



UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE
HAOUARI BOUMEDIENE

FACULTÉ DE GENIE MECANIQUE
ET GENIE DES PROCEDES

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

Magister

en Génie Mécanique

Spécialité : Mécanique et Fatigue des Matériaux

Par

LECHELAH Ramzi

Thème

**CONTRIBUTION A L'ETUDE
DU COMPORTEMENT DES PLAQUES
EN COMPOSITE VERRE -E/EPOXY-
ENDOMMAGEES PAR CHOCS**

Soutenu publiquement le 03/10/2004 devant le jury composé de Messieurs :

N. OUALI

S. RECHAK

K. NECIB

A. AHMED-BENYAHIA

T. BOUKHAROUBA

K. AZOUAOUI

Maître de Conférences à l'USTHB

Professeur à l'ENP

Maître de Conférences à l'EMP

Maître de Conférences à l'USTHB

Professeur à l'USTHB

Chargé de Cours à l'USTHB

Président

Examineur

Examineur

Examineur

Directeur de Mémoire

Co-Directeur de Mémoire

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur le Professeur **BOUKHAROUBA Taoufik** d'avoir bien voulu diriger et suivre ce travail et à la confiance qu'il m'a témoignée durant sa réalisation. Ses compétences scientifiques, son don de communiquer son savoir et ses qualités humaines témoignées d'une grande personnalité scientifique. Qu'il trouve ici ma profonde gratitude et ma sincère et très amicale reconnaissance.

A Monsieur **AZOUAOUI Krimo** qui ma fait l'honneur de co-diriger ce travail, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et mes remerciements pour son aide et sa contribution au présent travail.

J'adresse mes remerciements à Monsieur le Docteur **OUALI Nourdine**, Maître de Conférences à l'U.S.T.H.B d'avoir accepté d'évaluer ce travail et présider le jury.

Je tiens également à remercier vivement Messieurs la Professeur **S. RECHAK**, de L'E.N.P, le Docteur **K. NECIB**, Maître de Conférence à l'E.M.P et le Docteur **A. AHMED BEN YAHIA**, Maître de Conférence à l'U.S.T.H.B d'examiner ce travail et de participer aux jury.

J'exprime également une grande reconnaissance à toute l'équipe de recherche du **Laboratoire de Mécanique Avancée** pour leurs esprits d'entraides et l'atmosphère très agréable et chaleureuse qui y règne.

Que tous trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Résumé

Le comportement sous choc et les caractéristiques de flexion et de cisaillement post-impact d'un composite à base de résine époxy renforcée des fibres de verre-E (mat) a fait l'objet de ce travail.

Une analyse expérimentale a été effectuée sur un dispositif de poids tombant, conçu et réalisé au sein de notre laboratoire. La rigidité et la résistance résiduelles à la flexion et au cisaillement ont été mesurées sur des éprouvettes normalisées prélevées sur les plaques impactées répétitivement. Les résultats d'essais nous ont permis d'analyser directement sur les éprouvettes endommagées l'évolution du dommage en fonction de l'énergie d'impact. Par la suite, de tracer et analyser les courbes donnant respectivement la variation de la résistance et la rigidité résiduelles en fonction de l'énergie d'impact et en fonction du nombre de chocs (impacts).

Abstract

An investigation is performed to study the post-impact properties of epoxy resin reinforced by E-glass fibres. Damages induced by impacts in the composite material, such as matrix cracking, delaminations and fibre breaking may reduce the overall bending and shearing strengths. These damages are combined in a very complicated way for the description of damage growth and fracture. In this work, we present results from an experimental study which shows the evolution of bending and shearing residual strengths of Glass/Epoxy composite materials at low velocity impact. This study allowed us to highlight the effect of impact energy on the loss of global stiffness and the decrease of residual strengths. The macroscopic failure modes and the internal damage as a consequence of impact tests are investigated. Experimental analysis was carried out by drop weight apparatus designed and built in our laboratory.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Recherche bibliographique	
Introduction	3
I.1 - Analyse de l'effet d'un certain nombre de paramètres géométriques et mécaniques sur le comportement post-impact du composite	4
II.1.1 - Effet de l'empilement	4
II.1.2 - Effet du niveau de l'énergie et du nombre d'impacts	7
II.1.3 - Effet de la largeur et de la distance entre appuis.....	11
II.1.4 - Effet de l'énergie d'impact.....	12
II.1.5 - Effet du traitement des fibres.....	14
II.1.6 - Effet du tissage.....	19
II.2 - Description des mécanismes d'endommagement.....	23
II.3 - Conclusion.....	24
CHAPITRE II : Méthode expérimentale	
Introduction	26
II.1 - Matériau et Protocole d'essais	26
II.1.1 - Matériaux	26
II.1.2 - Essais de chocs	27
II.1.3 - Essais post-impact	29
II.1.3.1 - Essais de cisaillement par flexion trois points	31
II.1.3.2 - Essai de flexion pure	33
II.2 - Conclusion	33
CHAPITRE III : Résultats et discussion	
III.1 - Essais de chocs	35
III.1.1 Analyse des dommages sur les deux faces de la plaque.....	35

III.1.2 Analyse des dommages dans l'épaisseur	38
III.2 - Résultats des essais statiques sur éprouvettes non impactées	41
III.3 - Résultats des essais post-impact	47
III.4 - Essais à impacts répétés	50
III.5 - Conclusion	53
CONCLUSION GENERALE.....	55

Introduction générale

I- Introduction générale

L'utilisation des matériaux composites dans les structures mécaniques, apportent de nombreux avantages non négligeables, on cite, la légèreté, la rigidité, la résistance mécanique, la résistance à la corrosion, la liberté de formes et la maintenance réduite. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes aptes à répondre aux diverses exigences de fonctionnement. Cependant, si ces avantages liés aux comportements mécaniques sous sollicitations statiques ont pu être vérifiés, il n'en est pas de même pour les sollicitations de type chocs.

L'impact que subissent parfois les structures en composites, peut induire des défauts non apparents à la surface et des dégâts à peine ou pas du tout visibles. Ceci peut affecter la résistance et la rigidité résiduelles du matériau et conduire à la défaillance totale de la structure.

Le comportement aux chocs d'une structure en matériau composite reste l'une des préoccupations majeures aussi bien des industries que des laboratoires de recherche à travers le monde. En fait, il dépend d'un grand nombre de paramètres (matériau et forme de l'impacteur, matériau impacté, géométrie de la structure et ses liaisons, vitesse et énergie d'impact, etc.). Par ailleurs, l'analyse du comportement au choc par un corps étranger nécessite la connaissance de la dynamique de l'impact, c'est-à-dire, être capable de prédire la forme et la taille de la zone endommagée, le type des dommages causés et les propriétés résiduelles du matériau (résistance et rigidité).

La littérature dans le domaine du comportement au choc des plaques en composites traite beaucoup plus la phénoménologie des dommages induits par les impacts. Quant à la chronologie de l'apparition de ces dommages, cela reste encore mal maîtrisé.

Pour contribuer à appréhender et à mieux comprendre l'apparition de ces de dommages, nous nous sommes fixé comme objectif dans ce travail d'analyser du point de vue phénoménologique mais aussi du point de vue comportement mécanique des plaques impactées à des niveaux d'énergies variables. Le matériau de l'étude est de fabrication locale (ENP Chlef), il est constitué par une résine époxy renforcée de mèches de fibres de verre-E, du type mat. Celui-ci est utilisé dans la

fabrication des structures marines, tels que les petites barques de plaisance, les chalutiers, etc.

Pour répondre à cet objectif, une étude expérimentale est effectuée sur un dispositif de poids tombant, conçu et fabriqué par nos propres soins au sein de notre laboratoire. Par la suite, une caractérisation mécanique post-impact, par un essai de flexion et un essai de cisaillement, est réalisée sur des éprouvettes normalisées découpées directement dans les plaques impactées afin, de mesurer ses propriétés résiduelles. On procédera aussi à l'évaluation du dommage causé au matériau en fonction du nombre d'impacts, en utilisant la technique de mesure de la taille de dommage dite « high intensity background light technic ».

Pour ce faire, le mémoire débute par une introduction générale définissant l'objectif de l'étude et se compose de trois chapitres répartis comme suit :

- ✓ le premier chapitre regroupe une synthèse d'un certain nombre de travaux de recherche relativement récents, rapportés par la littérature,
 - ✓ le second chapitre, est consacré à la présentation de la procédure expérimentale,
 - ✓ dans le troisième chapitre il sera question de la présentation et de l'analyse des résultats d'essais d'impact et post-impact,
- nous finirons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Recherche bibliographique

Introduction

Les matériaux dits homogènes et isotropes tels que l'acier, les alliages, le verre, etc, ont des modules d'élasticité longitudinal et transversal ainsi qu'une résistance à la rupture constants. En d'autres termes, ces propriétés ne dépendent pas d'une direction privilégiée par rapport à une autre.

Contrairement aux matériaux conventionnels, les matériaux composites renforcés par fibres sont anisotropes et non homogènes. Cette anisotropie est responsable de la dépendance des propriétés du matériau à l'orientation des fibres et la non homogénéité provoque une dépendance locale des propriétés mécaniques.

La disparité de la rigidité combinée avec la faible résistance de la matrice, font que les matériaux composites soient sensibles au délaminage. En plus de cette disparité, l'impact génère des contraintes de cisaillement qui affectent la sensibilité au délaminage des matériaux composites.

Dans les matériaux composites l'initiation de la rupture se produit généralement bien avant l'observation macroscopique d'un changement quelconque dans le comportement. La défaillance finale d'un composite est le résultat d'une :

- rupture de la matrice,
- déchaussement des fibres,
- rupture des fibres,
- rupture de l'interface fibre-matrice.

L'étude du comportement d'une structure en composite soumise à des chocs, se révèle délicat en raison de grands nombres de paramètres géométriques et dynamiques à prendre en considération. Nous allons passer en revue quelques résultats expérimentaux relatifs à l'évaluation de la résistance et la rigidité résiduelles d'une structure en matériau composite endommagé par choc.

Les essais de chocs sont généralement conduits sur un dispositif à poids tombant, suivi par des essais de caractérisation statiques post-impacts de compression, de flexion et de cisaillement par flexion trois points. Généralement, l'objectif de ces essais est d'analyser l'évolution du dommage et de mesurer la résistance et la rigidité résiduelles d'une éprouvette endommagée en fonction de l'énergie d'impact.

L'évolution des moyens de contrôle non destructif et des instruments d'émission acoustique, ont permis de donner un grand élan ces dernières 10 années à l'étude du comportement mécanique des composites endommagés par chocs.

I.1 - Analyse de l'effet d'un certain nombre de paramètres géométriques et mécaniques sur le comportement post-impact des composites

Plusieurs paramètres géométriques et dynamiques peuvent influencer le comportement au choc d'une structure en matériau composite. Les plus importants sont les suivants :

1. l'empilement des plis,
2. le nombre de plis,
3. l'orientation des fibres,
4. l'épaisseur des plis,
5. la largeur de l'éprouvette impactée,
6. la distance entre appuis,
7. types d'appuis,
8. niveau d'énergie d'impact,
9. vitesse d'impact,
10. nombre d'impact,
11. etc.

On va passer en revue par certains de ces travaux.

II.1.1 - Effet de l'empilement

Afin de mettre en évidence l'influence de l'empilement des plis sur la résistance résiduelle du matériau, Ernest et al [1] ont réalisé des essais de chocs sur des plaques en composite verre/époxy type HERCULES [IM7/8551-7], empilées suivant plusieurs orientations. Les séquences qui ont été considérées sont :

1. $[45, 90, -45, 0]_{3S}$
2. $[45_2, 90_2, -45_2, 0_2]_{2S}$
3. $[45_3, 90_3, -45_3, 0_3]_S$
4. $[30, 60, 90, -30, -60, 0]_{2S}$
5. $[30, 60, 90, -60, -30, 0]_{2S}$
6. $[45, (90, 45)_3, (0, 45)_2, 0]_S$
7. $[45, (0, -45)_3, (90, 45)_2, 90]_S$

Les plaques sont impactées en leur centre par la chute libre d'une sphère en acier de diamètre 15.9 mm et de poids 5.44 kg. Plusieurs vitesses d'impact ont été utilisées. Les zones endommagées suivant l'épaisseur, sont examinées après chaque essai en utilisant la méthode de pénétration d'un liquide fluorescent (ressuage). Ceci a permis aux auteurs de mesurer la taille du dommage et sa répartition par couche. Par ailleurs, la résistance résiduelle est mesurée par des essais de compression post-impact sur des éprouvettes endommagées, découpées directement dans les plaques impactées. Le dépouillement des résultats des essais ont permis aux auteurs de tracer les courbes reliant la surface endommagée et la résistance résiduelle en compression à l'énergie d'impact (figures I.1, I.2 et I.3). On peut déduire directement à partir des courbes tracées ce qui suit :

- pour les séquences $(90, 45)_3$ et $(0, -45)$ le délaminage à l'interface des plis persiste et croît avec l'énergie d'impact,
- pour les séquences dont les plis ne présente pas de multicouches, la forme géométrique de la partie endommagée est circulaire,
- pour les deux séquences $[30, 60, 90, -30, -60, 0]_{2S}$ et $[30, 60, 90, -60, -30, 0]_{2S}$ le matériau offre une meilleure résistance résiduelle (figure I.1),
- pour chaque séquence de stratification correspond une taille (dimension) de la zone de dommage, marquant la fin du palier (figure I.2).
- pour la $[45_3, 90_3, -45_3, 0_3]_S$, l'augmentation de l'épaisseur du pli provoque une chute prématurée de la résistance et favorise le délaminage au niveau de l'interface de deux plis successifs, et par là, l'augmentation de la dimension (taille) de la zone endommagée (figure I.2),
- pour la même énergie d'impact, un matériau empilé selon la séquence $[45, 90, -45, 0]_{3S}$ offre une résistance résiduelle relativement élevée (figure I.3),

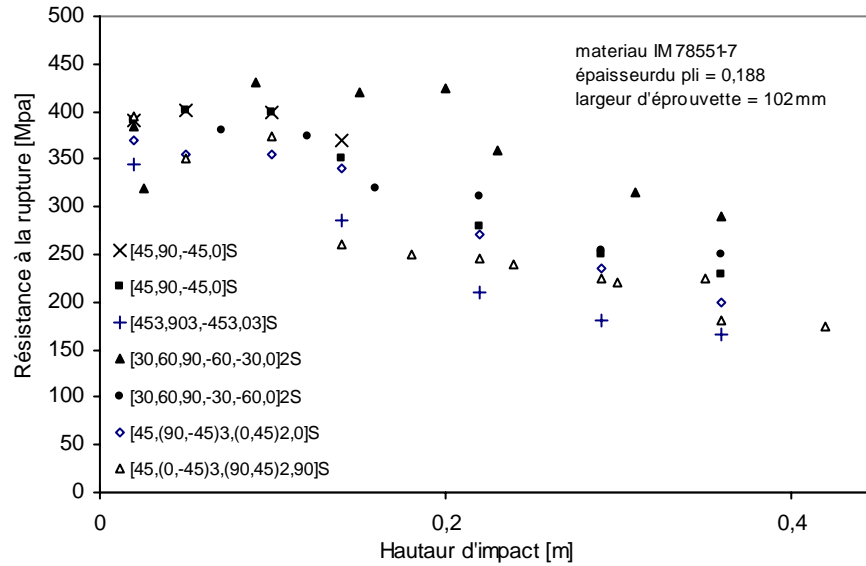


Figure I.1 : Variation de la résistance résiduelle de compression en fonction de l'énergie [1]

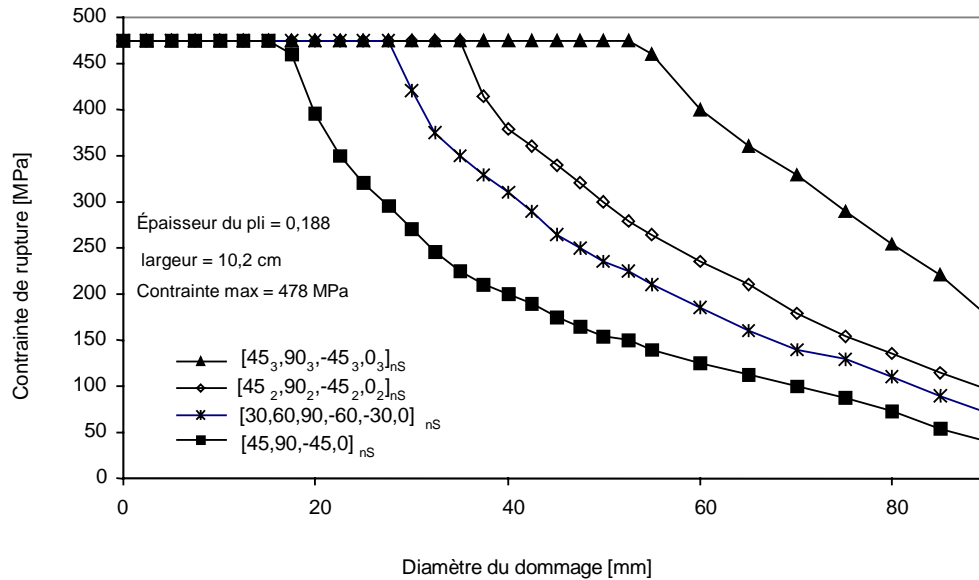


Figure I.2 : Influence de l'empilement sur la variation de la résistance résiduelle en fonction de la taille du dommage [1]

