme le montre l'image des résultats de la corrélation pour un temps d'essais de 458s soit une déformation d'environ 3,8%. De plus lorsqu'on atteint la contrainte maximale, les déformations maximums se localisent à des positions préférentielles dans l'éprouvette. Ces zones locales de déformations maximums sont représentées par des bandes blanches. Plusieurs bandes blanches apparaissent pour une contrainte se rapprochant de la contrainte maximum. L'une de ces zones localisées de déformations maximum va être privilégiée au moment de la rupture. Comme on peut le voir sur la Figure III.58, la rupture s'est produite au niveau de la deuxième bande blanche.

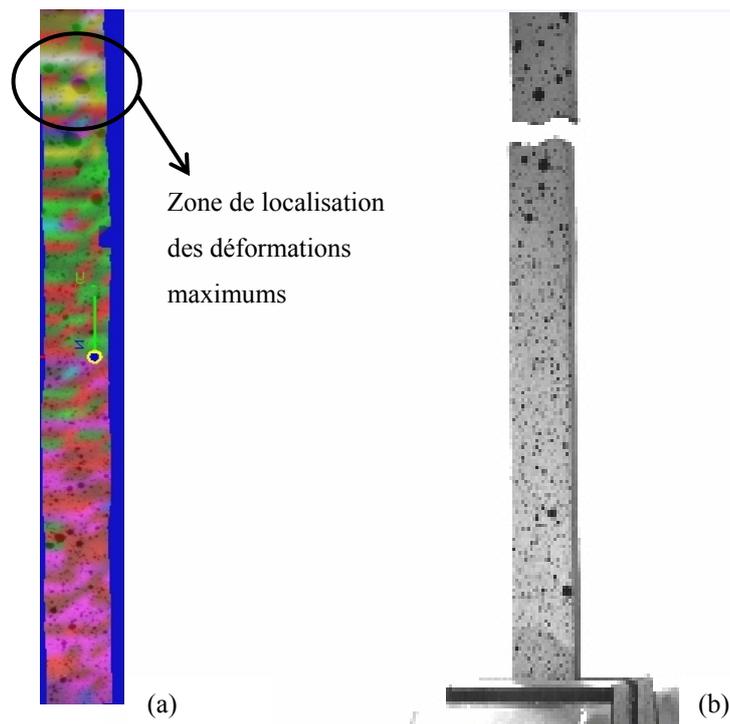


Figure III.58 : Image des déformations longitudinales ϵ_{yy} locales (a) au moment de la rupture et image de l'éprouvette après rupture (b)

IV.3 Modules d'Young locaux et répartition des fibres dans l'éprouvette

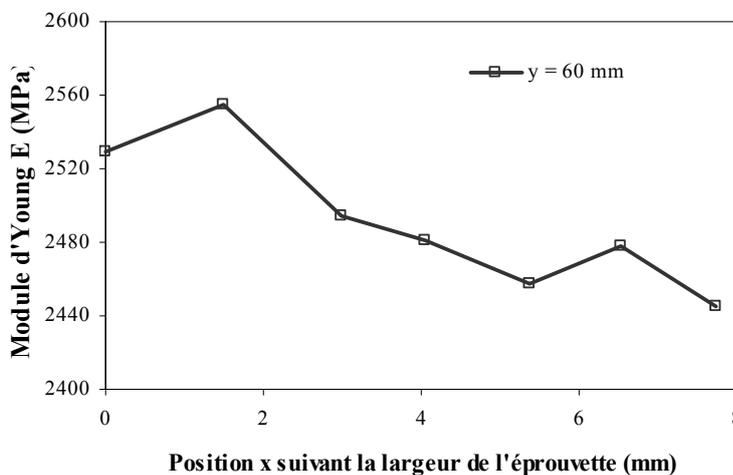
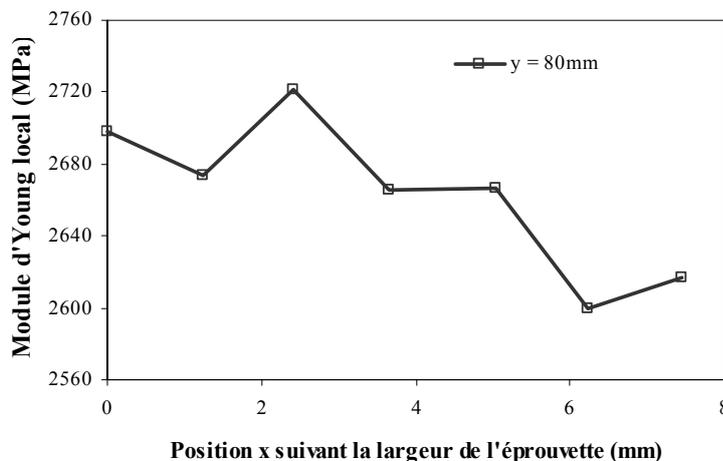
A partir des champs de déplacements déterminés précédemment avec la corrélation d'images. Il est possible de calculer, les modules locaux en tous points de l'éprouvette. Pour cela les hypothèses suivantes ont été faites.

(1) Les zones d'étude sont assez grandes pour pouvoir déterminer un comportement moyen (zones d'étude à l'échelle macroscopique).

(2) Les contraintes locales sont les mêmes en tous points de l'éprouvette.

Avec ces hypothèses, le module d'Young (E) en tous points peut être déduit (σ_e la contrainte, l_0 la longueur initiale et u le déplacement longitudinal U_y)

$$E(u) = \frac{\sigma^e \cdot l_0}{U_y} \quad \text{(Eq. III-7)}$$



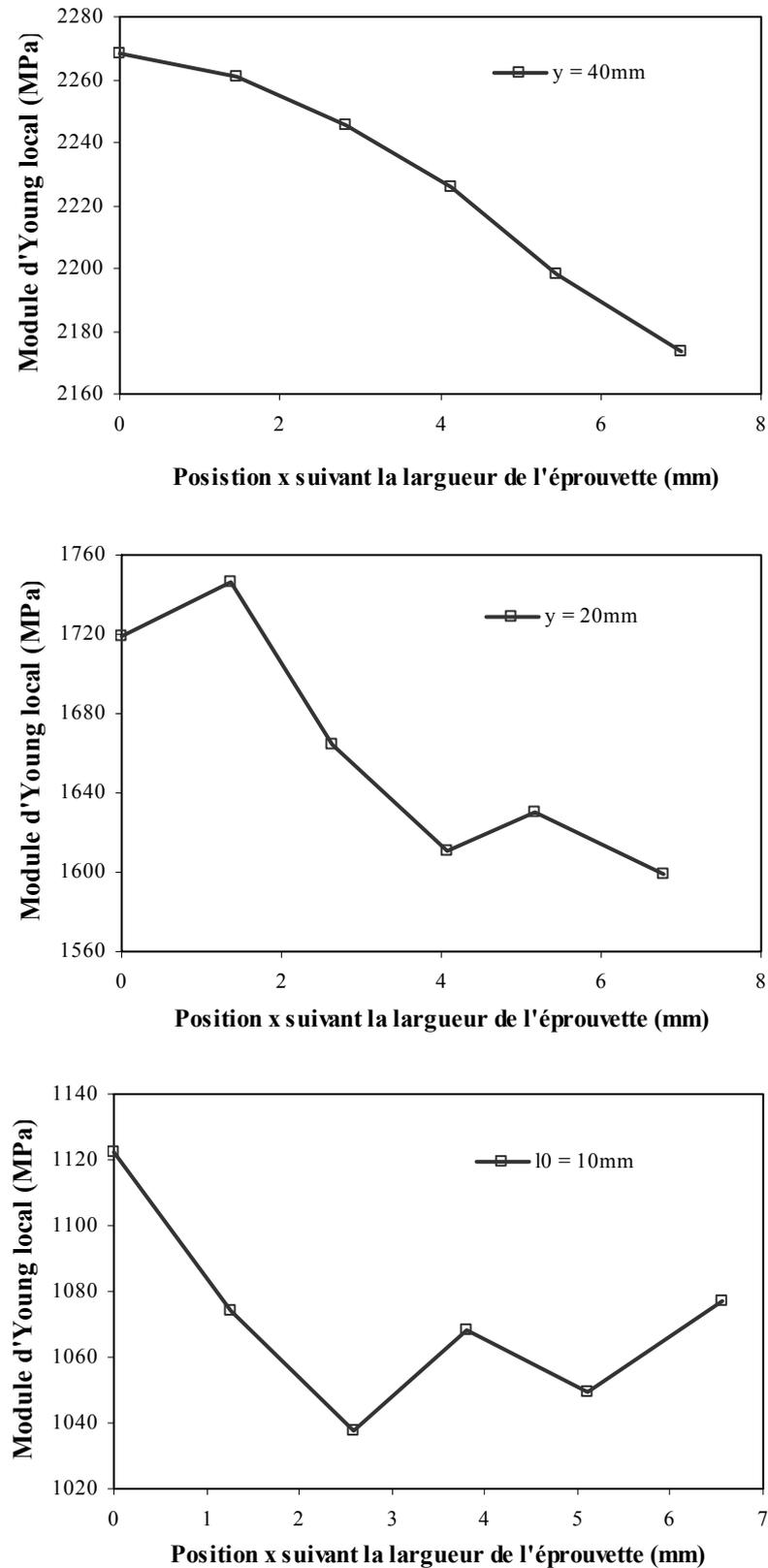


Figure III.59 : Variation du module d'Young local suivant la largeur de l'éprouvette pour différentes positions y (10, 20, 40, 60 et 80mm)

Les résultats présentés dans la Figure III.59 montrent l'hétérogénéité du module d'Young local dans l'ensemble de l'éprouvette. Comme le démontre (Eq III-16), la variation locale du module d'Young est l'inverse de la variation du déplacement local suivant la largeur de l'éprouvette. La Figure III.51 a montrée que les déplacements longitudinaux U_y sont plus importants à droite de l'éprouvette ce qui est la conséquence d'une rigidité plus importante à gauche de l'éprouvette (voir Figure III.60).

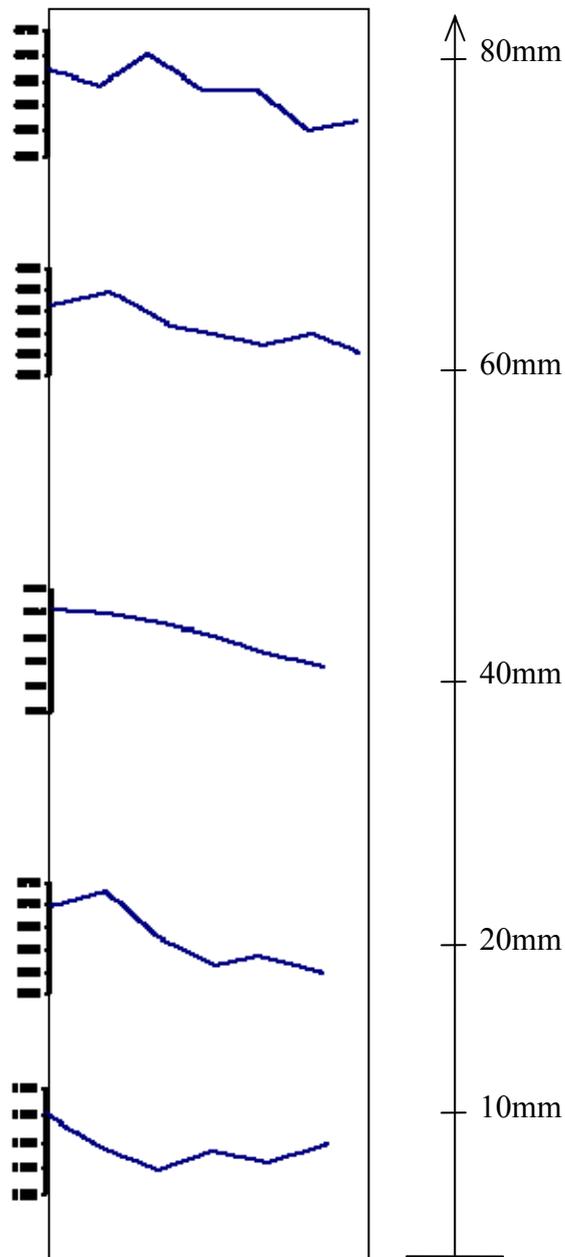


Figure III.60 : Evolution du module d'Young local dans la largeur et la longueur de l'éprouvette

De plus, une variation du module d'Young est constatée dans la longueur de l'éprouvette. Les essais de traction couplés avec la méthode de détection des champs de déplacements par corrélation d'image ont montré pour toutes les éprouvettes testées que le module d'Young est plus important du côté où la rupture se produit. En comparant ses résultats avec les résultats montrant la localisation des déformations longitudinales ε_{yy} , nous avons constaté que la rupture de l'éprouvette se produisait toujours dans une zone où la rigidité était la plus grande.

Le module d'Young local dans le sens de l'éprouvette augmente en fonction du point d'injection (position longitudinale y). Lorsque le module d'Young est déterminé dans une zone proche du point d'injection la variation de celui-ci dans la largeur est plus importante, alors que lorsqu'il est calculé dans une zone éloignée par exemple à l'extrémité opposé du point d'injection, cette croissance est moins importante, comme le montre la Figure III.61 suivante. Les modules d'élasticité caractérisés en traction (partie III, I-2) était de l'ordre de 3300MPa à 3600MPa alors que le module calculé dans la zone de rupture est de l'ordre de 2700 à 3000MPa. Ce qui confirme que le comportement local d'un agro-composite n'est pas le même que le comportement global.

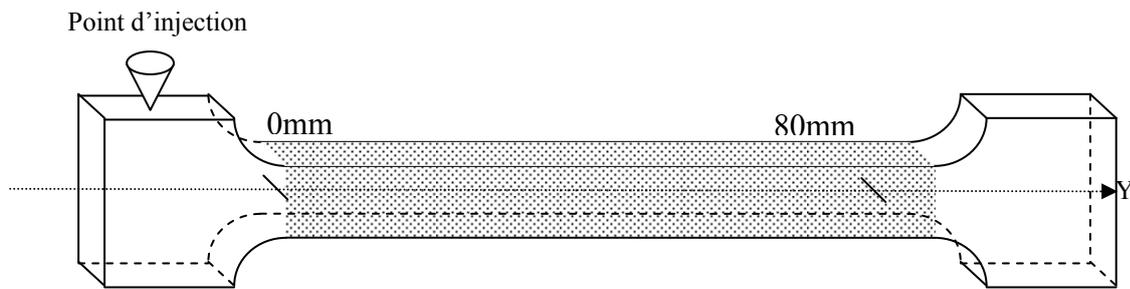
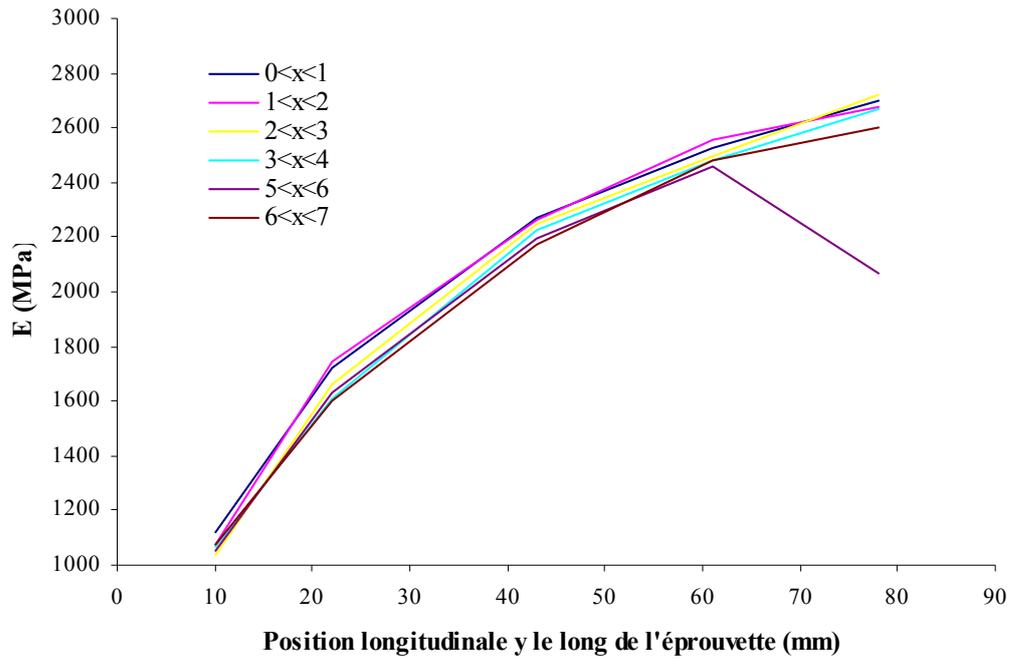


Figure III.61 : Variation du module d'Young local en fonction de la position longitudinale y

Pour valider cette hétérogénéité de la rigidité dans l'ensemble de l'éprouvette, une étude complémentaire a été menée montrant la variation du module d'Young local suivant la longueur de l'éprouvette pour différents instants de temps au cours de l'essai pour lequel le comportement du composite est élastique. Les résultats suivants (Figure III.62) montrent que le module est le même quelque soit le temps d'essai.

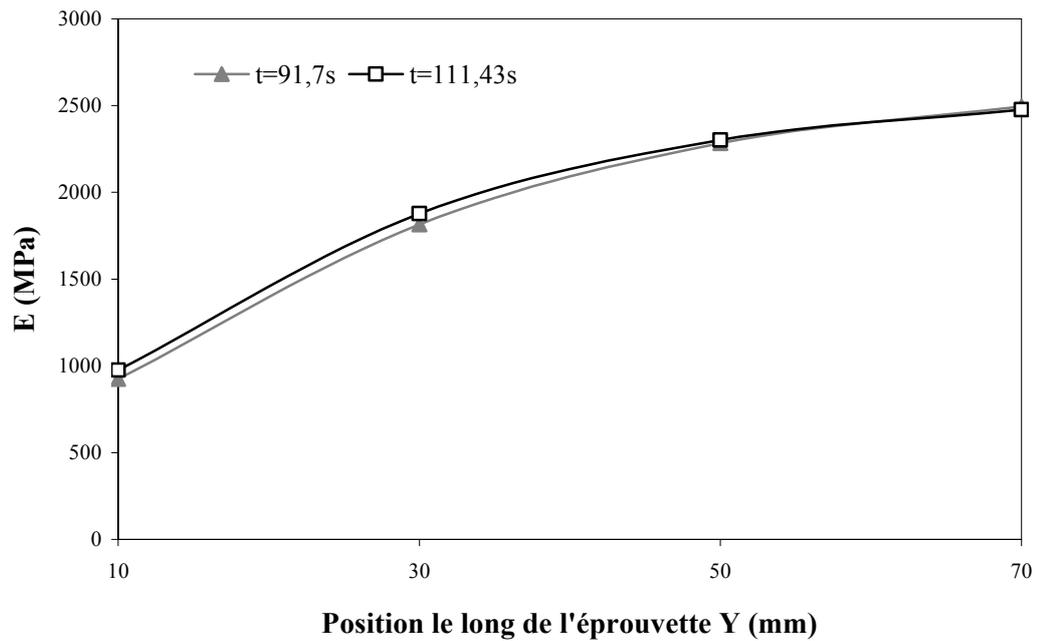


Figure III.62 : Evolution du module d'Young suivant la longueur de l'éprouvette à un temps d'essai de 91,7 et 111,43s (mesure effectuée au milieu de l'éprouvette à $x = 5mm$)

Ainsi à partir de ces résultats, il est possible d'obtenir une cartographie du module d'Young local sur l'ensemble de l'éprouvette pour chaque essai, un exemple est montré ci-après en Figure III.65. Comme expliqué précédemment les propriétés mécaniques élastiques des agro-composites injectés ne sont pas homogènes. Le module d'Young est plus faible dans une zone proche du point d'injection et augmente lorsqu'on s'éloigne de celui-ci. De plus cette hétérogénéité se constate dans la largeur de l'éprouvette même si la variation de la valeur du module d'Young est moins importante que dans la longueur.

Comme il a été expliqué dans la partie I.5, l'endommagement et la rupture des composites testés sont influencés par l'hétérogénéité de la répartition des fibres dans la matrice. En appliquant un modèle d'homogénéisation micro-macro, il est possible de déterminer la quantité locale de fibres à partir de la rigidité locale déterminée précédemment.

IV.4 Modélisation micro macro et variation du pourcentage de fibre

Des modèles d'homogénéisation micro-macro permettent à partir des propriétés mécaniques de chaque constituant de déterminer les propriétés mécaniques du composites. Les modèles de Voigt et de Reuss sont les bornes haute et basse pour lesquels les autres modèles se situent entre ces deux bornes. Ainsi ces deux modèles peuvent être considérés comme des bornes limites présentant certains inconvénients de modélisation mais étant faciles à mettre en œuvre. Pour cette raison, nous avons appliqué le modèle de Voigt à notre problématique pour retrouver le taux de fibres local dans l'éprouvette. Ce modèle de Voigt considère un assemblage de matériaux en parallèle (la matrice et les fibres) (Figure III.63).

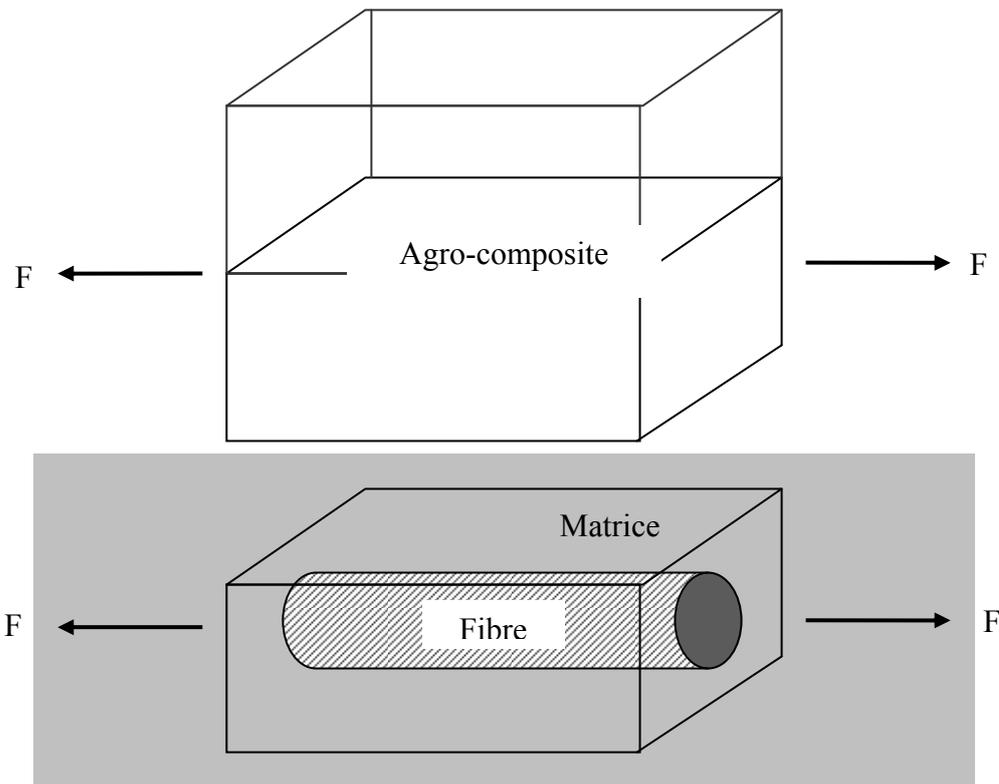


Figure III.63 : Modélisation de Voigt

Cette modélisation micro-macro permet à partir de la valeur du module d'Young local de déterminer le pourcentage massique de renfort connaissant les propriétés de la matrice et du renfort (Eq. III-17).

$$V_f (\%) = \frac{E_c^* - (V_m \cdot E_m)}{E_f} \times 100 \quad (\text{Eq. III-8})$$

L'augmentation du taux de fibre est assez importante entre le point d'injection et l'extrémité opposée. Ce taux passe de 15 à 35% (Figure III.64). L'augmentation du taux de fibre est plus conséquente pour une position longitudinale comprise entre 20 et 50mm comparée à une position plus éloignée du point d'injection de 50-80mm.

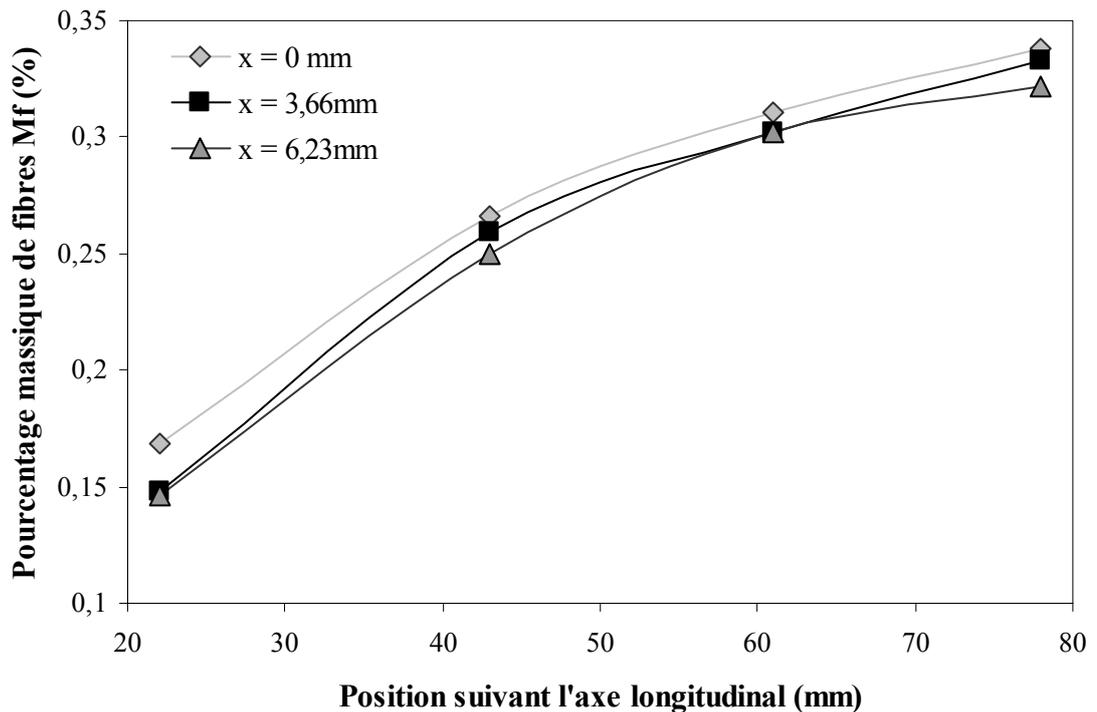


Figure III.64 : Evolution du pourcentage massique de fibres en fonction de la position suivant l'axe longitudinal

La Figure III.65 montre la répartition des fibres et la variation du module d'Young dans l'ensemble de l'éprouvette. Les résultats des essais montrent qu'il existe une hétérogénéité de la rigidité locale du composite causée par un taux de fibres local différent. Eloigné du point d'injection le taux de fibres est plus élevé apportant une rigidité plus grande au niveau de la zone de rupture.

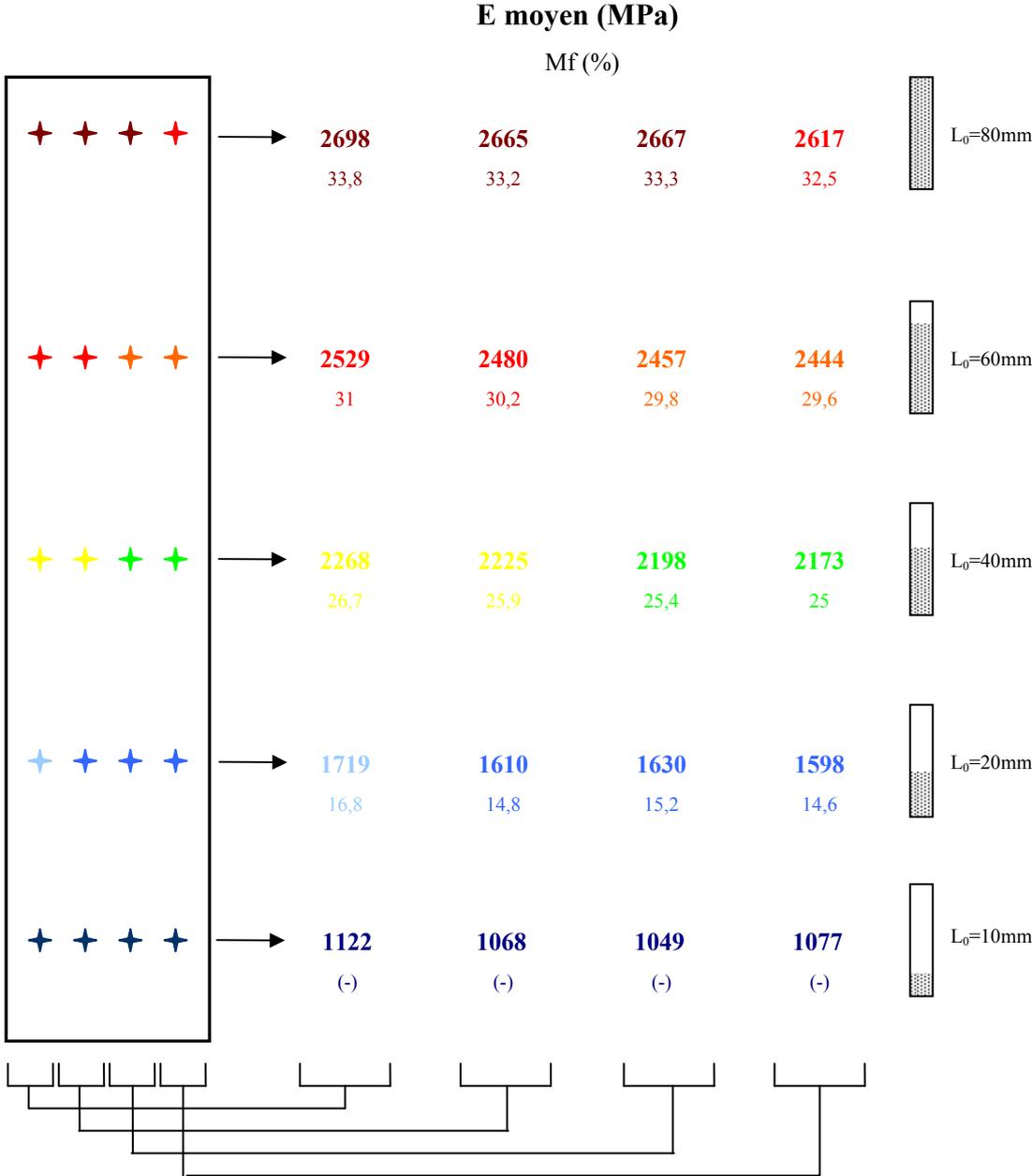


Figure III.65 : Cartographie du module d'Young en tous points de l'éprouvette

IV.5 Détermination du coefficient de Poisson

En utilisant les déplacements locaux U_x et U_y mesurés par la corrélation d'images, il est possible d'obtenir la valeur du coefficient de Poisson avec une bonne précision (Eq. III-18).

$$\nu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{-\varepsilon_{xx_i}}{\varepsilon_{yy_i}} \right) \quad (\text{Eq. III-9})$$

Où n est le nombre de mesures et i la ième mesure

Comme les déplacements U_x et U_y sont obtenus à différents temps au cours de la sollicitation, une valeur moyenne du coefficient a été calculée pour différentes mesures dans la partie élastique du comportement (Tableau III-17). Les valeurs des coefficients de Poisson ont été discutées dans la partie III, I.4.3.

