



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procédés

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

En
GENIE MECANIQUE

Spécialité ; *Mécanique et Fatigue des Matériaux*

Par : OUROUA Yacine

THEME :

**ETUDE DE L'ENDOMMAGEMENT DE PLAQUES
COMPOSITES EN VERRE/POLYESTER SOUMISES
A LA FATIGUE PAR CHOCS**

Soutenue publiquement le 26 Septembre 2004, devant le jury composé de :

- | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------|---------------------------|
| - BOUKHAROUBA Toufik | Professeur | USTHB | Président |
| - AZOUAOUI Krimo | Chargé de cours | USTHB | Directeur de thèse |
| - NECIB Kamel | Maître de conférences | EMP | Examineur |
| - AHMED BENYAHIA Ali | Maître de conférences | USTHB | Examineur |
| - HADJ-RABAH Yacine | Chargé de cours | USTHB | Examineur |

REMERCIEMENTS

J'adresse mes vifs remerciements -

au Docteur AZOUAOUI Krimo de l'U.S.T.H.B de m'avoir permis de travailler sur ce thème et de m'avoir dirigé le long de la réalisation de ce présent travail. Je lui exprime ma sincère gratitude de m'avoir aidé, orienté, encouragé et fait bénéficier de sa grande expérience dans le domaine de la recherche scientifique,

à Monsieur Amar MESBAH chargé de cours à l'U.S.T.H.B , pour son aide précieuse et ses conseils avisés,

à Monsieur le professeur Toufik BOUKHAROUBA de l'U.S.T.H.B, mon enseignant et président de jury de m'avoir fait le grand honneur d'examiner ce travail et de présider le jury d'examen,

à Messieurs Kamel NECIB maître de conférences à l'E.M.P, ALI AHMED BENYAHIA maître de conférences à l'U.S.T.H.B et YACINE HADJ-RABAH chargé de cours à l'U.S.T.H.B pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de le juger et de faire partie du jury de soutenance,

à Monsieur M. MOULAY, chef de département du service technique à l'E.N.P.C de la wilaya de Chlef dont la collaboration a été très bénéfique pour la réalisation de ces travaux,

enfin, je ne saurais oublier, dans mes remerciements, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

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

*A mon père et a ma mère,
pour leur soutien et leur dévouement.
A ma grande sœur, à mon épouse et mon fils,
ainsi qu'à tous mes proches.
A mon frère ABDELHAMID.*

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION GENERALE | 7 |
| | |
| <u>CHAPITRE I :</u> ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE | |
| I-1- Introduction..... | 12 |
| I-2- Principe des essais de fatigue par chocs..... | 13 |
| I-2-1- Principe général des essais..... | 13 |
| I-2-2- Méthodes et dispositifs expérimentaux..... | 14 |
| I-2-2-1- Essais de chocs répétés par chute de poids..... | 14 |
| a) Choc non instrumenté..... | 15 |
| b) Choc instrumenté..... | 16 |
| I-2-2-2- Dispositif à came pour la production de chocs cycliques..... | 17 |
| I-2-2-3- Production de chocs répétés par le mécanisme bielle-manivelle..... | 18 |
| I-2-2-4- Canon à air comprimé..... | 18 |
| I-2-2-5- Barres d'Hopkison..... | 19 |
| I-2.3- Dimensions des éprouvettes et géométrie des impacteurs..... | 20 |
| I-3- Développement théorique et analyse expérimentale de la fatigue par chocs..... | 26 |
| I-3-1- Effet du nombre d'impacts sur la charge maximale et sur la tolérance d'endommagement..... | 27 |
| I-3-2- Analyse théorique de la formulation de l'équation de la durée de vie en fatigue par chocs..... | 31 |
| I-4- Résistance résiduelle des matériaux composites soumis aux chocs répétés..... | 34 |
| I-4-1- Résistance résiduelle à la traction..... | 34 |
| I-4-2- Résistance résiduelle à la compression..... | 38 |
| I-4-3- Résistance résiduelle à la flexion..... | 41 |
| I-5- Modélisation de l'endommagement et la rupture d'un matériau composite en verre/époxy soumis aux chocs répétés..... | 44 |
| I-6- Conclusion..... | 46 |

CHAPITRE II: ETUDE EXPERIMENTALE

| | |
|--|----|
| II-1- Description du matériau et propriétés mécaniques..... | 49 |
| II-1-1- La matrice..... | 49 |
| II-1-2- Le renfort..... | 50 |
| II-1-3- Procédé de fabrication des éprouvettes..... | 51 |
| II-2- Présentation de la machine de fatigue par chocs..... | 52 |
| II-2-1- Principe de fonctionnement..... | 52 |
| II-2-2- Montage d'éprouvettes..... | 53 |
| II-2-3- L'impacteur..... | 53 |
| II-2-4- Le variateur de vitesse..... | 54 |
| II-2-5- L'amortisseur de chocs..... | 54 |
| II-3- Méthode expérimentale..... | 55 |
| II-3-1- Dispositif de mesure de la vitesse d'impact..... | 55 |
| II-3-2- compteur de cycles..... | 58 |
| II-3-3- Procédure expérimentale..... | 59 |
| II-3-4- Technique de mesure de la surface délaminée et les dimensions du cratère..... | 60 |

CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS

| | |
|--|----|
| III-1- Effet de l'énergie et du nombre d'impacts sur la surface de délaminage..... | 62 |
| III-1-1- Variation de la surface de délaminage en fonction de l'énergie d'impact..... | 63 |
| III-1-2- Variation de la surface de délaminage en fonction du nombre d'impacts..... | 65 |
| III-1-3- Variation de la surface de délaminage en fonction de l'énergie d'impact Cumulée..... | 67 |
| III-2- Effet de l'énergie d'impact et le nombre d'impacts sur les dimensions du cratère..... | 69 |
| III-2-1- Evolution du rapport du diamètre par la profondeur du cratère en fonction du nombre d'impacts..... | 72 |

| | |
|--|----|
| III-3- Effet de l'énergie d'impact sur la durée de vie..... | 74 |
| III-3-1 Relation entre l'énergie d'impact cumulée et le nombre d'impacts à rupture (N_r)..... | 78 |
| III-3-2 Représentation mathématique de la courbe d'endurance..... | 79 |
| | |
| CONCLUSION GENERALE | 81 |
| | |
| ANNEXE | 84 |
| | |
| <i>Références bibliographiques</i> | 91 |

RESUME

Cette étude s'articule autour de trois chapitres ; le premier concerne l'étude bibliographique, le second résumant la procédure expérimentale utilisée, enfin le troisième faisant la synthèse des différents résultats auxquels ce travail est parvenu.

Le chapitre I regroupe les principaux résultats présentés dans littérature, concernant les essais de fatigue par chocs sur plaques composites

Cette étude bibliographique représente une synthèse assez complète des récents travaux réalisés dans les domaines du comportement mécanique des composites soumis à la fatigue par chocs.

La procédure expérimentale, décrivant la nature des essais effectués, la machine de fatigue par chocs et ses constituants tels que : le système bielle – manivelle, le projectile, le montage d'éprouvettes l'amortisseur de chocs, le variateur de vitesse, le compteur de cycles et les matériaux composites ainsi que les dimensions des éprouvettes utilisées est détaillée dans le chapitre II.

Le Chapitre III regroupe les résultats expérimentaux avec une analyse phénoménologique des différents dommages en fonction du nombre d'impacts, d'une part et de l'énergie d'impact d'autre part.

En conclusion nous démontrons le comportement de fatigue classique, le tracé de la courbe de fatigue ; énergie d'impact en fonction du nombre d'impacts à la rupture (représentant la durée de vie) fait ressortir une courbe similaire aux courbes de Wöhler, obéissant à une loi puissance.

ABSTRACT

This study is dealing with three items. The first one deals with the bibliographic study, the second one summarizes the experimental proceedings used, and the third item presents a synthesis of the different results obtained.

The item I is regrouping the main results presented in the literature, concerning the fatigue tests under impacts of composite plates. This bibliographic study which is more or less comprehensive represents a synthesis of the recent works undertaken in this field.

These works are achieved specially in the scopes of composite mechanical behaviour under fatigue due to impacts.

The experimental proceedings describes the nature of the tests undertaken, the machine of fatigue under impacts and its components as: the crank arm system, the projectile, the tube setting, the shock absorber, the various speeds system, the cycles counter etc ... The composite materials and the tube sizes used are also detailed in item II.

The item III gathers the experimental results with a phenomenology analysis on different damages according to the number of impacts on one hand, and according to energy, on the other hand.

Finally, we demonstrate that the layout of the fatigue curve; the energy of impacts according to the number of impacts causing the fracture (representing the duration of life); brings out a curve identical to the Wöhler curves; submitting to a power law.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'importance économique des matériaux composites est maintenant incontestable. Cet élan est dû essentiellement à l'alliance entre le bon comportement mécanique du matériau et son étonnante légèreté. Les prévisions portent à penser que cette importance va aller croissant dans les années qui viennent. Une grande diversité de fabrication est concernée, depuis les produits composites dits à grande diffusion jusqu'aux composants aérospatiaux à haute performance mécaniques et thermomécaniques.

En pratique, les pièces en matériaux composites ne supportent pas exclusivement des chargements statiques, c'est à dire constants dans le temps, mais peuvent être soumises à des sollicitations périodiques, cycliques, de fréquence constante ou variable ou intermittente, parfois combinées avec du fluage.

Plus sévère que la fatigue statique, la fatigue dynamique doit être prise en compte dans les problèmes de conception de pièces techniques, sachant néanmoins qu'il s'agit d'un phénomène complexe aux multiples facteurs d'influence. Une attention toute particulière doit être portée à la reproduction en laboratoire de toutes les conditions d'utilisation.

Le comportement de ces matériaux aux charges dynamiques cycliques tel que les chocs répétés a été toujours un centre d'intérêt pour les concepteurs et les chercheurs. Des recherches dans ce domaine ont débuté au Japon dans les années 70 dont les objectifs peuvent se résumer à :

- la comparaison des effets de la fatigue classique aux effets de la fatigue par chocs,
- l'évolution des caractéristiques mécaniques à grande vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$,
- l'étude de l'effet d'entaille sous chargement dynamique cyclique.

Cependant, ces matériaux ont un comportement au-delà de l'élasticité, marqué par la présence de phénomènes microscopiques locaux que l'on appelle endommagement. Les mécanismes d'endommagement par chocs restent encore mal compris en raison des divers

processus de rupture qui peuvent apparaître simultanément; poinçonnement de la surface de contact, fissuration interne (non visible), apparition de fissures à la surface (avant ou arrière aux chocs) et formation de cratère sur la surface d'impact.

L'étendue de l'endommagement causé peut entraîner de sérieuses dégradations dans les propriétés mécaniques, notamment la rigidité en flexion. En effet, l'endommagement subi par le matériau favorise une perte de rigidité de ce dernier.

Dans le cadre général de la fatigue par chocs d'un projectile indéformable sur une plaque composite, on peut caractériser les différents niveaux d'endommagement atteint à partir du nombre d'impacts reçu par cette dernière ou de la durée de chargement par chocs.

La contribution du présent travail s'inscrit dans cette phase où le nombre d'impacts va nous renseigner sur les différents paramètres d'endommagement tels que la surface de délaminage, la dimension du cratère et celle de la profondeur d'impact.

Dans le cadre de cette étude, un composite à renfort tissé a été retenu, il s'agit d'un tissu taffetas qui offre un support intéressant à la création d'une méthodologie expérimentale de suivi et d'observation des endommagements.

Le premier chapitre de ce manuscrit est consacré à l'étude bibliographique. Dans cette partie nous avons traité trois thèmes principaux en l'occurrence les différentes méthodes et dispositifs expérimentaux de fatigue par chocs, développement théorique et analyse expérimentale de la fatigue par chocs et enfin la résistance résiduelle des matériaux composites soumis aux chocs répétés.

Le second chapitre concerne la machine de fatigue par chocs, en effet cette dernière a déjà fait l'objet d'une étude, suivie d'une réalisation inachevée par les étudiants de cinquième année ingénieur, présentée comme projet de fin d'étude. Notre objectif est de reprendre certains détails afin de rendre cette machine opérationnelle à savoir :

1. étude critique de l'ensemble des pièces de la machine, revoir si c'est nécessaire les dimensions, les formes et le mécanisme,

2. recensement des pièces et dispositifs manquants et qui sont indispensables à la réalisation des essais de fatigue par chocs tels que: douilles à billes, compteur de cycles, coupe-courant, amortisseur de chocs en fin de course de l'impacteur,
3. réalisation d'un montage spécifique, où sera encastrée l'éprouvette.
4. usinage de l'impacteur à tête hémisphérique, afin d'assurer un contact ponctuel lors des chocs.

Dans ce chapitre, nous abordons l'étude expérimentale. Cette partie est dévissée en trois paragraphes:

- Le premier paragraphe concerne la présentation des propriétés générales des matériaux étudiées.
- La seconde est relative à la description du dispositif expérimental avec caractérisation et mise au point de la machine de fatigue par chocs.
- Le troisième paragraphe traite la procédure expérimentale utilisée pour la réalisation de nos essais sur les différentes plaques composites.

Le troisième chapitre consiste à regrouper les résultats expérimentaux relatifs à l'effet de l'énergie d'impact sur la durée de vie en fatigue par chocs. L'évolution de la surface délaminée ainsi que de la dimension du cratère en fonction de l'énergie d'impact est également étudiée. Enfin nous terminerons par les conclusions de ce modeste travail.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1 Introduction

La compréhension des phénomènes liés à l'endommagement des matériaux composites soumis à la fatigue par chocs et les mécanismes de rupture résultants est essentielle pour le développement et la conception des structures en matériaux composites soumises pendant leurs durées de vie à des charges par impacts répétés.

L'étude de ces phénomènes est d'une complexité bien plus grande que l'analyse des propriétés d'élasticité ou de viscoélasticité. En effet lors d'un chargement répété d'impacts, des micro-fissures apparaissent dans la matrice, des fibres se rompent, des décohésions se créent aux interfaces, ce qui rend difficile la prédiction du comportement des structures endommagées. Les processus de rupture des composites sont donc d'une grande diversité et ne peuvent être décrits que si l'on connaît :

- le critère de résistance de chaque phase,
- l'état des contraintes et des déformations dans le matériau,
- les phénomènes de propagation de fissures dans la microstructure,
- la nature de l'interface entre la matrice et le renfort.

Ces renseignements ne sont connus que partiellement et l'obtention par l'analyse d'une contrainte limite au-delà de laquelle il y a ruine du matériau est quasi impossible.

Dans le contexte industriel moderne de conception de pièces, les essais mécaniques à l'état solide revêtent une importance accrue dans la mesure où ils définissent la pertinence des données sur lesquelles les industriels s'appuient.

Ces essais justifient l'ensemble des moyens expérimentaux destinés à mesurer certaines propriétés dans des conditions de sollicitations mécaniques bien définies. Ils ont pour objectifs la détermination :

- des lois de comportement mécanique complètes du matériau,
- des caractéristiques mécaniques élémentaires, points singuliers des lois de comportement (modules, allongement et contraintes aux seuils critiques tels que la non-linéarité, l'écoulement, la rupture).

L'endommagement résultant des essais de fatigue par chocs sur des matériaux composites a été peu étudié dans la littérature. La raison essentielle est peut-être le peu de machines pouvant produire des chocs cycliques.

Dans le présent chapitre nous allons présenter les principaux travaux effectués dans le domaine de la fatigue par chocs des matériaux composites.

I-2 Principe des essais de fatigue par chocs

I-2-1 Principe général des essais

Des développements récents ont montrés que la fatigue par chocs quantifie la réponse d'un matériau à une charge de chocs répétés puisque la fatigue par chocs consiste en une production de chocs répétés jusqu'à ce qu'une rupture survienne.

Tous les essais de choc effectués dans l'industrie et les laboratoires correspondent à l'application d'une énergie d'impact (pendule ou chute de poids) sur un matériau et à la mesure, dans le meilleur des cas, de son affaiblissement avant et après rupture. Deux matériaux l'un fragile, l'autre ductile, peuvent avoir la même énergie de rupture ; cela dépend de la loi de comportement et le mode de sollicitation qui est trop complexe pour maîtriser l'influence de paramètres tels que :

- la vitesse de sollicitation donc de déformation,
- la géométrie de la pièce ou de l'éprouvette,
- les défauts de surface (entailles) ou de volume (porosités),
- la température et l'hygrométrie,
- les conditions de fixation (appuis simples, encastremets...),
- le type de sollicitation axiale ou biaxiale (traction, flexion...).

Les essais de fatigue par chocs permettent d'étudier les effets du nombre d'impacts ainsi que l'énergie d'impact cumulée sur l'endommagement des matériaux composites. La détermination de la zone endommagée par les impacts, notamment les dommages internes tel que le délaminage, fait l'objet de recherche accrue.

I-2-2 Méthodes et dispositifs expérimentaux

Pour sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre, le dispositif d'essais de chocs répétés le plus utilisé est le système de poids tombant ou chute de poids. D'autres dispositifs complexes et plus onéreux sont également utilisés tel que; le canon à air comprimé, le système de barres d'Hopkinson.

I-2-2-1 Essais de chocs répétés par chute de poids

Le principe de cette essai est de laisser tomber une masse d'une hauteur donnée perpendiculairement à une plaque et à caractériser le type de défaillance ou de comportement obtenu pour une énergie d'impact donnée (Fig. I-1). Le choc par chute de masse ou de projectile est pratiqué en version non instrumentée ou instrumentée.

Ce type de dispositif à été utilisé par plusieurs auteurs, tels que .Wyrick et Adams [1], Jang et al. [2] ainsi que Lhymn [3] (Fig. I-1).

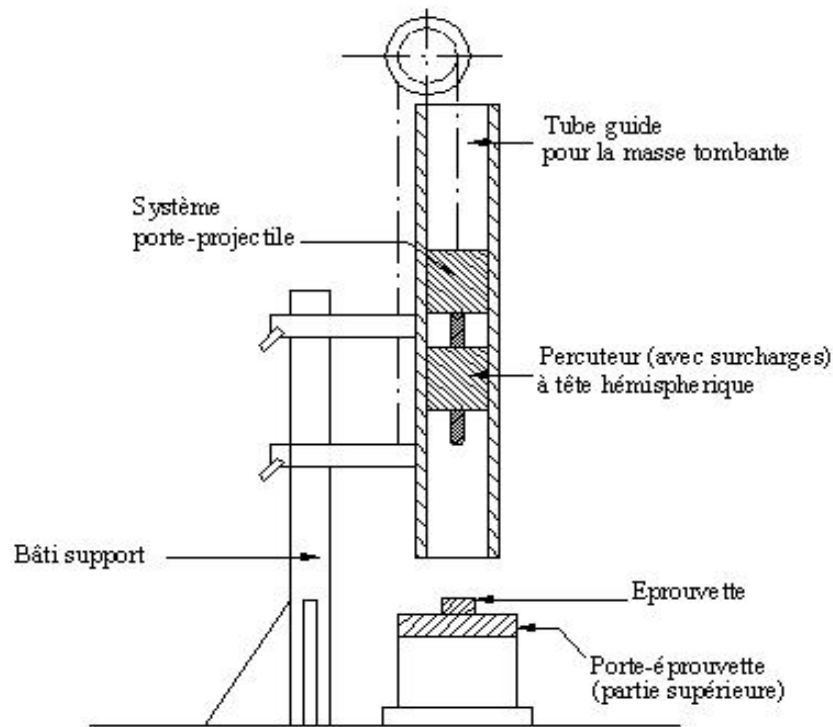


Fig. I-1-Dispositif d'essai de chocs répétés par chute de poids [16].

a) Choc non instrumenté :

Il est largement pratiqué à cause de la simplicité des éléments qui composent ce dispositif, ainsi que la facilité du principe de fonctionnement. On parle de choc non instrumenté lorsque le comportement à l'impact des matériaux n'est caractérisé qu'en terme d'énergie de défaillance, cette dernière pouvant être de type craquelure, rupture, pénétration, éclatement ou indentation. L'énergie d'impact peut être modulée soit à hauteur de chute variable et masse constante, soit à masse variable et hauteur de chute constante.

b) Choc instrumenté

Il a été quant à lui développé plus récemment. Dans ce cas la caractérisation du comportement à l'impact repose sur les relations force-déformation ou force-temps à vitesse nominale d'impact constante au cours du choc. Il est ainsi possible de caractériser le mode d'endommagement du matériau de manière plus fine qu'une simple énergie de rupture, la finalité étant de proposer une interprétation des mécanismes qui produisent en chaque point des lois de comportement.