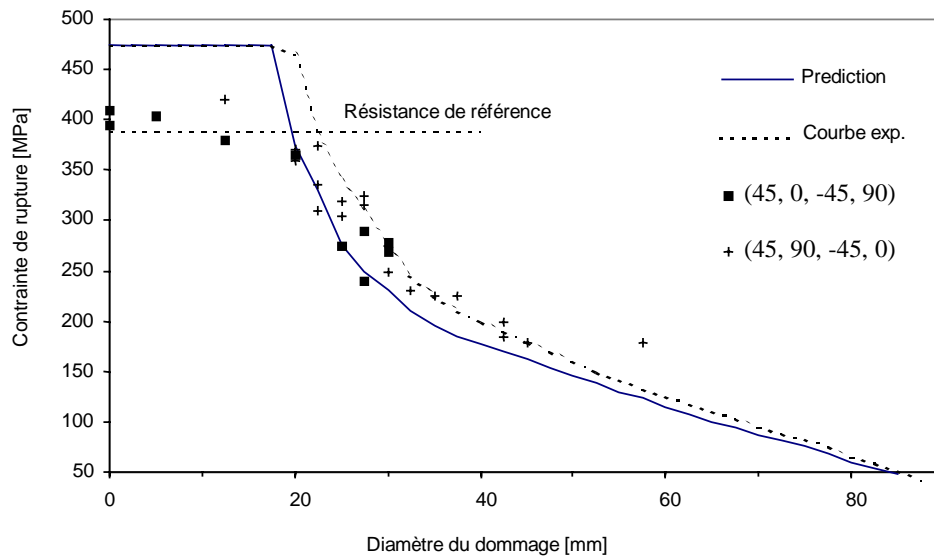


Figure I.3 : Influence de l'empilement sur la variation de la résistance résiduelle en fonction de la taille du dommage [1]

A la fin de leurs travaux, les auteurs concluent que l'hétérogénéité de l'empilement à travers l'épaisseur favorise la chute de la résistance résiduelle. L'augmentation de l'angle de l'orientation d'un pli par rapport au pli antérieur provoque une diminution significative de la résistance résiduelle. De plus, la perte de la résistance résiduelle n'est pas significative pour les faibles énergies. Cette tendance est complètement renversée à partir du niveau 0.7J ou on assiste à une chute importante de la résistance jusqu'à la défaillance totale de la plaque.

II.1.2 - Effet du niveau de l'énergie et du nombre d'impacts

Wyrick et Adams [2] ont réalisés des essais de chocs répétés sur un dispositif de poids tombant, afin de déterminer par des essais de traction et de compression post-impact l'influence de l'énergie et le nombre d'impacts sur la résistance résiduelle d'un composite en carbone/époxy.

Les essais de choc ont été réalisés sur des plaques de dimensions 150x150x2mm, empilées selon la séquence [45/0/ - 45/90]_{2S}. L'impact est assuré par un projectile de tête hémisphérique de diamètre 12.7mm. Pour faire varier l'énergie d'impact, des masses additives sont rajoutées. Le signal de l'effort d'impact est enregistré en

temps réel sur un oscilloscope digital par l'intermédiaire d'un capteur piézoélectrique monté sur la plaque impactée.

Le protocole d'essai consiste à faire subir aux plaques des chocs répétés, à des niveaux d'énergies différents (tableau 1).

Nombre d'impact	Niveau d'énergie d'impact [j]		
	3	10	30
1	3	10	30
10	3	10	-
100	3	-	-

Tableau 1 : Paramètres d'essais de chocs [2]

Après chaque essai, les plaques sont découpées en cinq éprouvettes de dimensions 150x25mm et 88x25mm, servant respectivement aux essais de traction et de compression post-impact. Cette manière de faire permet aux auteurs de mesurer la résistance résiduelle à travers toute la surface de la plaque impactée (voir figure I.4). Les essais de traction et de compression ont permis le tracé des histogrammes et des courbes représentées dans les figures (I.5 à I.8).

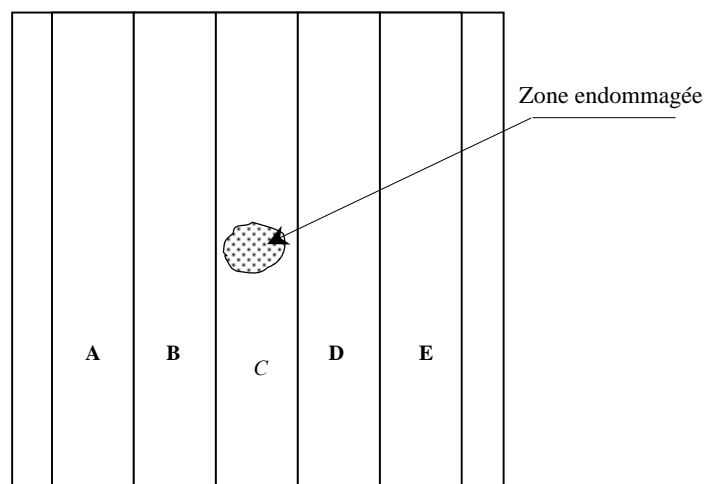


Figure I.4 : Epreuves destinées aux essais post-impact [2]

Ces auteurs ont constatés que :

- ✓ la résistance de la plaque en traction et en compression ne varie pas en dehors de la zone endommagée, (figures I.5 et I.7),
- ✓ la résistance résiduelle en traction dans la zone impactée est supérieure à celle en compression au niveau de la même zone (figures I.5 et I.7). Il est tout à fait clair que dans le cas de la traction, la résistance résiduelle est due principalement à la résistance des fibres qu'à celle de la matrice,
- ✓ l'endommagement correspondant à un nombre d'impacts inférieur à 100, pour un niveau d'énergie n'excédant pas 3J, est sans effet sur la résistance résiduelle (figures I.6 et I.8),
- ✓ la résistance résiduelle décroît légèrement dès que l'énergie d'impact atteint les 10J (figures I.5 et I.7),
- ✓ pour un niveau d'énergie de 30J, il est relevé une baisse très nette de la résistance en traction comme en compression, où le matériau est totalement endommagé au bout du 10^{ième} impact (plaque complètement perforée). (figures I.6 et I.8),
- ✓ pour une énergie de 100J, la plaque est totalement perforée dès le premier impact (figures I.6 et I.8).

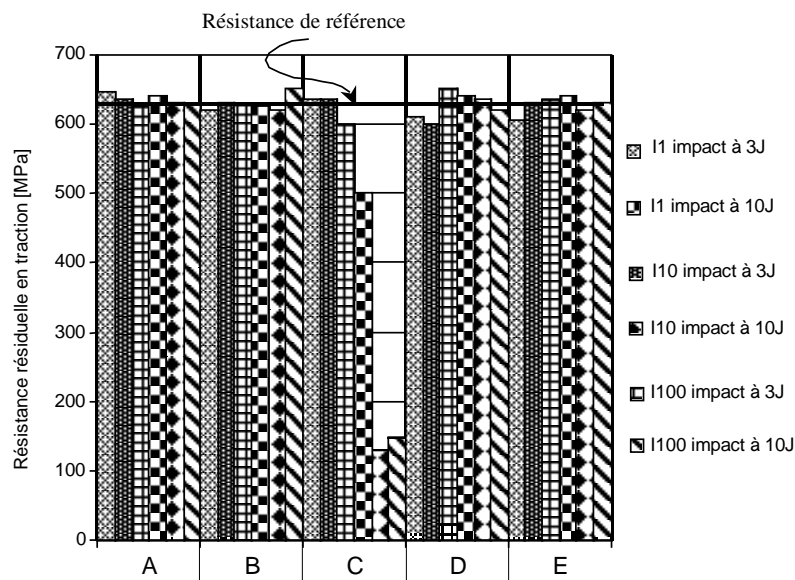


Figure I.5 : Résistance résiduelle de traction à différents niveaux d'énergie [2]

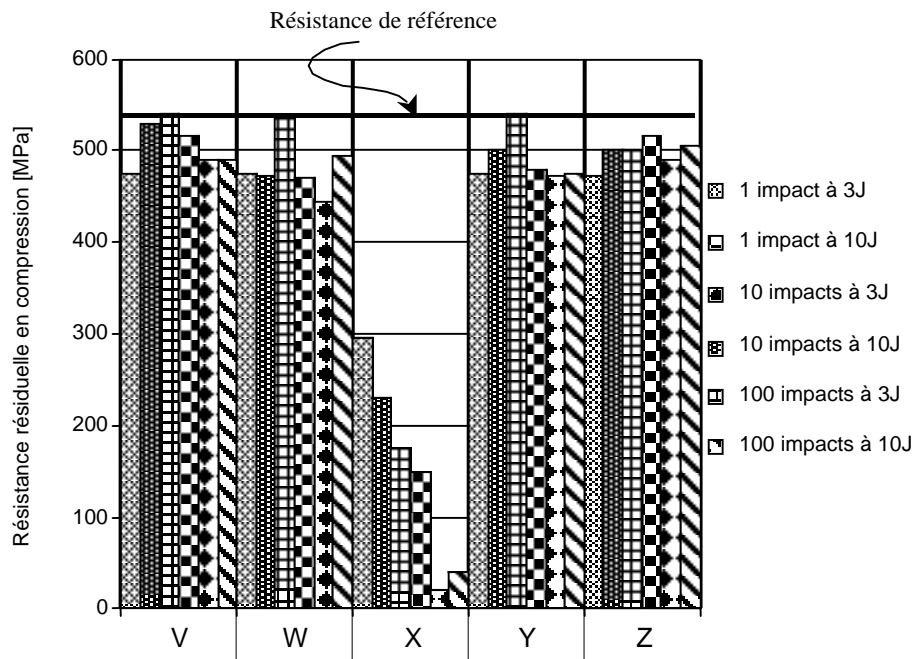


Figure I.6 : Résistance résiduelle de compression à différents niveaux d'énergie [2]

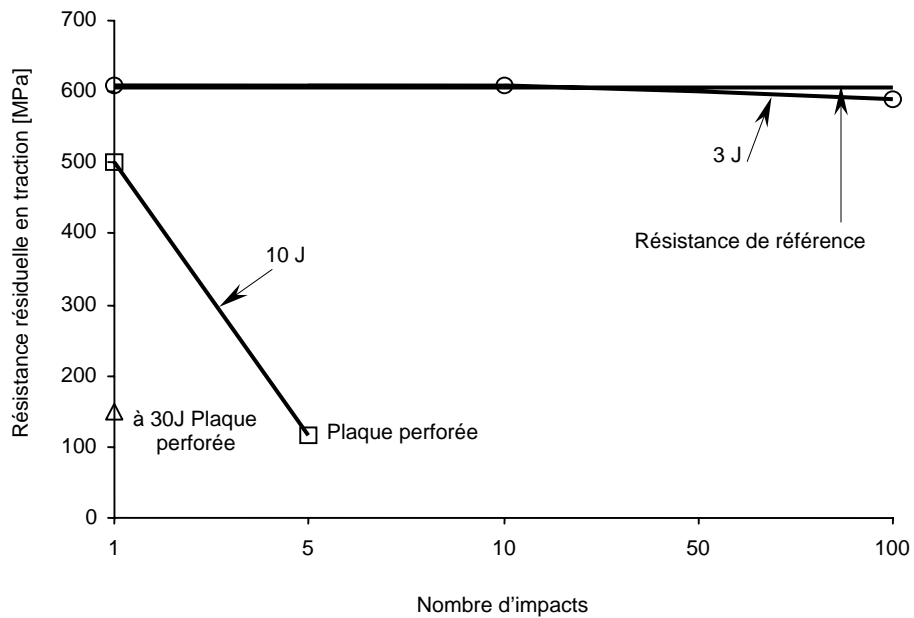


Figure I.7 : Influence du nombre d'impacts sur la résistance résiduelle en traction [2]

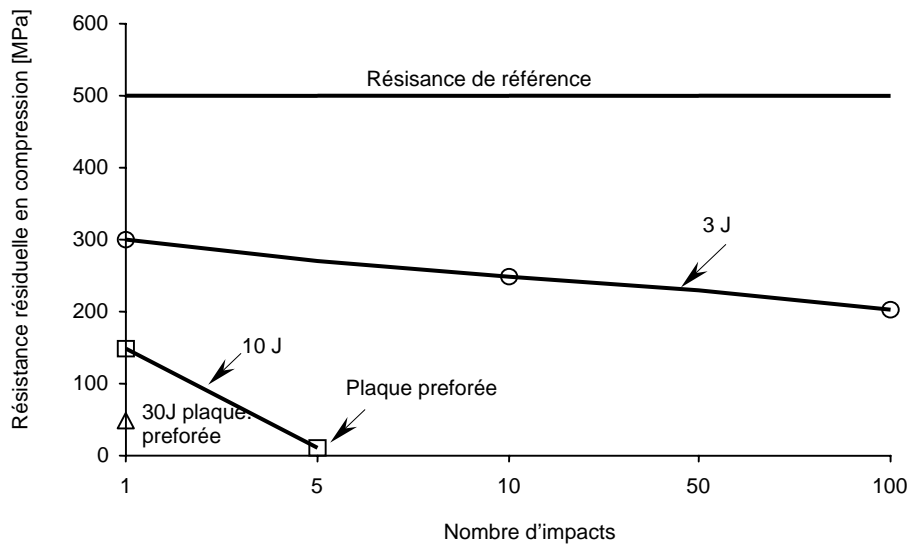


Figure I.8 : Influence du nombre d'impacts sur la résistance résiduelle en compression [2]

II.1.3 - Effet de la largeur et de la distance entre appuis

Guillaumat [3], a conduit une campagne d'essais d'impact sur des plaques de 1m^2 simplement appuyées, en verre/époxy, empilées selon la séquence $[0, 90]_{3s}$. Les essais ont été réalisés sur un dispositif de poids tombant instrumenté d'un accéléromètre et d'un capteur de force.

La vitesse de déplacement de l'impacteur et le déplacement au point d'impact sont mesurés en temps réel par faisceaux lasers.

Les variables retenues dans cette étude sont la longueur entre appuis et la largeur de la plaque (tableau I.2), l'énergie d'impact est fixée à 32J, en utilisant deux couples masse – vitesse. La première campagne d'essais a été conduite avec une masse de 2.4 kg et une vitesse d'impact de 5.16 m/s (hauteur de chute de 1.5m), soit une énergie de 31.9J, et la deuxième avec une masse de 7.4 kg et une vitesse d'impact de 2.92 m/s (hauteur de chute de 0.5m), soit une énergie de 31.6J. Les résultats obtenus montrent que le temps de contact est très sensible au couple masse-vitesse. L'analyse est faite en prenant en considération les paramètres suivants :

- ✓ le temps de contact impacteur-structure,
- ✓ le déplacement au centre de la plaque (point d'impact),
- ✓ la force maximale,
- ✓ la taille de la surface endommagée.

A l'issu de cette étude, l'auteur conclut que :

- ✓ la distance entre appuis a une influence beaucoup plus importante que la largeur de la plaque,
- ✓ le déplacement au centre et le temps de contact augmentent avec la distance entre appuis et inversement, la force de contact impacteur-structure diminue,
- ✓ la seule connaissance de l'énergie incidente lors d'un impact n'est pas toujours le paramètre le plus pertinent.

Largeur [mm]	400	325	175	100	175	325	250	250	250
Distance entre appuis [mm]	250	380	380	250	120	120	250	250	250

Tableau I.2 : Paramètres géométriques d'essais [3]

II.1.4 - Effet de l'énergie d'impact

Z. Aboura [4] a réalisé des essais de choc sur le pendule Charpy modifié et instrumenté d'un capteur piézoélectrique relié à un amplificateur de charge. Au cours de ses essais à des niveaux d'énergie variant de 0.5 à 5J, l'auteur récupère sur une table traçante reliée à un oscilloscope l'évènement charge - temps. Les éprouvettes testées sont fabriquées dans un composite à base de résine époxy souple et de résine époxy rigide renforcées de fibres de verre tissées. Les éprouvettes testées sont de dimensions 10x120x3.2 mm.

En premier lieu, des observations sous microscope électronique à balayage réalisées sur les éprouvettes endommagées ont permis à l'auteur d'émettre les remarques suivantes :

1. à des niveaux d'énergie de l'ordre de 0.5J, le dommage apparaît au sein des fibres transverses, caractérisé par des microfissures dans la résine localisées sur le périmètre de la fibre. Ces microfissures coalescent entre-elles pour former une fissure de taille plus importante,
2. de 1 à 1.5J, les fissures demeurent localisées en dessous de l'axe neutre de l'éprouvette impactée,
3. à partir de 2J, le dommage devient plus important et les fissures transverses sont inclinées, signe d'apparition des contraintes de cisaillement,
4. au delà de 4J, l'endommagement n'est plus restreint à une partie de l'éprouvette mais il s'étale à l'ensemble de l'éprouvette entraînant la rupture de fibres.

