

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE-CONCENTRATION GÉNIE MÉCANIQUE

PAR  
ABDERRAOUF KIOUA

ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE A L'IMPACT A BASSE VITESSE D'UN  
COMPOSÉT LIN/KEVLAR/ÉPOXY

MARS 2020

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## **DEDICACE**

AU NOM D'ALLAH LE TRES MISERICORDIEUX, LE TOUT MISERICORDIEUX.

À ma très chère mère Barika BATACHE, Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. Quoi que je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. Je n'espère ne jamais te décevoir ni trahir ta confiance et tes sacrifices. Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et Bonheur.

À ma très chère sœur Romaisa, je te remercie pour ton soutien continu. Puisses tu trouves dans ce travail le témoin de mon amour et de mon affection.

À mon cher petit cœur d'amour Zaid pour toute l'ambiance dont tu m'as entouré, pour toute la spontanéité et ton élan chaleureux, je te souhaite tout le bonheur du monde.

À la mémoire de mon grand-père maternel, la mémoire de ma grand-mère maternelle qui ont été toujours dans mon esprit et dans mon cœur, je vous dédie aujourd'hui ma réussite. Que Dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis.

À Fanie Poirier-Defoy et sa fille Maya, merci pour votre soutien, votre encouragement.

À mon frère Nordin LAKHDARI, Merci de m'avoir accueilli parmi vous. Je tiens à t'exprimer ma sincère reconnaissance et ma profonde estime.

## **REMERCIEMENTS**

Je souhaite avant tout remercier mon directeur de mémoire, Prof. Lotfi TOUBAL, pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma Co directrice de mémoire, Prof. Habiba BOUGHERARA. Je la remercie de m'avoir orienté, aidé et conseillé.

Je tiens à exprimer ma gratitude au professeur Rachid BOUKHILI de m'avoir accueilli, dans son laboratoire pour réaliser mes essais d'impact.

Mes grands remerciements vont à ma famille qui m'a toujours supporté au cours de ces années d'études

## **RESUME**

L'utilisation des fibres de Kevlar comme un renforcement dans les matériaux composites est devenue un intérêt dans le domaine de l'industrie à cause de la bonne capacité à absorber l'énergie d'impact à basse vitesse.

Cette étude porte sur le comportement mécanique des matériaux composites hybrides : Kevlar/Lin/époxy et lin/époxy dont le but est d'étudier l'influence de l'ajout des fibres de lin à un composite synthétique à base de fibre de kevlar. Pour cela, des essais expérimentaux à savoir : des essais de flexion 3, des essai Charpy, des essais d'impact à basse vitesse de type Puits de chute ont été effectués.

Les résultats obtenus montrent que la présence du kevlar améliore d'une manière importante la résistance et la rigidité ainsi que les énergies de ruptures du matériau hybride.

## **ABSTRACT**

The use of Kevlar fibers as a reinforcement in composites has knew a growing interest in the industry field because of its ability to absorb low-velocity impact energy.

In this study we investigate the mechanical behaviour of hybrid composite Kevlar / Flax and pure flax composite, with the aim of studing the influence of the addition of flax fibers to a synthetic composite made of Kevlar fibers. For this purpose, various experimental tests were carried out, namely: 3 and 4-point bending tests, Charpy test, and low velocity impact test.

The results of the experimental tests show that the presence of Kevlar leads to a significant increase of some mechanical proprieties, including Strength, Young modulus and the damage Resistance to a Drop-Weight Impact Event.

## Table des matières

<i>Chapitre I : Introduction.....</i>	<i>12</i>
I.1.     Introduction.....	13
I.2.     Problématique .....	14
I.3.     Question de recherche .....	15
I.4.     Objectifs .....	15
<i>Chapitre II : Revue de la littérature .....</i>	<i>16</i>
II.1.    Les fibres naturelles .....	17
II.1.1 Application .....	17
II.1.2 Classification des fibres naturelles .....	19
II.1.3 Composition et structure de la fibre de lin : .....	20
II.1.4 Les composites à renfort de fibres de lin .....	21
II.2.    Les fibres synthétiques .....	23
II.2.1 Fibre aramide/Kevlar.....	23
II.2.2 Caractéristiques physiques.....	23
II.2.3 Structure de la fibre de Kevlar.....	24
II.2.4 Propriétés mécaniques de Kevlar .....	24
II.2.5 Les composites à renfort des fibres de kevlar .....	25
II.2.6 Domaines d'applications de Kevlar .....	26
II.3.    Tests d'impact à basse vitesse .....	27
II.3.1 Définition.....	27
II.3.2 Essais de Charpy .....	28
II.3.3 Essais Izod.....	28
II.3.4 Essais du poids tombant.....	29
II.4.    Énergie dynamique dans les composites .....	29
II.5.    Caractéristiques qui influencent la résistance à l'impact.....	30
II.6.    Dommages suite à l'impact.....	30
<i>Chapitre III : Résultats des essais de flexion et de Charpy .....</i>	<i>32</i>
III.1 Introduction .....	33
III.2.    Fabrication.....	33
III.3.    Essais de Flexion.....	35
1. Procédure.....	35
2. Corrélation d'images numériques : .....	36
3. Émission acoustique : .....	36
III.4.    Essais de Charpy .....	36
1. Introduction : .....	36
2. Procédure :.....	37
3. Éprouvette .....	38
III.5.    Résultats .....	38
1. Essais de flexion .....	38
2. Essai Charpy .....	47
3. Essai de Charpy à température ambiante .....	47
4. Essai de Charpy à T= 0° C .....	49

5. Essai de Charpy à T= -22° C .....	53
6. Effet de la température :.....	55
<b>Chapitre IV : Impact à basse vitesse – Puits de chute .....</b>	<b>57</b>
IV.1. Introduction .....	58
IV.2. Essais .....	59
IV.3. Résultats.....	60
1. Énergie d'impact E = 5,5 J .....	60
2. Énergie d'impact E= 10J .....	66
3. Énergie d'impact E= 45J .....	72
4. La configuration [OK2/(0/90) 3F] S .....	77
IV.4. Caractérisation des dommages physiques : .....	80
<b>Chapitre V Conclusion.....</b>	<b>84</b>

## Liste des figures

Figure II-1 Classification des différents types des fibres naturelles [19].....	19
Figure II-2 Type de renforts (fibres naturelles). Adapté [17-18] .....	20
FigureII-3 La structure d'une cellule de fibre de lin [22].....	21
Figure III-1 Schéma explicatif de l'assemblage stratifié Kevlar/ Lin.....	34
Figure III-2 Plan de découpe de la plaque : éprouvettes de flexion, Charpy et Impact .....	34
Figure III-3 Dimension d'éprouvette de flexion 3 points .....	35
Figure III-4 Machine d'essai de flexion équipée d'une camera CCD et deux capteurs d'émission acoustique .....	35
Figure III-5 Procédure de l'essai de Charpy [51] .....	36
Figure III-6 Machine de Charpy mouton pendule CEAST 9050 utilise dans les tests .....	37
Figure III-7 Dispositif pour créer une entaille en V .....	38
Figure III-8 Graphe contrainte-déformation pour les stratifiés [0K <sub>2</sub> /0F <sub>6</sub> ] s.....	39
Figure III-9 Graphe contrainte-déformation pour les stratifiés [0K <sub>2</sub> /(0/90)3F]s.....	40
Figure III-10 Graphe contrainte-déformation pour les stratifiés [0K <sub>2</sub> /±45F <sub>6</sub> ]s.....	40
Figure III-11 Contrainte-déformation pour les stratifiés [0]F16.....	42
Figure III-12 Contrainte-déformation pour les stratifiés [±45] F16.....	42
Figure III-13 Comparaisons entre les différents matériaux .....	44
Figure III-14 (a) face arrière de [±45] F16, (b) face arrière de [0] F16 .....	44
Figure III-15 Les faces supérieures et arrière pour les différents configurations (matériau hybride) .....	45
Figure III-16 L'évolution de l'énergie acoustique et la courbe contrainte-déformation : (a) [0K <sub>2</sub> /±45F <sub>6</sub> ], (b)[0K <sub>2</sub> /(0/90)3F] S et (c) [0K <sub>2</sub> /0F <sub>6</sub> ] .....	46
FigureIII-17 Résumé des données recueillies à température ambiante .....	49
Figure III-18 Résumé des données recueillies à T= 0°C .....	52
Figure III-19 Résumé des données recueillies à T= -22°C .....	54
Figure III-20 Effet de la température sur la ténacité des différents stratifiés pour le composite hybride.....	55
Figure III-21 Effet de la température sur la ténacité des différents stratifiés pour le composite lin.....	56
Figure III-22 Les ruptures macroscopiques obtenues des éprouvettes après le test Charpy....	56
Figure IV-1 ILa machine d'essais à masse tombante instrumentée modèle 8250.....	58
Figure IV-2 Essais d'impact de stratifiés composites : (a) Force-temps, (b) Énergie-temps et (c) Force-déplacement [50] .....	59
Figure IV-3 La force en fonction de temps pour l'empilement 45° .....	61
Figure IV-4 La force en fonction de temps pour l'empilement 0° .....	61
Figure IV-5 Le premier dommage produit dans la configuration a 45° .....	62
Figure IV-6 Le premier dommage produit dans la configuration à 0° .....	62
Figure IV-7 Énergies en fonction de temps pour la configuration à 45° .....	63
Figure IV-8 Énergies en fonction de temps pour la configuration à 0° .....	64
Figure IV-9 Force en fonction de déplacement pour l'empilement 0° .....	65
Figure IV-10 Force en fonction de déplacement pour l'empilement 45° .....	65
Figure IV-11 La force en fonction de temps pour la configuration à 45° .....	67
Figure IV-12 La force en fonction de temps pour la configuration à 0° .....	68
Figure IV-13 Le premier dommage pour la configuration à 45° .....	68
Figure IV-14 Énergies en fonction de temps pour la configuration 0° .....	70
Figure IV-15 Force en fonction de déplacement pour la configuration 45° .....	71

FigureIV-16 Force en fonction déplacement pour la configuration 0° .....	71
Figure IV-17 La force en fonction de temps pour l'empilement 45° .....	73
Figure IV-18 La force en fonction de temps pour l'empilement 0°.....	73
Figure IV-19 Le premier dommage configuration 45° .....	74
Figure IV-20 Le premier dommage configuration 0° .....	74
Figure IV-21 Énergies en fonction de temps pour l'empilement 45° .....	75
Figure IV-22 Énergies en fonction de temps pour l'empilement 0° .....	75
Figure IV-23 Force en fonction de déplacement pour l'empilement 0° .....	76
Figure IV-24 Force en fonction de déplacement pour l'empilement 0° .....	76
Figure IV-25 La force en fonction de temps .....	78
Figure IV-26 Premier dommage .....	78
Figure IV-27 Énergies en fonction de temps .....	79
FigureIV-28 Force en fonction de déplacement.....	80
FigureIV-29 Les faces arrière pour le Kevlar/lin avec différents niveaux d'énergie.....	80
FigureIV-30 Les faces d'impact pour le kevlar/lin avec différents niveaux d'énergie.....	81
FigureIV-31 Les faces d'impact pour le lin avec différents niveaux d'énergie .....	82
FigureIV-32 Les faces arrière pour le lin avec différents niveaux d'énergie.....	82

## Liste des tableaux

Tableau II-1 Exemples de pièces pour automobiles fabriquées à base de composite à fibre naturelle [12] .....	17
Tableau II-2 Autre demain d'application de fibre naturelle [13-14].....	18
TableauII-3 Propriétés mécaniques pour les différents types de kevlar.....	25
Tableau II-5 Propriétés mécaniques de : Lin, Kevlar et Kevlar/lin [37].....	26
Tableau III-1 Résultats collectés lors des essais flexion 3 point pour stratifie [0 <sub>K2</sub> /0 <sub>F6</sub> ] S.....	41
Tableau III-2 Résultats collecter lors des essais flexion 3 point pour stratifie [0 <sub>K2</sub> /(0/90) <sub>3F</sub> ]S	41
Tableau III-3 Résultats collecter lors des essais flexion 3 point pour stratifie [0K2/ $\pm$ 45F6] S	41
Tableau III-4 Résultats collecter lors des essais flexion 3 points pour stratifiant [0] F16.....	43
Tableau III-5 Résultats collecter lors des essais flexion 3 point pour stratifie [ $\pm$ 45] F16 .....	43
Tableau III-6 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement 0° .....	47
Tableau III-7 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement $\pm$ 45 .....	48
Tableau III-8 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement (0/90).....	48
Tableau III-9 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement 0° .....	50
Tableau III-10 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement $\pm$ 45 .....	51
Tableau III-11 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement (0/90).....	51
Tableau III-12 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement 0° .....	53
Tableau III-13 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement $\pm$ 45 .....	53
TableauIII-14 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement (0/90).....	54
Tableau IV-1 Les résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 5,5 J.....	60
Tableau IV-2 Les résultats collectes lors d'impact à basse vitesse E= 5,5 J.....	60
TableauIV-3 Des résultats collectés d'impact à basse vitesse E= 10 J .....	66
TableauIV-4 Des résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 10 J .....	66
Tableau IV-5 Résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 45 J .....	72
Tableau IV-6 Résultats collectés lors de l'impact à basse vitesse E= 45 J .....	72
Tableau IV-7 Résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 5,5 J .....	77
Tableau IV-8 Résultats collectes lors d'impact à basse vitesse E= 10 J .....	77
Tableau IV-9 Résultats collectes lors d'impact à basse vitesse E= 45 J .....	77



## **Chapitre I : Introduction**

## I.1. Introduction

La bonne capacité des composites à base de fibres de Kevlar à absorber l'énergie d'impact à basse vitesse leur a permis d'être utilisés dans différentes applications industrielles, notamment dans la fabrication de casques ou pour le renforcement des coques de bateaux [1]. Néanmoins, ces matériaux présentent quelques problèmes. Ils sont coûteux, leur procédé d'obtention est énergivore et leur recyclage, une fois imprégné de résine dans un composite, pose problème. De nos jours lorsque l'on veut fabriquer un nouveau produit il faut penser à son impact sur l'environnement, d'où l'utilisation croissante des matériaux composites et plus précisément des écocomposites à base de fibres naturelles. D'après plusieurs études [1-5], les composites à fibres naturelles (CFN) peuvent rentrer en compétition en remplaçant totalement ou partiellement les composites à fibres synthétiques non renouvelables dans plusieurs domaines tels que le textile, l'agriculture, le naval, le génie civil, etc. Il faut noter que les propriétés mécaniques des fibres végétales sont plus faibles par rapport à celles des fibres de verre les plus largement utilisées. Toutefois, en raison de leur faible densité, les propriétés mécaniques spécifiques des fibres végétales sont comparables à celles des fibres de verre.

Ce travail s'inscrit dans une dynamique liée à l'intérêt et l'utilisation accrue des fibres naturelles dans la mise en œuvre de nouvelles pièces en composites. Au cours de sa durée de vie, un matériau va obligatoirement subir nombre de sollicitations et dégradations et les fonctions des pièces composées de ces derniers peuvent en être altérées. Il est donc nécessaire de prévoir ces sollicitations extérieures dans le but d'éviter les risques, mais également pour optimiser les performances et la maintenance des pièces en question. Ce travail s'intéresse donc à l'évaluation du comportement mécanique, la résilience, la résistance à l'impact et l'endommagement des matériaux CFN.

## I.2. Problématique

Les performances mécaniques des CFN offrent aujourd’hui de nouvelles perspectives pour la conception de structures (faibles densités, bonnes propriétés mécaniques, faibles coûts, etc.). Cependant, contrairement aux composites à fibres synthétiques, plus fiables, car produits dans des conditions contrôlées, la disparité des propriétés mécaniques des CFN couplée au manque d’information sur leurs modes d’endommagement sous des sollicitations instantanées (impact, etc.,) ou différées (flUAGE, fatigue, etc.,) empêchent leur utilisation à grande échelle [6-10]. Dans cette étude on s’intéresse à évaluer la contribution de l’ajout de quatre couches de kevlar à l’amélioration de la résistance à l’impact à basse vitesse (résilience) d’un composite à base de fibres de lin. Bien que l’aire sous la courbe contrainte-déformation d’un essai de traction représente l’énergie dépensée par unité de volume pour rompre le matériau (appelée aussi la ténacité), la résistance que l’on vise à étudier ici est différente de la résistance observée dans un essai de traction statique. Pendant sa durée de vie, une pièce peut subir des chocs mécaniques brutaux. Pour cette situation, nous devons faire appel à des essais où on doit adapter la vitesse de sollicitation que doit subir réellement le matériau. Deux types de séquences d’empilement ont été utilisés pour cette étude. Les résultats obtenus sont comparés et l’effet de l’orientation des plis ainsi l’ajout de quatre couches de kevlar sont présentés.

Les matériaux composites sont considérés comme une vraie alternative aux matériaux métalliques suite à leurs propriétés mécaniques spécifiques importantes. Les composites à base de fibre de kevlar ont une bonne capacité à absorber l’énergie d’impact à basse vitesse et cela mène à leur utilisation dans les différents domaines et applications industrielles, notamment l’aéronautique, l’industrie d’automobile, fabrication de câbles, de casques ou le renforcement des coques des bateaux. Néanmoins, ces matériaux présentent quelques problèmes. Ils sont coûteux, leur procédé d’obtention est énergivore leur recyclage, une fois imprégné de résine dans un composite, pose problème. Ce qui a mené des chercheurs à se tourner vers des composites à base de fibres naturelles (lin, chanvre, jute, sisal, etc.) en association ou en remplacement des fibres synthétiques dans les matériaux composites.

### **I.3. Question de recherche**

Notre étude vise à répondre aux questions suivantes :

1. Quel est l'effet de l'ajout de couches de kevlar sur l'endommagement d'un composite lin/époxy ?
2. Quel est l'effet de l'orientation des plis sur le seuil d'endommagement des deux matériaux étudiés (hybride et lin/époxy) ?
3. Une température basse modifie telle la résilience du matériau de l'étude ?

### **I.4. Objectifs**

Les écocomposites offrent un bon compromis : propriétés/coûts/écologie, mais, leurs utilisations restent limitées aux applications non structurelles.

Afin de répondre à cette question de recherche, des essais de flexion 3 points, des essais Charpy et d'impact à basse vitesse seront réalisé dans le but de :

- Déterminer les propriétés mécaniques de l'écocomposite.
- Évaluer l'ajout de couches de kevlar sur l'énergie de rupture par impact (essais Charpy et Puits de chute).
- Évaluer l'effet de la température sur la résilience de l'écocomposite.

## **Chapitre II : Revue de la littérature**

Depuis les trente dernières années l'utilisation des composites à fibres naturelles ne cessent d'augmenter. De nos jours, le développement de matériaux issu de la biomasse représente un enjeu écologique et un défi technique important. Sans être exhaustif, ce chapitre résumera quelques travaux concernant les composites à fibres naturelles et leurs performances mécaniques.

## II.1.Les fibres naturelles

Plusieurs recherches indiquent que les fibres naturelles ont un coût inférieur à celui des fibres synthétiques [15-16]. Dans ce travail, on se concentre sur les fibres de lin comme une fibre naturelle, parce que les fibres de lin ont une meilleure résistance spécifique, une faible densité, une haute résistance et une grande rigidité.

### II.1.1 Application

Historiquement, depuis les années 40 en raison de la rareté de l'approvisionnement des ressources naturelles par rapport aux matériaux métallique tel que l'aluminium, les industriels se sont tournés vers des matériaux naturels facilement accessible. On trouve ces matériaux comme renfort dans différentes pièces du secteur manufacturé (fabrication des sièges, des fuselages d'avions, voir même des voitures [7]. Les fibres naturelles ont continué à se développer surtout dans industrie automobile pour habillés l'intérieur des voitures ou d'autres parties de voitures (Mercedes classe E, Daimler Chrysler... etc.), dans le but de réduire le coût et le poids des véhicules. Le Tableau II-1 présente quelques exemples de pièces fabriquées à base de fibre naturelle dans le domaine d'automobile.

Tableau II-1 Exemples de pièces pour automobiles fabriquées à base de composite à fibre naturelle [12]

Manufacturier	Modèle	Composantes
Audi	A2, A3, A4, A4 Avant, A6, A8, Roadster, Coupe	Sièges arrière, panneaux de portes arrière et de côté, doublures de coffre, porte-chapeaux, doublures de roues de secours
Citroën	C5	Panneaux de portes intérieurs
BMW	3, 5, 7 séries	Panneaux de portes, panneaux de garniture de pavillon, doublures de coffre, sièges arrière, panneaux d'isolation acoustique, doublures de plancher
Lotus	Eco Elise	Panneaux de carrosserie, spoilers, sièges, tapis intérieurs
Fiat	Punto, Brava, Marea, Alfa Romeo 146, 156	Panneaux de portes
Opel	Astra, Vectra, Zafira	Panneaux instrumentaux, panneaux de garniture de pavillon, panneaux de portes, panneaux de couverture de piliers
Peugeot	406	Panneaux de portes avant et arrière

<b>Rover</b>	2000 et autres	Isolation, étagères arrière de rangement/panneaux
<b>Toyota</b>	Raum, Brevis, Harrier, Celsior	Panneaux de portes, sièges arrière, tapis de sol, couvre-roues de secours
<b>Volkswagen</b>	Golf A4, Passat Variant, Bora	Panneaux de portes, sièges arrière, panneaux de finition du couvercle de coffre, doublures de coffre
<b>Mitsubishi</b>	Space star, Colt	Planchers de coffre, panneaux de portes, panneaux instrumentaux
<b>Renault</b>	Clio, Twingo	Étagères arrière
<b>Daimler-Benz</b>	Mercedes A, C, E, S class, Trucks, EvoBus (exterior)	Panneaux de portes, pare-brise/tableaux de bord, panneaux de couverture de piliers, boîtes à gants, panneaux de support instrumental, isolation, panneaux d'ouvertures, panneaux de dossier de sièges, panneaux de coffre, surfaces de sièges/dossiers, couvertures internes du moteur, isolation du moteur, pare-soleils, pare-chocs, boîtes de roues, couvertures de toit
<b>Honda</b>	Pilot	Planchers de coffre
<b>Volvo</b>	C70, V70	Rembourrages de sièges, panneaux de plancher de coffre
<b>General Motors</b>	Cadillac Deville, Chevrolet TrailBlazer	Sièges arrière, planchers de coffre
<b>Saturn</b>	L3000	Panneaux de garniture de tablette arrière et panneaux de portes
<b>Ford</b>	Mondeo CD 162, Focus, freestar	Panneaux de plancher, panneaux de portes, B-piliers, doublures de coffre

Il y a d'autres secteurs économiques où les composites à fibres naturelles ont une place de choix (Tableau II-2), principalement : Le domaine de la santé et les produits pharmaceutiques, les soins à domicile, les additifs pour l'alimentation humaine et animale, la construction, l'emballages, les pâtes et papiers, etc. L'utilisation de ces fibres naturelles dans ces domaines peut représenter un gain important d'un point de vue économique et écologique.

Tableau II-2 Autre demain d'application de fibre naturelle [13-14]

<b>FIBRE</b>	<b>APPLICATION</b>	<b>COMPOSITION</b>	<b>MANUFACTURIÈRE</b>
<b>COCO</b>	Conteneurs, boîtes, plateaux, emballages	Coco et caoutchouc naturel	Enkev
<b>LIN</b>	Panneau mural vert	50 %-résine recyclée renforcée de 25 % de Lin et 25 % de fibre de verre	Innovation in green composite technology
<b>LIN, CHANVRE</b>	Vélo de course Étuis pour instruments de musique	Lin, Chanvre et époxy Plastiques (PLA et PP) et additifs, fibres naturelles	Museeuw Bikes Green line
<b>LIN, BALSA, BOIS</b>	Sports d'été et d'hiver	Fibre naturelle et matériau composite renforcé	bcom

<b>CHANVRE, KENAF, JUTE</b>	Conteneurs pour l'expédition et le stockage, panneaux intérieurs, planchers de chargement et boucliers de soubassement pour voitures et camions, panneaux d'espace de travail et Mobilier pour bureaux et maisons, support structurel pour plants agricoles	Fibres naturelles et FlexForm Technologies polymères thermoplastiques fibreux
<b>KENAF BOIS</b>	Pochette de téléphone portable Construction de maison modulaire	Kenaf et PLA Le bois composite NEC Tech-Wood International

### II.1.2 Classification des fibres naturelles

Les fibres naturelles peuvent être divisées en six catégories principales en fonction de leur source d'extraits, les fibres libériennes (Lin, Jute, chanvre... etc.), les fibres de feuille (Sisal, PAFL, henequen...), fibre de graine (coton, kapok, ...), les fibres de fruit (coco, palmier), fibres de bois (bois dur et bois tendre), fibres de tige (riz, blé, orge...) et les fibres d'herbe (bamboo, bagasse...) [19]. Voici un organigramme qui illustre les différents types des fibres naturelles et leurs classifications figure II-1.

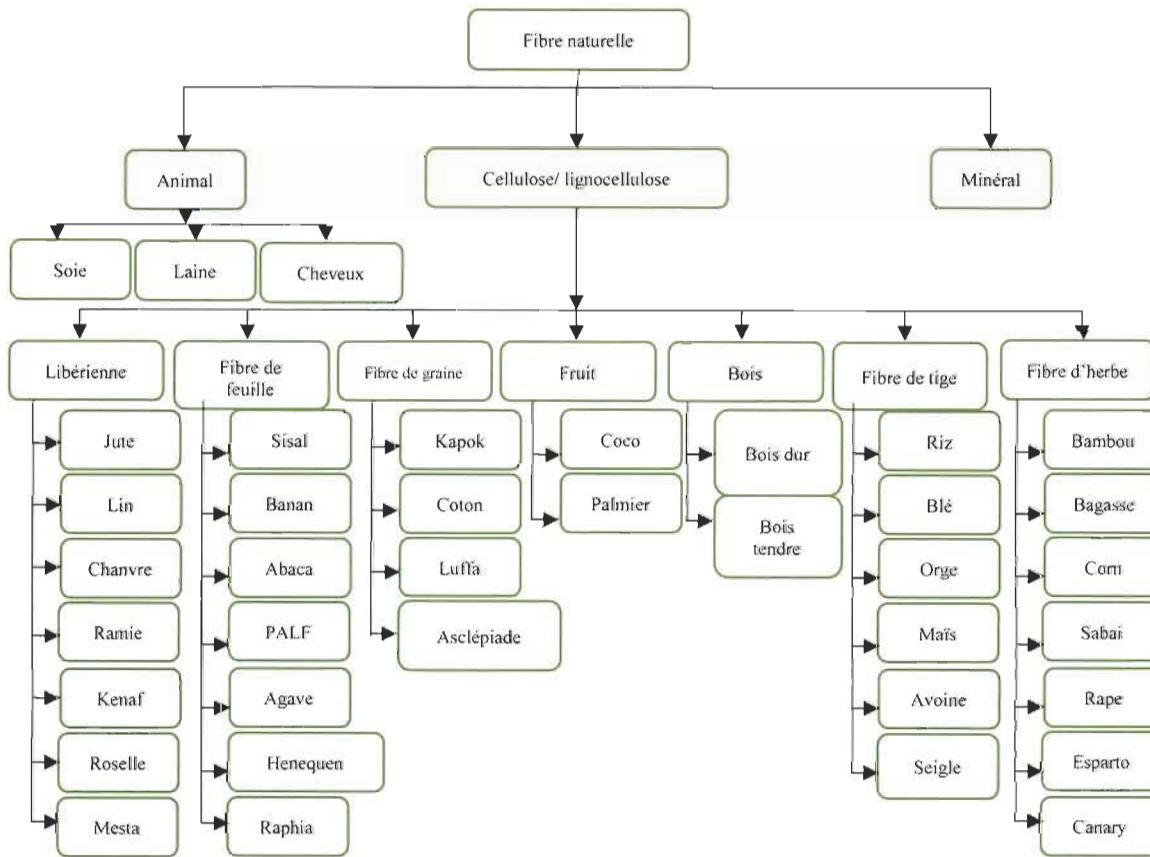


Figure II-1 Classification des différents types des fibres naturelles [19].

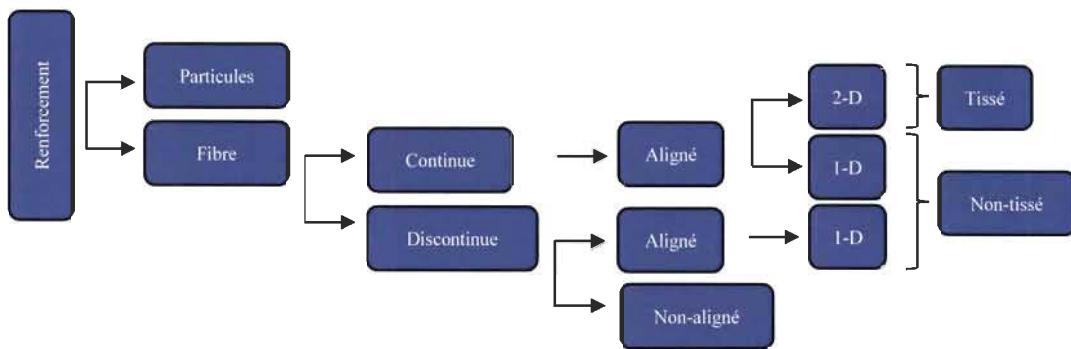


Figure II-2 Type de renforts (fibres naturelles). Adapté [17-18]

Les fibres végétales sont les plus utilisées dans le domaine industriel et font l'objet de plusieurs travaux de recherche dans le domaine académique. Les renforts en fibres naturelles peuvent être défini en fonction de la longueur, la largeur et l'orientation. La fibre elle-même est caractérisée comme des fibres continues ou discontinues (Figure II-2). Lorsque des fibres continues sont utilisées, l'architecture de celles-ci peut avoir plus d'une dimension [17].