C'est ainsi que la majeure partie des recherches effectuées jusqu'à présent sur la fatigue par chocs a vu l'utilisation de ce type de dispositif (Fig. I-2). Les conditions générales d'essai (éprouvettes, projectile) restent toujours liées au choix des chercheurs et au but recherché par ces derniers.

L'enregistrement des lois de comportement nécessite en outre la mise en place de jauges de déformation ou d'un capteur de force piézo-électrique au voisinage de la pointe du projectile et la mesure directe (via un transducteur électronique) ou le calcul de la flèche à partir des courbes force temps. Ce type de dispositif a été utilisé par Jang et Kowbel [2] et aussi par Wyrick et Adams [1] pour leur recherche sur la fatigue par chocs des matériaux composites.

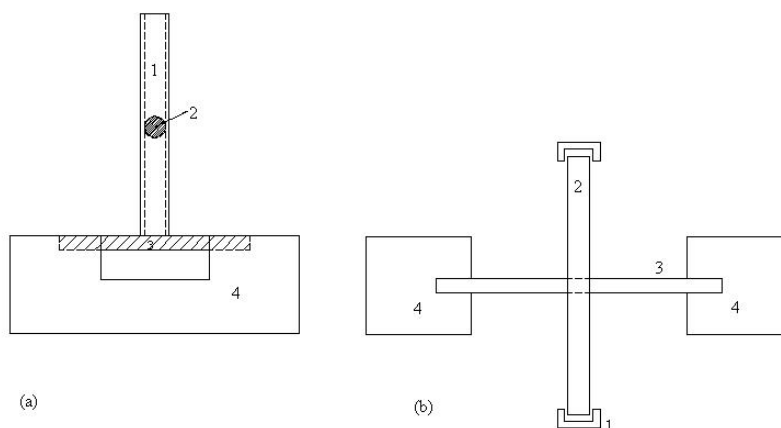


Fig. I-2 : Représentation simplifiée d'un dispositif de choc par chute de poids développé par Lhymn [3].

1-canal guide

2-masse de choc

3- éprouvette

4-support de l'éprouvette

I-2-2-2 - Dispositif à came pour la production de chocs cycliques

Le schéma de principe du dispositif est illustré sur la (Fig. I-3). Le système proposé par Mittelman [4] est basé sur l'emploi de la propriété de l'énergie stocké par un ressort sollicité en traction.

Le bras de culbuteur (1) comportant à l'extrémité l'impacteur (5) pivote autour d'un axe (2). Le pivotement de ce dernier est commandé par une came (3) et un ressort hélicoïdal(4). La came étant animée d'un mouvement de rotation, un tour complet de cette dernière permet au culbuteur d'exercer un impact grâce à la force de rappel du ressort.

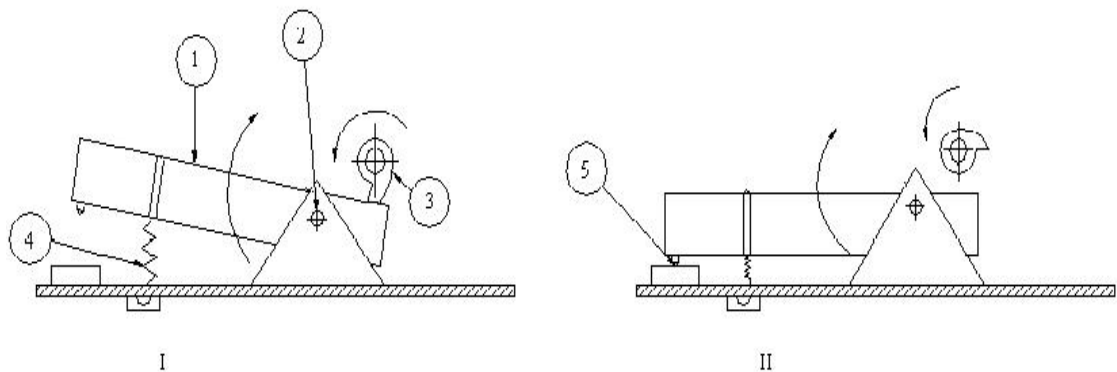


Fig. I-3-Dispositif a came pour production des chocs cycliques développé par A. Millelman [4].

I-2-2-3 Production de chocs répétés par le mécanisme bielle manivelle

Un mécanisme de transformation du mouvement de rotation continu en mouvement de translation alternatif par le système bielle-manivelle pour la production des chocs cycliques a été proposé par Azouaoui et al. [5] (Fig. I-4).

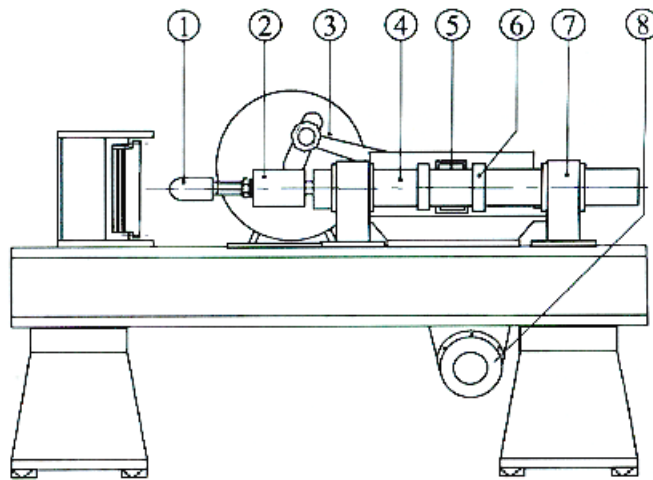


Fig. I-4- Mécanisme bielle-manivelle pour la production des chocs répétés développé par Azouaoui et al. [5].

Le mouvement de rotation du moteur (8) est transmis à la bielle (3) par l'intermédiaire du disque manivelle (à rayon réglable), la fourchette (5) en liaison avec la bielle entraîne le poinçon (4) en translation grâce à la butée (6). Le même cycle se produit à chaque tour complet de la bielle.

I-2-2-4 Canon à air comprimé

Ce dispositif est également utilisé pour produire des chocs répétés en propulsant à grandes vitesses (20 à 500 m/s) des projectiles à têtes sphériques (Fig. I- 5).

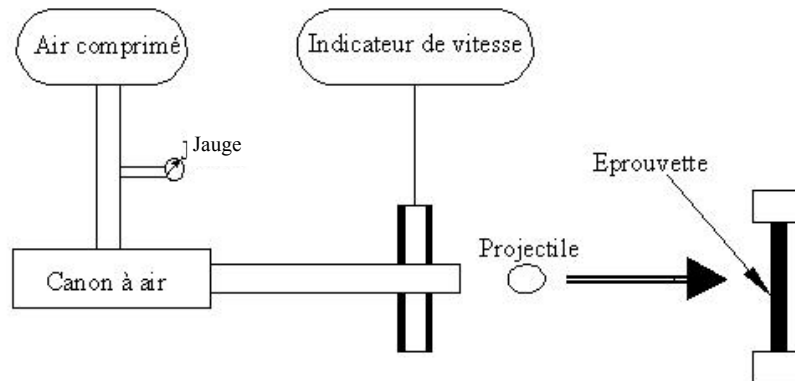


Fig. I-5 : Canon à air comprimé [16].

I-2-2-5 Dispositif des barres d’Hopkinson

Ce dernier système est constitué d’un canon à air comprimé propulsant un impacteur sur une barre incidente. L’onde de choc générée a une amplitude fonction de la vitesse et une durée fonction de la longueur de l’impacteur. Elle se propage dans la barre incidente à la vitesse du son jusqu’à l’éprouvette et se décompose en deux signaux l’un transmis et l’autre réfléchi dans une proportion qui dépend de la différence des impédances acoustiques de la barre et de l’éprouvette. De la même manière à l’autre extrémité de l’éprouvette, une partie du signal est transmise à la barre de sortie et l’autre est réfléchi. Des jauges de déformation collées sur les barres permettent de mesurer les différents signaux (incident, réfléchi et transmis) dont l’analyse permet de déterminer la loi de comportement du matériau essayé.

Pour leur étude sur le comportement des matériaux composites à matrice métallique du type Sic_w/7475Al travaillant à des contraintes très élevées et soumis en même temps à de faibles cycles d’impacts, Yang et al. [6] ont utilisé ce dispositif combiné à un mécanisme de barre de traction assurant des chocs en traction (Fig. I-6).

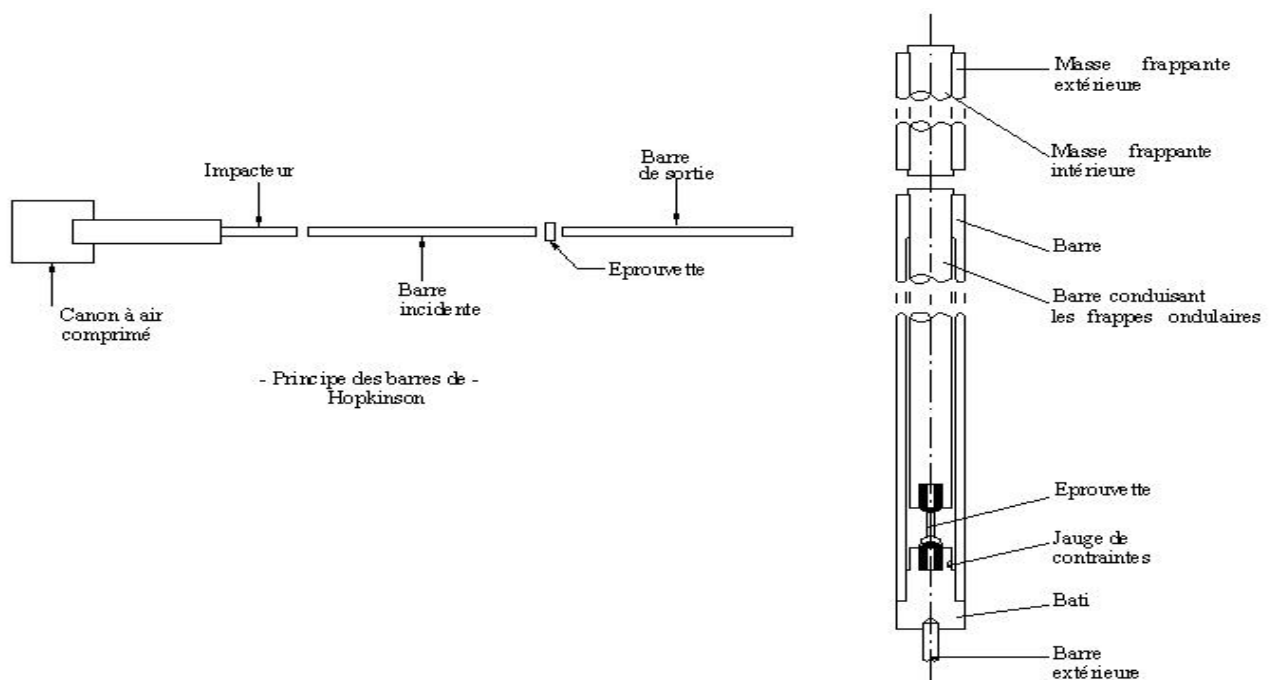


Fig. I-6 Combinaison des barres d'Hopkinson avec un système de barre de traction développé par Yang et al. [6].

I-2-3- Dimensions des éprouvettes et géométrie des impacteurs

Généralement le type d'éprouvettes utilisées pour les essais de fatigue par chocs c'est les plaques rectangulaires, carrés ou circulaires, des poutres sont aussi choisies quelquefois, sachant que le choix du type d'éprouvettes reste toujours lié au besoin technologique et au but recherché par les différents chercheurs.

Le constat général sur les différentes études effectuées à ce jour sur la fatigue par chocs c'est qu'aucune configuration standard d'éprouvettes n'a été adopté.

C'est ainsi que B. P. Jang et al. [2], pour leur étude sur le comportement et la résistance à la fatigue par chocs des matériaux composites, ont utilisé une large gamme d'éprouvettes en

composites constituées de 30 plis à base de fibres de carbone, de verre et de kevlar-49 imprégnées de résine époxy.

Les éprouvettes sont des poutres de différentes épaisseurs (selon le type de fibre); 7.5mm pour les fibres de carbone, 6.4mm pour le kevlar et 9.4mm pour les fibres de verre. Les auteurs ont choisi des poutres de 51mm de long et 13mm de large.

Le dispositif de choc utilisé est une machine de poids tombant sur laquelle est monté un impacteur à tête hémisphérique de 12.7mm de diamètre.

Diverses énergies d'impact ont été essayées en gardant une vitesse d'impact constante (hauteur de chute constante) ou pour différentes vitesses.

Quant à Wyrick et Adams [1], ils ont mesuré la résistance résiduelle d'un matériau composite soumis à des chocs multiples. Les éprouvettes sélectionnées sont des plaques stratifiées de 16 plis quasi-isotropes de configuration $[45/0/-45/90]_{2S}$ en carbone/époxy. Les dimensions des plaques sont de 150mm x 150mm pour une épaisseur de 2mm, encastrées sur les quatre bords laissant une surface utile de 125mm x 125mm.

Un dispositif à poids tombant est utilisé, avec un impacteur à tête hémisphérique de 14,7mm de diamètre. Trois énergies d'impact ont été prises en compte par les auteurs; 3, 10 et 30J. Les essais de chocs ont été menés jusqu'à perforation pour les deux dernières énergies, quant à l'énergie de 3J, les auteurs se sont arrêtés à 100 impacts, sans aller au terme de la perforation. Comme pour Wyrick et Adams [1], la machine de chocs utilisée par Lhymn [3] est un dispositif à poids tombant. L'impacteur est par contre un cylindre de 22,68g de tel sorte que le contact impacteur-éprouvettes soit linéaire.

Les essais de fatigue par chocs ont été réalisés dans la gamme d'énergie [10-20] J pour un grand nombre d'impacts, atteignant un nombre d'impacts à rupture supérieur à 10^3 .

Lhymn [3] a essayé de montrer dans le cadre de la fatigue par chocs des matériaux composites, l'importance de l'orientation des fibres sur la durée de vie, ce qui justifie le choix des deux types d'éprouvettes utilisées par l'auteur, des éprouvettes de types T et L.

Pour le type T, la direction des fibres dans les deux couches supérieures et inférieures est normale à la direction verticale de chute et parallèle à l'axe de l'éprouvette. Dans l'éprouvette du type L, la direction des fibres dans les deux plis supérieurs et inférieurs est également normale à la direction verticale et normale aussi à l'axe de la poutre (Fig. I-7).

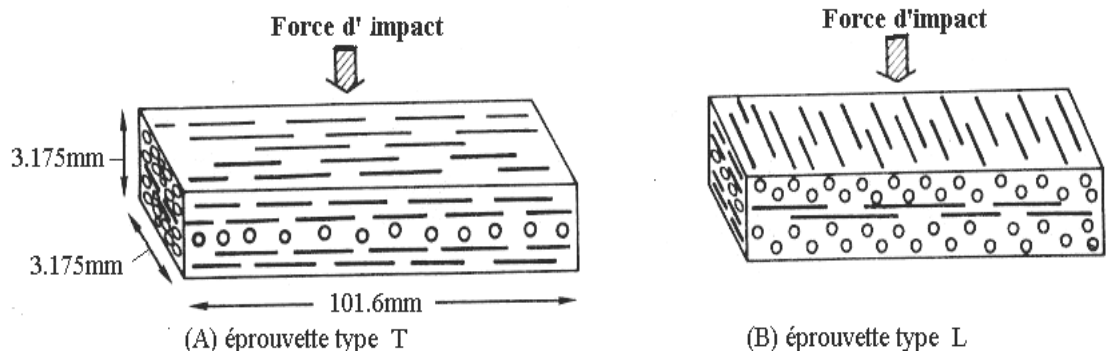


Fig. I-7 : Configuration des éprouvettes de Lhymn [3].

L'étude élaborée par Mittelman [4] sur la résistance résiduelle en flexion des matériaux composites soumis à la fatigue par chocs s'est intéressée à des éprouvettes sous forme de poutres découpées à partir d'une plaque stratifiée de 2,2mm d'épaisseur à 60 % de fibres en volume comprenant 16 plis pour une configuration $[0 / \pm 45/0]_{2s}$ ainsi, les dimensions de l'éprouvette et l'emplacement du point d'impact sont illustrés sur la figure (I-7).

Le bras de culbuteur du dispositif à came utilisé par Mittelman [4] est muni d'impacteur hémisphérique servant à impacter répétitivement les éprouvettes sus-mentionnées sous des énergies de 2, 3, 4 et 5J avec un nombre d'impacts allant de 5 à 405.

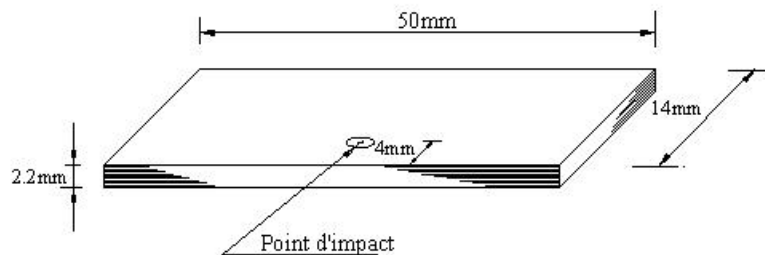


Fig. I-8- Dimensions de l'éprouvette de mittelman [4].

Quant à l'étude réalisée par Azouaoui et al. [5] sur la modélisation de l'endommagement et la rupture des plaques en verre/epoxy soumises à la fatigue par chocs, les auteurs ont utilisé des plaques stratifiées constituées de 8 nappes préimprégnées sous forme de tissu taffetas imprégnés de résine époxy. Le type de fibre est un verre-E, avec un taux de fibres en volume de 62%. Les dimensions des éprouvettes sont d'une longueur de 280mm, d'une largeur de 180mm et d'une épaisseur de 5,4mm obtenue par huit couches de tissu. Le projectile du dispositif utilisé par Azouaoui et al. [5] est muni d'un impacteur à tête hémisphérique de 35mm de diamètre servant à impacter les éprouvettes encastrées sur deux bords.

Des composites à matrice métallique du type Sic_w/7475Al ont été utilisés par Yang et al. [6] comme éprouvettes, dans le but d'étudier le comportement de ce matériau lorsqu'il est soumis à de faibles cycles d'impacts sous contraintes de traction très élevée (Fig. I-9).

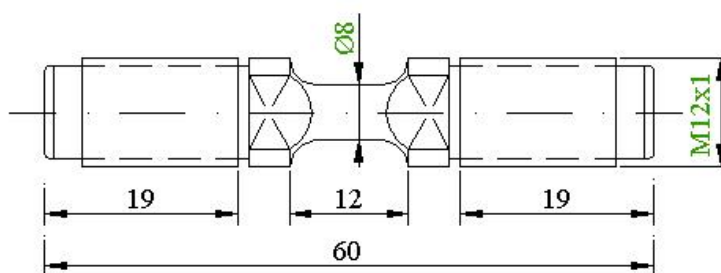


Fig. I-9- Epreuve composite à matrice métallique SICw/7475Al [6].

Les impacteurs sont souvent choisis à partir de formes géométriques simples (Fig. I-10), permettant une meilleure compréhension du phénomène de dissipation de l'énergie d'impact et son mode de propagation dans le matériau, chose qui revêt un grand intérêt pour tout travail de recherche.

Les essais de fatigue par chocs menés jusqu'à présent par plusieurs chercheurs sont résumés dans le tableau (I-1). Il est évident qu'aucune configuration standard d'essai de chocs par chute de masse ou autre n'existe actuellement. Les diverses formes et dimensions

d'éprouvettes ajoutées aux différents types d'appuis ainsi que les multiples géométries d'impacteurs utilisés dans le domaine de la fatigue par chocs, indiquent une absence totale et injustifiée d'une normalisation de ce type d'essai, bien que des tentatives aient été déjà faites dans ce sens.