En second lieu, l'auteur analyse par des essais de flexion trois points post-impact, respectivement l'évolution de la charge à rupture et le module d'élasticité en flexion en fonction de l'énergie d'impact. Les résultats obtenus sont représentés dans les figures (I.9 et I.10), sont comparés à ceux obtenus sur des éprouvettes vierges,

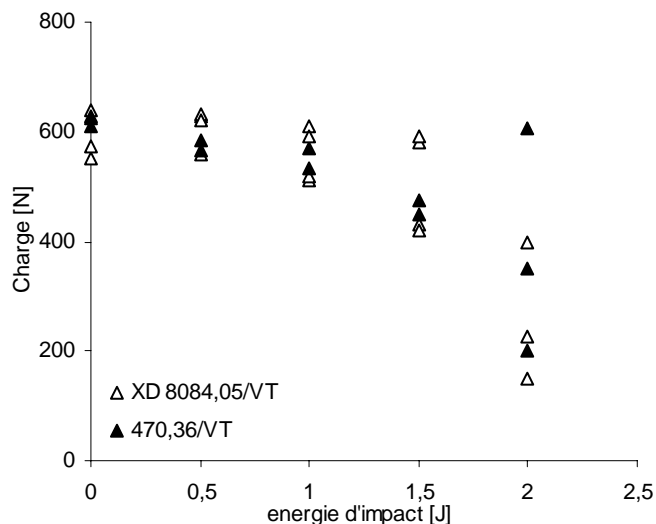


Figure I.9 : Évolution de la charge à rupture en fonction de l'énergie d'impact [4]

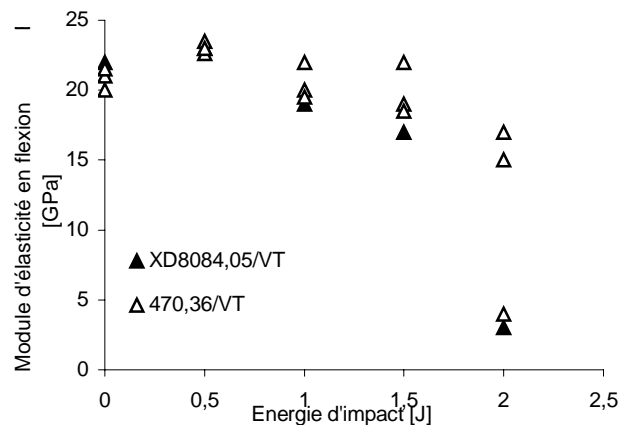


Figure I.10 : Évolution du module d'élasticité en flexion en fonction de l'énergie d'impact [4]

Des résultats obtenus (figures I.9 et I.10), l'auteur conclut que la nature de la résine n'apporte aucune amélioration notable aussi bien en ce qui concerne les propriétés élastiques que celles à la rupture.

II.1.5 - Effet du traitement des fibres

Yasunobu et al [5] étudient l'effet du traitement de surfaces des fibres (ensimage) sur l'évolution du dommage sous sollicitation du type chocs. Cinq solutions aqueuses ont été préparées avec trois types d'ensimage à différentes concentrations. Les nappes de fibres sont trempées dans chaque solution de traitement puis séchées pendant 10min à une température de l'ordre de 110°C. Les plaques stratifiées sont constituées de 20 plis à base de résine vinyle ester, générant une épaisseur de 4mm. Le procédé de fabrication est manuelle, les plaques sont séchées à température ambiante durant 48 heures, ensuite elles sont recuites durant 3 heures à 80°C, puis durant 2 heures à 150°C.

Les essais de chocs ont été réalisés sur un dispositif à poids tombant instrumenté d'un capteur piézoélectrique. Les plaques impactées de forme carrées de dimensions 100x100mm sont encastrées sur les quatre côtés. Pour chaque essai une courbe force – déplacement est enregistrée (figure I.11). Après dépouillement, les auteurs analysent les résultats des essais en indiquant l'évolution des paramètres suivants :

- la rigidité,
- l'effort correspondant au premier endommagement P_i ,
- l'effort maximum P_m ,
- l'énergie absorbée $U = U_p + U_m$,
- l'énergie correspondant au pic de chargement U_m ,
- l'énergie d'amorçage de dommage U_i ,

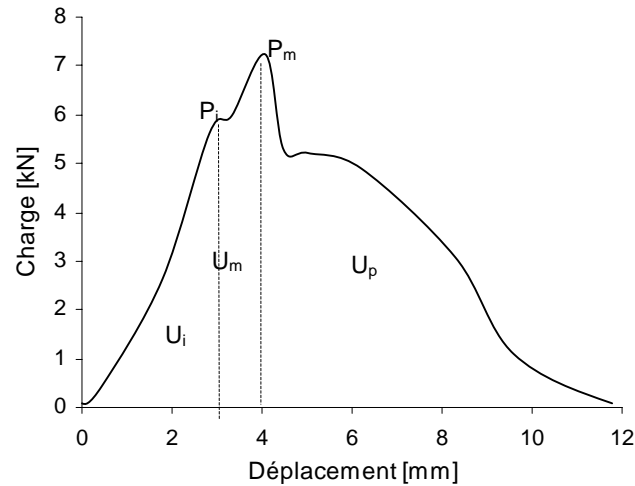


Figure I.11 : Courbe charge /déplacement d'essai d'impact [5]

Les plaques sont examinées au microscope électronique, afin d'évaluer le dommage et le mode d'endommagement sur les deux faces de la plaque. Par la suite, la résistance résiduelle est mesurée par des essais de compression post-impacts, réalisés sur les éprouvettes endommagées.

Les auteurs concluent que le premier point d'inflexion noté P_i (figure I.11) correspond au début d'endommagement et par conséquent, l'aire au dessous de cette partie de la courbe représente l'énergie élastique stockée par la plaque, notée U_i . Il apparaît aussi que cette quantité d'énergie n'est pas influencée par l'énergie d'impact (figure I.12). Par contre, l'énergie maximum croît linéairement en fonction de l'énergie d'impact (figure I.13).

La variation de la surface endommagée en fonction de l'énergie d'impact pour les éprouvettes ayant subiées différentes solutions d'ensimage cinq est portée sur la figure I.14. en dessous d'une énergie critique de l'ordre de 10J, aucun dommage n'apparaît et cela pour les cinq différentes éprouvettes. Cette énergie correspond approximativement à l'énergie d'amorçage U_i calculée par l'aire sous la courbe charge – déplacement (figure I.11).

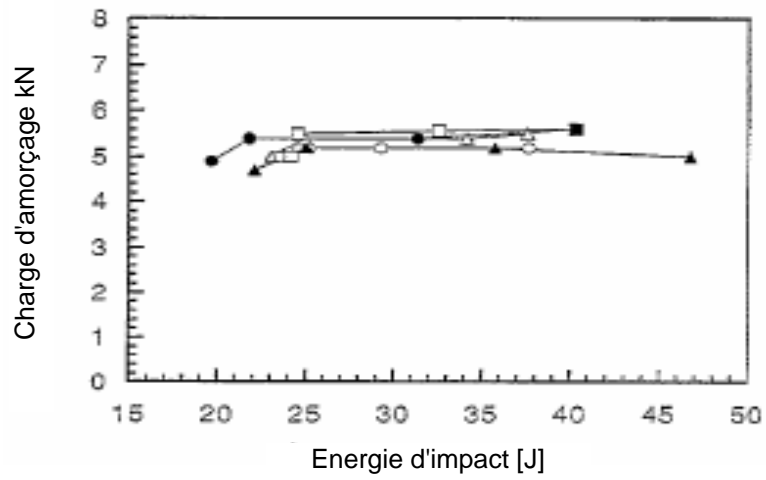


Figure I.12 : Variation de la charge d'amorçage de l'endommagement en fonction de l'énergie d'impact [5]

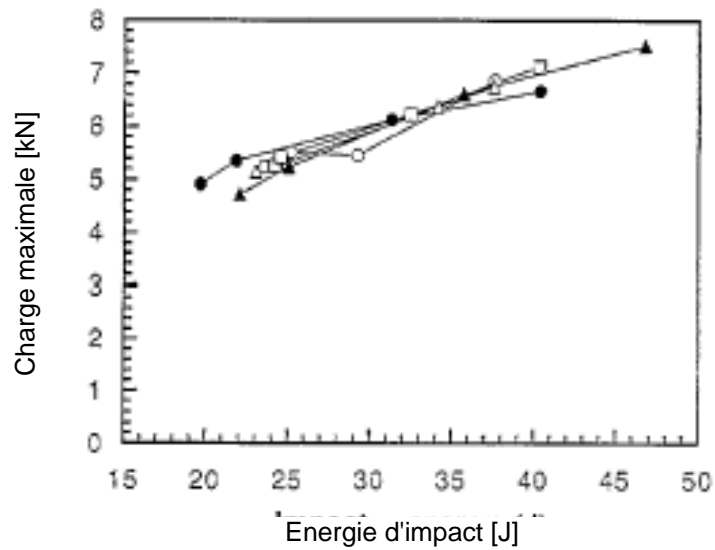


Figure I.13 : Variation de la charge maximale en fonction de l'énergie d'impact [5]

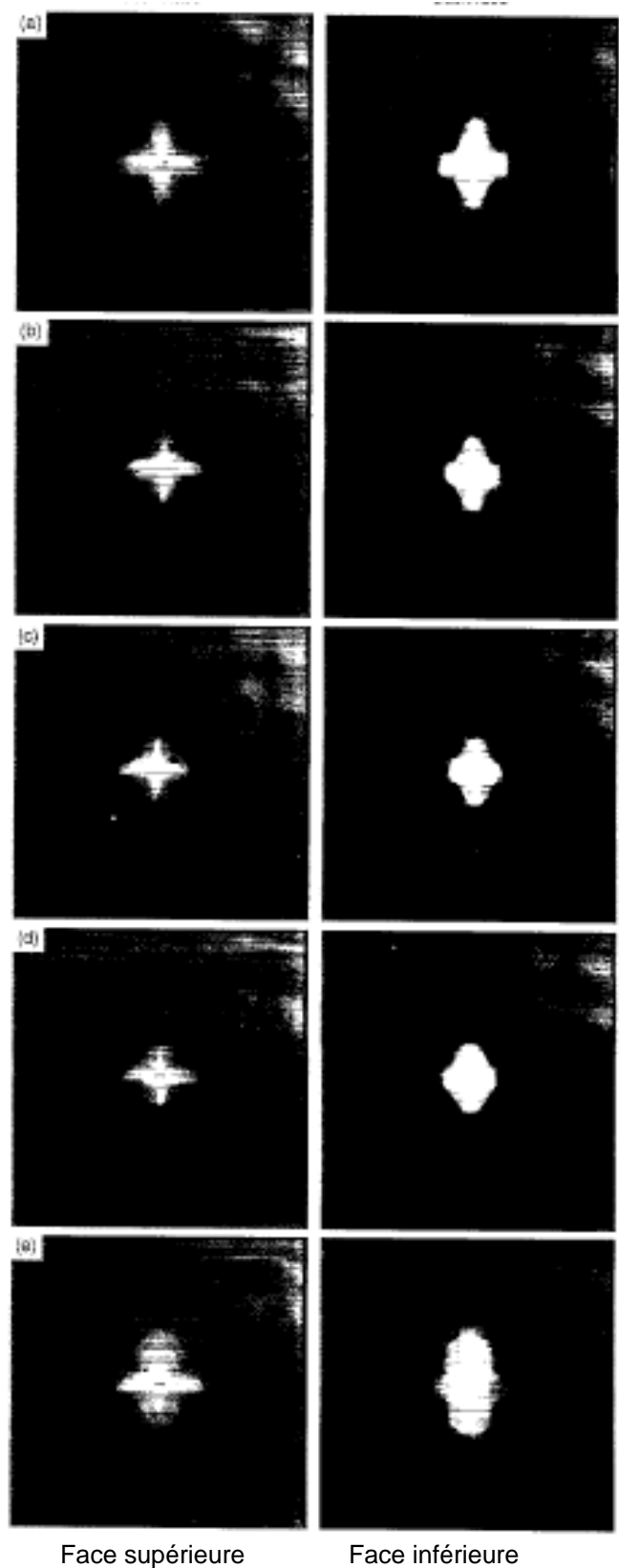


Figure I.15 : Photos représentatives de la forme de dommage sur les deux faces des plaques impactées [5]

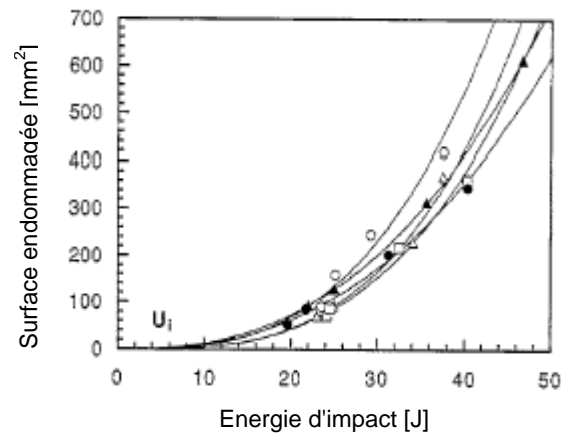


Figure I.14 : Variation de la surface endommagée en fonction de l'énergie d'impact [5]

L'excès d'énergie d'impact une partie se transforme en déformation anélastique et en énergie de propagation de l'endommagement. Ce phénomène est de plus en plus important sur la face inférieure que l'énergie d'impact est élevée (figure I.15).

II.1.6 - Effet du tissage

L'étude effectuée par Mouritz [6] est basée sur des essais post-impact de flexion et de cisaillement sur poutres courtes afin de mesurer les résistances résiduelles. L'analyse de la forme de la maille et de la densité de couture de plis verre/époxy cousus par un fil en Kevlar sur l'évolution des contraintes de flexion et de contraintes de cisaillement, est étudiée au travers du nombre d'impacts et du niveau d'énergie.

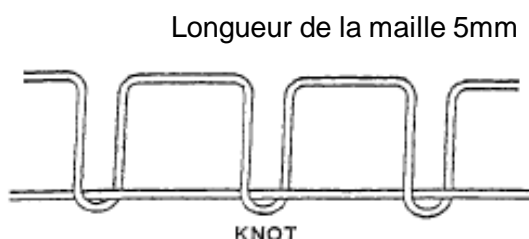


Figure I.16 : Forme de la maille de couture [6]

Les plaques sont constituées de plusieurs plis en verre/époxy, cousus par un fil en Kevlar49 pour former une nappe (figure I.16). Cinq types de nappes ont été ainsi fabriquées, puis découpées en plaques de dimensions 100x125mm. Les plaques maintenues par les quatre côtés sont impactées répétitivement par 1, 5, 10, 25 et 50 impacts en utilisant un poinçon de rayon 6,2mm et de 0,95kg de masse à des hauteurs variant entre 0,5 et 2m. La vitesse incidente et la vitesse de rebondissement sont mesurées juste avant et après l'impact. Après chaque essai, la zone impactée des plaques sont examinées sous un microscope électronique. Par la suite, des essais post-impacts de flexion trois points sont conduits selon les normes ASTM D790M-84 et ASTM D2344-84. Les différentes observations relevées par l'auteur à :

- la couture des plis diminue la résistance au délaminage en mode I, par contre, elle n'influe par beaucoup sur la résistance en mode II.
- le procédé de picage par utilisation d'une l'aiguille de tissage induit dans les plis des zones de concentration de contraintes, d'où une chute des caractéristiques de flexion et de cisaillement (figure I.17a et 17b),
- sous l'action d'un seul impact la résistance résiduelle en flexion varie peu, par tandis que, la résistance résiduelle au cisaillement diminue fortement. Après plusieurs impacts la résistance résiduelle de flexion subit une dégradation importante provoquée par la propagation du dommage (figure I.18 et I.19),

- l'aire de la surface délaminée mesurée sur les plaques cousues est un peu plus grande que celle mesurée sur les plaques non cousues impactées avec le même niveau d'énergie (figure I.20).