Tableau III-17 : Détermination du coefficient de Poisson à partir des mesures de ε_{xx} et ε_{yy} pour différents instants de temps

Temps n°	ε_{xx}	ε_{yy}	ν
75	-0,1673	0,4596	0,364
76	-0,1774	0,4724	0,376
77	-0,1593	0,4687	0,340
78	-0,1582	0,4695	0,337
79	-0,1763	0,4686	0,376
80	-0,1768	0,4756	0,372
81	-0,1841	0,4748	0,388
82	-0,1917	0,4792	0,400
83	-0,1851	0,4825	0,384
84	-0,1852	0,4910	0,377
85	-0,1993	0,4983	0,400
86	-0,1847	0,4990	0,370
87	-0,1766	0,4985	0,354
88	-0,1759	0,4952	0,355
89	-0,1760	0,5036	0,350
90	-0,1754	0,5001	0,351
91	-0,1854	0,5032	0,368
92	-0,1845	0,5113	0,361
93	-0,1840	0,5126	0,359
94	-0,1845	0,5229	0,353

IV.6 Conclusion

Dans cette troisième partie, dans un premier temps, des agro-composites renforcés par les six types de faisceaux de fibres caractérisés dans la partie II ont été étudiés en traction et en flexion. Les résultats ont montré que les différences de propriétés mécaniques constatées pour les fibres ne se répercutaient sur les composites, démontrant l'importance du processus de mise en forme. En effet les agro-composites présentaient tous des propriétés semblables. Dans un deuxième temps des études complémentaires ont montré l'impact du comportement visco-élastoplastique du polypropylène sur le composite renforcé par des fibres de chanvre. Les résultats ont mis en évidence l'effet de la vitesse de sollicitation et la sensibilité des agro-composites aux petites vitesses puisque les propriétés mesurées étaient les plus faibles alors que pour des vitesses plus élevées, une augmentation significative a été remarquée. En comparant deux processus d'injection, l'importance de l'agent de couplage pour la cohésion de la matrice et de la fibre a été constatée. Les composites injectés sans agent de couplage avaient des propriétés qui tendaient à être celles du polypropylène seul. Pour finir une dernière étude couplant des essais de caractérisation en traction et en flexion avec une technique de corrélation d'images permettant l'étude du comportement local ont démontré l'hétérogénéité du module d'Young qui est la conséquence d'une répartition non-homogène des fibres dans l'ensemble de l'éprouvette. Cette hétérogénéité avait pour principale conséquence de fragiliser le composite localement favorisant son endommagement et sa rupture.

**CHAPITRE IV : Modélisation du
comportement mécanique des fibres
de chanvre**

CHAPITRE IV : MODELISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES FIBRES DE CHANVRE	257
<i>Partie I . Acquisition des données géométriques de la fibre et reconstruction 3D de la géométrie</i>	260
I.1 Calcul de la section moyenne d'une fibre	260
I.1.1 Principe	260
I.1.2 Méthode.....	263
I.1.3 Programme	265
I.1.4 Application à différentes fibres de chanvre	265
I.2 Détection du contour de la fibre.....	268
I.3 Reconstruction 3D de la géométrie de la fibre.....	270
<i>Partie II . Modélisation du comportement mécanique des fibres unitaires</i>	272
II.1 Modèle de comportement des fibres unitaires	272
II.1.1 Partie I : Modèle de mise en tension statistique des constituants de la fibre unitaire.....	273
II.1.2 Partie 2 : Première partie linéaire (rigidité E_2).....	287
II.1.3 Partie 3 : Deuxième partie linéaire (rigidité E_3).....	288
II.1.4 Modèle général de comportement	289
II.2 Propagation des incertitudes de mesures dans le modèle de comportement	291
II.2.1 Cas du modèle élastique à une partie linéaire.....	294
II.2.2 Cas du modèle de comportement à deux parties linéaires	296
II.2.3 Application du modèle avec prise en compte des incertitudes.....	297
II.3 Conclusion.....	298

Le deuxième chapitre de ce mémoire était dédiée au comportement mécanique de la fibre unitaire, ensuite dans un troisième chapitre le composite a été étudié et pour finir dans ce quatrième chapitre seront expliqués et démontrés les méthodes et les outils développés pour effectuer les études pour lesquelles les résultats ont été présentés auparavant. Dans un premier temps, la modélisation de la géométrie d'une fibre unitaire incluant l'acquisition des données géométriques et la reconstruction 3D seront détaillées. Dans une deuxième partie un modèle de comportement des fibres unitaires sera présenté tenant compte de la probabilité de mise en tension d'une ou de plusieurs micro-fibrilles constituant la fibre. Une étude sur la propagation des incertitudes des données d'entrées du modèle sera réalisée.

Une méthode optique a été mise en place pour déterminer la géométrie de la fibre (partie II, I.2). Elle fait appel à un programme informatique qui traite les images prises de la fibre. De ce traitement numérique, l'information de la géométrie peut être obtenue. Dans cette sous-partie, l'algorithme et le programme du traitement d'image seront présentés.

Partie I . Acquisition des données géométriques de la fibre et reconstruction 3D de la géométrie

Le programme permettant de traiter les images prises de la fibre (partie II, I.2) se divise en deux parties. La première consiste à déterminer la valeur de la section de la fibre sous différentes considérations géométriques. La deuxième consiste à détecter le contour de la fibre et ainsi obtenir les coordonnées des points constituant le profil pour une reconstruction CAO en 3D de la fibre.

I.1 Calcul de la section moyenne d'une fibre

Dans ce paragraphe sera présentée la méthode générale permettant la détermination de la section sous certaines hypothèses de modélisation géométrique (section circulaire moyenne) correspondant à l'hypothèse de modélisation 1 dans la partie II, IV.1. Les autres modélisations géométriques ont été réalisées suivant la même méthode, seule la formulation du calcul de la valeur de la section change.

I.1.1 Principe

Pour rappel, par leur aspect naturel, la variation du diamètre le long d'une fibre de chanvre peut être importante, comme le montre la Figure IV.1 ; pouvant induire des erreurs non négligeables lors de la détermination de ses caractéristiques mécaniques. Ainsi pour estimer le diamètre moyen le long de la fibre, il est nécessaire de réaliser plusieurs mesures ponctuelles comme par exemple à 0, 25, 50, 75 et 100% de la longueur [MUN07], [MWA06] et [SCH06-2]. En fonction de la géométrie de la fibre et de la valeur de la section considérée, les propriétés mécaniques de la fibre (contrainte à rupture, limite élastique et module d'Young) seront différentes. Ainsi il est important de considérer une géométrie de fibre la plus proche de la réalité.

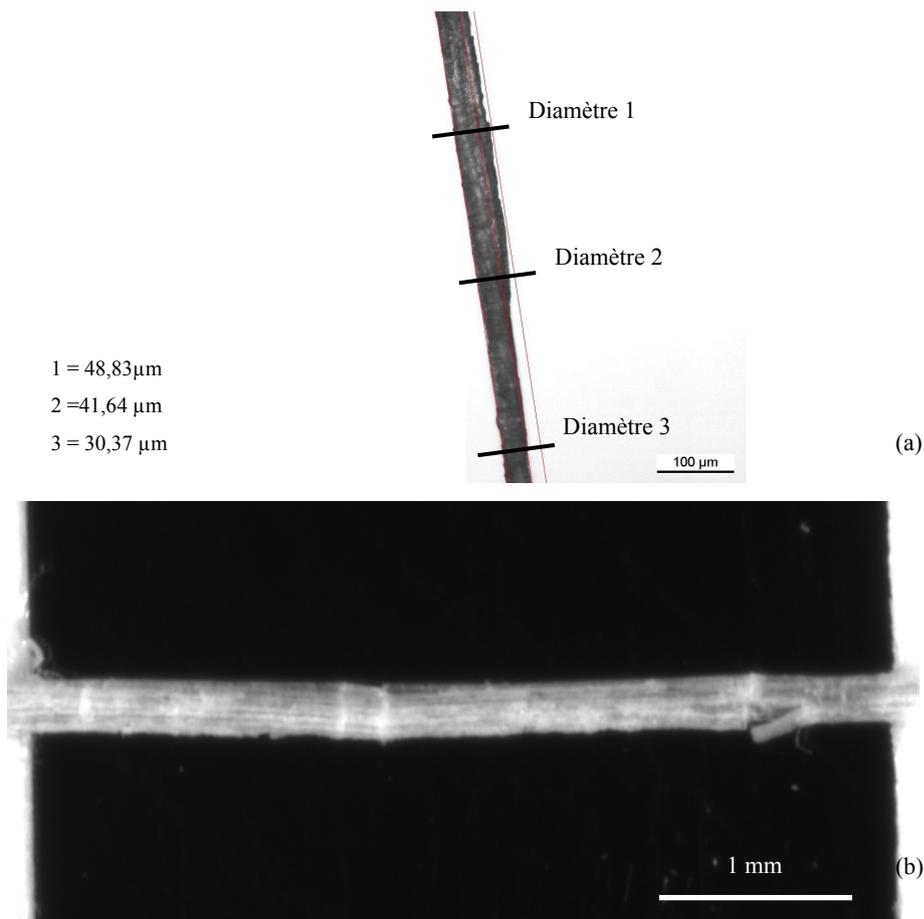


Figure IV.1 : Microscopie d'une fibre de chanvre : fibre unitaire (a) et faisceau (b)

A partir de plusieurs mesures de section i , il est possible d'exprimer le diamètre moyenné D_i de la fibre pour une orientation donnée en fonction du diamètre local d_i .

$$D_i = \frac{1}{n} \sum_1^{i=n} d_i \quad (\text{Eq. IV-1})$$

Dans la plupart des études traitant des fibres végétales [MAD07], [ROU12], [SCH06-2], la cellule fibreuse est considérée comme circulaire parfaite, alors qu'en réalité ce n'est pas le cas (voir Figure IV.2). Pour estimer au mieux la section réelle de la fibre avec cette hypothèse il faut mesurer plusieurs diamètres pour une même position le long de la fibre. Comme par exemple effectuer cinq mesures en orientant la fibre de 36° à chaque mesure. Choisir cinq orientations est un bon compromis pour permettre une description réelle de la fibre sans avoir trop de mesures à réaliser. La

section moyenne ainsi obtenue est définie comme suit (cas de la modélisation 1 hypothèse de section circulaire):

$$S = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\sum_{i=1}^{i=5} D_i}{5} \right)^2 \quad (\text{Eq. IV-2})$$

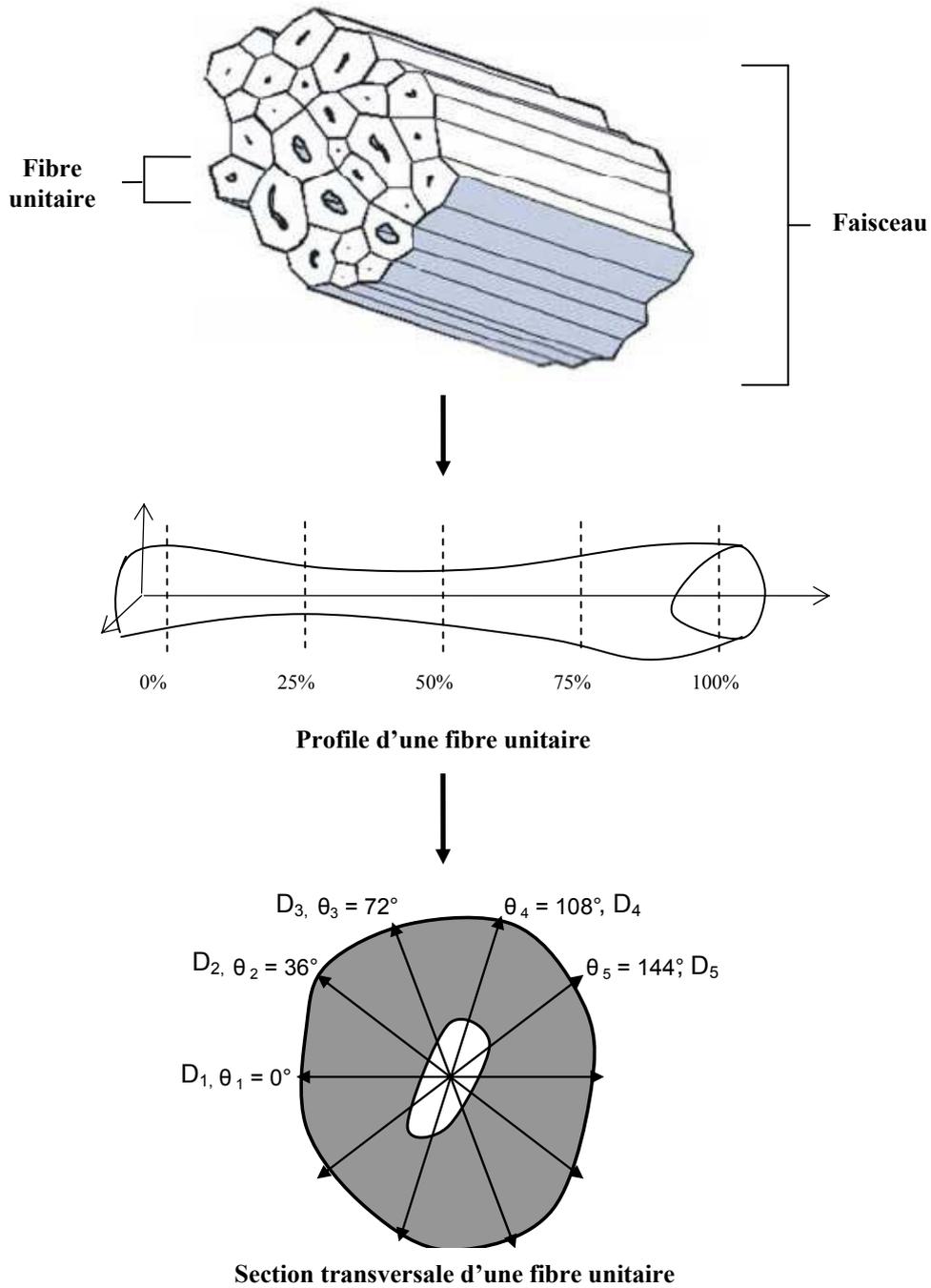


Figure IV.2 : Coupe transversale d'un faisceau de fibres et d'une fibre unitaire

Pour optimiser la précision de la mesure de D_i , l'idéal serait de faire n mesures le long de la fibre avec n très grand. D'un point de vue expérimental cela est impossible, mais mathématiquement cela revient à calculer l'aire de notre section en intégrant le profil de la fibre suivant sa longueur.

1.1.2 Méthode

L'une des méthodes pour déterminer la valeur de la section réelle est de la calculer à partir de plusieurs photos numériques en réalisant un traitement d'image. Le principe est de calculer le nombre de pixels définissant la fibre et de multiplier ce nombre par la taille d'un pixel en mètre. Pour rappel, la méthode (décrite dans la partie II, I.2) pour obtenir la valeur de la section de la fibre est la suivante :

1. Obtention de n photos

2. Calcul de la taille d'un pixel

Les données d'entrée de programme de traitement d'image sont :

- la résolution de l'image ($L \times l$) en pixel, avec L la longueur et l la largeur
- la longueur de référence de l'échantillon l_e .

A partir de ces données (Figure IV.3), il est possible de calculer la longueur d'un pixel l_p (Eq IV-3) et l'aire d'un pixel A_p en mètre (Eq IV-4).

$$l_p = l_e / L \quad (\text{Eq. IV-3})$$

$$A_p = l_p^2 \quad (\text{Eq. IV-4})$$

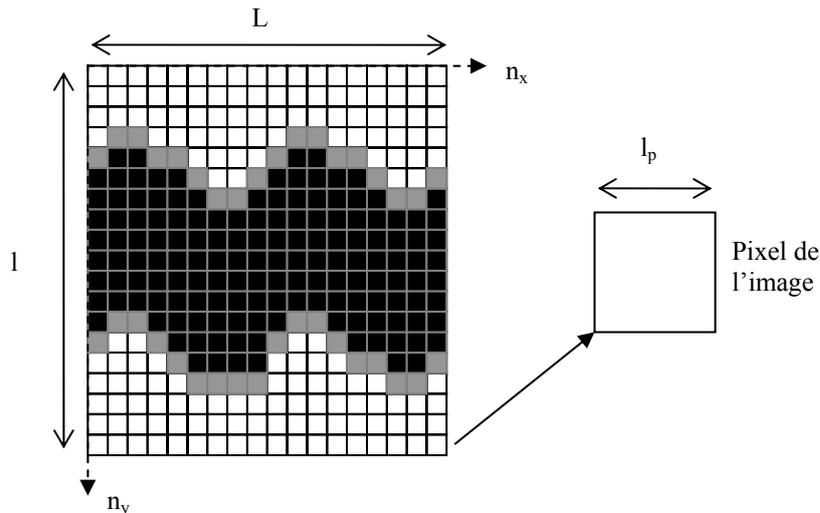


Figure IV.3 : Schéma d'une image numérique d'une fibre

3. Calcul des pixels contenus dans la fibre

Les données d'entrée de cette troisième étape sont les niveaux de gris de chaque pixel sous forme de matrice. Cette étape consiste à calculer le nombre de pixels avec un niveau de gris inférieur à un seuil de gris défini par l'opérateur. Ce seuil détermine quels pixels sont considérés comme appartenant ou non à la fibre. La donnée de sortie obtenue est le nombre de pixels contenus dans la fibre ($n_{\text{pixel_fibre}}$) en dessous du seuil S_g .

4. Calcul de la section pour un angle donné

A partir de l'aire d'un pixel A_p , du nombre de pixels $n_{\text{pixel_fibre}}$ en dessous du seuil de gris et de la longueur de référence de l'échantillon l_e déterminés précédemment, il est possible de calculer le diamètre moyen de la fibre pour un angle donné D_i . Le diamètre moyen de la fibre pour un angle donné D_i est calculé par :

$$D_i = (n_{\text{pixel_fibre}} \times A_p) / l_e \quad (\text{Eq. IV-5})$$

5. Calcul de la section moyenne totale de la fibre

A partir des diamètres moyens de la fibre déterminés pour chaque angle D_i et considérant certaines hypothèses géométriques de la section de la fibre (circulaire, polygonale, section moyenne ou déterminée localement dans la zone de rupture), il est possible de calculer la valeur numérique de la section. Par exemple pour une hypothèse de section circulaire, la section moyenne de la fibre S est déterminée en utilisant l'équation Eq. IV-2.

1.1.3 Programme

Un programme permettant de détecter la fibre et de déterminer la valeur de la section transversale suivant la méthode précédemment a été développé. Il a ensuite été codé en langage C utilisant des bibliothèques d'OpenCV. Ces bibliothèques sont en accès libre et ne demandent pas de licence pour leur utilisation. Elles regroupent de nombreuses fonctions utiles pour manipuler des images et photographies. L'algorithme est montré en annexe I.

1.1.4 Application à différentes fibres de chanvre

Des applications ont été effectuées sur plusieurs échantillons de fibres (échantillon 1, 2 et 3). Différents diamètres ont été mesurés le long de la fibre à l'aide d'un microscope optique par la méthode de mesures ponctuelles Tableau IV-1. Ces mesures montrent que l'échantillon 2 a le diamètre le plus petit ($56\mu\text{m}$), alors que l'échantillon 3 a le diamètre le plus grand de $331\mu\text{m}$. L'échantillon 2 présente un diamètre moyen de $96\mu\text{m}$. L'échantillon 2 est une fibre unitaire alors que les échantillons 1 et 3 sont des faisceaux de fibres.

Tableau IV-1 : Diamètres mesurés à partir des images optiques

Diamètre (μm)	Echantillon 1	Echantillon e2	Echantillon e3
Mesure 1	334,41	52,58	65,87
Mesure 2	328,14	82,45	108,98
Mesure 3	341,65	38,82	60,99
Mesure 4	319,45	74,25	102,84
Mesure 5		47,9	117,2
Mesure 6		63,47	168,63
Mesure 7		32,34	52,69
Mesure 8		59,88	93,41
Moyenne	330,91	56,461	96,326
Min	319,45	32,34	52,69
Max	341,65	82,45	168,63

Les différentes données mesurées par les deux méthodes (mesures ponctuelles et mesures calculées numériquement) sont présentées dans le tableau suivant (Tableau IV-2). D'un point de vue expérimental, il n'est difficile d'estimer quelle méthode donne les résultats les plus précis. Mais d'un point de vue théorique, il est facile d'affirmer que les mesures obtenues par traitement numériques sont plus précises. Les mesures obtenues par microscope optique permettent seulement d'estimer le profil de la fibre en un nombre de localisations limitées. Ainsi pour obtenir l'ensemble du profil, il est nécessaire de réaliser une infinité de mesure. Les données obtenues par traitement d'une image donnent directement le profil de la fibre. La seule erreur de mesure (par rapport au diamètre réel de la fibre) provient de la qualité de l'image ainsi que de la définition de la valeur du seuil de gris qui est choisie.

En comparant les valeurs des diamètres mesurés et calculés par le traitement d'image, l'écart tend vers 0 pour des fibres avec des tailles relativement grandes dans le cas de l'échantillon e1 avec une erreur de 0,6%. Pour des fibres unitaires et faisceau de petite taille (échantillons e2 et e3), l'erreur de mesures varie de quelques pourcents à 9%. Cela s'explique par le fait que plus la taille est grande, plus l'erreur commise sur la détection des pixels contenus dans la fibre sera négligeable. A l'inverse plus la taille est petite, plus le nombre de pixels contenus dans la fibre est relativement faible, ainsi l'erreur sur la détection du nombre de pixels aura une influence plus grande.

Tableau IV-2 : Valeurs du diamètre et de la section de la fibre obtenues par deux méthodes de mesures différentes

	Aperçus avant / après traitement de l'image	Données Mesurées (méthode ponctuelle)		Données Calculées (traitement d'image)		Temps de mesure pour 1 échantillon = 30 min
		Ø(µm)	Section (µm ²)	Ø(µm)	Section (µm ²)	
e1		330.9	86004	328.8	84904	Temps de mesure pour 1 échantillon = 10 min
e2		56.5	2503.7	58.5	2688.6	
e3		96.3	7287.5	105.7	8780.7	

*Sg : Seuil de gris

**Lref : longueur de référence

I.2 Détection du contour de la fibre

Après avoir déterminé la valeur de la section et supprimé les pixels qui ne font parti de la fibre. Il est intéressant de détecter le profil (contour) pour pouvoir réaliser une modélisation de la fibre qui se rapproche le plus de la géométrie réelle. Pour la détection du contour d'un objet dans une image numérique, différentes méthodes existent comme par exemple le filtre de Prewitt, de Sobel ou encore celui de Canny. Dans notre cas une méthode plus simple peut être envisagée au vue du type d'image qui est prise. La photo que nous prenons est toujours du même type. Ainsi l'obtention du contour revient à déterminer le profil supérieur et inférieur (sachant que les extrémités gauche et droite de la fibre sont les bords de la photo.

Pour obtenir les points décrivant le contour supérieur et inférieur, il faut détecter les pixels de la fibre ayant un positionnement vertical qui soit maximum et minimum. En multipliant les coordonnées en pixel du contour par la taille d'un pixel en mètre, on obtient les coordonnées des points du profil dans un repère métrique. Le programme décrit ci-après est le programme de la partie II, I.2, intégrant la détection de contour avec une partie dédiée au traitement des données. Ce programme est toujours développé en langage C utilisant les bibliothèques OpenCV.

Suite à l'exécution de celui-ci, différents fichiers de résultats au format texte (.txt) et asci (.asc) sont créés.

Les fichiers textes sont une sauvegarde des données obtenues grâce à ce programme.

parametre_fibre.txt : ce fichier regroupe les trois informations suivantes, la longueur de référence de la fibre, le diamètre total moyen et la surface totale moyenne.

parametre_ei_i.txt : ce fichier regroupe toutes les informations concernant la fibre pour chaque orientation et les coordonnées dans le plan de l'image (x;y) des points du profil (x1, xmin1, xmax2, x2, xmin2, xmax2).

Les fichiers asci (.asc) ont pour but d'être utilisés sous Catia et de permettre l'importation des coordonnées des points des différents profils détectés.

parametre_ei_i_points.asc : ce fichier regroupe les coordonnées x, y et z des points des 10 profils de la fibre (2 profils \times 5 images), dans l'ordre suivant profil 1 minimum, profil 1 maximum, puis profil 2 minimum et ainsi de suite.

parametre_ei_i_sectionpoints.asc : ce fichier regroupe les coordonnées x, y et z des 10 points définissant la section de la fibre.

Comme précédemment un programme a été développé et codé en langage C utilisant les bibliothèques en open source d'OpenCV pour le traitement d'image. Le code est montré en annexe II.

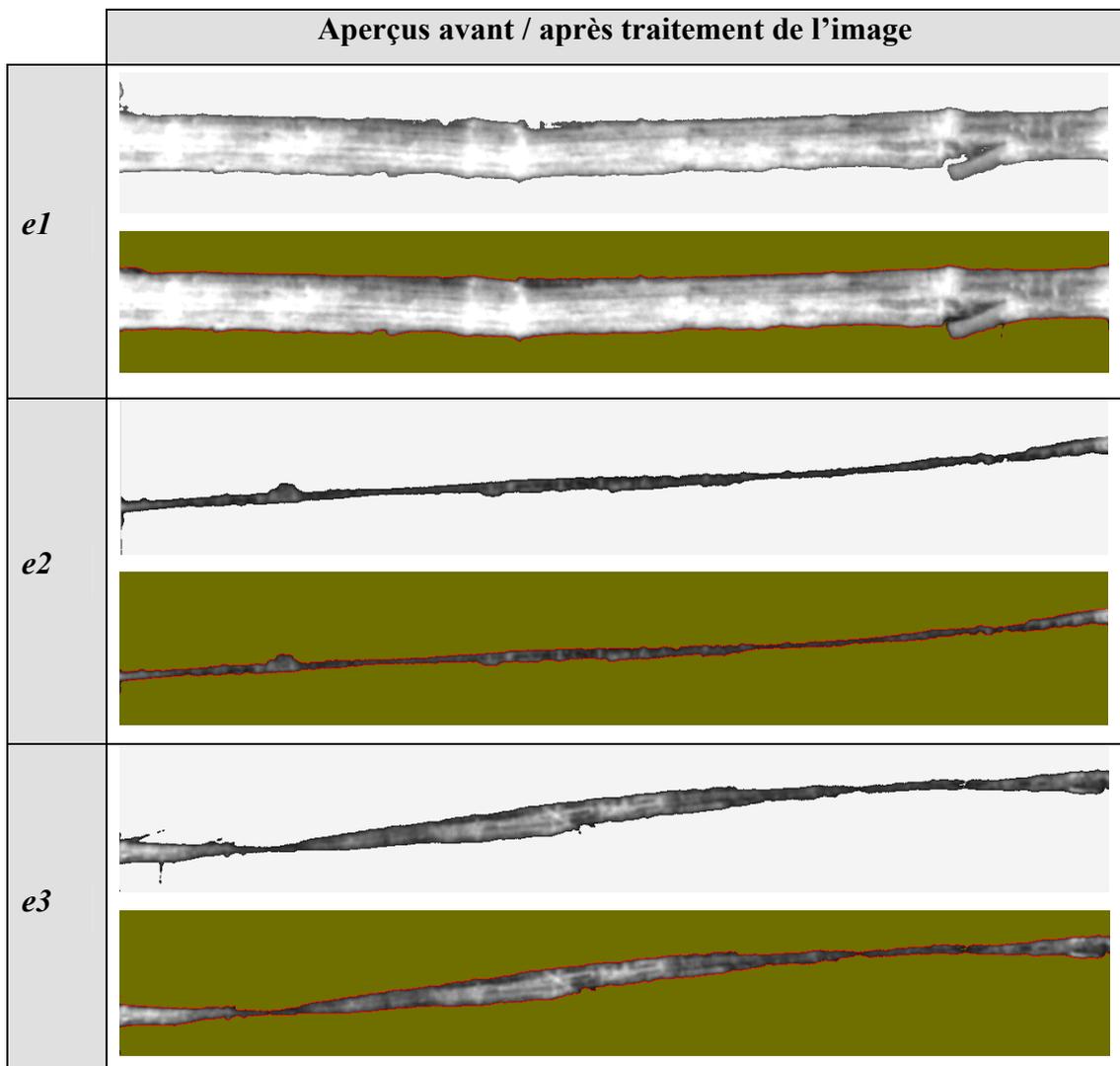


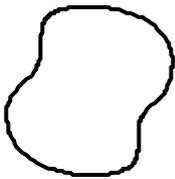
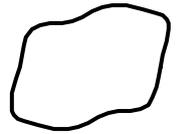
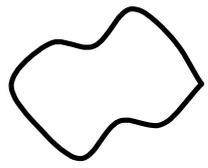
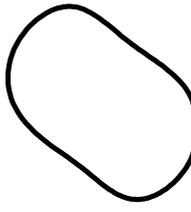
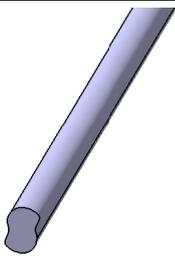
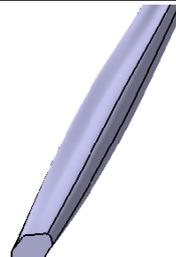
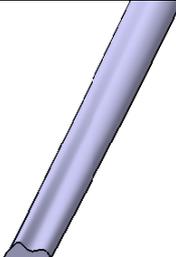
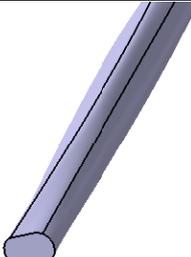
Figure IV.4 : Exemples de résultats du traitement d'image pour trois cas

Ci-dessus sont présentés trois exemples de résultats pour la détection du contour et le traitement d'image réalisé avec une longueur de référence de 6mm et un seuil de gris de 25. Le profil de la fibre est indiqué en rouge.