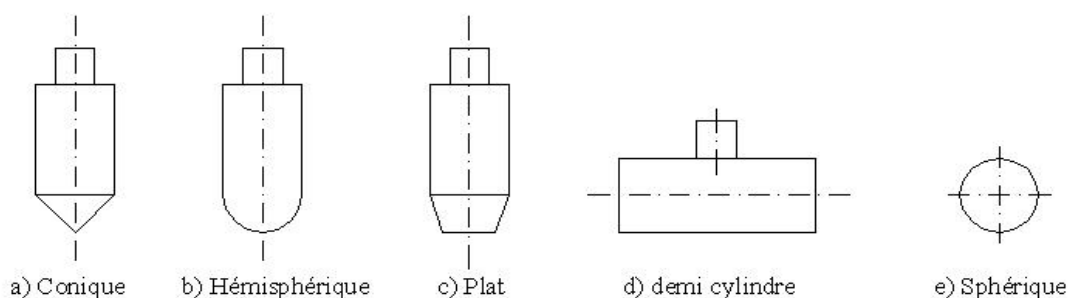


Fig. I-10- Formes géométriques des différents impacteurs utilisés dans les essais de fatigue par chocs

Tableau I-1- Résumé de la littérature concernant les essais de chocs et les essais de fatigue par chocs

| | Dimensions des éprouvettes d'essais [mm] | Distance entre appuis Et type d'appui | Diamètre et forme de l'impacteur | Références |
|-----------------|---|--|--|------------------------|
| Essais de chocs | 300 x 1000 | Surface utile de diamètre 100mm Anneau d'encastrement | Tête hémisphérique ϕ 12.7mm | Cantwell et al. [7] |
| | 300 x 840 | Surface utile 200 x 800mm encastré | Tête hémisphérique ϕ 15 et ϕ 30mm | Levin [8] |

| | | | | |
|-----------------------------|---|--|--------------------------------------|--|
| | 80 x 220 | Fixée seulement du côté de 80mm | Tête hémisphérique ϕ 20 mm | Caprino et al. [9] |
| | 152 x 152 | Surface utile 127 x 127mm appui simple | Tête hémisphérique ϕ 12.7mm | Wardel et Tokarsky [10], Winkel et Adams [11] |
| | 150 x 150 | Surface utile 140 x 140mm encastrée | 9.7mm méplat | Chaturvedi et Sierakowski [12] |
| | Diamètre 50 | Diamètre 50mm Encastrée | Sphère ϕ 25.4mm | Lal [13] |
| Essais de fatigue par chocs | 51x12.7x7.5 (carbone) 51x12.7x6.4 (Kevlar) 51x13.7x9.4 (verre) | Distance entre Appuis 50.8 mm | Tête hémisphérique ϕ 12.7mm | Chang et Kowbel [2] |
| | 150 x 150 | Surface utile 125 x 125mm Encastrée | Tête hémisphérique ϕ 12.7mm | Wyrick et Adams [1] |
| | 50 x 14 x 2.2 | Encastrée | Tête hémisphérique ϕ 12.7 mm | Mittelman [4] |
| | 101.6 x 3.175 x 3.175 | Appuis simples | Cylindrique | Lhymn [3] |
| | 280 x 180 x 5.4 | Encasrée sur deux bords | Tête hémisphérique ϕ 35 mm | Azouaoui et al. [5] |

I-3 Développement théorique et analyse expérimentale de la fatigue par chocs

L'utilisation croissante des composites à matrice époxy et fibres de verre pour les applications industrielles comme éléments de structure augmente le besoin de développer et d'améliorer les méthodes expérimentales et analytiques dans le but de caractériser et prédire le comportement mécanique de ces matériaux, notamment aux chocs.

La résistance et la rigidité sont souvent les deux premières propriétés à examiner lorsqu'il y a lieu de sélectionner un matériau de structure. En effet, le choix des matériaux est une étape importante, qui doit être soigneusement argumenté sur le plan technique et économique.

Des efforts considérables ont été consentis pour comprendre la réponse des composites au choc, cependant la fatigue par chocs sur les matériaux composites nécessite une plus grande différenciation, puisque l'effet des chocs répétés sur l'endommagement des structures composites est d'une complexité encore plus accrue. Cette raison, parmi tant d'autres, comme le peu de machine produisant des chocs cycliques, fait que ce domaine a été peu investi par les chercheurs.

Les résistances résiduelles à la compression et à la traction de composites en carbone/époxy soumis aux chocs répétés ont été mesurées par Wyrick et Adams [1]. Les auteurs ont montré que le niveau d'énergie d'impact et le nombre d'impacts sont les facteurs principaux qui influencent la dégradation de la résistance résiduelle. Rotem [14] a montré que lorsqu'un choc de faible énergie est appliqué sur un stratifié, des dommages invisibles pourraient se produire en raison des contraintes élevées engendrées par le choc. Une zone de dommage se propage et cause une certaine réduction de la résistance et de la rigidité. La variation de la rigidité de plastiques renforcés par des fibres de verre, soumis à la fatigue par choc, a fait l'objet des travaux de Tamus et al. [15]. Une analyse théorique de la durée de vie en fatigue par chocs de composites PPS à fibres courtes a été effectuée par Lhymn [3]. Dans un autre article le même auteur discute les résultats d'une étude micro-fractographique.

La possibilité d'application des essais de fatigue par chocs pour l'évaluation de la tolérance à l'endommagement des structures composites n'a pas été discutée dans les différentes études des auteurs sus-mentionnés, Jang et al. [2] se sont intéressés à cette caractéristique post-impacts, par l'identification de certains paramètres comme indices de la tolérance à l'endommagement des composites.

C'est ainsi que ces auteurs ont déterminé les valeurs critiques de l'énergie d'impact qui favorise l'apparition de dommages significatifs, et ce pour différentes configurations de composites. Les effets des chocs répétés sur l'évolution des dommages apparents à la surface et internes ont été également discutés.

Dans le présent paragraphe, nous allons présenter les résultats obtenus par différents auteurs en vue de mieux appréhender les processus d'endommagement des matériaux composites soumis aux chocs répétés.

I-3-1 Effet du nombre d'impacts sur la charge maximale et sur la tolérance à l'endommagement

Pour caractériser la tolérance à l'endommagement de divers systèmes de composites Jang et al. [2] ont réalisé des essais de chocs répétés sous différentes énergies incidentes d'impact. Les auteurs se sont intéressés de prime abord, à la détermination théorique puis expérimentale de l'énergie d'impact critique, au delà de laquelle le composite subit un endommagement significatif sous forme de fissures de délaminage en réponse à un choc unique.

Le délaminage se traduit par une décohésion plane interfaciale qui produit un dédoublement du composite, dans son épaisseur. Ce type de dommage plan qui se propage selon un front, sous des sollicitations de traction et de cisaillement, altère considérablement les propriétés mécaniques du composite endommagé.

Par la suite, Jang et al. [2] ont étudié l'effet du nombre d'impacts sur les variations de la charge maximale d'impact. La figure I-10 montre deux comportements distincts des composites testés pour une énergie d'impact inférieure à l'énergie critique. En effet, la charge maximale normalisée reste constante ou diminue légèrement tant que le nombre d'impacts critique N_c n'est pas atteint (Fig. I-10 (a,b)). Au delà de cette valeur critique (N_c), une décroissance franche de la charge est signalée. La première partie des courbes de charge caractérisant le comportement sus-indiqué, disparaît pour les énergies d'impact supérieures à l'énergie critique (Fig. I-10 (c)).

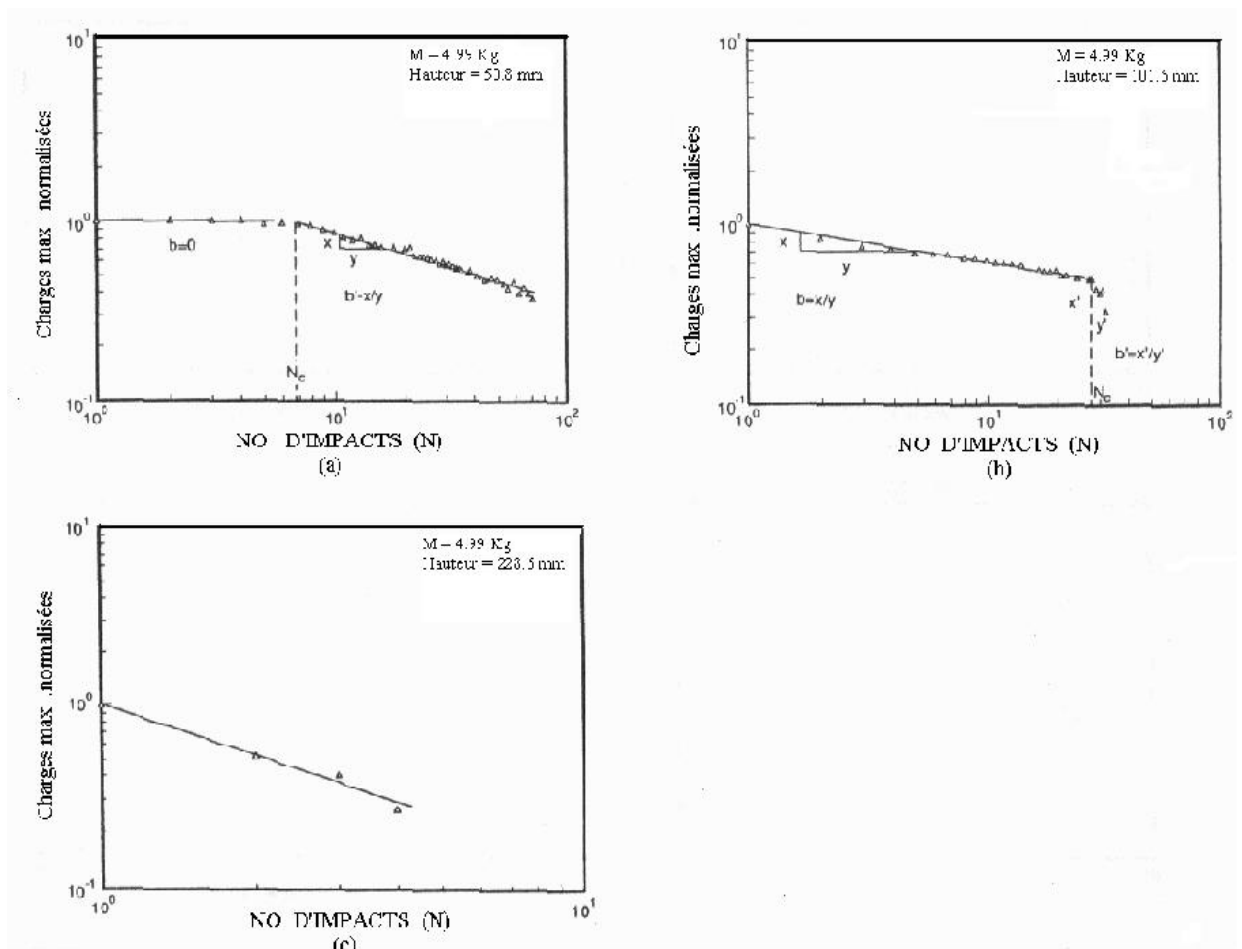


Fig. I-11- Evolution de la charge maximale : $\text{Log}(P_m^N / P_m^0)$ en fonction du nombre d'impacts du composite carbone/époxy.

(a) $E_{(in)} = 2.48$ J

(b) $E_{(in)} = 4.97$ J

(c) $E_{(in)} = 11.81$ J

Le tracé des courbes dans la figure (I-10) a été exécuté selon une échelle bi-logarithmique.

La partie linéaire des courbes de charge $\text{Log} (P_m^N / P_m^0)$ montre une pente « b » qui peut être utilisée comme indicateur de la tolérance à l'endommagement. En effet, une petite valeur de la pente « b » signifie que le composite est plus résistant à l'endommagement par fatigue par chocs.

Les auteurs proposent les équations analytiques suivantes pour décrire la réponse des composites testés:

$$\frac{P_m^N}{P_m^0} = \begin{cases} (N - N_c)^{-b} & \text{si } E_{in} < E_c \\ N^{-b} & \text{si } E_{in} \geq E_c \end{cases} \quad (1)$$

avec : P_m^N Charge maximale au $N^{\text{ième}}$ choc.

Pour de faibles énergies incidentes d'impact ($E_{in} < E_c$), le nombre de cycles peut atteindre un niveau critique de l'état d'endommagement du composite, noté N_c . Ce paramètre peut également être considéré comme un indicateur de la tolérance à l'endommagement.

Lorsque les chocs répétés se poursuivent après le déclenchement du délaminage, la taille et le nombre des fissures augmentent, ceci engendre une baisse continue de la résistance et de la rigidité des composites.

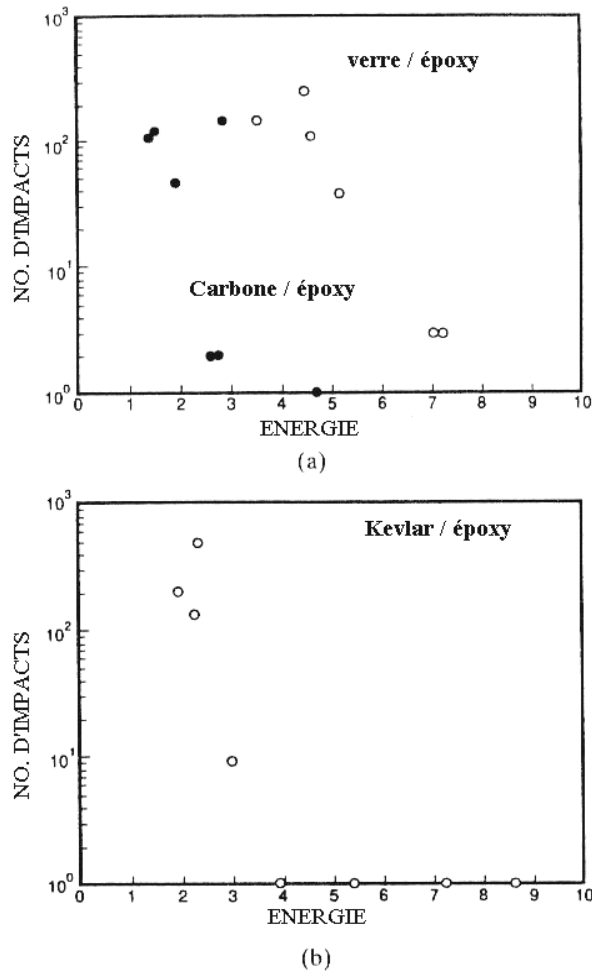


Fig. I-12- Evolution du nombre d'impacts nécessaires au déclenchement du délaminage en fonction de l'énergie incidente.

a) Composite en verre/époxy et carbone/époxy

b) Composite Kevlar/époxy

D'après les figures I-11 et I-12 et les valeurs de E_C , b et N_c , nous pouvons conclure que les composites à fibres de verre possèdent une plus grande tolérance à l'endommagement, suivis du kevlar et ensuite se classent les composites à fibres de carbone. La grande rigidité des fibres de carbone fait que les composites constitués par ces fibres délaminent plus facilement pour de faibles énergies d'impact.

I-3-2 Analyse théorique de la formulation de l'équation de la durée de vie en fatigue par chocs

Une analyse théorique de la durée de vie d'un matériau composite en PPS (polyphénylène de sulfure, résine thermoplastique) renforcé par des fibres de verre E soumis à la fatigue par chocs a été développée par Lhymn [3]. Cette analyse est basée sur une approche énergétique et des données expérimentales.

L'utilisation des concepts de la mécanique de la rupture a permis à l'auteur de réaliser une étude théorique sur le comportement du matériau soumis à la fatigue par chocs, en tenant compte de l'orientation des fibres. Cette analyse a été suivie par des essais expérimentaux de fatigue par chocs par poids tombant, et a pu ainsi établir l'équation de la durée de vie sur des éprouvettes de type T et L (Fig. I-7).

Lors d'un choc, l'énergie d'impact (E) n'est pas consommée entièrement pour endommager le matériau. En effet, une partie de cette énergie est dissipée sous diverses formes. La nature exacte de dissipation de l'énergie absorbée en endommagement par le matériau se trouve être nettement inférieure à l'énergie incidente. L'auteur choisit de la noter par : E^h , h étant une constante du matériau. pour un nombre d'impacts N, correspondant à la rupture du matériau, l'énergie de rupture est alors : $N E^h$, on écrit alors :

$$N \cdot E^h = E_i^* \quad (2)$$

L'énergie de rupture E^* est considérée constante par Lhymn [3], il vient alors :

$$C \cdot E^h \cdot N = 1 \quad (3)$$

Où C et h sont des constantes du matériau et N est le nombre d'impacts à rupture.

Une analyse statistique basée sur l'équation de la durée de vie et la fonction de distribution de Weibull à deux paramètres est effectuée pour le cas d'une rupture par chocs, où la résistance à la fatigue est remplacée par l'énergie d'impact.

Où $R(N_F)$ indique la fiabilité de N_F (probabilité de survie) :

$$R(N_F) = e^{-\left[\left(\frac{N_F}{N_0}\right)^{a_f}\right]} \quad (4)$$

Exemple : $R=0.1$ indique que la probabilité de rupture est de 10%.

$R=0.8$ indique que la probabilité de rupture est de 80%.

N_0 est un paramètre de localisation, caractérisant la rupture, et α_f est un paramètre de forme.

A partir des équations (3) et (4), on écrit :

$$E = A \left\{ [-\ln R(N_F)]^{1/\sigma_f h} \right\} N^{-1/h} \quad (5)$$

Les résultats expérimentaux des essais de fatigue par chocs sur les éprouvettes T et L sont respectivement représentés sur les figures I-12 et I-13. D'une manière générale, ces résultats sont dispersés mais les observations suivantes sont à relever :

- 1- On remarque qu'il y a une énergie d'impact au-dessous de laquelle aucune rupture de fatigue par chocs n'est observée.
- 2- Lorsque l'énergie d'impact est supérieure à la valeur limite, la durée de vie en fatigue par chocs de l'éprouvette T est plus longue que celle de l'éprouvette L.
- 3- Il y a une grande dispersion des résultats relatifs aux deux éprouvettes T et L.

La détermination complète des paramètres α_f , h et A , à partir des résultats expérimentaux permet d'écrire les équations de la fatigue par chocs pour les deux éprouvettes de l'étude :

- Pour l'éprouvette T :

$$(E)_T = 25.6 \left\{ [-\ln R]^{1/(0.632 \times 6.3)} \right\} N_F^{-1/6.3} \quad (6)$$

- Pour l'éprouvette L :

$$(E)_L = 18.04 \left\{ [-\ln R]^{1/(0.59 \times 6.4)} \right\} N_F^{-1/6.4} \quad (7)$$

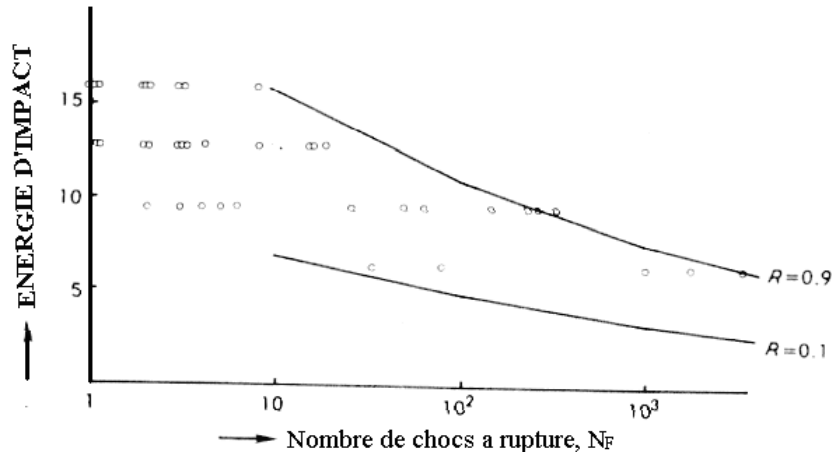


Fig. I-13- Fatigue par chocs des éprouvettes de type L [3].

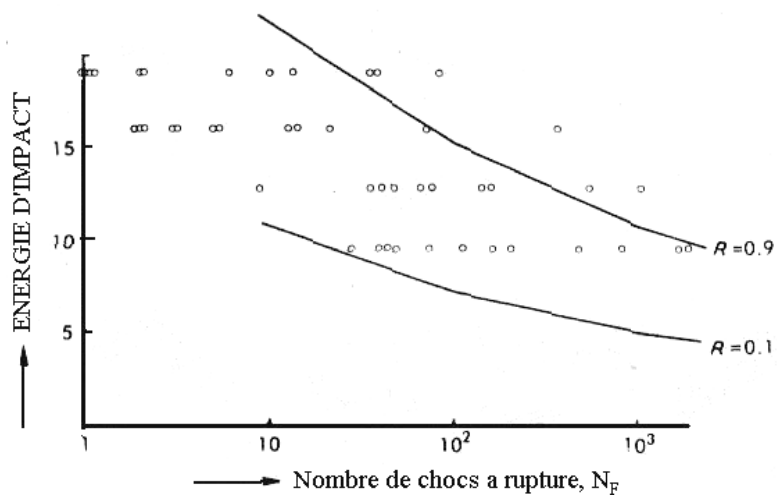


Fig. I-14- Fatigue par chocs des éprouvettes de type T [3].