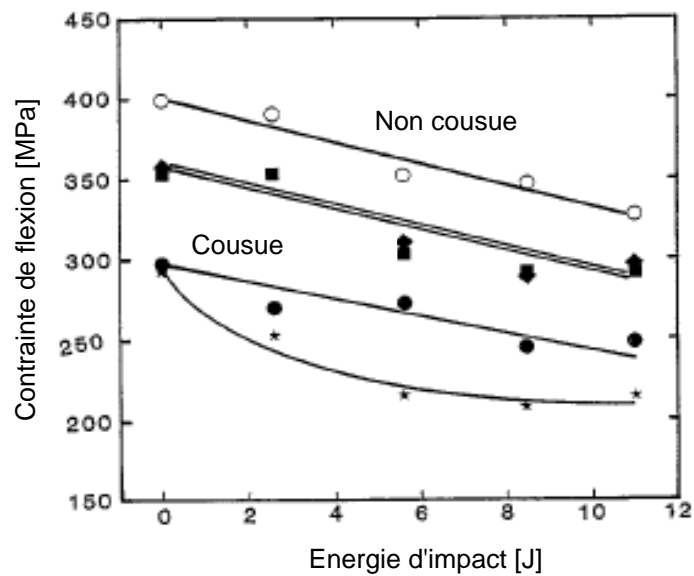


Figure I.17a : Variation des contraintes résiduelles de flexion en fonction de l'énergie d'impact [6]

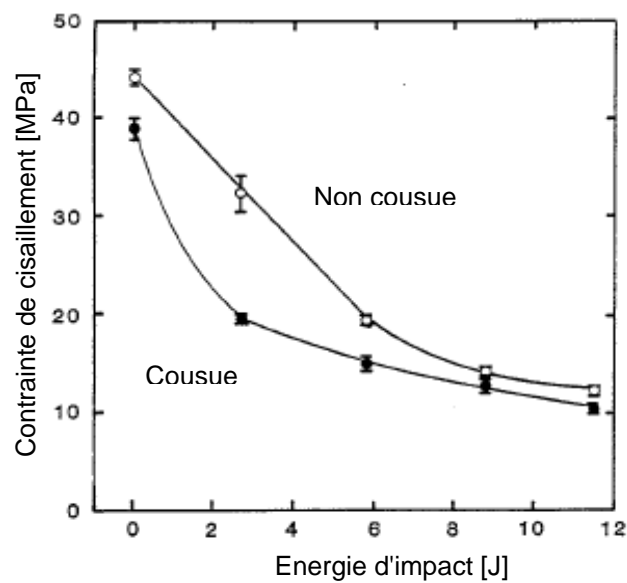


Figure I.17b : Variation des contraintes résiduelles de cisaillement en fonction de l'énergie d'impact [6]

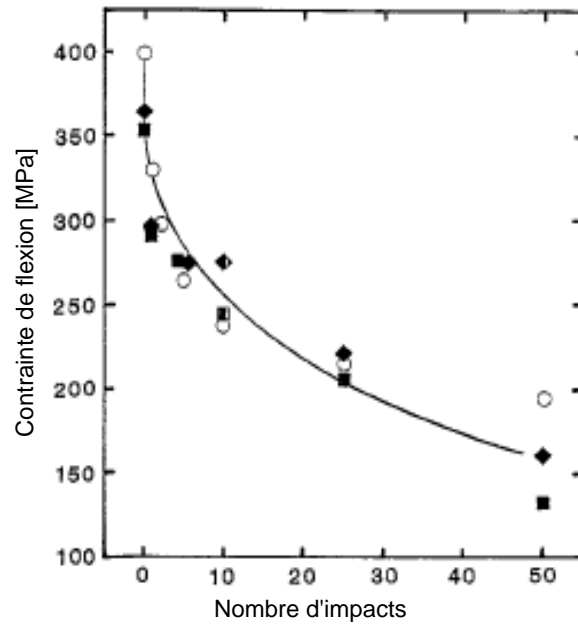


Figure I.18 : Variation de la contrainte résiduelle en fonction de nombre d'impacts [6]

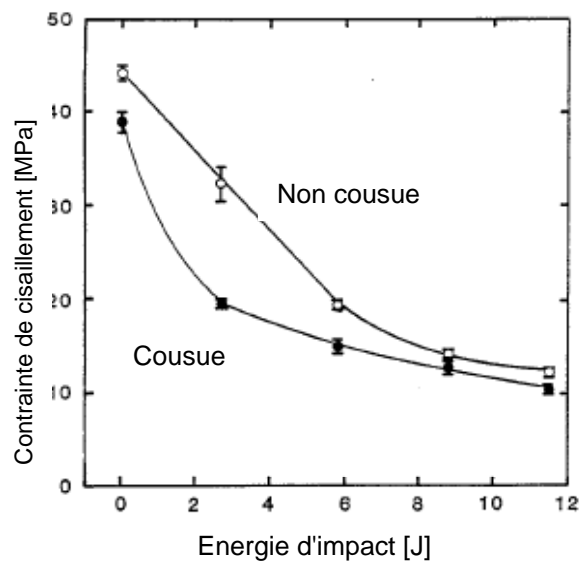


Figure I.19 : Variation de la contrainte résiduelle en fonction de l'énergie d'impact [6]

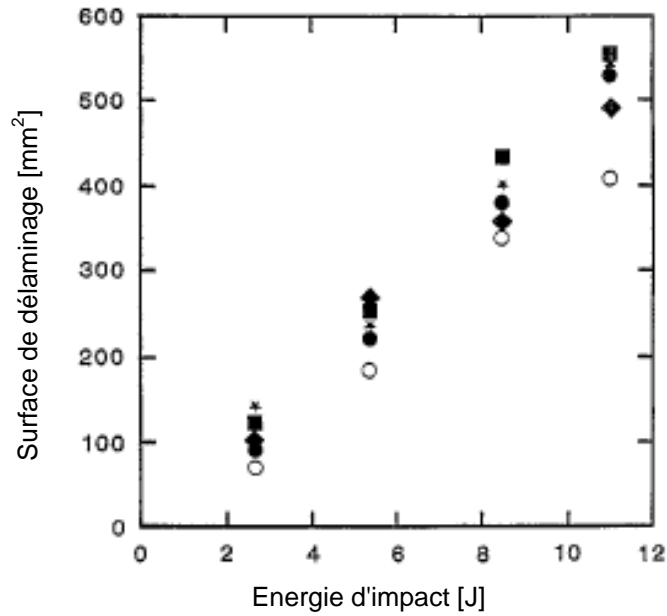


Figure I.20 : Variation de la surface de délaminage en fonction de l'énergie d'impact [6]

Comme précédemment, Jang-Kyo et Man-Lung [7] analysent l'effet du tissage sur l'évolution du dommage en fonction de l'énergie d'impact. Les résultats obtenus montrent que la surface délaminée est restreinte à la zone d'impact (figure I.21 et I.22). Les auteurs concluent que le tissage freine la propagation de délaminage et assure une bonne résistance au délaminage en mode II.

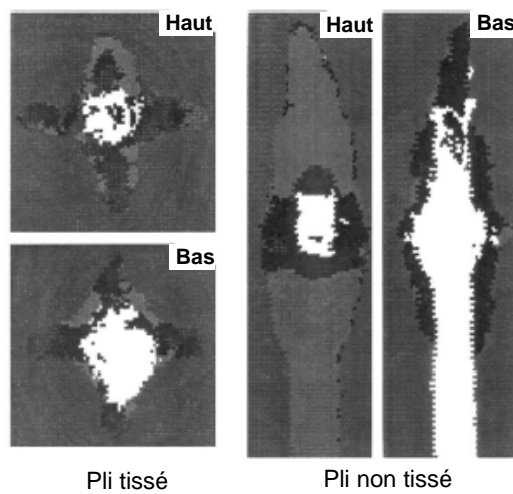


Figure I.21 : Influence du tissage sur la géométrie de la surface endommagée [7]

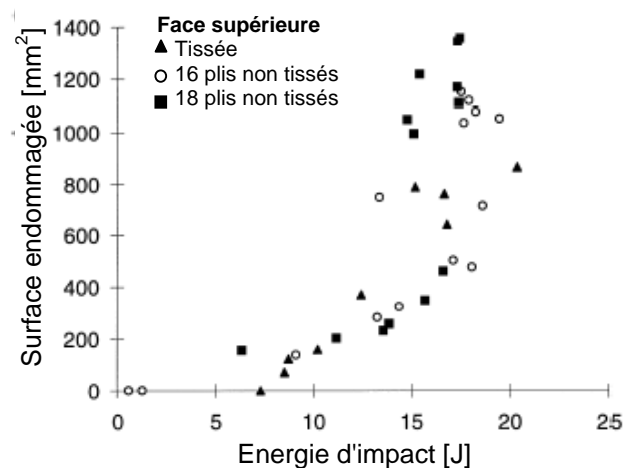


Figure I.22 : Évolution des surfaces endommagées en fonction de l'énergie d'impact [7]

II.2 - Description des mécanismes d'endommagement

Les études relatives au délaminage sont nombreuses dans la littérature, néanmoins, elles traitent toutes de l'évolution de la géométrie de la surface endommagée en fonction de l'énergie d'impact. Le tracé des courbes donnant l'évolution de la surface endommagée en fonction de l'énergie d'impact permet d'estimer directement l'énergie critique à l'amorçage du délaminage. Ceci est possible par un simple prolongement de la droite jusqu'à l'intersection avec l'axe des abscisses (axe des énergies).

L'exploitation des résultats d'essais réalisés sous de faibles niveaux d'énergie (généralement par poinçonnement), a permis à Allix, et al [8] d'expliquer les mécanismes conduisant successivement au délaminage et la rupture d'un stratifié.

Au cours du chargement, des fissures transverses se développent dans chaque pli unidirectionnel, centrées sur la zone de contact poinçon/plaque et se propagent le long des fibres. Dans chaque pli apparaît une bande désolidarisée, libre de mouvement dans la direction normale au pli (figure I.23).

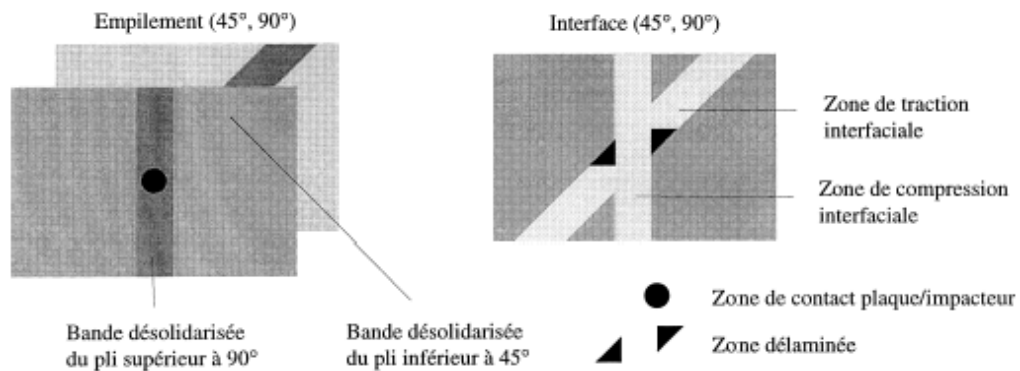


Figure I.23 : Schématisation du dommage [8]

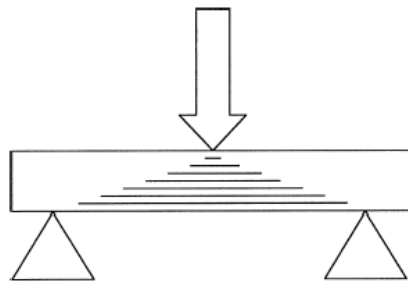


Figure I.24 : Cône d'endommagement [8]

L'analyse du dommage dans l'épaisseur montre que l'interface entre deux plis est soumise à des contraintes de traction et de compression de par et d'autre d'une couche neutre.

Les zones délaménées progressent au sein de la zone de traction, dans les limites de la zone de compression, décrivant une paire de triangles jumeaux [8]. Par itération sur l'ensemble des interfaces du stratifié, ce schéma d'interprétation dessine dans l'espace une forme dite double-hélice. L'augmentation de la surface délaminée depuis le côté impacté vers le côté libre définit l'enveloppe de cette double-hélice, sous la forme d'un cône d'endommagement (figure I.24).

I.3 - Conclusion

La synthèse bibliographique présentée dans ce chapitre nous a permis de mettre en évidence certains paramètres d'influence sur le comportement des composites impactés. Les principales remarques retenues du point de vue expérimentale se résument à :

la majorité des travaux assimilent les chocs à un seul impact, par contre, les structures mises en service sont exposées à des impacts répétitifs

1. . Nous relevons que l'endommagement produit par un seul impact ne reflète pas correctement les dégâts occasionnés par plusieurs impacts. Dans certaines approches, plus rare, les chocs sont assimilés à plusieurs impacts répétés ou cycliques. L'influence du nombre d'impacts ou plus précisément la fatigue par chocs reste toujours, peu traitée dans la littérature,
2. l'impact est un problème multi-paramètres, d'où la difficulté de prédire le comportement d'une structure soumise à ce genre de sollicitation. On relève que la majorité des travaux de recherche considèrent que l'influence de l'énergie d'impact est prépondérante par rapport aux autres facteurs responsables de la dégradation des propriétés mécaniques du matériau composite. il faut signaler aussi que ces mêmes travaux de recherches permettent de classer l'impact en fonction de la vitesse d'impact, d'où les trois catégories : basse vitesse ($v \leq 10\text{m/s}$), haute vitesse ($10 < v \leq 200 \text{ m/s}$) et enfin balistique ($v > 200 \text{ m/s}$),
3. grâce aux moyens de contrôle non destructif, les chercheurs peuvent quantifier l'effet de l'effort et la durée du contact sur le comportement aux chocs. Ces nouveaux paramètres permettent de mieux quantifier l'énergie d'impact réelle entre l'impacteur et la plaque impactée,
4. les principaux mécanismes conduisant à l'endommagement retenus sont le délaminage et la rupture des fibres,
5. les essais post-impact les plus répondus restent la flexion et le cisaillement,
6. l'empilement et les séquences de stratification des plis sont les paramètres qui influent le plus sur le comportement des composites.

Chapitre II :

Méthode expérimentale

II.1 - Introduction

L'analyse la plus répandue d'un essai de choc consiste à relier l'énergie d'impact à la surface endommagée. Cette manière de faire ne permet pas d'expliquer la perte de rigidité de la plaque en fonction du niveau d'énergie d'impact. Pour résoudre ce problème on fait appel aux essais post-impacts. La majorité des travaux que nous avons consultés dans le domaine des structures composites impactées portent sur le comportement post-impact, en réalisant des essais de flexion, de cisaillement et voire même de compression [1 - 8]. Ces essais permettent de relier la résistance et la rigidité résiduelles des éprouvettes endommagées à l'énergie d'impact.

Le comportement sous choc à différents niveaux d'énergie ainsi que les caractéristiques post-impact en flexion et en cisaillement d'un composite à base de résine époxy renforcée des fibres de verre E (mat) a fait l'objet de ce travail. Une étude expérimentale a été effectuée sur un dispositif de poids tombant, conçu et réalisé au sein de notre laboratoire. Ainsi, la résistance et la rigidité résiduelles à la flexion trois points et au cisaillement par flexion trois points des plaques impactées ont été mesurées à partir des résultats d'essais post-impacts.

II.2 – Matériau et Protocole d'essais

Nous avons réalisé des essais d'impact sur des plaques d'épaisseur 8mm à quatre couches, encastrées sur deux bords et dont la surface est de 160x80 mm. Par suite, des essais post-impacts ont été conduits sur des éprouvettes normalisées découpées de part et d'autre du point d'impact dans les plaques endommagées par chocs. Il s'agit d'essais statiques de flexion trois points et de cisaillement par flexion trois points.

II.2.1 - Matériaux

Le matériau étudié est un stratifié verre-E/époxy (plis mat) sous forme de plaques constituées de quatre couches, fabriquées par la société algérienne ENPC de Chlef. Ces plaques rentrent dans la fabrication des embarcations de pêche et de plaisance ainsi que les panneaux et les plate-formes d'isolation.

Le procédé de fabrication est manuelle, utilisant un moule de forme rectangulaire de dimension 1800x1200x8 mm, à température ambiante et pression atmosphérique. Les plaques destinées aux essais de chocs sont toutes découpées dans la même plaque (figure II.1).

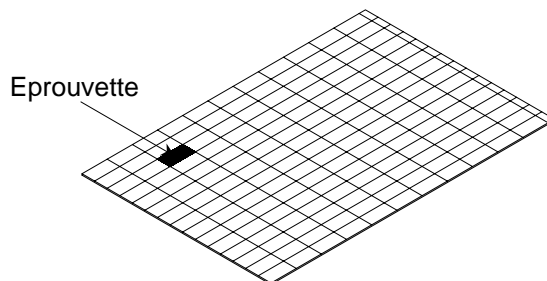


Figure II.1 : Schéma de découpe des éprouvettes

II.2.2 - Essais de chocs

Les essais de chocs ont été menés sur un dispositif de poids tombant conçu et fabriqué au sein de notre laboratoire de mécanique avancée de l'USTHB (figure II.2). Notre dispositif d'essai de chocs a été conçu de manière à nous permettre de développer des niveaux d'énergie d'impact et des vitesses d'impact suffisantes pour la conduite de nos essais.