I.3 Reconstruction 3D de la géométrie de la fibre

Une modélisation 3D de la fibre est construite à partir des données géométriques déterminées par le traitement d'images numériques en utilisant Catia V5. Les informations recueillies permettent de modéliser la section transversale d'une fibre (Figure IV.6). Une modélisation plus ou moins affinée de la section peut être faite. Les mesures géométriques permettent de représenter une multitude de sections le long de la fibre. En réalisant une reconstruction volumique entre deux sections il est alors possible d'obtenir un modèle 3D partiel et intégral de la fibre (Figure IV.5). En appliquant cela à plusieurs sections, il est alors possible de construire la géométrie entière de la fibre. Un exemple de plusieurs reconstructions 3D est montré dans le Tableau IV-3. Ces géométries 3D sont ensuite utilisées pour les simulations numériques et les calculs d'optimisation en vue de caractériser la fibre tenant compte de sa réelle géométrie (partie II, IV-1).

Tableau IV-3 : Exemples de géométrie de fibre modélisée

	Fibre 1	Fibre 2	Fibre 3	Fibre 4
Profils des sections à 0.02mm				
Modèle 3D				

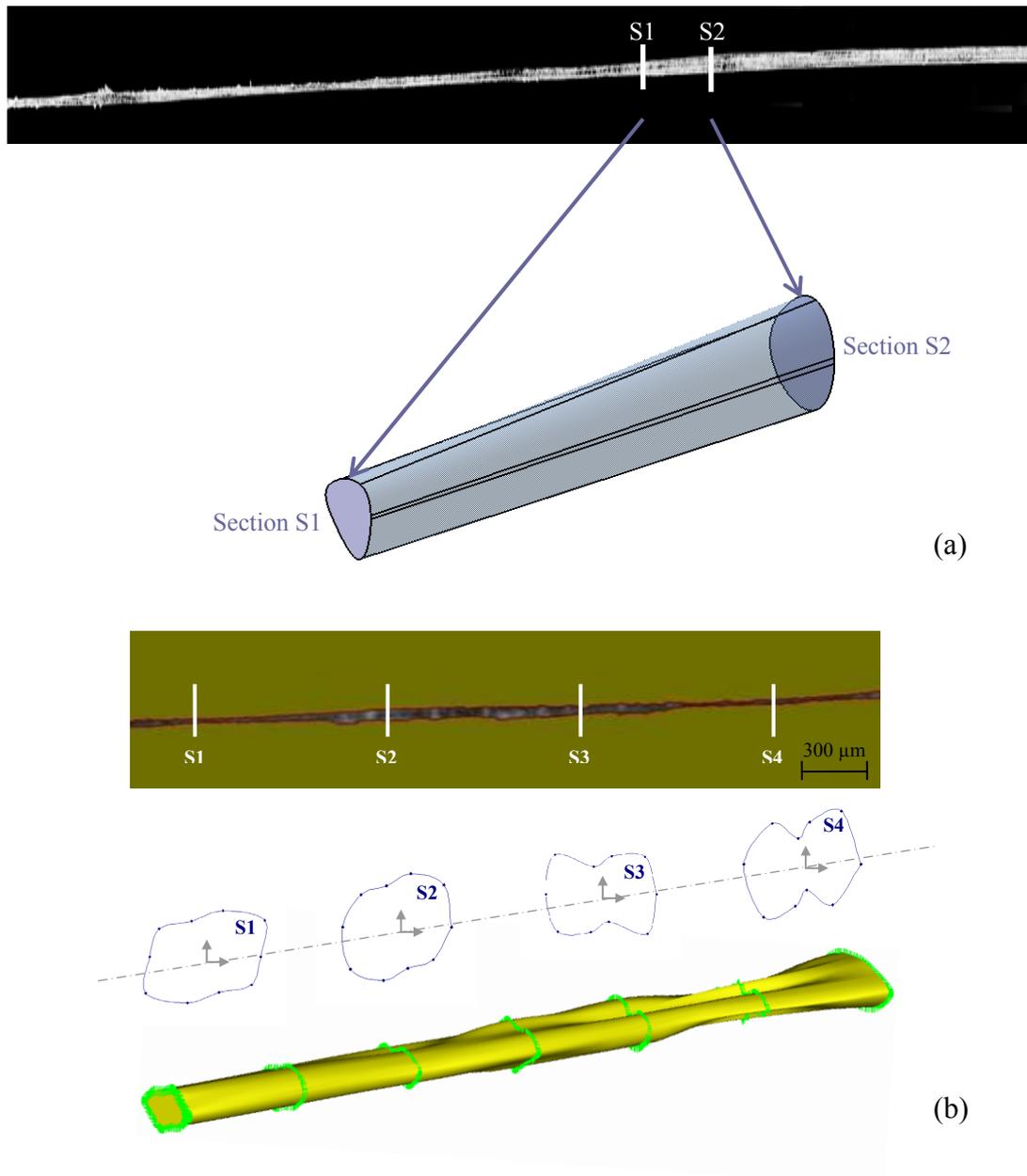


Figure IV.5 : Reconstruction 3D de la fibre, (a) : reconstruction partielle à partir de deux sections et (b) : reconstruction multi-sections

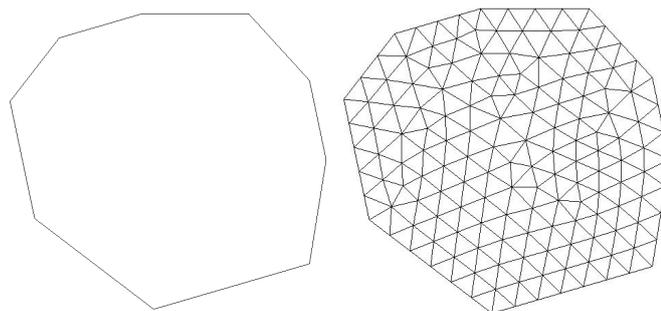


Figure IV.6 : Section transversale d'une fibre unitaire

Partie II . Modélisation du comportement mécanique des fibres unitaires

II.1 Modèle de comportement des fibres unitaires

Les fibres de chanvre sont partiellement constituées de micro-fibrilles, généralement celles-ci ne sont pas sollicitées de la même manière et leur mise en tension est progressive.

La caractérisation mécanique d'une fibre unitaire (partie II, II.1) a mis en évidence que le comportement se divise en trois parties pour lesquelles, la rigidité de la fibre change. Dans cette section sera présenté un modèle décrivant chacune l'évolution de la contrainte dans la fibre en fonction de la déformation causée par la variation de rigidité de la fibre (Figure IV.7).

- Partie I : Le comportement est non-linéaire dû à un alignement et un redressement des constituants de la fibre. La modélisation de la partie I tient compte de la mise en tension statistique d'un ou plusieurs constituants. Lorsque tous les constituants sont mis en tension $E_1(\epsilon)=E_0$.
- Partie II : Après avoir atteint une contrainte seuil σ_1 , le module d'élasticité chute avec $E_2 \leq E_0$.
- Partie III : Après avoir atteint un certaine contrainte σ_2 , la fibre atteint sa rigidité maximum $E_0 \leq E_3$. Le module d'élasticité E_3 caractérise la rigidité de la fibre

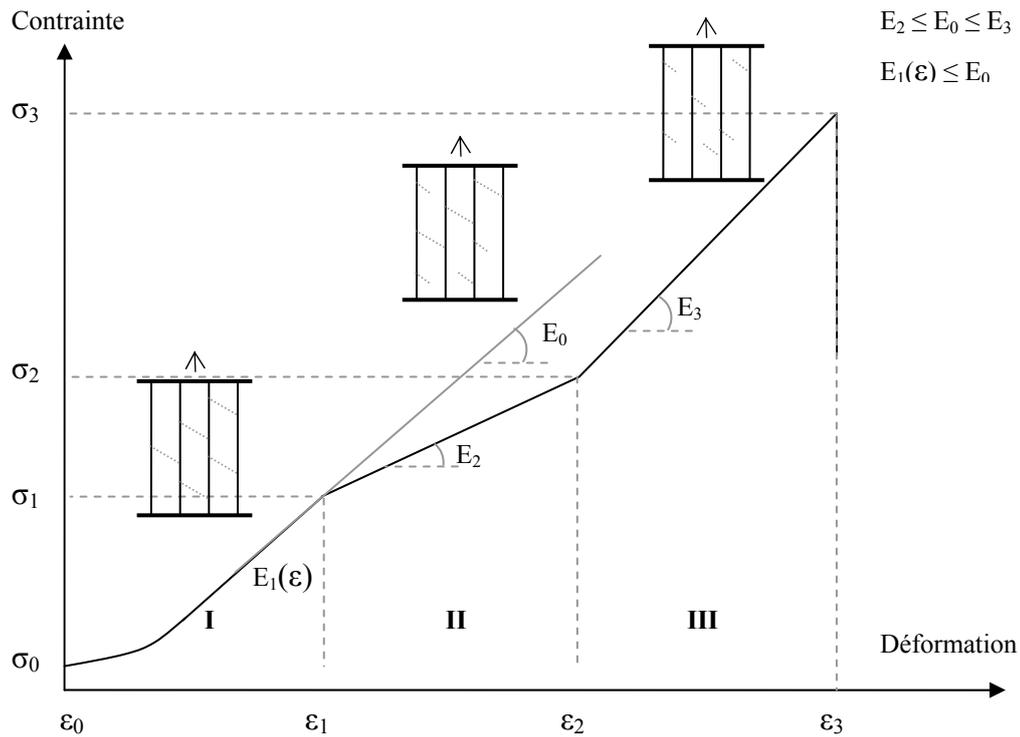
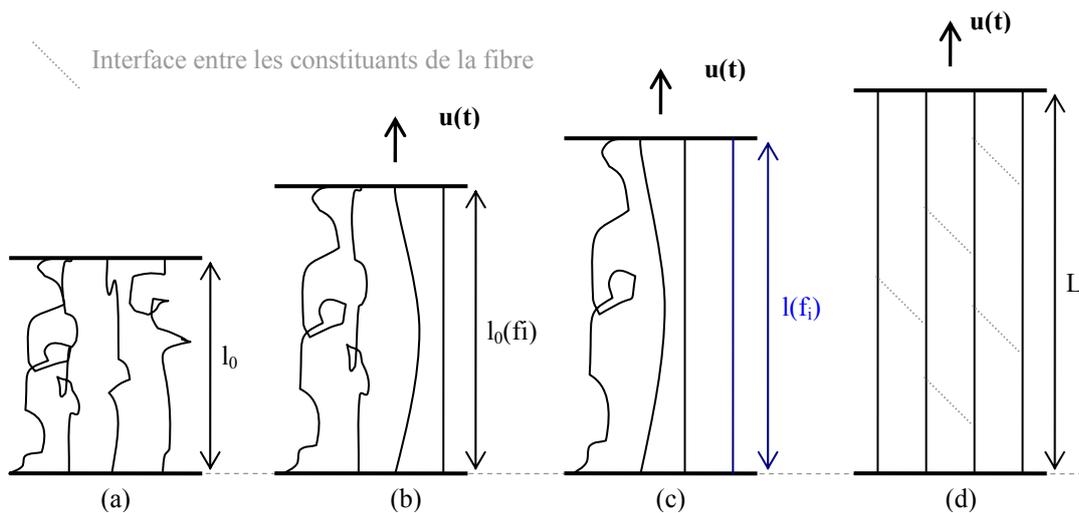


Figure IV.7 : Modélisation théorique du comportement d'une fibre unitaire

II.1.1 Partie I : Modèle de mise en tension statistique des constituants de la fibre unitaire

La partie I décrit la mise en tension progressive de la fibre. Avant la mise en tension, aucun constituant n'est tendu (a). Après avoir appliqué un déplacement une partie des constituants se tendent (b). En continuant d'appliquer un déplacement un nombre plus important de constituants se mettent en tension (c). Ce nombre ne cesse de croître jusqu'au moment où la fibre est entièrement tendue (d). Cette progression décrit la probabilité qu'un nombre de constituants donnés soit tendu à un instant t . Cette progression peut être soit proportionnelle ou non, la modélisation suivant permettra de le déterminer (Figure IV.8).



l_0 : longueur initiale de la fibre

$l_0(f_i)$: longueur initiale d'un constituant i

$l(t)$: longueur de la fibre au cours de la mise sous tension

$l(f_i)$: longueur d'un constituant i au cours de la mise en tension

L : longueur final correspondant à la mise en tension de tous les constituants

Figure IV.8 : Principe de mise en tension des constituants de la fibre unitaire

II.1.1.1 Principe de mise en tension

Un constituant est tendu lorsque la longueur initiale du constituant $l_0(f_i)$ est équivalente ou inférieure à la longueur de la fibre au cours de la mise sous tension, soit :

$$l_0(f_i) \leq l(t) \quad (\text{Eq. IV-6})$$

A l'état initial (phase a), aucune sollicitation n'est appliquée sur la fibre. Ensuite, les constituants sont mis sous tension (phase a et b). Au cours de la mise sous tension, une partie des constituants (n') est tendue et le reste (m) n'est pas encore sollicité, soit :

$$l_0(f_{n'}) < l(t) < l_0(f_m) \quad (\text{Eq. IV-7})$$

avec $l_0(f_{n'}) \leq l_0(f_m)$ (Eq. IV-8)

et $n' + m = n$ (Eq. IV-9)

où n est le nombre total de constituant composant la fibre

A la fin de la mise sous tension (phase d), tous les constituants sont tendus, soit :

$$l(f_i) = l(t) = L \quad (\text{Eq. IV-10})$$

En résumé :

Phase a :	$n' = 0$	$m = n$	$l_0(f_i) \leq l(t)$
Phase b et c :	$\frac{\partial n'}{\partial t} > 0$	$\frac{\partial m}{\partial t} < 0$	$l_0(f_{n'}) < l(t) < l_0(f_m)$
Phase d :	$n' = n$	$m = 0$	$l(f_i) = l(t) = L$

II.1.1.2 Fonction probabiliste de mise en tension de la fibre

La mise en tension de la fibre dépend de la tension progressive des constituants. Ne connaissant pas le nombre de constituants tendus au cours de la mise en tension, il est nécessaire de l'évaluer en utilisant une loi de probabilité. Le nombre de fibres ayant une longueur initiale $l_0(f_i)$ est décrite par la fonction de distribution de probabilité $d(l_0(f_i))$ montrée en Figure IV.9.

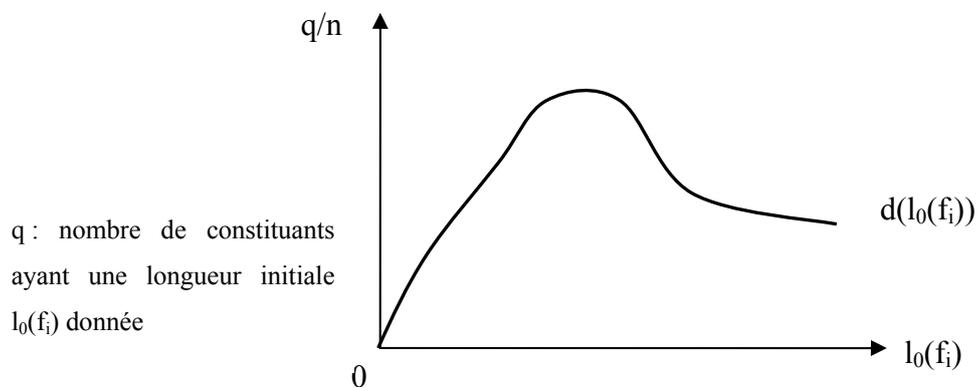


Figure IV.9 : Fonction de distribution de probabilité $d(l_0(f_i))$

La probabilité d'avoir un constituant d'une longueur initiale $l_0(f_i)$ comprise entre l_1 et l_2 dans la fibre est :

$$P = \int_{l_1}^{l_2} d(l_0(f_i)).dl \quad (\text{Eq. IV-11})$$

La condition pour qu'un constituant de longueur initiale $l_0(f_i)$ soit tendu est : $l_0(f_i) \leq l(t)$. Ainsi la probabilité $t(l_0(f_i), l(t))$ d'avoir un constituant de longueur initiale $l_0(f_i)$ qui est sous tension ($0 < l_0(f_i) \leq l(t)$) est :

$$t(l_0(f_i), l(t)) = \int_0^{l(t)} d(l_0(f_i)).dl \quad (\text{Eq. IV-12})$$

Soit la probabilité d'avoir tous les constituants de même longueur initiale sous tension est :

$$T(l_0(f_i), l(t)) = \prod_{i=1}^{n'} \left(\int_0^{l(t)} d(l_0(f_i)).dl \right) = \left(\int_0^{l(t)} d(l_0(f_i)).dl \right)^{n'} \quad (\text{Eq. IV-13})$$

Par définition le nombre de constituants tendus (n') évolue au cours du temps, de manière croissante (Figure IV.10). Ainsi la fonction probabiliste de mise en tension de la fibre $T(l_0(f_i), l(t))$ est définie comme suit :

$$n' = T(l_0(f_i), l(t))n \quad (\text{Eq. IV-14})$$

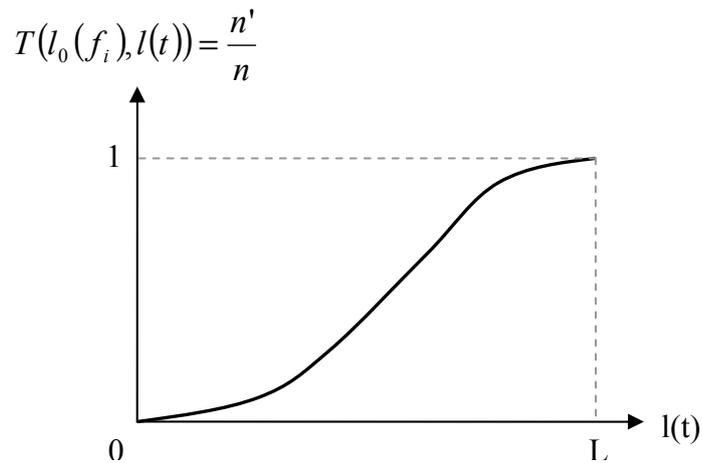


Figure IV.10 : Evolution de la fonction probabiliste en fonction de la longueur de la fibre à un instant t

II.1.1.3 Etat de déformation lors de la mise en tension

a) Etat de déformation d'un constituant

A l'état initial, aucun constituant n'est tendu, soit :

$$\varepsilon_i = 0 \quad (\text{Eq. IV-15})$$

Au cours de la mise en tension, les constituants commencent à s'allonger. Ils ont une longueur initiale $l_0(f_i) < l(t)$, soit une déformation équivalant à :

$$\varepsilon_i = \frac{l(t) - l_0(f_i)}{l_0(f_i)} \quad (\text{Eq. IV-16})$$

b) Etat de déformation de la fibre

A l'état initial, la fibre n'est pas sollicitée, soit :

$$\varepsilon = 0 \quad (\text{Eq. IV-17})$$

La déformation de la fibre dépend de la combinaison des déformations des constituants, soit une déformation effective ε_{eff} définie comme :

$$\varepsilon = \varepsilon_{eff} = \xi(\varepsilon_i) \quad (\text{Eq. IV-18})$$

Par définition, la longueur $l(t)$ dépend de la déformation ε : $l(t) = l_0(f_i)(\varepsilon + 1)$. Ainsi la fonction de probabilité de mise en tension de la fibre $T(l_0(f_i), l(t))$ dépend de la déformation ε .

II.1.1.4 Etat de contrainte lors de la mise en tension

L'état de contrainte de la fibre est une représentation de l'état de contrainte des constituants de la fibre. A l'état initial aucun constituant n'est contraint. Pour une tension partielle, une partie est sollicitée et pour une tension finale, l'ensemble des constituants est contraint (Figure IV.11).

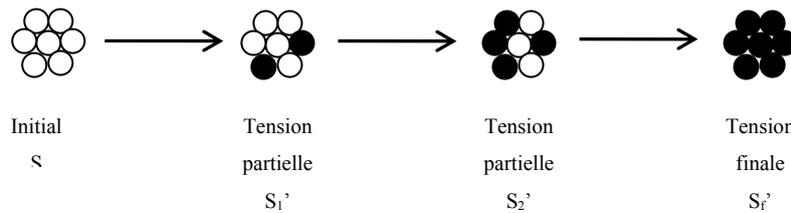


Figure IV.11 : Etat de contrainte de la fibre au cours de la mise en tension

a) Etat de contrainte de la fibre (cas général)

Lors de la tension d'une fibre, la contrainte (Figure IV.12) définie par la mécanique des matériaux équivaut à :

$$\sigma = \frac{F'}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{S} \quad (\text{Eq. IV-19})$$

Avec F_i : la force appliquée sur un constituant de la fibre, F' : la force appliquée sur la fibre et n : le nombre de constituants composant la fibre.

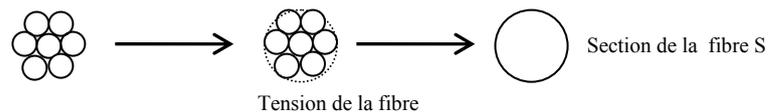


Figure IV.12 : Schématisation de la tension d'une fibre (cas général)

En considérant que tous les constituants ont la même section $s_1 = s_2 = s_i$, soit

$S = \sum_{i=1}^n s_i = n.s_i$, la contrainte s'écrit :

$$\sigma = \frac{1}{n.S} (F_1 + F_2 + \dots + F_n) = \frac{1}{n} \left(\frac{F_1}{s} + \frac{F_2}{s} + \dots + \frac{F_n}{s} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (\text{Eq. IV-20})$$

b) Etat de contrainte dans la fibre où les constituants la composant travaillent partiellement (état de contrainte considéré)

Lors de la tension d'une fibre, l'état de contrainte partiel (Figure IV.13) défini par la mécanique des matériaux équivaut à :

$$\sigma = \frac{F'}{S} = \frac{\sum_{i=1}^{n'} F_i}{S} \quad (\text{Eq. IV-21})$$

Avec F_i : la force appliquée sur un constituant de la fibre, F' : la force appliquée sur la fibre et n' : le nombre de constituants mis en tension.

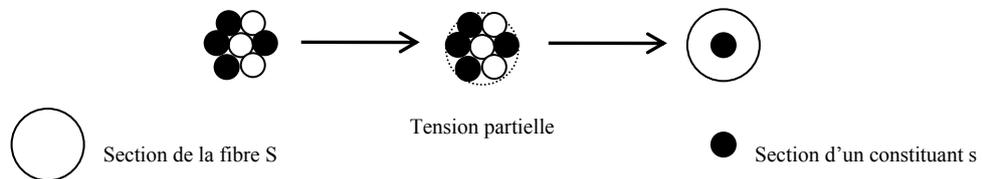


Figure IV.13 : Etat de contrainte partielle d'une fibre

En considérant que tous les constituants ont la même section $s_1 = s_2 = s_i$, soit

$S = \sum_{i=1}^n s_i = n.s_i$, la contrainte s'écrit :

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n'} \sigma_i \quad (\text{Eq. IV-22})$$

c) Etat de contrainte effective (ou réelle) ne tenant compte que de la surface des fibres travaillant

Les deux états de contrainte décrits ci-dessus ne reflètent pas la réelle physique de la fibre. En réalité, l'état de contrainte effectif représente la force de résistance des

constituants tendus rapportée à leurs sections, divisé par la section totale des constituants mis en tension (S').

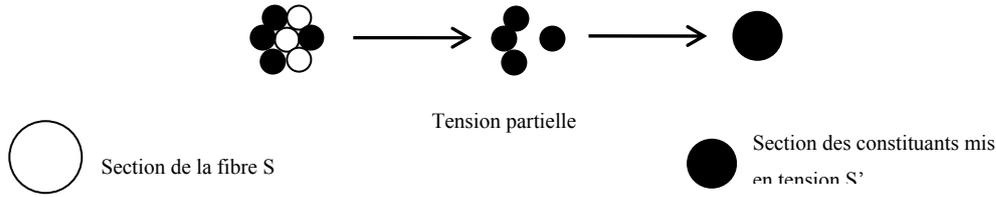


Figure IV.14 : Schématisation de l'état de contrainte effective de la fibre

L'état de contrainte effectif s'écrit alors comme suit :

$$\sigma_{eff} = \frac{F'}{S'} = \frac{\sum_{i=1}^{n'} F_i}{S'} \quad (\text{Eq. IV-23})$$

Avec F_i : la force appliquée sur un constituant de la fibre, F' : la force appliquée sur la fibre et n' : le nombre de constituants mis en tension.

En considérant que tous les constituants ont la même section $s_1 = s_2 = s_i$, on a

$S' = \sum_{i=1}^{n'} s_i = n' s_i$, la contrainte efficace peut alors s'écrire :

$$\sigma_{eff} = \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} \sigma_i \quad (\text{Eq. IV-24})$$

d) Relation entre la contrainte effective et la contrainte considérée

En comparant la contrainte réelle à la contrainte considérée comme étant celle de la fibre sollicitée lors d'une mise en tension, la relation suivante est obtenue :

$$\frac{\sigma}{\sigma_{eff}} = \frac{n'}{n} \quad (\text{Eq. IV-25})$$

Ainsi il est possible de décrire l'évolution de la contrainte de la fibre en fonction de l'état de contrainte réelle pondérée par le nombre de constituants réellement sollicités (Figure IV.15). Lorsque le nombre de constituants tendus (n') tend vers 0, la contrainte vaut 0. Alors que si (n') tend à correspondre au nombre de constituants total composant la fibre, la contrainte considérée prend la valeur de la contrainte efficace.

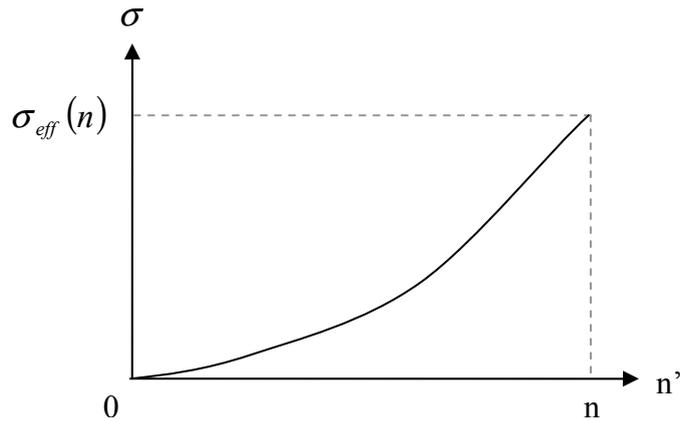


Figure IV.15 : Evolution de la contrainte de la fibre en fonction du nombre de constituants sollicités

$$\lim_{n' \rightarrow 0}(\sigma) = 0 \text{ et } \lim_{n' \rightarrow n}(\sigma) = \sigma_{eff}(n)$$

En concordance avec la partie II.1.1.2, la fonction $T(l_0(f_i), l(t))$ est équivalent à :

$$\sigma = T(l_0(f_i), l(t)) \cdot \sigma_{eff} = T(\varepsilon) \cdot \sigma_{eff} \quad (\text{Eq. IV-26})$$

II.1.1.5 Identification du modèle de comportement

a) Cas 1 : La fonction de probabilité $T(\varepsilon)$ est proportionnelle à la déformation

Pour ce cas, l'évolution de la probabilité de mise en tension de la fibre est considérée comme linéaire en fonction de la déformation (Figure IV.16).