Cette étude sur la rupture de composites à fibres courtes soumis à la fatigue par chocs fait apparaître les points suivants :

- 1- la durée de vie en fatigue par chocs est fonction de l'orientation des fibres,
- 2- il faut une valeur minimale de l'énergie d'impact pour qu'il y ait rupture (pour qu'une rupture se produise),
- 3- l'équation de la durée de vie en fatigue par chocs est déduite puis analysée au moyen de la fonction de Weibull afin de prédire la durée de vie des structures composites à fibres courtes. Cette équation peut être utilisée pour la conception des pièces composites et le calcul d'engineering.

I-4 Résistance résiduelle des matériaux composites soumis aux chocs répétés

L'étude des effets des impacts répétés sur la résistance résiduelle des structures en matériaux composites est d'une grande importance. L'effet nuisible du choc sur certains matériaux composites tels que les polymères renforcés par des fibres de verre ou de carbone, a conduit les chercheurs à entreprendre des études permettant de mesurer la résistance résiduelle de ce type de matériau soumis à des chocs répétés à plusieurs niveaux d'énergie. En effet, les dommages résultants peuvent sérieusement altérer la performance mécanique du composite.

I-4-1 Résistance résiduelle à la traction

Une étude expérimentale de chocs répétés sur plaques composites en carbone/Epoxy, de 2mm d'épaisseur et 150x150 mm² de surface a été réalisée par Wyrick et Adams [1]. Trois niveaux d'énergie ont été sélectionnés 3J, 10J et 30J afin d'analyser leur effet sur la rupture des composites (tableau I-2).

Tableau I-2 : Gamme d'énergies choisies pour les essais de chocs répétés et le nombre de chocs correspondant :

| Nombre de chocs | Energie d'impact | | |
|-----------------|------------------|------|-----|
| 1 | 3J | 10J | 30J |
| 10 | 3J | 10J* | |
| 100 | 3J | | |

* Effectuer l'essai jusqu'à 10 impacts s'il n'y a pas de perforation .

Chaque plaque, une fois soumise aux chocs, est découpée en cinq éprouvettes de traction, de 25mm de largeur et 150mm de longueur destinées à mesurer les résistances résiduelles en traction.

La localisation de chaque éprouvette au niveau des plaques est spécifiée dans la Fig. I-15.

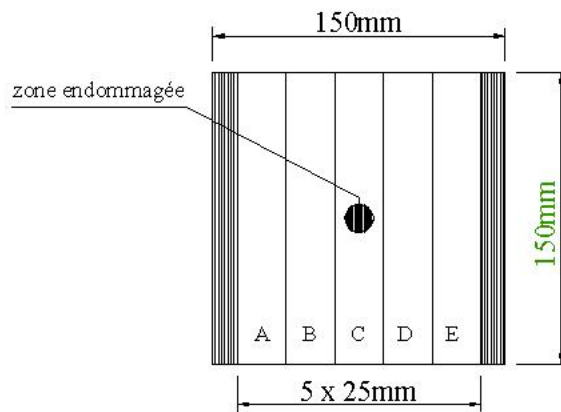


Fig. I-15- Mode de découpe des éprouvettes de traction après les essais de chocs répétés.[1].

- les éprouvettes notées C contiennent le point d'impact,
- les éprouvettes B et D sont placées de chaque côté de l'éprouvette C,
- les éprouvettes A et E sont prélevées sur les deux bords d'une plaque.

Cette localisation des éprouvettes permettra l'estimation du gradient d'endommagement à travers le panneau composite et à indiquer si la réduction de la résistance résiduelle en traction est symétrique autour du point d'impact.

La résistance résiduelle à la traction du composite chute considérablement, mais seulement dans le cas des éprouvettes C contenant la zone endommagée par les impacts. Un petit nombre d'impacts (10) sous une faible énergie d'impact (3J) n'influence aucunement la résistance résiduelle.

Pour les énergies d'impact et le nombre de chocs sélectionnés, la région de la plaque ayant subi une détérioration importante de la résistance résiduelle est située dans les environs immédiats autour du point d'impact.

Les résultats du tableau 3 montrent qu'en dessous d'une certaine énergie d'impact seuil, la résistance résiduelle en traction reste constante pour le cas d'un choc unique. Cette énergie seuil est comprise entre 3J et 10J. D'un point de vue général, plus on augmente l'énergie d'impact, plus la résistance résiduelle diminue. D'un autre côté, plus le nombre de chocs augmente, plus la résistance à la traction décroît (Fig. I-16).

Les chocs répétés peuvent faire chuter la résistance résiduelle en traction, même pour les faibles énergies d'impact en dessous du seuil critique.

Pour les énergies d'impact intermédiaires, la perforation peut se produire après quelques chocs seulement, ceci engendre une chute importante de la résistance à la traction.

Au dessus d'un certain niveau d'énergie d'impact, la plaque sera perforée en un seul choc, et la résistance à la traction en sera considérablement affectée.

Quand une plaque est perforée, la résistance résiduelle à la traction reste toujours la même quelque soit la cause de la perforation en plusieurs chocs ou en un seul choc.

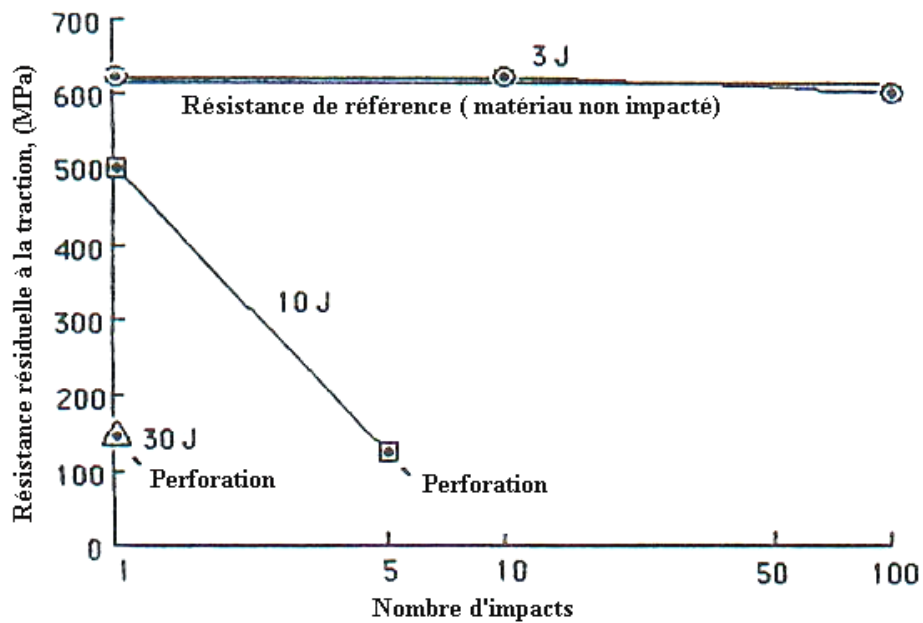


Fig. I-16- Résistance à la traction des éprouvettes centrales C après impact, tracée en fonction du nombre d'impacts à 3J, 10J et 30J [1].

Tableau I-3: Résumé des résultats d'essai de traction statique, pour la mesure des résistance résiduelle.

| Energie Du choc (J) | Nombres de chocs | Résistance ultime à la traction (MPa) | | | | |
|------------------------|---------------------|--|-----|------------|-----|-----|
| | | A | B | C | D | E |
| 3 | 1 | 642 | 624 | 642 | 618 | 606 |
| 3 | 10 | 635 | 638 | 642 | 603 | 620 |
| 3 | 100 | 621 | 635 | 602 | 654 | 632 |
| 10 | 1 | 639 | 630 | 506 | 639 | 638 |
| 10 | 4-6* | 630 | 621 | 124 | 635 | 611 |
| 30 | 1 | 624 | 648 | 140 | 617 | 638 |
| - | - | La résistance de référence de l'éprouvette non soumise aux chocs = 625 Mpa | | | | |

*Perforé en 4 à 6 chocs.

I-4-2 Résistance résiduelle à la compression

La résistance résiduelle à la compression a été également mesurée par Wyrick et Adams [1]. De même que précédemment, les chocs répétés sont exécutés sur trois niveaux d'énergie (tableau I-5). Les plaques impactées sont découpées en cinq éprouvettes de compression de 25mm de largeur et 88mm de longueur.

La localisation de chaque éprouvette au niveau des plaques est spécifiée dans la figure (I-16)

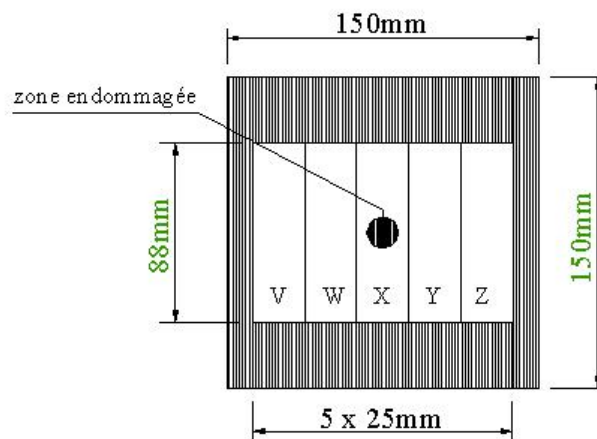


Fig. I-16- Mode de découpage des éprouvettes de compression après les essais de chocs répétés [1].

- les éprouvettes notées X contiennent le point d'impact,
- les éprouvettes W et Y sont situées de chaque côté de l'éprouvette X,
- les éprouvettes V et Z sont découpées sur les deux bords des plaques.

Contrairement à la résistance à la traction, la résistance à la compression post-impact est influencée par toutes les énergies d'impact testées, notamment les impacts légers de basse énergie. La résistance à la compression chute de façon importante, mais uniquement pour les éprouvettes X renfermant le point d'impact (tableau I-5).

La résistance à la compression baisse suite à l'augmentation de l'énergie d'impact, et cette chute est considérable même pour les chocs très légers (figure I-17).

En effet, sous une basse énergie d'impact de 3J, la résistance à la compression chute de 40% par rapport à la résistance de référence qui est de l'ordre 494 MPa (tableau I-4).

Tableau I-4: Résumé des résultats d'essai de compression statique, pour la mesure des résistances résiduelles

| Energie D'impact (J) | Nombre de chocs | Résistance ultime à la compression (MPa) du spécimen | | | | |
|----------------------------|--------------------|--|-----|------------|-----|-----|
| | | V | W | X | Y | Z |
| 3 | 1 | 474 | 481 | 293 | 480 | 480 |
| 3 | 10 | 517 | 478 | 231 | 504 | 490 |
| 3 | 100 | 530 | 520 | 184 | 530 | 490 |
| 10 | 1 | 505 | 479 | 150 | 482 | 510 |
| 10 | 4-6* | 487 | 448 | 25 | 482 | 480 |
| 30 | 1 | 487 | 495 | 50 | 479 | 500 |
| – | – | La résistance de référence de l'éprouvette non soumise aux chocs = 494 Mpa | | | | |

*Perforé en 4 à 6 chocs.

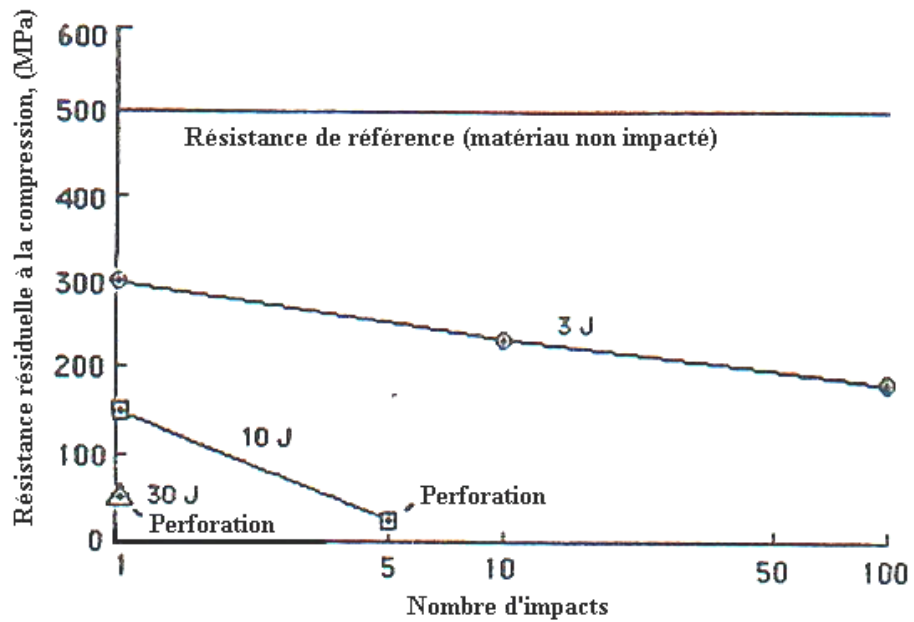


Fig. I-17- Résistance à la compression des éprouvettes centrales X après impact, tracée en fonction du nombre d'impacts à 3J, 10J et 30J [1].

Le concept d'une énergie seuil endommageante doit s'appliquer à la résistance à la compression aussi bien qu'à la résistance à la traction. Pour le présent matériau composite, cette énergie seuil semble être beaucoup plus petite que 3J.

A basse énergie, la résistance à la compression décroît suite au nombre de chocs répétés, la dégradation la plus significative apparaît en conséquence au premier choc.

Un seul choc à énergie élevée induit une réduction plus grande de la résistance comparativement à celle d'un grand nombre de chocs légers (à basse énergie).

En conclusion, nous pourrions dire que le niveau d'énergie d'impact ainsi que le nombre de chocs répétés sont les facteurs principaux qui influencent les dégradations de la résistance que ce soit en traction ou en compression.

Toutefois, la perte de la résistance des plaques composites est limitée essentiellement à la région près du point d'impact.

I-4-3 Résistance résiduelle à la flexion

D'autres travaux de recherche sur les effets des impacts répétés à basse énergie ont été conduits par Mittelman [4] afin d'étudier l'évolution de la résistance résiduelle en flexion en fonction du niveau d'énergie et du nombre d'impacts. Mittelman a effectué des essais de flexion statique post-impacts pour la mesure de la résistance résiduelle, du fait des sollicitations de flexion que subissent de nombreuses structures composites en service.

Les niveaux d'énergie étudiés se situent dans l'intervalle 2 à 5 J et le nombre maximum d'impacts est de 405. Une corrélation a été trouvée entre la résistance résiduelle d'un stratifié en carbone/époxy et une nouvelle variable introduite, représentant le logarithme du produit du nombre d'impacts(NOI) par l'énergie d'impact.

Les éprouvettes utilisées de section rectangulaire, ainsi que l'emplacement du point d'impact sont illustrés sur la figure (I-8).

L'emplacement asymétrique du point d'impact, à proximité du bord d'éprouvette, peut fournir des informations qualitatives sur les dommages internes dus aux chocs. Ces observations sont effectuées après avoir assuré un bon polissage de la surface latérale suivant l'épaisseur de l'éprouvette.

Ces éprouvettes et après impact sont soumises à un chargement de flexion trois points sur une machine d'essai universelle Zwick blanc(model 1484). La résistance initiale des éprouvettes non impactées est de l'ordre de 54.5 MPa.

Le tableau I-6 donne les résultats des essais réalisés, représentant les valeurs mesurées de la résistance résiduelle pour différentes énergies d'impacts et plusieurs nombre de chocs.

Tableau I-5 : Résistance résiduelle en (MPa) due aux différents paramètres d'impacts.

| Nombre d'impacts | ENERGIE (J) | | | |
|------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 5 | 54.58 | 41, 56.58 | 50, 56.62 | 46 |
| 15 | 47.53 | 55.56 | 43, 56.58 | 21, 43.45 |
| 45 | 28.44 | 46.47 | 44.54 | 47.49 |
| 135 | 45 | 55 | 48.35 | 43 |
| 405 | 49 | 47 | 24 | 39 |

Tableau I-6 : Pourcentage P des éprouvettes ayant une résistance résiduelle supérieure à 54,5 MPa pour les différents paramètres d'impacts.

| Nombre d'impacts | P(%) | Energie (J) | P(%) |
|------------------|------|-------------|------|
| 5 | 55 | 2 | 13 |
| 15 | 40 | 3 | 55 |
| 45 | 0 | 4 | 36 |
| 135 | 20 | 5 | 0 |
| 405 | 0 | | |

Chaque paramètre pris individuellement ne montre pas d'effet systématique sur la résistance résiduelle, en outre le tableau I-6 montre une grande dispersion des résultats.

Cependant, une combinaison des deux paramètres, basée sur le logarithme du produit du nombre d'impacts par l'énergie; $\text{Log}(\text{NOI} \times \text{Energie})$ révèle un effet plus évident sur la résistance résiduelle comme le montre la figure (I-18).

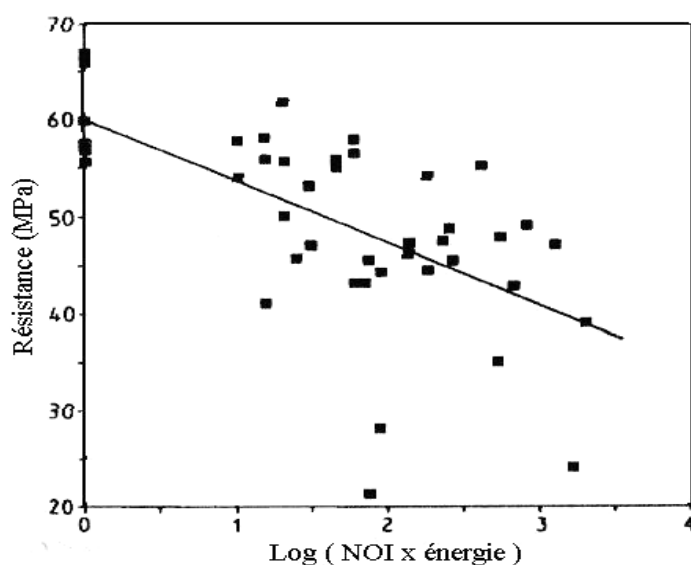


Fig. I-18- Résistance de référence et résistance résiduelle par rapport à $\text{Log}(\text{NOI} \times \text{ENERGIE})$ [4].

En outre, une droite de régression linéaire des valeurs expérimentales est tracée sur le même graphique, le coefficient de corrélation de cette régression linéaire est de 63%, qui bien que petit est statistiquement significatif. Cela démontre le bien fondé de la relation qui combine les deux paramètres d'impact, et qui explique de façon satisfaisante l'effet des impacts répétés à faible énergie sur la résistance résiduelle d'un matériau composite.

I-5- Modélisation de l'endommagement et la rupture d'un matériau composite en verre/epoxy soumis aux chocs répétés

L'étendue des dégâts causés par la fatigue par chocs peut entraîner de sérieuses dégradations dans les propriétés mécaniques, notamment la rigidité en flexion. En effet, Azouaoui et al. [5] ont étudié ce phénomène par la caractérisation des différents niveaux d'endommagement atteints à partir du nombre d'impacts et ou de la durée de chargement par choc (Fig. I- 19).

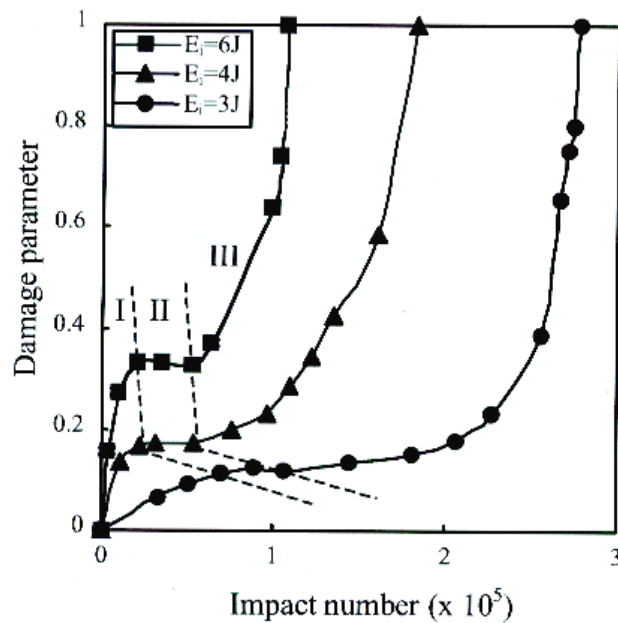
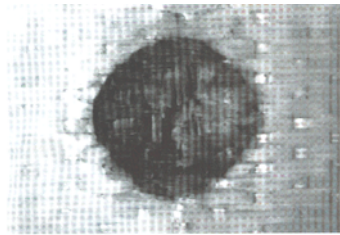


Fig. I-19 Courbes d'endommagement du composite stratifié verre/époxy tissu [5].