Le dispositif d'essais est constitué essentiellement d'un bâti rigide (1) en acier supportant le système de fixation de la plaque (2) et deux colonnes de guidage de 2m de hauteur (3) et de section circulaire. Les surfaces des colonnes sont traitées et parfaitement polies, facilitant aussi le guidage du chariot (4) lors de sa course. Sur la partie inférieure du chariot (4) est fixé un impacteur (5) en acier à tête hémisphérique de diamètre 6mm et orienté vers le centre de l'éprouvette. Le poids, de l'ensemble chariot + poinçon est de 3kg.

Les essais ont été conduits sur des plaques de dimensions 160x80x8mm (figure II.3), encastrées sur leurs deux largeurs et impactées en leurs milieu à des basses vitesses d'impact, $V < 10\text{m/s}$ (figure II.2).

En faisant varier le couple masse – hauteur, plusieurs valeurs d'énergie et vitesse d'impact peuvent être sélectionnées, simultanément ou séparément. Les plaques ont

été testées à six niveaux d'énergie d'impact sous la même vitesse 5.5m/s. Deux séries d'essais ont été réalisées :

1. essais à un (1) impact. Les plaques impactées serviront comme éprouvettes pour les essais post-impacts de flexion et de cisaillement. Ces essais nous ont permis de relier directement la taille de la surface endommagée à l'énergie d'impact,
2. essais à (n) impacts, c'est-à-dire, jusqu'à rupture. Ces essais nous ont permis de relier l'énergie d'impact au nombre n d'impacts à rupture.

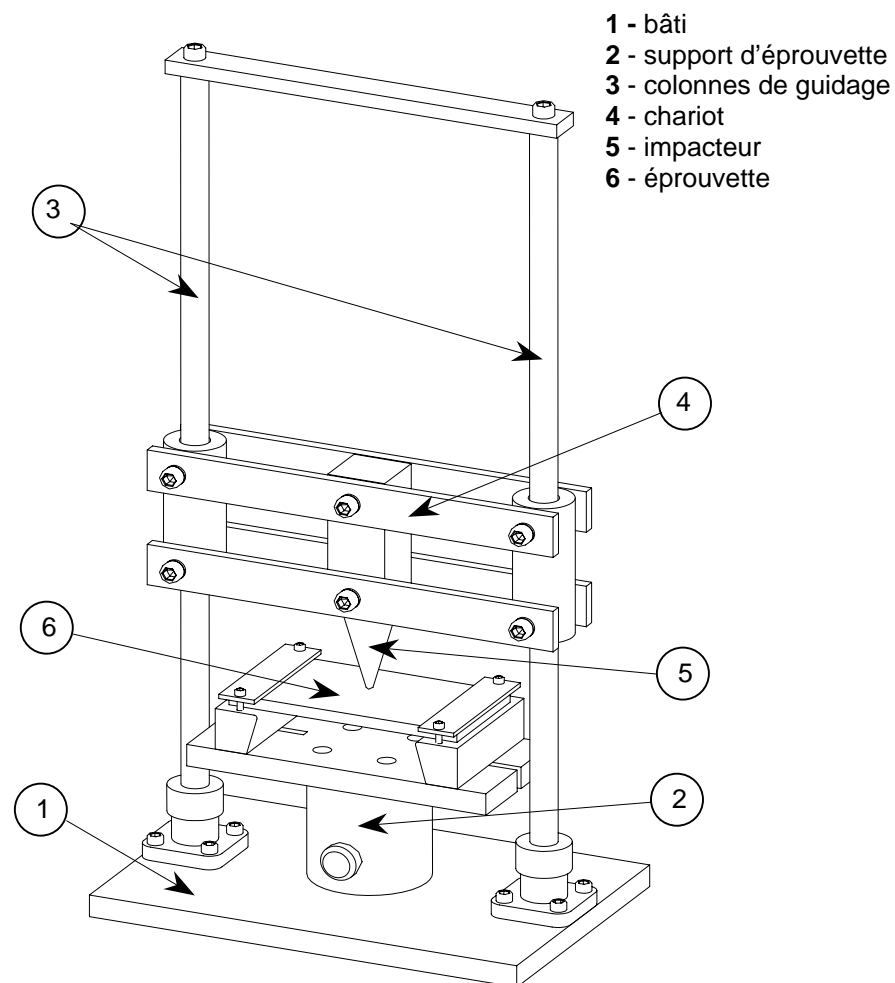


Figure II.2 : Dispositif d'essais de chocs

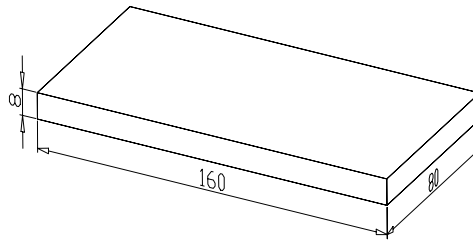


Figure II.3 : Dimensions des éprouvettes

II.2.3 - Essais post-impacts

Les essais de flexion sur composites sont exécutés en respectant scrupuleusement les recommandations des normes ASTM D790M-84 (flexion) ASTM D2344-84 (cisaillement) EN ISO 14125 (la conception) [9]. Ces essais sont largement utilisés dans les milieux industriels en raison de leur simplicité. Cependant, la flexion n'engendre pas un état de contraintes simple (M_f et T) ou pur (M_f) au sein des matériaux testés, il se trouve que les contraintes de traction sont localisées dans la partie convexe, les contraintes de compression sont à leur tour engendrées dans la partie concave et les contraintes de cisaillement sont maximales sur l'axe neutre de la section de l'éprouvette. Bien que les contraintes normales maximales sont localisées au niveau des fibres les plus éloignées de l'axe neutre.

Dans le cas de la flexion trois points, le rapport de la contrainte normale à la contrainte de cisaillement est gouvernée par l'élancement de l'éprouvette (rapport de la distance entre appuis à l'épaisseur). De la figure (II.4), on observe trois cas de contraintes engendrées, à savoir contrainte normale et contrainte de cisaillement (mixte, type I), ou contrainte normale uniquement (type II) ou enfin cisaillement quasi-pur (type III). A chaque cas, correspond un mode de rupture particulier et qu'on va détailler plus loin. C'est dans cette perspective, que nous proposons deux configurations d'essais de flexion trois points post-impact. En se basant sur la mesure du déplacement et de l'effort appliqué, pour deux valeurs différentes de la distance entre appuis telles que les contraintes engendrées soient du type (II) ou (III), il est possible de déterminer les deux modules E et G .

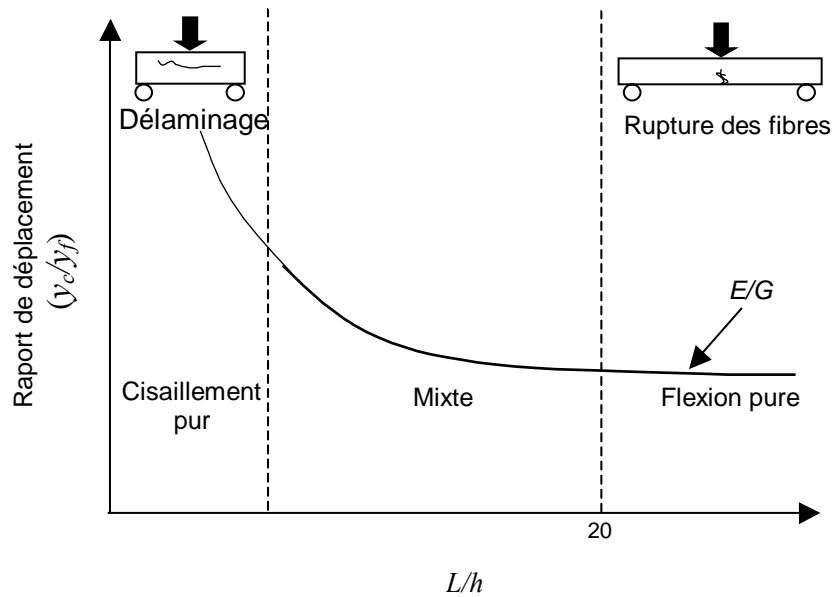
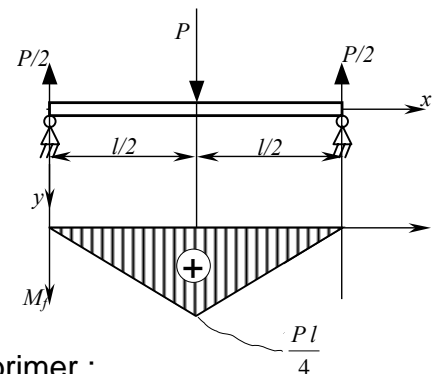


Figure II.4 : Schématisation de l'influence du rapport (L/h) sur le mode de sollicitation et de rupture [10]

Considérons une poutre en flexion trois points, simplement appuyée. Le moment de flexion s'exprime par :

$$M = \frac{Px}{2} \quad 0 \leq x \leq l/2 \quad (\text{II.1})$$

P est la charge appliquée au milieu de la poutre
 l la distance entre appuis.



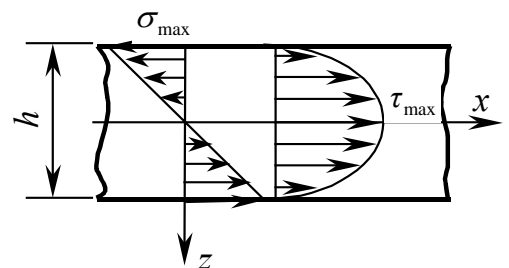
Dans ces conditions, la théorie des poutres permet d'exprimer :

- la contrainte normale maximale de flexion :

$$\sigma_f = \pm \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (\text{II.2})$$

- la contrainte maximale de cisaillement :

$$\tau_{max} = \frac{3P}{4bh} \quad (\text{II.3})$$



où :

b : largeur de l'éprouvette

h : épaisseur de l'éprouvette

Nos essais de flexion trois points (essais post-impacts) ont été conduits sur des poutres découpées directement dans les plaques impactées et dont les dimensions géométriques sont données dans le tableau (II.1) mais aussi représentées par la figure (II.5).

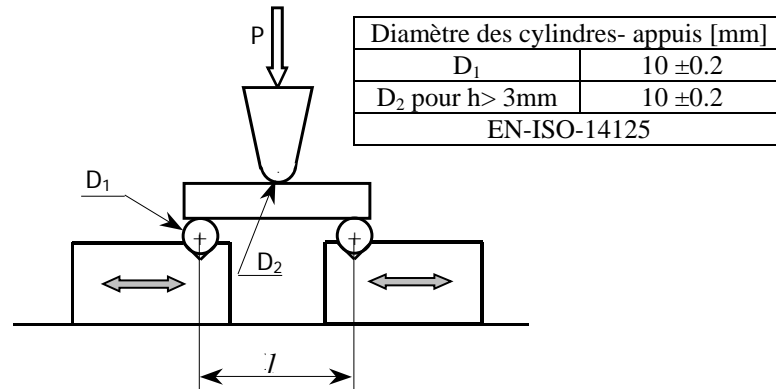


Figure II.5 : Montage de flexion [9]

Sollicitation	Longueur totale L [mm]	Distance entre appuis l [mm]	Largeur b [mm]	Epaisseur h [mm]
Flexion pure	160	150	30	8
Cisaillement quasi-pur	35	25	30	8

Tableau (II.1) : Dimensions géométriques des éprouvettes de flexion trois points, selon ASTM D790M-84 (flexion) et ASTM D2344-84 (cisaillement)

II.2.3.1 - Essais de cisaillement par flexion trois points

Les essais de cisaillement sont très importants pour les matériaux composites, réputés par leur très grande sensibilité aux contraintes de cisaillement. Les essais de cisaillement pur sont difficiles à mettre en œuvre et à exploiter.

Il y a bien lieu de distinguer le cisaillement perpendiculaire au plan des couches (intralaminaire) et le cisaillement dans le plan des couches (interlaminaire).

Les plaques renforcées de mats dont les nappes de fils continus sont disposées dans un plan sans aucune orientation préférentielle, ce qui confère au mat une

isotropie des propriétés mécaniques dans son plan. Ces plaques obtenues par empilement de plusieurs couches de mats, sont sujet au délaminage qui se traduit par une décohésion entre couches constituant ainsi le point faible de ces matériaux. La résistance au délaminage, dont il faut toujours tenir compte, dépend de la nature de la résine, de la liaison renfort – matrice, du type et du pourcentage de renfort, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé.

Pour apprécier quantitativement la résistance au délaminage, on peut induire des contraintes de cisaillement dans le plan perpendiculaire à ces couches, par flexion trois points entre des appuis rapprochés (tableau II.1 et figure II.5). Il s'agit de l'essai de cisaillement sur poutre courte SBST (Short Beam Shear Testing) ou également appelé essai de résistance au cisaillement interlaminaire ILSS (Inter Lamina Shear Strength). Une diminution de la distance entre appuis conserve en effet l'effort tranchant, donc les contraintes de cisaillement, alors qu'elle réduit proportionnellement les contraintes normales. Comme il ne s'agit pas de cisaillement pur, la rupture peut intervenir par délaminage figure (II.6), dont lequel la résistance au délaminage est donnée par la relation (II.3) [11].

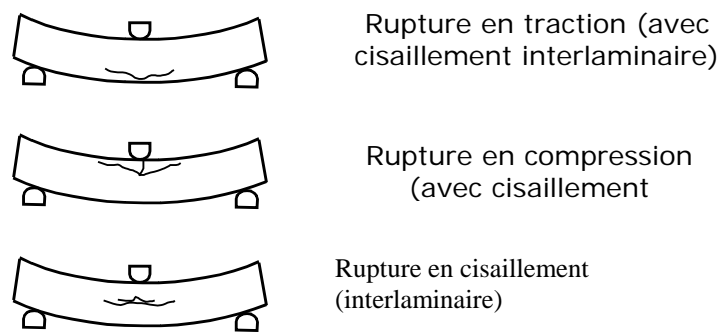


Figure II.6 : Modes de rupture d'un composite en flexion trois points, éprouvette courte [9]

II.2.3.2 – Essai de flexion pure

La rupture intervient sous l'action des contraintes normales de flexion seules ou associées avec le cisaillement, auquel cas la résistance au délaminage ne peut être calculée uniquement par la relation (II.3). Nos essais ont été effectués dans les conditions décrites par le tableau (II.1) et la figure (II.5). La rupture peut intervenir selon les différents modes suivants [9] :

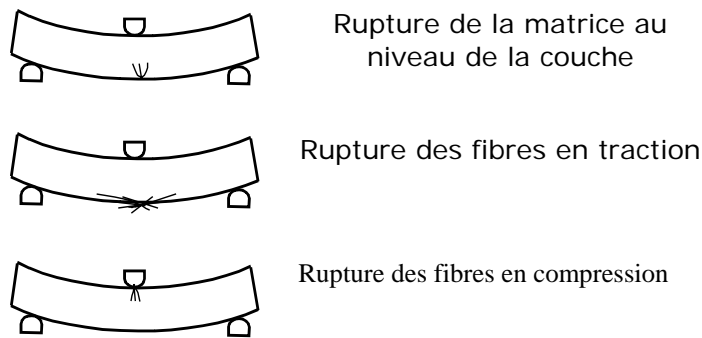


Figure II.7 : Modes de rupture d'un composite en flexion trois points, éprouvette élancée [9]

II.3 - Conclusion

Compte tenu des travaux consultés dans la littérature et les moyens expérimentaux de notre laboratoire, il nous est apparu nécessaire de mettre au point une procédure expérimentale assez simple, peu coûteuse mais complète. Les essais de chocs ont été menés sur un dispositif de poids tombant permettant de développer des niveaux d'énergie d'impact allant jusqu'à 100J et des vitesses maximales d'impact de 7m/s, suffisantes pour la conduite de nos essais. Les plaques endommagées sont découpées par la suite pour fournir les éprouvettes destinées aux essais post impacts.

Les essais post impacts de flexion trois points sont effectués dans le sens où ils permettent de tenir compte de l'effet de l'élancement qui gouverne le mode de rupture et la participation de la contrainte de cisaillement à la déformation en flexion.

Nous proposons alors deux configurations d'essais post-impacts : flexion conduite avec un élancement $l/h=18$ afin d'être sous condition de flexion pure, et flexion conduite avec un élancement $l/h=3$ pour être sous condition de cisaillement quasi pur.

Cette procédure donne la possibilité de mesurer les caractéristiques de rigidité et de résistance à partir des courbes charge/déplacement recueillies sur la machine universelle de traction - compression.

Chapitre III :

Résultats et discussion

Résultats et discussion

Les résultats d'essais de chocs (essais d'impact), de flexion trois points et de cisaillement sur éprouvettes courtes (essais post-impacts) nous ont permis de tracer et analyser les courbes donnant respectivement la variation de la taille de la zone endommagée, de la résistance et rigidité résiduelles en fonction de l'énergie d'impact. Ces résultats vont être exposés et discutés dans ce chapitre.

III.1 - Essais de chocs

Une première campagne d'essais a été menée sous un impact unique et à une vitesse d'impact constante de 5.5m/s, en faisant varier l'énergie de 44 à 86J (figures III.1 et 2). Ces essais ont été conduits dans le but de quantifier la résistance et la rigidité résiduelles sous l'effet d'un choc unique par des essais post-impact de flexion trois points et de cisaillement sur poutre courte.