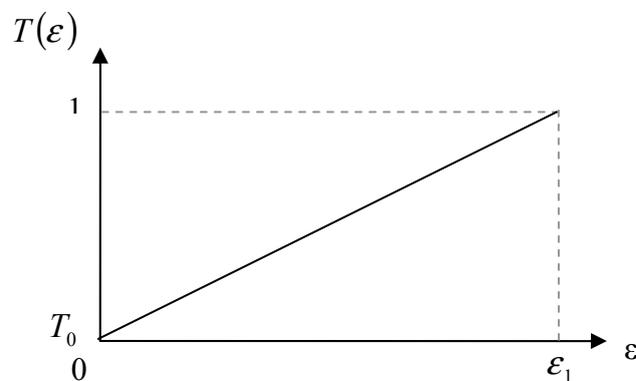


Figure IV.16 : Evolution linéaire de la probabilité de mise en tension

La fonction $T(\varepsilon)$ doit respecter les conditions suivantes $T(\varepsilon_0)=T_0$ et $T(\varepsilon_1)=1$, soit :

$$T(\varepsilon) = (1 - T_0) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} + T_0 \quad (\text{Eq. IV-27})$$

$$\sigma'(\varepsilon) = T(\varepsilon) \cdot \sigma_{eff}(\varepsilon) \quad (\text{Eq. IV-28})$$

$\sigma_{eff}(\varepsilon)$ est d'ordre 1 car nous considérons le comportement des constituants purement élastique, soit :

$$\sigma'(\varepsilon) = \left((1 - T_0) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} + T_0 \right) \cdot (a' \varepsilon + b') = A \varepsilon^2 + B \varepsilon + C \quad (\text{Eq. IV-29})$$

$\sigma(\varepsilon)$ doit respecter les conditions aux limites suivantes :

$$\sigma'(\varepsilon) \Big|_{\varepsilon_0} = \sigma_0 \quad (\text{tension initiale avant mise en tension})$$

$$\sigma'(\varepsilon) \Big|_{\varepsilon_1} = \sigma''(\varepsilon) \Big|_{\varepsilon_2} = \sigma_1 \quad (\text{condition de continuité entre la partie I et II})$$

$$\frac{\partial(\sigma'(\varepsilon))}{\partial \varepsilon} \Big|_{\varepsilon_1} = E_0 \quad (\text{Valeur de la rigidité de la fibre en } \varepsilon_1)$$

Par résolution, on obtient $A = \frac{E_0}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\varepsilon_1^2}$

$$B = 2 \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1} - E_0$$

$$C = \sigma_0$$

Soit $\sigma'(\varepsilon) = \left(\frac{E_0}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\varepsilon_1^2} \right) \varepsilon^2 + \left(2 \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1} - E_0 \right) \varepsilon + \sigma_0$ **Cas 1** (Eq. IV-30)

La mise en tension est lente en début de sollicitation et s'accélère au cours de la sollicitation. Ainsi si l'on considère la croissance de la contrainte nulle en début de

sollicitation $\left. \frac{\partial(\sigma^I(\varepsilon))}{\partial\varepsilon} \right|_{\varepsilon_0} = 0$, on obtient $B = 0$ et $A = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1^2}$

$$\text{Soit } \boxed{\sigma^I(\varepsilon) = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1^2} \varepsilon^2 + \sigma_0} \quad \text{Cas 1.1} \quad (\text{Eq. IV-31})$$

$$\text{Ainsi on peut définir une valeur de } E_0 = 2 \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1} \right) \quad \text{Cas 1.1} \quad (\text{Eq. IV-32})$$

b) Cas 2 : La fonction de probabilité $T(\varepsilon)$ est parabolique à la déformation

Pour ce cas, l'évolution de la probabilité de mise en tension de la fibre est considérée comme croissante et non-linéaire en fonction de la déformation (Figure IV.17).

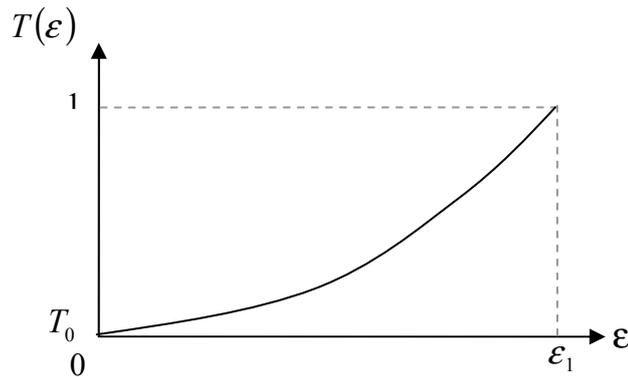


Figure IV.17 : Evolution parabolique de la probabilité de mise en tension

La fonction $T(\varepsilon)$ doit respecter les conditions suivantes $T(\varepsilon_0) = T_0$ et $T(\varepsilon_1) = 1$, soit :

$$T(\varepsilon) = (1 - T_0) \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_1^2} + T_0 \quad (\text{Eq. IV-33})$$

$$\sigma^I(\varepsilon) = T(\varepsilon) \cdot \sigma_{eff}(\varepsilon) \quad (\text{Eq. IV-34})$$

$\sigma_{eff}(\varepsilon)$ étant d'ordre 1 car nous considérons le comportement des constituants purement élastique, soit :

$$\sigma'(\varepsilon) = \left((1-T_0) \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_1^2} + T_0 \right) (a'\varepsilon + b') = A\varepsilon^3 + B\varepsilon^2 + C\varepsilon + D \quad (\text{Eq. IV-35})$$

$\sigma(\varepsilon)$ doit respecter les conditions aux limites suivantes :

$$\sigma'(\varepsilon) \Big|_{\varepsilon_0} = \sigma^0 \quad (\text{tension initiale avant mise en tension})$$

$$\sigma'(\varepsilon) \Big|_{\varepsilon_1} = \sigma''(\varepsilon) \Big|_{\varepsilon_2} = \sigma_1 \quad (\text{condition de continuité entre la partie I et II})$$

$$\frac{\partial(\sigma'(\varepsilon))}{\partial\varepsilon} \Big|_{\varepsilon_0} = 0 \quad (\text{pente nulle pour } \varepsilon=0, \text{ mise en tension lente en début de sollicitation})$$

$$\frac{\partial(\sigma'(\varepsilon))}{\partial\varepsilon} \Big|_{\varepsilon_1} = E_0 \quad \text{Valeur de la rigidité de la fibre en } \varepsilon_1$$

Par résolution, on obtient $A = \frac{E_0}{\varepsilon_1^2} - 2 \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1^3}$

$$B = -\frac{E_0}{\varepsilon_1} - 3 \cdot \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\varepsilon_1^2}$$

$$C = 0$$

$$D = \sigma_0$$

Soit $\sigma'(\varepsilon) = \left(\frac{E_0}{\varepsilon_1^2} - 2 \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1^3} \right) \varepsilon^3 - \left(\frac{E_0}{\varepsilon_1} + 3 \cdot \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\varepsilon_1^2} \right) \varepsilon^2 + \sigma_0$ **Cas 2** (Eq. IV-36)

c) Application

Un exemple a été étudié pour valider les modèles précédents (Figure IV.18). Les modèles avec une fonction probabiliste $T(\varepsilon)$ proportionnelle (cas 1 et cas 1.1) à la déformation ne permettent pas de décrire la mise en tension de la fibre. Alors qu'une fonction probabiliste parabolique permet d'avoir un comportement modélisé plus réaliste.

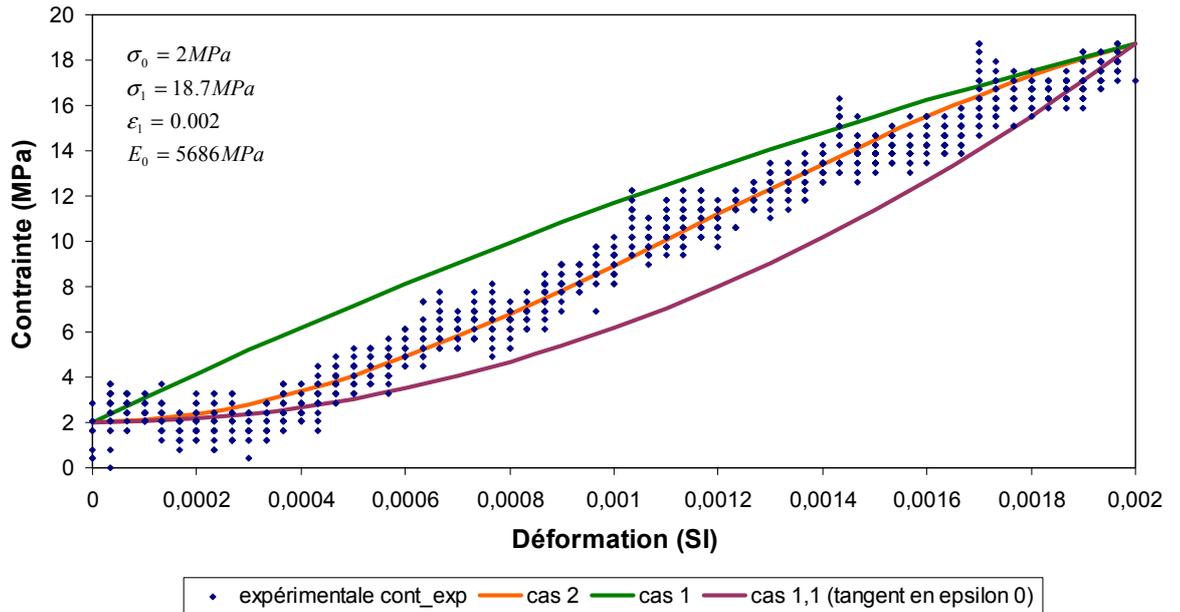


Figure IV.18 : Modèle de comportement d'une fibre unitaire et cas expérimental (partiel)

Cas 1 : Fonction de probabilité $T(\epsilon)$ proportionnelle à la déformation

Cas 1.1 : Fonction de probabilité $T(\epsilon)$ proportionnelle à la déformation avec une mise en tension lente pour les petites déformation $< 0,008$

Cas 2 : Fonction de probabilité $T(\epsilon)$ non linéaire et parabolique à la déformation

d) Variation du module $E^I(\epsilon)$ en fonction de la déformation

Le comportement de la fibre dépend de la variation de sa rigidité, ainsi il est intéressant de regarder comment le module d'élasticité $E^I(\epsilon)$ évolue en fonction de la déformation pour cette première partie de la courbe.

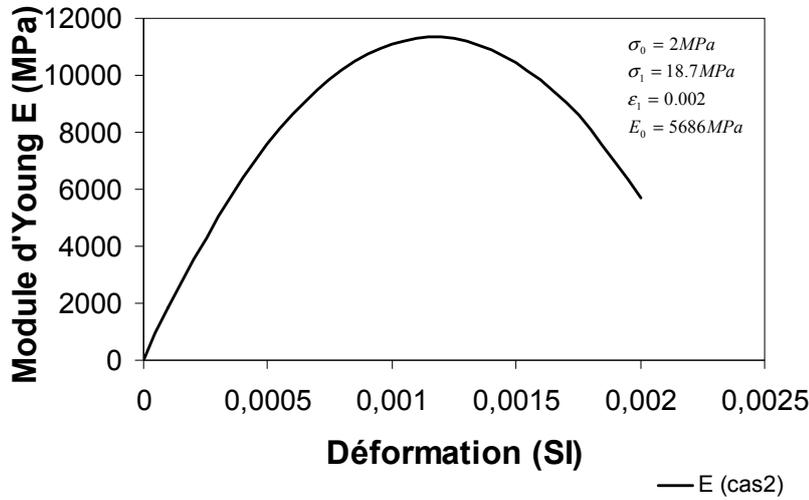
L'évolution du module d'élasticité pour le cas 1 et 2 est décrite comme suit :

$$\text{Cas 1 : } E^I(\epsilon) = \frac{\partial \sigma^I(\epsilon)}{\partial \epsilon} = 2 \left(\frac{E_0}{\epsilon_1} + \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\epsilon_1^2} \right) \epsilon + \left(2 \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\epsilon_1} - E_0 \right) \quad (\text{Eq. IV-37})$$

$$\text{Cas 2 : } E^I(\epsilon) = \frac{\partial \sigma^I(\epsilon)}{\partial \epsilon} = 3 \left(\frac{E_0}{\epsilon_1^2} + \frac{2(\sigma_0 - \sigma_1)}{\epsilon_1^3} \right) \epsilon^2 + 2 \left(-\frac{3(\sigma_0 - \sigma_1)}{\epsilon_1^2} - \frac{E_0}{\epsilon_1} \right) \epsilon \quad (\text{Eq. IV-38})$$

Pour le cas 2 de modélisation avec une fonction probabiliste parabolique, le module d'élasticité croît jusqu'à atteindre une valeur maximum de l'ordre 11 GPa (cas de l'exemple), puis décroît pour atteindre la valeur E_0 . Cette chute du module décrit le

changement physique de structure de la fibre causé par un réagencement des constituants de la fibre et un endommagement de l'interface entre ceux-ci.



Cas 2 : Fonction de probabilité $T(\epsilon)$ non linéaire et parabolique à la déformation

Figure IV.19 : Variation du module d'élasticité en fonction de la déformation cas 2

e) Calcul de la contrainte effective $\sigma_{eff}(\epsilon)$

A partir de la fonction probabiliste de mise en tension, il est possible de déterminer l'état de contrainte effective dans la fibre pour le cas 1 et 2.

Cas 1 :

$$\sigma'(\epsilon) = T(\epsilon) \cdot \sigma_{eff}(\epsilon) = \left((1 - T_0) \frac{\epsilon}{\epsilon_1} + T_0 \right) \cdot (a' \epsilon + b')$$

$\sigma_{eff}(\epsilon)$ doit permettre de respecter les conditions aux limites appliquées à $\sigma'(\epsilon)$:

$$\sigma'(\epsilon) \Big|_{\epsilon_0} = \sigma_0 \text{ soit } \sigma'(\epsilon_0) = \left((1 - T_0) \frac{\epsilon_0}{\epsilon_1} + T_0 \right) \cdot (a' \epsilon_0 + b') = \sigma_0$$

$$\sigma'(\epsilon) \Big|_{\epsilon_1} = \sigma_1 \text{ soit } \sigma'(\epsilon_1) = \left((1 - T_0) \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1} + T_0 \right) \cdot (a' \epsilon_1 + b') = \sigma_1$$

Par résolution, nous obtenons :

$$a' = \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_0}{T_0} \right) \cdot \frac{1}{\epsilon_1} \quad \text{et} \quad b' = \frac{\sigma_0}{T_0}$$

Ainsi :

$$\boxed{\sigma_{eff}(\varepsilon) = \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_0}{T_0} \right) \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_0}{T_0}} \quad \text{cas 1} \quad (\text{Eq. IV-39})$$

Cas 2 :

$$\sigma'(\varepsilon) = T(\varepsilon) \cdot \sigma_{eff}(\varepsilon) = \left((1 - T_0) \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_1^2} + T_0 \right) \cdot (a' \varepsilon + b')$$

$\sigma_{eff}(\varepsilon)$ doit permettre de respecter les conditions aux limites appliquées à $\sigma'(\varepsilon)$:

$$\sigma'(\varepsilon) \Big|_{\varepsilon_0} = \sigma^0 \text{ soit } \sigma'(\varepsilon_0) = \left((1 - T_0) \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_1^2} + T_0 \right) \cdot (a' \varepsilon_0 + b') = \sigma_0$$

$$\sigma'(\varepsilon) \Big|_{\varepsilon_1} = \sigma_1 \text{ soit } \sigma'(\varepsilon_1) = \left((1 - T_0) \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_1^2} + T_0 \right) \cdot (a' \varepsilon_1 + b') = \sigma_1$$

Par résolution, nous obtenons :

$$a' = \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_0}{T_0} \right) \frac{1}{\varepsilon_1} \quad \text{et} \quad b' = \frac{\sigma_0}{T_0}$$

Ainsi :

$$\boxed{\sigma_{eff}(\varepsilon) = \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_0}{T_0} \right) \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} + \frac{\sigma_0}{T_0}} \quad \text{cas 2} \quad (\text{Eq. IV-40})$$

Quelque soit la définition de la fonction de probabilité de mise en tension $T(\varepsilon)$, la contrainte effective σ_{eff} est identique. Cela démontre que la mise en tension partielle de la fibre est seulement due à $T(\varepsilon)$. Alors que la contrainte efficace représente seulement l'état de contrainte des constituants.

II.1.2 Partie 2 : Première partie linéaire (rigidité E_2)

Après avoir modélisée la mise en tension de la fibre (partie I de la courbe), l'évolution de la contrainte dans la partie II a été aussi définie.

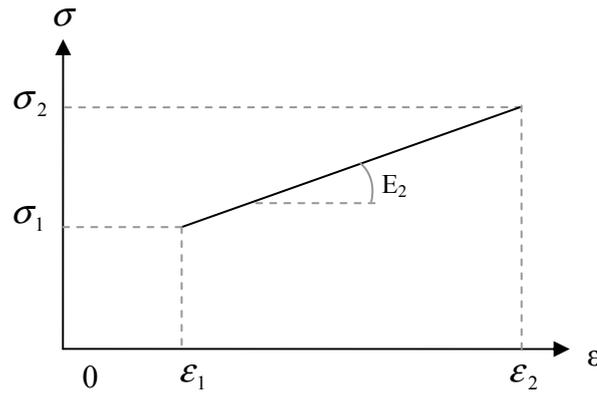


Figure IV.20 : Modèle de comportement linéaire de la fibre (partie II)

- L'évolution linéaire de la contrainte en fonction de la déformation est de la forme $\sigma''(\varepsilon) = D\varepsilon + F$ (Figure IV.20).

$\sigma''(\varepsilon)$ doit respecter les conditions limites suivantes :

$$\sigma''(\varepsilon)\Big|_{\varepsilon_1} = \sigma_1$$

$$\frac{\partial(\sigma''(\varepsilon))}{\partial\varepsilon}\Big|_{\varepsilon_1} = E_2$$

Par résolution, on obtient $D = E_2$

$$F = \sigma_1 - E_2\varepsilon_1$$

$$\text{Soit } \boxed{\sigma''(\varepsilon) = E_2(\varepsilon - \varepsilon_1) + \sigma_1} \quad (\text{Eq. IV-41})$$

II.1.3 Partie 3 : Deuxième partie linéaire (rigidité E_3)

Après avoir modélisée la mise en tension de la fibre (Partie I de la courbe) et l'évolution de la contrainte dans la partie II, la variation de la contrainte dans la partie III a été caractérisé.

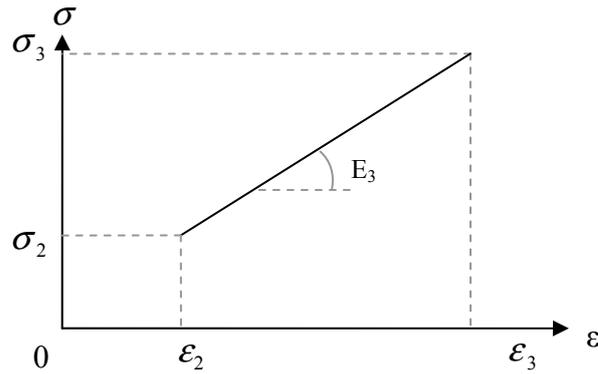


Figure IV.21 : Modèle de comportement linéaire de la fibre (partie III)

L'évolution de la contrainte en fonction de la contrainte est de la forme $\sigma^{III}(\varepsilon) = G\varepsilon + H$ (Figure IV.21).

$\sigma^{III}(\varepsilon)$ doit respecter les conditions limites suivantes :

$$\sigma^{III}(\varepsilon)\Big|_{\varepsilon_2} = \sigma_2$$

$$\frac{\partial(\sigma^{III}(\varepsilon))}{\partial\varepsilon}\Big|_{\varepsilon_1} = E_3$$

Par résolution, on obtient $G = E_3$

$$F = \sigma_2 - E_3\varepsilon_2$$

Soit $\boxed{\sigma^{III}(\varepsilon) = E_3(\varepsilon - \varepsilon_2) + \sigma_2}$ (Eq. IV-42)

II.1.4 Modèle général de comportement

La modélisation du comportement de chaque partie permet de déterminer le comportement de l'ensemble de la fibre pour une déformation donnée (Figure IV.22).

$$\sigma^I(\varepsilon) = \left(\frac{E_0}{\varepsilon_1^2} - 2 \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1^3} \right) \varepsilon^3 - \left(\frac{E_0}{\varepsilon_1} + 3 \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\varepsilon_1^2} \right) \varepsilon^2 + \sigma_0 \quad \varepsilon < \varepsilon_1$$

$$\sigma^{II}(\varepsilon) = E_2(\varepsilon - \varepsilon_1) + \sigma_1 \quad \varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2$$

$$\sigma^{III}(\varepsilon) = E_3(\varepsilon - \varepsilon_2) + \sigma_2 \quad \varepsilon_2 < \varepsilon < \varepsilon_3$$

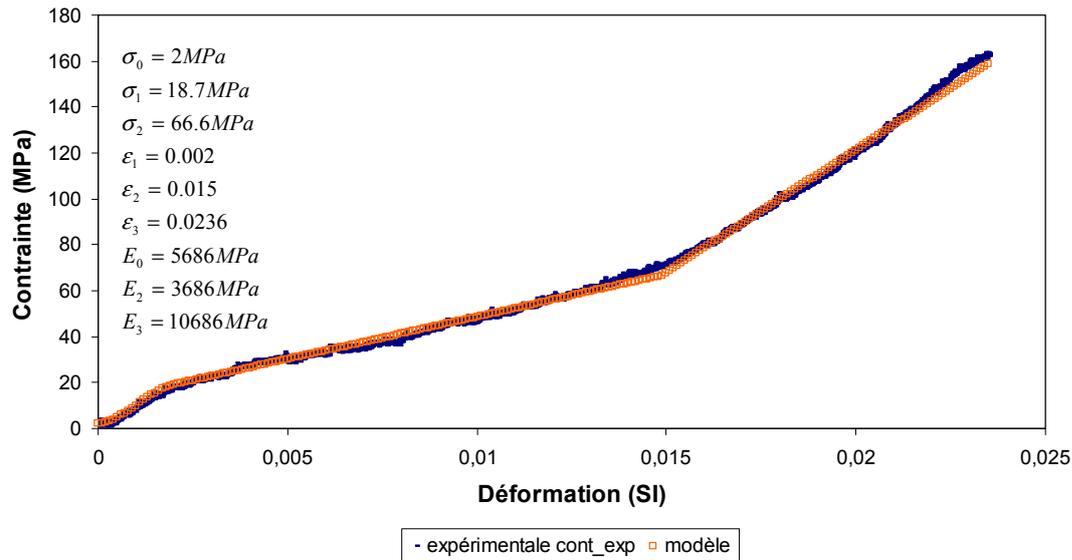


Figure IV.22 : Modèle de comportement de la fibre comparé au comportement expérimental

II.2 Propagation des incertitudes de mesures dans le modèle de comportement

Les essais de caractérisation des fibres unitaires et des faisceaux de chanvre (Chapitre II, partie II) ont démontré une forte dispersion des leurs propriétés mécaniques. Ainsi dans cette partie, nous avons cherché à tenir compte des incertitudes dans le modèle de comportement de la fibre (Figure IV.23).

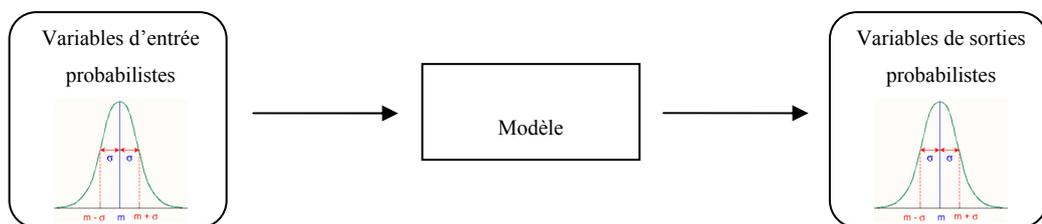


Figure IV.23 : Principe de propagation des incertitudes dans un modèle de comportement

Dans le cas général d'un comportement mécanique, la contrainte est définie en fonction de la déformation. Lorsqu'il existe une incertitude de cette dispersion, celle-ci sera propagée par le modèle de comportement à la contrainte. La contrainte est alors comprise entre deux valeurs limites une contrainte maximum et minimum centrées autour d'une contrainte moyenne (Figure IV.24).

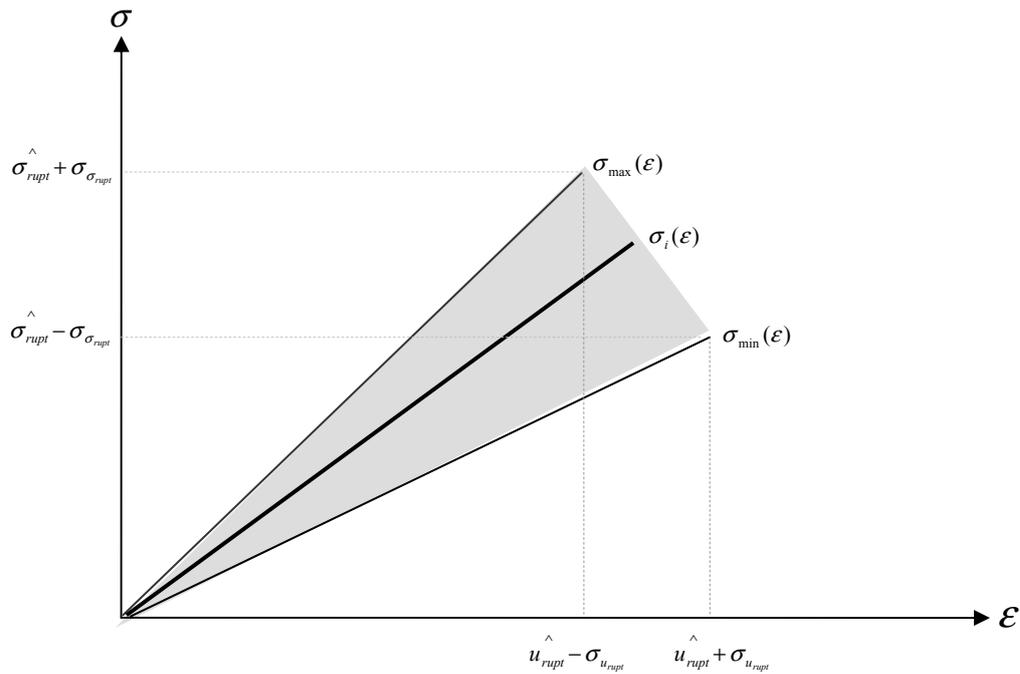


Figure IV.24 : Cas théorique de la propagation des incertitudes dans un modèle linéaire

Pour pouvoir tenir compte de la dispersion des paramètres d'entrées de notre modèle dans la modélisation du comportement des fibres. La simulation de Monte Carlo a été utilisée dans le cas d'un modèle de comportement de la fibre purement élastique. Dans ce cas d'étude toutes les données d'entrées sont considérées comme des données Gaussiennes.

Simulation de Monte Carlo :

La simulation de Monte Carlo est utilisée pour déterminer une valeur moyenne et une déviation standard de la réponse d'un système du type : $Y = M(x)$. Où x est un vecteur de n échantillons $\{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}\}$.

La valeur moyenne des valeurs du vecteur x est exprimée par :

$$\hat{\mu}_Y = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n M(x^{(k)})$$

La valeur de la déviation standard des valeurs du vecteurs x est exprimée par :

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \left(M(x^{(k)}) - \hat{\mu}_Y \right)^2$$

Dans notre cas de modélisation les entrées (données ou variables du modèle) sont toutes des données Gaussiennes à l'exception de la longueur initiale l_0 . Les sorties (paramètres calculés) sont la contrainte, la déformation et la force de traction, qui sont aussi des données Gaussiennes (Tableau IV-4)

Tableau IV-4 : Données d'entrée et de sortie

Inputs (données)	
La longueur initiale l_0	constante
Le module d'Young E	$\hat{E} \pm \sigma_E$
La surface de l'éprouvette S	$\hat{S} \pm \sigma_S$
Le déplacement de la traverse mobile u	$\hat{u} \pm \sigma_u$
Outputs (paramètres calculés)	
La déformation ε	$\hat{\varepsilon} \pm \sigma_\varepsilon$
La contrainte σ	$\hat{\sigma} \pm \sigma_\sigma$
La force de traction F	$\hat{F} \pm \sigma_F$

\hat{X} : La valeur moyenne du paramètre X et σ_X : écart type du paramètre X

II.2.1 Cas du modèle élastique à une partie linéaire

Le détail des calculs est montré en annexe III. Le modèle de comportement élastique (loi de Hooke) avec les incertitudes s'écrit :

$$\hat{\sigma} \pm \sigma_{\sigma} = \hat{E} \pm \sigma_E \cdot \hat{\varepsilon} \pm \sigma_{\varepsilon} \quad (\text{Eq. IV-43})$$

Pour lequel :

$$\hat{\sigma} = \hat{E} \cdot \hat{\varepsilon} + \sigma_E \cdot \sigma_{\varepsilon}$$

$$\sigma_{\sigma} = \hat{E} \cdot \sigma_{\varepsilon} + \varepsilon \cdot \sigma_E$$

La contrainte peut aussi être exprimée en fonction de la force de traction :

$$\hat{\sigma} \pm \sigma_{\sigma} = \frac{\hat{F} \pm \sigma_F}{\hat{S} \pm \sigma_S} \quad (\text{Eq. IV-44})$$

Pour laquelle :

$$\hat{\sigma} = \frac{\hat{F} \cdot \hat{S} - \sigma_F \cdot \sigma_S}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2}$$

$$\sigma_{\sigma} = \frac{\hat{S} \cdot \sigma_F - \hat{F} \cdot \sigma_S}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2}$$

En tenant du comportement élastique, la force peut alors être exprimée en fonction du déplacement :

$$\hat{F} \pm \sigma_F = \frac{\hat{E} \pm \sigma_E \cdot \hat{S} \pm \sigma_S}{l_0} \cdot u \pm \sigma_u \quad (\text{Eq. IV-45})$$

Pour laquelle :

$$\hat{F} = \frac{1}{l_0} \left[\hat{E} \hat{S} \hat{u} + \hat{E} \hat{\sigma}_S \hat{\sigma}_u + \hat{S} \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_u + \hat{u} \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S \right]$$

$$\hat{\sigma}_F = \frac{1}{l_0} \left[\hat{E} \hat{S} \hat{\sigma}_u + \hat{E} \hat{u} \hat{\sigma}_S + \hat{S} \hat{u} \hat{\sigma}_E + \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S \hat{\sigma}_u \right]$$

Toujours en tenant compte de l'élasticité du matériau, il est possible d'exprimer la contrainte en fonction du déplacement et du module d'Young (Eq. IV-45 couplé à Eq. IV-46). Ainsi la contrainte moyenne s'exprime :

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{l_0} \left(\frac{\hat{E} \hat{S}^2 \hat{u} + \hat{S}^2 \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_u - \hat{E} \hat{u} \hat{\sigma}_S^2 - \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S^2 \hat{\sigma}_u}{\hat{S}^2 - \hat{\sigma}_S^2} \right) \quad (\text{Eq. IV-46})$$

Avec comme incertitude sur la contrainte :

$$\hat{\sigma}_\sigma = \frac{1}{l_0} \left(\frac{A \left(\hat{S} - \hat{\sigma}_S \right) - C}{\hat{S}^2 - \hat{\sigma}_S^2} \right) = \frac{1}{l_0} \left(\frac{\hat{E} \hat{S}^2 \hat{\sigma}_u + \hat{S}^2 \hat{u} \hat{\sigma}_E - \hat{E} \hat{\sigma}_S^2 \hat{\sigma}_u - \hat{u} \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S^2}{\hat{S}^2 - \hat{\sigma}_S^2} \right) \quad (\text{Eq. IV-47})$$

La déformation étant un rapport de l'allongement sur la longueur initiale, peut être exprimée avec des incertitudes.

$$\hat{\varepsilon} \pm \hat{\sigma}_\varepsilon = \frac{\hat{u} \pm \hat{\sigma}_u}{l_0} \quad (\text{Eq. IV-48})$$

Pour laquelle :

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{u}}{l_0}$$

$$\hat{\sigma}_\varepsilon = \frac{\hat{\sigma}_u}{l_0}$$

A l'inverse, toujours en considérant la loi de Hooke, le module d'Young s'écrit :

$$\hat{E} \pm \hat{\sigma}_E = \frac{\hat{\sigma} \pm \hat{\sigma}_\sigma}{\hat{\varepsilon} \pm \hat{\sigma}_\varepsilon} \quad (\text{Eq. IV-49})$$

Avec :

$$\hat{E} = \frac{\hat{\sigma} \cdot \hat{\varepsilon} - \hat{\sigma}_\sigma \cdot \hat{\sigma}_\varepsilon}{\hat{\varepsilon} + \hat{\sigma}_\varepsilon^2}$$

$$\hat{\sigma}_E = \frac{\hat{\varepsilon} \cdot \hat{\sigma}_\sigma - \hat{\sigma} \cdot \hat{\sigma}_\varepsilon}{\hat{\varepsilon} - \hat{\sigma}_\varepsilon^2}$$

II.2.2 Cas du modèle de comportement à deux parties linéaires

Les équations déterminées précédemment peuvent être appliqué au modèle de comportement d'une fibre unitaire (partie II.1.4 et Figure IV.25).