### II.1.3 Composition et structure de la fibre de lin :

Une tige de lin est composée de plusieurs parts : la lacune, le xylème, le cambium, le phloème, le cortex et l'épiderme figure II-3. À l'intérieur du phloème se trouve des faisceaux et un ensemble de plusieurs fibres élémentaires, regroupent jusqu'un une quarantaine de fibres reliées entre elles par une interphase à base de pectines qui s'appelle lamelle mitoyenne [20- 22]

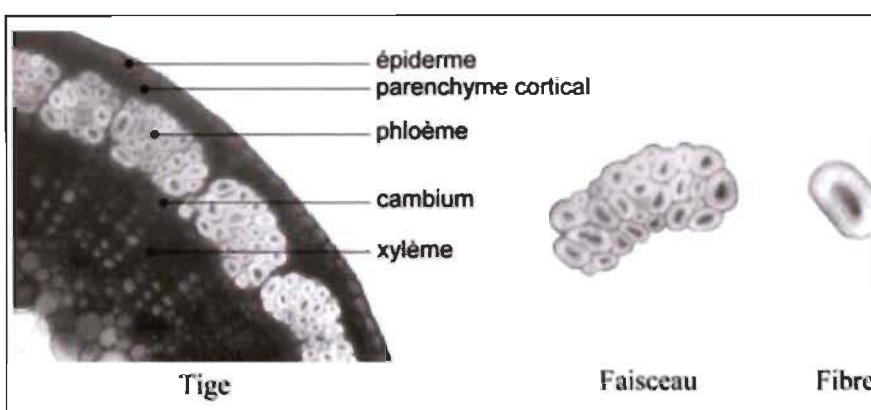


Figure II-3. Micrographie optique d'une fibre de lin [22]

La figure II-5. Illustré la constitution pariétale d'une fibre de lin, le lumen c'est la partie qui contribue à la circulation de l'eau. La paroi secondaire est la plus épaisse et est constituée de lamelles concentriques de cellulose parallèles entre elles dans une matrice de pectines.

L'interphase matrice lamelle est d'hémicellulose. La paroi primaire, c'est une structure très mince et fortement hydratée, cette paroi se présente comme un réseau non orienté de cellulose micro-fibrillaire.

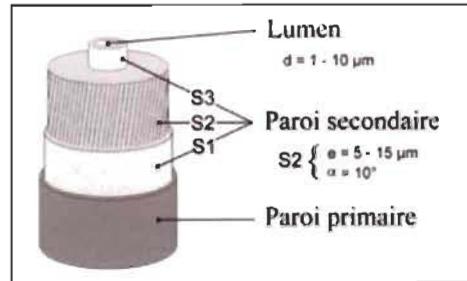


Figure II-3 La structure d'une cellule de fibre de lin [22]

Des micro-fibrilles possèdent de bonnes propriétés mécaniques, se trouvent dans ces lamelles. Elles sont regroupées et enroulées en spirale Figure II-5.

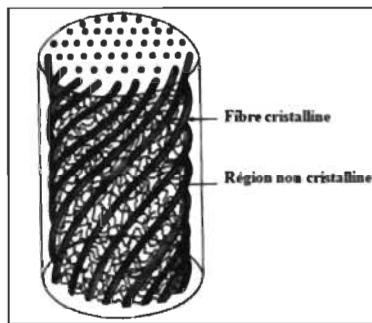


Figure II-5 La couche S2 de fibres élémentaires [23]

#### II.1.4 Les composites à renfort de fibres de lin

La composition chimique et physique ainsi le pourcentage de cellulose ce sont les facteurs qui contrôlent les propriétés mécaniques d'une fibre. La fibre de lin se situe parmi les fibres végétales les plus résistantes. Beaucoup de travaux ont été publiés concernant l'utilisation de fibre de lin en tant qu'élément de renfort dans les matériaux composites.

La connaissance du comportement des fibres de lin est considérée comme une grande importance pour leur utilisation en tant que renfort des matériaux composites [24]. Baley [25] a étudié aussi l'influence de la microstructure de lin sur le comportement de stratifié lin /époxy [25].

Arpitha.G.R et Yogesha [26] ont présenté une vue d'ensemble des propriétés mécaniques telles que la résistance à traction, la flexion et l'impact, le module d'élasticité correspondant des composites polymères renforcés de fibres naturelles et des observations de surface de rupture.

Ils ont conclu que les fibres naturelles ont de bonnes perspectives de renforcement dans les composites polymères.

D'après Sanjay MR et al, les composites à fibres naturelles présentent des propriétés mécaniques spécifiques comparables à celles des composites à fibres synthétiques (fibres de verre) en ce qui concerne la résistance à la traction, la résistance aux chocs, la résistance au cisaillement inter laminaire, les propriétés thermiques, l'absorption d'eau et les propriétés tribologiques [27].

Une étude de l'effet du vieillissement hygrothermique cyclique sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques d'un composite lin / époxy quasi isotrope a été menée par Kossi F et al., [28]. Les auteurs ont constaté que malgré l'effet de gonflement causer par le cycle immersion/séchage, le composite a montré une bonne rétention des propriétés mécaniques. Une bonne stabilité thermique des échantillons vieillis a été révélé, ce qui peut être corrélé à une bonne durabilité mécanique de ce composite après cent quatre jours de vieillissement hygrothermique [28].

Un autre stratifié hybrides renforcés avec des couches de lin et basalte a été étudié par Papa L. et al., [29]. Des essais d'impact à basse vitesse ont été utiliser dans le but d'étudier le comportement dynamique de ce matériau. Les résultats des tests expérimentaux montrent que le composite hybride basalte / lin affichait des meilleures performances d'impact que ceux des stratifiés basaltique ou de lin seul figure II-6 [29].

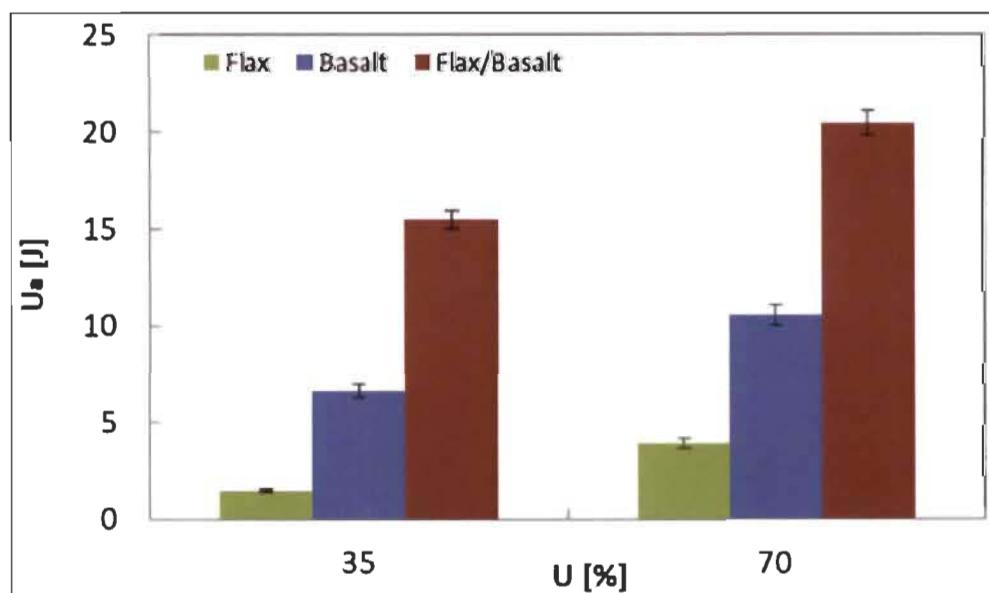


Figure II-6 Énergie absorbée  $U_a$  VS énergie d'impact  $U$  [29]

## II.2.Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont des fibres dérivées de ressources non renouvelables issu de l'industrie pétrochimique. Ces fibres peuvent être divisées en deux grandes catégories (figure II-7) : des fibres synthétiques organiques : Aramide, kevlar, polyéthylène, et des fibres non organiques : verre, carbone, bore, etc.

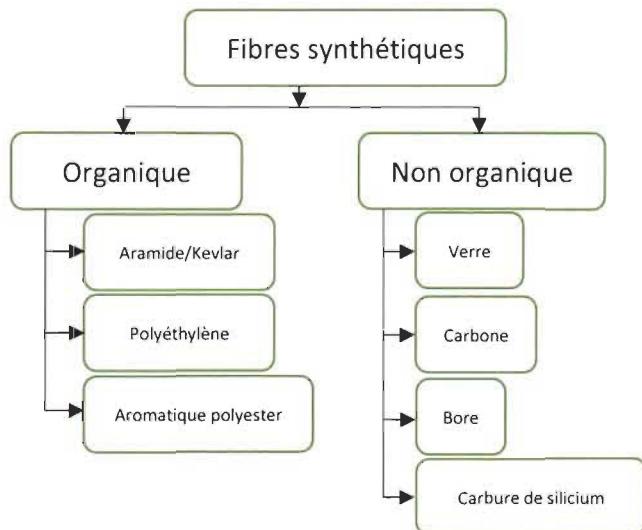


Figure II-7 Classifications des fibres synthétiques [19]

### II.2.1. Fibre aramide/Kevlar

Le kevlar est un aramide, un terme inventé comme abréviation de polyamide aromatique. Le kevlar est composé de polyparaphénylène téraphthalamide, qui est plus connu sous le nom de para-aramide.

### II.2.2. Caractéristiques physiques

Les fibres de Kevlar (figure II-8) ont comme propriétés d'allier la légèreté, la ténacité, la stabilité chimique et thermique. Elles supportent des températures élevées pouvant aller jusqu'à 300 °C. De plus, les fibres présentent une bonne stabilité dimensionnelle et à haute température, elles ne se rétractent, ne fondent pas, mais carbonisent.



Figure II-8 Kevlar grossi 200 X au microscope électronique [30]

### II.2.3. Structure de la fibre de Kevlar

Les fibres de kevlar sont constituées des longues chaînes de molécules produites à partir de PPTA (poly-paraphénylène téréphthalamide), et les liaisons hydrogène entre ces chaînes rendent les fibres extrêmement résistantes figure II-9.

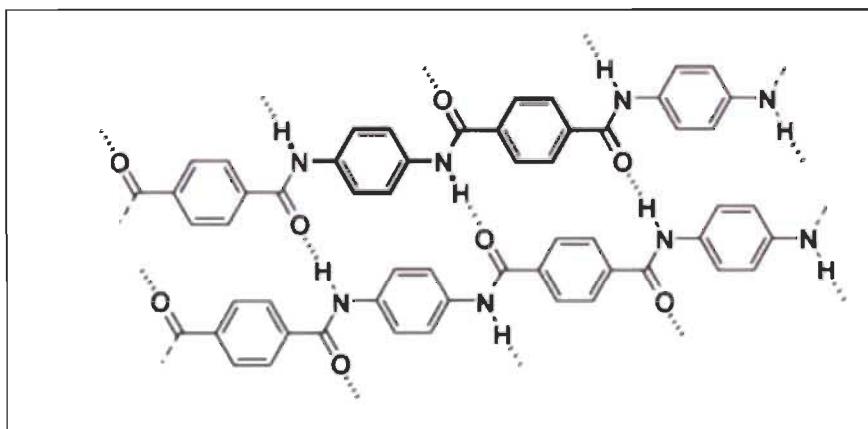


Figure II-9 Structurelle moléculaire du Kevlar [31]

Les fibres d'aramide/Kevlar sont toutefois des composés basés sur la structure du benzène. Ces fibres aramide/ Kevlar a une grande résistance dans la direction longitudinale à cause des liaisons hydrogène qui maintiennent ensemble les chaînes de polymère de kevlar [32].

### II.2.4. Propriétés mécaniques de Kevlar

La résistance à la traction du Kevlar est comprise entre environ 2,6 et 4,1 GPa. C'est plus que le double de celui des fibres classiques. La rupture en traction de ces fibres commence aux extrémités des fibrilles et se propage par rupture en cisaillement entre les fibrilles.

Tableau II-3 Propriétés mécaniques pour les différents types de kevlar

	Densité g/cm <sup>3</sup>	Module de traction GPa	Résistance à la traction GPa	Allongement à la traction %
<b>Kevlar 29</b>	1,44	83	3,6	4,0
<b>Kevlar 49</b>	1,44	131	3,6	2,8
<b>Kevlar 129</b>	1,47	186	3,4	2,0

En tension, le kevlar se comporte élastiquement, et en compression, il présente un comportement non linéaire et ductile. Il présente un rendement aux déformations en compression de 0,3 à 0,5 %. Les fibres d'aramide sont réputées pour leur ténacité et leur tolérance générale aux dommages. Le Kevlar 29 a le module le plus bas et la ténacité la plus élevée et un allongement à la traction d'environ 4 % [33].

Le module de traction et la résistance du Kevlar 29 est à peu près comparables à ceux de la fibre de verre (S ou E), alors que sa densité est presque la moitié de celle du verre. C'est l'avantage, de fibre de Kevlar pour des applications où on veut un poids plus léger [34].

### II.2.5. Les composites à renfort des fibres de kevlar

Prashanth S et al. [35]. Ont réalisé une synthèse des travaux antérieurs concernant les différentes propriétés mécaniques de trois fibres synthétiques, les fibres de verre, de carbone et kevlar. Les résultats ont démontré que le Kevlar est plus résistant à la fatigue avec une forte résistance à l'abrasion.

Sy. et al [5] présentent un travail concernant l'utilisation de fibres naturelles en tant que renforcement composite avec des fibres de Kevlar vu que les propriétés mécaniques de la fibre naturelle sont plus faibles et leurs performances de résistance aux chocs sont insatisfaisantes. Les auteurs concluent que l'énergie absorbée augmente avec l'énergie d'impact (composite hybride vs composite lin). À un niveau d'énergie bas, les dommages sont minimes, à des niveaux d'énergie plus élevée, les dommages deviennent plus importants sur la face arrière. La rupture de fibres ne s'est pas propagée à travers les fibres de Kevlar ce qui suggère que le tissé de Kevlar est efficace pour améliorer la ténacité du composite.

Les composites à structure hybride Kevlar/verre ont montré de meilleurs résultats sur le plan de la résistance mécanique (en traction et en flexion) et de la résilience (essais d'impact de type Izod) [36].

Un composite constitué de fibres de kevlar et de fibres de lin a été testé. Les propriétés mécaniques et les mécanismes d'endommagement ont été identifiés à partir des essais de flexion

trois-points et de traction Tableau II-4. Le composite présente un fort comportement anisotrope non linéaire. Cette étude a montré que le composite hybride présente la même faiblesse en compression que le composite Kevlar, avec des propriétés de compression inférieures aux propriétés de traction. Le composite hybride a une propriété mécanique intermédiaire entre le composite de lin et le composite d'aramide [37].

Tableau II-5 Propriétés mécaniques de : Lin, Kevlar et Kevlar/lin [37]

	<b>Lin</b>	<b>Kevlar 49</b>	<b>Kevlar/ Lin</b>
<b>Module d'élasticité (GPa)</b>	11,2	30	16
<b>Résistance à la traction (MPa)</b>	76,7	550	172
<b>Échec d'elongation en traction (%)</b>	-	2,5	1,6
<b>Module de flexion (GPa)</b>	2,12	28	10
<b>Résistance (MPa)</b>	57	345	200
<b>Module de compression (GPa)</b>	6,2	28	10
<b>Résistance à la compression (MPa)</b>	86,7	170	110
<b>Comportement</b>	Dommages plastiques- élastiques	Plastiques-élastiques	Dommages plastiques- élastiques
<b>Fraction volumique de fibres (%)</b>	37	40	40

### II.2.6. Domaines d'applications de Kevlar

Le kevlar, est rendu le matériau idéal pour une vaste gamme d'applications exigeantes en raison de ces propriétés excellentes propriétés physiques, mécaniques, chimiques et thermique. Le kevlar est surtout utilisé pour la fabrication de gilets pare-balles légers.

Il existe dans certaines applications dans les composants d'aéronefs qui utilisent maintenant ce matériau pour renforcer d'autres matériaux tels que le carbone et le bore. La résistance peut être augmenter toute en réduisant le poids de la structure. Actuellement, les fabricants ouvrent la voie à une utilisation maximale des propriétés du Kevlar, non seulement dans l'industrie aéronautique. Le kevlar c'est l'un des matériaux composites prometteurs constituant 50 % de la fabrication d'avions telle que le Boeing 787 [38].

Le Kevlar contribue à améliorer les performances et la durabilité des composants automobiles pour une grande variété de véhicules [39]. L'utilisation de kevlar dans la fabrication des voitures de course, rendre les réservoirs de carburant plus résistant et difficiles à percer en cas d'accident ce qui est minimise les risques d'incendie. L'ajout de Kevlar au pneu le rend également plus résistant à la perforation. Ce qui affecte la maniabilité et les virages.

Il existe d'autres domaines d'application de la fibre aramide :

- **Les équipements de sports** : Le kevlar est utilisé dans la fabrication de divers équipements sportifs. Notamment, les raquettes de tennis et de badminton, les crosses du hockey, etc.
- **Équipements de sécurité** : Le kevlar est utilisé dans la fabrication de divers équipements de protection individuelle, tels que les chaussures d'équitation, les casques, les gants industriels, les vêtements de protection contre le feu, etc.
- **Fabrication d'équipements militaires** : Le kevlar est utilisé dans la fabrication de divers équipements de l'armée, tels que les casques militaires, les armures de véhicule, les ailes d'avion de chasse et autres pièces.

### **II.3. Tests d'impact à basse vitesse**

#### **II.3.1. Définition**

Les impacts à basse vitesse peuvent être définis comme des événements pouvant se produire dans une plage allant de 1 à 10 m/s, en fonction de la rigidité de la cible, des propriétés du matériau ainsi que de la masse et de la rigidité du projectile.

Il existe plusieurs normes relatives aux tests d'impact : Les essais Charpy, les essais Izod et les essais de poids tombant Figure II-10.

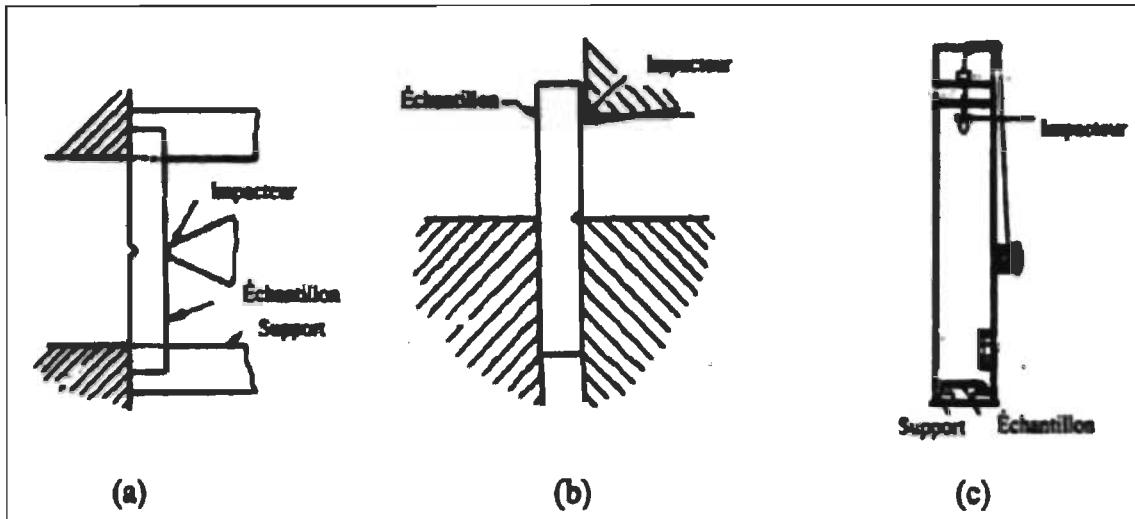


Figure II-10 Essais d'impact, (a) essais Charpy, (b) essais Izode et (c) poids tombant [40]

### II.3.2. Essais de Charpy

Dans un essai Charpy, l'échantillon doit être placé verticalement et un impacteur mouton-pendule génère l'impact tel que présenté à la figure II-11.

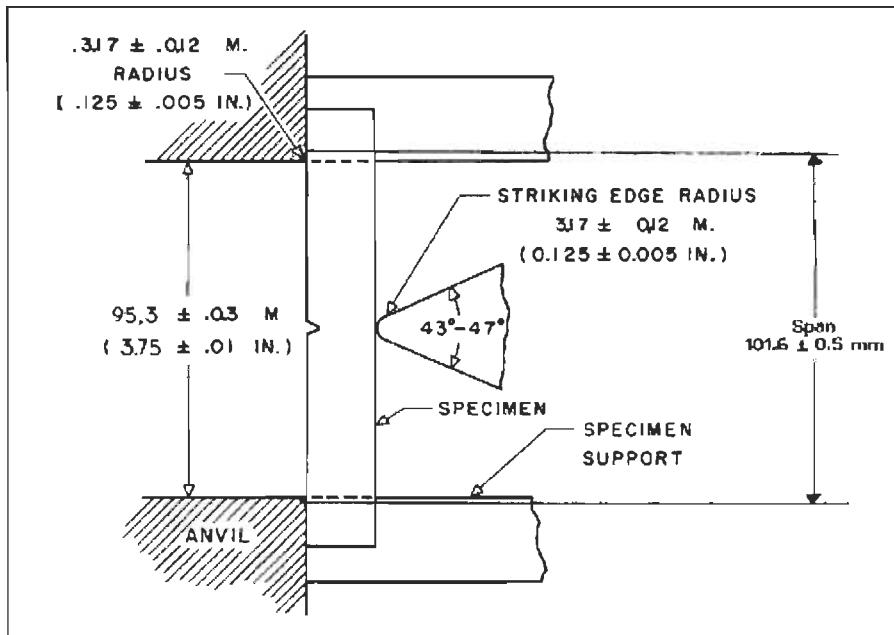


Figure II-11 Essai Charpy [41]

### II.3.3. Essais Izod

L'essai Izod est basé sur le même principe de l'essai Charpy, sauf que pour l'essai Izod, l'échantillon est ancré à une seule extrémité figure II-12.

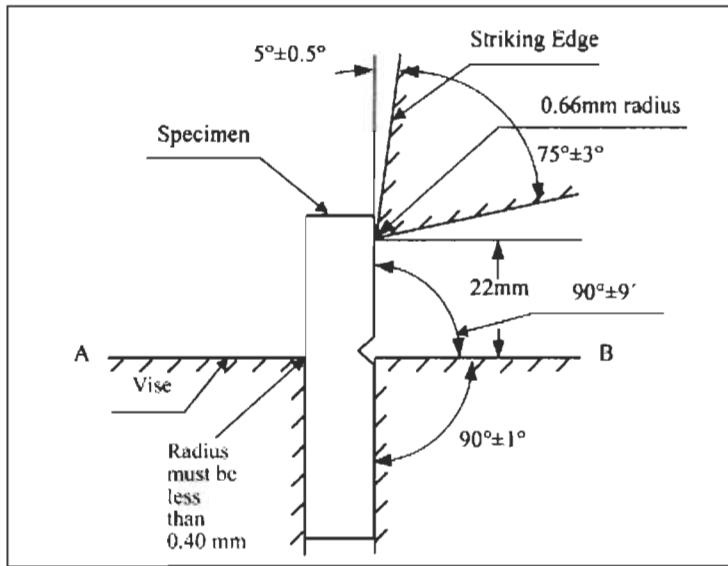


Figure II-12 Essais Izod [42]

#### II.3.4. Essais du poids tombant

La méthode du poids tombant correspondant à une tour avec un impacteur de masse variable, et une hauteur variable afin d'obtenir la force d'impact désirée.

#### II.4. Énergie dynamique dans les composites

Il existe trois types d'énergie en lien avec l'endommagement subit par une structure impactée : l'énergie absorbée, l'énergie dissipée et l'énergie emmagasinée figure II-13 [43]. L'énergie absorbée provoque des déformations plastiques qui sont des dommages irréversibles. L'énergie de dissipation c'est les pertes par frottement, et vibration dans l'environnement. Enfin, l'énergie emmagasinée c'est la déformation élastique, c'est aussi la déformation qui est retransmise à l'impacteur sous forme de rebond.

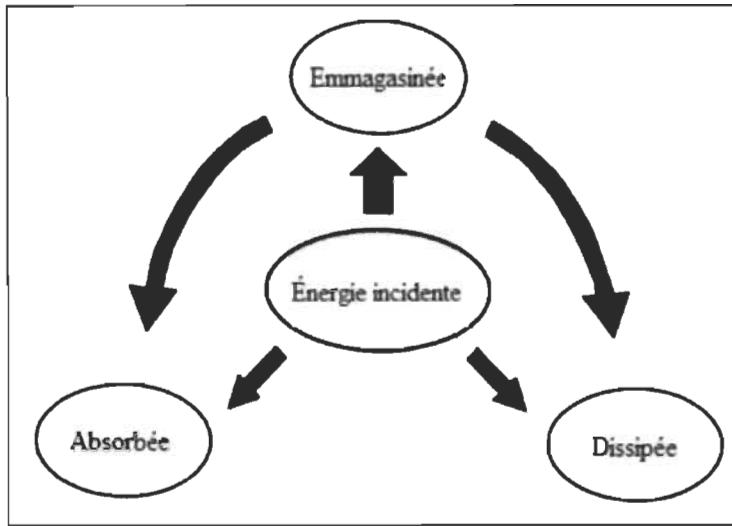


Figure II-13 Distributions de l'énergie d'impact [43]

## II.5. Caractéristiques qui influencent la résistance à l'impact

De nombreuses études qui proposent des caractéristiques des composites qui favorisent leur résistance à l'impact. Hitchen et al. s'intéressent à un composite carbone/époxy. Ils étudient 6 types de composites à base de 16 plis en alternant les couches à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $+45^\circ$  et  $-45^\circ$ . Ils montrent qu'il faut alterner les couches afin d'éviter les successions de couches similaires et mettre des couches à  $\pm 45^\circ$  en surface du composite dans le but d'augmenter la résistance au déclaminage [44].

Quaresimin et al., démontrent que la capacité d'absorption d'un composite dépend de la séquence d'empilement. Ils s'intéressent à l'influence de la séquence d'empilement de composites carbone/époxy unidirectionnels et alterné  $0^\circ/45^\circ$ . Ils observent la présence après impact de déclaminages aux interfaces  $0^\circ$  et  $45^\circ$ , alors qu'il n'y en a pas dans les composites unidirectionnels [45-46].

## II.6. Dommages suite à l'impact

L'analyse des échantillons endommagés peut être effectuée en utilisant un microscope électronique, ce qui a permis de visualiser précisément les détails de la rupture, et cela après avoir coupé le matériau dans le sens de la largeur afin de pouvoir observer le matériau par la tranche (méthode destructive). Ou bien en utilisant une méthode non destructive, à l'œil nu, on peut identifier l'endommagement des couches externes du matériau.

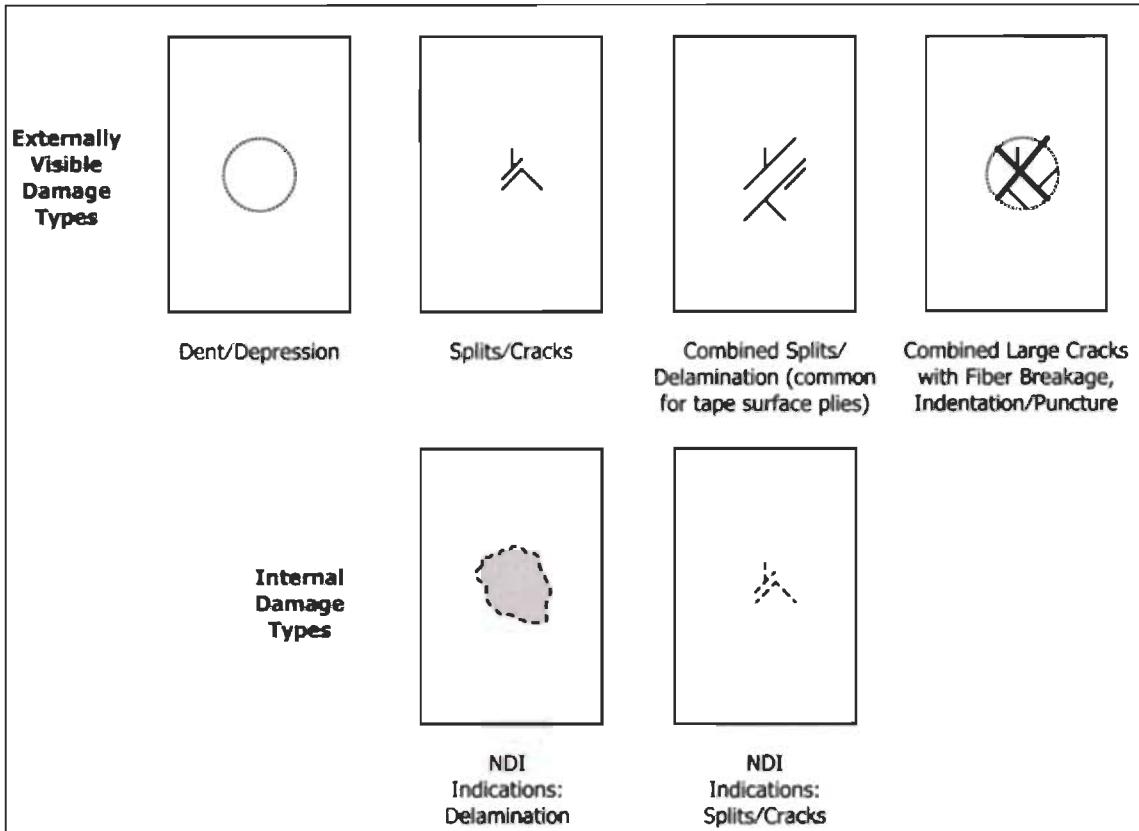


Figure II-14 Modes de dommages couramment observés lors de l'impact avec un poids tombant [47]

Il est nécessaire d'étudier les dommages causés aux faces avant et arrière du matériau par l'impact pour comprendre les principaux mécanismes d'absorption d'énergie essentiels à la conception des stratifiés figure II-14 [47-49]. Les ruptures transverses de la matrice sont les premiers dommages à apparaître, elles sont soit liées à un cisaillement de la matrice qui provoque une rupture transversale par rapport à la surface des plis, ou bien elles sont liées à des contraintes en tension qui provoquent une rupture perpendiculaire à la surface du pli [50]. C'est possible aussi de mesurer les dimensions géométriques des dommages détectés à l'aide d'un instrument approprié et de déterminer également la largeur, la longueur et le diamètre maximal des dommages [47].

### **Chapitre III : Résultats des essais de flexion et de Charpy**

### **III.1 Introduction**

Afin d'évaluer l'influence du kevlar sur les propriétés de nos matériaux, des plaques avec et sans kevlar d'une surface de 305 mm x 305 mm ont été moulées. Dans le but de réduire l'influence des paramètres de fabrication (l'alignement des fibres par exemple), on a utilisé des fibres unidirectionnelles de la société LINEO NV pour fabriquer nos différentes séries de plaques kevlar/lin/époxy et lin/époxy.