Une seconde campagne d'essais, toujours sous un impact unique, avec cette fois-ci un niveau d'énergie constant de 44J et trois vitesses d'impact à s'avoir 3.8, 4.4 et 5.5m/s, a été mené dans le but d'analyser l'effet de la vitesse d'impact sur l'évolution du dommage.

Enfin, une dernière campagne d'essais d'impacts multiples, sous une énergie variable de 44 à 86J et une vitesse constante de 5.5 m/s, est effectuée jusqu'à la défaillance totale de la plaque, ce qui nous a permis de tracer la courbe d'évolution de l'énergie d'impact en fonction du nombre d'impacts à rupture.

III.1.1: Analyse du dommage sur les deux faces de la plaque

Les figures (III.1, 2 et 3) décrivent l'évolution du dommage en fonction de l'énergie d'impact, au niveau des deux faces supérieure et inférieure de l'éprouvette impactée. Il apparaît qu'on peut associer à chaque niveau d'énergie, une forme et une valeur appropriée de la taille de la surface endommagée (figure III.2).

On relève par ailleurs, qu'au niveau des plis inférieurs, l'évolution de l'aire de la surface endommagée se caractérise par sa forme circulaire, centrée au point d'impact. Cette aire de forme circulaire, évolue en fonction du niveau d'énergie d'impact, jusqu'à la valeur de 85% de l'énergie de défaillance de la plaque.

Ce type d'évolution en forme de cercles concentriques, de centre le point d'impact, est relativement freinée à partir d'un taux de 65% de l'énergie de rupture. Cela peut s'expliquer principalement par le déchaussement et la rupture des fibres au niveau des plis inférieurs conduisant à l'apparition de fissures dans le dernier pli, qui en coalescant forment une fissure principale (hélice), qui a tendance à se propager selon la direction de la largeur (figure III.3b), et ce dans la zone de flexion maximale (figure III.1). Au delà de 85% de l'énergie de défaillance, la forme de la zone endommagée change et devient de plus en plus allongée dans la direction de la largeur, direction de propagation de la fissure. Par un prolongement de la droite passant par les points expérimentaux (figures III.3a et b), on remarque que l'énergie critique de délaminage entre plis les plus tendus est inférieure de 55% à celle provoquant la fissuration de la résine et la rupture des fibres par compression au niveau des plis les plus comprimés. Ceci est confirmé par les photos représentées dans la figure (III.1).

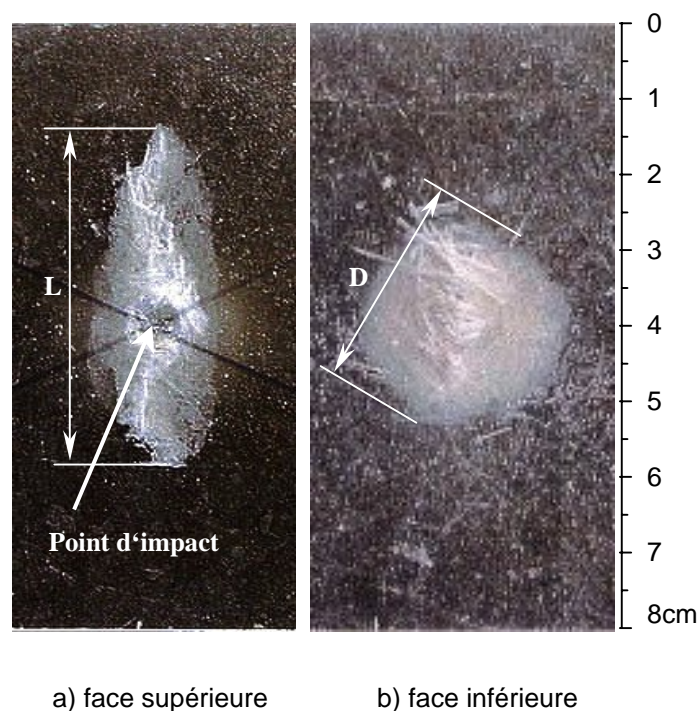
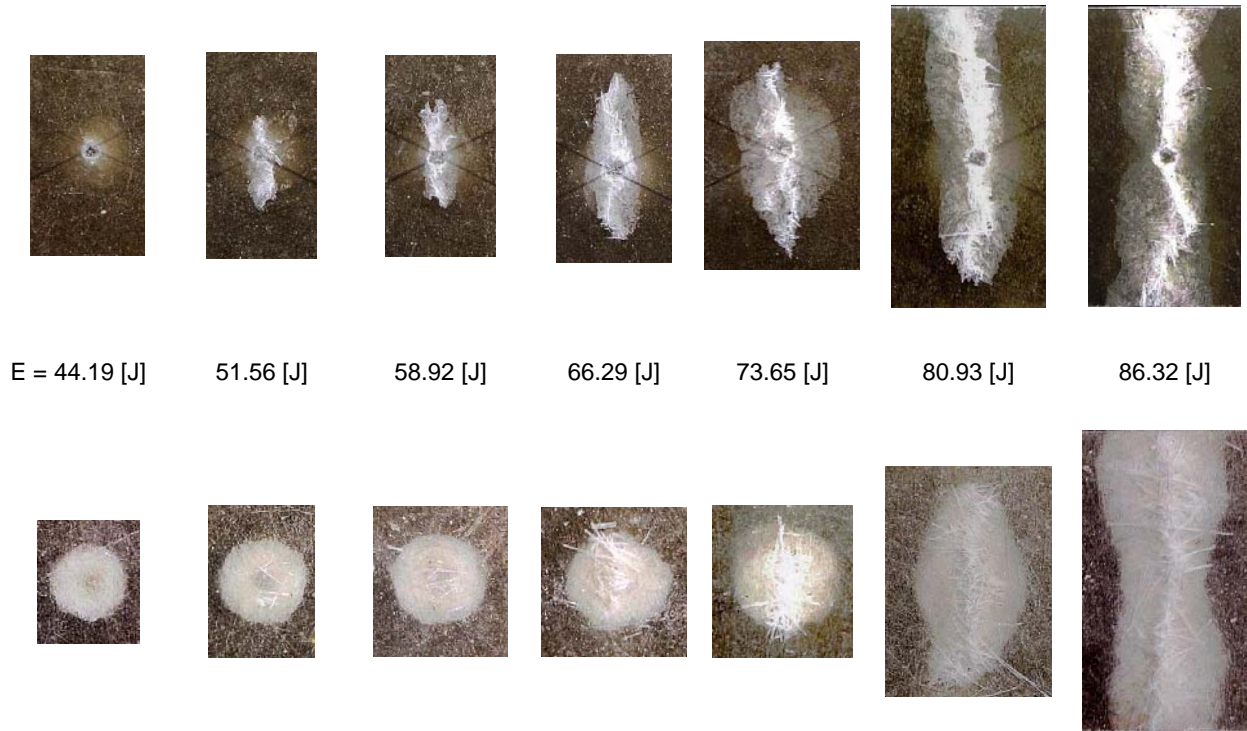


Figure III.1 : Dommages induits par un impact de 4.5kg à 1.5m de hauteur

Couches supérieures



Couches Inférieures

Figure III.2 : Dommages induits par un impact à différents niveaux d'énergie

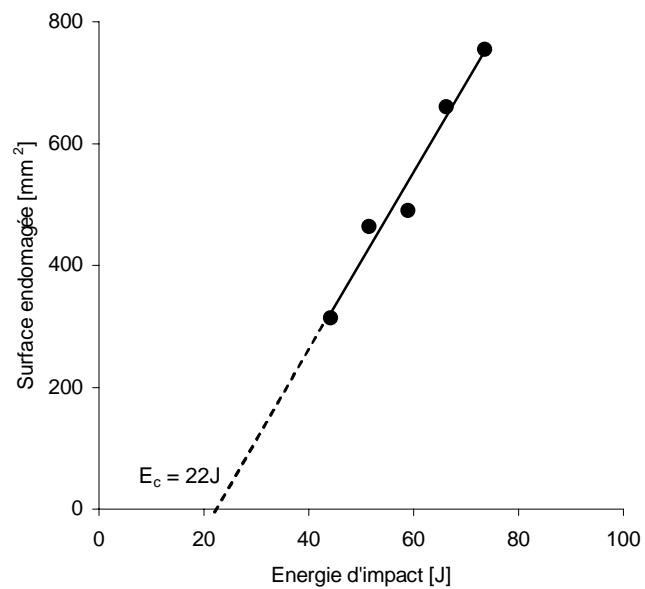


Figure III.3a : Evolution de la surface de délaminage au niveau de la face opposée à l'impact en fonction de l'énergie d'impact (vitesse d'impact = 5.5 m/s)

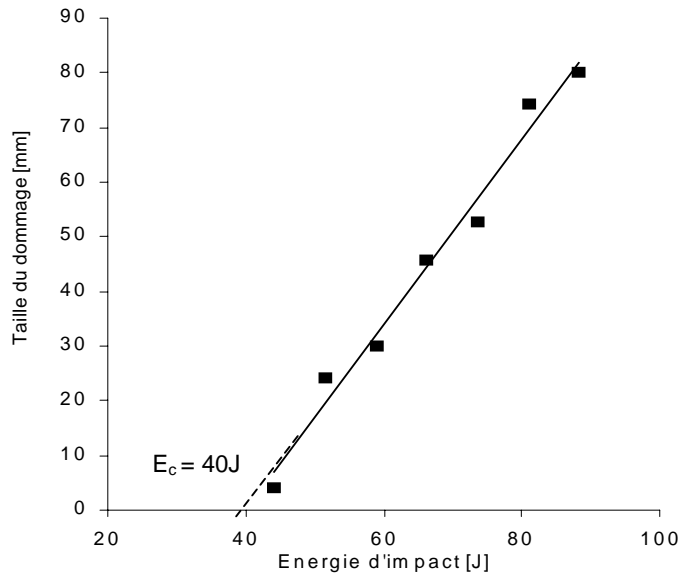


Figure III.3b : Evolution du dommage au niveau de la face impactée en fonction de l'énergie d'impact (vitesse d'impact = 5.5 m/s)

III.1.2 - Analyse du dommage dans l'épaisseur

L'injection d'un produit révélateur fluorescent sur la demi coupe transversale passant par le point d'impact de l'éprouvette endommagée, nous a permis de faire des observations à l'échelle macroscopique. Une représentation graphique de l'évolution du cône de délaminage et des fissurations interlaminaires en fonction de l'énergie d'impact est donnée par l'ensemble des figures (III.4).

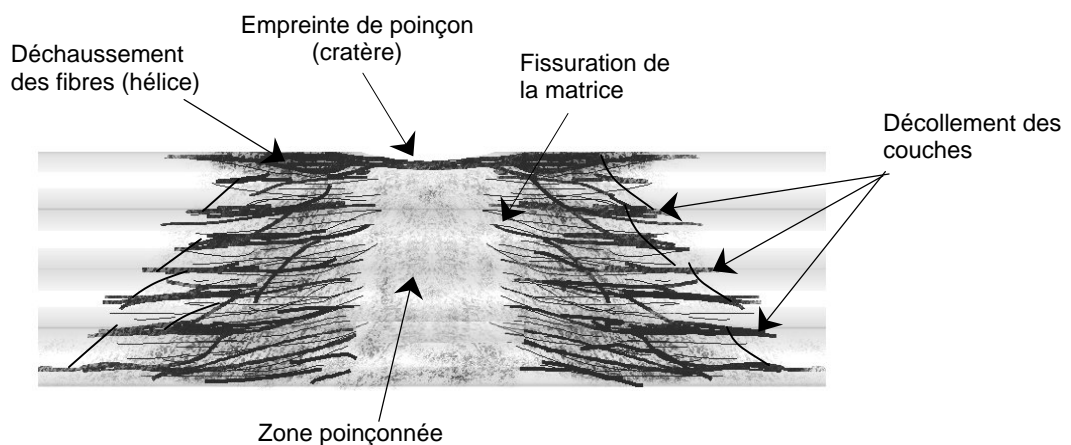


Figure III.4 : Schématisation du cône d'endommagement

Nous pouvons distinguer au sein du matériau quatre formes de dommage :

- ✓ fissuration de la matrice,
- ✓ délaminage,
- ✓ déchaussement des fibres.

Le dommage prend la forme d'un cône de base égale au diamètre du délaminage mesurée sur la face inférieure, et d'un sommet égal à l'empreinte du poinçon sur l'éprouvette. L'évolution du cône du dommage en fonction de l'énergie d'impact peut être décrite de la manière suivante (figure III.5 et 6) :

- pour un niveau d'énergie supérieur à 22J les premiers dommages apparaissent en dessous de l'axe neutre de l'éprouvette (partie tendue). Ils sont caractérisés par un réseau de micro-fissures délimité par des languettes inclinées de 45°, formant l'angle du cône du dommage,
- en augmentant l'énergie d'impact jusqu'à 44J, les dommages se propagent vers les plis comprimés en dépassant l'axe neutre de l'éprouvette,
- entre 44 à 59J, le cône atteint la face supérieure de l'éprouvette et marque l'empreinte du poinçon par un cratère,
- à partir de 60J l'endommagement devient plus important, le cône perd sa forme finale au niveau de la base par l'apparition de la rupture et le déchaussement des fibres au niveau du pli inférieur,
- au delà de 73J l'endommagement n'est plus restreint à l'intérieur du cône mais englobe toute la largeur de l'éprouvette, entraînant la défaillance totale (rupture) de l'éprouvette.

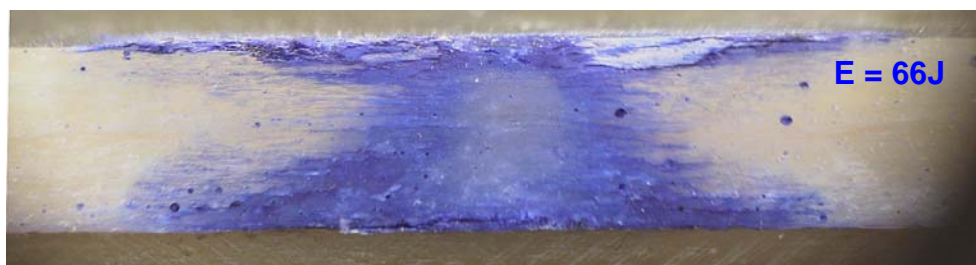
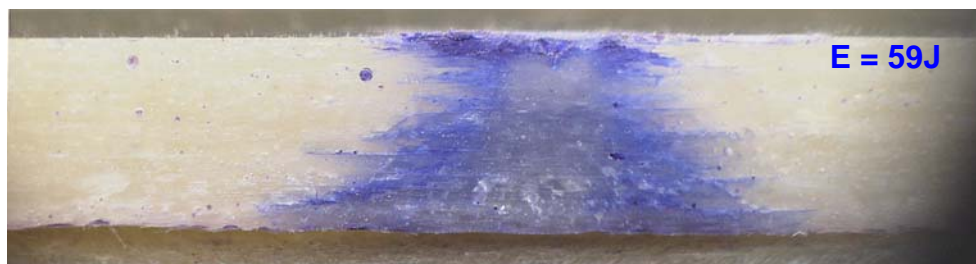
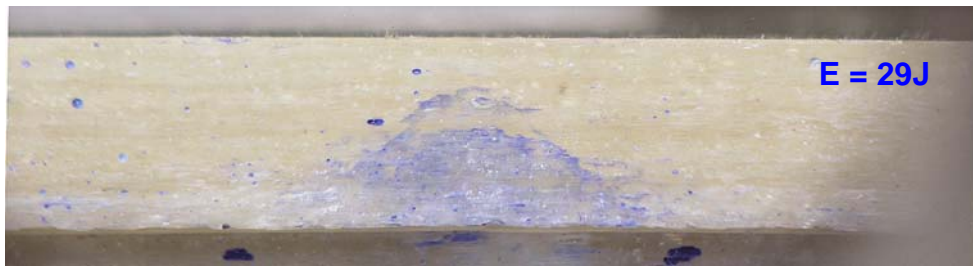


Figure : III.5 : Photos représentatives des fissurations interlaminaires à travers plusieurs interfaces