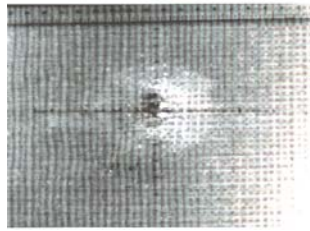
Ces courbes portant sur l'évolution de l'endommagement en fonction du nombre de chocs montrent trois zones distinctes à des niveaux d'énergies variables :

- zone I déclenchement du délaminage,
- Zone II saturation du délaminage,

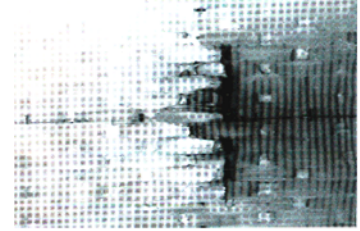
- Zone III fissuration des plis et rupture des fibres.



- Cratère sphérique face avant



- Rupture des fibres et observation du délaminage sur la face arrière



- Rupture des fibres du tissage face arrière.

Fig. I-20 Evolution des différents dommages en cours de fatigue par chocs [5].

Sous l'effet d'un chargement cyclique par chocs d'une plaque composite en verre/epoxy, l'endommagement résultant est caractérisé par une variable scalaire D qui est définie à partir des rigidités de flexion de la même plaque.

Les auteurs [5] ont ensuite, proposés un modèle d'endommagement utilisant une forme modifiée de l'équation empirique de Mankowsky [17] (équation N^e). La variable D qui caractérise l'endommagement du matériau, est définie en fonction de la fraction de vie β (Fig.I-21).

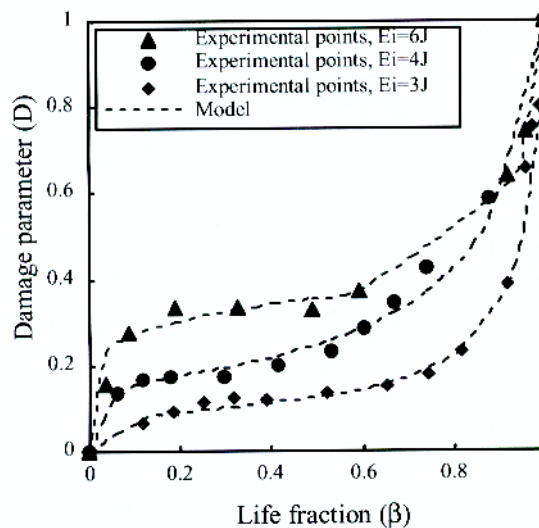


Fig. I-21 Modèle d'endommagement d'un tissu en verre/époxy [5].

$$D = a \cdot \frac{\beta^b}{(a+1) - \beta^c} \quad (\text{équation N}^6)$$

Avec D, le paramètre d'endommagement, β , la durée de vie, a, b, et c sont des constantes expérimentales dépendant du matériau et du niveau d'énergie.

Notons par ailleurs que les auteurs ont analysé les différents modes d'endommagement microscopiques et les dommages internes à différents niveaux d'énergie d'impact.

I-6- CONCLUSION :

L'objectif principal des travaux que nous avons présentés dans ce chapitre est l'étude du comportement des matériaux composites soumis à la fatigue par chocs, dans un but bien défini à savoir, optimiser ce type de matériau pour d'éventuelles conceptions structurelles.

Cette étude bibliographique a permis de mettre en évidence un certain nombre d'équations analytiques, permettant de décrire le comportement des matériaux composites soumis à la fatigue par chocs. Ainsi, on peut citer l'équation de la durée de vie permettant de prédire le nombre d'impacts à rupture sous une énergie donnée.

La résistance résiduelle à la traction, compression et flexion, est le paramètre post-impacts le plus employé par les chercheurs quant à l'étude de la fatigue par chocs, sauf que toutes les études élaborés diffèrent d'un auteur à l'autre.

Ces différences se résument dans les machines d'essai utilisées, le choix du type d'éprouvettes (dimensions, empilement, matériaux, nombre de plis, etc.), le type d'impacteur (formes, diamètres, etc.) la nature et les dimensions des dispositifs de fixation et de sollicitation et les moyens de mesures utilisés.

Il est clair que ce type d'essai ne peut être réalisé en respectant des conditions définis au préalable par une normalisation, puisqu'aucune norme spécifique concernant les essais de fatigue par chocs n'existe à ce jour.

Nous tenons à rappeler que les paramètres externes et internes des essais de fatigue par chocs ne sont jamais pris en considération dans leurs totalités.

Si les résultats obtenus par l'ensemble des chercheurs attestent que le niveau d'énergie et le nombre d'impacts sont les deux paramètres essentiels qui régissent les lois de comportement d'un matériau composite soumis à la fatigue par chocs, il y a lieu de souligner que d'autres

paramètres peuvent influencer ces résultats comme, à titre d'exemple, les dimensions des éprouvettes et en particulier l'épaisseur des plaques.

Il convient de signaler, à cet égard, qu'aucune corrélation précise entre la dimension de la zone impactée et l'influence néfaste de cette zone endommagée n'a pu être mise en évidence à ce jour.

D'une manière générale, la fatigue par chocs des matériaux composites dépend aussi de la nature des fibres et des résines, de la mise en œuvre du matériau, de la qualité des interfaces; autant de paramètres susceptibles d'être optimisés pour améliorer la résistance à la fatigue par chocs.

CHAPITRE II

ETUDE EXPERIMENTALE

II-1 Description du Matériau et propriétés mécaniques

L'usage est établi d'appeler composites des matériaux comportant un très grand nombre de fibres disposées en renforts et liées sur une phase différente appelée matrice.

Nos investigations sur le choix du matériau prévu pour nos essais de fatigue par chocs nous ont conduit à opter pour un composite tissé en verre/polyester fabriqué par l'Entreprise Nationale de Plastique et Caoutchouc de la wilaya de Chlef. Ce matériau est préconisé généralement pour les coques de voiliers et d'autres pièces industrielles.

II-1-1- Matrice

La matrice constituant le matériau est une résine en polyester insaturé (AROPOL G120), d'usage général, à base d'acide orthophtalique et de réactivité moyenne et de masse volumique 1,1 Kg/dm³.

Les caractéristiques mécaniques de cette résine sont consignées dans le tableau II-1 (fournis par le fabricant)

Tableau II-1- Caractéristiques mécaniques du polyester AROPOL G120

| Propriétés | Valeur moyenne | Norme |
|--|-----------------------|--------------|
| Résistance à la flexion | 100 MPa | ISO 178 |
| Module de flexion | 4 000 MPa | ISO 178 |
| Résistance à la rupture en traction | 55 MPa | ISO 527 |
| Module de traction | 3600 MPa | ISO 527 |
| Allongement à la rupture | 2 % | ISO 527 |

II-1-2- Renfort :

C'est un tissu en fibres de verre de type E, disposées suivant deux directions perpendiculaires; une direction dite de chaîne et l'autre de trame. Les fibres sont liées par tissage c'est à dire par passage des fils de trame au dessous et au dessus des fils de chaîne. C'est un type de tissu de verre à armures taffetas ou toile. (Fig.II-1).

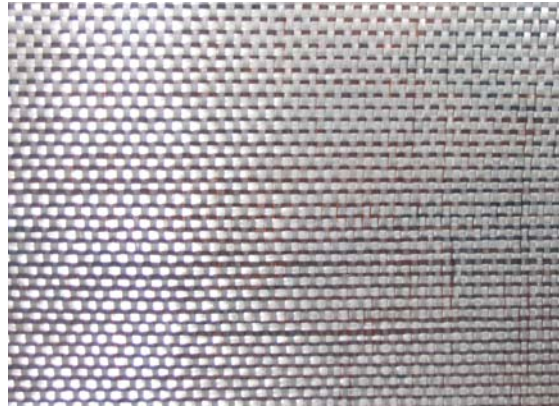


Figure II-1-Tissu de verre à armures taffetas.

Les propriétés mécaniques des fibres de verre E sont regroupées dans le tableau (II-2).

Tableau II-2 : Propriétés mécaniques de fibres de verre-E

| Caractéristiques | Valeur | Unités |
|---|--------------------------------|--------------------|
| Caractéristique en traction : <ul style="list-style-type: none">- Résistance à la rupture- Module de Young- Allongement à la rupture | 3400 à 3500 73 4.6 à 4.8 | MPa GPa % |
| Masse volumique | 2.54 | g /cm ³ |

II-1-3 Procédé de fabrication des éprouvettes

La fabrication des éprouvettes est obtenue par drapage manuel, procédé appelé moulage au contact. Celui-ci consiste à disposer les couches de renforts en tissu de verre sur le moule ouvert (plaque métallique Fig. II-2), chaque couche est enduite de résine polyester mélangée à des accélérateurs de durcissement qui sont le MECP (Méthyle Ethyle Cétone Peroxyde) et le Octoat de cobalt (1% de chaque pour 100 grammes de résine). Le compactage éliminant l'air restant se fait manuellement au rouleau. Chaque plaque est de deux mètres de longueur et un mètre de largeur et d'une épaisseur de 3.5 millimètres obtenu après application de huit couches de résine et tissu de verre, avec un rapport de résine sur fibre de 30/70, ces plaques sont découpées en éprouvettes de dimensions 280mm x 180mm x 3.5mm par les essais de fatigue par chocs.

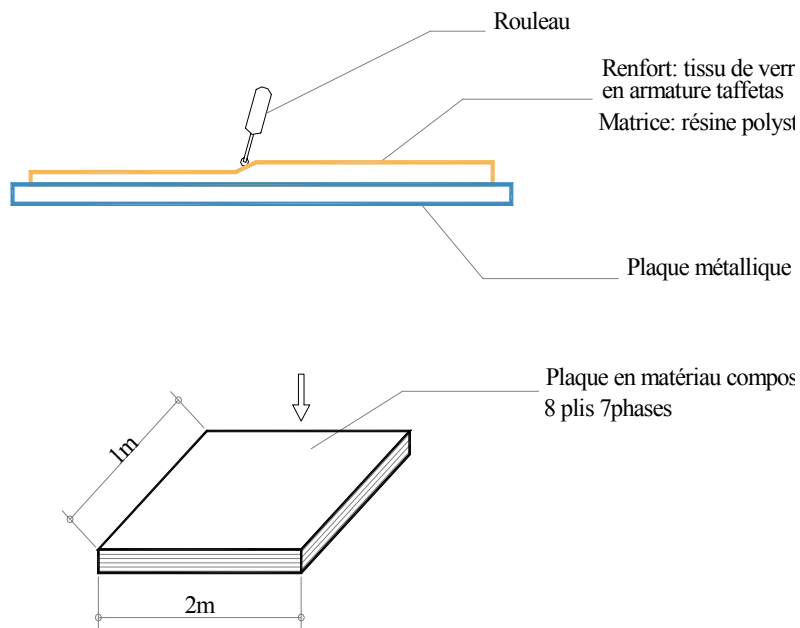


Figure II-2 Mode d'élaboration du matériau composite.

II-2 Présentation de la machine de fatigue par chocs

Notre machine de fatigue par chocs a déjà fait l'objet d'une étude préliminaire effectuée par des étudiants de cinquième année d'ingénieur comme projet de fin d'études. Avant d'entamer les essais de fatigue par chocs, nous avons été amenés au préalable, à reprendre et étudier la réalisation de tous les mécanismes de la machine afin de la rendre opérationnelle.

II-2-1 Principe de fonctionnement

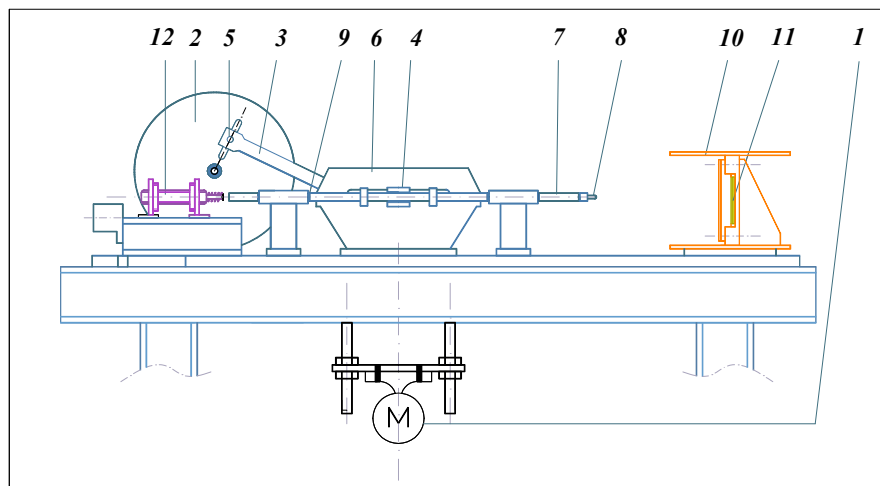


Fig. II-3- Schéma de principe de la machine de fatigue par chocs.

Les impacts répétés sont obtenus grâce à la transformation du mouvement de rotation en mouvement de translation, par un système bielle manivelle. En effet, le moteur (1) de la Fig. II-3 entraîne en rotation un système de poulie motrice; liée par une courroie trapézoïdale à une poulie réceptrice, qui fait tourner le disque manivelle (2).

L'une des extrémités de la bielle (3) est articulée au maneton (5) qui est en liaison complète démontable avec le disque manivelle afin de permettre le réglage du rayon de giration. L'autre extrémité de la bielle est articulée à la fourchette (4) guidée en translation par la glissière (6). Cette dernière lance et reprend à chaque cycle l'impacteur (8). Celui-ci est guidé en translation par des douilles à billes (9).

II-2-2 Montage d'éprouvette

Le montage d'éprouvette a été conçu de façon à ce que deux bords de l'éprouvette seront encastrés alors que les deux autres bords seront libres. La fixation s'effectue sur des supports rigides de mors mobiles munis par des plaques de serrage afin d'éviter toute possibilité de glissement de l'éprouvette. (Fig. II-4).

Le montage d'éprouvette sera monté sur le bâti de la machine de façon à ce que le site des impacts sera localisé au centre de l'éprouvette.



Figure II- 4- Montage d'éprouvette.

II-2-3- L'impacteur

L'impacteur sera lié au poinçon par l'intermédiaire d'une liaison par filetage, sa tête est hémisphérique de diamètre 20mm, afin d'assurer un contact ponctuel lors des chocs (Fig. II-5).

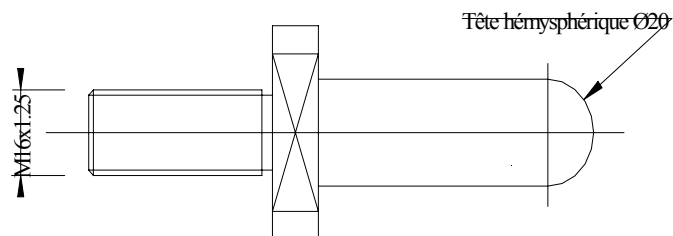


Figure II-5- Impacteur à tête hémisphérique.

II-2-4- Le variateur de vitesse

Le variateur de vitesse permet de fournir, à partir d'une tension alternative à fréquence fixe de 50 Hz (fréquences réseaux) une tension alternative à fréquence variable de 0,0 à 50,0 Hz avec un pas de 0,1 Hz, d'où la variation de la vitesse de rotation d'un moteur couplé à ce type de tension

Nous avons préconisé pour nos expériences un variateur de vitesse pour moteur asynchrone de marque ALTIVAR-Télemécanique (Fig. II-6).



Figure II-6- Montage moteur variateur de vitesse.

II-2-5 Amortisseur de chocs

Son rôle est d'amortir le projectile afin que la vitesse de rebond soit presque nulle à l'instant t , moment de la percussion de la fourchette sur le projectile. La nécessité de l'amortisseur de chocs est impérative du fait que la vitesse d'impact varie en gardant constante la fréquence du variateur, cela est dû principalement à la vitesse de rebond de l'impacteur qui prend des valeurs différentes selon la variation de rigidité de l'éprouvette pendant les essais de fatigue par chocs.

L'amortisseur que nous avons préconisé pour nos expériences est un amortisseur hydraulique de marque ENEDINE (Fig.II-7)

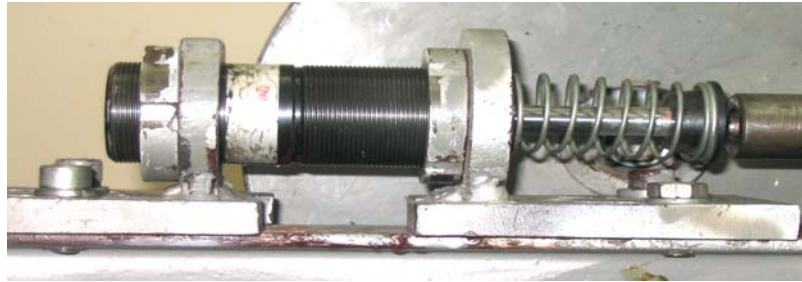


Figure II-7- Amortisseur de chocs.

II-3- Méthode expérimentale

Le but recherché par nos essais c'est d'étudier l'endommagement de plaques composites soumises à un nombre de chocs répétés sous un niveau d'énergie défini, jusqu'à la rupture de ces dernières.

II-3-1- Dispositif de mesure de la vitesse d'impact

Aussi l'objectif de notre travail nous impose la prise en considération de certains paramètres tels que la variation du nombre d'impacts par rapport au temps ou tout simplement la variation de la vitesse de l'impacteur. La mise en évidence des conditions d'impacts représentent la première étape de notre expérience, qui consiste à déterminer l'énergie d'impact, laquelle est conditionnée par trois paramètres essentiels, qui sont :

- la course de l'impacteur, c'est à dire le choix d'un rayon de giration initiale de la bielle,
- la masse totale du poinçon plus l'impacteur,
- la vitesse d'impact.

La valeur du rayon de la bille est d'une importance primordiale car la vitesse de l'impacteur en dépend directement. C'est ainsi que le maintien de cette valeur de rayon constante tout au cours de nos essais devient obligation, on prendra $R_G = 60 \text{ mm}$.

L'énergie cinétique de l'impacteur qui est animé d'un mouvement de translation d'une vitesse v est donnée par la relation: $E_{cin} = \frac{1}{2} M v^2$, avec M représente la masse totale du poinçon plus l'impacteur en mouvement. Dans notre cas, la masse du poinçon plus l'impacteur est de 5,575 kg.

Sachant que la masse intervenant dans la détermination de l'énergie d'impact est constante, donc la variation d'énergie ne peut s'effectuer qu'en faisant varier la vitesse d'impact. Ainsi pour pouvoir fixer à chaque essai une valeur bien définie de l'énergie, il est nécessaire de connaître la vitesse de l'impacteur.

Pour la mesure de cette vitesse, nous avons procédé à la conception d'un mécanisme constitué de deux plaques métalliques parallèles à une distance de 16mm l'une de l'autre. Ces deux dernières sont en liaison complète avec un socle magnétique permettant le lien du mécanisme avec le bâti de la machine. Une des extrémités d'un ressort est liée à l'impacteur et l'autre est libre afin qu'elle soit en contact avec les lames métalliques à chaque cycle. Un montage électrique est associé à ce mécanisme, ainsi l'interception par un oscilloscope des deux signaux dus au contact ressort-lames métalliques nous permettra de lire directement la période des deux signaux, c'est à dire le temps écoulé pendant que l'impacteur parcourt une distance de 16 mm (Fig.II-8).