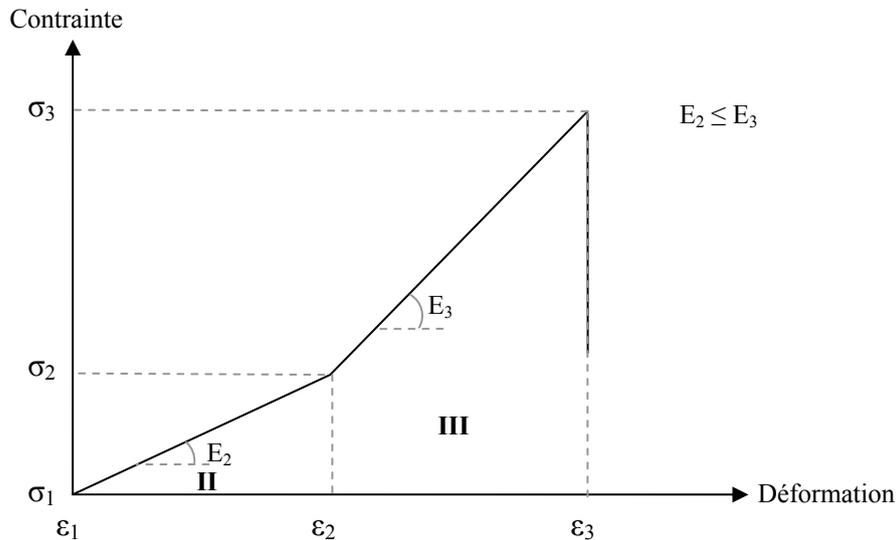


Figure IV.25 : Modèle de comportement à deux parties linéaires

$\sigma^{II}(\varepsilon) = E_2(\varepsilon - \varepsilon_1) + \sigma_1$	$\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2$
$\sigma^{III}(\varepsilon) = E_3(\varepsilon - \varepsilon_2) + \sigma_2$	$\varepsilon_2 < \varepsilon < \varepsilon_3$

Dans le cas général d'un comportement élastique avec une pré-contrainte initiale σ_0 pour une déformation de 0, nous avons :

$$\hat{\sigma} \pm \sigma_\sigma = \left(\hat{E} \pm \sigma_E \right) \left(\hat{\varepsilon} \pm \sigma_\varepsilon \right) + \left(\hat{\sigma}_0 \pm \sigma_{\sigma_0} \right) \quad (\text{Eq. IV-50})$$

Où la contrainte moyenne et la dispersion de la contrainte vaut :

$$\hat{\sigma} = \hat{E} \cdot \hat{\varepsilon} + \sigma_E \cdot \sigma_\varepsilon + \hat{\sigma}_0$$

et

$$\sigma_\sigma = \hat{E} \cdot \sigma_\varepsilon + \hat{\varepsilon} \cdot \sigma_E + \sigma_{\sigma_0}$$

En appliquant ce cas général à notre modèle de comportement de la fibre, nous obtenons :

- Partie II : $\hat{\sigma}^{\text{II}}(\varepsilon) \pm \sigma_{\sigma^{\text{II}}(\varepsilon)} = \left(\hat{E}_2 \pm \sigma_{E_2} \right) \left(\varepsilon - \left(\hat{\varepsilon}_1 \pm \sigma_{\varepsilon_1} \right) \right) + \left(\hat{\sigma}_1 \pm \sigma_{\sigma_1} \right) \quad (\text{Eq. IV-51})$

Avec

$$\hat{\sigma}^{\text{II}}(\varepsilon) = \hat{E}_2 \cdot \varepsilon - \hat{E}_2 \cdot \hat{\varepsilon}_1 - \sigma_{E_2} \cdot \sigma_{\varepsilon_1} + \hat{\sigma}_1$$

$$\sigma_{\sigma^{\text{II}}(\varepsilon)} = \varepsilon \cdot \sigma_{E_2} - \hat{E}_2 \cdot \sigma_{\varepsilon_1} - \hat{\varepsilon}_1 \cdot \sigma_{E_2} + \sigma_{\sigma_1}$$

- Partie III : $\hat{\sigma}^{\text{III}}(\varepsilon) \pm \sigma_{\sigma^{\text{III}}(\varepsilon)} = \left(\hat{E}_3 \pm \sigma_{E_3} \right) \left(\varepsilon - \left(\hat{\varepsilon}_2 \pm \sigma_{\varepsilon_2} \right) \right) + \left(\hat{\sigma}_2 \pm \sigma_{\sigma_2} \right) \quad (\text{Eq. IV-52})$

Avec

$$\hat{\sigma}^{\text{III}}(\varepsilon) = \hat{E}_3 \cdot \left(\varepsilon - \hat{\varepsilon}_2 \right) - \sigma_{E_3} \cdot \sigma_{\varepsilon_2} + \hat{\sigma}_2$$

$$\sigma_{\sigma^{\text{III}}(\varepsilon)} = \varepsilon \cdot \sigma_{E_3} - \hat{E}_3 \cdot \sigma_{\varepsilon_2} - \hat{\varepsilon}_2 \cdot \sigma_{E_3} + \sigma_{\sigma_2}$$

II.2.3 Application du modèle avec prise en compte des incertitudes

Les propriétés mécaniques moyennes caractérisées en traction pour des fibres unitaires (Tableau IV-5) ont été comparées aux contraintes calculées considérant un modèle à deux parties linéaires décrit précédemment (Tableau IV-6). Les contraintes calculées $\hat{\sigma}^{\text{II}}(\varepsilon_2)$ et $\hat{\sigma}^{\text{III}}(\varepsilon_3)$ correspondent aux contraintes moyennes mesurées

comme le montrent les tableaux suivants avec un faible écart de quelques MPa, validant ainsi les modèles présentés précédemment.

Tableau IV-5: Mesures expérimentales pour plusieurs fibres unitaires

	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	E2	E3	σ_1	σ_2	σ_3
e43_1	0,0034	0,0155	0,0215	12 758	14 234	15	170	255
e46_2	0,0009	0,0129	0,0217	7 752	10 780	27	120	215
e46_8	0,0005	0,0065	0,0135	12 897	14 557	35	112	213
e46_10	0,0019	0,0167	0,0299	9 228	9 752	40	177	305
e46_11	0,0046	0,0117	0,0215	13 875	14 234	17	116	255
e46_12	0,0060	0,0127	0,0217	13 897	10 780	25	118	215
Moyenne	0,0029	0,0127	0,0216	11 734	12 390	27	135	243
ET	0,0021	0,0035	0,0051	2 600	2 174	10	29	36

Tableau IV-6 : Données calculées en considérant un modèle à deux parties linéaires

	$\sigma^{II}(\epsilon_2) = \sigma_2$	$\sigma^{III}(\epsilon_3) = \sigma_3$
Moyenne	136	238
ET	20	34

II.3 Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, nous avons développé une méthode pour déterminer la valeur de la section transversale d'une fibre. Cette méthode de reconstruction 3D de la géométrie réelle de la fibre et la modélisation avec prise en compte des incertitudes des propriétés mécaniques ont été présentées. A partir d'un traitement d'images numériques de la fibre pour plusieurs orientations, des modèles numériques (développés sous CATIA) ont été créés. En utilisant cette construction géométrique, il a été possible d'envisager plusieurs hypothèses de modélisation géométrique de la fibre lors de sa caractérisation mécanique. De plus une modélisation de la mise en tension statistique des fibres en début de sollicitation a été développée tenant compte de l'état de contrainte effective dans la fibre et d'une fonction de probabilité de mise en tension des n constituants composant la fibre. Pour finir les incertitudes de mesures des propriétés mécaniques de la fibre ont été introduites au modèle de

comportement. Ce modèle de comportement de la fibre permet de prédire le comportement et les propriétés mécaniques en fonction des paramètres géométriques et matériaux avec leurs incertitudes. Il peut être employé pour simuler le comportement d'une fibre sous différentes sollicitations. Par la suite, ce modèle pourra être utilisé pour simuler le comportement non homogénéisé d'un agro-composite dans le but par exemple, d'étudier le comportement local d'une fibre coulée dans un polymère et permettre l'optimisation de la liaison entre la fibre et la matrice en vue d'améliorer la résistance aux concentrations locales de contraintes au niveau de l'interface.

Conclusions et perspectives

Le thème de recherche de cette thèse est d'optimiser et de favoriser l'utilisation d'agro-composites renforcés par des fibres végétales à l'échelle industrielle. Le but était de comprendre et de caractériser le comportement de ces matériaux bio-sourcés à l'échelle microscopique (la fibre unitaire) et macroscopique à l'échelle du composite et d'analyser l'influence du renfort sur le composite.

Le premier chapitre de ce mémoire a été dédié à l'étude de l'état de l'art, exposant différents travaux de recherche déjà menés dans ce domaine et leurs contributions au niveau industriel et académique. Cette synthèse de la littérature a montré la complexité d'utiliser des renforts extraits de ressources végétales dans les composites. Les propriétés mécaniques de ces fibres dépendent de nombreux paramètres comme les conditions de culture de la plante, la variété et la provenance, les conditions d'essais, la géométrie, l'extraction des fibres, etc.

De plus leur structure complexe est difficile à analyser et demande des expérimentations pointues. Néanmoins, les fibres végétales présentent de nombreux avantages pour la fabrication de nouveaux matériaux. Elles sont peu coûteuses, en adéquation avec un développement industriel respectueux de l'environnement et leurs propriétés physiques, mécaniques, thermiques et chimiques permettent leur utilisation dans divers domaines d'application.

Il n'est pas facile d'assembler une matière synthétique avec un matériau végétale. La conception et la fabrication d'agro-matériaux renforcés posent de nombreuses questions et demandent une certaine compréhension de leur comportement mécanique à différentes échelles. De nombreuses publications ont fait état de cette complexité et ont apporté certains éléments de réponses. Ces travaux ont montré l'influence de la variété de la fibre végétale sur leur pouvoir renforçant dans un composite et les différents traitements que peut subir la fibre en vue d'améliorer les

propriétés de l'agro-composite. Le processus de fabrication et de mise en œuvre des pièces en agro-composites restent encore un point important sur la qualité des produits finis. Les végétaux étant peu résistants à des températures élevées, les processus standards de fabrication peuvent ne pas être entièrement compatibles avec la fabrication d'agro-composites.

Le deuxième chapitre de ce mémoire est dédié à l'étude du comportement mécanique des fibres de chanvre. Plusieurs études ont été menées pour déterminer leur comportement mécanique, l'influence que peut avoir des conditions particulières de culture sur les propriétés de la fibre, l'influence que peut avoir la considération géométrique des fibres sur leurs propriétés intrinsèques ou encore l'impact qu'ont les défauts naturels sur le comportement. Les essais de caractérisation réalisés sur des fibres unitaires et des faisceaux de chanvre ont mis en évidence la bonne qualité de la fibre unitaire.

Les fibres unitaires ont de meilleures propriétés mécaniques que les faisceaux avec une résistance mécanique à la traction et une rigidité deux à trois fois supérieures. Ces travaux ont aussi montré que la variété de chanvre joue un rôle sur les propriétés des fibres. Une variété produisant plus de fibres avait un meilleur rendement productif mais fournissait des fibres avec une qualité moins intéressante. Cette étude a aussi mis en évidence l'influence des conditions de culture comme la densité de semis et l'apport en eau sur les propriétés mécaniques. Les résultats obtenus ne peuvent pas déterminer si une condition est bénéfique ou non, améliorant les propriétés, puisque une condition de culture n'a pas le même impact d'une variété de chanvre à une autre.

Cependant cette étude a montré qu'une variété de chanvre standard soumise aux conditions standards de culture produisait des fibres avec de bonnes propriétés mécaniques. Deux études complémentaires ont été réalisées. La première montre l'influence de la considération géométrique sur la caractérisation des fibres et la deuxième met en évidence le comportement irréversible et non-linéaire de la fibre en début de sollicitation, puis entièrement élastique en fin de sollicitation. Les fibres de chanvre ont une géométrie non-standard, si la considération d'homogénéité géométrique des fibres lors de leur caractérisation est trop éloignée de la géométrie réelle de la fibre, les propriétés mécaniques seront estimées avec une erreur importante. Cette étude a montré que considérer la section de la fibre comme étant

celle de la zone à rupture donne des résultats avec une faible erreur. Néanmoins la modélisation géométrique réelle de reconstruction 3D de la fibre couplée avec un calcul d'optimisation par approche inverse permet d'estimer les propriétés de la fibre avec une bonne précision mais demande beaucoup plus de temps, de moyens matériels et numériques adaptés.

Le troisième chapitre a présenté les études effectuées sur l'agro-composite renforcé avec ces mêmes fibres courtes de chanvre. Quelque soit le type de fibres, les propriétés des composites restent identiques malgré que les propriétés des fibres soient différentes. D'autres facteurs peuvent influencer la qualité du composite notamment le processus de fabrication et l'interface fibre – matrice.

Des essais de caractérisation ont été menés sur des composites renforcés par des fibres de chanvre récoltées en 2009 et 2011 dans la région de la Champagne-Ardenne. Ils ont montré que l'année de récolte avait peu d'impact, même si cette constatation ne peut pas être généralisée car les variations climatiques d'une année à l'autre ne sont pas constantes.

D'autres essais de caractérisation et d'observations microscopiques ont été effectués sur des composites injectés avec les mêmes fibres mais qui ont suivi des processus de fabrication différents, donnant des propriétés mécaniques différentes. Les résultats obtenus montrent que la résistance à rupture n'était pas identique confirmant l'influence du processus d'injection et le rôle de l'agent de couplage sur les propriétés finales. Suite à ces constatations, les travaux de recherche se sont orientés vers la compréhension du mécanisme de rupture. Pour cela, une série d'études par corrélation d'images d'agro-composite PP / Chanvre sous différentes sollicitations ont été menées. Cette étude a montré la localisation précoce des déformations dans la zone de rupture démontrant une zone privilégiée d'initiation et de propagation de l'endommagement.

L'analyse des champs de déplacements et de déformations locaux ont permis de mettre en évidence l'hétérogénéité de la répartition des fibres dans le composite. Cette non-homogénéité a pour conséquence d'avoir un matériau qui avec une rigidité non-homogène dans l'ensemble du composite créant des zones fragiles où l'endommagement est favorisé.

Dans le quatrième chapitre de la thèse, les outils de caractérisation par méthodes optiques et les méthodes de modélisation numérique ont été présentés. Une méthode de mesure de la géométrie de la fibre et un algorithme de traitement d'images ont été développés permettant d'obtenir le profil de la fibre. Les données géométriques ont permis de reconstruire la forme géométrique 3D de la fibre. Le modèle CAO a été ensuite utilisé dans un calcul par la méthode des éléments finis (Abaqus) couplé à un outil d'optimisation (Matlab) pour déterminer les propriétés mécaniques par approche inverse en considérant la géométrie réelle des fibres.

Les études expérimentales avaient montré le comportement particulier d'une fibre unitaire, notamment en début de sollicitation où il existe une mise en tension progressive des constituants de la fibre. Ainsi nous avons cherché à modéliser ce phénomène.

Un modèle probabiliste de la mise en tension d'un ou plusieurs constituants a été étudié permettant une description de la tension progressive de la fibre. Les expérimentations avaient aussi montré une forte dispersion des propriétés, pour cette raison, nous avons intégré celle-ci dans le modèle en tenant compte de la propagation des incertitudes des propriétés mécaniques des fibres unitaires.

Les travaux menés lors de cette thèse ont abouti à de nombreuses conclusions et permettent d'envisager des perspectives de recherche variées sur les fibres et les agro-composites. Concernant le composite renforcé par des fibres végétales différents axes de recherche peuvent être envisagés :

- Les essais de caractérisation des composites ont permis une analyse de la rupture de ces agro-composites. Une étude approfondie pourrait être couplée avec un suivi par émission acoustique pour identifier les mécanismes d'endommagement. Ainsi l'information sonore pourrait donner une indication qualitative et quantitative sur le type et les mécanismes de rupture.
- La corrélation d'images a permis de déterminer l'hétérogénéité des matériaux et de quantifier la variation de la rigidité. Une méthode locale plus précise de mesure serait la nano-indentation d'obtenir ainsi une mesure très précise du module d'Young local. De cette étude, une analyse de la variation de la rigidité entre la fibre et la matrice passant par l'interface pourrait être déterminée. La nano-indentation permettrait d'avoir une information en surface.

-
- La rupture se produit toujours dans une zone où les déformations sont maximales, mais actuellement la propagation de l'endommagement n'est pas connue, celui-ci pourrait se produire de l'extérieur de la matière vers l'intérieur ou inversement. Des essais de caractérisation filmés à grande vitesse pourraient apporter des éléments de réponse à cette question.
 - Des essais à faibles cycles de charge et de décharge ont été réalisés mais se limitaient à quelques cycles. Des essais de fatigue avec des cycles de charge – décharge ou de traction – compression ou de torsion pourraient être menés permettant à la fois de déterminer la résistance des agro-composites à la fatigue et de quantifier l'endommagement. Tous les essais cités précédemment pourraient être réalisés dans un environnement contrôlé. Par exemple des essais de fatigue couplés à du vieillissement en milieu ambiant permettraient l'étude d'un vieillissement mécanique et climatique simultanés.

Concernant les fibres végétales, de nombreuses études peuvent aussi être envisagées :

- L'impact de la géométrie des fibres sur les propriétés mécaniques a été identifiée. Mais cette caractérisation tenait seulement compte du profil extérieur de la fibre sans lumen. Des travaux de recherche ont montré la présence de lumen dans certains cas. Ainsi des méthodes par LASER ou au rayon X permettraient d'obtenir le profil intérieur du lumen. Celui-ci pourrait être ensuite modélisé et intégré au modèle 3D de la fibre en vue d'identifier le comportement mécanique qui tient compte de cette particularité géométrique.
- Comme pour les composites, les fibres unitaires et les faisceaux ont été soumis à des essais de charge et de décharge. Il serait aussi intéressant de mener des essais de fatigue cyclique sur les fibres pour déterminer, leurs propriétés mécaniques dans le temps, leur endommagement et leur durée de vie.

Références

- [AND09] Andersons J., Porike E., *The effect of mechanical defects on the strength distribution of elementary flax fibres*, Composites Science and Technology 69 (2009), 2152-2157
- [ATH09] Athijayamania A., Thiruchitrambalamb M., Effect of moisture absorption on the mechanical properties of randomly oriented natural fibers/polyester hybrid composite, Materials Science and Engineering A 517 (2009) 344–353
- [AZW13] Azwa Z.N., Yousif B.F., and Al., A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. Materials and Design 47 (2013) 424–442
- [BAL04] Baley C., *Influence of kink bands on the tensile strength of flax fibers*. Journal of Materials Science, 2004. **39**(1): p. 331-4.
- [BAL04-2] Baley C., Pillin I., and Al., État de l'art sur les matériaux composites biodégradables. Revue des Composites et des Matériaux Avancés, 2 (2004), 135–166
- [BAL05] Baley C., *Fibres naturelles pour matériaux composites*, Techniques de l'ingénieur, Techniques de l'ingénieur.
- [BAX08] Bax B., Müssig J., Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites. Composites Science and Technology 68 (2008) 1601–1607
- [BER08] Beckermann G.W, Pickering K.L., Engineering and evaluation of hemp fibre reinforced polypropylene composites: Fibre treatment and matrix modification. Composites: Part A 39 (2008) 979–988
- [BIN11] Binet S., Malard S., Fibres de cellulose, fiche toxicologique 2011, Institut National de Recherche et de Sécurité
- [BLE95] Bledzki A.K., Izbicka J., Gassan J., Kunststoffe-Umwelt-Recycling. Settin, Poland, 27-29 September 1995
- [BLE99] Bledzki A.K., Gassan J., Composites reinforced with cellulose based fibres. Prog. Polym. Sci. 24 (1999) 221-274

-
- [BOD85] Bodig J., Jayne B.A., *Mechanics of Wood Composites and Wood Composites*. Van Nostrand reinhold Co. New York (1982) NY. 712
- [BOD07] Bodros, E., et al., *Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications?* Composites Science and Technology, 2007. **67**(3-4): 462-470.
- [BOS02] Bos, H., M. Van Den Oever, and O. Peters, *Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites*. Journal of Materials Science, 2002. **37**(8): 1683-1692.
- [BOU10] Bourmaud A., Baley C., *Effect of thermo mechanical processing on the mechanical properties of biocomposites flax fibers evaluated by nanoindentation*, Polymer Degradation and Stability 95 (2010) 1488-1494
- [BOU11] Bourmaud A., Le Duigou A., *What is the technical and environmental interest in reusing a recycled polypropylene/hemp fibre composite?*. Polymer Degradation and Stability 96 (2011) 1732-1739
- [CHA07] Charlet K., Jernot J.P. et al., *Relation entre la microstructure et le comportement mécanique d'une fibre de lin*, JNC15 (2007) Marseille, France
- [CHA09] Charlet K., et al., *Influence of an Agatha flax fibre location in a stem on its mechanical, chemical and morphological properties*. Composites Science and Technology, 2009. **69**(9): 1399-1403.
- [CHA10] Charket K. et Béakou A., *Caractérisation des interfaces au sein d'un faisceau de fibres de lin*, conférence Matériaux 2010, octobre 2010, Nantes France.
- [CHA11] Charlet K., Gaillard-Martinie B., and al., *Mechanical behavior and numerical modelling of the middle lumella of flax*, Comptes Rendus des JNC 17, Poitiers 2011
- [CHE11] Cherouat A., Gong X.L., Ilcyszyn F. and Al., *Effect of the fibre morphology and aging conditions on the mechanical properties of hemp fibers*. Advanced Materials Research , 418-420 (2011): 270-273
- [DAS13] Dasong D., Mizi F. and Al., *Fabrication of nanocelluloses from hemp fibers and their application for the reinforcement of hemp fibers*. Industrial Crops and Products 44 (2013) 192– 199

-
- [DHA06] H.N. Dhakal et al., Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites, *Composites Science and Technology*, 2006 67: 1674-1683.
- [DIE99] Diener J, Siehler U. Okologischer vergleich von NMT-und GMTBauteilen.
Angew Makromol Chem 1999;272(Nr. 4744):1–4.
- [DUI08] Le Duigou A., Pillin Isabelle, *Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly(l-lactide) composites*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39 (2008) 1471-1478
- [DUV11] Duval A., Bourmaud A. et al., *Influence of the sampling area of the stem on the mechanical properties of hemp fiber*, *Materials letters* 65 (2011) 797-800
- [ELK13] Elkhaoulani A., Arrakhiz F.Z. and al., Mechanical and thermal properties of polymer composite based on natural fibers: Moroccan hemp fibers/polypropylene. *Materials and Design* 49(2013)203–208
- [ETI12] Etienne S., David L., *Introduction à la science physique des polymères – Cours et exercices 2^e édition*, 2012 Dunod
- [ERN05] Etude de marché des nouvelles utilisations des fibres végétales. Note de synthèse Ernst & Young, ADEME décembre 2005
- [FAR12] Faruk O., Bledzki A.K. and al., Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010, *Progress in Polymer Science* 37 (2012) 1552–1596
- [FRA09] François V., Lineo – Flax fibres impregnation. 2009, Available from : www.lineo.eu
- [GAS01] Gassan J, Bledzki AK. Thermal degradation of flax and jute fibers. *J Appl Polym Sci* 2001;82(6):1417–22
- [GEN06] Geneau C., Procédé d'élaboration d'agro-matériau composite naturel par extrusion biva et injection moulage de tourteau de tournesol, thèse de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2006
- [HER04] Herrera-Franco P.J., Valadez-Gonzalez A., *Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composites*, *Composites: Part A* 35 (2004) 339-345
-

-
- [HO08] Ho Thi T.N., *Etude de l'influence de la température et de l'humidité sur les propriétés mécaniques en traction des fibres de chanvre et de coco*, thèse (2008), Ecole de technologie supérieure Université du Québec
- [ILC12] Ilczyszyn F., Cherouat A. and Montay G., Mechanical modelling of hemp fibres using digital imaging treatment. *Advanced Materials Research* Vol. 423 (2012) 143-153
- [ILC12-2] Ilczyszyn F., Cherouat A. et Montay G., Caractérisation des propriétés mécaniques de fibres de chanvre. *Matériaux et Techniques* 100 5(2012) 451-457
- [ISL10] Islam M.S., Pickering K.L. and Al., Influence of accelerated ageing on the physico-mechanical properties of alkali-treated industrial hemp fibre reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites. *Polymer Degradation and Stability* 95 (2010) 59-65
- [JOS04] Joshi S.V., Drzal L.T., *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?*, *Composites: Part A* 35 (2004) 371-376
- [KUL83] Kulkarni A.G., Cheriyan K.A., and al., *Studies on the moisture Sorption of Coire Fibers*, *J. Appl. Polym. Sci.* (1993) 28, pp 625-632
- [KRA03] Denis O.K., Stuart E. and al., Opportunities to improve fiber degradation in the rumen : microbiology, ecology, and genomics, *FEMS Microbiology Reviews* 27 (2003) 663-693
- [LI08] Li, J., *Etude bibliographique de la caractérisation mécanique des fibres biodégradables et végétales*. 2008.
- [LIL00] Lilholt H., Lawther J.M., Natural organic fibers. *Comprehensive Composite Mmaterials*, 1 (2000), 303–325
- [MAD07] Madsen, B., et al., *Hemp yarn reinforced composites - I. Yarn characteristics*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007. **38**(10): 2194-2203.
- [MAY08] Maya J.J., Sabu T., Biofibres and biocomposites, *Carbohydrate Polymers* 71 (2008) 343–364
- [MEI11] Meirhaeghe C., Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France, *Etude de l'ADEME* 2011
-

-
- [MOH05] Mohanty A.K., Manjusri M. and Lawrence T.D., Natural fibers, biopolymers and biocomposites, 2008, published by CRC Press Taylors & Francis.
- [MOY11] Moyeenuddin A.S., Pickering K.L., Effect of various chemical treatments on the fibre structure and tensile properties of industrial hemp fibres. *Composites: Part A* 42 (2011) 888–895
- [MUN07] Munawar, S., K. Umemura, and S. Kawai, *Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fiber bundles*. *Journal of Wood Science*, 2007. **53**(2): p. 108-113.
- [MUS99] Müssig J., Caractérisation des fibres de chanvre. Journée scientifique du chanvre, 1999 Montjean sur Loire France
- [MWA06] Mwaikanbo L.Y., Ansell M.P., Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials – I. hemp fibres. *J Master Sci* 2006, 41, 2483-2496
- [OCH08] Ochi S., Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites. *Mechanics of Materials* 40 (2008) 446–452
- [OKS03] Oksmana K., Skrifvarsb M., Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology* 63 (2003) 1317–1324
- [PHI09] Phillips S.; Bio-composite material applications to musical instruments. Thèse de 2009, Structures and composites materials laboratory, Department of mechanical engineering McGill University, Montreal
- [PLA09] Placet V., Characterization of the thermo-mechanical behaviour of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites. *Composites: Part A* 40 (2009) 1111–1118
- [PLA09-2] Placet V., Characterization of the thermo-mechanical behaviour of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing - Special Issue: 15th French National Conference on Composites - JNC15*, 40 (2009), 1111–1118
- [PRA81] Pratten N.A., *The precise measurement of the density of small samples*, *Journal of Material Science* (1981) 1737-1747
-

-
- [RAF09] Rafols F., Artengo 820 flax fiber – Tennis racket. 2009, Available from : www.artengo.com
- [ROM04] Romão, C., et al., *Single filament mechanical characterisation of hemp fibres for reinforcing composite materials*. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2004. p :418.
- [ROU12] Roudier A., Analyse multi-échelle du comportement hygro-mécanique des fibres de lin, thèse 2012, Université Blaise Pascal – Clermont II
- [SAT09] Kestur G.S., Gregorio G.C.A., Fernando W., Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview, Progress in Polymer Science 34 (2009) 982–1021
- [SCH06] Schäfer T., Honermeier B., *Effect of sowing date and plant density on the cell morphology of hemp (Cannabis sativa L.)*, Industrial Crops and Product 23 (2006) 88-98
- [SCH06-2] Schledjewski R., Medina L., Schlarb A.K., Mechanical and morphological characterization of selected natural fibres. Advanced Composites Letters 2006, Vol. 15 N°2
- [SHA13] Shalwan A., Yousif B.F., In State of Art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres. Materials and Design 48 (2013) 14–24
- [SIL08] Silva, N.D., *Etat de la connaissance scientifique sur les fibres végétales*. 2008.
- [SOB12] Sobczak L., Reinhold W. L., Andreas H., Polypropylene composites with natural fibers and wood – General mechanical property profiles, Composites Science and Technology 72 (2012) 550–557
- [SPE62] Spendley W., Hext G.R. and Himsworth F.R., *Technometrics* 1962 ; 4:441-461.
- [TEM06] Temimi-Maaref N., *Comportement thermo-mécanique et rupture de polypropylènes. Etude expérimentale et modélisation.*, thèse 2006, Ecole des mines de Paris.
- [THI04] Thi-Thu-Loan D., Shang-Lin G., *Jute/polypropylene composites I. Effect of matrix modification*, Composites Science and Technology 66 (2006) 952-963
- [THO11] Thomason J.L. and al., *Fibre cross-section determination and variability in sisal and flax and its effects on fibre performance*
-