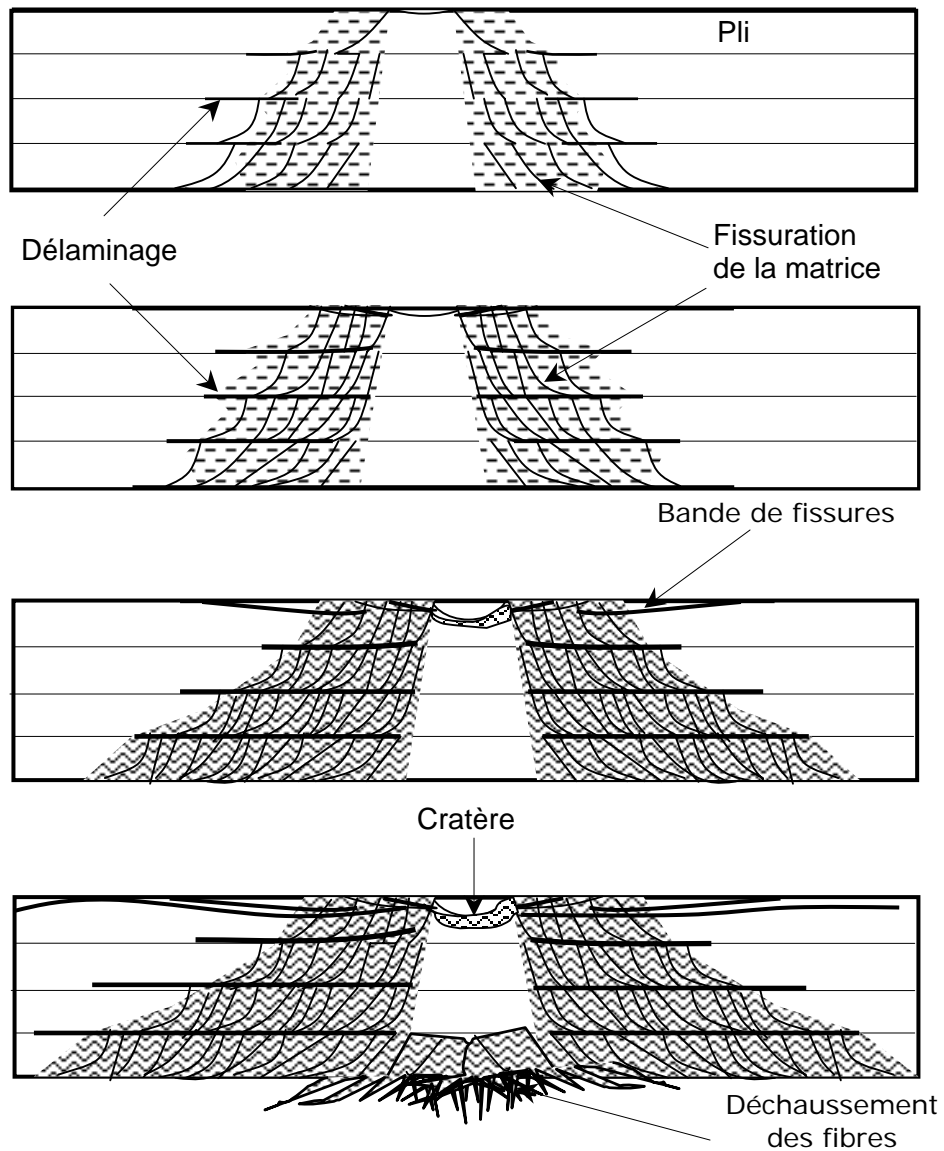


Figure III.6 : Schématisation des fissurations interlaminaires dans les plaques impactées

III.2 - Résultats des essais statiques sur éprouvettes non impactées

Avant de déterminer les caractéristiques mécaniques par flexion trois points des poutres, nous avons jugés utile de vérifier l'influence de l'élançement sur le mode de rupture. Des près-essais ont été menés sur des éprouvettes vierges pour trois valeurs différentes d'élançement (tableau III.1). Les résultats obtenus sont donnés dans la figure (III.7).

A l'issue de ces résultats nous avons pu :

1. arrêté l'élanement donné par le rapport $\left(\frac{l}{h}\right)$ (tableau III.1),
2. tracé les courbes charge – déplacement (figures III.5 et 6).

	Flexion avec cisaillement élevé	Flexion et cisaillement (mixte)	Flexion pure
distance entre appuis [mm]	25	96	150
Rapport d'élanement	3.125	12	18.75
Charge de rupture moyenne (mesurée) [N]	2812	577	388.1
Déplacement (mesurée) [mm]	0.92	5.2	12.28
Flèche ^(*) (calculée) [mm]	0.34	4.8	12.28

(*) due à la contrainte normale

Tableau III.1 : Résultats des essais de référence

Les essais ont été réalisés sur une machine électromécanique universelle pilotée par ordinateur dans les conditions suivantes :

- à température ambiante,
- à vitesse de déplacement de la traverse mobile de 1mm/min.

Les éprouvettes sont montées sur un dispositif permettant de faire varier la distance entre appuis, monté directement sur la machine d'essais universelle. L'éprouvette est simplement appuyée sur deux cylindres à ses extrémités. L'application de la charge est assurée par le troisième appui monté directement sur la traverse mobile de la machine, voir figure (II.5).

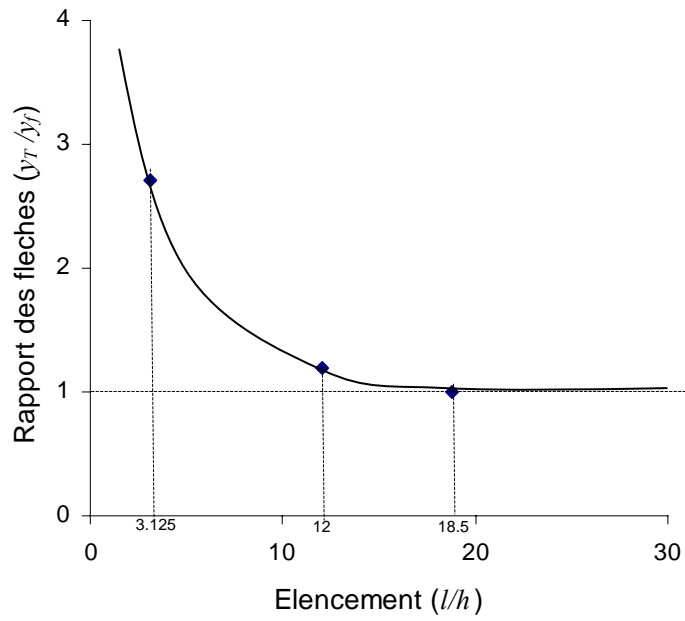


Figure III.7 : Influence de l'élanement sur le mode de rupture en flexion trois points

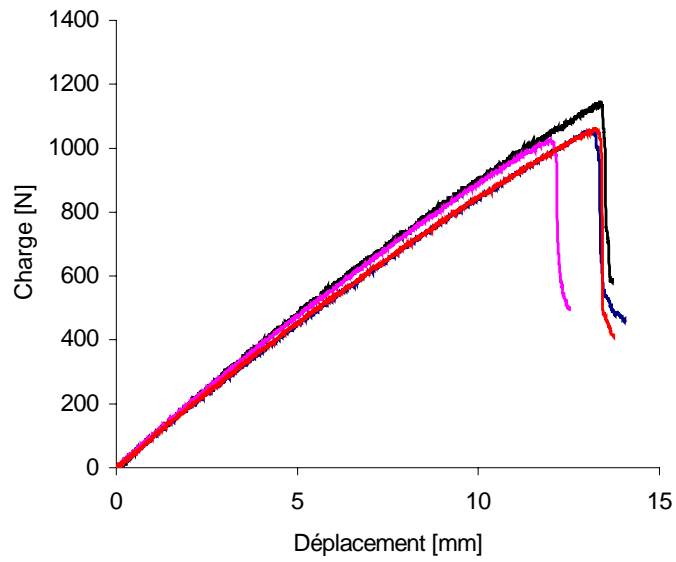


Figure III.8 : Courbes d'essais de flexion pure

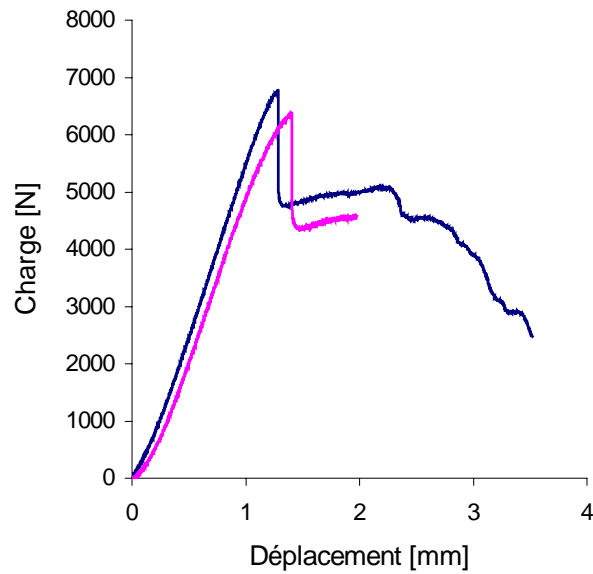


Figure III.9 : Courbes de cisaillement

Dans le cas de la flexion pure (poutre élancée), on constate que la défaillance de l'éprouvette se produit par une combinaison de mode regroupant la rupture de la matrice, le déchaussement et rupture de quelques fibres en traction après un délaminage localisé au niveau du dernier pli (Photo III.1).

Avec l'augmentation de la charge, le phénomène prend de l'ampleur vers les couches supérieures et dans le sens longitudinal sous forme de délaminage. Ceci est en parfaite concordance avec le schéma rapporté dans la référence [9] (figure III.10a).

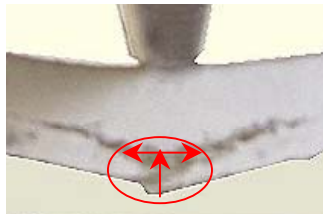


Photo III.1 : Rupture par flexion pure



Figure III.10a : Rupture en flexion d'après la littérature [9]

Par contre, dans le cas du cisaillement par flexion trois points, la rupture se produit par cisaillement inter-laminaire suite à une rupture d'interface qui crée un délaminage dans la zone du plan médian de l'éprouvette (Photo III.2). La résistance au délaminage peut être déterminée par la relation (II.2), donnée dans le chapitre (II). De même que pour le cas de la flexion pure, la rupture par cisaillement est en parfaite concordance avec le schéma rapporté dans la référence [9] (figures III.10b).

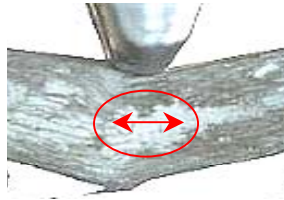


Photo III.2 : Rupture par cisaillement



Figure III.10b : Mode de rupture par cisaillement d'après la littérature [9]

Le dépouillement des résultats d'essais nous a permis de calculer les modules d'élasticité longitudinal et transversal ainsi que, la contrainte normale et la contrainte tangentielle. Ces valeurs sont prises comme grandeurs de référence pour les résultats d'essais post-impacts.

L'application de la théorie des poutres nous permet de déterminer pour les poutres vierges (non impactées) :

1. les modules de rigidités E_0 et G_0 ,
2. la résistance à la rupture en flexion et en cisaillement σ_0 et τ_0 .

ceci se traduit dans le cas de la flexion pure par :

$$E_0 = \frac{I^3}{4bh^3} \left(\frac{P}{y_f} \right) = \frac{150^3}{4 \cdot 10 \cdot 8^3} 106,16 = 5835 \text{ MPa} \quad (\text{III.1})$$

avec $\left(\frac{P}{y_f}\right)$ la pente mesurée directement sur les courbes expérimentales charge – déplacement (figure III.8).

$$\sigma_{max} = \frac{3 \cdot Pl}{2bh^2} = \frac{3 \cdot 150}{2 \cdot 10 \cdot 8^2} = 134,65 \text{ MPa} \quad (\text{III.2})$$

Par ailleurs, dans le cas du cisaillement par flexion trois points, le rapport de la flèche totale (flexion pure + cisaillement) par la flèche en flexion pure s'exprime comme suit :

$$\frac{y_T}{y_f} = 1 + \frac{E}{G} \left(\frac{h}{l}\right)^2 \quad (\text{III.3})$$

avec : $y_T = y_f + y_c$

y_T : la flèche totale mesurée à partir des essais de flexion,

y_f : la flèche de flexion pure,

y_c : le glissement transversal par cisaillement.

Dans le premier membre de l'équation (III.3) donné par le rapport y_T/y_f , le numérateur représente le déplacement (flèche) total(e) obtenu par essai de flexion sur poutres courtes (figure III.9) et, le dénominateur désigne la part due à la flexion pure dans y_T . Cette quantité (y_f) est obtenue par l'utilisation de la formule (III.1) et, le module d'élasticité transversal peut être obtenu par :

$$G_0 = \frac{E}{\left(\frac{y_T}{y_f} - 1\right)} \left(\frac{h}{l}\right)^2 = 178,93 \text{ MPa} \quad (\text{III.4})$$

La résistance au cisaillement transverse est obtenue par la formule (II.3) :

$$\tau_{max} = \frac{3P}{4bh} = \frac{3.6767}{4.30.8} = 21,15 \text{ MPa} \quad (\text{III.5})$$

En résumé les caractéristiques mécaniques de référence retenues pour notre matériau sont :

Module d'élasticité en flexion	$E_0 = 5832 \text{ MPa}$
Module de cisaillement transverse	$G_0 = 179 \text{ MPa}$
Contrainte de rupture en flexion	$\sigma_{max} = 134,65 \text{ MPa}$
Contrainte de rupture par cisaillement	$\tau_{max} = 21.15 \text{ MPa}$

Tableau III.3 : Grandeurs de référence relatives aux propriétés mécaniques du matériau

III.3 - Résultats des essais post-impacts

Une fois les élancements $\left(\frac{l}{h}\right)$ qui nous intéressent sont arrêtés (poutre élancée et poutre courte), on entame la première campagne d'essais. Ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes normalisées découpées directement dans les plaques impactées à une vitesse de 5.5 m/s et à différents niveaux d'énergie. Il s'agit des essais de flexion trois points et les essais de cisaillement par flexion trois points. Les figures (III.11 et III.12) donnent les courbes charge – déplacement obtenues.

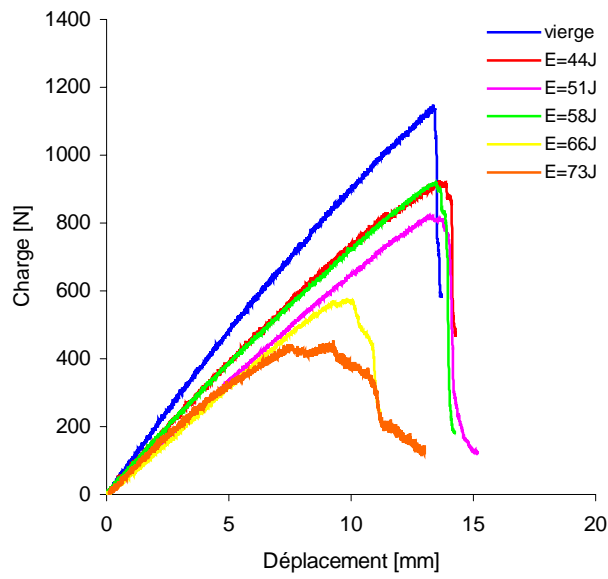


Figure III.11 : Courbes charge – déplacement obtenues par flexion trois points

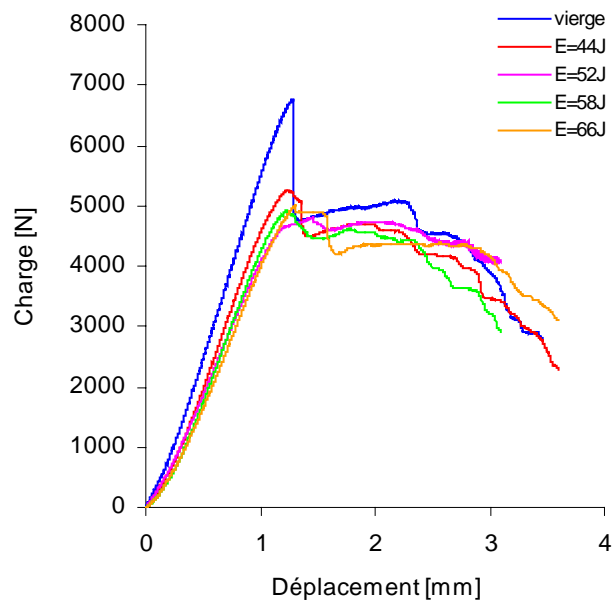


Figure III.12 : Courbes charge – déplacement de cisaillement par flexion trois points

Le dépouillement de ces résultats nous a permis de tracer la variation des rigidités longitudinale et transversale en fonction de l'énergie d'impact. De la figure (III.13), on relève que pour un même niveau d'énergie d'impact la perte de rigidité résiduelle en flexion $\frac{\tilde{E}}{E_0}$ est plus significative que la réduction constatée dans le cas du cisaillement $\frac{\tilde{G}}{G_0}$. Cela est confirmé par la chute rapide de la résistance résiduelle normalisée en flexion $\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_0}$ dès les faibles niveaux d'énergie d'impact montrée par la figure (III.14). Le symbole (\tilde{x}) désigne une propriété du matériau endommagé et (x_0) désigne la même propriété du matériau avant impact (matériau vierge).