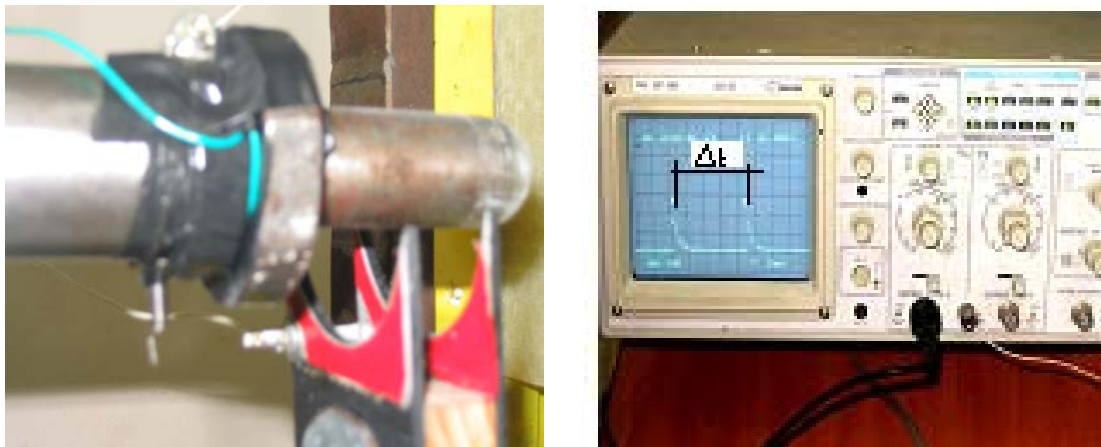


Figure II-8- Mécanisme de détermination de la vitesse d'impact.

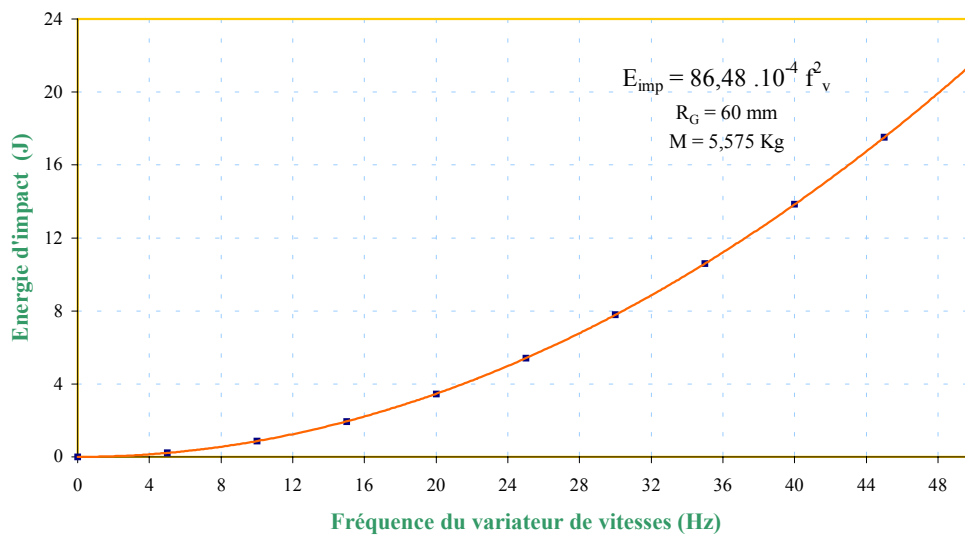
L'énergie d'impact serait alors :

$$E_{imp} = \frac{1}{2} M V_{imp}^2$$

On connaît la valeur de la vitesse en fonction de la fréquence du variateur donc l'énergie d'impact peut s'écrire sous la forme suivante:

$$E_{imp} = 15.512 \cdot 10^{-4} M f_y^2$$

Des prés-essais effectués, on tire la courbe caractéristique de la machine de fatigue par chocs, donnant l'énergie d'impact en fonction de la fréquence du variateur (Fig.II-9).



**Figure II-9- Courbe caractéristique de la machine de fatigue par chocs
 $R_G=60\text{mm}$ et $M=5.575\text{kg}$.**

Toute valeur d'énergie choisie pour les essais de fatigue par chocs dépendra donc directement de la valeur de la fréquence affichée par le variateur de vitesse.

II-3-2- Compteur de cycles

Le nombre d'impacts est déterminé par un compteur de cycles. Il s'agit d'un appareillage constitué d'une cellule photoélectrique à détection de proximité et d'un compteur affichant le nombre d'impacts à chaque mise en marche de la machine. En mettant en parallèle un chronomètre, cela nous permet d'obtenir la fréquence de la machine, c'est à dire le nombre d'impacts par seconde correspondant à la fréquence du variateur. Bien évidemment, la cellule est montée au bord du montage d'éprouvette et à la même hauteur que l'impacteur (Fig. II-10).



Figure II-10- Compteur de cycles.

II-3-3 Procédure expérimentale

Les essais de fatigue par chocs sont effectués sur les éprouvettes décrites en (II-1-3) à des niveaux d'énergie allant de 2 à 7 Joules. Les conditions d'essai sont énumérées dans le tableau II-3 représenté ci-dessous.

Tableau II-3 : **PROTOCOLE D'ESSAI**

| Eprouvettes | Fréquence des impacts (Hz) | Vitesse d'impact (m/s) | Energie d'impact (J) |
|--------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| P1 | 2.732 | 1.037 | 3 |
| P2 | 3.155 | 1.198 | 4 |
| P3 | 3.527 | 1.34 | 5 |
| P4 | 3.865 | 1.467 | 6 |
| P5 | 4.13 | 1.538 | 7 |
| P6 | 2.951 | 1.12 | 3.5 |
| P7 | 2.231 | 0.847 | 2 |

Notons que toutes les valeurs regroupées dans le tableau II-3 dépendent de deux paramètres importants qui sont le rayon de giration, $R_G = 60 \text{ mm}$ et la masse du poinçon plus l'impacteur, $M = 5,575 \text{ kg}$.

Aussi, faut-il préciser que chaque éprouvette est soumise à un essai de fatigue par chocs sous un même niveau d'énergie, défini au préalable et cela jusqu'à rupture.

Pendant toute la période des essais, nous avons procédé à l'observation et au suivi du comportement de chaque éprouvette jusqu'à rupture, afin de recenser les différents paramètres pouvant nous renseigner sur certains mécanismes d'endommagement du

matériau, tels que la variation de la surface de délaminage, l'évolution de diamètre et de la profondeur du cratère, et les fissurations apparaissant à la surface.

II-3-4- Technique de mesure de la surface délaminée et les dimensions du cratère

Pour prendre les dimensions tels que le diamètre du cratère, la surface de délaminage et les fissures visibles, nous avons utilisé un régllet gradué au demi millimètre. En ce qui concerne la profondeur d'impact, un comparateur d'une précision au 1/100 de millimètre a été employé (Fig. II-11).

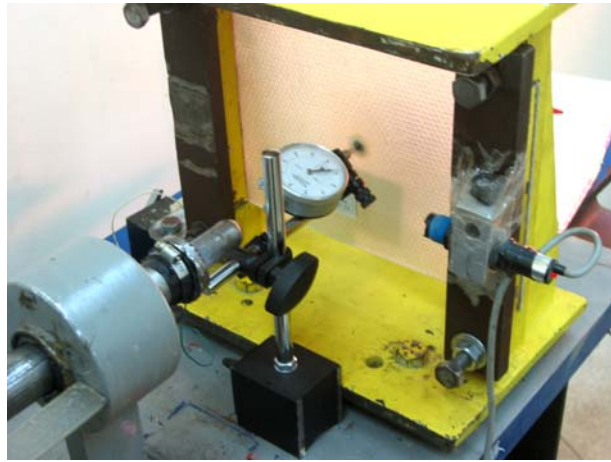


Figure II-11- Mesure de la profondeur d'impact.

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette partie concerne la représentation des résultats des essais de fatigue par chocs sur l'endommagement et la rupture du matériau composite étudié.

L'évolution des dommages est étudiée à travers des paramètres d'impact, tels que l'énergie d'impact et le nombre d'impacts. Enfin une courbe d'endurance est tracée, montrant les différentes phases d'évolution de la charge d'impact (représentée ici par l'énergie d'impact) en fonction de la durée de vie en fatigue par chocs.

Au cours des essais de fatigue par chocs, nos observations des dommages ont été axées sur les faces avant et arrière des éprouvettes et plus particulièrement au niveau du point d'impact.

Des photos de la zone endommagée par les impacts ainsi que la face arrière aux chocs ont été prises afin de noter, suivre et analyser l'évolution des dommages, tels que le délaminage, le cratère et les fissures de surfaces, en fonction d'une part du nombre d'impacts et d'autre part de l'énergie d'impact. Précisons toutefois que ces photos ont été prises à partir de la même position pendant toute la période des essais.

III-1 Effet de l'énergie et du nombre d'impacts sur la surface de délaminage

Une analyse préliminaire des éprouvettes endommagées par fatigue par chocs révèle que pour un même nombre d'impacts, il y a apparition d'une surface blanchâtre de forme géométrique circulaire, visible sur les faces avant et arrière aux chocs dont le diamètre augmente avec l'énergie d'impact c'est le phénomène de délaminage. En effet, le verre/epoxy étant translucide, il s'opacifie en délaminant. Aux alentours de cette surface, des fissures de quelques millimètres de longueur sont à signaler, elles sont plus évidentes dans le sens horizontal.

Le délaminage est la forme de dommage la plus préjudiciable pour un stratifié, puisqu'il est la principale cause de la dégradation des propriétés mécaniques. Partant de ce constat, nous nous sommes attachés dans cette étude à suivre l'évolution du délaminage tout au long de la période d'essais de fatigue par chocs.

Le niveau d'énergie ainsi que le nombre d'impacts jouent un rôle primordial dans l'endommagement et la rupture des matériaux composites. Plus l'énergie d'impact ou le nombre d'impacts augmentent simultanément ou séparément, plus la surface de délaminage, paramètre d'endommagement important, augmente aussi.

III-1-1 Variation de la surface de délaminage en fonction de l'énergie d'impact

A faible niveau d'énergie 3 à 3,5 Joules, notre attention a été attirée par la lenteur de la propagation de la surface de délaminage, et ce à chaque fois que le nombre d'impacts augmentait. Nous avons même remarqué dans certains cas que les dimensions de la surface varient très lentement, malgré l'accroissement du nombre d'impacts qui atteint quelques fois 10000 impacts. Par ailleurs, la variation de la surface de délaminage est beaucoup plus importante lorsque le niveau d'énergie est plus élevé (Fig. III-1).

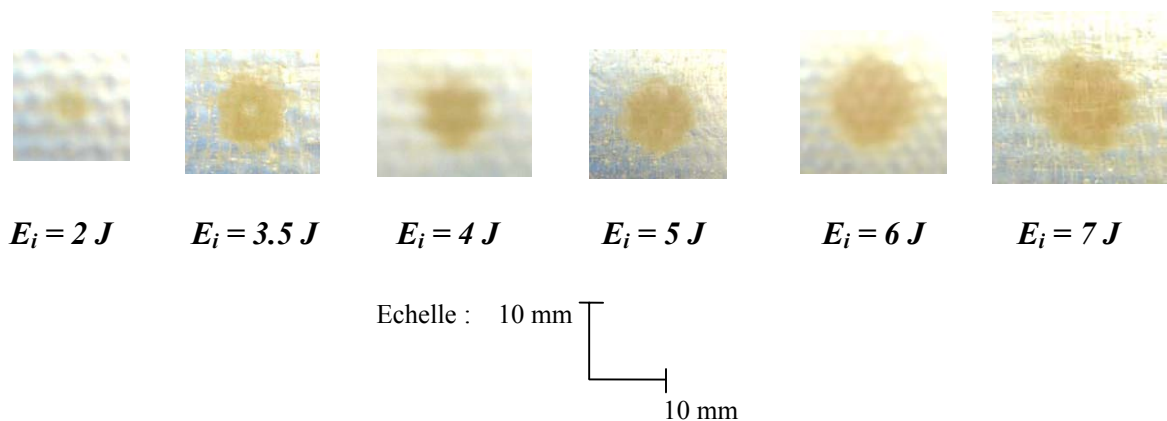


Figure III-1 Surfaces de délaminages sur des éprouvettes à $N= 100$ impacts et à des niveaux d'énergie variables (vue face arrière).

Afin d'avoir une idée plus claire sur l'évolution de la surface de délaminage, nous avons tracé, des courbes représentant la variation de la surface de délaminage en fonction de l'énergie d'impact pour un nombre d'impacts défini au préalable (Fig. III-2).

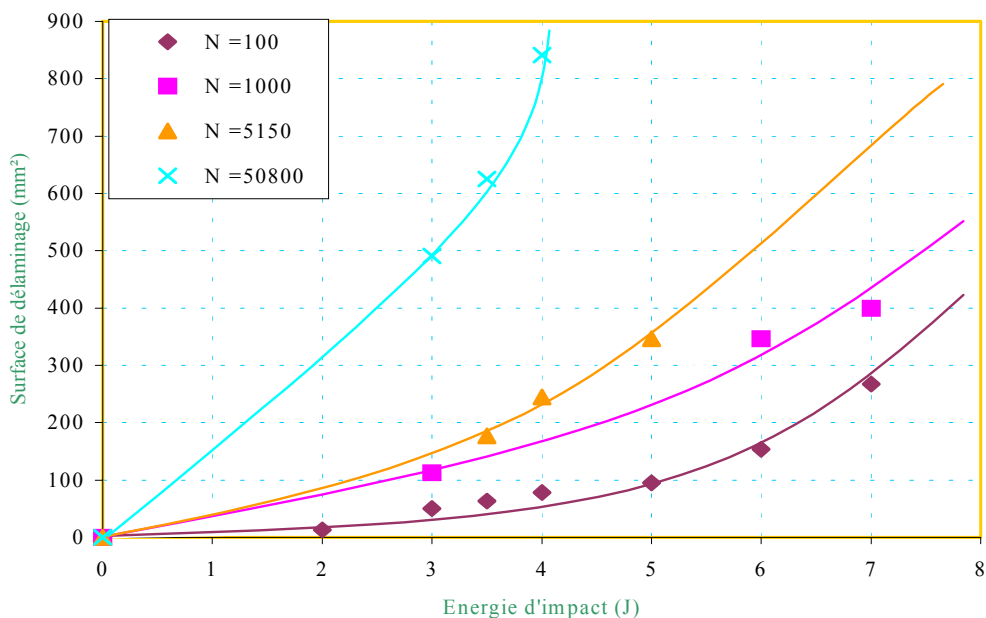


Figure III-2 - Evolution de la surface de délaminage en fonction de l'énergie d'impact.

Les courbes de la figure III-2 confirment bien les observations constatées au cours des essais et que nous avons décrit précédemment.

Ces courbes montrent que pour des énergies d'impact croissantes, la surface délaminée est d'autant plus importante que le nombre d'impacts est grand. Cela indique que la surface délaminée projetée résultant de la superposition des délaminages au niveau de toutes les interfaces, est grandement affectée par le niveau d'énergie.

La comparaison entre les différentes éprouvettes essayées, pour un même nombre d'impacts mais sous diverses énergies d'impact, fait ressortir une évolution croissante en exponentielle de la surface délaminée.

En effet, l'augmentation du niveau d'énergie induit des contraintes de cisaillement importants aux interfaces inter plis, qui conduisent à la rupture de l'interface et par suite la formation et la propagation du délaminage.

Enfin, on peut conclure que la figure III-2 montre bien que la progression de la surface de délaminage s'effectue d'une manière très rapide si le niveau d'énergie est important, ce qui confirme encore une fois l'importance de l'énergie d'impact et son rôle prépondérant dans l'endommagement des matériaux soumis aux chocs répétés.

III-1-2- Variation de la surface de délaminage en fonction du nombre d'impacts

L'évolution de la surface délaminiée dépend aussi d'un autre facteur important, en effet le nombre d'impacts agit aussi sur la propagation des dommages et plus précisément sur la variation de la surface de délaminage (Fig. III-3).

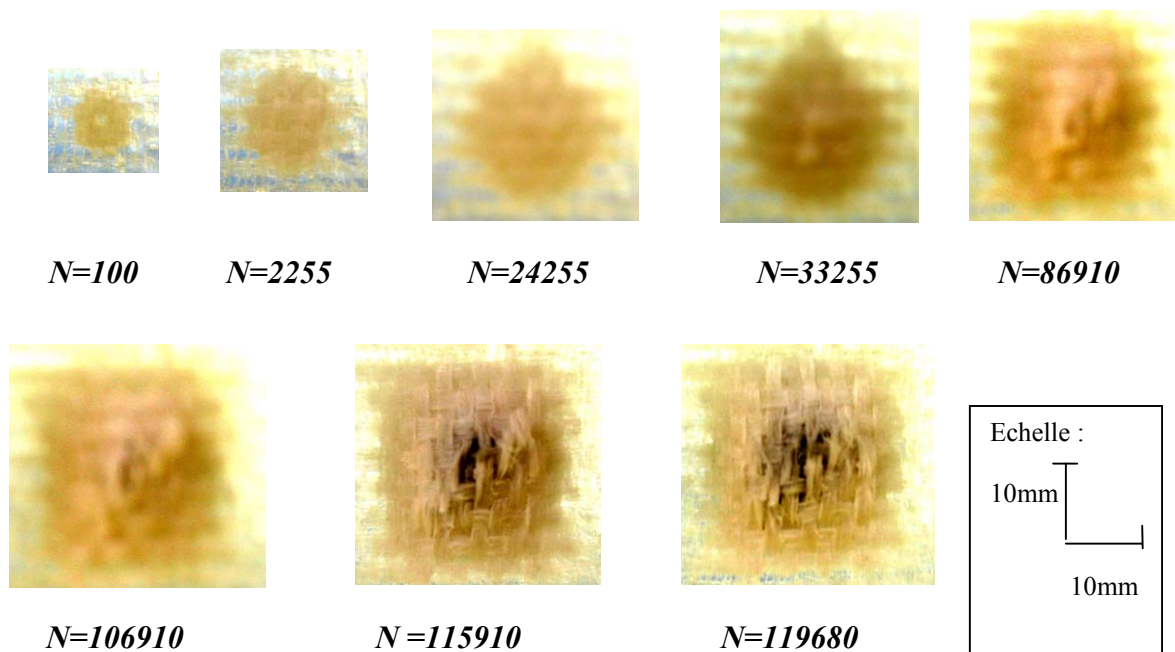


Figure III-3 Surface de délaminage d'une éprouvette soumise à une énergie d'impact de 3.5 J et à un nombre d'impacts variable (vue face arrière).

Afin de quantifier la surface délaminée et son évolution en fonction du nombre d'impacts, nous avons jugé utile de tracer les courbes de variations de cette surface pour différents nombres d'impacts, et ce jusqu'à défaillance totale de la plaque composite (Fig. III-4).

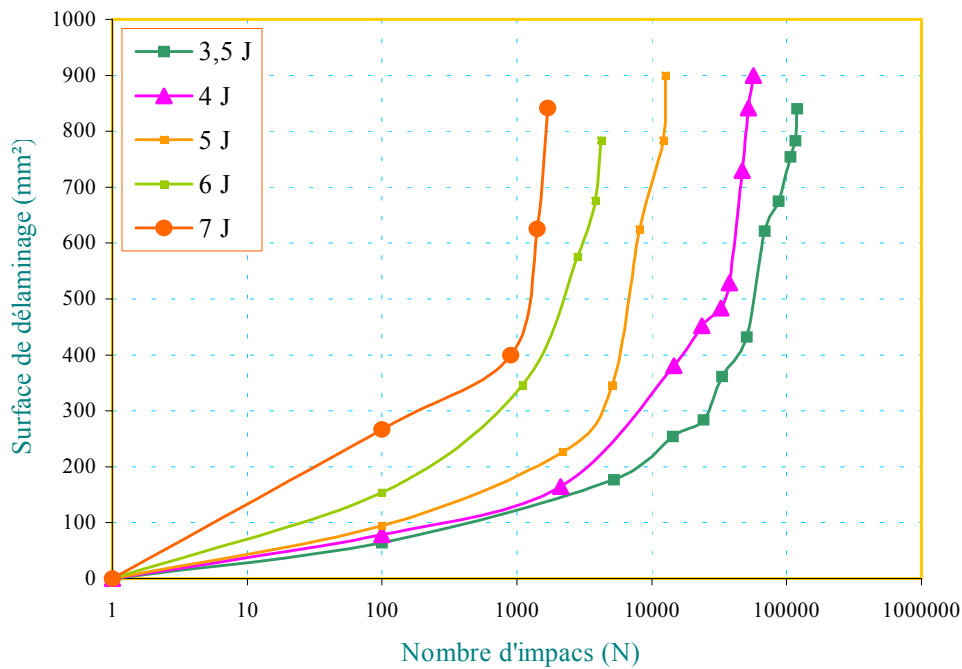


Figure III - 4 - Evolution de la surface de délaminage en fonction du nombre d'impacts.