-
- characterisation*, Composites Science and Technology 71 (2011) 1008-1015
- [THY05] Thygesen, L.G. and P. Hoffmeyer, *Image analysis for the quantification of dislocations in hemp fibres*. Industrial Crops and Products, 2005. **21**(2): 173-184.
- [THY06] Thygesen, L.G., J.B. Bilde-Sørensen, and P. Hoffmeyer, *Visualisation of dislocations in hemp fibres: A comparison between scanning electron microscopy (SEM) and polarized light microscopy (PLM)*. Industrial Crops and Products, 2006. **24**(2): 181-185.
- [THY07] Thygesen, A., et al., *Comparison of composites made from fungal defibrated hemp with composites of traditional hemp yarn*. Industrial Crops and Products, 2007. **25**(2): 147-159.
- [THY08-1] Thygesen, L.G., *Quantification of dislocations in hemp fibers using acid hydrolysis and fiber segment length distributions*. Journal of Materials Science, 2008. **43**(4): 1311-1317.
- [THY08-2] Thygesen, L.G. and M.R. Asgharipour, *The effects of growth and storage conditions on dislocations in hemp fibres*. Journal of Materials Science, 2008. **43**(10): 3670-3673.
- [WAM01] Wambua P, Ivens J, Verpoest I. Some mechanical properties of kenaf / polypropylene composites prepared using a film stacking technique. In: 13th international conference on composite materials conference proceedings, Beijing, China. The Chinese Society for Composite Materials and China Universities Alumni Association, 2001; 25–29.
- [WAM03] Wambua, P., J. Ivens, and I. Verpoest, *Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?* Composites Science and Technology, 2003. **63**(9): 1259-1264.
- [WAN09] Wan Y.Z., Honglin Luo F., and al., Mechanical, moisture absorption, and biodegradation behaviours of bacterial cellulose fibre-reinforced starch biocomposites, Composites Science and Technology 69 (2009) 1212–1217
- [WIT94] Wittig W., Kunststoffe im Automobilbau. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994
-

Table des figures

FIGURE I.1 : HABILLAGE INTERIEUR DE PORTIERE DE VOITURE EN LIN / POLYPROPYLENE [BAL05]	20
FIGURE I.2 : WINCH DE BATEAU DE PLAISANCE DONT LA POUPEE EST CONSTITUEE D'UN COMPOSITE RENFORCE PAR DES FIBRES DE COTON [BAL05]	20
FIGURE I.3 : GUITARES SECHES EN COMPOSITES RENFORCES PAR DES FIBRES VEGETALES ET DE CARBONE [PHI09]	21
FIGURE I.4 : MATERIELS DE SPORT FABRIQUES EN AGRO-COMPOSITE RENFORCES PAR DU LIN : VELO DE COURSE MUSEEUW MF-5 (A) [FRA09] ET RAQUETTE DE TENNIS ARTENGO 820 (B) [RAF09]	22
FIGURE I.5 : EXEMPLES DE DIVERSES APPLICATIONS POUR L'EMPLOIE DES FIBRES DE CHANVRE ET DE LIN	22
FIGURE I.6 : VUE MACROSCOPIQUE DE LA SECTION TRANSVERSALE D'UNE TIGE DE LIN [LI08]	26
FIGURE I.7 : FIBRES UNITAIRES ET FAISCEAUX [MUS99]	27
FIGURE I.8 : MICROSCOPIE DE LA SECTION D'UNE TIGE DE LIN	27
FIGURE I.9 : PROCESSUS D'EXTRACTION DES FIBRES VEGETALES [MEI11]	28
FIGURE I.10: FIBRE VEGETALE A L'ECHELLE MACRO, MESO ET MICROSCOPIQUE	29
FIGURE I.11: SCHEMA A DIFFERENTES ECHELLES DE LA PLANTE ET DE LA FIBRE DE CHANVRE	29
FIGURE I.12 : MODELISATION D'UNE FIBRE VEGETALE DANS UN FAISCEAU [SIL08]	30
FIGURE I.13 : MODELISATION SIMPLIFIEE D'UNE FIBRE VEGETALE [BAL05]	31
FIGURE I.14 : MICROSCOPIE (MEB) DE LA SECTION D'UNE FIBRE DE CHANVRE MONTRANT LA STRUCTURE FIBRILLAIRE (UTT)	33
FIGURE I.15 : PRODUCTION MONDIALE DE FIBRES VEGETALES [MEI11]	39
FIGURE I.16 : SECTION D'UN FAISCEAU DE FIBRES OBTENUE PAR MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB) [MUN07]	46
FIGURE I.17 : SCHEMA DE MONTAGE DES FIBRES [CHA07]	52
FIGURE I.18 : DIAMETRE (μm), DENSITE (g/cm^3) (A) ET AIRE DE LA SECTION TRANSVERSALE (B) POUR DIFFERENTES FIBRES NATURELLES [MUN07]	53
FIGURE I.19 : COMPORTEMENT MECANIQUE POUR DIFFERENTS FAISCEAUX DE FIBRES VEGETALES [MUN07] (A) ET COMPORTEMENTS MECANIQUES TYPQUES D'UN FAISCEAU DE CHANVRE (3 COURBES TYPES : TYPES 1 , 2 ET 3 [DUV11](B)	54
FIGURE I.20 : EVOLUTION DE LA CONTRAINTE A RUPTURE ET DE LA RIGIDITE POUR DIFFERENTES FIBRES VEGETALES EN FONCTION DU DIAMETRE DES FAISCEAUX [MUN07] (A ET B) ET SPECIFIQUEMENT POUR LE CHANVRE [DUV11](C ET D)	55
FIGURE I.21 : EVOLUTION DE LA SECTION D'UN FIL DE CHANVRE EN FONCTION DU NOMBRE DE FIBRES QUE CONTIENT LE FIL [MAD07]	57

Table des figures

FIGURE I.22 : COMPORTEMENT MECANIQUE POUR DES FILS DE CHANVRE : COURBE DE TRACTION (A), GROSSISSEMENT DE LA COURBE DE TRACTION MONTRANT LE COMPORTEMENT INITIALEMENT NON LINEAIRE ET (C) CONTRAINTE – DEFORMATION POUR DES FILS AVEC DES DENSITES LINEAIRES RESPECTIVEMENT DE 46,5 (GRIS) ET 52,9 (NOIR) TEX [MAD07]	58
FIGURE I.23 : COURBES TYPQUES FORCE – DEPLACEMENT POUR LES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE [PLA09] (A) ET COMPORTEMENT MECANIQUE D’UNE FIBRE UNITAIRES DE LIN (B).....	60
FIGURE I.24 : DEFAUTS NATURELS (DISLOCATIONS ET NŒUDS) DES FIBRES VEGETALES	62
FIGURE I.25 : MASSE NORMALISEE TENANT COMPTE DE LA TENEUR EN EAU DES FIBRES UNITAIRES DE LIN A DIFFERENTS TAUX DE CONDITIONNEMENT [ROU12].....	64
FIGURE I.26 : SCHEMATISATION DU COMPORTEMENT ELASTIQUE DES FIBRILLES DE LA DEUXIEME PAROI CELLULAIRE [BOD82].....	65
FIGURE I.27 : PROPRIETES MECANQUES D’AGRO-COMPOSITES POLYPROPYLENE RENFORCES PAR DES FIBRES VEGETALES DE DIFFERENTES NATURES [WAM03]	68
FIGURE I.28: RESISTANCES MECANQUES ET MODULES D’ELASTICITE POUR DIFFERENTS AGRO- COMPOSITES [SHA13].....	69
FIGURE I.29 : PROPRIETES MECANQUES D’UN AGRO-COMPOSITE EN FONCTION DU POURCENTAGE MASSIQUE DE RENFORT (FIBRE DE KENAF) [WAM01]	69
FIGURE I.30 : PROPRIETES MECANQUES D’UN AGRO-COMPOSITE EN FONCTION DU POURCENTAGE MASSIQUE DE RENFORT (FIBRE DE CHANVRE) [ELK13].....	70
FIGURE I.31 : PROPRIETES MECANQUES LONGITUDINALE ET TRANSVERSALE D’UN AGRO-COMPOSITE POLYETHYLENE (HDPE) AVEC DES FIBRES "HENEQUEN" (46wt%) [HER04]	71
FIGURE I.32 : PROPRIETES MECANQUES DES AGRO-COMPOSITES POUR PLUSIEURS CYCLES DE RECYCLAGE [DUI08]	73
FIGURE I.33 : GAIN EN POIDS EN FONCTION DU TEMPS D’ABSORPTION [DHA06]	74
FIGURE I.34 : RESISTANCE EN TRACTION EN FONCTION DE LA FRACTION VOLUMIQUE DE FIBRES AVEC ET SANS ABSORPTION D’EAU [DHA06].....	74
FIGURE II.1 : SCHEMA DU PROCESSUS D’INJECTION DIRECT DE L’IFTS.....	83
FIGURE II.2 : SUPPORT ET MONTAGE DES FIBRES	84
FIGURE II.3 : MICROSCOPIES DE LA SURFACE D’UNE FIBRE DE CHANVRE DEFIBRE MANUELLEMENT A) ET THERMO-MECANIQUEMENT B), C).....	85
FIGURE II.4 : PHOTO ET SCHEMA DE LA MACHINE DE MICRO-TRACTION.....	86
FIGURE II.5 : COURBE CONTRAINTE - DEFORMATION EN TRACTION D’UN MATERIAU COMPOSITE	89
FIGURE II.6 : SCHEMA D’UNE POUTRE SOUMISE A DE LA FLEXION 3 POINTS	90
FIGURE II.7 : PHOTO MEB (MICROSCOPE A BALAYAGE ELECTRONIQUE) DE PLUSIEURS FIBRES DE CHANVRE AU POINT DE RUPTURE.....	91
FIGURE II.8 : EVOLUTION DU DIAMETRE D’UNE FIBRE UNITAIRE EN FONCTION DE LA POSITION LE LONG DE LA FIBRE	92
FIGURE II.9 : IMAGES MICROSCOPIQUES D’UNE FIBRE UNITAIRE DE CHANVRE POUR CINQ ORIENTATIONS ANGULAIRES DIFFERENTES	93

FIGURE II.10: PHOTO ET SCHEMA DU SYSTEME D'IMAGERIE OPTIQUE PERMETTANT D'OBTENIR LES MICROSCOPIES DES FIBRES DE CHANVRE, (1) CAMERA AVEC UN OBJECTIF AYANT UN GROSSISSEMENT ($\times 5$), (2) ORDINATEUR, (3) LUMIERE BLANCHE ET FROIDE, (4) MONTAGE SPECIFIQUE PERMETTANT L'ORIENTATION ANGULAIRE DES FIBRES ET (5) MONITEUR PERMETTANT LE REGLAGE DE L'INTENSITE DE LA LUMIERE.	93
FIGURE II.11 : SCHEMA DU PROFIL D'UNE FIBRE AVANT (A) ET APRES (B) LE TRAITEMENT D'IMAGE NUMERIQUE.....	95
FIGURE II.12 : SCHEMA DU RESULTAT DU TRAITEMENT NUMERIQUE D'IMAGE	95
FIGURE II.13 : PHOTOGRAPHIE D'UNE FIBRE UNITAIRE DE CHANVRE AVANT ET APRES TRAITEMENT DE L'IMAGE	96
FIGURE II.14 : PROFIL DE LA SECTION TRANSVERSE D'UNE FIBRE UNITAIRE ET MESURE DES DIAMETRES POUR CINQ ORIENTATIONS DIFFERENTES	97
FIGURE II.15 : COMPORTEMENT MECANIQUE EN TRACTION DES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE.....	100
FIGURE II.16 : COMPORTEMENT THEORIQUE DES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE.....	101
FIGURE II.17 : COURBES DE TRACTION POUR DES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE.....	103
FIGURE II.18 : MICROSCOPIES D'UNE PARTIE DE LA SECTION D'UNE TIGE DE CHANVRE (PHOTOS A ET B), ETUDES REALISEES PAR EVA FERNANDEZ TENDERO. C ET D : MICROSCOPIES MEB, D'UN FACIES DE RUPTURE D'UN AGRO-COMPOSITE PP / CHANVRE. E ET F : PHOTOGRAPHIE DE LA SECTION TRANSVERSALE D'UNE FIBRE UNITAIRE APRES RUPTURE.....	106
FIGURE II.19 : COMPORTEMENT MECANIQUE EN TRACTION D'UN FAISCEAU DE FIBRES DE CHANVRE ..	108
FIGURE II.20 : EXEMPLE DE COURBES DE TRACTION POUR DES FAISCEAUX DE FIBRES DE CHANVRE....	109
FIGURE II.21 : COMPARAISON DES PROPRIETES MECANQUES EN TRACTION DES FIBRES UNITAIRES ET DES FAISCEAUX DE CHANVRE (VARIETE ET CONDITIONS DE CULTURE STANDARD).....	112
FIGURE II.22 : VARIATION DE LA CONTRAINTE MAXIMUM ET DU MODULE D'YOUNG EN FONCTION DU DIAMETRE DES FIBRES DE CHANVRE (FIBRES UNITAIRES ET FAISCEAUX).....	114
FIGURE II.23 : SCHEMA D'EXEMPLES DE TYPES DE FAISCEAUX POUVANT ETRE SOLLICITES EN TRACTION	115
FIGURE II.24 : COMPORTEMENT MECANIQUE D'UNE FIBRE UNITAIRE (COURBE A 3 ZONES A, B ET C) .	117
FIGURE II.25 : CHARGE (A) ET DEPLACEMENT (B) DE LA TRAVERSE POUR UN ESSAI DE CHARGE / DECHARGE (DANS LA ZONE C) EN TRACTION POUR UNE FIBRE UNITAIRE.....	118
FIGURE II.26 : EVOLUTION DE LA CONTRAINTE DE TRACTION EN FONCTION DE LA DEFORMATION POUR UN CHARGEMENT CYCLIQUE CHARGE / DECHARGE (DANS LA ZONE C) D'UNE FIBRE UNITAIRE....	119
FIGURE II.27 : CHARGE (A) ET DEPLACEMENT (B) EN FONCTION DU TEMPS D'ESSAI.....	120
FIGURE II.28 : PHOTOGRAPHIE D'UNE FIBRE DE CHANVRE APRES DECHARGE (DEPLACEMENT RAMENE A 0 μ M).....	121
FIGURE II.29 : EVOLUTION DE LA CONTRAINTE DE TRACTION EN FONCTION DE LA DEFORMATION POUR UN CHARGEMENT CYCLIQUE CHARGE / DECHARGE (ZONE A,B ET C) D'UNE FIBRE UNITAIRE.....	123
FIGURE II.30 : DIAMETRE DES FIBRES DE CHANVRE TESTEES EN FONCTION DU TYPE DE CULTURE	125
FIGURE II.31 : PROPRIETES MECANQUES DES FIBRES UNITAIRES EN FONCTION DE LA VARIETE DE CHANVRE.....	128

Table des figures

FIGURE II.32 : PROPRIETES MECANIQUES DES FIBRES UNITAIRES EN FONCTION DES CONDITIONS DE CULTURES (VARIETE STANDARD, TYPE A)	129
FIGURE II.33 : PROPRIETES MECANIQUES DES FIBRES UNITAIRES EN FONCTION DES CONDITIONS DE CULTURES (VARIETE PRODUISANT PLUS DE FIBRES, TYPE B)	130
FIGURE II.34 : PROPRIETES MECANIQUES DES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE EN FONCTION DU TYPE DE FIBRES	132
FIGURE II.35 : DEFORMATION A RUPTURE DES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE EN FONCTION DU TYPE DE FIBRES	132
FIGURE II.36 : PROPRIETES MECANIQUES DES FAISCEAUX DE CHANVRE POUR DIFFERENTS POUR DEUX VARIETES DE CHANVRE	133
FIGURE II.37 : PROPRIETES MECANIQUES DES FAISCEAUX DE CHANVRE POUR DIFFERENTS CONDITIONS DE CULTURE (VARIETE DE CHANVRE A)	135
FIGURE II.38 : PROPRIETES MECANIQUES DES FAISCEAUX DE CHANVRE POUR DIFFERENTS CONDITIONS DE CULTURE (VARIETE DE CHANVRE B).....	136
FIGURE II.39 : PROPRIETES MECANIQUES DES FAISCEAUX DE CHANVRE POUR DIFFERENTS TYPES DE CHANVRE.....	137
FIGURE II.40 : DIAMETRES DES ECHANTILLONS CARACTERISES (FIBRES UNITAIRES ET FAISCEAUX) EN FONCTION DE LA VARIETE DE CHANVRE ET DES CONDITIONS DE CULTURE	140
FIGURE II.41 : COMPARAISON DU MODULE D'YOUNG ENTRE LES FAISCEAUX ET LES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE EN FONCTION DE LA VARIETE ET DES CONDITIONS DE CULTURE	140
FIGURE II.42 : COMPARAISON DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA TRACTION POUR LES FAISCEAUX ET LES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE	141
FIGURE II.43 : VARIATION DE LA CONTRAINTE MAXIMUM ET DU MODULE D'YOUNG EN FONCTION DU DIAMETRE DES FIBRES DE CHANVRE POUR LES SIX MODALITES DE CULTURE	143
FIGURE II.44 : PROFIL DE LA SECTION TRANSVERSE D'UNE FIBRE UNITAIRE ET MESURE DES DIAMETRES POUR CINQ ORIENTATIONS	145
FIGURE II.45 : PROFIL DE LA SECTION POLYGONALE DISCRETISEE EN ELEMENTS FINIS	146
FIGURE II.46 : PROFIL CIRCULAIRE DE LA SECTION LOCALISEE AU POINT DE RUPTURE	146
FIGURE II.47 : PROFIL POLYGONALE DE LA SECTION DE LA FIBRE AU POINT DE RUPTURE.....	147
FIGURE II.48: MODELE 3D D'UNE FIBRE UNITAIRE	147
FIGURE II.49 : CONTRAINTE DE TRACTION EN FONCTION DE LA DEFORMATION LONGITUDINALE DETERMINEE POUR LES METHODES 1 A 4	149
FIGURE II.50 : VALEUR DE LA SECTION DE LA FIBRE CONSIDEREE PAR LES DIFFERENTES METHODES .	150
FIGURE II.51 : CONTRAINTE MAXIMUM (A) ET MODULE D'YOUNG POUR DIFFERENTES MODELISATIONS DE LA GEOMETRIE DE LA FIBRE.....	153
FIGURE II.52 : MICROSCOPIES D'UN DEFAUT COUDE PRISES AU COURS D'UN ESSAI DE TRACTION	156
FIGURE II.53 : DEFORMATIONS LONGITUDINALES (A) ET RADIALE (B) D'UN COUDE AU COURS DE L'ESSAI	157
FIGURE III.1 : MICROSCOPIE DE LA SECTION D'UNE EPROUVETTE EN TRACTION (VISUALISATION DES FIBRES).....	165

FIGURE III.2 : MICROSCOPIE NUMERIQUE DE LA SECTION TRANSVERSALE D'UNE EPROUVETTE DE TRACTION (A : IMAGE GROSSIE, B : IMAGE D'ENSEMBLE).....	166
FIGURE III.3 : COMPORTEMENT EN TRACTION D'UN COMPOSITE PP - CHANVRE	168
FIGURE III.4 : EVOLUTION DE L'INCREMENTATION DE CONTRAINTE $\Delta\Sigma$ EN FONCTION DE LA VARIATION DE DEFORMATION ΔE	168
FIGURE III.5 : COMPORTEMENT EN FLEXION D'UN COMPOSITE PP - CHANVRE.....	169
FIGURE III.6 : CONTRAINTE ET MODULE D'ELASTICITE EN FLEXION EN FONCTION DE LA FLECHE A X = L/2	170
FIGURE III.7 : COURBES DE TRACTION POUR LES COMPOSITES RENFORCES PAR DES FIBRES DE CHANVRE DE TYPE STANDARD	171
FIGURE III.8 : COURBE DE FLEXION - CONTRAINTE DE FLEXION EN FONCTION DE LA FLECHE IMPOSEE (COMPOSITE RENFORCE PAR DES FIBRES STANDARD)	175
FIGURE III.9 : ETAT DE SOLlicitATION EN TRACTION (A) ET FLEXION (B) D'UNE EPROUVETTE PP - CHANVRE.....	177
FIGURE III.10 : EPROUVETTE DE TRACTION PP - CHANVRE A $T_0 = 0s$	180
FIGURE III.11 : IMAGES MACROSCOPIQUES D'UNE EPROUVETTE PP - CHANVRE AU COURS D'UN ESSAI DE TRACTION (FACE AVANT), (A) : A 2,51 MIN, (B) : A 3,29 MIN ET (C) : APRES RUPTURE	181
FIGURE III.12 : IMAGES MACROSCOPIQUES D'UNE EPROUVETTE PP - CHANVRE AU COURS D'UN ESSAI DE TRACTION (FACE ARRIERE), (A) : A 2,51 MIN, (B) : A 3,29 MIN ET (C) : APRES RUPTURE.....	182
FIGURE III.13 : FACIES DE RUPTURE NON-HOMOGENE D'UNE EPROUVETTE SOUMISE A DE LA TRACTION UNIAXIALE	183
FIGURE III.14 : FACIES DE RUPTURE HOMOGENE D'UNE EPROUVETTE DE TRACTION SOUMISE A DE LA TRACTION UNIAXIALE.....	184
FIGURE III.15 : FACIES DE RUPTURE D'UNE EPROUVETTE SOUMISE A DE LA FLEXION 3 POINTS	184
FIGURE III.16 : ZONES DE RUPTURE DES EPROUVETTES DE TRACTION (CHANVRE 2009, PEP)	185
FIGURE III.17 : ZONES DE RUPTURE DES EPROUVETTES DE TRACTION (CHANVRE 2011, PEP)	186
FIGURE III.18 : ZONES DE RUPTURE DES EPROUVETTES DE TRACTION (CHANVRE 2011, IFTS).....	187
FIGURE III.19 : RUPTURE LOCALISEE DES COMPOSITES CHANVRE – PP.....	188
FIGURE III.20 : IMAGES OPTIQUES A DIFFERENTES POSITIONS LE LONG ET DANS LA SECTION TRANSVERSALE DE LA FIBRE : (A) PHOTO AU CŒUR ET PROCHE DU POINT D'INJECTION, (B) PHOTO AU CŒUR ET LOIN DU POINT D'INJECTION, (C) PHOTO EN SURFACE ET PROCHE DU POINT D'INJECTION, (C) PHOTO EN SURFACE ET LOIN DU POINT D'INJECTION, SCHEMATISATION DE LA REPARTITION DES FIBRES DANS LA LONGUEUR (E) ET DANS LA SECTION TRANSVERSALE (F).....	189
FIGURE III.21 : IMAGES OBTENUES PAR BALAYAGE ELECTRONIQUE DE LA ZONE CENTRALE DE LA SECTION TRANSVERSALE : (A) AU MILIEU DE LA SECTION, (B) PARTIE GAUCHE OU IL Y UNE CONCENTRATION DE FIBRE $\times 600$, (C) PARTIE DROITE OU IL Y UNE DECONCENTRATION $\times 200$, (D) PARTIE GAUCHE OU IL Y UNE CONCENTRATION DE FIBRE $\times 45$, (E) PARTIE DROITE OU IL Y UNE DECONCENTRATION $\times 45$	191
FIGURE III.22 : COMPORTEMENT MECANIQUE EN TRACTION DES AGRO-COMPOSITES POLYPROPYLENE - CHANVRE POUR DIFFERENTES NATURES DE FIBRES DE CHANVRE (ANNEE 2009).....	194

Table des figures

FIGURE III.23 : PROPRIETES MECANQUES DE RESISTANCE EN TRACTION DES COMPOSITES PP-CHANVRE EN FONCTION DE LA NATURE DES FIBRES (ANNEE 2009).....	195
FIGURE III.24 : PROPRIETES ELASTIQUE EN TRACTION DES COMPOSITES PP-CHANVRE EN FONCTION DE LA NATURE DES FIBRES (ANNEE 2009).....	196
FIGURE III.25 : EVOLUTION DE LA CONTRAINTE DE FLEXION EN FONCTION DE LA FLECHE POUR DES AGRO-COMPOSITES PP - CHANVRE RENFORCES PAR DIFFERENTS TYPES DE CHANVRE RECOLTES EN 2009.....	199
FIGURE III.26 : COMPARAISON DE LA FLECHE A RUPTURE ET DE LA FORCE DE FLEXION MAXIMUM POUR DES AGRO-COMPOSITES RENFORCES PAR DIFFERENTS TYPES DE FIBRES DE CHANVRE (ANNEE 2009).....	201
FIGURE III.27 : PROPRIETES ELASTIQUES MODULE D'YOUNG E (A) ET LIMITE ELASTIQUE Re (B) DES AGRO-COMPOSITES EN FONCTION DES CONDITIONS DE CULTURE ET DE LA VARIETE DE CHANVRE	202
FIGURE III.28 : CONTRAINTES MAXIMUM EN TRACTION ET EN FLEXION DES AGRO-COMPOSITES EN FONCTION DES CONDITIONS DE CULTURE ET DE LA VARIETE	203
FIGURE III.29 : COMPARAISON DU MODULE D'YOUNG (A) ET DE LA CONTRAINTE MAXIMUM (B) ENTRE LES FAISCEAUX, LES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE ET LES COMPOSITES PP – CHANVRE RENFORCES PAR CES MEMES FIBRES	206
FIGURE III.30 : COURBE DE TRACTION EN FONCTION DE DIFFERENTES CONDITIONS DE CULTURE ET DE VARIETES DE CHANVRE RECOLTEES EN 2009 ET 2011.....	208
FIGURE III.31 : CONTRAINTE MAXIMUM (A) ET DEFORMATION A RUPTURE (B) POUR DES AGRO-COMPOSITES RENFORCES PAR DIFFERENTS TYPES DE FIBRES DE CHANVRE RECOLTEES EN 2009 ET 2011	209
FIGURE III.32 : PROPRIETES ELASTIQUES (MODULE D'YOUNG (A) ET LIMITE D'ELASTICITE (B)) POUR DES AGRO-COMPOSITES RENFORCES PAR DIFFERENTS TYPES DE FIBRES DE CHANVRE RECOLTEES EN 2009 ET 2011.....	210
FIGURE III.33 : COMPORTEMENT MECANIQUE EN TRACTION DES AGRO-COMPOSITES PP - CHANVRE FABRIQUES ET INJECTES PAR DEUX PROCESSUS DIFFERENTS.....	211
FIGURE III.34 : PROPRIETES MECANQUES EN TRACTION DES AGRO-COMPOSITES PP - CHANVRE FABRIQUES ET INJECTES PAR DEUX PROCESSUS DIFFERENTS POUR PLUSIEURS TYPES DE FIBRES	213
FIGURE III.35 : COMPORTEMENT MECANIQUE DU COMPOSITE EN FONCTION DE LA VITESSE DE SOLLICITATION	214
FIGURE III.36 : HISTOGRAMME DES PROPRIETES MECANQUES EN FONCTION DE LA VITESSE DE SOLLICITATION : A) ALLONGEMENT ET FORCE DE TRACTION A RUPTURE, B) DEFORMATION ET CONTRAINTE DE TRACTION A RUPTURE.....	215
FIGURE III.37 : CONTRAINTES A LA LIMITE D'ELASTICITE Re, A LA CONTRAINTE MAXIMUM ET A LA RUPTURE POUR DIFFERENTES VITESSES DE SOLLICITATION.....	217
FIGURE III.38 : EVOLUTION DU MODULE D'YOUNG E EN FONCTION DE LA VITESSE DE SOLLICITATION	218