### **III.2. Fabrication**

Pour cette partie de l'étude, deux matériaux composites à fibres naturelles avec et sans kevlar (kevlar/lin/époxy et lin/époxy) ont été fabriqués. Un composite hybride Kevlar / Lin est fabriqué à partir d'un empilement de 12 couches de tissu UD FlaxPly® sec (de chez Lineo NV, Belgique), pris en sandwich h entre quatre couches de tissé de Kevlar (DuPont Kevlar® 49 - BGF Industries) figure III-1. Une matrice thermodurcissable Araldite® LY 565 (époxy) et un durcisseur Aradur® 22962 (polyamine durcisseur) sont utilisés pour enrober les fibres. Ce système de résine à une température de durcissement équivalente à 150 °C, inférieure à la température de dégradation des fibres de lin. Un rapport massique époxy-durcisseur équivalent à (100 :25) a été utilisé tel que recommandé par le fournisseur.

Dans cette étude, pour la configuration lin/époxy, deux séquences d'empilement ont été utilisées :  $[0_{F16}]$  et  $[\pm 45_{F16}]$ . En ce qui concerne les plaques kevlar/lin/époxy, trois configurations de stratifié de 305 mm x 305 mm ont été fabriquées : un stratifié unidirectionnel avec une séquence d'empilage  $[0_K/0_F]_S$ , un stratifié croisé avec une séquence d'empilage  $[0_K/(0/90)_3F]_S$ , et enfin un stratifié avec une séquence d'empilage  $[0_K/\pm 45_F]_S$  où la lettre **K** indique la couche de kevlar et la lettre **F** la couche de lin.

Le stratifié est fabriqué en utilisant le procédé de moulage au contact. Pour la polymérisation, les plaques ont été initialement chauffées jusqu'à 150 °C sous une pression de 2,5 bars pendant une demi-heure, suivi par une étape de durcissement stable pendant 2,5 h à 150 °C / 5 bars. Finalement, la plaque a subi un refroidissement de 150 °C jusqu'à la température ambiante pendant encore 1 h tout en maintenant une pression de 5 bars. Ce cycle de polymérisation a permis de fabriquer des stratifiés avec une fraction volumique de fibres allant de 50 à 60% et un taux de vide inférieur à 3% [17].

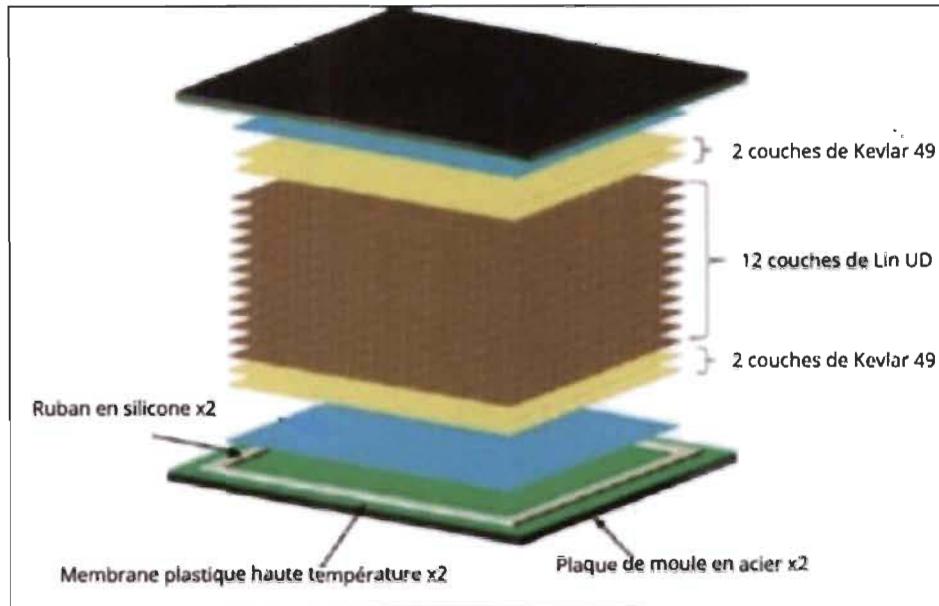


Figure III-1 Schéma explicatif de l'assemblage stratifié Kevlar/ Lin

Dans le but d'obtenir des éprouvettes normalisées d'impact, de flexion et de Charpy, les plaques une fois fabriquées ont été découpées à l'aide d'une scie. Les éprouvettes d'impact à basse vitesse présentent une forme rectangulaire de dimensions (150 mm × 100 mm × 3,4 mm) conformément à la norme ASTM D7136. Pour les essais de flexion, des éprouvettes ont été prélevées en respectant la norme ASTM D790, qui stipule les dimensions suivantes : (120 mm × 12,7 mm × 3,4 mm). Les éprouvettes Charpy présentent les dimensions suivantes : (62 mm × 12 mm × 3,4 mm) conformément à la norme ASTM D6110. La figure III.2 présente le plan de découpe de plaque.

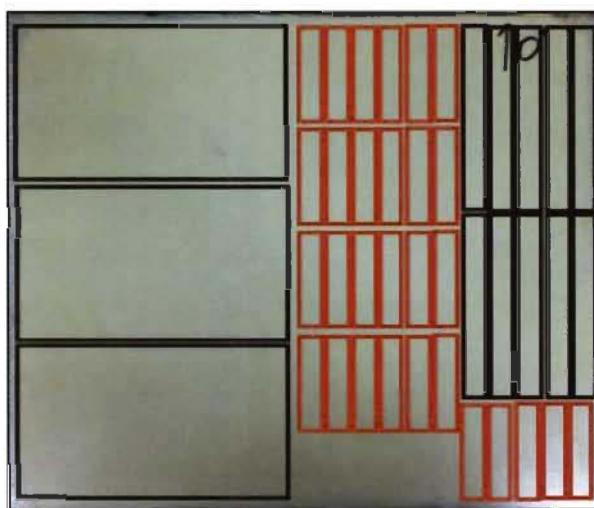


Figure III-2 Plan de découpe de la plaque : éprouvettes de flexion, Charpy et Impact

### III.3. Essais de Flexion

#### 1. Procédure

Les essais de flexion ont été réalisés en respectant la norme ASTM (D790), afin de déterminer les propriétés mécaniques en flexion des composites lin/époxy et Kevlar/lin/époxy. Cinq configurations de stratifiés ont été préparées :  $[0_{K2}/0_{F6}]_S$ ,  $[0_{K2}/(0/90)_3F]_S$ ,  $[0_{K2}/\pm 45_{F6}]_S$ ,  $[0_{F16}]$  et  $[\pm 45_{F16}]$ . Les essais sont réalisés sur une machine électromécanique de type Instron U150-LM, équipée d'une cellule de charge de 10 kN (Figure III.4). L'essai est réalisé en imposant un déplacement de 2 mm/sec jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette.

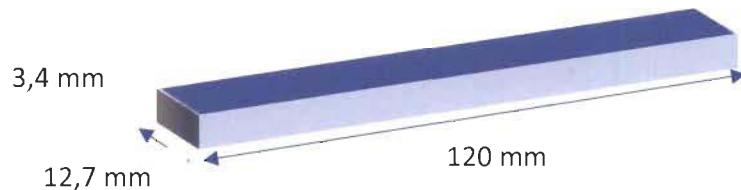


Figure III-3 Dimension d'éprouvette de flexion 3 points

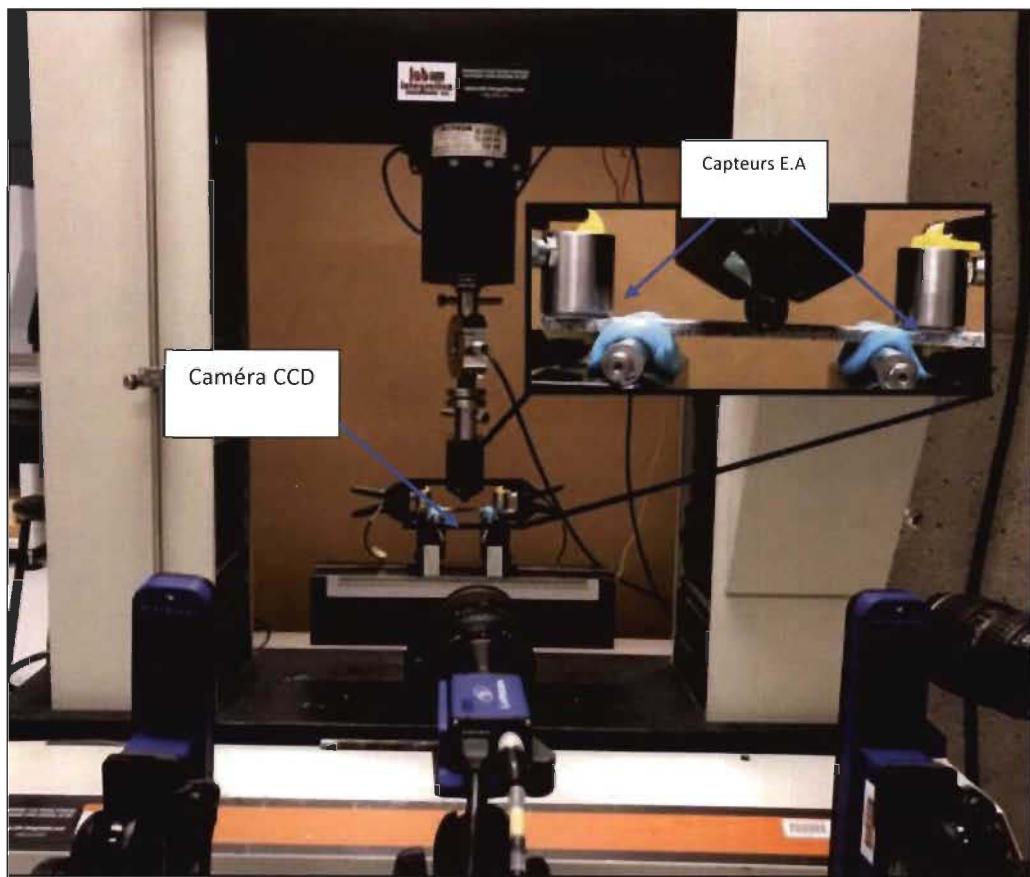


Figure III-4 Machine d'essai de flexion équipée d'une camera CCD et deux capteurs d'émission acoustique

## 2. Corrélation d'images numériques :

Un système de corrélation d'images numérique (caméras CCD) a été utilisé pour mesurer le champ de déplacement et de la déformation des éprouvettes durant les essais de flexion 3 points. Sur nos essais, une seule caméra a été utilisée pour enregistrer des images numériques avec une définition de 1280 par 1024 pixels. Ces images sont traitées avec le logiciel StrainMaster (distribué par la société LaVision Inc.). Grâce à ce dispositif, il est possible de mesurer les champs de déplacements et de déformations de nos éprouvettes.

## 3. Émission acoustique :

La norme AFNOR NF A 09-350 définit l'émission acoustique (EA) comme « *un phénomène de libération d'énergie élastique sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau ayant des processus dynamiques de déformation* ». Ces ondes résultent de l'initiation et évolution de l'endommagement du matériau sous l'effet d'une sollicitation mécanique. La chaîne de mesure d'EA (cf. figure III.4) est composée d'un ordinateur équipé d'une carte d'EA d'acquisition (4 voies de mesure), de préamplificateurs et de capteurs d'EA. Deux capteurs d'émission acoustique ont été utilisés pour le suivi de certains essais.

### III.4. Essais de Charpy

#### 1. Introduction :

Les essais de résilience de Charpy sont les essais les plus utilisés pour mesurer la résilience d'un matériau. Des éprouvettes entaillées dont les deux extrémités sont posées sur un support sont heurtées par un marteau en leurs centre pour la couper en deux (figure III.5).

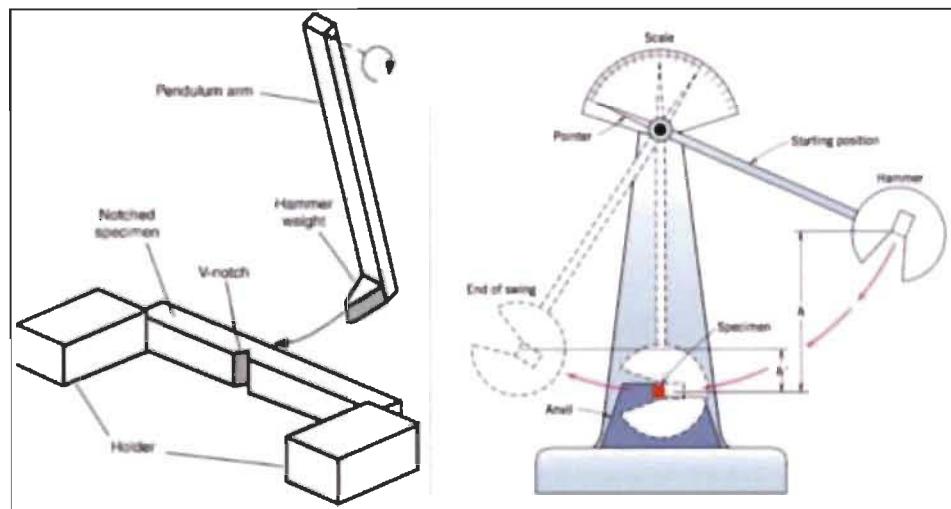


Figure III-5 Procédure de l'essai de Charpy [51]

## 2. Procédure :

Le laboratoire de l'Université de Québec à Trois Rivières est équipé de moyen permettant d'effectuer des essais Charpy (figure III.6). Une machine a mouton-pendule CEAST 9050 de la compagnie INSTRON, équipée d'un marteau de 5,4 J, a été utilisée pour effectuer les essais de Charpy. Les essais ont été réalisés selon la norme ASTM D6110.

Pour faire un essai, on libère le pendule (marteau) d'une hauteur fixe  $h$  sans vitesse initiale. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait à sa position de départ. Le marteau continue sa course jusqu'à ce qu'il atteigne une hauteur maximale  $h'$  qui devrait être inférieure à la hauteur initiale  $h$ .

L'énergie absorbée  $E$  peut être calculée à partir de la différence des énergies potentielles du pendule :

$$E = m \cdot g \cdot (h - h')$$

$m$  : la masse de marteau,  $g$  : l'accélération gravitationnelle.



Figure III-6 Machine de Charpy mouton pendule CEAST 9050 utilise dans les tests

### 3. Éprouvette

Des éprouvettes avec des longueurs de 64 mm et des largeurs de 12.7 mm, ont été découpées pour les essais Charpy. Des entailles de 2 mm ont été réalisées à l'aide d'une machine de type Intron (figure III.7). L'étape suivante consistait à faire des essais d'impact à des températures : Ambiante, nulles et négatives, 23 °C, 0 °C et -22 °C, respectivement. De la glace carbonique est utilisée pour faire baisser la température des éprouvettes.

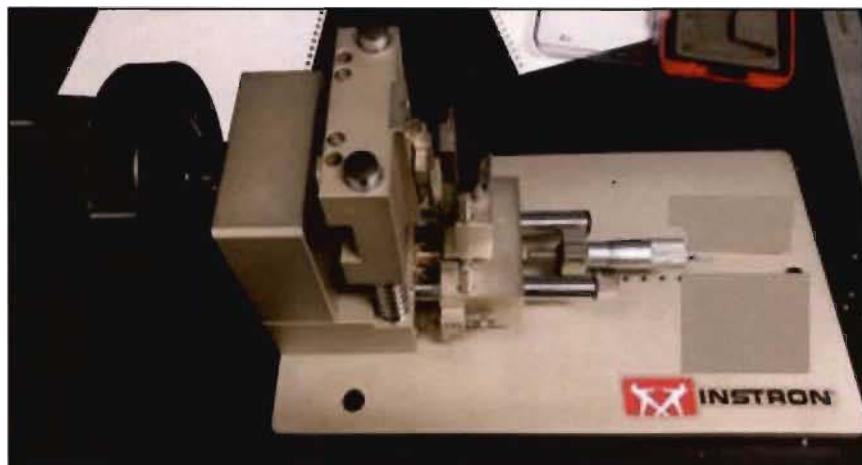


Figure III-7 Dispositif pour créer une entaille en V

Deux types d'échantillons ont été testés avec différents empilements :

- Un composite hybride Kevlar/Lin/époxy avec trois séquences d'empilements :  $[0_{K2}/0_{F6}]_S$ ,  $[0_{K2}/\pm45_{F6}]_S$  et  $[0_{K2}/(0/90)_{3F}]_S$ .
- Un composite Lin/époxy avec deux séquences d'empilement :  $[0]_{F16}$  et  $[\pm45]_{F16}$ .

L'éprouvette doit être placée sur les appuis du mouton de Charpy, de manière à ce que l'arrête du couteau du marteau vienne la frapper dans le plan de symétrie de l'entaille et sur la surface opposée à celle-ci. L'énergie nominale du marteau est de 5.4 J.

### III.5. Résultats

#### 1. Essais de flexion

Nous avons réalisé 5 essais de flexion 3 points pour chaque stratifié, on s'assure que :

- Les échantillons sont bien placés sur le port-échantillon.
- La caméra CCD est bien installée et la calibration est effectuée,

Les courbes et les propriétés mécaniques obtenues à partir des essais de flexion 3 points sont présentées dans la partie ci-dessous.

#### **Matériaux hybrides kevlar/ lin :**

Les figures III.8, III.9 et III.10, présentent les courbes contrainte-déformation obtenues à partir des essais de flexion 3 points, pour les échantillons ayant des empilements  $[0_{K2}/ 0_{F6}]_s$ ,  $[0_{K2}/ (0/90)_{3F}]_s$  et  $[0_{K2}/ \pm 45_{F6}]_s$ . Pour tous les échantillons, les courbes contrainte-déformation passent par les phases suivantes : Une première phase linéaire caractérisée par un module d'élasticité E. Une deuxième phase où la pente de la courbe diminue en raison du début de l'endommagement du matériau. Les courbes continuent à évoluer d'une manière non linéaire jusqu'à une valeur maximale de la contrainte. Pour les éprouvettes  $[0_{K2}/ 0_{F6}]_s$ , cette valeur maximale de la contrainte représente le point où il y a eu la rupture du matériau et la contrainte diminue jusqu'à la rupture finale des éprouvettes. Concernant les composites ayant comme séquence d'empilement  $[0_{K2}/ (0/90)_{3F}]_s$  et  $[0_{K2}/ \pm 45_{F6}]_s$ , la courbe continue à baisser d'une manière graduelle jusqu'à la rupture finale des éprouvettes. Cette chute par palier représente éventuellement des mécanismes d'endommagement tels que, la fissuration matricielle, le déclaminage, la rupture et l'arrachage des fibres.

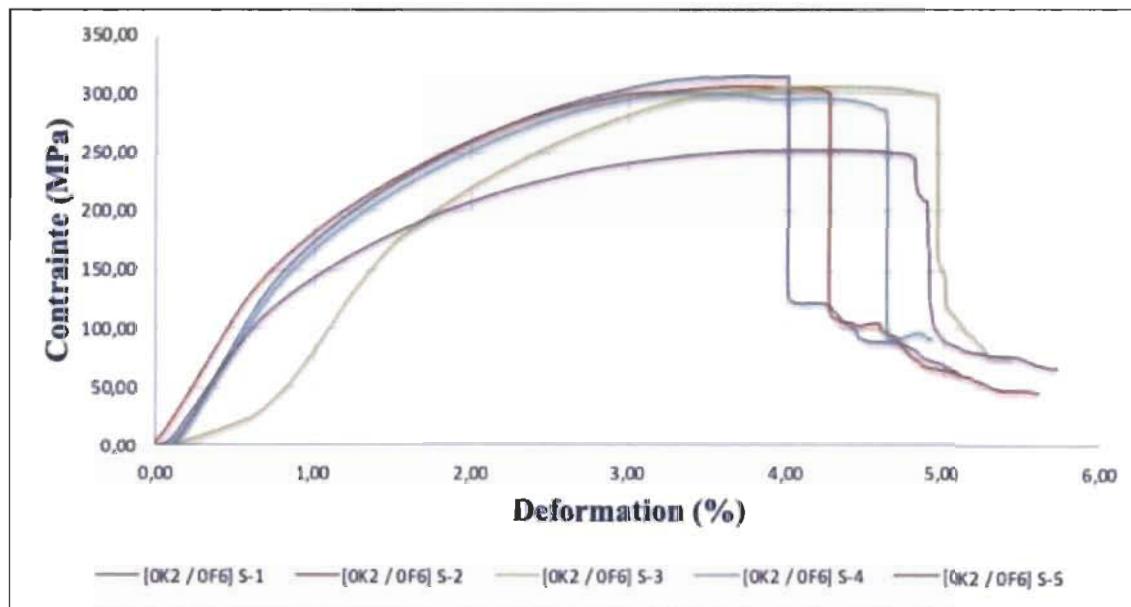


Figure III-8 Graphe contrainte-déformation pour les stratifiés  $[0_{K2}/ 0_{F6}]_s$

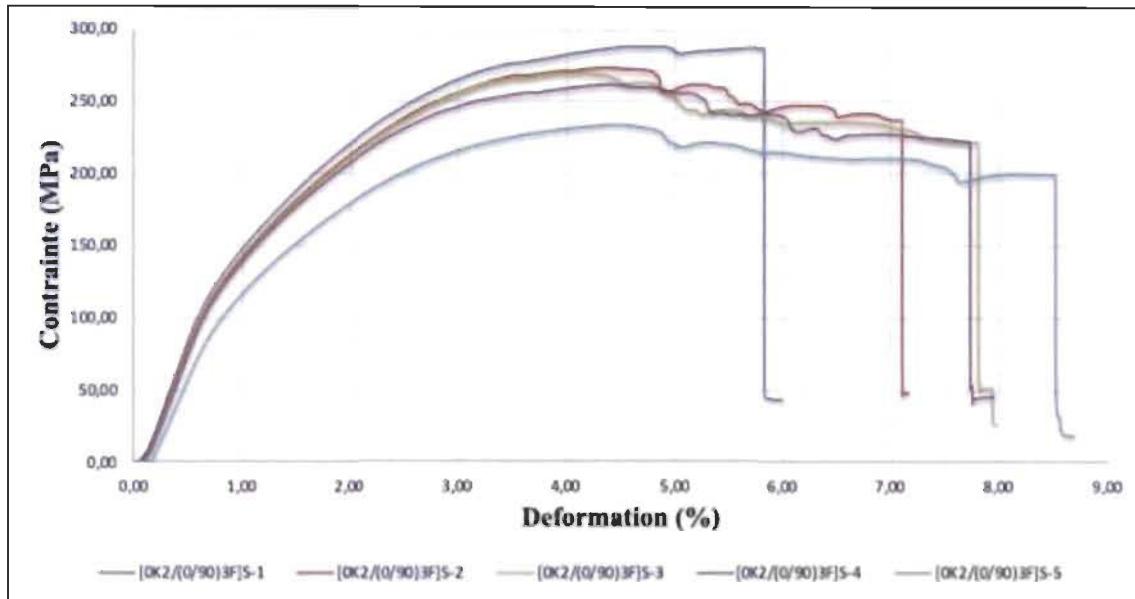


Figure III-9 Graphe contrainte-déformation pour les stratifiés  $[0K_2/(0/90)_3F]_S$

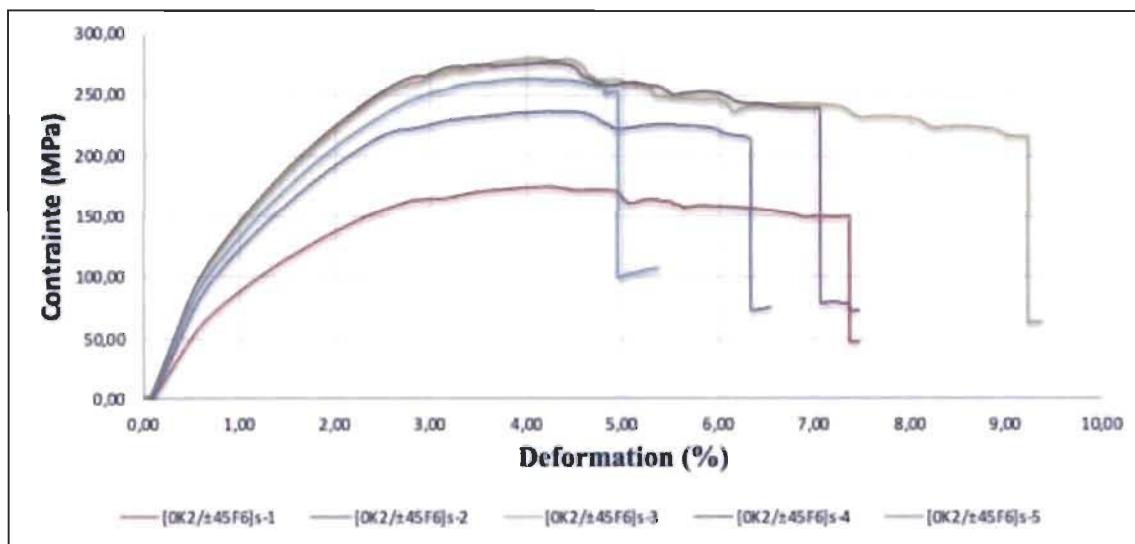


Figure III-10 Graphe contrainte-déformation pour les stratifiés  $[0K_2/\pm 45F_6]_S$

Les tableaux III-1, III-2 et III-3, présentent les différentes propriétés mécaniques obtenues à partir des essais de flexion 3 points, pour les différents stratifiés hybrides. Les échantillons avec empilement  $[0K_2 / 0_{F6}]_S$  montrent une contrainte moyenne autour de 293,95 MPa ( $\pm 28,39$  MPa) avec une déformation moyenne équivalente à 4,94 % et un module d'Young égal à 19,79 GPa ( $\pm 1,31$  MPa). Pour les empilements  $[0K_2/(0/90)_3F]_S$ , la contrainte égale 265,63 MPa ( $\pm 19,92$  MPa), ce qui signifie que la contrainte a diminué de 10% par rapport à  $[0K_2 / 0_{F6}]_S$ . Les résultats en rouge ne sont pas pris en compte dans le calcul.

Tableau III-1 Résultats collectés lors des essais flexion 3 point pour stratifie [0K<sub>2</sub>/0F<sub>6</sub>] S

	Contrainte (MPa)	Déformation (%)	Module (GPa)	Force (N)
[0K <sub>2</sub> / 0F <sub>6</sub> ] S-1	315,43	3,51	19,63	478,20
[0K <sub>2</sub> / 0F <sub>6</sub> ] S-2	306,39	5,61	21,68	479,99
[0K <sub>2</sub> / 0F <sub>6</sub> ] S-3	306,46	5,43	3,88	496,72
[0K <sub>2</sub> / 0F <sub>6</sub> ] S-4	301,74	4,93	19,02	493,79
[0K <sub>2</sub> / 0F <sub>6</sub> ] S-5	252,23	5,73	18,81	406,08
<b>Moyenne</b>	293,95	4,94	19,79	464,52
<b>Écart Type</b>	28,39	1,02	1,31	39,57
<b>C<sub>V</sub></b>	0,10	0,21	0,07	0,09

Tableau III-2 Résultats collecter lors des essais flexion 3 point pour stratifie [0K<sub>2</sub>/(0/90)<sub>3F</sub>]S

	Contrainte MPa	Déformation %	Module GPa	Force
[0K <sub>2</sub> / (0/90) 3F] S -1	288,06	5,99	19,34	470,00
[0K <sub>2</sub> / (0/90) 3F] S -2	273,52	7,16	18,25	424,55
[0K <sub>2</sub> / (0/90) 3F] S -3	270,34	7,97	17,96	447,61
[0K <sub>2</sub> / (0/90) 3F] S -4	262,04	7,95	16,51	428,19
[0K <sub>2</sub> / (0/90) 3F] S -5	234,19	8,70	12,08	383,52
<b>Moyenne</b>	273,49	7,27	18,02	442,59
<b>Écart Type</b>	10,85	0,93	1,17	20,89
<b>C<sub>V</sub></b>	0,04	0,13	0,06	0,05

Tableau III-3 Résultats collecter lors des essais flexion 3 point pour stratifie [0K<sub>2</sub>/±45F6] S

	Contrainte MPa	Déformation %	Module GPa	Force
[0K <sub>2</sub> / ±45F6] s-1	175,24	7,47	11,26	427,63
[0K <sub>2</sub> / ±45F6] s-2	236,83	6,55	15,72	375,01
[0K <sub>2</sub> / ±45F6] s-3	280,63	9,38	19,81	456,54
[0K <sub>2</sub> / ±45F6] s-4	277,31	7,47	19,90	424,76
[0K <sub>2</sub> / ±45F6] s-5	264,04	5,38	18,44	358,65
<b>Moyenne</b>	264,70	7,19	18,47	403,74
<b>Écart Type</b>	19,92	1,69	1,95	45,05
<b>C<sub>V</sub></b>	0,08	0,23	0,11	0,11

### Pour le Lin :

Les figures III.11 et III.12 présentent les courbes contrainte-déformation obtenues à partir des essais de flexion 3 points, pour les échantillons de lin. Pour tous les échantillons, les courbes contrainte-déformation passent par les phases suivantes : Une première phase linéaire caractérisée par un module d'élasticité E. Une deuxième phase où la pente de la courbe diminue en raison du début de l'endommagement du matériau. Les courbes continuent à évoluer d'une manière non linéaire jusqu'à une valeur maximale de la contrainte le point où il y a eu la rupture du matériau.