De ces figures, on peut conclure que le déchaussement des fibres et par la suite la propagation de la fissure contribuent à l'accélération de la perte de résistance et de rigidité résiduelles des plaques impactées (figures III.13 et 14).

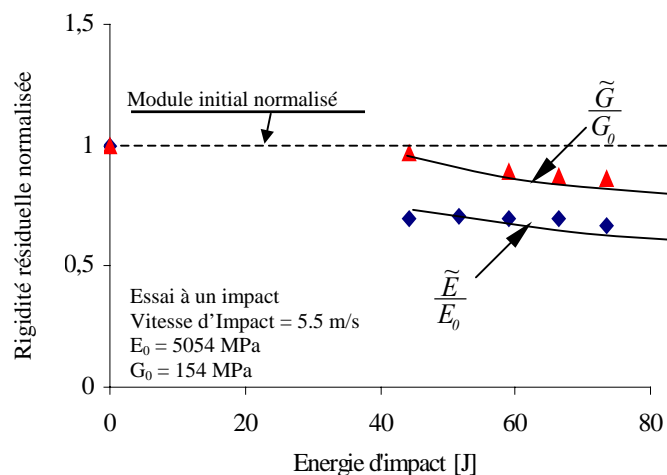


Figure III.13 : Variation de la rigidité résiduelle normalisée en fonction de l'énergie d'impact (un seul impact)

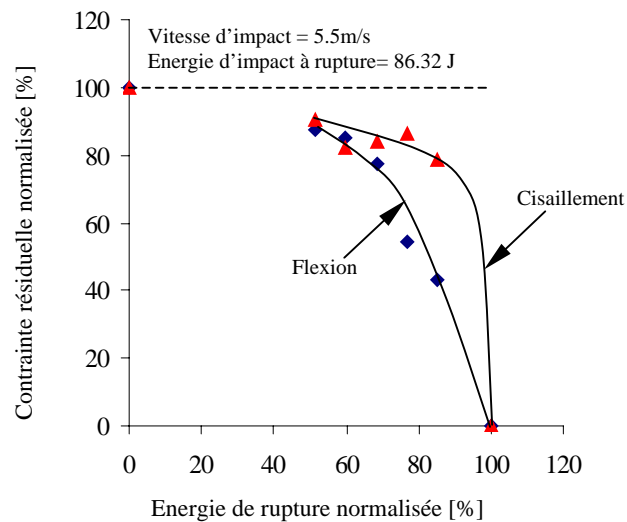


Figure III.14 : Variation de la résistance Résiduelle en fonction du taux de l'énergie d'impact à rupture, (un seul impact)

III.4 - Essais à impacts répétés

Le troisième protocole d'essais consiste à impacter répétitivement une éprouvette jusqu'à la rupture (défaillance totale). Tous les essais ont été réalisés à la même vitesse d'impact et à des niveaux d'énergie différents.

Au moment d'impact, on mesure la hauteur de chute et la hauteur de rebondissement afin de quantifier respectivement l'énergie d'impact et l'énergie restituée. La variation des niveaux d'énergie se fait par addition des poids.

La hauteur de rebondissement après chaque impact est mesurée grâce à un mécanisme monté sur le chariot du dispositif d'essais, permettant ainsi de calculer l'énergie restituée.

Les résultats d'essais nous ont permis de tracer et d'analyser les courbes donnant la variation respectivement de l'énergie d'impact et l'énergie restituée en fonction de du nombre d'impacts et l'évolution de l'énergie restituée et l'énergie absorbée en fonction de l'énergie d'impact

L'énergie absorbe par la plaque est d'autant plus importante que l'énergie d'impact est importante, mais par contre, l'énergie de rebondissement reste toujours constante (figure III.15 et III.16). Cela peut être expliqué par le fait que cette quantité

correspond à l'énergie élastique stockée par la plaque et qui ne dépend que des caractéristiques mécanique et géométrique. Par conséquent, le surplus d'énergie va se transformer en déformation anélastique (endommagement) ce qui provoque l'augmentation de l'énergie absorbée.

On peut alors dire d'après Hirai [5] que cette énergie restituée est l'énergie d'amorçage des dommages.

Pour analyser l'effet de l'énergie à vitesse d'impact constante (égale à 5.5m/s) sur le nombre d'impacts nous avons tracés respectivement l'évolution de l'énergie d'impact et l'énergie restituée en fonction du nombre d'impacts. Les résultats de ces essais ont été portés sur les figures (III.15 et III.17). L'examen de ces résultats montre que :

- pour les énergies d'impact inférieures à 52J (70% de l'énergie de rupture) le palier des énergies restituées est de plus en plus prononcé (figure III.15),
- les plaques impactées à des niveaux supérieurs à 70% de l'énergie d'impact de rupture se rompent après deux ou trois impacts seulement (figure III.15),
- la figure (III.17) présente la prévision de la limite d'endurance de l'énergie d'impact en fonction du nombre d'impacts,
- l'énergie absorbée est d'autant plus importante que l'énergie d'impact est grande. Par contre, l'énergie restituée est toujours constante quel qu ce soit le niveau d'énergie d'impact (figure III.16). La courbe correspondant à l'énergie absorbée, montre une droite qui ne passe pas par l'origine « 0 », car le délaminage n'apparaît qu'à partir d'un certain seuil limite (figure III.3a).

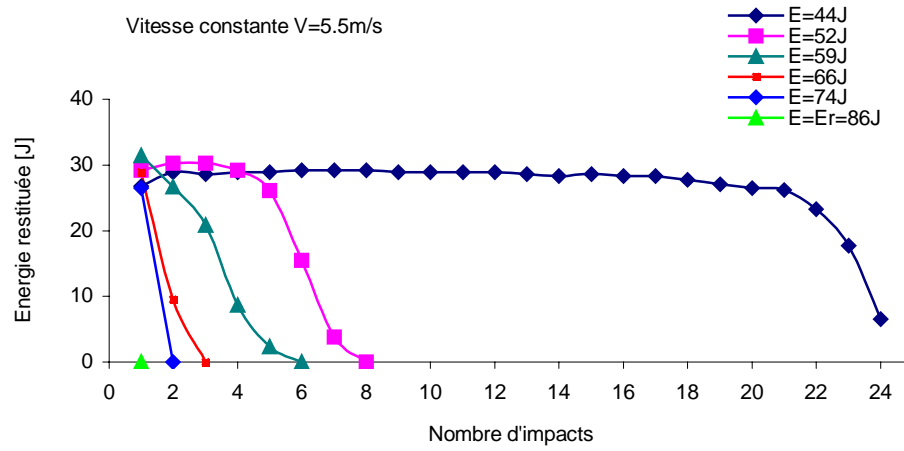


Figure III.15 : Variation de l'énergie restituée en fonction du nombre d'impacts

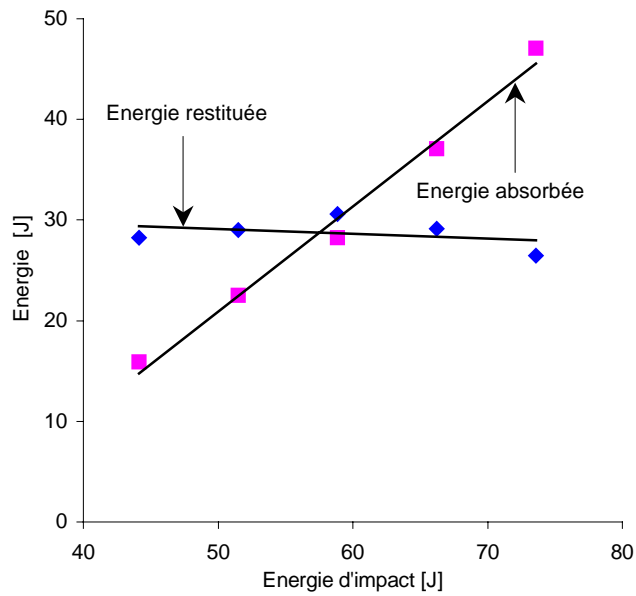


Figure III.16 : Variation de l'énergie restituée et de l'énergie absorbée en fonction de l'énergie d'impact

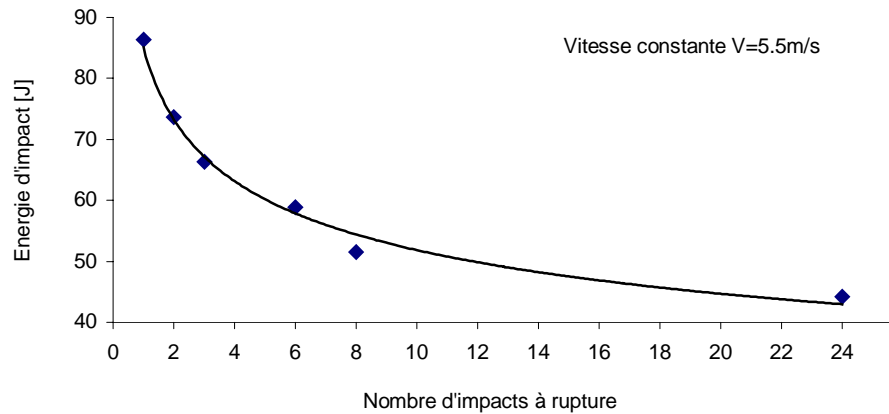


Figure III.17 : Variation de l'énergie d'impact à rupture en fonction du nombre d'impact

III.5 - Conclusion

Les résultats de ces essais ont permis d'établir un schéma d'endommagement et de décrire son évolution en fonction de l'augmentation du niveau d'énergie. Lorsque le matériau est impacté à faible énergie (22J), cette sollicitation n'a d'effet sur la dégradation des caractéristiques mécaniques du matériau qu'à partir d'un certain nombre d'impacts supérieur à 200. Les premiers dommages apparaissent au sein de la matrice sous forme de délaminage localisé au niveau de la dernière interface.

Plus l'énergie d'impact augmente (linéairement), plus cette zone s'élargit en créant une forme géométrique conique de la zone endommagée. Le même phénomène se répète dans le cas de la sollicitation répétée mais il est limité par l'endurance du matériau au choc.

A partir de 60J l'endommagement devient plus important le cône perd sa forme au niveau de la base par l'apparition de la rupture et de déchaussement des fibres au niveau du pli inférieur.

Pour des niveaux d'énergie supérieurs à 73J l'endommagement n'est plus restreint à l'intérieur du cône mais englobe toute la largeur entraînant la défaillance de l'éprouvette.

On relève que, pour un même niveau d'énergie d'impact la perte de la rigidité résiduelle en flexion $\frac{\tilde{E}}{E_0}$ est plus significative que la réduction constatée dans le cas du cisaillement $\frac{\tilde{G}}{G_0}$. Cela est confirmé par la chute rapide de la résistance résiduelle normalisée en flexion $\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_0}$ dès les faibles niveaux d'énergie d'impact.

On peut conclure que le déchaussement des fibres et par la suite la propagation de la fissure contribuent à l'accélération de la perte de la résistance et de la rigidité résiduelles des plaques impactées.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les essais d'impact conduits sur des plaques de faibles dimensions géométriques et d'épaisseur 8mm à 4 plis, en composite verre E/époxy (mat) nous ont permis de suivre l'évolution de l'aire et de la forme de la zone endommagée en fonction des différents niveaux d'énergie d'impact. L'analyse par des observations visuelles en utilisant la technique de la lumière, nous a permis de conclure que le délaminage apparaît au niveau de la dernière interface dès les faibles énergies d'impact. Le délaminage se manifeste dans une première étape sous une forme circulaire centrée au point d'impact, dont l'aire de la zone endommagée évolue avec le niveau d'énergie d'impact. Dans une seconde étape, le délaminage est accompagné par l'apparition de fissures de part et d'autre du point d'impact (sous forme d'une hélice). Dans cette étape l'aire de la zone endommagée se voit ralentie par un quasi blocage de la propagation du délaminage. Ce dernier passe par une troisième phase, où la forme et la taille de la zone concernée par le délaminage dépendrait de la vitesse et de la direction de propagation de la fissure.

Sous un impact répétitif, L'énergie absorbée par la plaque augmente avec l'augmentation de l'énergie d'impact, mais par contre, l'énergie de rebondissement reste toujours constante. Cela peut être interprété par le fait que cette quantité correspond à l'énergie élastique stockée par la plaque et qui ne dépend que des caractéristiques mécaniques et géométriques et du déplacement de la plaque. Par conséquent, le surplus d'énergie d'impact va se transformer en déformation anélastique (endommagement) ce qui provoque l'augmentation de l'énergie absorbée. On peut alors définir l'énergie restituée $E_c=29J$ par l'énergie d'amorçage de l'endommagement.

Lorsque le matériau est impacté à faible énergie (inférieure à 22J), cette sollicitation n'a d'effet sur la dégradation des caractéristiques mécaniques du matériau, qu'à partir d'un certain nombre d'impacts supérieur à 200 impacts. À partir d'un niveau d'énergie pour $E = E_c=22J$, les premiers dommages apparaissent au sein de la matrice sous forme de microfissures localisées dans les derniers pli en dessous du point d'impact.

On relève aussi que, plus l'énergie d'impact augmente (linéairement), plus ces microfissures coalescent pour créer un délaminage. Cette zone s'élargit en formant une géométrie conique de la zone endommagée.

A partir de 40J, sur la face supérieure de par et d'autre du point d'impact, un réseau de fissures apparaît sous forme d'une hélice. La taille et la forme de ce réseau sont de plus en plus importantes que l'énergie et le nombre d'impacts augmentent. A 60J l'endommagement devient plus important et le cône perd sa forme au niveau de la base par l'apparitions de rupture et déchaussement des fibres au niveau du dernier pli.

Pour des niveaux d'énergie d'impact supérieur à 73J, la taille de la surface délaminée est relativement ralentie suivant la direction longitudinale, l'endommagement n'est plus restreint à l'intérieur du cône mais englobe toute la largeur entraînant la défaillance totale de l'éprouvette (rupture par pliage).

L'analyse des caractéristiques mécaniques par les essais de flexion et de cisaillement post-impacts, on révélé que pour un même niveau d'énergie d'impact la perte de la rigidité résiduelle en flexion $\frac{\tilde{E}}{E_0}$ est plus significative que la réduction constatée dans le cas du cisaillement $\frac{\tilde{G}}{G_0}$. Cela est confirmé par la chute rapide de la résistance résiduelle normalisée en flexion $\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_0}$ dès les faibles niveaux d'énergie d'impact.

On peut conclure que la forme conique de l'endommagement, le déchaussement des fibres, la propagation de la fissure au niveau des derniers plis ainsi que les bandes de fissures sur la face supérieure, contribuent à l'accélération de la perte de la résistance et de la rigidité résiduelles des éprouvettes impactées par un impact ou par un impact répétitif.

Reference bibliographique

- [1] F. Ernest Dotst, Larry B. Ilcewicz, B. William Avery, and R. Brian. Coxon "Effects of Stacking Sequence on Impact Damage Resistance and Residual Strength for Quasi-Isotropic Laminates. composite materials". Fatigue and Fracture (third volume), ASTM STP. T. K O'Brien, pp. 476-500 (1991).
- [2] A. David Wyrick and F. Donald Adams, Residual Strength of a Carbon/epoxy Composite Material Subjected to Repeated impact " Journal of Composite Materials, vol.22, pp. 749-765, (1988).
- [3] L. Guillaumat. "Aide au Pré-dimensionnement de Structure Composites Impactées." LAMEFIP-ENSAM, Esplanade des Arts et Métiers Ind., pp. 235-240 (2000).
- [4] Z. Aboura, Etude de Processus de Délamination Mode I et Mode II et Mode mixte (I + II) de Matériaux composites à Renforts Tissés à Différentes Vitesse de Sollicitation. Doctorat de l'UTC (1993).
- [5] H. Yasunobu., H. Hiroyuki et K. Jang-Kyo. "Impact Response of Woven Glass-fabric Composite - I Effect of Fiber Surface Treatment" Composite Science and Technology, vol.52, pp 91-104 (1997).
- [6] A. P. Mouritz "Flexural Strength and Interlaminar Shear Strength of GRP".Composite Science and Technology, vol.57, pp 509-522 (1997).
- [7] K Jang-Kyo et S Man-Lung "Impact and Delamination Failure of Woven-Fabric Composites" Composite Science and Technology, vol.60, pp 745-761 (2000).
- [8] A Olivier, D. Guédra-Degeorges, S. Guinard et A. Vinet "Analyse de la Tenue aux Impacts à Faible Vitesse et Faible Energie des Stratifiés Composites par la Mécanique de l'Endommagement" Composite Science and Technology, vol.1, pp 27-35 (2000).
- [9] "Matériaux Plastiques et Composites : Essai mécanique " Technique de l'ingénieur, vol AM II 5 405 pp 09-11

- [10] A, Ahmed Benyahia " Etude de Délaminage des Matériaux Composites en mode (I) et en mode (II)", Thèse de Doctorat de l'UTC (1996)
- [11] J.-M.Berthelot "MATERIAUX COMPOSITES Comportement mécanique et analyse des structures", 3^e édition (TEC & DOC), pp420-442(1999).