FIGURE III.39 : DEFORMATIONS A LA LIMITE ELASTIQUE, A LA CONTRAINTE MAXIMUM ET A RUPTURE POUR DIFFERENTES VITESSES DE SOLLICITATION.....	219
FIGURE III.40 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE LA LIMITE ELASTIQUE ET DE LA DEFORMATION A LA LIMITE ELASTIQUE EN FONCTION DE LA VITESSE DE SOLLICITATION.....	220
FIGURE III.41 : COMPORTEMENT MECANIQUE EN TRACTION EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FIBRES (30 ET 40% EN MASSE).....	221
FIGURE III.42 : COMPARAISON DES PROPRIETES MECANQUES ENTRE UN COMPOSITE RENFORCE A 30 ET 40%.....	223
FIGURE III.43 : DIFFERENTS COMPORTEMENTS THEORIQUES LOCALES EN TRACTION D'UN AGRO- COMPOSITE EN FONCTION DE LA DEFORMATION LOCALE.....	226
FIGURE III.44 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA CORRELATION D'IMAGES	228
FIGURE III.45 : DEPLACEMENT LONGITUDINAL DE LA TRAVERSE ET DEPLACEMENT LOCAL CALCULE PAR LA METHODE DE LA CORRELATION D'IMAGES	229
FIGURE III.46 : PHOTO D'UNE EPROUVETTE SOLLICITEE EN TRACTION COUPLEE AVEC LA METHODE DE CORRELATION D'IMAGES (ZONES D'ETUDES GLOBALE ET LOCALE)	230
FIGURE III.47 : EVOLUTION DU DEPLACEMENT LOCAL U_y SUIVANT LA POSITION LONGITUDINALE y	231
FIGURE III.48 : DEPLACEMENT LOCAL U_y SUIVANT L'AXE DE TRACTION EN TOUTS POINTS DE L'EPROUVETTE : (A) CHAMP DE DEPLACEMENT THEORIQUE POUR UN MATERIAU HOMOGENE, (B) CHAMP DE DEPLACEMENT MESURE POUR UN AGRO-COMPOSITE CHANVRE (30% EN VOLUME) – POLYPROPYLENE INJECTE	231
FIGURE III.49 : EVOLUTION DU DEPLACEMENT LOCAL U_y SUIVANT LA POSITION TRANSVERSALE x	232
FIGURE III.50 : DEPLACEMENTS LOCAUX U_y A DIFFERENTS MOMENTS ET CORRESPONDANCE AVEC LA COURBE DE TRACTION	234
FIGURE III.51 : DEPLACEMENT LOCAL U_y SUIVANT LA LARGUEUR TRANSVERSALE x POUR UNE POSITION LONGITUDINALE DONNEE ($y=40\text{MM}$).....	235
FIGURE III.52 : EVOLUTION DU TAUX D'ACCROISSEMENT DU DEPLACEMENT LOCAL U_y AU COURS DE L'ESSAI	236
FIGURE III.53 : VARIATION DU DEPLACEMENT LONGITUDINAL U_y SUIVANT LA LARGUEUR x DE L'EPROUVETTE POUR DES POSITIONS y DONNEES (TEMPS D'ESSAIS EST DE 196s)	237
FIGURE III.54 : TAUX DE VARIATION DU DEPLACEMENT LONGITUDINAL $U_y(x)$ SUIVANT LA LARGUEUR DE L'EPROUVETTE x POUR DIFFERENTES POSITIONS y	238
FIGURE III.55 : DEPLACEMENTS TRANSVERSAUX $U_x(x)$ DANS LA MOITIE DE LA-LARGEUR DE L'EPROUVETTE	239
FIGURE III.56 : EVOLUTION DE LA DEFORMATION LONGITUDINALE ϵ_{yy} AU COURS DE L'ESSAI (DEFORMATIONS CALCULEES A PARTIR DU DEPLACEMENT DE LA TRAVERSE ET DE LA CORRELATION D'IMAGES)	240
FIGURE III.57 : DEFORMATIONS LOCALES ϵ_{yy} A DIFFERENTS TEMPS D'ESSAI ET CORRESPONDANCE AVEC LA COURBE DE TRACTION	242
FIGURE III.58 : IMAGE DES DEFORMATIONS LONGITUDINALES ϵ_{yy} LOCALES (A) AU MOMENT DE LA RUPTURE ET IMAGE DE L'EPROUVETTE APRES RUPTURE (B)	243

Table des figures

FIGURE III.59 : VARIATION DU MODULE D'YOUNG LOCAL SUIVANT LA LARGUEUR DE L'EPROUVETTE POUR DIFFERENTES POSITIONS Y (10, 20, 40, 60 ET 80MM)	245
FIGURE III.60 : EVOLUTION DU MODULE D'YOUNG LOCAL DANS LA LARGEUR ET LA LONGUEUR DE L'EPROUVETTE	246
FIGURE III.61 : VARIATION DU MODULE D'YOUNG LOCAL EN FONCTION DE LA POSITION LONGITUDINALE Y	248
FIGURE III.62 : EVOLUTION DU MODULE D'YOUNG SUIVANT LA LONGUEUR DE L'EPROUVETTE A UN TEMPS D'ESSAI DE 91,7 ET 111,43S (MESURE EFFECTUEE AU MILIEU DE L'EPROUVETTE A X = 5MM)	249
FIGURE III.63 : MODELISATION DE VOIGT	250
FIGURE III.64 : EVOLUTION DU POURCENTAGE MASSIQUE DE FIBRES EN FONCTION DE LA POSITION SUIVANT L'AXE LONGITUDINAL.....	251
FIGURE III.65 : CARTOGRAPHIE DU MODULE D'YOUNG EN TOUS POINTS DE L'EPROUVETTE.....	252
FIGURE IV.1 : MICROSCOPIE D'UNE FIBRE DE CHANVRE : FIBRE UNITAIRE (A) ET FAISCEAU (B).....	261
FIGURE IV.2 : COUPE TRANSVERSALE D'UN FAISCEAU DE FIBRES ET D'UNE FIBRE UNITAIRE	262
FIGURE IV.3 : SCHEMA D'UNE IMAGE NUMERIQUE D'UNE FIBRE.....	264
FIGURE IV.4 : EXEMPLES DE RESULTATS DU TRAITEMENT D'IMAGE POUR TROIS CAS	269
FIGURE IV.5 : RECONSTRUCTION 3D DE LA FIBRE, (A) : RECONSTRUCTION PARTIELLE A PARTIR DE DEUX SECTIONS ET (B) : RECONSTRUCTION MULTI-SECTIONS.....	271
FIGURE IV.6 : SECTION TRANSVERSALE D'UNE FIBRE UNITAIRE.....	271
FIGURE IV.7 : MODELISATION THEORIQUE DU COMPORTEMENT D'UNE FIBRE UNITAIRE	273
FIGURE IV.8 : PRINCIPE DE MISE EN TENSION DES CONSTITUANTS DE LA FIBRE UNITAIRE	274
FIGURE IV.9 : FONCTION DE DISTRIBUTION DE PROBABILITE $D(L_0(F_i))$	275
FIGURE IV.10 : EVOLUTION DE LA FONCTION PROBABILISTE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE LA FIBRE A UN INSTANT T	277
FIGURE IV.11 : ETAT DE CONTRAINTE DE LA FIBRE AU COURS DE LA MISE EN TENSION.....	278
FIGURE IV.12 : SCHEMATISATION DE LA TENSION D'UNE FIBRE (CAS GENERAL).....	278
FIGURE IV.13 : ETAT DE CONTRAINTE PARTIELLE D'UNE FIBRE.....	279
FIGURE IV.14 : SCHEMATISATION DE L'ETAT DE CONTRAINTE EFFECTIVE DE LA FIBRE.....	280
FIGURE IV.15 : EVOLUTION DE LA CONTRAINTE DE LA FIBRE EN FONCTION DU NOMBRE DE CONSTITUANTS SOLLICITES	281
FIGURE IV.16 : EVOLUTION LINEAIRE DE LA PROBABILITE DE MISE EN TENSION	281
FIGURE IV.17 : EVOLUTION PARABOLIQUE DE LA PROBABILITE DE MISE EN TENSION.....	283
FIGURE IV.18 : MODELE DE COMPORTEMENT D'UNE FIBRE UNITAIRE ET CAS EXPERIMENTAL (PARTIE I)	285
FIGURE IV.19 : VARIATION DU MODULE D'ELASTICITE EN FONCTION DE LA DEFORMATION CAS 2.....	286
FIGURE IV.20 : MODELE DE COMPORTEMENT LINEAIRE DE LA FIBRE (PARTIE II)	288
FIGURE IV.21 : MODELE DE COMPORTEMENT LINEAIRE DE LA FIBRE (PARTIE III)	289
FIGURE IV.22 : MODELE DE COMPORTEMENT DE LA FIBRE COMPARE AU COMPORTEMENT EXPERIMENTAL.....	290

FIGURE IV.23 : PRINCIPE DE PROPAGATION DES INCERTITUDES DANS UN MODELE DE COMPORTEMENT	
.....	291
FIGURE IV.24 : CAS THEORIQUE DE LA PROPAGATION DES INCERTITUDES DANS UN MODELE LINEAIRE	
.....	292
FIGURE IV.25 : MODELE DE COMPORTEMENT A DEUX PARTIES LINEAIRES	296

Table des tableaux

TABLEAU I-1 : EXEMPLES D'APPLICATION DES COMPOSITES RENFORCES PAR DES FIBRES DE LIN ET DE CHANVRE (SOURCE ADEME, 2005) [ERN05].....	21
TABLEAU I-2 : COMPARAISON DES PROPRIETES MECANIQUES D'UN COMPOSITE EPOXY/VERRE ET EPOXY/LIN [BAL05].....	23
TABLEAU I-3 : COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES RENFORCEES PAR DIFFERENTES NATURE DE FIBRE [BAL05].....	24
TABLEAU I-4 : RESISTANCE MECANIQUE ET DE MODULE D'YOUNG POUR DES COMPOSITES PP, PLA RENFORCES PAR DES FIBRES DE LIN, DE KENAF OU DE CHANVRE	24
TABLEAU I-5 : COMPOSITION CHIMIQUE DE FIBRES VEGETALES (TRAVAUX DE MC DOUGALL) [SIL08]	34
TABLEAU I-6 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES FIBRES VEGETALES	35
TABLEAU I-7 : PRIX INDICATIF DES FIBRES VEGETALES ET SYNTHETIQUES (EN €/KG).....	35
TABLEAU I-8 : DENSITE DES FIBRES VEGETALES, DE VERRE ET DE CARBONE.....	36
TABLEAU I-9 : EXEMPLE DE CARACTERISTIQUES MECANIQUES POUR DES FIBRES VEGETALES ET SYNTHETIQUES [SIL08].....	37
TABLEAU I-10 : CARACTERISTIQUES DES FIBRES DE CHANVRE [MOH05].....	40
TABLEAU I-11 : EXEMPLE DE PROPRIETES ELEMENTAIRES (RESISTANCE MECANIQUE ET MODULE D'YOUNG) POUR DES FIBRES DE CHANVRE	41
TABLEAU I-12 : DIAMETRES DE FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE MESURES PAR METHODE OPTIQUE [ROM04]	49
TABLEAU I-13 : VALEUR DES DIAMETRES MESURES APRES RUPTURE POUR DES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE [ROM04].....	49
TABLEAU I-14 : VALEURS DE DIFFERENTS PARAMETRES MECANIQUES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D'ESSAI ET DU TAUX D'HUMIDITE LORS DU CONDITIONNEMENT [MAD07]	57
TABLEAU I-15 : PROPRIETES MECANIQUES DES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE [ROM04].....	61
TABLEAU I-16 : PROPRIETES MECANIQUES DES FIBRES DE JUTE POUR DIFFERENTES LONGUEURS DE FIBRES [THI04]	62
TABLEAU I-17 : COUT EN ENERGIE NON RENOUVELABLE POUR LA FABRICATION DE FIBRE DE VERRE ET DE LIN [JOS04].....	67
TABLEAU I-18 : MODULE DE TRACTION ET DURETE DE FIBRES DE LIN AVANT ET APRES PROCESSUS DE MISE EN FORME [BOU10].....	75
TABLEAU II-1 : TYPES DE CHANVRE ETUDIES	81
TABLEAU II-2 : DIFFERENTS COMPOSITES ETUDIES.....	82
TABLEAU II-3 : PARAMETRE DU PROCEDE D'INJECTION DU PEP	83
TABLEAU II-4 : CARACTERISTIQUES DES ESSAIS DE TRACTIONS	87

TABLEAU II-5 : DIAMETRES DES ECHANTILLONS DE FIBRES UNITAIRES CARACTERISEES	99
TABLEAU II-6 : DETAIL DU COMPORTEMENT MECANIQUE THEORIQUE D'UNE FIBRE UNITAIRE DE CHANVRE EN FONCTION DES CINQ ZONES MONTREES SUR LE FIGURE II.16.....	102
TABLEAU II-7 : PROPRIETES MECANQUES EN TRACTION DES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE	105
TABLEAU II-8 : DIAMETRES DES ECHANTILLONS DES FAISCEAUX DE FIBRES CARACTERISEES	107
TABLEAU II-9 : EXEMPLES DE PROPRIETES MECANQUES EN TRACTION DES FAISCEAUX DE FIBRES DE CHANVRE.....	110
TABLEAU II-10: COMPARAISON DES PROPRIETES MECANQUES ENTRE LES FIBRES UNITAIRES ET LES FAISCEAUX DE CHANVRE	111
TABLEAU II-11: DETAILS DES DIFFERENTS TYPES DE CHANVRE CARACTERISES	124
TABLEAU II-12 : DONNEES GEOMETRIQUES DES FAISCEAUX DE CHANVRE	126
TABLEAU II-13 : PROPRIETES MECANQUES DES FIBRES UNITAIRES ET DES FAISCEAUX EN FONCTION DU TYPE DE FIBRE	138
TABLEAU II-14 : DEFORMATION A RUPTURE POUR LES FIBRES UNITAIRES ET LES FAISCEAUX EN FONCTION DU TYPE DE FIBRE DE CHANVRE.....	139
TABLEAU II-15 : PROPRIETES MECANQUES DES FIBRES UNITAIRES DE CHANVRE POUR DIFFERENTES MODELISATIONS DE LA GEOMETRIE DE LA FIBRE	151
TABLEAU III-1 : PROPRIETES MECANQUES EN TRACTION D'UN COMPOSITE PP - CHANVRE (FIBRE STANDARD DE 2009).....	172
TABLEAU III-2 : VALEURS DES DEFORMATIONS A RE, A LA CONTRAINTE MAXIMUM, A LA RUPTURE ET A LA STRICTION (TRACTION UNIAXIALE).....	173
TABLEAU III-3 : PROPRIETES MECANQUES EN FLEXION D'UN COMPOSITE PP - CHANVRE (FIBRE STANDARD)	176
TABLEAU III-4 : COMPARAISON PROPRIETES MECANQUES EN TRACTION ET EN FLEXION.....	176
TABLEAU III-5 : VALEUR DU COEFFICIENT DE POISSON POUR LE COMPOSITE RENFORCE PAR DES FIBRES DE CHANVRE STANDARD.....	178
TABLEAU III-6 : COMPARAISON DES PROPRIETES MECANQUES EN TRACTION DES FIBRES UNITAIRES ET FAISCEAUX DE CHANVRE, POLYPROPYLENE ET DU COMPOSITES	179
TABLEAU III-7 : DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES D'AGRO-COMPOSITES ANALYSES	193
TABLEAU III-8 : PROPRIETES MECANQUES D'UN AGRO-COMPOSITE PP / CHANVRE POUR DIFFERENTS TYPES DE FIBRES.....	195
TABLEAU III-9 : PROPRIETES MECANQUES EN FLEXION DES AGRO-COMPOSITES PP - CHANVRE RENFORCES PAR DIFFERENTS TYPES DE FIBRES DE CHANVRE (ANNEE 2009).....	200
TABLEAU III-10 : DENSITE ET POURCENTAGE EN FIBRES DES COMPOSITES PP- CHANVRE	205
TABLEAU III-11 : VALEUR DU MODULE D'YOUNG (MODELE DE VOIGT ET DONNEE EXPERIMENTALE) 205	
TABLEAU III-12 : PROPRIETES MECANQUES EN TRACTION D'UN AGRO-COMPOSITE PP / CHANVRE (FIBRES RECOLTEES EN 2011) POUR DIFFERENTES NATURES DE FIBRES	208
TABLEAU III-13 : PROPRIETES MECANQUES EN TRACTION D'UN AGRO-COMPOSITES PP - CHANVRE (PROCESSUS DE FABRICATION IFTS)	212

TABLEAU III-14 : PROPRIETES MECANIQUES EN TRACTION DES AGRO-COMPOSITES RENFORCES EN FONCTION DE LA VITESSE DE SOLLICITATION	217
TABLEAU III-15 : VALEUR DES DEFORMATIONS A LA LIMITE ELASTIQUE (R_e), A LA CONTRAINTE MAXIMUM ET A LA RUPTURE EN FONCTION DE LA VITESSE DE SOLLICITATION	220
TABLEAU III-16 : PROPRIETES MECANIQUES EN FONCTION DU POURCENTAGE DE FIBRES (30% ET 40% EN MASSE)	222
TABLEAU III-17 : DETERMINATION DU COEFFICIENT DE POISSON A PARTIR DES MESURES DE ϵ_{xx} ET ϵ_{yy} POUR DIFFERENTS INSTANTS DE TEMPS.....	253
TABLEAU IV-1 : DIAMETRES MESURES A PARTIR DES IMAGES OPTIQUES.....	266
TABLEAU IV-2 : VALEURS DU DIAMETRE ET DE LA SECTION DE LA FIBRE OBTENUES PAR DEUX METHODES DE MESURES DIFFERENTES	267
TABLEAU IV-3 : EXEMPLES DE GEOMETRIE DE FIBRE MODELISEE	270
TABLEAU IV-4 : DONNEES D'ENTREE ET DE SORTIE.....	293
TABLEAU IV-5: MESURES EXPERIMENTALES POUR PLUSIEURS FIBRE UNITAIRES	298
TABLEAU IV-6 : DONNEES CALCULEES EN CONSIDERANT UN MODELE A DEUX PARTIES LINEAIRES	298

Annexes:

Annexe I *p.331*

Annexe II *p.334*

Annexe III *p.346*


```

for (y=0;y<size.width-1;y++)
{
    for (x=0;x<size.height-1;x++)
    {
        pixel = cvGet2D(image, x, y);
        printf("%f\n",pixel.val[0]);
        if(pixel.val[0]>theshold_color)
        {
            counter_pixel++;
        }
        else
        {
            pixel_color = cvGet2D(image_color, x, y);
            pixel_color.val[0] = 0.0;
            pixel_color.val[1] = 111.0;
            pixel_color.val[2] = 111.0;
            cvSet2D(image_color, x, y, pixel_color);
        }
    }
}

printf("nombre pixel contenu dans la fibre = %d\n",
counter_pixel);

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Calcul de la taille d'un pixel
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

longueur_pixel= longueur_ref / size.width;
taille_pixel = longueur_pixel * longueur_pixel;
printf("la longueur d'un pixel est : %f\n",longueur_pixel);
printf("la surface d'un pixel est : %f\n",taille_pixel);

```

```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Affichage et fermeture des fenetres graphiques
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

cvNamedWindow("image", CV_WINDOW_AUTOSIZE);
cvNamedWindow("image_color", CV_WINDOW_AUTOSIZE);
cvShowImage("image", image);
cvShowImage("image_color", image_color);

cvWaitKey(0);

cvDestroyWindow("image");
cvDestroyWindow("image_color");
cvReleaseImage(&image);
cvReleaseImage(&image_color);

return 0;
}

```

Annexe II :

```
#include <cv.h>
#include <highgui.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

int calcul_max(int tableau[],int taille)          ////////////////
Routine pour le max d'un tableau ////////////////
{
    int i=0;
    int max;
    max=tableau[0];
    for (i=1;i<taille-1;i++)
    {
        if (tableau[i]>max)
        {
            max=tableau[i];
        }
    }
    return max;
}

int calcul_min(int tableau[],int taille)          ////////////////
Routine pour le min d'un tableau ////////////////
{
    int i=0;
    int min;
    min=tableau[0];
    for (i=1;i<taille-1;i++)
    {
        if (tableau[i]<min)
        {
            min=tableau[i];
        }
    }
    return min;
}
```

```

double Ylocal(double Ymin, double Ymax)
{
    double R=0;
    R = (Ymax+Ymin)/2;
    return R;
}

double changementderepere_X(double r, double R, double angle)
{
    double X=0;
    X = (r-R)*cos(angle);
    return X;
}

double changementderepere_Y(double r, double R, double angle)
{
    double Y=0;
    Y = (r-R)*sin(angle);
    return Y;
}

double rotation_x(double r, double angle)
{
    double xrot=0;
    xrot = r*cos(angle);
    return xrot;
}

double rotation_y(double r, double angle)
{
    double yrot=0;
    yrot = r*sin(angle);
    return yrot;
}

int main()
{
    double cosinus=0;
    double sinus=0;
    double R=0;

```

```

    /* variable détermination du profil haut et bas */
    //int** tableau_pixel=NULL;
    // variable allocation de memoire dynamique

    int tableau_pixelmax[300];
    // variable pour stocker le y des pixels > au seuil de gris
(calcul du max)
    int tableau_pixelmin[300];
    // variable pour stocker le y des pixels > au seuil de gris
(calcul du min)
    int tableau_max[1400];
    // variable qui stock les max de chaque collonne
    int tableau_min[1400];
    // variable qui stock les min de chaque collonne
    double tableau_coordonneemax[1400][7]; //
variable qui stock les coordonnées des pixel max (ligne i : ordonnées
pour chaque photo)
    double tableau_coordonneemin[1400][7]; //
variable qui stock les coordonnées des pixel min (ligne i : ordonnées
pour chaque photo)
    double tableau_coordonnee[1400][7];
    double tableau_coordonneemin_X[1400][7];
    double tableau_coordonneemin_Y[1400][7];
    double tableau_coordonneemax_X[1400][7];
    double tableau_coordonneemax_Y[1400][7];
    double section_x[12];
    double section_y[12];
    int max=0;
    // maximum d 1 collonne pour un x donné
    int min=0;
    // minimum d 1 collonne pour un x donné
    double angle=0;
    double orientation=0;

    int counter_pixel=0;
    // compteur de pixel
    double theshold_color=0;
    // seuil de gris
    double longueur_ref = 0;
    // longueur de référence de l'éprouvette = largeur image

```

```

char chaine[200];
// directory image à traiter
char chaine2[200];
// directory fichier créer
char chaine3[200];
// directory fichier2 créer
char chaine4[200];
char unite[20];
// nom de l'unité de mesure
int numep = 0;
// numero de l'éprouvette
int nep = 0;
// nombre de mesure ou d'orientatio,
int numexp = 0;
// numéro de l'échantillonnage

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Obtention des pixels contenus dans la
fibre //////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

printf("Le numero de l'experimentation est : ");
scanf("%d",&numexp);
printf("Le numero de l'eprouvette est : ");
scanf("%d",&numep);
printf("Le nombre de mesure est : ");
scanf("%d",&nep);
printf("Le seuil de gris est :");
scanf("%lf",&theshold_color);
printf("L'unite de mesure est :");
scanf("%s",&unite);
printf("longueur de reference de la fibre =");
scanf ("%lf",&longueur_ref);

for(u=0;u<5;u++)
{
    for(v=0;v<nep;v++)

```

```

for (i=1;i<nep+1;i++)
{
    counter_pixel=0;
    longueur_pixel= 0;
    taille_pixel = 0;
    surface_plane = 0;
    diametre_moyen = 0;
    surface_moyen = 0;
    section_x[i]=0;
    section_x[i+nep]=0;
    section_y[i]=0;
    section_y[i+nep]=0;

    sprintf(chaine,
"C:\\Temp\\camera_lab0\\e%d_%d_%d.bmp", numexp, numep, i);
    image=cvLoadImage(chaine,0);
    image_color=cvLoadImage(chaine,1);
    if (image != NULL)
    {
        // On peut lire et écrire dans le fichier
        printf("\n\nouverture de l image %s\n\n", chaine);
    }
    else
    {
        // On affiche un message d'erreur si on veut
        printf("Impossible d'ouvrir le fichier
e%d_%d_%d.bmp\n\n", numexp, numep, i);
    }

    size=cvGetSize(image);
    printf("width=%d\n",size.width);
    printf("height=%d\n\n",size.height);
    longueur_pixel= longueur_ref / size.width;

    width[i]=0;
    width[i]=size.width;

    /*
    tableau_pixel = malloc(sizeof(int)*size.width*size.height);
    //allocation de memoire dynamique

```

```

for (x=0;x<size.width;x++)
{
    tableau_max[x]=0;          // initialisation des tableaux
    tableau_min[x]=0;

    for (y=0;y<size.height;y++)
    {
        tableau_pixelmax[y]=0;      // initialisation
des tableaux
        tableau_pixelmin[y]=99999;
        pixel = cvGet2D(image, y, x);
        //printf("%f\n",pixel.val[0]);
        if(pixel.val[0]>theshold_color)
        {
            counter_pixel++;
            tableau_pixelmax[y]=y;
            tableau_pixelmin[y]=y;
        }
        else
        {
            pixel_color = cvGet2D(image_color, y, x);
            pixel_color.val[0] = 0.0;
            pixel_color.val[1] = 111.0;
            pixel_color.val[2] = 111.0;
            cvSet2D(image_color, y, x, pixel_color);
        }
    }
    max = calcul_max(tableau_pixelmax,size.height);
    tableau_max[x]=max;
    min = calcul_min(tableau_pixelmin,size.height);
    tableau_min[x]=min;
    tableau_cooronnee[x][i]=longueur_pixel*x;
    tableau_cooronneemax[x][i]=longueur_pixel*max;
    printf("%f  ",tableau_cooronnee[x][i]);
    printf("%f\n",tableau_cooronneemax[x][i]);
    tableau_cooronneemin[x][i]=longueur_pixel*min;
    printf("%f  ",tableau_cooronnee[x][i]);
    printf("%f\n",tableau_cooronneemin[x][i]);
    pixel_color.val[0] = 0.0;
    pixel_color.val[1] = 0.0;

```

```

        if (i==1)
        {
            angle =0;
        }
        else if (i!=1)
        {
            angle = (i-1)*36;
        }
        orientation = (angle*PI)/180;
        cosinus=cos(orientation);
        sinus=sin(orientation);

        R          =          Ylocal(tableau_coordonneemin[0][i],
tableau_coordonneemax[x][i]);
        tableau_coordonneemin_X[x][i]          =
changementderepere_X(tableau_coordonneemin[x][i], R, orientation);
        tableau_coordonneemin_Y[x][i]          =
changementderepere_Y(tableau_coordonneemin[x][i], R, orientation);
        tableau_coordonneemax_X[x][i]          =
changementderepere_X(tableau_coordonneemax[x][i], R, orientation);
        tableau_coordonneemax_Y[x][i]          =
changementderepere_Y(tableau_coordonneemax[x][i], R, orientation);

    }

    printf("R = %f",R);
    printf("\n orientation : %f en degree, %f en
rad\n",angle,orientation);
    printf("cos = %f, sin = %f",cosinus,sinus);
    printf("\nnombre pixel contenu dans la fibre = %d\n",
counter_pixel);

    //free(tableau_pixel);          //liberation de la memoir
allouee pour tableau_pixel

    //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////
    ////////////////////////////////////// Calcul de la taille d'un pixel

```

```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Calcul du diametre de la fibre
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

    surface_plane = taille_pixel*counter_pixel;
    tableau[2][i-1] = surface_plane;
    diametre_moyen = surface_plane / longueur_ref;
    tableau[3][i-1] = diametre_moyen;
    section_x[i]=diametre_moyen/2;
    section_x[i+nep]=-diametre_moyen/2;
    section_y[i]=diametre_moyen/2;
    section_y[i+nep]=-diametre_moyen/2;
    surface_moyen = (PI/4)*(diametre_moyen*diametre_moyen);
    tableau[4][i-1]= surface_moyen;
    printf("la surface des pixels (%s²) contenus dans la fibre
est : %f\n",unite,surface_plane);
    printf("la diametre moyen (%s) de la fibre
est : %f\n",unite,diametre_moyen);
    printf("la surface moyenne (%s²) de la fibre
est : %f\n",unite,surface_moyen);

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Affichage et fermeture des fenetres graphiques
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

    cvNamedWindow("image", CV_WINDOW_AUTOSIZE);
    cvNamedWindow("image_color", CV_WINDOW_AUTOSIZE);
    cvShowImage("image",image);
    cvShowImage("image_color",image_color);

    cvWaitKey(0);

    cvDestroyWindow("image");
    cvDestroyWindow("image_color");

```

Annexes:

```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Calcul du diametre moyen de la fibre
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

diametre_totale_moyen = calcul_diametre_moyen_total(tableau,nep);
surface_total_moyen =
diametre_totale_moyen*diametre_totale_moyen*(PI/4);
printf("\nLe diametre total (%s) moyen est
de : %f\n",unite,diametre_totale_moyen);
printf("Le surface totale moyenne (%s²) est
de : %f\n",unite,surface_total_moyen);

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Creation du fichier parametre_fibre.txt
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

fichier = fopen("C:\\temp\\parametre_fibre.txt", "w+");
if (fichier != NULL)
{
    // On peut lire et écrire dans le fichier
    printf("\n\nEcriture dans le fichier
parametre_fibre.txt\n");
}
else
{
    // On affiche un message d'erreur si on veut
    printf("\n\nImpossible d'ouvrir le fichier
parametre_fibre.txt\n\n");
}

fprintf(fichier, "%f,\n", longueur_ref);
fprintf(fichier, "%f,\n", diametre_totale_moyen);
fprintf(fichier, "%f,\n", surface_total_moyen);

```

```

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Creation du fichier parametre_ei.txt
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

sprintf(chaine2, "C:\\Temp\\parametre_e%d_%d.txt", numexp, numep);
fichier = fopen(chaine2, "w+");

if (fichier != NULL)
{
    // On peut lire et écrire dans le fichier
    printf("\nEcriture dans le fichier
parametre_e%d_%d.txt\n\n", numexp, numep);
}
else
{
    // On affiche un message d'erreur si on veut
    printf("\nImpossible d'ouvrir le fichier
parametre_e%d_%d.txt\n\n", numexp, numep);
}

fprintf(fichier, "L'unité de mesure est en : ");
fprintf(fichier, "%s,\n\n", unite);
fprintf(fichier, "Le seuil de gris est : ");
fprintf(fichier, "%f,\n\n", threshold_color);
fprintf(fichier, "La longueur de référence de l'éprouvette est :
");
fprintf(fichier, "%f %s,\n\n", longueur_ref, unite);

for (j=1; j<nep+1; j++)
{
    fprintf(fichier, "éprouvette e%d_%d_%d\n", numexp, numep, j);
    fprintf(fichier, "La longueur (%s) d'un pixel est :
", unite);
    fprintf(fichier, "%f,\n", tableau[0][j-1]);
    fprintf(fichier, "La taille d'un pixel (%s²) est : ", unite);
    fprintf(fichier, "%f,\n", tableau[1][j-1]);
    fprintf(fichier, "La surface plane (%s²) est : ", unite);
    fprintf(fichier, "%f,\n", tableau[2][j-1]);
}