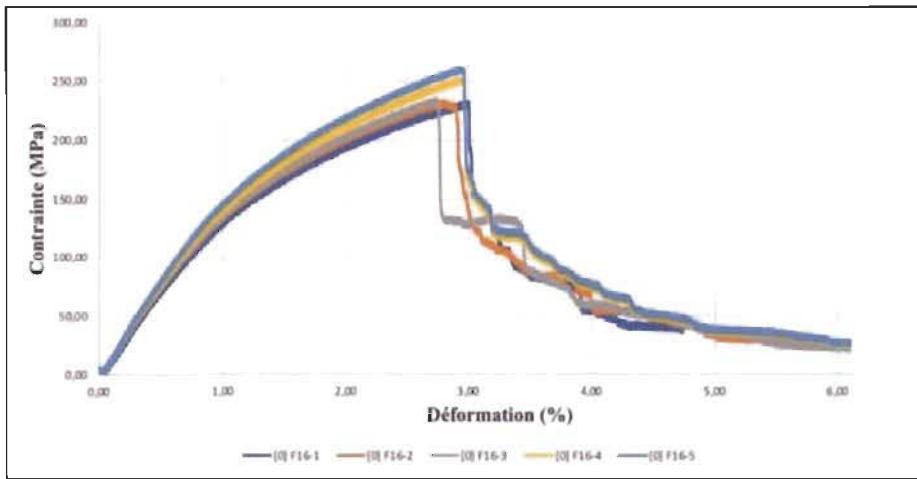


Figure III-11 Contrainte-déformation pour les stratifiés [0]F16

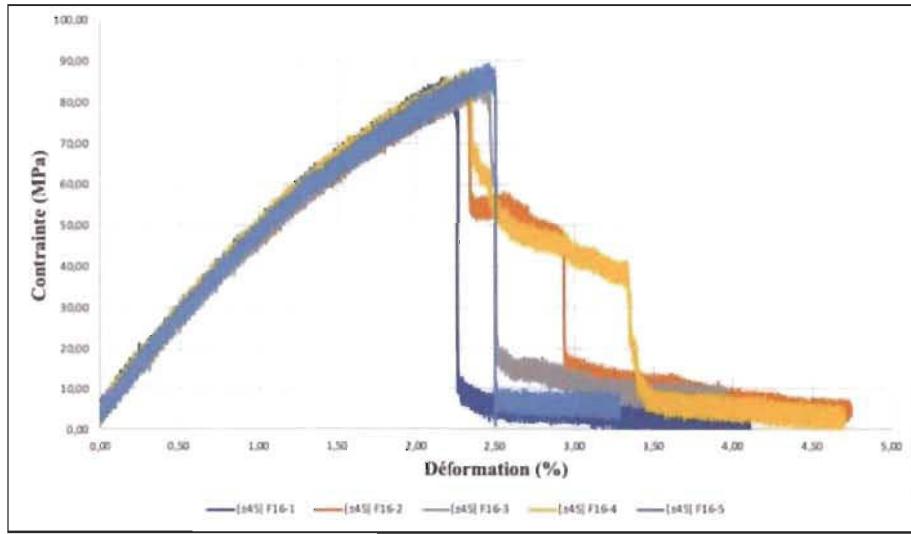


Figure III-12 Contrainte-déformation pour les stratifiés [+/-45] F16

Les tableaux III-4, III-5, présentent les différentes propriétés mécaniques obtenues à partir des essais de flexion 3 points, pour les différents stratifiés lin. La contrainte moyenne pour les échantillons avec l'empilement [0]<sub>F16</sub> est autour de 243,36 MPa ( $\pm 11,79$  MPa) et une

déformation de 5,77% avec un module de 0,01 GPa ( $\pm$  0,04 GPa). Et pour l'empilement  $[\pm 45]_{F16}$ , la contrainte est égale 86,91 MPa ( $\pm$  1,62 MPa) et une déformation de 4,16% avec un module de 0,02 GPa ( $\pm$  0,1 GPa).

Tableau III-4 Résultats collecter lors des essais flexion 3 points pour stratifié [0] F16

	Contrainte MPa	Déformation %	Module GPa	Force kN
[0] F16-1	232,90	4,74	15,98	0,48
[0] F16-2	233,38	5,82	16,64	0,49
[0] F16-3	235,90	6,10	16,92	0,48
[0] F16-4	252,76	6,10	17,47	0,54
[0] F16-5	261,87	6,10	18,10	0,54
<b>Moyenne</b>	243,36	5,77	17,02	0,51
<b>Écart Type</b>	11,79	0,53	0,72	0,03
<b>Cv</b>	0,05	0,09	0,04	0,05

Tableau III-5 Résultats collecter lors des essais flexion 3 point pour stratifié  $[\pm 45] F16$

	Contrainte MPa	Déformation %	Module GPa	Force kN
$[\pm 45] F16-1$	85,93	4,11	4,79	0,18
$[\pm 45] F16-2$	84,94	4,75	4,58	0,18
$[\pm 45] F16-3$	86,94	3,96	4,69	0,18
$[\pm 45] F16-4$	87,55	4,70	4,71	0,18
$[\pm 45] F16-5$	89,20	3,28	4,96	0,20
<b>Moyenne</b>	86,91	4,16	4,75	0,19
<b>Écart Type</b>	1,62	0,60	0,14	0,01
<b>Cv</b>	0,02	0,14	0,03	0,04

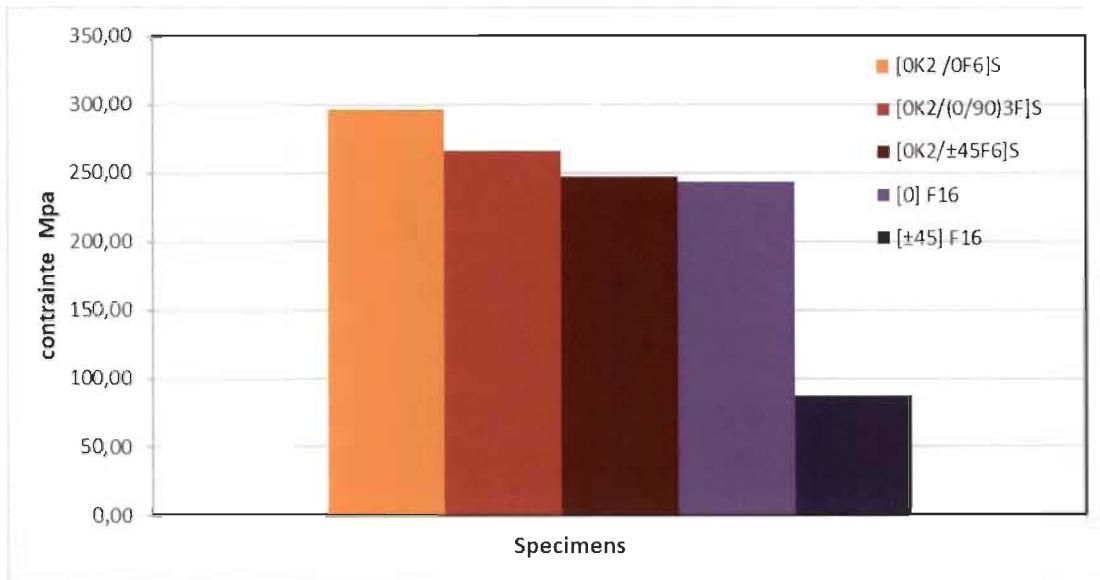


Figure III-13 Comparaisons entre les différents matériaux

La figure III.13 montre clairement que l'ajout de kevlar a un effet bénéfique. Par exemple  $[0_{K2}/0_{F6}]S$  présentent des contraintes 17,91% plus par rapport au  $[0] F16$ , et aussi, les contraintes pour  $[0_{K2}/\pm45_{F6}]S$  sont plus de 65,71% par rapport au  $[\pm45] F16$ .



Figure III-14 (a) face arrière de  $[\pm45] F16$ , (b) face arrière de  $[0] F16$

La figure ci-dessous (figure III.14) montre les faces arrière de l'éprouvettes de flexion 3 points endommagées. La figure (a) illustre l'endommagement de l'éprouvette de lin avec l'empilement  $[\pm45] F16$ , la fissure se propage diagonalement au sens de fibres. Par contre pour la figure (b), nous observons une rupture suivant la largeur de l'échantillon.

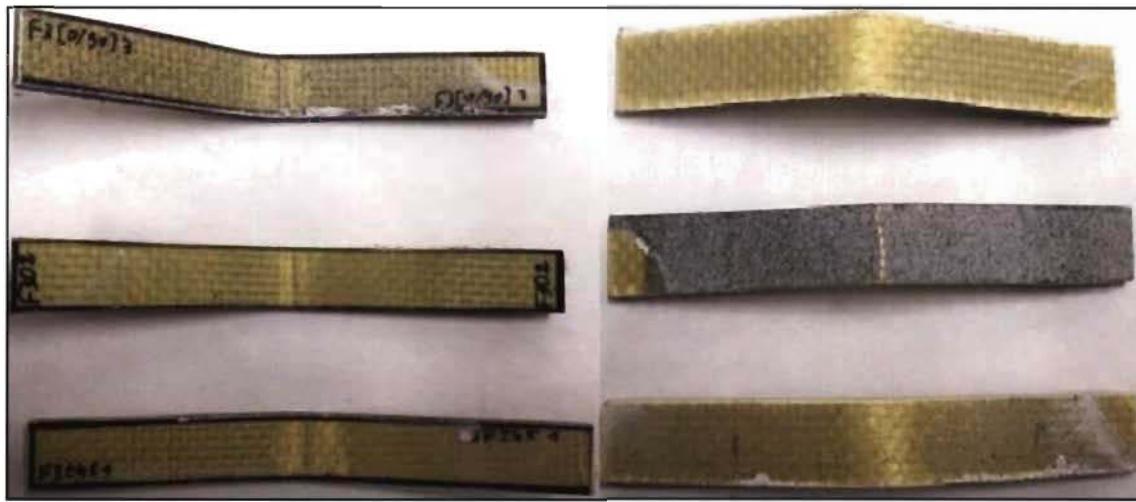


Figure III-15 Les faces supérieures et arrière pour les différents configurations (matériau hybride)

Dans le cas de matériau hybride, et pour les trois empilements  $[0_{K2}/(0/90)_{3F}]_S$ ,  $[0_{K2}/0_{F6}]_S$  et  $[0_{K2}/\pm45_{F6}]_S$  la fissure se propage suivant la largeur de l'éprouvette, même dans le cas de  $[0_{K2}/\pm45_{F6}]_S$ , ce que signifie que l'ajout de kevlar empêche la fissure de suivre la direction  $45^\circ$ .

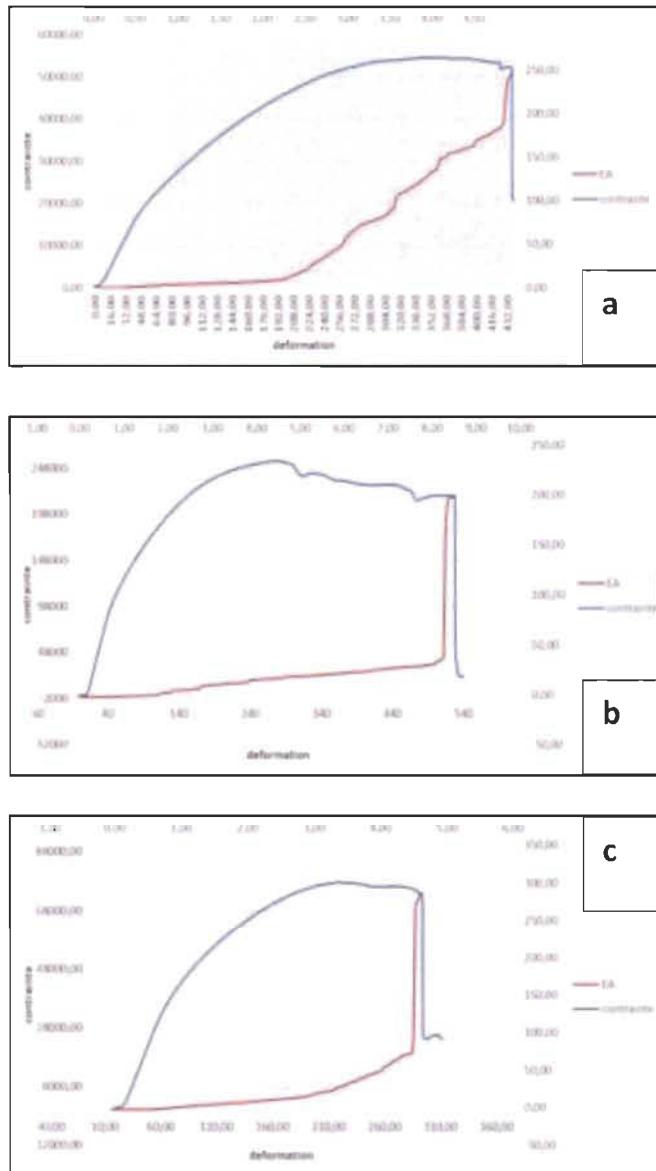


Figure III-16 L'évolution de l'énergie acoustique et la courbe contrainte-déformation : (a) [0K2/ $\pm 45F6$ ], (b)[0K2/(0/90)3F] S et (c) [0K2 /0F6]

Les graphes ci-dessus (figure III.16) montrent les courbes contrainte-déformation avec l'évolution de l'énergie acoustique enregistrée par les deux capteurs durant les essais de flexion 3 points pour les différentes configurations de notre matériau hybride. Comme indiqué sur les figures. Au début, quand le matériau présente un comportement élastique (la partie linéaire du graphe contrainte-déformation), l'énergie acoustique captée est quasiment nulle. Lorsque le matériau entre dans la deuxième phase « domaine plastique », l'énergie acoustique commence à augmenter d'une façon progressive jusqu'à la rupture du composite.

## 2. Essai Charpy

Nous avons réalisé 5 essais Charpy pour chaque empilement. Les précautions suivantes ont été prises :

- Bien placer l'échantillon sur les deux points d'appui,
- Vérifier la normalisation de l'échantillon,
- La température dans la salle d'épreuve est stable,
- Avoir atteint les températures souhaitées (pour les températures inférieures).

Les valeurs de l'énergie de rupture, la ténacité et la résistance au choc pour chaque échantillon au cours des essais sont présentées dans la section suivante.

## 3. Essai de Charpy à température ambiante

Le résumé des énergies de rupture mesurées de nos matériaux à température ambiante est présenté ci-dessous. Le tableau III-6 représente les résultats pour la configuration longitudinale  $[0_{K2} / 0_{F6}]_S$  est  $[0]_{F16}$ . Le tableau III-7 représente les résultats pour la configuration en biais  $[0_{K2} / \pm 45_{F6}]_S$  et  $[\pm 45]_{F16}$  et enfin, le tableau 8 représente les résultats pour la configuration  $[0_{K2}/(0/90)_{3F}]_S$ .

Tableau III-6 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement  $0^\circ$

Spécimen	$[0_{K2} / 0_{F6}]_S$			$[0]_{F16}$		
	Énergie  J	charpy impact ténacité [KJ/m <sup>2</sup> ]	Re aux chocs [J/m]	Énergie [J]	charpy impact ténacité [KJ/m <sup>2</sup> ]	Re aux chocs [J/m]
1	3,16	92,78	315,50	1,81	46,60	157,74
2	2,99	78,26	266,04	1,88	48,62	163,13
3	3,06	82,44	280,29	1,83	50,21	174,00
4	3,12	72,25	260,00	1,94	50,70	176,00
5	2,44	56,39	194,80	1,88	55,18	187,60
Moyenne	2,95	76,42	263,33	1,87	50,26	171,69
Écart Type	0,30	13,47	43,94	0,05	3,18	11,67
Cv	0,10	0,18	0,17	0,03	0,06	0,07

Tableau III-7 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement ±45

Spécimen	$ 0_{K2}/\pm45_{F6} $ s			$ \pm45 _{F16}$		
	Énergie [J]	charpy impact ténacité [KJ/m <sup>2</sup> ]	Re aux chocs [J/m]	Énergie [J]	charpy impact ténacité [KJ/m <sup>2</sup> ]	Re aux chocs [J/m]
1	1,87	52,62	178,91	0,33	8,77	29,17
2	1,77	50,09	170,36	0,25	7,06	24,05
3	1,83	51,67	175,70	0,26	7,20	24,12
4	1,89	49,06	166,81	0,29	8,00	26,14
5	1,91	52,12	177,21	0,35	9,65	27,55
Moyenne	1,85	51,11	173,80	0,30	8,14	26,20
Écart Type	0,05	1,49	5,05	0,04	1,09	2,21
Cv	0,03	0,03	0,03	0,14	0,13	0,08

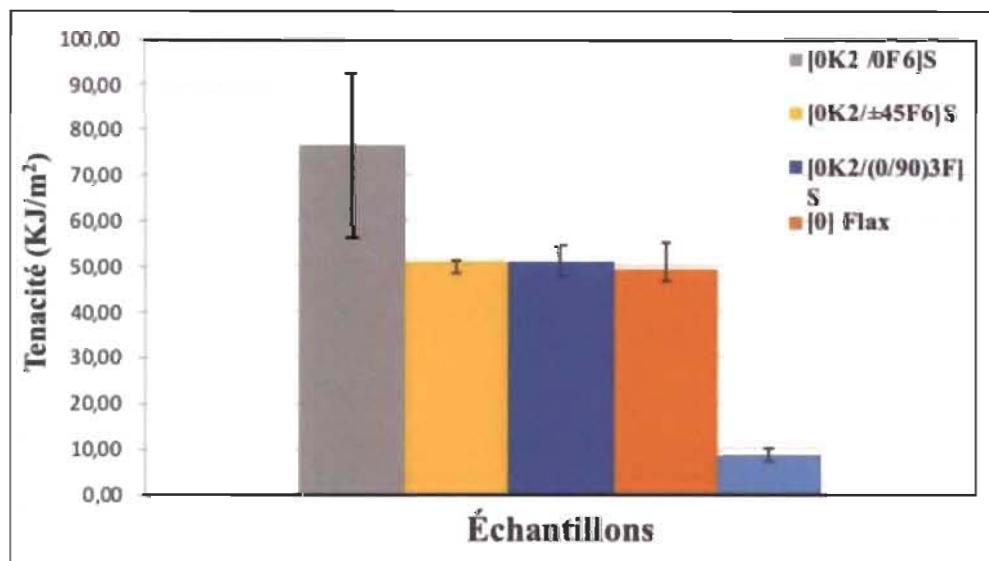
Tableau III-8 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement (0/90)

Spécimen	$ 0_{K2}/(0/90)_{F1} $ s		
	Énergie [J]	charpy impact ténacité [KJ/m <sup>2</sup> ]	Re aux chocs [J/m]
1	2,00	49,01	166,67
2	2,00	47,88	162,76
3	1,93	53,51	181,92
4	2,05	54,76	186,19
5	1,99	49,14	167,09
Moyenne	1,99	50,86	172,93
Écart Type	0,04	3,06	10,41
Cv	0,02	0,06	0,06

Pour la première configuration (Tab. III-6), les résultats montrent une variation d'énergie de rupture autour de 1,87 J ( $\pm 0,05$  J) dans le cas d'échantillons de lin. Pour les échantillons hybrides kevlar/ lin, les résultats montrent des résultats plus importants par rapport à celle de lin, une moyenne de 2,95 J ( $\pm 0,3$  J).

Nous pouvons conclure que pour nos essais, la présence du kevlar a pour effet d'améliorer la résistance de 36,61% par rapport au composite de lin. Pour la deuxième configuration (Tab. III-7), la présence du kevlar augmente d'une manière significative la résistance à l'impact de nos éprouvettes. La valeur de l'énergie de rupture pour les échantillons hybride kevlar/lin est presque sept fois celle de l'échantillon lin (de  $0,3 \text{ J} \pm 0,04$  à  $1,87 \text{ J} \pm 0,05$ ). Pour les deux configurations suivantes :  $[0]_{F16}$  et  $[0]_{K2} / \pm 45_{F6}$ s, on peut remarquer que les valeurs des énergies de rupture sont similaires. Pour la configuration  $[0]_{K2}/(0/90)_{3F}$ s, l'énergie de rupture est autour de  $1,99 \text{ J} (\pm 0,04 \text{ J})$  (Tab. III-8).

La figure III.17 résume les données recueillies. En comparant les résultats on peut remarquer que le kevlar a un effet remarquable sur la résistance au choc du composite, quel que soit pour les stratifiés avec l'empilements  $0^\circ$  ou  $\pm 45$ . Tel que l'ajout du kevlar à améliorer la résistance au choc de 36,61% pour les stratifiés avec l'empilement  $0^\circ$  et pour l'empilement  $\pm 45$ , la résistance au choc de matériau hybride kevlar/ lin et presque 6 fois celle de du lin. De l'autre côté, on peut remarquer que les échantillons avec l'empilement  $[0]_{K2}/(0/90)_{3F}$ s montrent des résultats quasiment similaires à ceux de  $[0]_{F16}$  et  $[0]_{K2}/\pm 45_{F6}$ s.



FigureIII-17 Résumé des données recueilles à température ambiante

#### 4. Essai de Charpy à T= 0° C

Un bloc de glace carbonique a été utilisé dans le but de refroidir les échantillons jusqu'à température égale à 0 °C. un thermomètre a été installé sur le détenteur de l'échantillon.

Les tableaux III-9, III-10, III-11 présentent les résultats enregistrés au cours des essais Charpy pour les différents empilements pour les deux matériaux hybrides et lin.

Pour la première configuration (Tab. III-9), les échantillons de lin montrent une variation d'énergie de rupture autour de 1,61 J ( $\pm 0,14$ J). Par contre pour les échantillons hybrides kevlar/lin, l'énergie de rupture égale 2,65 J ( $\pm 0,31$  J). Dans ce cas, on peut dire que la présence du kevlar a pour effet d'améliorer la résistance de 39,25%.

Tableau III-9 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement 0°

Spécimen	[0K2 /0F6] S			[0] F16		
	Énergie	charpy impact tenacity [KJ/m <sup>2</sup> ]	Re aux chocs [J/m]	Énergie	charpy impact ténacité [KJ/m <sup>2</sup> ]	Re aux chocs [J/m]
1	2,79	66,86	232,25	1,76	43,84	147,69
2	2,25	53,86	184,02	1,59	39,75	144,11
3	2,39	57,25	200,50	1,39	34,81	118,05
4	2,92	69,93	251,94	1,67	41,63	141,55
5	2,91	69,81	250,43	1,65	40,73	139,83
Moyenne	2,65	63,54	223,83	1,61	40,15	138,25
Écart Type	0,31	7,49	30,41	0,14	3,35	11,67
Cv	0,12	0,12	0,14	0,08	0,08	0,08

Pour la deuxième configuration (Tab III-10), l'ajout de Kevlar a amélioré l'énergie de rupture de 1,47 J ( $\pm 0,21$  J) à 1,71 J ( $\pm 0,09$  J). Ainsi la résistance au choc de 123,93 J/m à 158,15 J/m.

Tableau III-10 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement  $\pm 45$

Spécimen	$[0K2/\pm 45F6] S$			$[\pm 45] F16$		
	Énergie	charpy impact tenacity $ KJ/m^2 $	Re aux chocs $[J/m]$	Énergie	charpy impact ténacité $ KJ/m^2 $	Re aux chocs $[J/m]$
1	1,73	46,94	159,63	1,58	38,46	130,77
2		44,78	152,23	1,39	32,69	123,91
3		46,19	157,06	1,77	45,88	147,79
4		45,54	154,83	1,24	32,20	109,52
5		49,11	167,00	1,35	34,85	107,65
Moyenne	1,71	46,51	158,15	1,47	36,82	123,93
Écart Type	0,09	1,66	5,65	0,21	5,64	16,50
Cv	0,05	0,04	0,04	0,14	0,15	0,13

Pour les échantillons  $[0K2/(0/90)3F] S$ , on remarque que la résistance au choc est similaire à celle d'échantillons  $[0K2/\pm 45F6] S$ , malgré que l'énergie de rupture de  $[0K2/(0/90)3F] S$  est plus grand.

Tableau III-11 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement (0/90)

Spécimen	$[0K2/(0/90)3F] S$		
	Énergie	Charpy impact tenacity $ KJ/m^2 $	Re aux chocs $[J/m]$
1	1,71	41,11	137,67
2		44,54	167,45
3		43,45	155,58
4		41,53	154,69
5		51,75	179,75
Moyenne	1,85	44,48	159,03
Écart Type	0,18	4,30	15,71
Cv	0,10	0,10	0,10

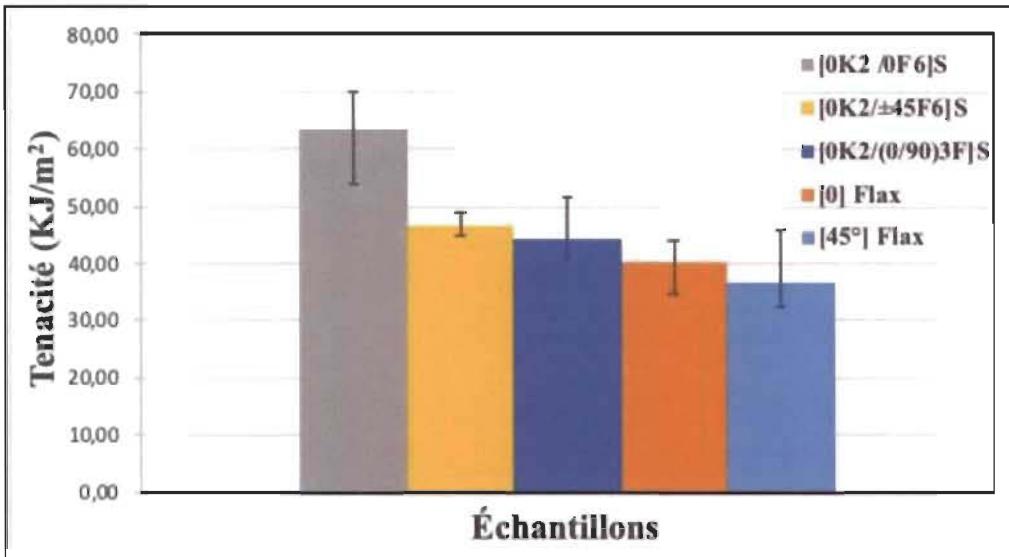


Figure III-18 Résumé des données recueillies à T= 0°C

La figure III.18. présente le résumé des données recueillies à T=0°C pour les deux matériaux avec différents empilements. La figure montre que la résistance aux chocs des échantillons hybrides est meilleure que celle de lin.

Pour les stratifiés ayant les séquences d'empilement 0° et ± 45°, l'ajout de kevlar a amélioré la résistance au choc de 36,81% et de 20,83%, respectivement.

## 5. Essai de Charpy à T= -22° C

Tableau III-12 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement 0°

Spécimen	0K2 /0F6  S			0  F16		
	Énergie	Charpy impact tenacity [KJ/m2]	Re aux chocs [J/m]	Énergie	Charpy impact tenacity [KJ/m2]	Re aux chocs [J/m]
1	2,12	50,78	176,42	1,69	41,31	141,32
2	2,14	51,38	175,57	1,68	41,06	139,04
3	2,26	54,17	192,66	1,51	40,35	131,79
4	2,54	60,85	207,95	1,46	35,70	119,62
5	2,22	53,23	182,93	1,37	40,14	131,00
Moyenne	2,25	54,08	187,11	1,54	39,71	132,56
Écart Type	0,17	4,02	13,51	0,14	2,29	8,50
Cv	0,07	0,07	0,07	0,09	0,06	0,06

Tableau III-13 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement ±45

Spécimen	0K2/±45F6  S			±45  F16		
	Énergie	Charpy impact tenacity [KJ/m2]	Re aux chocs [J/m]	Énergie	Charpy impact tenacity [KJ/m2]	Re aux chocs [J/m]
1	1,26	37,70	128,18	0,89	22,15	75,36
2	1,36	37,45	127,29	1,38	40,61	121,57
3	1,63	44,88	152,57	1,23	28,84	97,15
4	1,53	42,92	145,89	1,24	31,64	107,47
5	2,05	49,06	161,92	1,22	31,72	102,61
Moyenne	1,56	42,40	143,17	1,19	30,99	100,83
Écart Type	0,30	4,93	15,20	0,18	6,64	16,88
Cv	0,19	0,12	0,11	0,15	0,21	0,17

Les résultats enregistrés au cours de l'essai illustrent que les échantillons hybrides montrent des valeurs plus importantes par rapport aux échantillons de lin sans Kevlar. Pour la première configuration, l'énergie de rupture pour les échantillons hybride est autour de 2,25 J ( $\pm 0,17$  J)

et 1,54 J ( $\pm 0,14$  J) pour les échantillons lin sans kevlar. Ce qui représente une amélioration de 31,55%. Pour la deuxième configuration, l'énergie de rupture pour le lin est 1,19 J ( $\pm 0,18$  J) et 1,56 J ( $\pm 0,3$  J) pour kevlar/ lin. Une amélioration donc de 23,71%.

Tableau III-14 Résultats enregistrés au cours d'essai Charpy pour l'empilement (0/90)

Spécimen	$[0_{K2}/(0/90)_{3F}]_S$		
	Énergie	Charpy impact tenacity [kJ/m <sup>2</sup> ]	Re aux chocs [J/m]
1	2,10	50,30	170,49
2	1,73	41,53	152,92
3	1,66	39,88	140,57
4	1,77	42,50	148,91
5	1,88	45,14	158,55
<b>Moyenne</b>	1,83	43,87	154,29
<b>Écart Type</b>	0,17	4,07	11,17
<b>Cv</b>	0,09	0,09	0,07

Le figure III.19. Illustré les résultats recueillis au cours de l'essai de Charpy pour T= -22°C. la figure a montré que l'ajout de kevlar a un effet bénéfique sur la résistance à l'impact du composite. L'augmentation est de 26,57% pour les échantillons avec l'empilement 0°, et de 26,91% pour les échantillons avec empilement ± 45°.

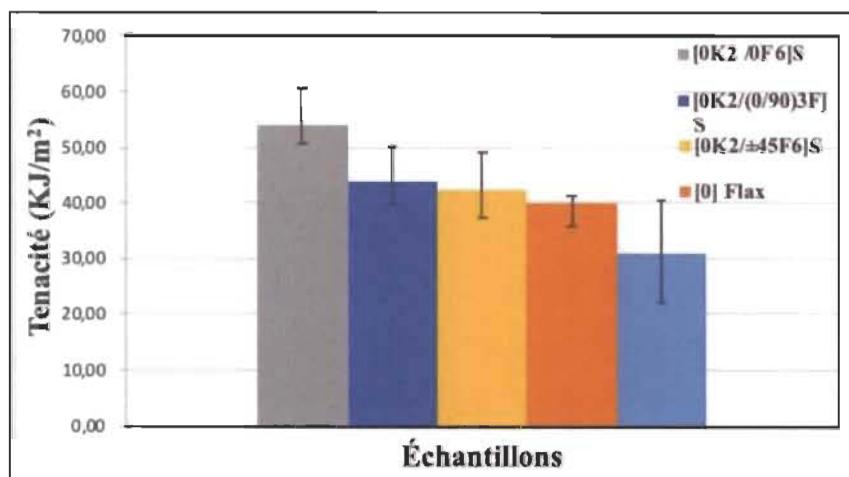


Figure III-19 Résumé des données recueillies à T= -22°C

## 6. Effet de la température :

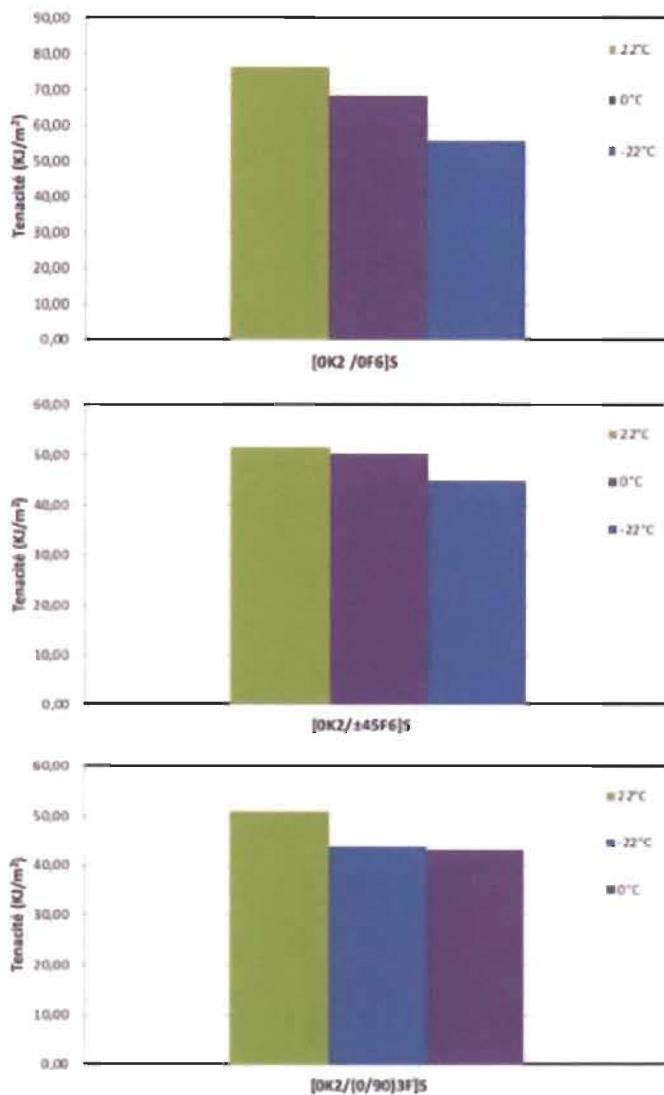


Figure III-20 Effet de la température sur la ténacité des différents stratifiés pour le composite hybride

La figure III.20. Présente l'effet de la température sur les différentes configurations pour notre matériau hybride kevlar/ lin. On remarque que la résistance à l'impact du composite est à son apogée dans des températures ambiantes, et elle commence à diminuer progressivement en fonction de la température, ce qui est totalement logique parce que lorsqu'un matériau est gelé, sa résistance à l'impact diminue. En plus, nous pouvons conclure que, dans le cas de matériau hybride kevlar/ lin, le changement de température a un effet plus important sur le composite avec les empilements  $[0_{K2}/(0/90)_3F]$  s est  $[0_{K2} / 0_{F6}]$  s.

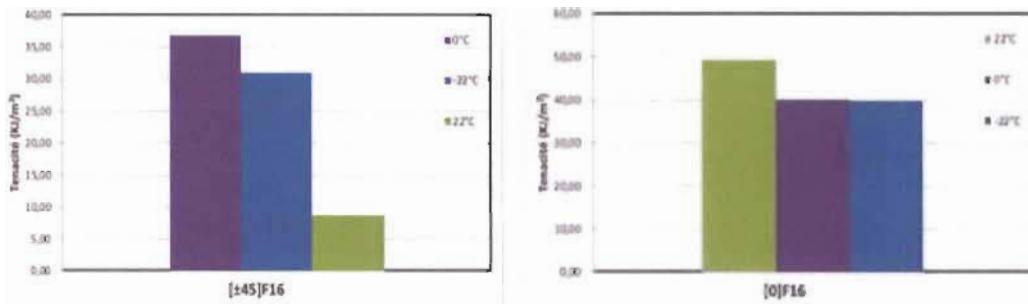


Figure III-21 Effet de la température sur la ténacité des différents stratifiés pour le composite lin

Dans le cas d'un composite de lin avec l'empilement  $[0]_{F16}$ , on remarque que pour la température ambiante la résistance à l'impact est à son apogée. Mais dans le cas de  $[\pm 45]_{F16}$ , on a observé un comportement différent par rapport aux cas présidents. La résistance à l'impact est à son apogée pour  $T = 0^\circ\text{C}$ , ensuite elle est diminuée de 15.83% pour  $T = -22^\circ\text{C}$  et de 76.45% pour  $T = 22^\circ\text{C}$ .

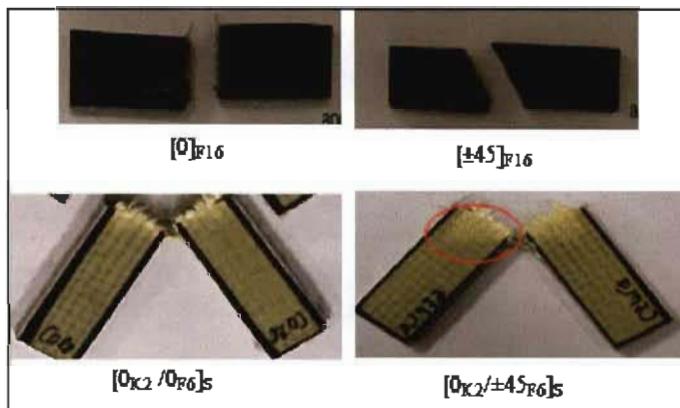


Figure III-22 Les ruptures macroscopiques obtenues des éprouvettes après le test Charpy

La figure III.22 montre les ruptures macroscopiques obtenues suite aux essais Charpy pour les quatre configurations. Pour les composites de lin sans kevlar, la rupture se produit le long de l'orientation de fibres des spécimens testés et les éprouvettes sont complètement rompues. Par contre pour les composites hybride, aucune séparation n'a été observée.

## **Chapitre IV : Impact à basse vitesse – Puits de chute**

#### IV.1. Introduction

La machine d'essais à puits de chute instrumentée de type DYNATUP modèle 8250 est utilisée pour tester les propriétés à l'impact d'un grand nombre de matériaux sur une large gamme de vitesses de choc. Cette machine se compose d'un bâti, de deux colonnes de guidage, d'un moteur de levage, d'un mécanisme de chute de poids, d'un panneau de commande et de divers accessoires, figure VI-1. Différents poids sont disponibles, permettant d'atteindre une grande variété d'énergies de choc. La cellule de charge, qui est fixée à la traverse inférieure, sert à fournir les données de charge au système d'acquisition des données qui lui est relié. Les informations concernant la vitesse sont fournies grâce à un dispositif de détection de la lumière et de réflecteur.

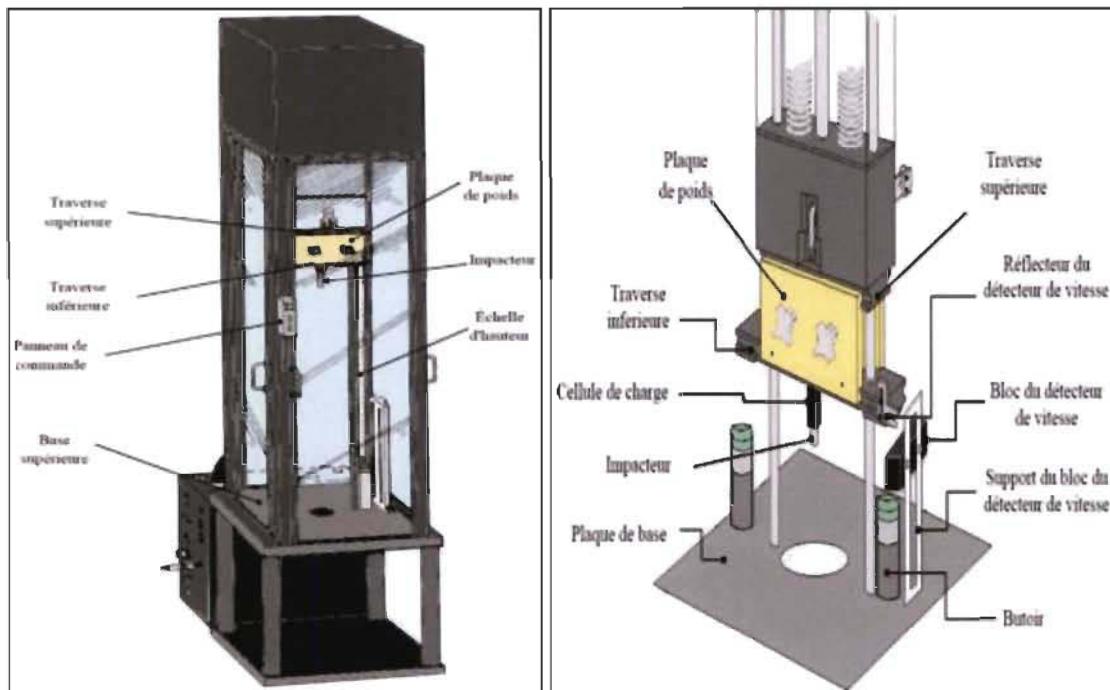


Figure IV-1 | La machine d'essais à masse tombante instrumentée modèle 8250

## IV.2. Essais

Les tests d'impact à basse vitesse ont été effectués à partir d'une chute libre d'une masse ( $m$ ), d'une hauteur variable ( $h$ ), sans vitesse initiale sur l'éprouvette placée au montage de fixation de la machine. Les données des essais d'impact ont été acquises via le système d'acquisition des données Dynatup Modèle 830-I qui est installé sur un PC connecté à la machine d'impact. Nous avons choisi trois différentes énergies pour évaluer les performances de nos matériaux sous une sollicitation d'impact à basse vitesse. Une énergie assez importante pour perforez le composite. Pour les deux autres, l'objectif est d'endommager le composite sans pour autant le percé. Dans ce chapitre nous présentons les différents résultats obtenus pour les différentes énergies et configurations d'éprouvettes.

La résistance aux chocs peut être déterminée en termes d'énergie de choc absorbée, de force maximale et de déformation maximale. On peut aussi analyser les différents mécanismes d'endommagement résultant suite aux essais d'impact. Il est possible d'obtenir ces paramètres en utilisant les courbes d'impact : force-temps, énergie-temps ou force-déplacement, voir figure IV-2.

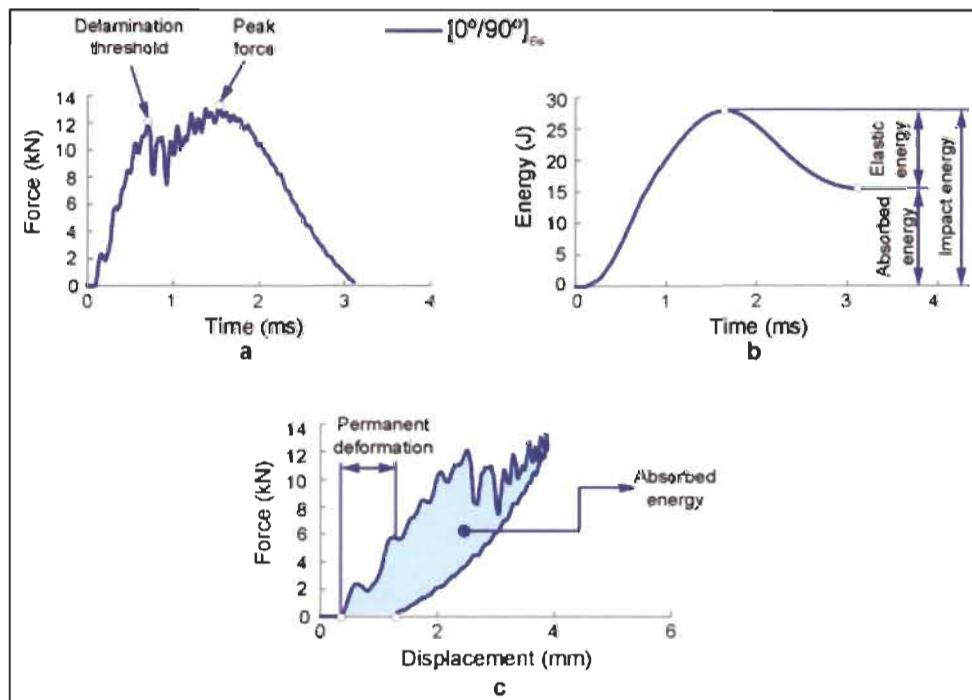


Figure IV-2 Essais d'impact de stratifiés composites : (a) Force-temps, (b) Énergie-temps et (c) Force-déplacement [50]

### IV.3. Résultats

#### 1. Énergie d'impact E = 5,5 J

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats d'impact à basse vitesse pour les stratifiés [0<sub>K2</sub>/0<sub>F6</sub>]S, [0]F16 (Tab.1) et [0<sub>K2</sub>/±45<sub>F6</sub>]S, [±45]F16 (Tab.2).

Tableau IV-1 Les résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 5,5 J

Spécimen	[0K2/0F6] S				[0] F16			
	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)
1	1,39	3,11	2275,77	4,35	1,38	3,47	1427,06	5,49
2	1,39	3,22	2426,96	5,04	1,37	3,15	1472,50	5,51
Moyenne	1,39	3,16	2351,37	4,69	1,38	3,31	1449,78	5,50
Écart Type	0,00	0,08	106,90	0,49	0,01	0,23	32,13	0,01
C <sub>v</sub>	0,00	0,02	0,05	0,10	0,01	0,07	0,02	0,00

Tableau IV-2 Les résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 5,5 J

Spécimen	[0K2/±45F6] S				[±45] F16			
	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)
1	1,37	3,07	2534,31	4,30	1,38	3,12	1641,85	3,91
2	1,37	1,90	3002,24	5,66	1,38	3,25	1611,05	5,05
Moyenne	1,37	2,49	2768,27	4,98	1,38	3,19	1626,45	4,48
Écart Type	0,00	0,83	330,88	0,96	0,00	0,09	21,78	0,81
C <sub>v</sub>	0,00	0,33	0,12	0,19	0,00	0,03	0,01	0,18

Pour la première configuration (Tab. IV-1), les résultats montrent une variation d'énergie absorbée autour de 3,31 J ( $\pm 0,23$  J), pour les échantillons de lin avec une force maximale de 1449,78 N ( $\pm 32,13$  N). Pour les échantillons hybrides kevlar/lin, les résultats montrent des énergies de moyenne de 3,16 J ( $\pm 0,08$  J), et une force maximale 2351,37 N ( $\pm 106,90$  N).

Pour la deuxième configuration (Tab. IV-2), les échantillons de lin présentent une variation d'énergie absorbée de 3,19 J ( $\pm 0,09$  J) avec une force maximale de 1626,45 N ( $\pm 21,78$  N).

Pour les échantillons hybrides les résultats montrent des énergies absorbées moyenne de 2,49 J ( $\pm 0,83$  J) et force maximale de 2768,27 N ( $\pm 330,88$  N). On peut dénoter que l'ajout de kevlar a amélioré l'énergie absorbée de 21,9 % et la force maximale de 41,25 %.

Les figures IV.3 et IV.4 illustrent la charge en fonction du temps pour les deux matériaux avec différents empilements lorsqu'ils sont soumis à un impact à basse vitesse.

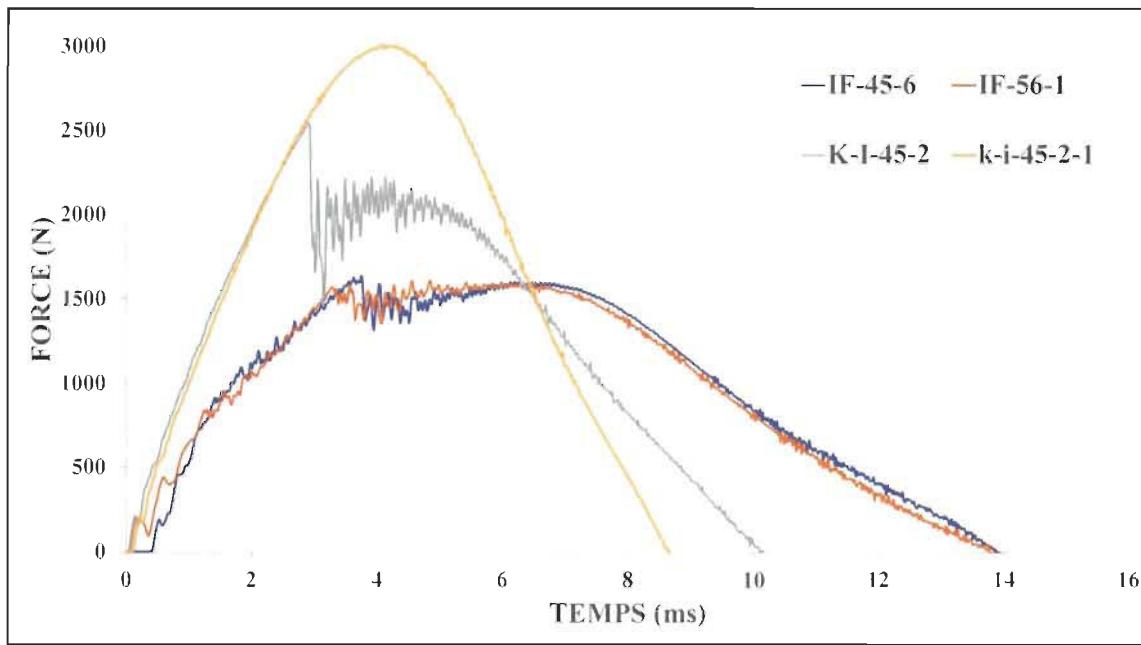


Figure IV-3 La force en fonction de temps pour l'empilement  $45^\circ$

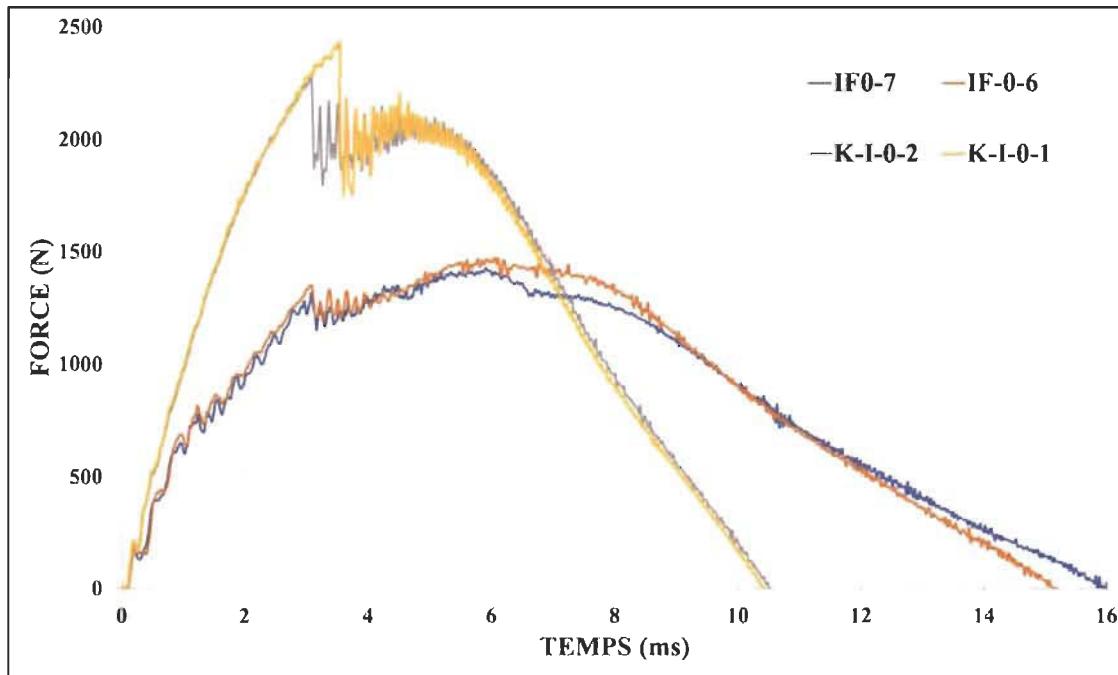


Figure IV-4 La force en fonction de temps pour l'empilement  $0^\circ$

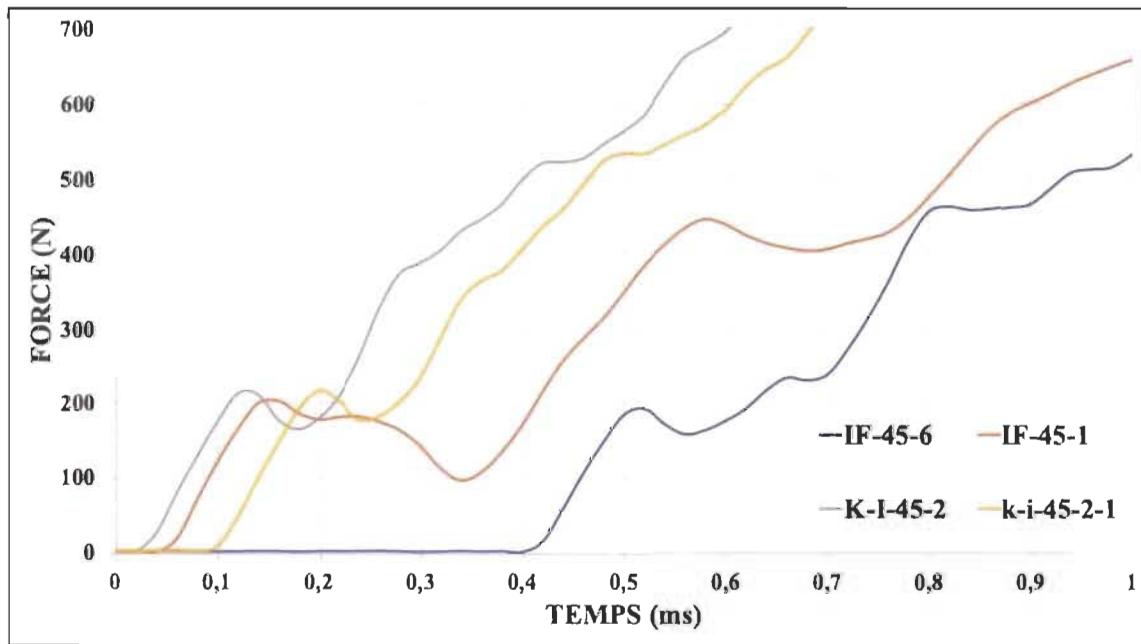


Figure IV-5 Le premier dommage produit dans la configuration à  $45^\circ$

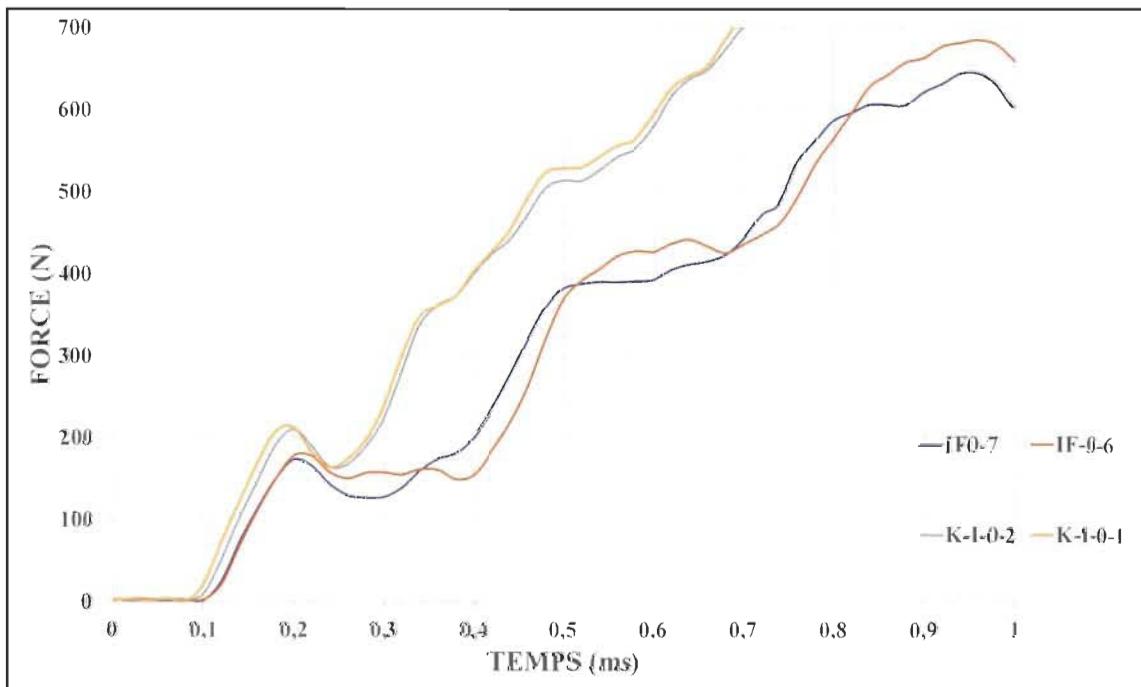


Figure IV-6 Le premier dommage produit dans la configuration à  $0^\circ$

La charge initiale indique le premier dommage produit dans l'échantillon (défaillance d'interface ou une fissuration de la matrice...). Pour les stratifiés hybrides, le premier dommage pour les différentes configurations a été produit pour une force égale 210 N, pour les stratifiés de lin, le début de l'endommagement est enregistré à partir de 180 N (figures IV.5 et IV.6).

La charge maximale enregistrée correspond à la valeur de la charge la plus élevée sur les courbes des figures IV.3 et IV. 4. Ces graphes présentent également des oscillations créées par des vibrations produites dans l'échantillon par l'impact. On peut remarquer que la charge initiale est presque identique pour le Kevlar et le lin dans les deux configurations  $0^\circ$  et  $45^\circ$ . Par contre, les échantillons de kevlar présentent des valeurs de charges maximales supérieures à celle du lin.

Les figures IV.7 et IV.8 représentent la variation de l'énergie d'impact en fonction du temps. Cette énergie d'impact se divise en énergie élastique ( $E_e$ ), c'est la partie de l'énergie d'impact qui est stockée dans l'échantillon et qui est responsable du rebond de l'impacteur. Et en énergie absorbée ( $E_a$ ) qu'est la fraction de l'énergie d'impact absorbée par l'échantillon par la formation de dommages.

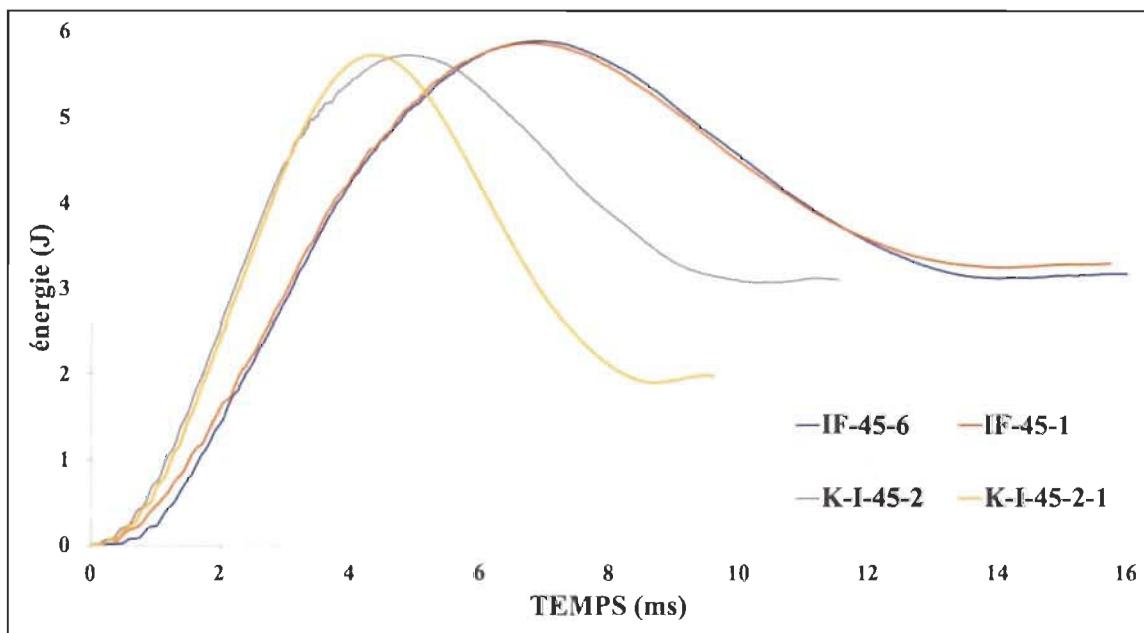


Figure IV-7 Énergies en fonction de temps pour la configuration à  $45^\circ$

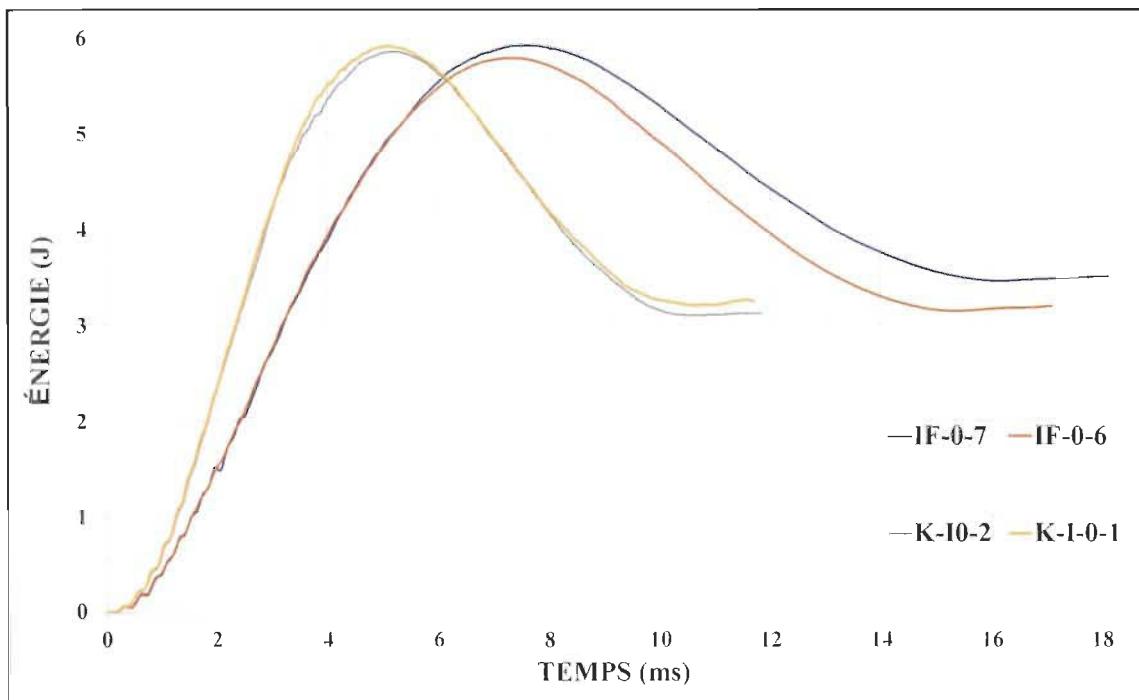


Figure IV-8 Énergies en fonction de temps pour la configuration à  $0^\circ$

La figure IV.7 présente l'évolution de l'énergie pour le matériau hybride et lin tous deux à  $45^\circ$ . D'une part on observe que pour les deux types de matériau, l'énergie évolue jusqu'à une valeur maximale de 5,9 J avec des temps différents. Le lin atteint cette valeur à environ 7 ms, tandis que l'hybride (kevlar + Lin) atteint cette valeur à 4,4 ms. Ces augmentations sont suivies d'une baisse jusqu'à la valeur de 3,2 J où la courbe reste stable.