```

```

    for (x=0;x<1400;x++)
    {
        for (i=1;i<nep+1;i++)
        {
            //if(tableau_coordonneemin[x][i]!=0)
            //{
                fprintf(fichier, "%f",
tableau_coordonnee[x][i]);
                fprintf(fichier, "%f",
tableau_coordonneemin[x][i]);
                fprintf(fichier, "%f",
tableau_coordonneemax[x][i]);
            //}
            //else
            //{
                // fprintf(fichier, "
            //}
        }
        fprintf(fichier, "\n");
    }

    fclose(fichier);

    //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////
    ////////////////////////////////////// Creation du fichier parametre_ei_points.txt
    //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////

    sprintf(chaine3,
"C:\\Temp\\parametre_e%d_%d_points.asc", numexp, numep);
    fichier = fopen(chaine3, "w+");

    if (fichier != NULL)
    {
        // On peut lire et écrire dans le fichier
        printf("Ecriture dans le fichier
parametre_e%d_%d_points.asc\n\n", numexp, numep);
    }

```

```

    {
        for (x=0;x<width[i];x++)
        {
            fprintf(fichier, "%f, ",
tableau_coordonneemin_X[x][i]);
            fprintf(fichier, "%f, ",
tableau_coordonneemin_Y[x][i]);
            fprintf(fichier, "%f, \n",
tableau_coordonnee[x][i]);
        }
        fprintf(fichier, "\n");
        for (x=0;x<width[i];x++)
        {
            fprintf(fichier, "%f, ",
tableau_coordonneemax_X[x][i]);
            fprintf(fichier, "%f, ",
tableau_coordonneemax_Y[x][i]);
            fprintf(fichier, "%f, \n",
tableau_coordonnee[x][i]);
        }
        fprintf(fichier, "\n");
    }

    fclose(fichier);

    //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////          Creation          du          fichier
    parametre_ei_sectionpoints.txt //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////
    //////////////////////////////////////

    sprintf(chaine4,
"C:\\Temp\\parametre_e%d_%d_sectionpoints.asc", numexp, numep);
    fichier = fopen(chaine4, "w+");

    if (fichier != NULL)
    {
        // On peut lire et écrire dans le fichier
        printf("Ecriture          dans          le          fichier
parametre_e%d_%d_sectionpoints.asc\n\n", numexp, numep);
    }

```

Annexe III :

Expression de la contrainte en fonction de la déformation

$$\sigma = M(\varepsilon) \qquad \sigma = E \cdot \varepsilon$$

Données d'entrée (données Gaussienne):

- La longueur initiale l_0
- Le module d'Young E : $\hat{E} \pm \sigma_E$
- La surface de l'éprouvette S : $\hat{S} \pm \sigma_S$
- Le déplacement de la traverse mobile u : $\hat{u} \pm \sigma_u$

Paramètres calculés (données Gaussiennes):

- La déformation ε : $\hat{\varepsilon} \pm \sigma_\varepsilon$
- La contrainte σ : $\hat{\sigma} \pm \sigma_\sigma$
- La force de traction F : $\hat{F} \pm \sigma_F$

1. Expression du modèle en fonction des incertitudes :

$$\hat{\sigma} \pm \sigma_\sigma = \hat{E} \pm \sigma_E \cdot \hat{\varepsilon} \pm \sigma_\varepsilon$$

2. Expression de la contrainte statistique maximum et minimum en fonction des incertitudes :

$$\sigma_{\max} = \hat{\sigma} + \sigma_\sigma = \left(\hat{E} + \sigma_E \right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon \right)$$

$$\sigma_{\min} = \hat{\sigma} - \sigma_\sigma = \left(\hat{E} - \sigma_E \right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} - \sigma_\varepsilon \right)$$

3. Détermination de la contrainte statistique moyenne en fonction des incertitudes :

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{\left(\hat{E} + \sigma_E\right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon\right) + \left(\hat{E} - \sigma_E\right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} - \sigma_\varepsilon\right)}{2} = \frac{2 \cdot \left(\hat{E} \cdot \hat{\varepsilon} + \sigma_E \cdot \sigma_\varepsilon\right)}{2}$$

Ainsi

$$\boxed{\hat{\sigma} = \hat{E} \cdot \hat{\varepsilon} + \sigma_E \cdot \sigma_\varepsilon}$$

4. Détermination de la déviation standard en fonction des incertitudes :

$$\sigma_\sigma = \sigma_{\max} - \hat{\sigma} = \left(\hat{E} + \sigma_E\right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon\right) - \hat{\sigma}$$

$$\sigma_\sigma = \left(\hat{E} + \sigma_E\right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon\right) - \hat{\sigma} = \left(\hat{E} + \sigma_E\right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon\right) - \hat{E} \cdot \hat{\varepsilon} + \sigma_E \cdot \sigma_\varepsilon$$

Ainsi

$$\boxed{\sigma_\sigma = \hat{E} \cdot \sigma_\varepsilon + \hat{\varepsilon} \cdot \sigma_E}$$

Expression de la contrainte en fonction de la force de traction

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

1. Expression du modèle en fonction des incertitudes :

$$\hat{\sigma} \pm \sigma_\sigma = \frac{\hat{F} \pm \sigma_F}{\hat{S} \pm \sigma_S}$$

2. Expression de la contrainte statistique maximum et minimum en fonction des incertitudes :

$$\sigma_{\max} = \hat{\sigma} + \sigma_\sigma = \frac{\hat{F} + \sigma_F}{\hat{S} + \sigma_S}$$

$$\sigma_{\min} = \hat{\sigma} - \sigma_\sigma = \frac{\hat{F} - \sigma_F}{\hat{S} - \sigma_S}$$

3. Détermination de la contrainte statistique moyenne en fonction des incertitudes :

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\hat{F} + \sigma_F}{\hat{S} + \sigma_S} + \frac{\hat{F} - \sigma_F}{\hat{S} - \sigma_S} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\left(\hat{F} + \sigma_F\right) \cdot \left(\hat{S} - \sigma_S\right) + \left(\hat{F} - \sigma_F\right) \cdot \left(\hat{S} + \sigma_S\right)}{\left(\hat{S} + \sigma_S\right) \cdot \left(\hat{S} - \sigma_S\right)} \right)$$

Annexes:

Ainsi

$$\hat{\sigma} = \frac{\hat{F} \cdot \hat{S} - \sigma_F \cdot \sigma_S}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2}$$

4. Détermination de la déviation standard en fonction des incertitudes :

$$\sigma_\sigma = \sigma_{\max} - \hat{\sigma} = \frac{\hat{F} + \sigma_F}{\hat{S} + \sigma_S} - \frac{\hat{F} \cdot \hat{S} - \sigma_F \cdot \sigma_S}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2}$$

$$\sigma_\sigma = \frac{\left(\hat{F} + \sigma_F\right) \cdot \left(\hat{S} - \sigma_S\right) - \left(\hat{F} \cdot \hat{S} - \sigma_F \cdot \sigma_S\right)}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2}$$

Ainsi

$$\sigma_\sigma = \frac{\hat{S} \cdot \sigma_F - \hat{F} \cdot \sigma_S}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2}$$

Expression de la force de traction en fonction du déplacement

$$F = M(u) \quad F = \frac{E \cdot S}{l_0} u$$

1. Expression du modèle en fonction des incertitudes :

$$\hat{F} \pm \sigma_F = \frac{\hat{E} \pm \sigma_E \cdot \hat{S} \pm \sigma_S}{l_0} \cdot u \pm \sigma_u$$

2. Expression de la force statistique de traction maximum et minimum en fonction des incertitudes :

$$F_{\max} = \hat{F} + \sigma_F = \frac{\left(\hat{E} + \sigma_E\right) \cdot \left(\hat{S} + \sigma_S\right)}{l_0} \cdot \left(u + \sigma_u\right)$$

$$F_{\min} = \hat{F} - \sigma_F = \frac{\left(\hat{E} - \sigma_E\right) \cdot \left(\hat{S} - \sigma_S\right)}{l_0} \cdot \left(u - \sigma_u\right)$$

3. Détermination de la force statistique de traction moyenne en fonction des incertitudes :

$$\hat{F} = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} = \frac{1}{2l_0} \left[\left(\hat{E} + \sigma_E \right) \left(\hat{S} + \sigma_S \right) \left(\hat{u} + \sigma_u \right) + \left(\hat{E} - \sigma_E \right) \left(\hat{S} - \sigma_S \right) \left(\hat{u} - \sigma_u \right) \right]$$

$$\hat{F} = \frac{1}{2l_0} \left[2\hat{E}\hat{S}\hat{u} + 2\hat{E}\sigma_S\sigma_u + 2\hat{S}\sigma_E\sigma_u + 2\hat{u}\sigma_E\sigma_S \right]$$

Ainsi

$$\boxed{\hat{F} = \frac{1}{l_0} \left[\hat{E}\hat{S}\hat{u} + \hat{E}\sigma_S\sigma_u + \hat{S}\sigma_E\sigma_u + \hat{u}\sigma_E\sigma_S \right]}$$

4. Détermination de la déviation standard en fonction des incertitudes :

$$\sigma_F = F_{\max} - \hat{F} = \frac{\left(\hat{E} + \sigma_E \right) \left(\hat{S} + \sigma_S \right) \left(\hat{u} + \sigma_u \right) - \hat{F}}{l_0}$$

$$\sigma_F = \frac{1}{l_0} \left[\left(\hat{E} + \sigma_E \right) \left(\hat{S} + \sigma_S \right) \left(\hat{u} + \sigma_u \right) - \left(\hat{E}\hat{S}\hat{u} + \hat{E}\sigma_S\sigma_u + \hat{S}\sigma_E\sigma_u + \hat{u}\sigma_E\sigma_S \right) \right]$$

Soit

$$\boxed{\sigma_F = \frac{1}{l_0} \left[\hat{E}\hat{S}\sigma_u + \hat{E}\hat{u}\sigma_S + \hat{S}\hat{u}\sigma_E + \sigma_E\sigma_S\sigma_u \right]}$$

Expression de la contrainte de traction en fonction du déplacement et du module d'Young

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

1. Expression du modèle en fonction des incertitudes :

$$\hat{\sigma} \pm \sigma_\sigma = \frac{\hat{F} \pm \sigma_F}{\hat{S} \pm \sigma_S}$$

2. Expression de la contrainte statistique maximum et minimum en fonction des incertitudes :

$$\sigma_{\max} = \hat{\sigma} + \sigma_\sigma = \frac{\hat{F} + \sigma_F}{\hat{S} + \sigma_S} = \frac{1}{l_0 \left(\hat{S} + \sigma_S \right)} \left[\hat{E}\hat{S}\hat{u} + \hat{E}\sigma_S\sigma_u + \hat{S}\sigma_E\sigma_u + \hat{u}\sigma_E\sigma_S + \hat{E}\hat{S}\sigma_u + \hat{E}\hat{u}\sigma_S + \hat{S}\hat{u}\sigma_E + \sigma_E\sigma_S\sigma_u \right]$$

En posant $A = \hat{E}\hat{S}\hat{u} + \hat{E}\sigma_S\sigma_u + \hat{S}\sigma_E\sigma_u + \hat{u}\sigma_E\sigma_S + \hat{E}\hat{S}\sigma_u + \hat{E}\hat{u}\sigma_S + \hat{S}\hat{u}\sigma_E + \sigma_E\sigma_S\sigma_u$

Annexes:

on a :

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{l_0 \left(\hat{S} + \sigma_S \right)} [A]$$

$$\sigma_{\min} = \hat{\sigma} - \sigma_{\sigma} = \frac{\hat{F} - \sigma_F}{\hat{S} - \sigma_S} = \frac{1}{l_0 \left(\hat{S} - \sigma_S \right)} \left[\hat{E} \hat{S} \hat{u} + \hat{E} \hat{\sigma}_S \hat{\sigma}_u + \hat{S} \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_u + \hat{u} \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S - \hat{E} \hat{S} \hat{\sigma}_u - \hat{E} \hat{u} \hat{\sigma}_S - \hat{S} \hat{u} \hat{\sigma}_E - \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S \hat{\sigma}_u \right]$$

En posant $B = \hat{E} \hat{S} \hat{u} + \hat{E} \hat{\sigma}_S \hat{\sigma}_u + \hat{S} \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_u + \hat{u} \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S - \hat{E} \hat{S} \hat{\sigma}_u - \hat{E} \hat{u} \hat{\sigma}_S - \hat{S} \hat{u} \hat{\sigma}_E - \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S \hat{\sigma}_u$

$$\sigma_{\min} = \frac{1}{l_0 \left(\hat{S} - \sigma_S \right)} [B]$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{1}{2l_0} \left[\frac{A}{\left(\hat{S} + \sigma_S \right)} + \frac{B}{\left(\hat{S} - \sigma_S \right)} \right] = \frac{1}{2l_0} \left[\frac{A \left(\hat{S} - \sigma_S \right) + B \left(\hat{S} + \sigma_S \right)}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2} \right]$$

$$A \left(\hat{S} - \sigma_S \right) + B \left(\hat{S} + \sigma_S \right) = 2 \hat{E} \hat{S}^2 \hat{u} + 2 \hat{S}^2 \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_u - 2 \hat{E} \hat{u} \hat{\sigma}_S^2 - 2 \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S^2 \hat{\sigma}_u$$

Soit

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{l_0} \left(\frac{\hat{E} \hat{S}^2 \hat{u} + \hat{S}^2 \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_u - \hat{E} \hat{u} \hat{\sigma}_S^2 - \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S^2 \hat{\sigma}_u}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2} \right)$$

Détermination de la déviation standard en fonction des incertitudes :

$$\sigma_{\sigma} = \sigma_{\max} - \hat{\sigma} = \frac{A}{l_0 \left(\hat{S} + \sigma_S \right)} - \frac{1}{l_0} \left(\frac{C}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2} \right) = \frac{1}{l_0} \left(\frac{A \left(\hat{S} - \sigma_S \right) - C}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2} \right)$$

Avec

$$C = \hat{E} \hat{S}^2 \hat{u} + \hat{S}^2 \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_u - \hat{E} \hat{u} \hat{\sigma}_S^2 - \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S^2 \hat{\sigma}_u$$

Ainsi

$$\sigma_{\sigma} = \frac{1}{l_0} \left(\frac{A \left(\hat{S} - \sigma_S \right) - C}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2} \right) = \frac{1}{l_0} \left(\frac{\hat{E} \hat{S}^2 \hat{\sigma}_u + \hat{S}^2 \hat{u} \hat{\sigma}_E - \hat{E} \hat{\sigma}_S^2 \hat{\sigma}_u - \hat{u} \hat{\sigma}_E \hat{\sigma}_S^2}{\hat{S}^2 - \sigma_S^2} \right)$$

Expression de la déformation :

$$\varepsilon = \frac{u}{l_0}$$

1. Expression du modèle en fonction des incertitudes :

$$\hat{\varepsilon} \pm \sigma_\varepsilon = \frac{u \pm \sigma_u}{l_0}$$

2. Expression de la force statistique de traction maximum et minimum en fonction des incertitudes :

$$\varepsilon_{\max} = \hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon = \frac{u + \sigma_u}{l_0}$$

$$\varepsilon_{\min} = \hat{\varepsilon} - \sigma_\varepsilon = \frac{u - \sigma_u}{l_0}$$

3. Détermination de la force statistique de traction moyenne en fonction des incertitudes :

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}}{2} = \frac{u}{l_0}$$

Ainsi

$$\boxed{\hat{\varepsilon} = \frac{u}{l_0}}$$

4. Détermination de la déviation standard en fonction des incertitudes :

$$\sigma_\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \hat{\varepsilon} = \frac{\sigma_u}{l_0}$$

Soit

$$\boxed{\sigma_\varepsilon = \frac{\sigma_u}{l_0}}$$

Expression du Module d'Young en fonction de la déformation et de la contrainte de traction

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

1. Expression du modèle en fonction des incertitudes :

$$\hat{E} \pm \sigma_E = \frac{\hat{\sigma} \pm \sigma_\sigma}{\hat{\varepsilon} \pm \sigma_\varepsilon}$$

2. Expression de la contrainte statistique maximum et minimum en fonction des incertitudes :

$$E_{\max} = \hat{E} + \sigma_E = \frac{\hat{\sigma} + \sigma_\sigma}{\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon}$$

$$E_{\min} = \hat{E} - \sigma_E = \frac{\hat{\sigma} - \sigma_\sigma}{\hat{\varepsilon} - \sigma_\varepsilon}$$

3. Détermination de la contrainte statistique moyenne en fonction des incertitudes :

$$\hat{E} = \frac{E_{\max} + E_{\min}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\hat{\sigma} + \sigma_\sigma}{\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon} + \frac{\hat{\sigma} - \sigma_\sigma}{\hat{\varepsilon} - \sigma_\varepsilon} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\left(\hat{\sigma} + \sigma_\sigma \right) \left(\hat{\varepsilon} - \sigma_\varepsilon \right) + \left(\hat{\sigma} - \sigma_\sigma \right) \left(\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon \right)}{\left(\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon \right) \left(\hat{\varepsilon} - \sigma_\varepsilon \right)} \right)$$

Ainsi

$$\hat{E} = \frac{\hat{\sigma} \cdot \hat{\varepsilon} - \sigma_\sigma \cdot \sigma_\varepsilon}{\hat{\varepsilon}^2 - \sigma_\varepsilon^2}$$

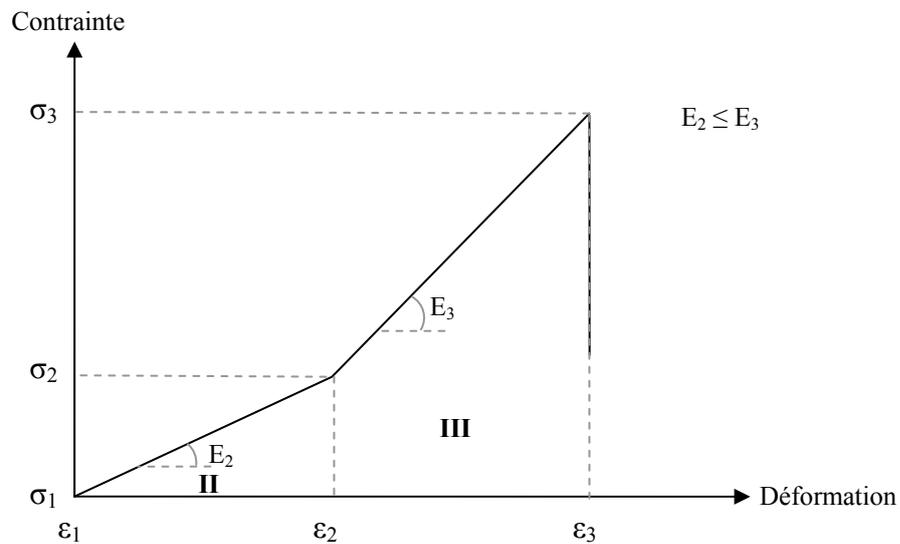
4. Détermination de la déviation standard en fonction des incertitudes :

$$\sigma_E = E_{\max} - \hat{E} = \frac{\hat{\sigma} + \sigma_\sigma}{\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon} - \hat{\sigma} = \frac{\hat{\sigma} + \sigma_\sigma}{\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon} - \frac{\hat{\sigma} \cdot \hat{\varepsilon} - \sigma_\sigma \cdot \sigma_\varepsilon}{\hat{\varepsilon}^2 - \sigma_\varepsilon^2}$$

$$\sigma_E = \frac{\left(\hat{\sigma} + \sigma_\sigma \right) \left(\hat{\varepsilon} - \sigma_\varepsilon \right) - \left(\hat{\sigma} \cdot \hat{\varepsilon} - \sigma_\sigma \cdot \sigma_\varepsilon \right)}{\hat{\varepsilon}^2 - \sigma_\varepsilon^2}$$

Ainsi

$$\sigma_E = \frac{\hat{\varepsilon} \cdot \sigma_\sigma - \sigma_\sigma \cdot \sigma_\varepsilon}{\hat{\varepsilon}^2 - \sigma_\varepsilon^2}$$



$$\sigma^{II}(\varepsilon) = E_2(\varepsilon - \varepsilon_1) + \sigma_1 \quad \varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2$$

$$\sigma^{III}(\varepsilon) = E_3(\varepsilon - \varepsilon_2) + \sigma_2 \quad \varepsilon_2 < \varepsilon < \varepsilon_3$$

Cas général :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \sigma_0$$

1. Expression du modèle en fonction des incertitudes :

$$\hat{\sigma} \pm \sigma_\sigma = \left(\hat{E} \pm \sigma_E \right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} \pm \sigma_\varepsilon \right) + \left(\hat{\sigma}_0 \pm \sigma_{\sigma_0} \right)$$

2. Expression de la contrainte statistique maximum et minimum en fonction des incertitudes :

$$\sigma_{\max} = \hat{\sigma} + \sigma_\sigma = \left(\hat{E} + \sigma_E \right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} + \sigma_\varepsilon \right) + \left(\hat{\sigma}_0 + \sigma_{\sigma_0} \right)$$

$$\sigma_{\min} = \hat{\sigma} - \sigma_\sigma = \left(\hat{E} - \sigma_E \right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} - \sigma_\varepsilon \right) + \left(\hat{\sigma}_0 - \sigma_{\sigma_0} \right)$$

3. Détermination de la contrainte statistique moyenne en fonction des incertitudes :

Annexes:

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{\left(\hat{E} + \sigma_E\right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} + \sigma_{\varepsilon}\right) + \left(\hat{E} - \sigma_E\right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} - \sigma_{\varepsilon}\right) + \left(\hat{\sigma}_0 + \sigma_{\sigma_0}\right) + \left(\hat{\sigma}_0 - \sigma_{\sigma_0}\right)}{2}$$

$$= \frac{2 \cdot \left(\hat{E} \cdot \hat{\varepsilon} + \sigma_E \cdot \sigma_{\varepsilon} + \hat{\sigma}_0\right)}{2}$$

Ainsi

$$\boxed{\hat{\sigma} = \hat{E} \cdot \hat{\varepsilon} + \sigma_E \cdot \sigma_{\varepsilon} + \hat{\sigma}_0}$$

4. Détermination de la déviation standard en fonction des incertitudes :

$$\sigma_{\sigma} = \sigma_{\max} - \hat{\sigma} = \left(\hat{E} + \sigma_E\right) \cdot \left(\hat{\varepsilon} + \sigma_{\varepsilon}\right) + \left(\hat{\sigma}_0 + \sigma_{\sigma_0}\right) - \left(\hat{E} \cdot \hat{\varepsilon} + \sigma_E \cdot \sigma_{\varepsilon} + \hat{\sigma}_0\right)$$

$$\text{Soit } \boxed{\sigma_{\sigma} = \hat{E} \cdot \sigma_{\varepsilon} + \hat{\varepsilon} \cdot \sigma_E + \sigma_{\sigma_0}}$$

Cas modèle à 2 parties linéaires :

- Partie II : $\sigma^{II}(\varepsilon) \pm \sigma_{\sigma^{II}(\varepsilon)} = \left(\hat{E}_2 \pm \sigma_{E_2}\right) \cdot \left(\varepsilon - \left(\hat{\varepsilon}_1 \pm \sigma_{\varepsilon_1}\right)\right) + \left(\hat{\sigma}_1 \pm \sigma_{\sigma_1}\right)$

1. Expression de la contrainte statistique maximum et minimum en fonction des incertitudes :

$$\sigma^{II}(\varepsilon)_{\max} = \sigma^{II}(\varepsilon) + \sigma_{\sigma^{II}(\varepsilon)} = \left(\hat{E}_2 + \sigma_{E_2}\right) \cdot \left(\varepsilon - \left(\hat{\varepsilon}_1 + \sigma_{\varepsilon_1}\right)\right) + \left(\hat{\sigma}_1 + \sigma_{\sigma_1}\right)$$

$$\sigma^{II}(\varepsilon)_{\min} = \sigma^{II}(\varepsilon) - \sigma_{\sigma^{II}(\varepsilon)} = \left(\hat{E}_2 - \sigma_{E_2}\right) \cdot \left(\varepsilon - \left(\hat{\varepsilon}_1 - \sigma_{\varepsilon_1}\right)\right) + \left(\hat{\sigma}_1 - \sigma_{\sigma_1}\right)$$

2. Détermination de la contrainte statistique moyenne en fonction des incertitudes :

$$\sigma^{II}(\varepsilon) = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{\left(\hat{E}_2 + \sigma_{E_2}\right) \cdot \left(\varepsilon - \left(\hat{\varepsilon}_1 + \sigma_{\varepsilon_1}\right)\right) + \left(\hat{\sigma}_1 + \sigma_{\sigma_1}\right) + \left(\hat{E}_2 - \sigma_{E_2}\right) \cdot \left(\varepsilon - \left(\hat{\varepsilon}_1 - \sigma_{\varepsilon_1}\right)\right) + \left(\hat{\sigma}_1 - \sigma_{\sigma_1}\right)}{2}$$

$$\hat{\sigma}^{II}(\varepsilon) = \frac{\hat{\sigma}_{\max} + \hat{\sigma}_{\min}}{2} = \frac{2 \left(\hat{E}_2 \cdot \hat{\varepsilon} - \hat{E}_2 \cdot \hat{\varepsilon}_1 - \hat{\sigma}_{E_2} \cdot \hat{\sigma}_{\varepsilon_1} + \hat{\sigma}_1 \right)}{2}$$

Ainsi $\boxed{\hat{\sigma}^{II}(\varepsilon) = \hat{E}_2 \cdot \hat{\varepsilon} - \hat{E}_2 \cdot \hat{\varepsilon}_1 - \hat{\sigma}_{E_2} \cdot \hat{\sigma}_{\varepsilon_1} + \hat{\sigma}_1}$

3. Détermination de la déviation standard en fonction des incertitudes :

$$\sigma_{\hat{\sigma}^{II}(\varepsilon)} = \hat{\sigma}^{II}(\varepsilon)_{\max} - \hat{\sigma}^{II}(\varepsilon) = \left(\hat{E} + \hat{\sigma}_E \right) \left(\hat{\varepsilon} + \hat{\sigma}_\varepsilon \right) + \left(\hat{\sigma}_0 + \hat{\sigma}_{\sigma_0} \right) - \left(\hat{E}_2 \cdot \hat{\varepsilon} + \hat{E}_2 \cdot \hat{\varepsilon}_1 + \hat{\sigma}_{E_2} \cdot \hat{\sigma}_{\varepsilon_1} + \hat{\sigma}_1 \right)$$

Soit $\boxed{\sigma_{\hat{\sigma}^{II}(\varepsilon)} = \varepsilon \cdot \hat{\sigma}_{E_2} \cdot - \hat{E}_2 \cdot \hat{\sigma}_{\varepsilon_1} - \hat{\varepsilon}_1 \cdot \hat{\sigma}_{E_2} \cdot + \hat{\sigma}_{\sigma_1}}$

- Partie III : $\hat{\sigma}^{III}(\varepsilon) \pm \sigma_{\hat{\sigma}^{III}(\varepsilon)} = \left(\hat{E}_3 \pm \hat{\sigma}_{E_3} \right) \left(\hat{\varepsilon} - \left(\hat{\varepsilon}_2 \pm \hat{\sigma}_{\varepsilon_2} \right) \right) + \left(\hat{\sigma}_2 \pm \hat{\sigma}_{\sigma_2} \right)$

4. Détermination de la contrainte statistique moyenne en fonction des incertitudes :

$$\boxed{\hat{\sigma}^{III}(\varepsilon) = \hat{E}_3 \cdot \left(\hat{\varepsilon} - \hat{\varepsilon}_2 \right) - \hat{\sigma}_{E_3} \cdot \hat{\sigma}_{\varepsilon_2} + \hat{\sigma}_2}$$

5. Détermination de la déviation standard en fonction des incertitudes :

$$\boxed{\sigma_{\hat{\sigma}^{III}(\varepsilon)} = \varepsilon \cdot \hat{\sigma}_{E_3} \cdot - \hat{E}_3 \cdot \hat{\sigma}_{\varepsilon_2} - \hat{\varepsilon}_2 \cdot \hat{\sigma}_{E_3} \cdot + \hat{\sigma}_{\sigma_2}}$$

Florent ILCZYSZYN

Doctorat : Systèmes Mécaniques et Matériaux

Année 2013

Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre

Dans les travaux de cette thèse, des fibres extraites de la plante de chanvre et des agro-composites polypropylène renforcés par des fibres courtes ont été étudiés. Des essais de caractérisations expérimentales alliés à une modélisation numérique ont permis de comprendre et de déterminer leurs comportements mécaniques en tenant compte des considérations géométriques, des défauts naturels ainsi que la taille des fibres.

De part leur nature, les fibres unitaires et les faisceaux de chanvre ont une structure, une forme et une composition complexe influençant leur comportement et leurs propriétés mécaniques. Les études menées dans cette thèse ont montré l'influence des conditions de cultures et de la variété de chanvre sur les propriétés des fibres et des agro-composites.

Concernant l'agro-composite, d'autres méthodes expérimentales à la fois optique et macroscopique ont été utilisées pour la caractérisation de son comportement. La méthode de corrélation d'images sous diverses sollicitations mécaniques a mis en lumière l'hétérogénéité du comportement local de ces matériaux, montrant ainsi la non-homogénéité des propriétés mécaniques. Une étude complémentaire a montré l'influence de la répartition des fibres et du processus de fabrication des agro-composites sur l'endommagement et la rupture du matériau.

Mots clés : composites – chanvre - fibres végétales – comportement mécanique.

Experimental and Numerical Characterization of Mechanical Behaviour of Biocomposites Reinforced by Hemp Fibres

In this thesis, fibres extracted from hemp plant and bio-composites polypropylene reinforced by short hemp fibres was investigated. Experimental studies coupled to numerical modelling have enabled to understand and determined their mechanical behaviour taking into account the geometrical shape, the natural defects and the size of hemp fibres. Microscopic experimental method has enabled to characterize the unitary fibre behaviour independently of fibre bundles.

Due to their vegetal origins, hemp unitary fibres and bundles present a complex morphology and structure which have an impact on the mechanical properties of composite. Studies carried out the effect of the growing conditions and hemp variety on the fibre behaviour.

For the bio-composite material, optical and macroscopic experimental characterization methods were used in order to determine the behaviour of a polypropylene PP reinforced by hemp fibres. The imaging correlation method is also used to analyse the local behaviour showing the heterogeneity of PP/hemp fibres reinforced material. Moreover, complementary work showed the impact of the fibre distribution and the manufacturing process on the composite properties and the damage initiation and growth.

Keywords: composites - hemp - natural fibres – mechanical behaviour.

Thèse réalisée en partenariat entre :