La figure IV.8, illustre l'évolution de l'énergie en fonction du temps pour le matériau hybride (kevlar + lin) et le lin avec une configuration à  $0^\circ$ . Les essais nous révèlent que pour cette configuration à  $0^\circ$ , l'énergie atteint une valeur de 5,8 J à des temps de 5 millisecondes et 6,7 ms respectivement pour l'hybride et le lin. Ensuite la valeur de cette énergie baisse et se stabilise à 3,2 J.

La figure IV.10 illustre la force en fonction du déplacement pour les deux matériaux hybrides et lin pour la configuration  $45^\circ$ . Le graphe montre que pour le matériau hybride, la charge a atteint les 2800 N, pour un déplacement de 4 mm. Alors que pour le lin, la charge n'a même pas dépassé 1500 N, mais le déplacement s'élève à environ 5.8 mm.

Pour la configuration à  $0^\circ$ , la figure IV.9 montre que dans le cas de Kevlar le matériau a atteint un déplacement 4 mm avec une charge maximale égale 2500 N ; alors que pour le lin, le

matériau on note un déplacement d'environ 6 mm pour une charge de 1500 N. les figures ci-dessus montrent clairement que les graphes ont tendance à retourner encore au point initial, ce qui signifie que la plaque n'est pas perforée.

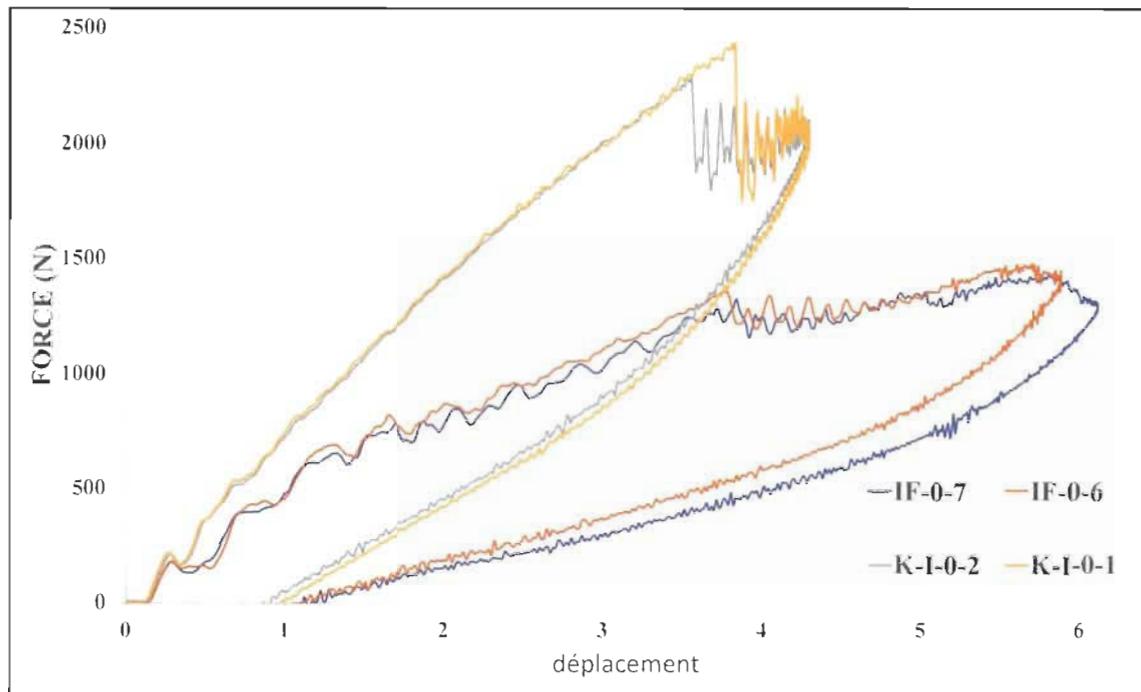


Figure IV-9 Force en fonction de déplacement pour l'empilement  $0^\circ$

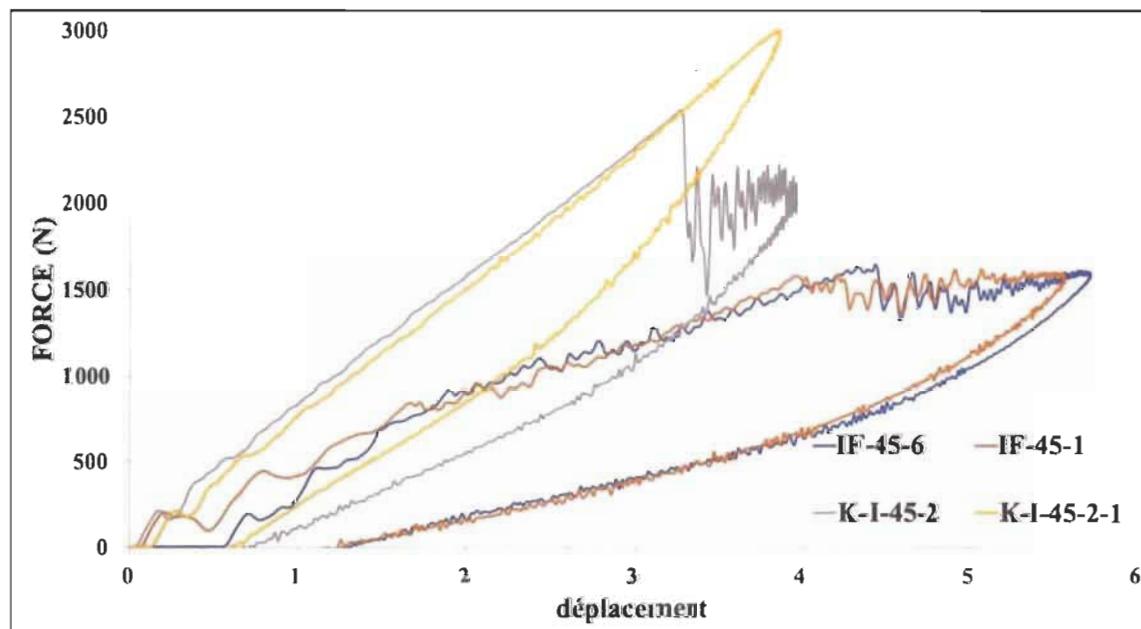


Figure IV-10 Force en fonction de déplacement pour l'empilement  $45^\circ$

## 2. Énergie d'impact E= 10J

Les tableaux suivants présentent les résultats enregistrés au cours d'essais d'impact à basse vitesse pour les différentes configurations à une énergie égale à 10 J, pour les deux matériaux hybrides et lin.

TableauIV-3 Des résultats collectés d'impact à basse vitesse E= 10 J

Spécimen	[0K2/0F6] S				[0] F16			
	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)
1	1,29	7,44	2475,96	5,10	1,26	8,18	1471,00	8,46
2	1,30	7,35	2668,08	10,03	1,29	8,35	1571,29	6,39
Moyenne	1,30	7,39	2572,02	7,57	1,28	8,27	1521,14	7,42
Écart Type	0,00	0,06	135,85	3,48	0,02	0,12	70,91	1,46
C <sub>v</sub>	0,00	0,01	0,05	0,46	0,02	0,01	0,05	0,20

Les résultats présentés dans le tableau IV-3 montrent une variation d'énergie absorbée autour de d'une valeur moyenne 8,27 J ( $\pm 0,12$  J), pour les échantillons de lin avec une force maximale de 1521,14 N ( $\pm 70,91$  N). Pour les échantillons hybrides kevlar/lin, les résultats montrent des énergies de moyenne de 7,39 J ( $\pm 0,06$  J), et une force maximale 2572,02 N ( $\pm 135,85$  N).

TableauV-4 Des résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 10 J

Spécimen	[0K2/ $\pm 45$ F6] S				[ $\pm 45$ ] F16			
	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)
1	1,31	7,36	2815,94	10,94	1,29	4,23	1726,48	3,38
2	1,29	7,08	3294,66	6,57	1,30	8,67	1702,19	6,44
Moyenne	1,30	7,22	3055,30	8,75	1,29	6,45	1714,33	4,91
Écart Type	0,01	0,20	338,51	3,09	0,00	3,15	17,18	2,16
C <sub>v</sub>	0,01	0,03	0,11	0,35	0,00	0,49	0,01	0,44

Pour la deuxième configuration (Tab. IV-4), les échantillons de lin montrent une variation d'énergie absorbée autour d'une valeur moyenne de 6,45 J ( $\pm 3,15$  J) et une force maximale de 1714,33 N ( $\pm 17,18$  N). Par contre, pour les échantillons hybrides, l'énergie de rupture égale 7,22 J ( $\pm 0,20$  J) avec une force maximale de 3055,30 N ( $\pm 338,51$  N), est presque le double par rapport au celle de lin.

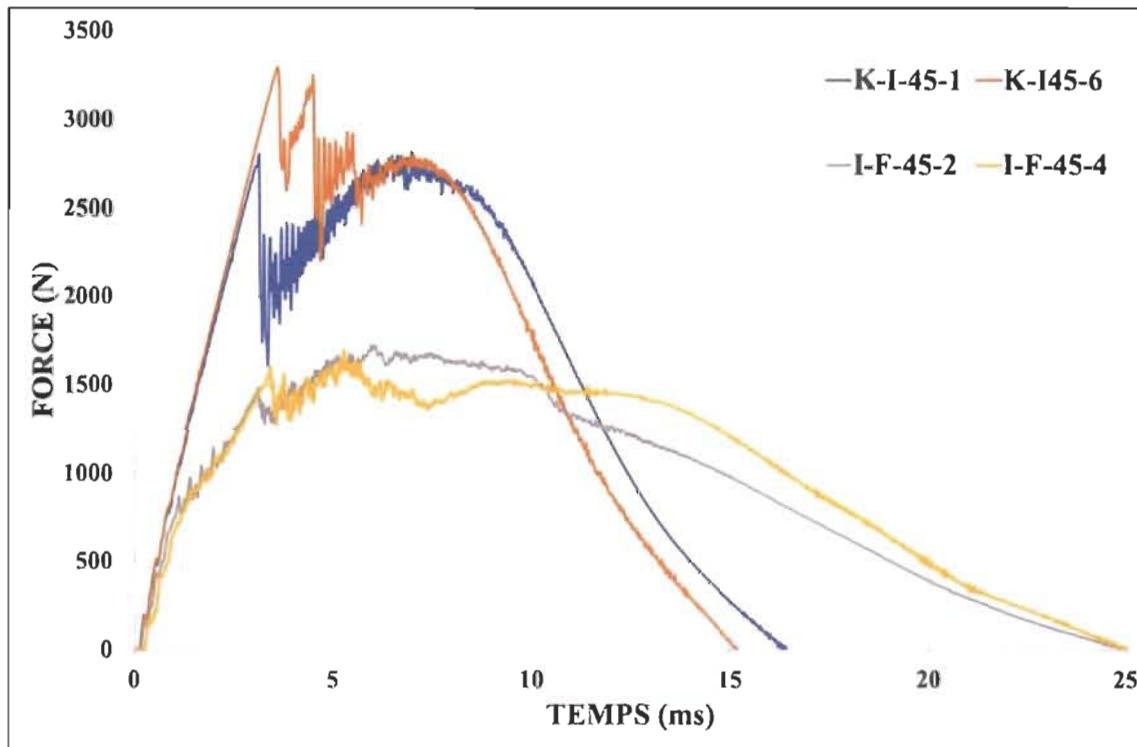


Figure IV-11 La force en fonction de temps pour la configuration à 45°

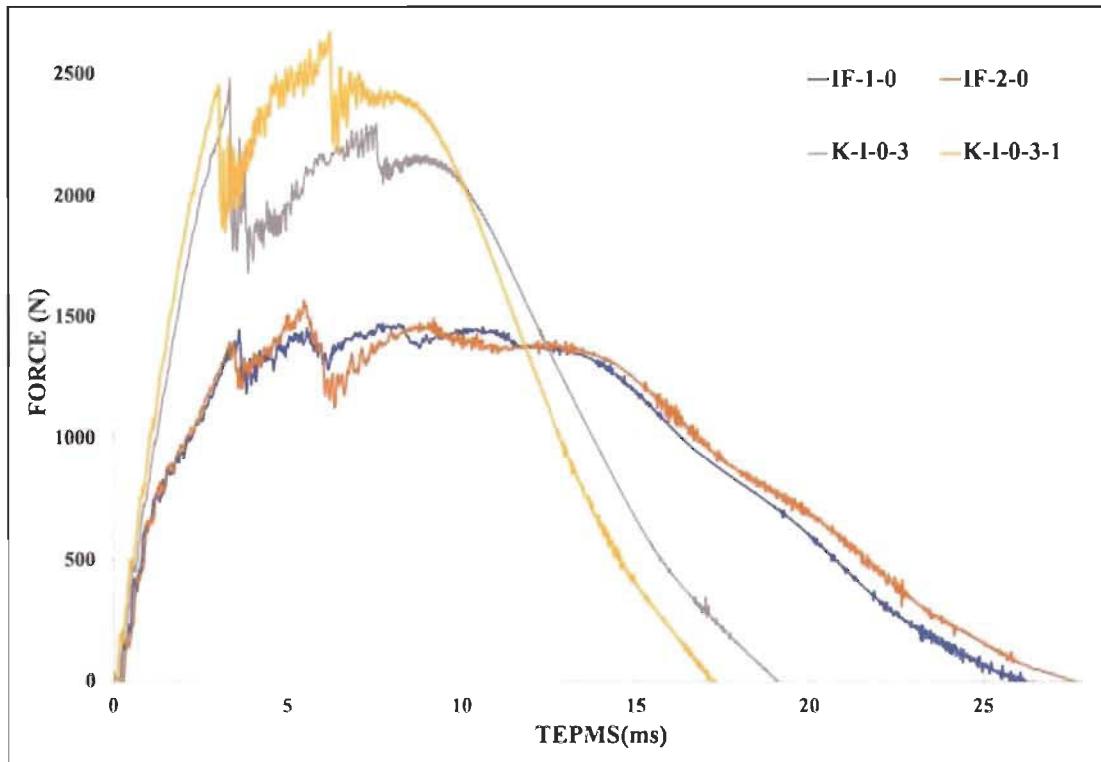


Figure IV-12 La force en fonction de temps pour la configuration à  $0^\circ$

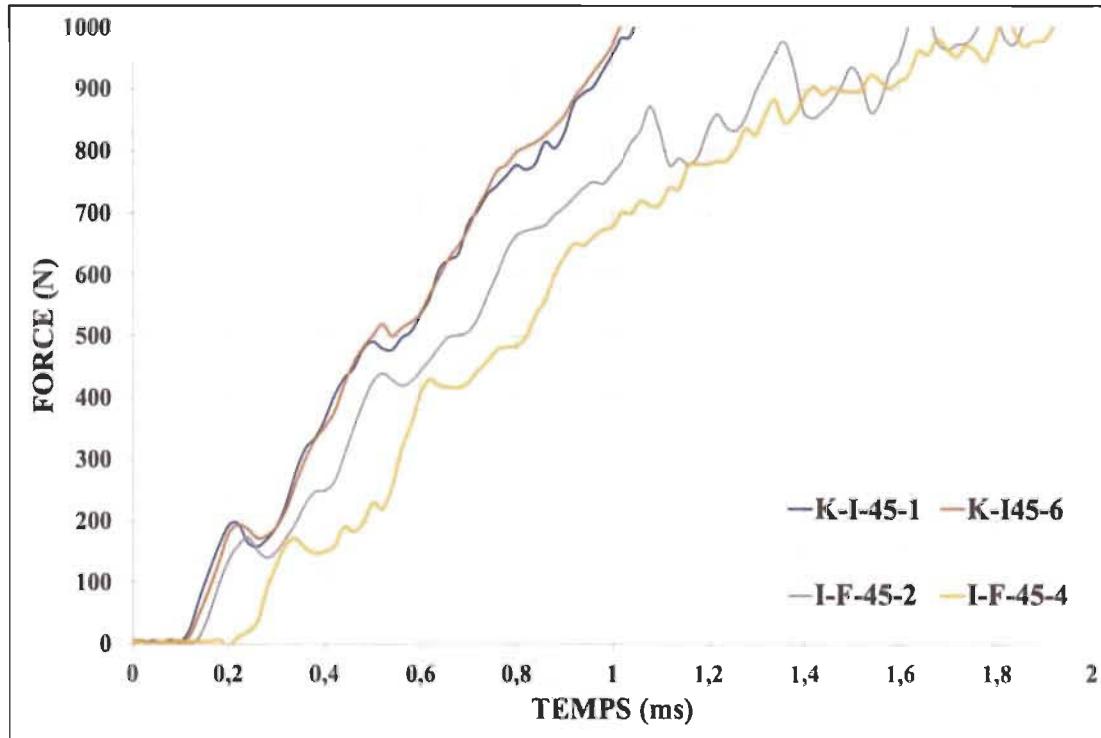


Figure IV-13 Le premier dommage pour la configuration à  $45^\circ$

Les figures IV.13 et IV.14 montrent que la charge initiale est presque identique pour les deux matériaux respectivement hybride (kevlar/lin) et le lin dans les deux configurations  $0^\circ$  et  $45^\circ$  respectivement figures 13 et figure 14. Le premier dommage pour les échantillons hybrides a été produit à une force égale 200 N, contrairement aux échantillons de lin, qu'ils ont endommagé à 170 N. Les échantillons hybrides atteignent une charge maximale plus grande par rapport à celle de lin (deux fois plus grand) (fig IV.11 et IV.12).

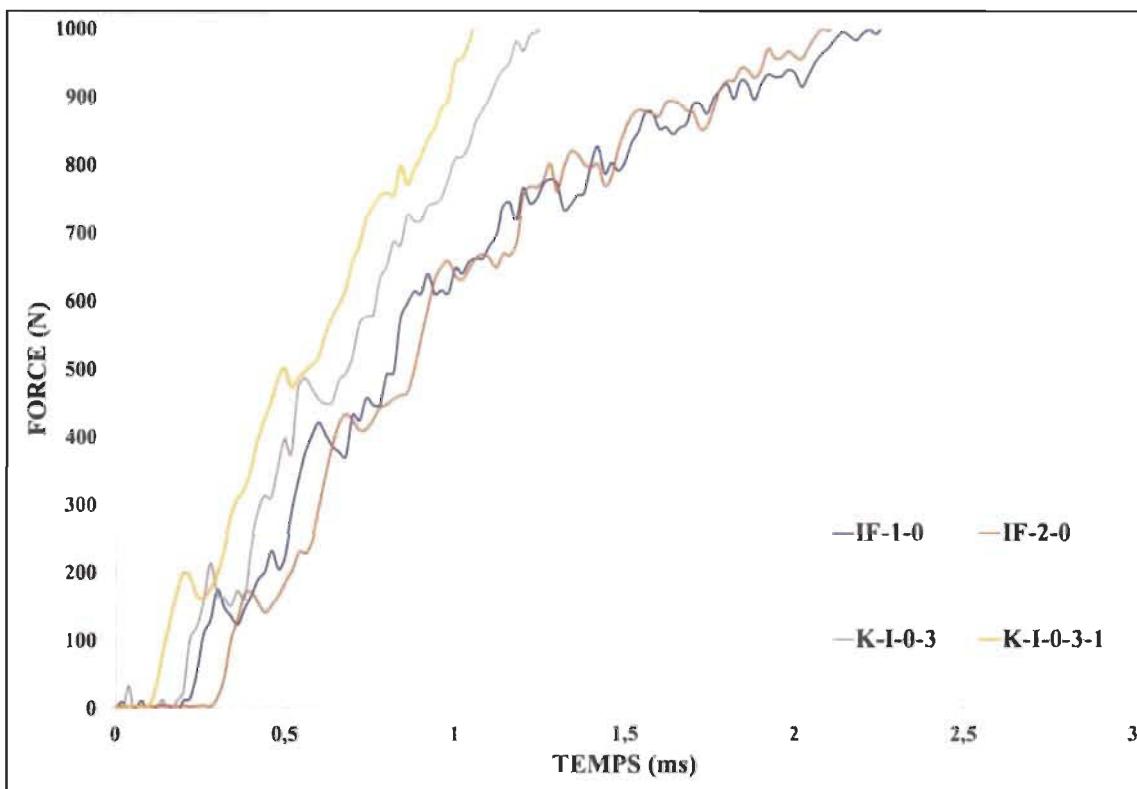


Figure IV-14 Le premier dommage pour la configuration à  $0^\circ$

Sur le plan de l'énergie, les figures ci-dessous montrent l'énergie en fonction de temps pour les deux matériaux hybride et lin avec les différentes configurations. La figure IV.15. montre que l'énergie pour le matériau hybride atteint une valeur maximale de 10,6 J dans les premiers 9 millisecondes, puis elle baisse et se stabilise à une valeur de 6,8 J.

Pour le lin l'énergie à commencer à baisser après qu'elle atteint une valeur entre 10,5 et 10,8 J dans la 14e millisecondes, et elle stabilise à une valeur de 8,2 J. la figure IV.15. Montre que le matériau hybride, atteint une valeur d'énergie entre 11 J durant les premiers 7 millisecondes et ensuite, elle baisse jusqu'à une valeur entre 7 et 7,5 J, alors que pour le lin dans les premiers 13 millisecondes l'énergie atteint une valeur de 10,8 J.

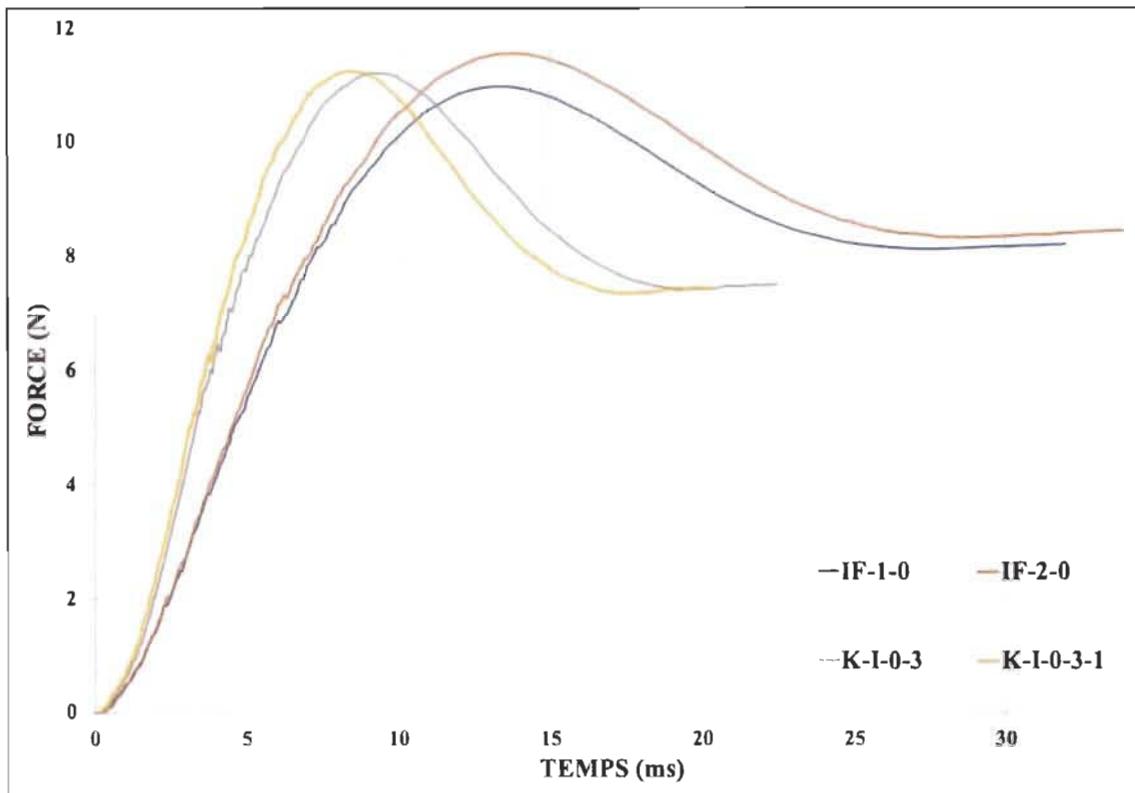
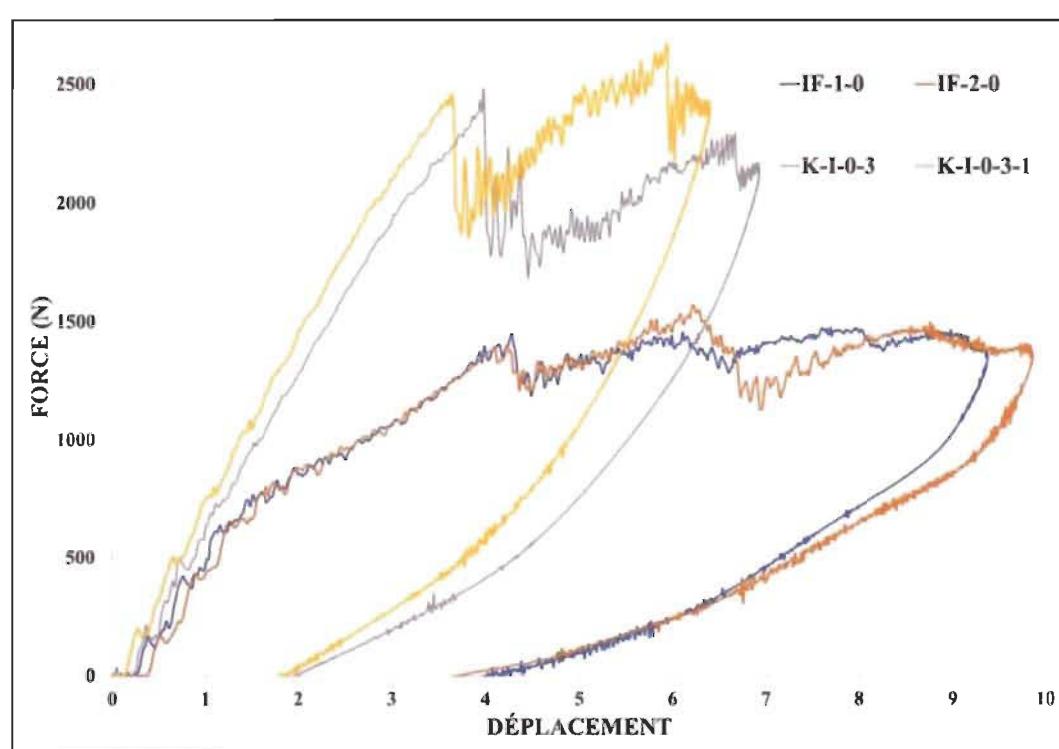
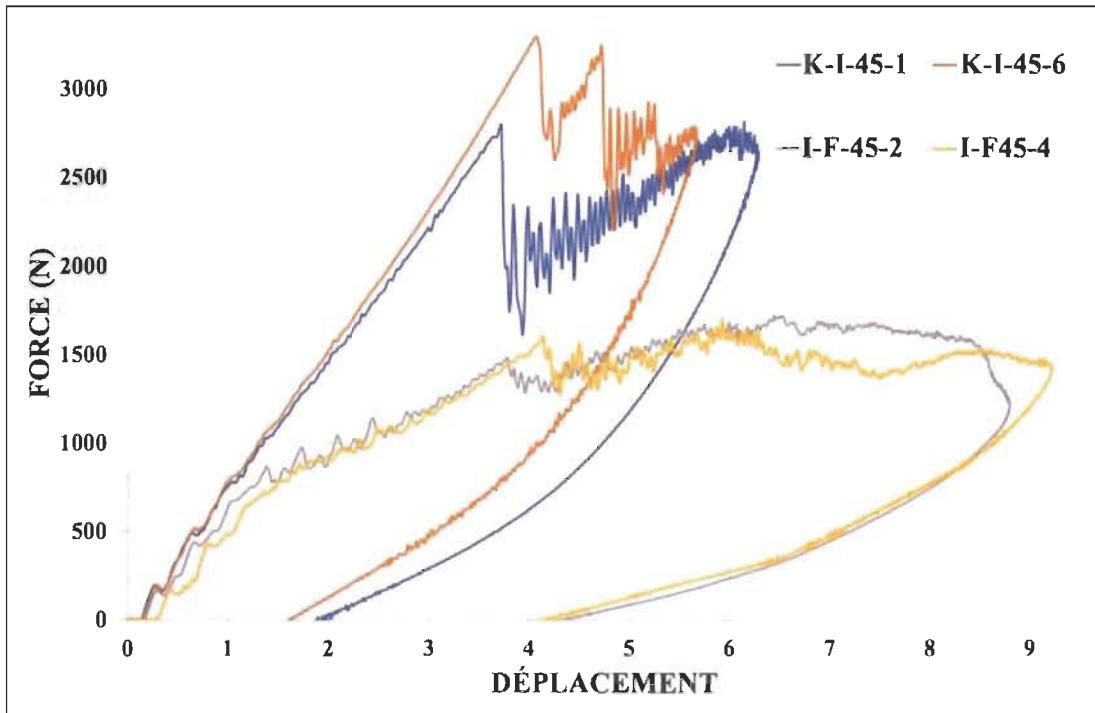


Figure IV-14 Énergies en fonction de temps pour la configuration  $0^\circ$

La figure IV.17. illustre la force en fonction de déplacement pour le matériau hybride et le lin pour la configuration à  $0^\circ$ . Le graphe de la figure IV.17 montre que pour le matériau hybride la charge atteint une valeur comprise entre 2500 et 2700 N ce qui occasionne un matériau à déplacement de 6,5 à 7 mm environ. Alors que pour le lin, la charge n'a même pas dépassé 1500 N, on a obtenu un déplacement de 9 mm qui est plus élevé que celui du matériau hybride. D'autre part, pour la configuration à  $45^\circ$ , illustré à la figure IV.16, on note un déplacement de 6,4 mm pour le matériau hybride pour une charge maximale comprise entre 2800 et 3300 N. Pour le lin, le déplacement est d'environ 9,2 mm avec une charge de 1700 N. les figures ci-dessous montrent clairement que les courbes tendent à retourner à l'état initiale, ce qui signifie que la plaque n'est pas perforée.



### 3. Énergie d'impact E= 45J

Les tableaux IV-5 et IV-6 présentent les résultats enregistrés au cours d'essais d'impact à basse vitesse pour les différentes configurations à une énergie égale à 10 J pour les deux matériaux hybrides et lin.

Tableau IV-5 Résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 45 J

Spécimen	[0K2/0F6] S				[0] F16			
	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)
1	2,75	24,39	2641,31	14,02	2,73	15,33	1699,09	5,69
2	2,73	25,41	2754,14	14,53	2,73	14,72	1610,15	5,88
3					2,75	21,55	1648,07	7,09
Moyenne	2,74	24,90	2697,73	14,28	2,74	17,20	1652,44	6,22
Écart Type	0,01	0,72	79,78	0,36	0,01	3,78	44,63	0,76
C <sub>v</sub>	0,00	0,03	0,03	0,03	0,00	0,22	0,03	0,12

Tableau IV-6 Résultats collectés lors de l'impact à basse vitesse E= 45 J

Spécime n	[0K2/±45F6] S				[±45] F16			
	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)
1	2,72	26,96	3833,06	16,15	2,72	16,25	2579,52	9,27
2	2,72	25,92	3536,13	12,70	2,72	19,32	1948,43	10,19
3	2,72	28,74	3643,01	14,40	2,71	19,45	1753,78	6,56
Moyenne	2,72	27,21	3670,73	14,42	2,72	18,34	2093,91	8,67
Écart Type	0,00	1,43	150,39	1,72	0,01	1,81	431,67	1,89
C <sub>v</sub>	0,00	0,05	0,04	0,12	0,00	0,10	0,21	0,22

Les résultats présentés dans le tableau 5 montrent une variation d'énergie absorbée autour d'une valeur moyenne 17,20, pour les échantillons de lin avec une force maximale de 1652,44 N. Pour les échantillons hybrides kevlar/lin, les résultats montrent une variation des énergies avec une moyenne de 24,90 J, et une force maximale 2697,73 N.

Pour la deuxième configuration (Tab. IV-6), les échantillons de lin montrent une variation d'énergie absorbée autour d'une moyenne de 18,34 J et une force maximale de 2093,91 N. Par contre pour les échantillons hybrides, l'énergie de rupture a une moyenne de 27,21 J avec une force maximale de 3670,73 N.

Sur le plan force-temps, les figures IV.18 et IV.19. Illustrent la force en fonction du temps pour les deux matériaux hybrides (kevlar/lin) et lin seule ; avec les configurations  $0^\circ$  et  $45^\circ$ , respectivement fig. IV.19 et fig. IV.18.

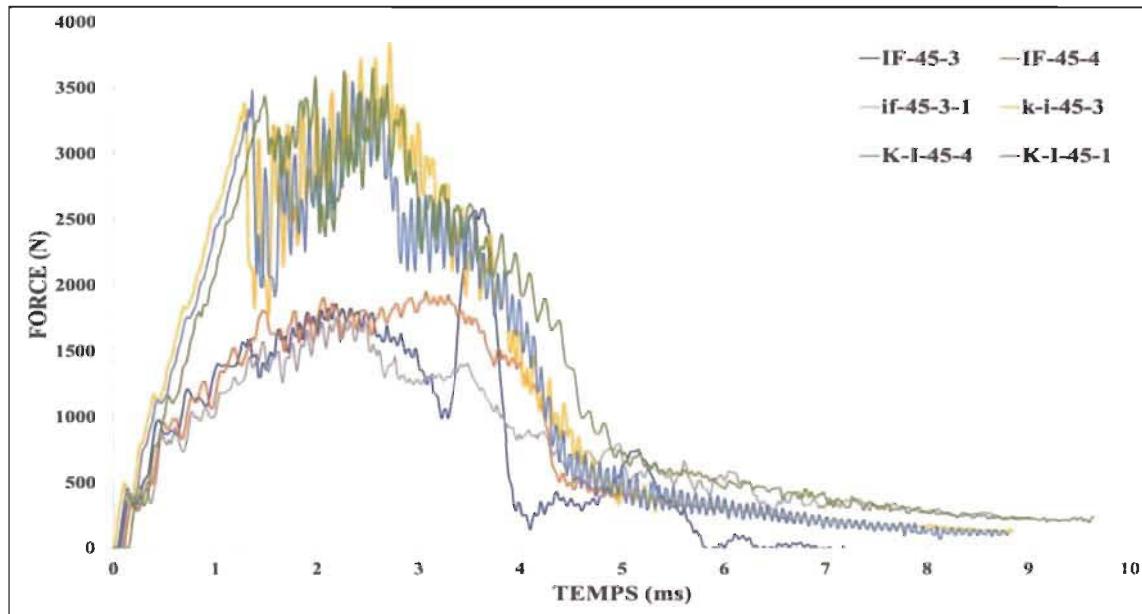


Figure IV-17 La force en fonction de temps pour l'empilement  $45^\circ$

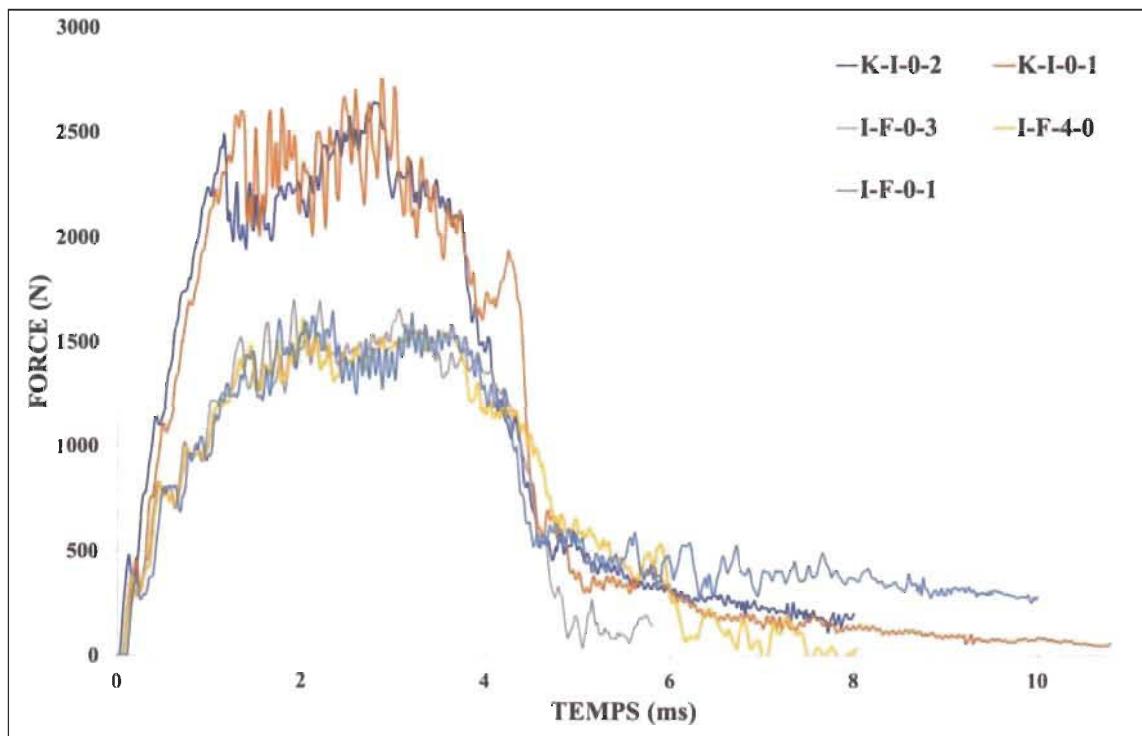


Figure IV-18 La force en fonction de temps pour l'empilement  $0^\circ$

Les graphes montrent que pour le matériau hybride, on a obtenu une force maximale de 2697,73 N pour la configuration  $0^\circ$  et de 3670,73 N pour la configuration  $45^\circ$ . Pour le lin à  $0^\circ$  on a obtenu une force de 1652,44 N ; et pour la configuration  $45^\circ$ , on a obtenu une force de 2093,91 N.

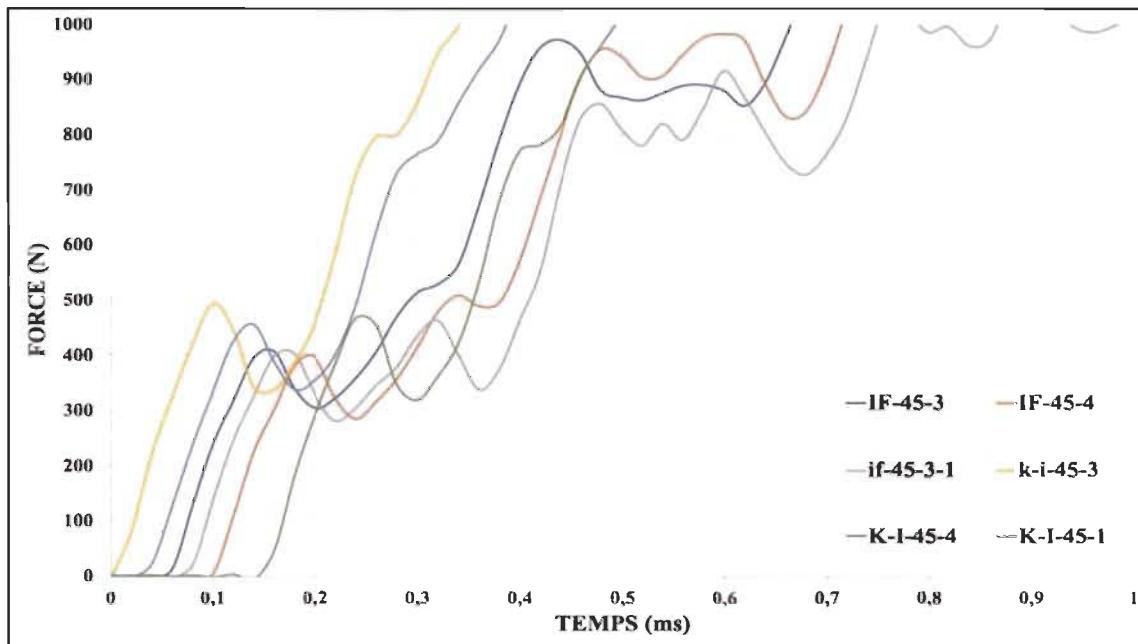


Figure IV-19 Le premier dommage configuration  $45^\circ$

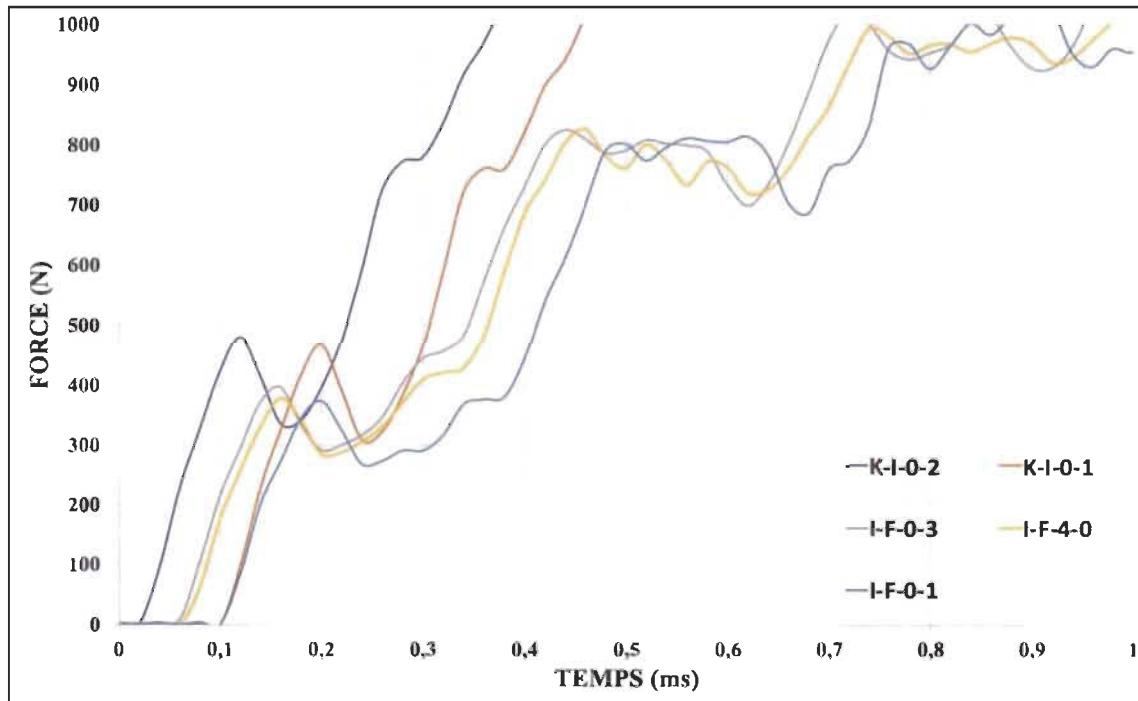


Figure IV-20 Le premier dommage configuration  $0^\circ$

D'après les figures précédentes, on peut dire pour le matériau hybride, les premiers dommages apparaissent dans chacune des différentes configurations  $0^\circ$  et  $45^\circ$  après l'application d'une force comprise entre entre 470 et 490 N. Tandis que pour les échantillons de lin, les dommages apparaissent pour une force comprise entre 380 et 410 N.

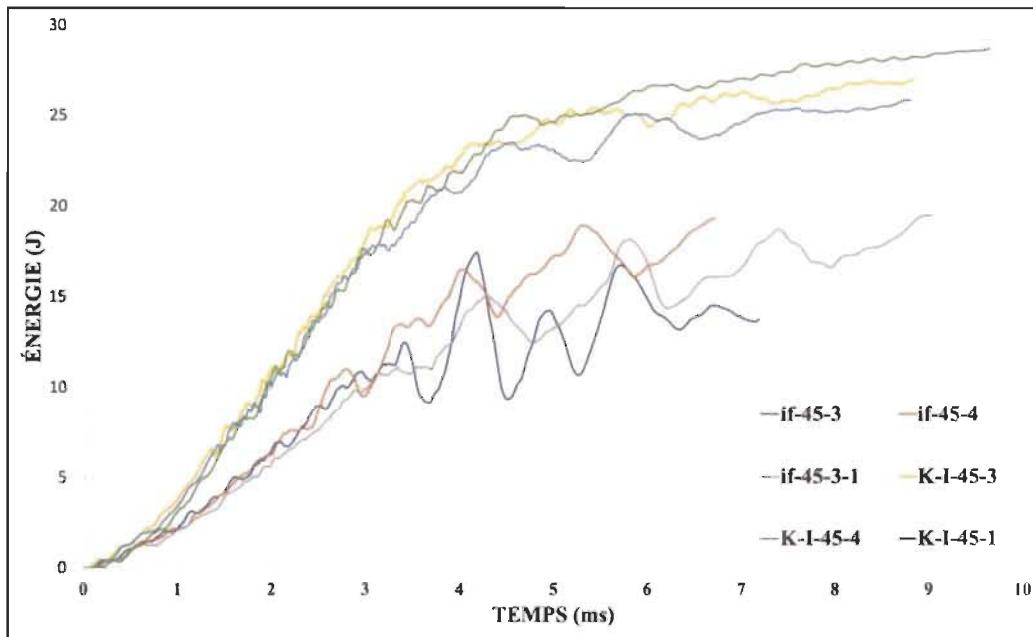


Figure IV-21 Énergies en fonction de temps pour l'empilement  $45^\circ$

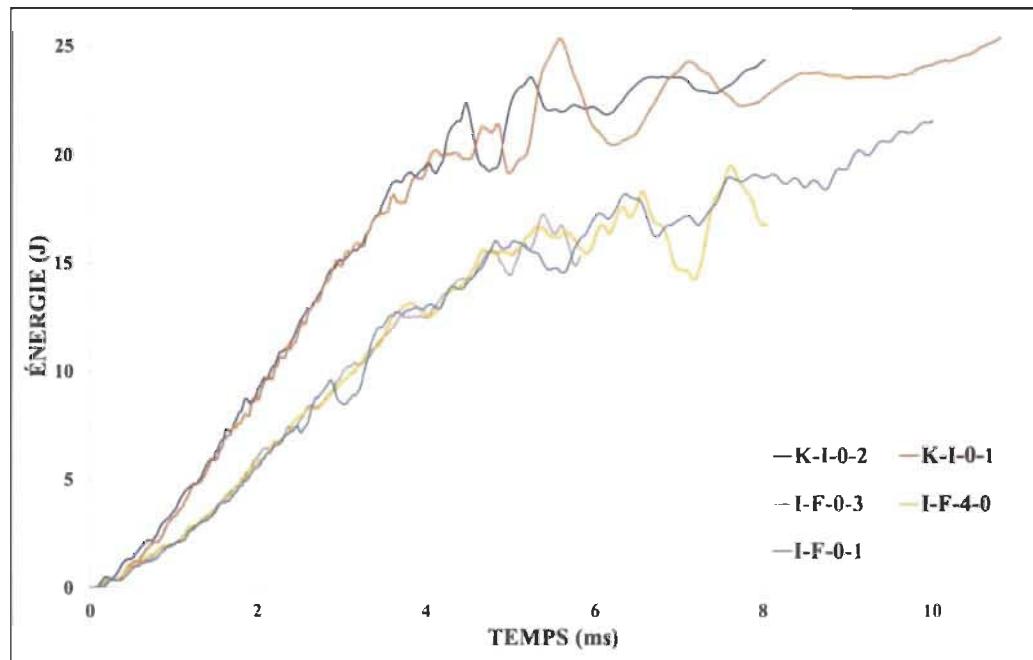


Figure IV-22 Énergies en fonction de temps pour l'empilement  $0^\circ$

Sur le plan énergie-temps, ont vu clairement qu'il n'y a pas d'énergie élastique ( $E_e$ ), ça veut dire que la plaque a été perforée complètement et il n'y a pas de rebond d'impacteur.

Les figure IV.24 et IV.25 illustrent la force en fonction du déplacement pour les différentes configurations  $0^\circ$  et  $45^\circ$ .

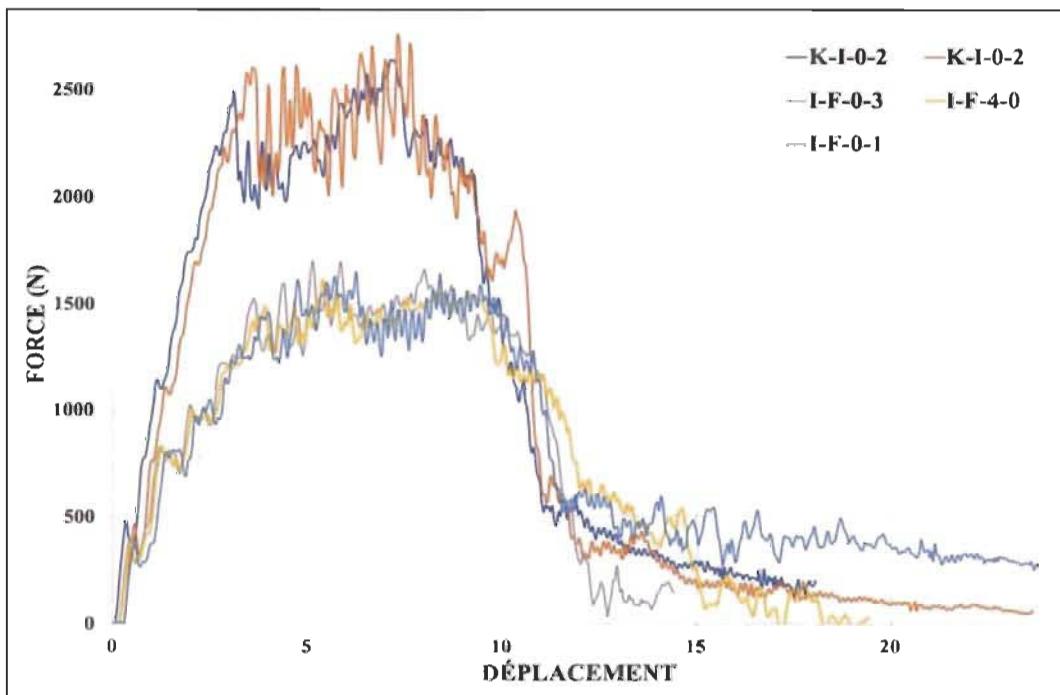


Figure IV-23 Force en fonction de déplacement pour l'empilement  $0^\circ$

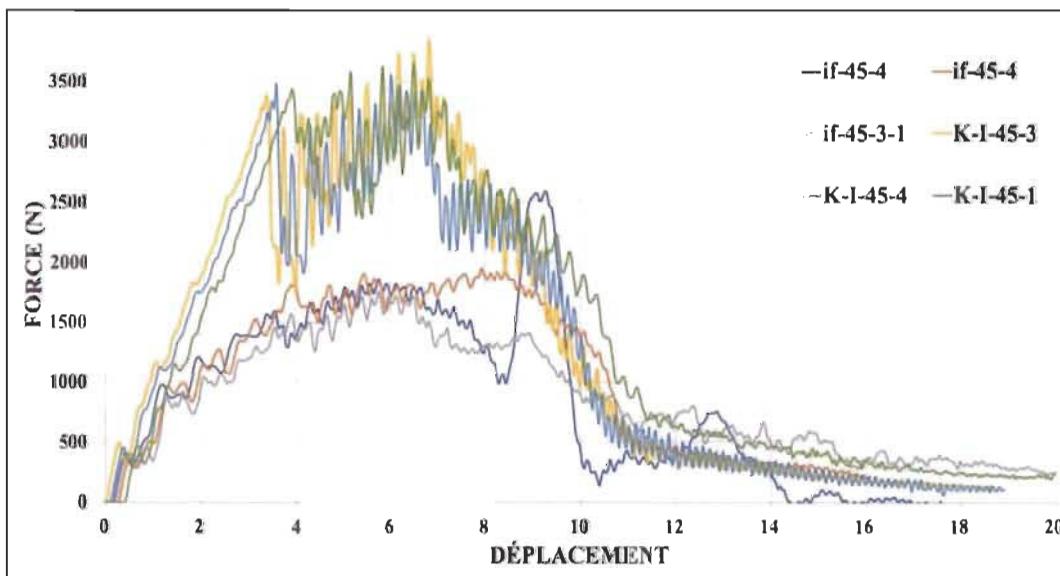


Figure IV-24 Force en fonction de déplacement pour l'empilement  $0^\circ$

D'après les graphes, pour la configuration à  $0^\circ$ , on atteint une force 1652,44 N pour le lin, et de 2697,73 N pour le matériau hybride ; tandis que à  $45^\circ$ , on obtient 2093,91 N pour le lin, et 3670,73 N pour le matériau hybride. Pour finir, pour chacun des deux matériaux (hybride et lin), dans chacune des deux configuration ( $0^\circ$  et  $45^\circ$ ), les courbes de force obtenues tendent vers 0 lorsque le déplacement devient important. Cela dénote une perforation complète des éprouvettes.

#### 4. La configuration [0K2/(0/90) 3F] S

Tableau IV-7 Résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 5,5 J

Spécimen	[0K2/(0/90) 3F] S			
	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)
1	1,39	3,12	2434,21	4,75
2	1,34	2,81	2293,71	4,39
Moyenne	1,36	2,96	2363,96	4,57
Écart Type	0,03	0,22	99,35	0,26
C <sub>v</sub>	0,02	0,07	0,04	0,06

Tableau IV-8 Résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 10 J

Spécimen	[0K2/(0/90) 3F] S			
	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)
1	1,30	6,92	2877,97	10,86
2	1,31	7,10	2839,22	10,80
Moyenne	1,31	7,01	2858,60	10,83
Écart Type	0,01	0,13	27,40	0,04
C <sub>v</sub>	0,00	0,02	0,01	0,00

Tableau IV-9 Résultats collectés lors d'impact à basse vitesse E= 45 J

Spécimen	[0K2/(0/90) 3F] S			
	Vitesse d'Impact (m/s)	Énergie absorbée	Force Max (N.)	Énergie a Fmax (J)
1	2,72	25,02	2921,22	5,28
2	2,73	24,05	2795,84	5,10
3	2,73	25,02	2788,45	4,86
Moyenne	2,73	24,69	2835,17	5,08
Écart Type	0,01	0,56	74,61	0,21
C <sub>v</sub>	0,00	0,02	0,03	0,04

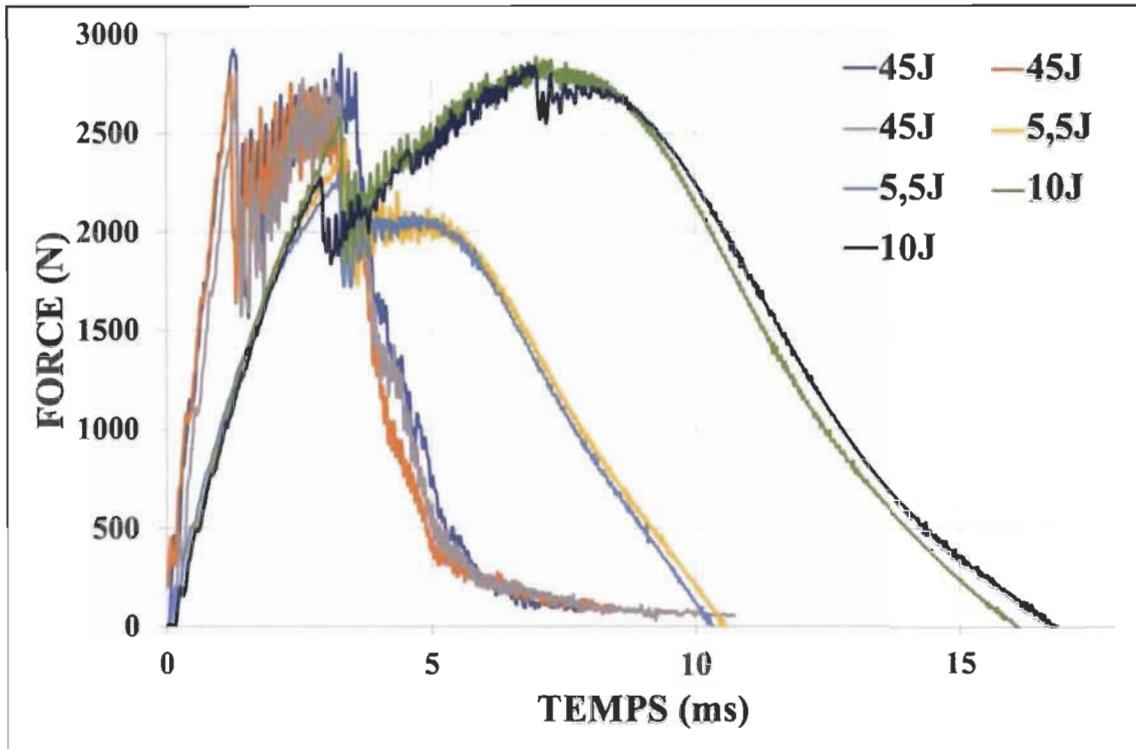


Figure IV-25 La force en fonction de temps

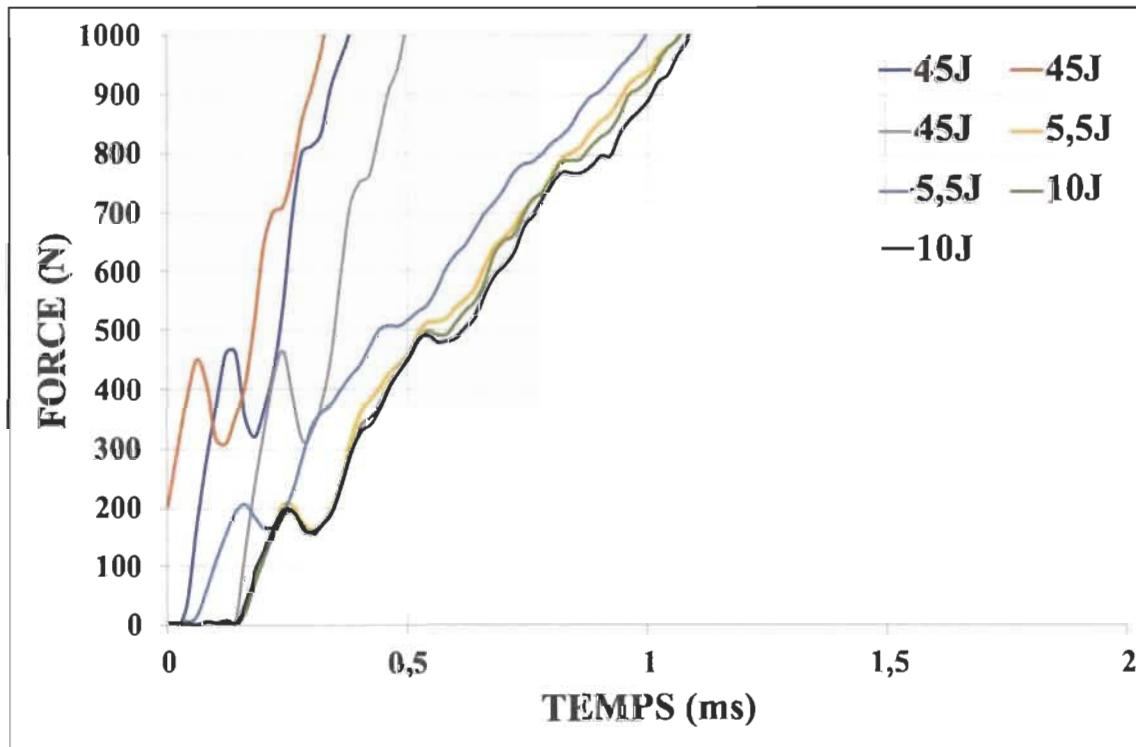


Figure IV-26 Premier dommage

Les figures IV.26 et IV.27 illustrent la force en fonction du temps pour le matériau hybride [0K2/0/90] 3F s avec les trois différentes énergies d'impact 5,5 J, 10 J et 45 J.

Les graphes montrent que pour une énergie d'impact  $E = 45\text{ J}$ , le premier dommage a été produit à 460 N ; et ensuite la force a atteint une valeur maximale 2835,17 N. Après, la force diminue et s'annule après 11s.

Par ailleurs, pour les énergies d'impact  $E = 10\text{ J}$  et  $E = 5,5\text{ J}$  le premier dommage se produite pratiquement en même temps à une force égale 200 N, sauf que pour  $E=10\text{ J}$  le graphe atteint une valeur maximale 2858,60 N et pour  $E=5,5\text{ J}$ ,  $F = 2363,96\text{ N}$ .

Sur le plan de l'énergie, la figure IV.28 a montré que pour des énergies d'impact 5,5 J et 10J on peut voir qu'il y a un rebond d'impacteur, ce qui signifie que les échantillons ne sont pas perforés. Par contre pour une énergie d'impact égal 45 J, l'énergie absorbée était bien inférieure à l'énergie d'impact, parce que dans ce cas l'impacteur a traversé la plaque et il l'a perforée.

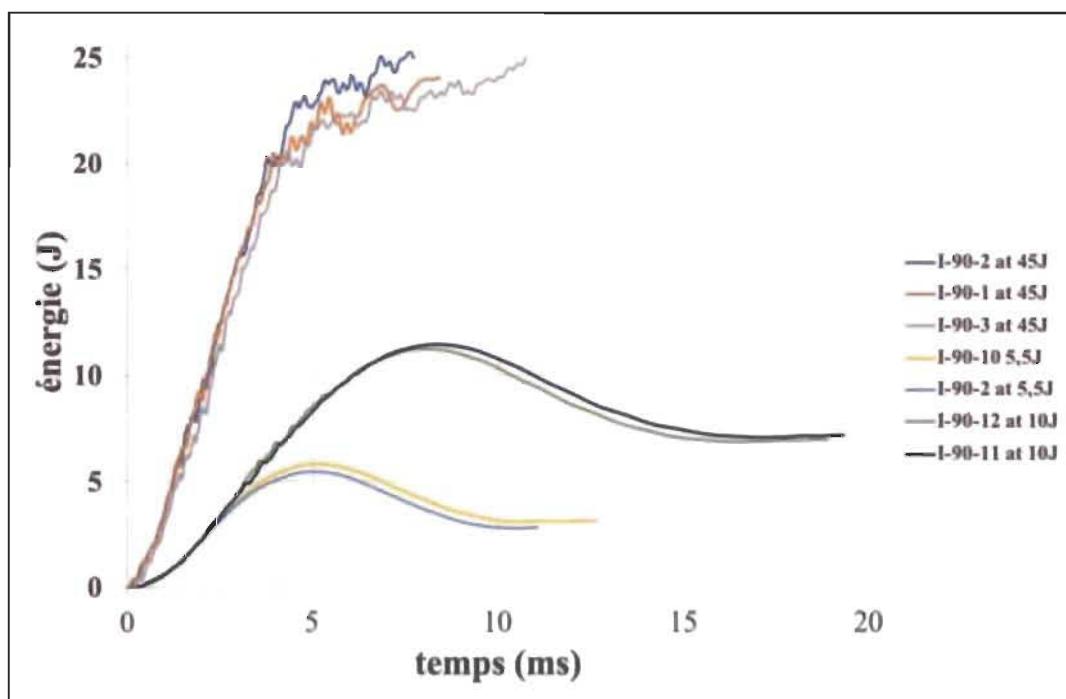


Figure IV-27 Énergies en fonction de temps

Sur le plan de l'énergie, la figure IV.28 montre que pour des énergies d'impact 5,5 J et 10J on peut voir qu'il y a un rebond d'impacteur, ce que signifie que les échantillons ne sont pas perforés, par contre pour une énergie d'impact égal 45 J, l'énergie absorbée était bien inférieure à l'énergie d'impact, parce que dans ce cas l'impacteur a traversé la plaque et il l'a perforée.

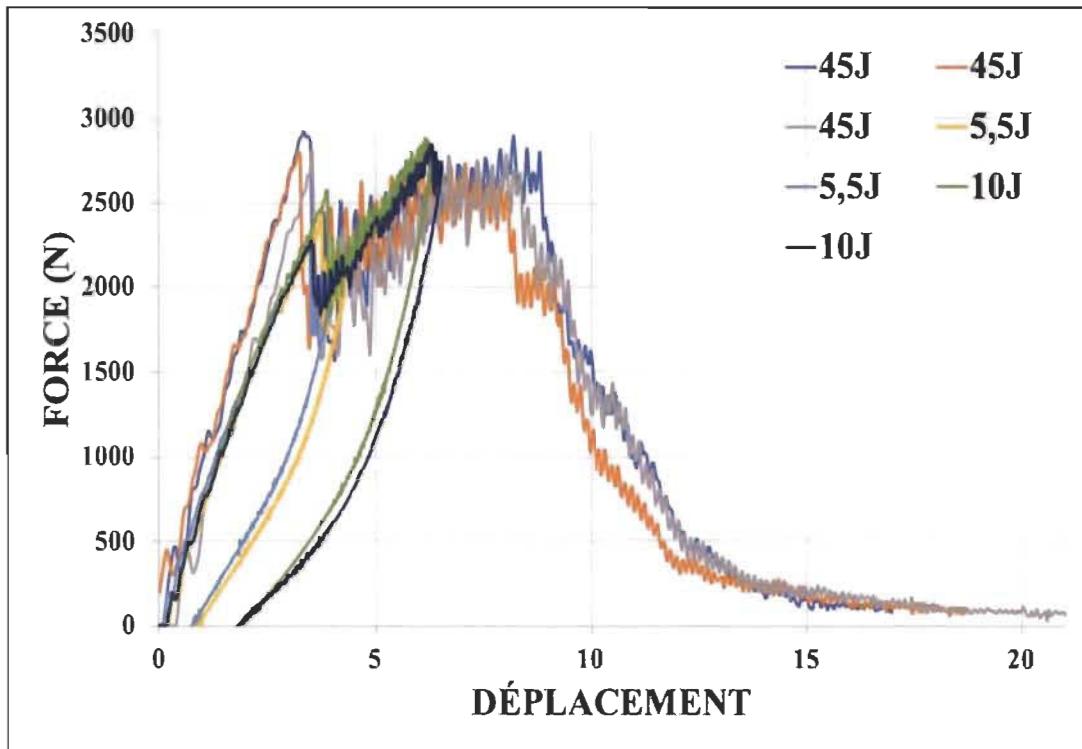


Figure IV-28 Force en fonction de déplacement

#### IV.4. Caractérisation des dommages physiques :

Les figures ci-dessus montrent les dommages causés sur les faces avant et arrière des laminés par l'impacteur.

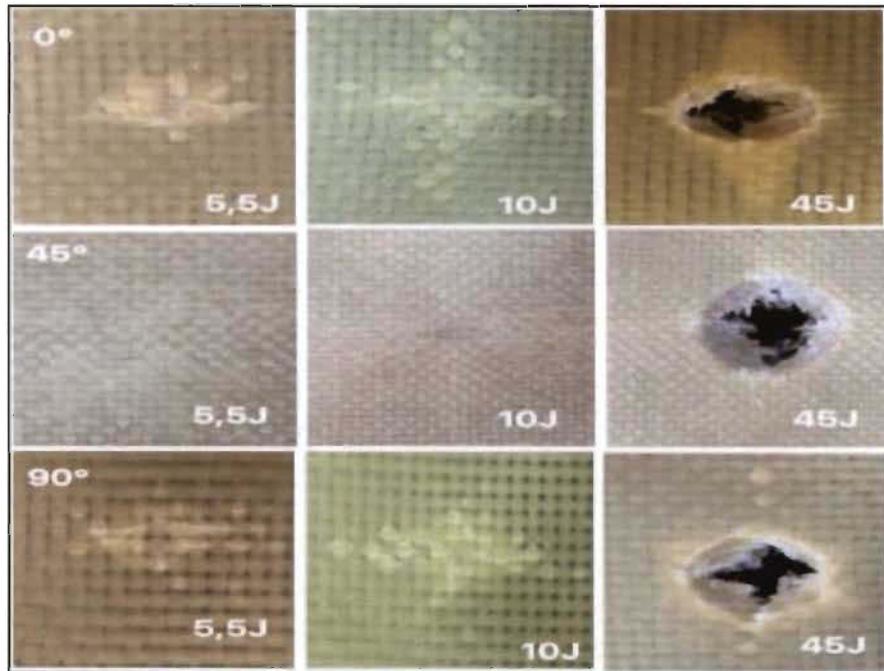
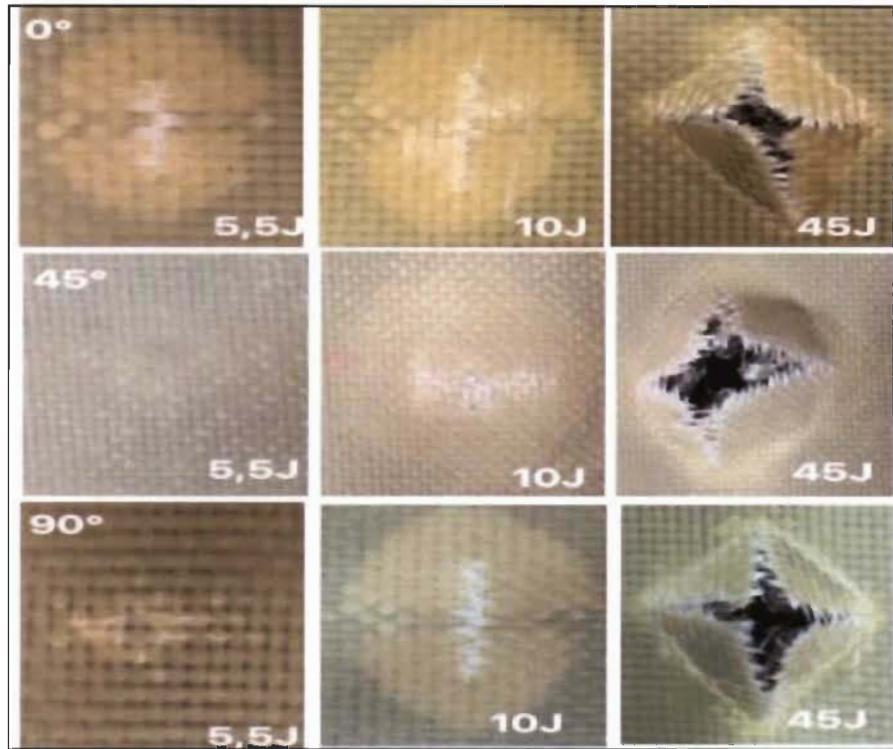


Figure IV-29 Les faces arrière pour le Kevlar/lin avec différents niveaux d'énergie



FigureIV-30 Les faces d'impact pour le kevlar/lin avec différents niveaux d'énergie

Dans le cas de 5,5 J, les dommages sont principalement caractérisés par une bosse qui n'est pas assez visible et sont plus perceptibles sur la face inférieure que sur la face d'impact.

Pour 0° le dommage sur la face d'impact signifie 2,03 % de la surface de la plaque, alors que sur la face inférieure représente 5 %.

Pour la configuration 45°, sur la face d'impact, le dommage n'est pas visible, par contre sur la face inférieure c'est légèrement visible et il représente à peu près 2,11 %.

Enfin pour les échantillons avec l'empilement (0/90) °, les dommages sur la face d'impact représentent de 2,16 % de la surface de la plaque et 3,61 % sur la face arrière.

Dans le cas de 10 J, les dommages les plus importants sont quelques peu circulaires. Ils sont observés sur la face inférieure. On remarque que le déclaminage a commencé au milieu du plan et se poursuit vers les côtés. Les pourcentages de dommage sur la face inférieure par rapport aux plaques testées pour les configurations 0° et 45° représentent respectivement 9,95 % et 7,13 % ; alors que sur la face d'impact le dommage représente 7,44 % et 3,66 % respectivement pour 0° et 45°.

Dans le cas de 45 J, les plaques sont toutes perforées avec les différents empilements et le dommage représentent 10,35 %, 12,16 % et 12,20 % respectivement pour les empilements de 45°, 0° et (0/90) °

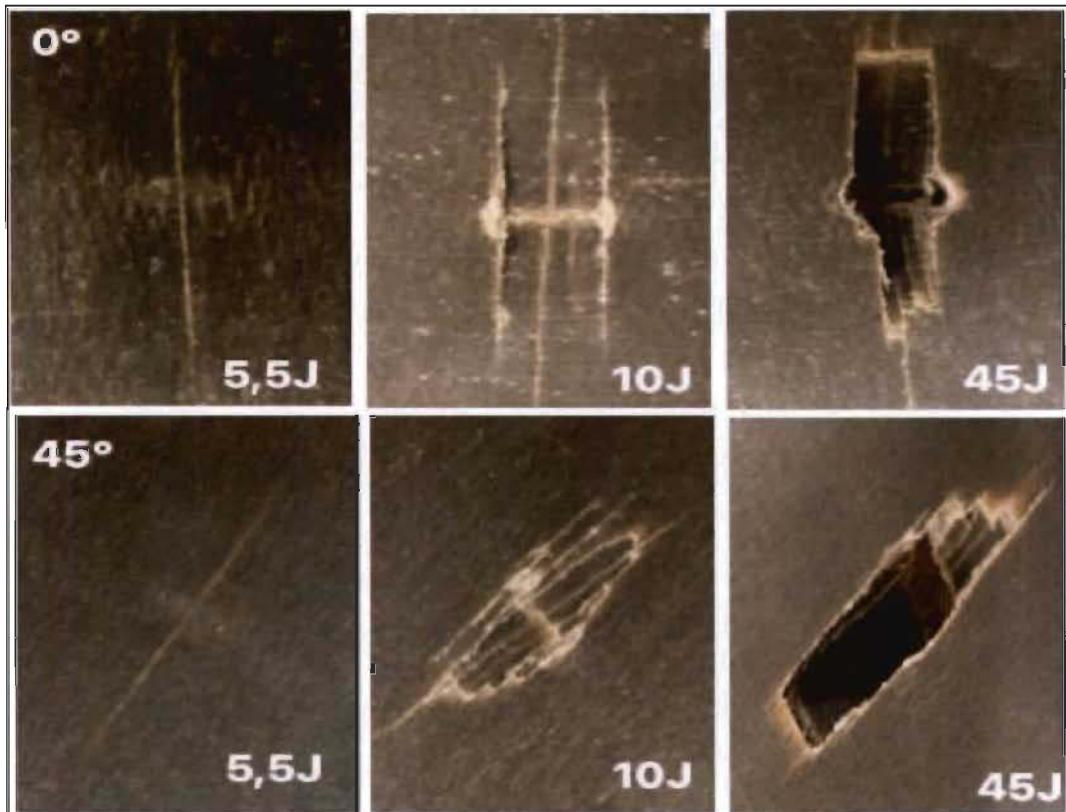


Figure IV-31 Les faces d'impact pour le lin avec différents niveaux d'énergie

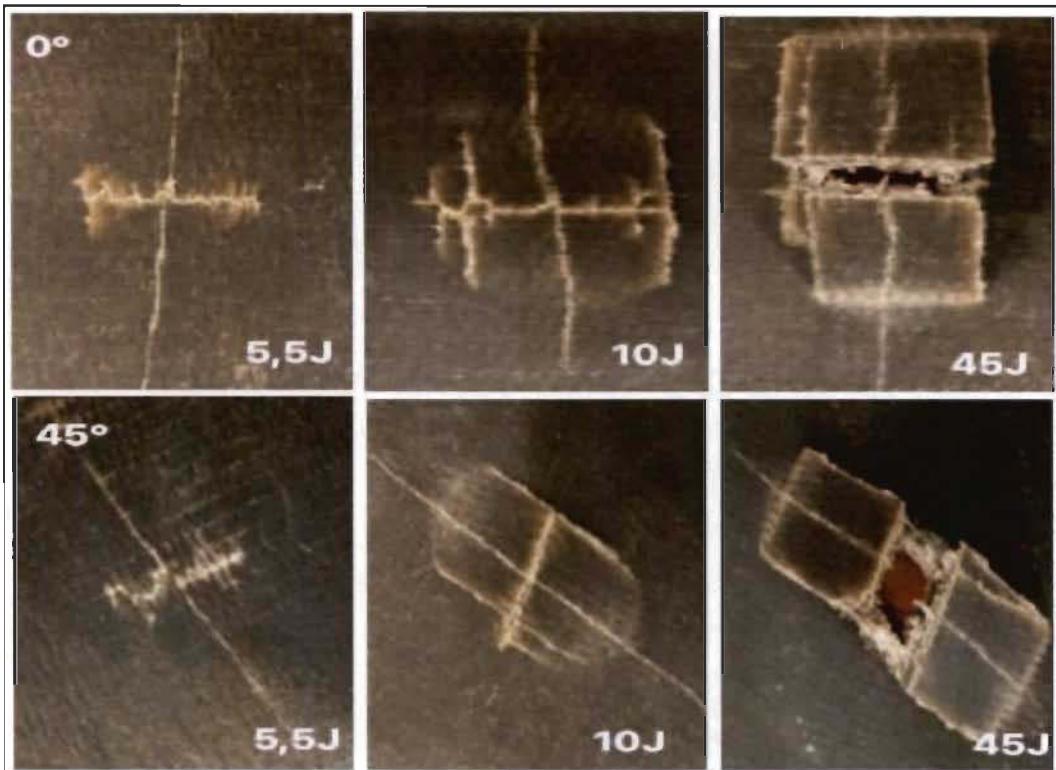


Figure IV-32 Les faces arrière pour le lin avec différents niveaux d'énergie

Les figures IV.32 et IV.33 montrent les faces d'impact et les faces inférieures pour les échantillons de lin. Le dommage commence au milieu et il propage avec la direction des fibres. Dans le cas de 5,5 J, le dommage est plus visible sur la face inférieure et représentent 10,47 % et 10,31 % respectivement pour les empilements de 45° et 0°, contre 2,02 % et 2,6 % sur la face d'impact respectivement pour les mêmes empilements. La forme des dommages est transformée en fissures qui suivent la direction des fibres.

Dans le cas de 10 J, les dommages sont plus importants et correspondent à 12,06 % et 11,64 % pour la face inférieure respectivement à 45° et 0° alors qu'ils représentent 4,52 % et 6,94 % sur la face d'impact.

Dans le cas de 45J, le dommage se traduit comme une rupture et une perforation observable de la fibre et ça représentent 16 % sur la face inférieure de la plaque pour l'empilement 0°, et 11,03 % pour la plaque avec la configuration 45°.

## Chapitre V : Conclusion

Dans ce travail, un matériau composite hybride kevlar/ lin avec deux types de stratifiés  $0^\circ$ ,  $(0/90^\circ)$  et  $\pm 45^\circ$  ont été fabriqués par thermocompression. Un autre matériau composite de lin avec deux types de stratifiés  $\pm 45^\circ$  et  $0^\circ$  a été testé.

Des tests destructifs de flexions 3 points, test d'impact Charpy et test d'impact à basse vitesse-puits de chute ont été réalisés sur les éprouvettes afin d'évaluer leurs comportements mécaniques.

Les résultats obtenus à partir des essais de flexion trois points montrent l'effet bénéfique qui a apporté l'ajout des fibres de kevlar pour les différents stratifiés  $[0_{K2}/ 0_{F6}]_S$ ,  $[0_{K2}/ \pm 45_{F6}]_S$  et  $[\pm 45]_{F16}$ . La présence de kevlar aide à obtenir un module d'Young plus important, ainsi les fibres de kevlar empêchent la propagation des fissures et améliorent la résistance de matériau.

Les essais d'impact Charpy démontrent qu'avec la présence de kevlar le matériau obtient une augmentation significative des énergies de rupture. Le kevlar empêche la propagation des fissures avec la direction des fibres dans le cas de stratifié  $\pm 45^\circ$ , ainsi aucune séparation des parties fracturées n'a été observée. On remarque que la résistance à l'impact du composite est à son apogée dans des températures ambiantes, et elle commence à diminuer progressivement en fonction de la diminution de la température.

L'analyse des résultats obtenues à partir les essais d'impact à basse vitesse montrent que l'énergie absorbée augmente avec l'énergie d'impact. Ainsi, on remarque que les fibres de Kevlar sont efficaces pour améliorer la ténacité des matériaux composites. Pour les deux matériaux composites hybride kevlar/lin et lin pur, à une faible énergie d'impact (5,5 J), les dommages aux échantillons sont minimes. Pour une énergie d'impact plus élevé (10 J), les dommages deviennent plus importants, se manifestent par des délamnages et fissures matricielles, avec une perforation remarquable pour le composite de lin. Pour ces deux niveaux d'énergies, aucune perforation n'a été observée pour le matériau hybride kevlar /lin. Par contre pour une énergie d'impact (45 J), les différents stratifiés sont perforés.

## Chapitre VI : Références

- [1] B.V. Kokta, R. Chen, C. Daneault, J.L. Valade, Use of wood fibers in thermoplastic composites. *Polym Compos.* 1983; 4(4):229–232.
- [2] Y. Kazemi, A. Cloutier, D. Rodrigue, Mechanical and morphological properties of wood plastic composites based on municipal plastic waste. *Polym Compos.* 2013; 34(4):487–493.
- [3] M. Farsi, Thermoplastic matrix reinforced with natural fibers: a study on interfacial behavior. In: Wang J, editor. Some critical issues for injection molding. Rijeka, Croatia: InTech; 2012. p. 225–250.
- [4] A.R. Kakroodi, Y. Kazemi, D. Rodrigue, Mechanical, rheological, morphological and water absorption properties of maleated polyethylene/hemp composites: effect of ground tire rubber addition. *Compos Part B – Eng.* 2013; 51(0):337–344.
- [5] B. Sy, H. Bougerara, Z. Fawaz, et A. Sarwar, Canadian international conference on composite materials 2017.
- [6] P. Wambua, J. Vans, I. Verpoest, Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics. *Compos Sci Tech.* 2003; 63: 1259-64.
- [7] J. Biagotti, D. Puglia, J.M. Kenny, A review on natural fibre-based composites – part I: structure, properties and processing of vegetable fibers. *J Nat Fibers.* Vol. 1(2). pp. 37-68, 2004.
- [8] L.S Penn, S.M, Lee, Interpretation of experimental results in the single pull-out filament test. *J of Composites Techn and Research.* 1989; 11(1): 23-30, 1989
- [9] B.L. Sy, Z. Fawaz, H. Bougerara, Damage evolution in unidirectional and cross-ply flax/epoxy laminates subjected to low velocity impact loading *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2018; 112: 452-467.
- [10] L. Toubal, R. Zitoune, F. Collombet, N. Gleizes, Moisture effects on the material properties of a Jute/Epoxy laminate: Impulse excitation technique contribution. *Journal of Natural Fibers.* 2018; 15 (1): 39-52.
- [11] B.C. Suddell, W.J. Evans, Natural fiber composites in automotive applications. In: Mohanty AK, Misra M, Drzal LT, editors. *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites:* CRC Taylor & Francis; 2005; 237–265.
- [12] O. Faruk, A.K. Bledzki, H-P. Fink, M. Sain, Progress report on natural fiber reinforced composites. *Macromol Mater Eng.* 2014; 299(1): 9–26.
- [13] Lucintel. Opportunities in Natural Fiber Composites; Lucintel: Las Colinas, TX, USA, 2011.

- [14] L. Dammer, M. Carus, K. Iffland, S. Piotrowski, L. Sarmento, R. Chinthapalli, A. Raschka, Current Situation and Trends of the Bio-Based Industries in Europe with a Focus on Bio-Based Materials; Nova-Institute GmbH: Huerth, Germany, 2017.
- [15] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoop, M. Trada, A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. Compos. Part B Eng. 2011; 42: 856–873.
- [16] A.N Benítez, M.D Monzón, I Angulo, Z Ortega, P.M Hernández, M.D Marrero, Treatment of banana fiber for use in the reinforcement of polymeric matrices. Measurement. 2013; 46: 1065–1073.
- [17] P. Mallick, Fiber-Reinforced Composites; Dekker Mechanical Engineering; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2007; Volume 20072757, ISBN 978-0-8493-4205-9.
- [18] Stevens, C.V. Series Preface; Müssig, J., Ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, UK, 2010; ISBN 9780470695081
- [1920] M. Jawaid, and H. P. S Abdul Khalil, “Cellulosic/synthetic fiber reinforced polymer hybrid composite: A review”. Carbohydrate Polymers. 2011 ; 86(1) : 1-18.
- [20] K. Charlet, C. Morvan, J. Bréard, J.P. Jernot, M. Gomina, “Etude morphologique d'un composite naturel-La fibre de lin”, RCMA. 2006 ; 16 : 11-24.
- [21] C. Amandine, F. Sylvain, J. Frédéric, C. Pascal. “The hygroscopic behavior of plant fibers: a review”. Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (UMR CNRS 6183), Université de Nantes - Centrale Nantes, I.U.T. de Saint-Nazaire, Saint-Nazaire cedex, France.
- [22] K. Mayssa. 2012. “Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques des matériaux composites par méthode holographique numérique 3D et analyse diélectrique ». Thèse pour l'obtention du Grade de Docteur en Sciences de l'Université du Maine Spécialité : Acoustique.
- [23] C. Baley, « Fibre naturelle de renfort pour matériaux composites », Tech. Ing. AM 5130.
- [24] C. Baley, Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase, Appl. Sci. Manuf. 2002; 33: 939–948.
- [25] C. Baley, A. Le Duigou, A. Bourmaud, P. Davies, “Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites”, Appl. Sci. Manuf. 2012; 43: 1226-1233.
- [26] G. R. Arpitha and B. Yogesha. “An Overview on Mechanical Property Evaluation of Natural Fiber Reinforced Polymers”. Materials Today: Proceedings Part A. 2017; 4(2): 2755-2760.
- [27] M. R. Sanjay, P. Madhu, M. Jawaid, P. Senthamaraikannan, S. Senthil, and S. Pradeep. Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production. 2018; 172(Supplement C) : 566-581.

- [28] K.S. Fabrice, L. Toubal, L. Laperrière. “Wetting/drying cyclic effects on mechanical and physicochemical properties of quasi-isotopic flax/epoxy composites”, *Polymer Degradation and Stability*. 2019; 161 : 121-130.
- [29] L. Papa, M.R. Riciardi, V. Antonucci, V. Pagliarulo, V. Lopresto, “Impact behaviour of hybrid basalt/flax twill laminates”, *Composites Part B: Engineering*” 2018; 153(15) : 17-25.
- [30] F. Roos, M. Guimon, R. Vincent, 2003, “ Fibres d’aramide : élément pour l’évaluation des risques ”, INRS, Document pour le Médecin du Travail N° 95 : 12 P.
- [31] R. Fangueiro. “Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications”, A volume in Woodhead Publishing Series in Textiles, 2011.
- [32] A. Algahtani, 2006. Manufacturing of High Strength Kevlar Fibers.
- [33] J. Chang, Kevlar Aramid Fiber” X. Miscellaneous.
- [34] V. Wigotsky, ANTEC fundamentals forum will focus on innovative products and processes. *Plastics Engineering*. Brookfield Center. 2002; 58(3) : 26-30.
- [35] S. Prashanth, K.M. Subbaya, K. Nithin and S. Sachhidananda, *Fiber Reinforced Composites - A Review*. *Material Science Engineering*. 2017; 6:3
- [36] S.L. Valen  a, S. Griza, Evaluation of the mechanical behavior of epoxy composite reinforced with kevlar plain fabric and glass/kevlar hybrid fabric. *Composites : Part B*. 2014 ; 70 :1-8.
- [37] C. Audibert, A-S. Andreani,   . Lain  , J-C. Grandidier, “Mechanical characterization and damage mechanism of a new Flax-Kevlar hybrid/epoxy composite”. *Composite Structures*. 2018; 195: 126-135.
- [38] F.J. Khusiafan, Use of KEVLAR ® 49 in Aircraft Components. *Engineering Management Research*. 2018; 7(2) : 14-19.
- [39] R. Bin Kabir, N. Ferdous, “Kevlar-The Super Tough Fiber,”. *International Journal of Textile Science*. 2012; 1(6) : 78-83.
- [40] Trudel-Boucher, David. 2000, “Impact    faible vitesse sur un composite polypropyl  ne/fibre de verre ”. *Mémoire de doctorat en génie mécanique*, Montréal, Université de Montréal,   cole de polytechnique de Montréal, 105 p.
- [41] ASTM D6110 Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics.

- [42] T. Kobayashi, “Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)” 2001, Pages 4027-4031.
- [43] C. Lavallée. 2010, “Étude de l’influence des caractéristiques des tissus sur la résistance à l’impact des matériaux composites ”. Thèse de maîtrise école de technologie supérieure université du Québec, 115 p.
- [44] S. a. Hitchen, R.M.J. Kemp, 1995, “The effect of stacking sequence on impact damage in a carbon fibre/epoxy composite”, Composites 26, 207–214.
- [45] Y. Lebaupin, 2017, “Comportement à l’impact et post-impact d’un composite lin/polyamide 11 élaboré par thermocompression ”. Thèse pour l’obtention du grade de docteur de l’école nationale supérieure de mécanique et d’aérotechnique.
- [46] M. Quaresimin, M. Ricotta, L. Martello, S. Mian, Energy absorption in composite laminates under impact loading. Compos. Part B Eng. 2013; (44) : 133–140.
- [47] D7136/D7136M – 15. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event1.
- [48] A. Rafiq, N. Merah, R. Boukhili, M. al-Qadhi, “Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay composite”, Polymer Testing. 2017; (57) : 1-11.
- [49] P. Legay. 2011. “Étude de l’influence de défauts sur les propriétés mécaniques de matériaux composites fabriqués par le procédé de placement de fibres ”. These de maîtrise École polytechnique de Montréal. 98 p.
- [50] M.A. Caminero, I. García-Moreno, G.P. Rodríguez, “Damage resistance of carbon fibre reinforced epoxy laminates subjected to low velocity impact: Effects of laminate thickness and ply-stacking sequence, Polym. Test. 2017; 63: 530–541.
- [51] Ductile to brittle transitions in materials. materials science, 10 NOVEMBER 2016.  
<https://www.jeremyjordan.me/ductile-to-brittle-transitions-in-materials/>