Les différentes courbes représentées dans la figure III-4 montrent qu'entre 1 et 1000 impacts, la variation de la surface de délaminage s'effectue progressivement et d'une manière quasi linéaire, dont la pente est beaucoup plus prononcée lorsque le niveau d'énergie est plus élevé.

Par contre lorsqu'on dépasse la valeur de 1000 impacts, le délaminage progresse d'une manière rapide et prend l'allure d'une fonction exponentielle jusqu'à la rupture.

Les enseignements que l'on peut tirer de ces résultats, c'est que le nombre d'impacts est l'un des facteurs principaux allié à l'énergie d'impact, qui influe de façon considérable sur

l'endommagement et la rupture des matériaux composites en verre/époxy sollicités en fatigue par chocs.

III-1-3 Variation de la surface de délaminage en fonction de l'énergie d'impact cumulée

Dans les deux paragraphes précédents (cf. § III-1-1 et III-1-2) nous nous sommes attachés à montrer l'influence " séparée " de l'énergie d'impacts (E_i) ainsi que le nombre d'impact (N) sur l'évolution de la surface délaminiée des plaques composites. Qu'en est-il de l'effet simultané de ces deux paramètres (représenté par la variable énergie d'impact cumulée : $E_{i,c} = N.E_i$) sur l'endommagement des stratifiés verre/époxy ?

Etudier la variation de la surface de délaminage en associant les deux facteurs principaux traités précédemment à savoir l'énergie d'impact et le nombre d'impacts, va nous permettre d'avoir une idée assez précise sur l'évolution des dommages au cours de la fatigue par chocs (Fig. III-5).

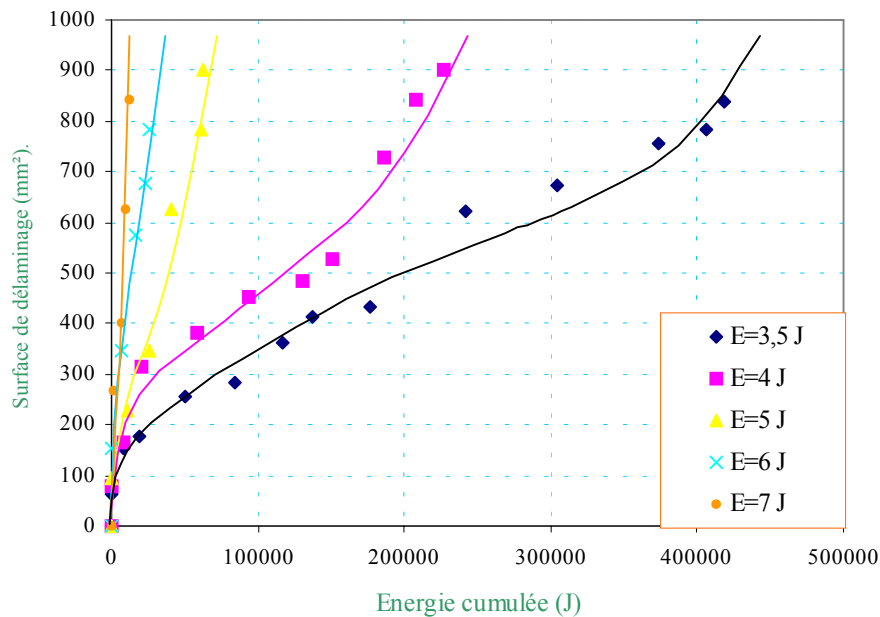


Figure III-5- Evolution de la surface de délaminage en fonction de l'énergie d'impact Cumulée.

Les courbes d'évolution du délaminage au niveau des différents interfaces en fonction de l'énergie d'impact cumulée (Fig. III-5) fait apparaître deux comportements.

Pour les basses énergies d'impact (3,5 et 4 J) la propagation des délaminages suivant trois phases : une évolution rapide au début suivie d'une phase de croissance plus lente de la surface délaminée, suivi d'une accélération du dommage jusqu'à la défaillance totale de la structure.

Cette évolution en trois phases peut s'expliquer par le fait qu'une grande part de l'énergie cumulée est absorbée en délaminage dans les phases I et III, tandis que le ralentissement constaté dans la phase intermédiaire II indique que l'énergie consommée en délaminage est moins importante. Cela semble être dû au fait que les autres types de dommage (principalement ; poinçonnement de la surface d'impact, croissance des dimensions du cratère, fissuration matricielle en face arrière, etc..) ainsi que la déformation élastique (en flexion) de la plaque absorbent la part d'énergie perdue par le délaminage durant la deuxième phase (Fig. III-5).

Pour les énergies d'impacts supérieures (5, 6 et 7 J), la propagation du délaminage s'effectue d'une manière très rapide malgré le faible nombre d'impacts (Fig.III-5).

L'évolution de la surface délaminée passe toujours par les trois mêmes phases dénombrées précédemment. La phase II de ralentissement des délaminages est nettement moins évidente que par le cas des basses énergies 4 et 3,5 J.

Nous pouvons conclure que le nombre d'impacts est le facteur principal de l'endommagement des composites, pour de faible niveau d'énergie (3,5 et 4 J). Mais, dès que l'énergie d'impact prend de plus grandes valeurs (≥ 5 J), celle-ci devient le facteur prépondérant.

Notons tout de même que les surfaces de délaminage après perforation ont atteint des valeurs comprises entre 784mm² et 900mm² et à aucun moment ces surfaces n'ont pu dépasser une valeur supérieure à 900mm² pour toutes les éprouvettes testées, quelque soit le niveau d'énergie choisi.

En effet, arrivée à une certaine surface limite, l'énergie d'impact disponible n'est plus suffisante pour propager le délaminage . cela est dû au faible nombre d'interfaces mais aussi au type d'empilement des composites, qui en s'entrecroisant les fils de chaînes et les fils de trames se dressent comme un obstacle à la propagation du délaminage.

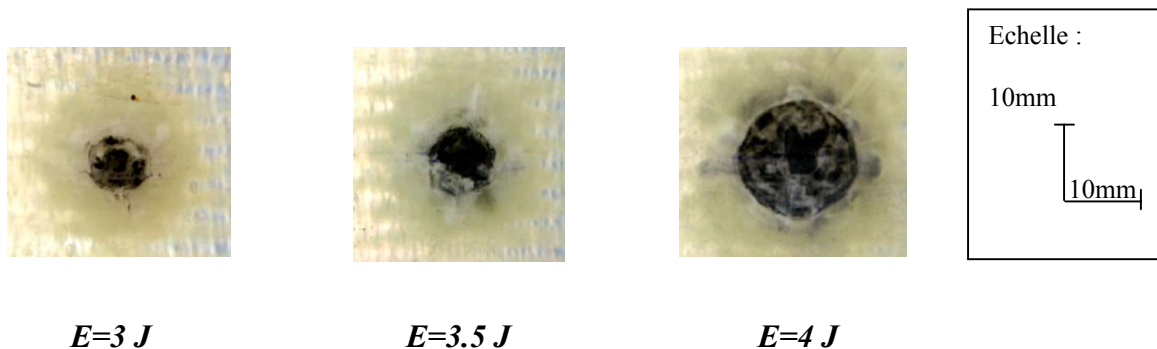
III-2 Effet de l'énergie d'impact et le nombre d'impacts sur les dimensions du cratère

Outre l'intérêt que nous avons porté à l'évolution de la surface de délaminage nous sommes attachés dans cette partie de l'étude à montrer l'effet de la fatigue par chocs sur la formation et l'expansion du cratère.

L'évolution des dimensions du cratère (diamètre et profondeur) a été suivi de près pendant toute la période des essais de fatigue par chocs. Nos investigations se sont axées sur l'étude de la variation de ces deux paramètres en fonction de l'énergie d'impact et du nombre d'impacts.

Les figures III-6 et III-7 montrent des photos de la zone endommagée par chocs.

L'évolution du cratère en fonction du niveau d'énergie et du nombre d'impacts y est illustrée.



**Figure III-6 Croissance du diamètre du cratère en fonction de l'énergie d'impact
(N = 51000 impacts).**

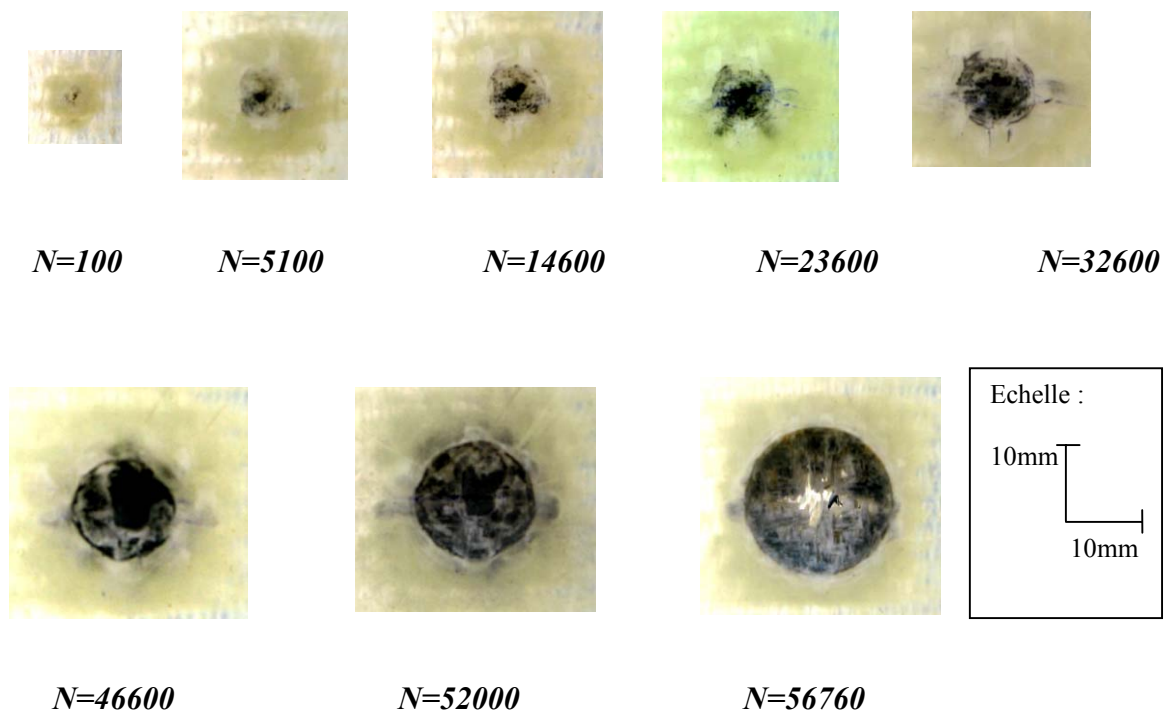
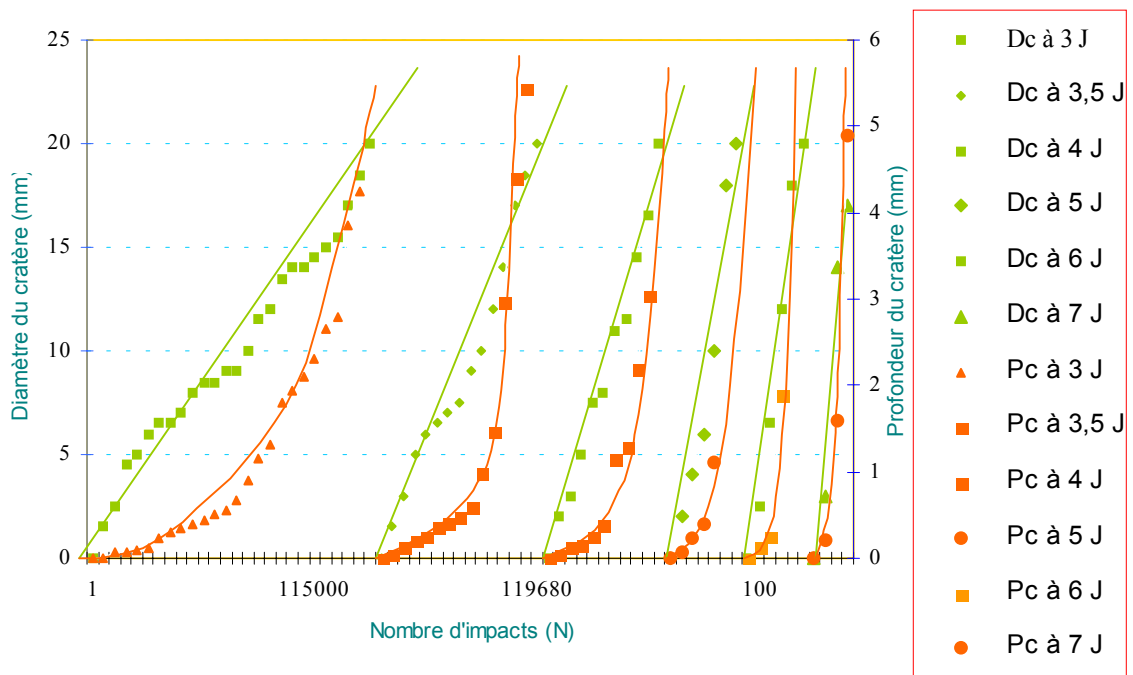


Figure III-7 Evolution du diamètre du cratère en fonction du nombre d'impacts ($E_i = 4 \text{ J}$).

L'expansion du cratère caractérisée par le poinçonnement cyclique du point d'impact, semble suivre une loi linéaire en ce qui concerne le diamètre du cratère, mais une croissance en exponentielle de la profondeur (Fig.III-8). Le même comportement est observé pour toutes les énergies d'impact essayées.



Dc : diamètre du cratère Pc : Profondeur du cratère

Figure III-8 Evolution du diamètre et la profondeur du cratère en fonction du nombre d'impacts.

l'évolution croissante du diamètre du cratère en fonction du nombre d'impacts, s'effectue d'une manière progressive et suit une droite linéaire de pente beaucoup plus remarquable lorsque le niveau d'énergie est plus élevé.

En ce qui concerne la profondeur du cratère la croissance de celle-ci s'effectue d'une manière lente au départ pour s'accélérer par la suite jusqu'à la rupture finale.

Cela indique que quelque soit l'état d'endommagement de la plaque impactée répétitivement il semblerait que le cratère absorbe la même énergie par la croissance de son diamètre, ce qui n'est pas exact. En effet, la croissance du diamètre du cratère s'accompagne de rupture en traction, cisaillement des fibres de la surface d'impact, tout au tour du point d'impact. plus le diamètre augmente, et plus il y a beaucoup plus de fibres à casser

(plus grand précisément) ce qui nécessite une plus grande énergie. On peut juste dire, que cette quantité d'énergie augmente graduellement lors de l'endommagement des plaques, ce qui induit une croissance linéaire du diamètre du cratère.

Par ailleurs, la profondeur du cratère couronne dans la première phase des courbes, une petite énergie en comparaison avec le délaminage et le diamètre du cratère. cela se traduit par une faible croissance de la profondeur. Dans la deuxième partie des courbes, une progression est constatée. Cette augmentation rapide de la profondeur se manifeste par l'affaissement et la rupture des plis du composite, les uns après les autres jusqu'à la défaillance totale de la structure.

Le début de cette seconde partie des courbes d'évolution de la profondeur en fonction du nombre d'impacts, peut être considéré comme une caractéristique importante de la défaillance du composite. Dans la première phase, on parlera de processus d'endommagement, tandis que le début de la seconde partie des courbes, marque le début du processus de rupture.

III-2-1 Evolution du rapport du diamètre par la profondeur du cratère en fonction du nombre d'impacts

Afin de comprendre l'évolution de l'une des dimensions du cratère relativement à l'autre, nous nous sommes intéressés à la variation du rapport de la profondeur du cratère sur le diamètre du cratère en fonction du nombre d'impacts (Fig. III-9).

Aux premiers abords nous avons pu constater l'existence de trois phases différentes.

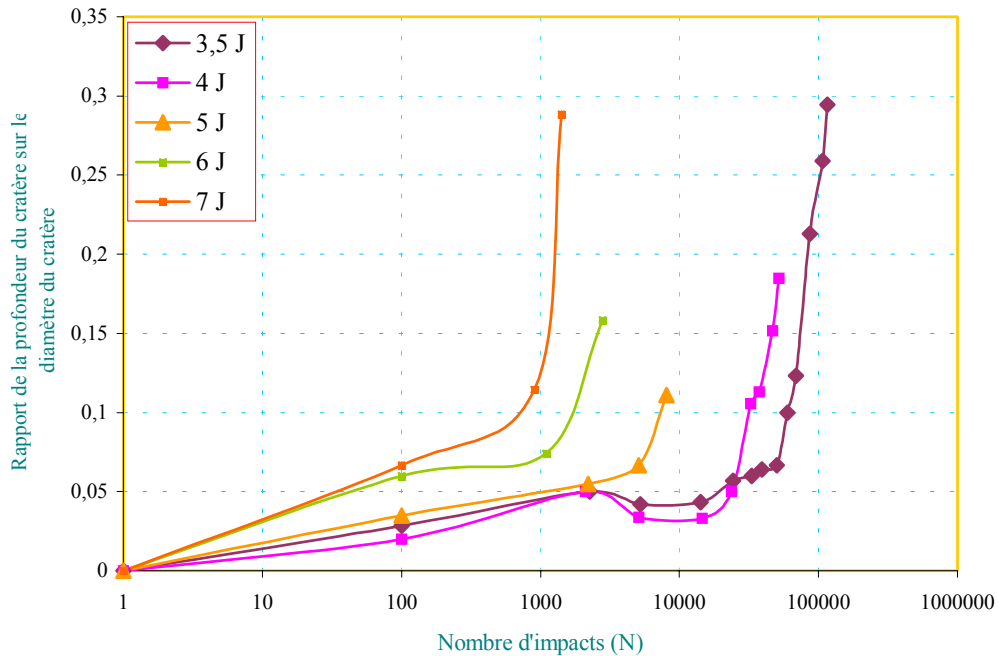


Figure III-9 Evolution du rapport du diamètre sur la profondeur du cratère en fonction du nombre d'impacts.

1^{er} Phase

Entre 1 et 3500 impacts correspondants aux niveaux d'énergie 3,5 , 4 et 5 J, la progression du rapport en fonction du nombre d'impacts est linéaire, cela signifie que l'évolution de la profondeur et le diamètre du cratère par rapport aux nombre d'impacts reste constante et égale à la pente de la droite qui régit cette progression.

En ce qui concerne les courbes 6 et 7 J, le même phénomène se produit mais la phase ne se situe que entre 1 et 100 impacts.

2^{ème} Phase

Entre 3500 et 35000 impacts sur les courbes 3,5 et 4 J, la progression change de pente et prend une direction curviligne de pentes négatives. L'évolution du rapport de la profondeur du cratère sur le diamètre du cratère indique que le diamètre du cratère progresse plus rapidement que la profondeur.

En ce qui concerne les courbes 6 et 7 J le même phénomène est à signaler sauf que la phase se déroule entre 100 et 1100 impacts.

3^{ème} Phase

Le nombre d'impacts est supérieure à 40000 pour les courbes 3,5 et 4 J et supérieure à 1200 pour les courbes 6 et 7 J. Dans cette phase, l'évolution du rapport de la profondeur du cratère sur le diamètre en fonction du nombre d'impacts, s'effectue d'une manière très rapide et suit une droite linéaire presque verticale ce qui signifie que dans cette phase, la profondeur du cratère progresse plus rapidement que le diamètre.

III-3 Effet de l'énergie d'impact sur la durée de vie

L'un des principaux objectifs de cette étude est le tracé des courbes de fatigues. Cela consiste à mener à terme les essais de fatigue par chocs jusqu'à la défaillance totale des plaques composites. On relève alors, pour chaque niveau d'énergie, le nombre d'impacts à rupture ou durée de vie. Les courbes de fatigue sont obtenues en portant en abscisses ; le nombre d'impacts à rupture et en ordonnées ; le niveau d'énergie (à la place du niveau de contrainte pour ce qui est de la fatigue classique).

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux suite à l'application des cycles d'efforts; cycles dont la répétition peut conduire à la rupture de ces matériaux.

Après les essais que nous venons d'élaborer, il serait très intéressant de trouver une caractéristique spécifique au matériau essayé et notamment en ce qui concerne sa résistance ou sa durée de vie lorsqu'il est soumis aux chocs répétés.

On a montré précédemment que les deux facteurs principaux qui régissent les différents modes d'endommagement du matériau au cours des essais de fatigue par chocs sont l'énergie et le nombre d'impacts.

La durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture N_r . L'exécution de N cycles ($N < N_r$) entraîne un certain endommagement du matériau qu'il est important de quantifier car il détermine sa capacité de vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer ce matériau pour éviter un accident.

Chaque éprouvette a été perforée après un certain nombre d'impacts et à une énergie bien définie. Les résultats obtenus ont été représentés sous forme d'une courbe caractérisant la rupture du matériau (perforation) en fonction de l'énergie et le nombre d'impacts donc à chaque éprouvette correspond un point du plan (E , N_r) (Fig.III-10).

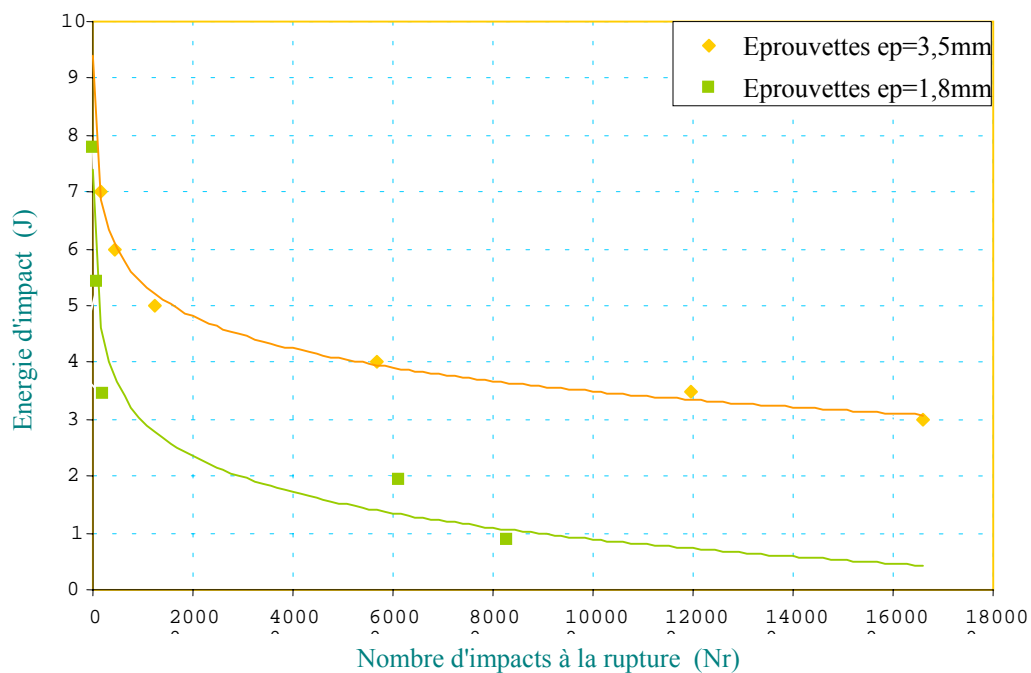


Figure III-10 Courbes de fatigue de deux types d'éprouvettes d'épaisseurs différentes (1.8 et 3.5 mm).

pour un niveau d'énergie supérieure à 6 J (éprouvettes d'épaisseur 3,5 mm) et supérieure à 4 J (éprouvettes d'épaisseur 1,8 mm), le niveau d'endommagement est très rapide et la durée des chocs répétés jusqu'à la perforation des éprouvettes est très courte. Plus le niveau d'énergie est élevé, plus la perforation est imminente ; cas de fatigue oligocyclique.

Pour une gamme d'énergie comprise entre 6 et 4 J (éprouvettes d'épaisseur 3,5 mm) et entre 1,5 et 4 J (éprouvettes d'épaisseur 1,8 mm) le degré d'endommagement va moins vite que précédemment, dans un intervalle de chocs répétés situés entre 5000 et 60000 impacts. Plus le niveau d'énergie diminue, plus la propagation des dommages ralentit ; cas de fatigue d'endurance limitée.

Pour un niveau d'énergie inférieure à 4 J (éprouvettes d'épaisseur 3,5 mm) et inférieure à 1,5 J (éprouvettes d'épaisseur 1,8 mm) la courbe de fatigue (Fig. III-10) montre que les paramètres caractérisants l'endommagement des plaques vont progresser d'une manière très lente jusqu'à la rupture. En effet, cette phase est située dans un intervalle compris entre 60000 et 170000 impacts, décrite par la pente d'une droite de coefficient directeur tendant vers 0 lorsque le nombre d'impacts est très élevé ; cas de fatigue d'endurance illimitée qu'on appelle aussi zone de sécurité. Ce résultat nous permet de conclure qu'à partir d'une certaine valeur d'énergie d'impact, le matériau impacté n'atteindra jamais la rupture, résultat prouvé par Lhymn [3].

Le graphe représenté par la figure III-11 peut être assimilé au diagramme d'endurance ou à la courbe de Wöhler, si l'amplitude maximale de la contrainte (σ) est remplacée par l'énergie d'impact (E) et mettre le nombre de cycles à rupture à l'échelle logarithmique.

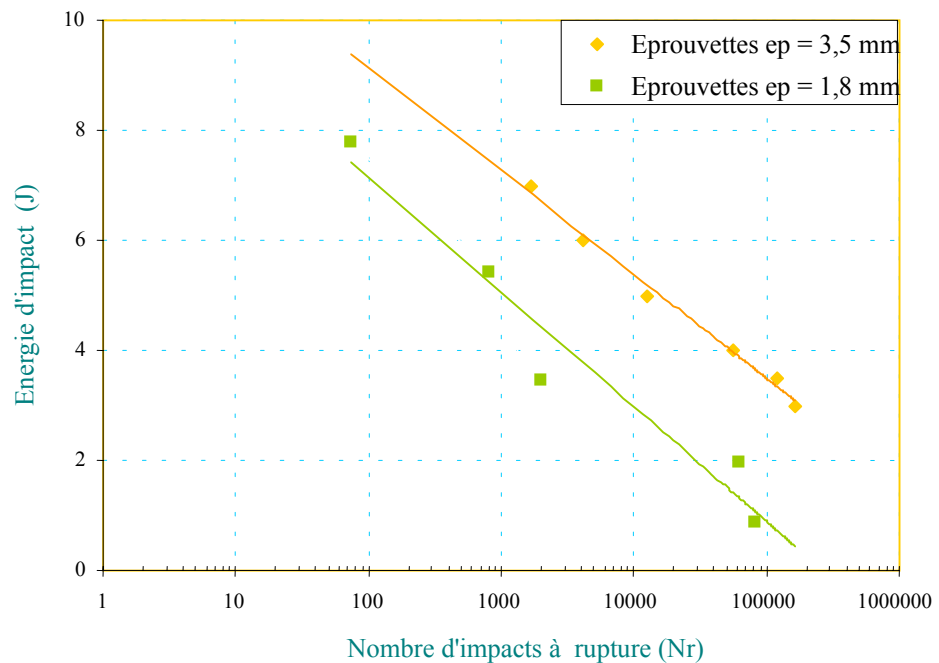


Figure III-11 Courbes de fatigue en échelle logarithmique.

L'effet de l'énergie d'impact sur le nombre d'impacts à rupture est significatif comme montré dans les figures (III-10 et III-11) cela indique que le nombre d'impacts à rupture varie inversement avec l'énergie d'impact.

Précisons toutefois que les points expérimentaux de la durée de vie en fatigue par chocs semblent suivre une courbe logarithmique (Figure III-10).

Ce résultat représenté par les courbes des figures (III-10 et III-11), est fort intéressant, puisqu'on peut à priori appliquer tout ce qu'on connaît sur la fatigue classique au cas de la fatigue par choc, en tenant compte des spécificité de ce type d'essais particulier.

III-3-1 Relation entre l'énergie d'impact cumulée et le nombre d'impacts à rupture (N_r).

La figure (III-12) montre que pour les forts niveaux d'énergie, de la gamme d'énergie sélectionnée, une faible énergie d'impact cumulée est suffisante pour rompre le matériau au bout d'un nombre d'impacts réduit.

Plus l'énergie d'impact est petite, et plus les plaques composites ont tendance à ne jamais se rompre, malgré la grande énergie cumulée par le matériau.

Cette zone d'endurance illimitée est représentée par l'asymptote horizontale en fin de courbe.

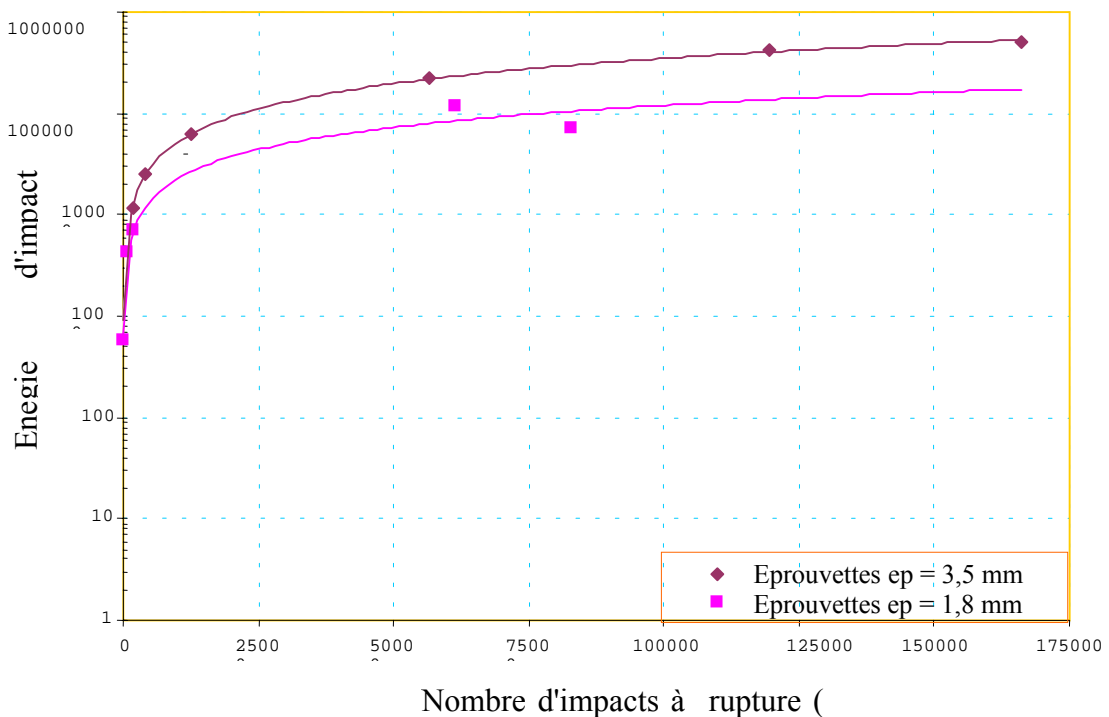


Figure III-12 Rupture des plaques en fonction de l'énergie d'impact cumulée et le nombre d'impacts à la rupture.

III-3-2 Représentation mathématique de la courbe d'endurance

L'allure générale du diagramme (E-N_f) a déjà été décrite dans la figure (III-10) dont E est l'énergie d'impact appliquée à chaque éprouvette. Comme nous l'avons déjà précisé auparavant en remplaçant (σ) par (E), La courbe de fatigue obtenue est une loi puissance comme c'est le cas des courbes de Whöler.

$$E = A.N^n \quad (1)$$

A et n sont des constantes dépendant du matériau qu'on pourrait déterminer à partir des points expérimentaux obtenus aux essais de fatigue par chocs l'équation décrite en (1) peut s'écrire aussi :

$$\text{Log } E = \text{Log } (A . N^n) \Rightarrow \text{Log } E = \text{Log } (A) + n.\text{Log } (N) \quad (2)$$

En procédant au changement de variable suivant, on obtient :

$$Y = a + b.X \quad \text{avec} \quad a = \text{Log } (A) \quad ; \quad b = n \quad ; \quad X = \text{Log } (N) \quad \text{et} \quad Y = \text{Log } E$$

Le tracé de la fonction $\text{Log } (E) = f(\text{Log } (N))$ (Fig.III-13) nous permet de déterminer les constantes a et b.

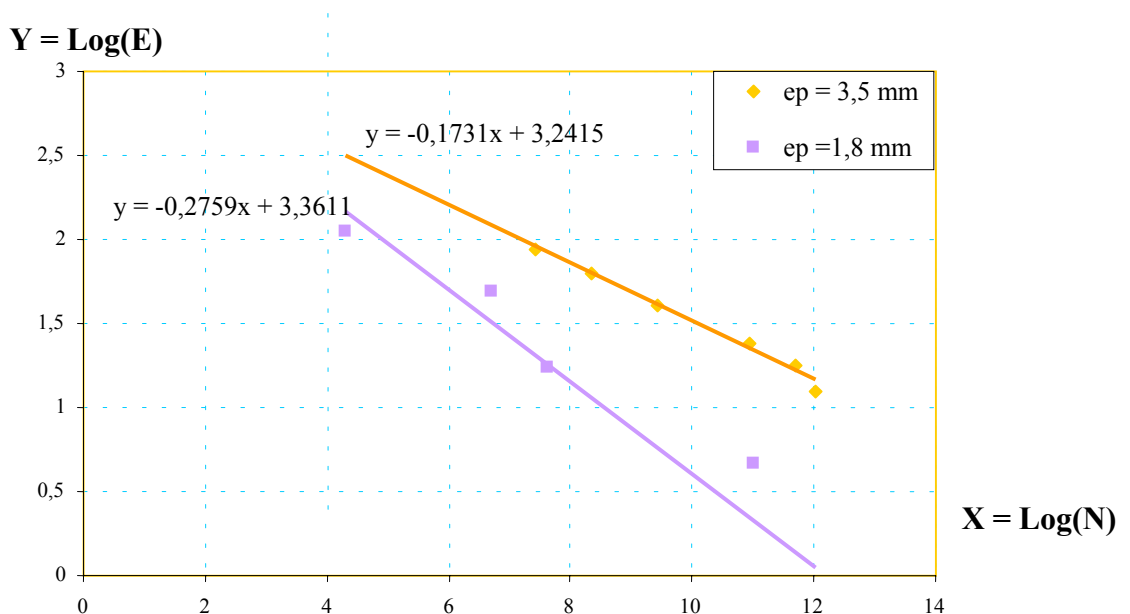


Figure III-13 Détermination des constantes A et n.

Pour les éprouvettes d'épaisseur 3.5 mm :

$$a = \text{Log}(A) = 3,2415 \quad \Rightarrow \quad A = 25,572$$

$$b = n = -0,1731 \quad \Rightarrow \quad n = -0,1731$$

La fonction de Whöler s'écrit alors $E = 25,572 \cdot N^{0.1731}$ (3)

Pour les éprouvettes d'épaisseur 1.8 mm :

$$a = \text{Log}(A) = 3,3611 \quad \Rightarrow \quad A = 28,820$$

$$b = n = -0,2759 \quad \Rightarrow \quad n = -0,2759$$

La fonction de Whöler s'écrit alors $E = 28,820 \cdot N^{0.2759}$ (4)

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail que nous venons d'élaborer avait comme objectif principal, la mise en service de la machine des essais de fatigue par chocs et d'entamer ensuite les essais de fatigue par chocs sur un matériau composite afin d'essayer de comprendre quelques phénomènes concernant l'endommagement des plaques sous chocs répétés .

Ce type d'essai parmi tant d'autres essais de comportement à long terme, (fatigue dynamique, fluage, fissuration sous contraintes...) génère généralement des données nécessaires aux calculs de conception d'ingénieurs et la prévision de la durée de vie, malheureusement encore trop rarement disponible dans la littérature technique.

Des résultats expérimentaux ont été obtenus, une analyse phénoménologique des différents dommages en fonction du nombre d'impacts, d'une part et de l'énergie d'impact d'autre part, on a ensuite montré l'influence du nombre d'impacts sur l'évolution du cratère qui augmente de dimensions (diamètre et profondeur) avec les impacts. Dans la face non impactée, des fissures longitudinales et transversales se développent en plus d'un délaminage apparent de forme circulaire.

Dans notre étude un comportement de fatigue classique a été montré. En effet, le tracé de la courbe de fatigue ; énergie d'impact en fonction du nombre d'impacts à rupture (représentant la durée de vie) fait ressortir une courbe similaire aux courbes de Wöhler, obéissant à une loi puissance.

Les résultats obtenus représentent une grande importance pour la communauté scientifique, et constituent un petit pas vers l'avant, si on sait que peu de travaux ont été réalisés dans ce domaine, sachant néanmoins que comprendre l'endommagement des composites sous fatigue par chocs reste toujours un phénomène complexe aux multiples facteurs d'influence donc une attention toute particulière doit être portée à la production en laboratoire de toutes les conditions d'utilisation.

Rappelons encore une fois que ces essais sont encore peu pratiqués mais se développent à un rythme tel que l'on peut espérer voir apparaître les caractéristiques correspondantes dans les catalogues et banques de données des multiples nuances commerciales de polymères industriels dans un proche avenir.

D'une manière générale, il faut savoir que le but des essais de fatigue dynamique est de définir quantitativement la limite d'endurance d'un matériau soumis à une sollicitation périodique, c'est à dire l'amplitude maximale qu'il peut supporter indéfiniment, sans rupture apparente. En fait, il s'agit souvent d'une limite pratique ou conventionnelle pour laquelle la rupture n'intervient qu'après un certain nombre de cycles qui peut être imposé dans la durée de vie en utilisation ou, le plus souvent, par l'appareillage d'essai.

En perspective des résultats obtenus une suite pourra être envisagée et notamment en ce qui concerne l'évolution de la microstructure et les propriétés en cours de fatigue par chocs et plus particulièrement, la variation de la rigidité, la variation de la résistance résiduelle et l'évolution des fissures internes après fatigue par chocs.

ANNEXE

A1- Matrice en résine polyester

- Application :

Les résines AROPOL G120 sont utilisées pour l'application manuelle, la projection simultanée et l'injection.

Elles sont plus particulièrement recommandées pour la fabrication de bateaux et la réalisation de pièces industrielles.

- Conditionnement :

Fûts non consignés ou camion citerne.

- Stockage :

Stockage à 20° C maximum, à l'abri de la lumière, pendant 6 mois maximum

Une durée de stockage plus longue ou des conditions de stockage ne tenant pas compte des précédentes recommandations peuvent quelque fois modifier les propriétés de la résine (viscosité ou temps de gel par exemple) .

- Caractéristiques physiques

| - Propriétés de la résine non réticulés AROPOL G 120 | Valeur Moyenne | Unité | Méthode interne |
|---|-----------------------|----------------------|------------------------|
| Viscosité à 23° C - Brookfield RV T 2/10 rpm | 280 | | D 005 |
| - Acidité | 24 | mg KOH / g | D 001 |
| - Teneur en styrène | 38 | % | D 003 |
| - Densité | 1,1 | Kg / dm ³ | QC 16 |
| - Réticulation à 23 ° C ⁽¹⁾ temps de gel | 20 | Min. | D 006 |

⁽¹⁾ - 100 g de résine + 1% peroxyde méthyle coton + 1% octoate de cobalt.

| - Propriétés de la résine non réticulée AROPOL G 120 | Valeur | Unité | Méthode |
|---|---------------|--------------|----------------|
| - Dureté | 45 | Barcol | ASTM D 2583 |
| - Température de déformation sus charge (HDT, 1,81 Mpa) | 68 | °C | ISO 75 |
| - Résistance à la flexion | 100 | Mpa | ISO 178 |
| - Module de flexion | 4000 | Mpa | ISO 178 |
| - Charge de rupture en traction | 55 | Mpa | ISO 527 |
| - Module de traction | 3600 | Mpa | ISO 527 |
| - Allongement à la rupture | 2,0 | % | ISO 527 |
| - Absorption d'eau | | | |
| - 24 heures | 19 | mg/échant | ISO 62 |
| - 28 jours ⁽²⁾ | 90 | mg/échant | ISO 62 |

⁽²⁾ Echantillon 50 x 50 x 4 mm

A2- Caractéristiques du variateur de vitesse et le moteur

Le moteur : de marque ABB MOTORS

$P = 1.1/1.3 \text{ KW}$ - $N_M = 1410 \text{ à } 1700 \text{ tr/mn}$ -

$U = 380-420 / 440-480 \text{ V (montage étoile)}$ pour $I = 2.9/2.8 \text{ A}$

$U = 220-420 / 250-280 \text{ V (montage triangle)}$ pour $I = 5/4.8 \text{ A}$

$\text{Cos } \varphi = 0.73 \text{ à } 0.79.$

Le variateur de vitesse : de marque ALTIVAR-Télemécanique

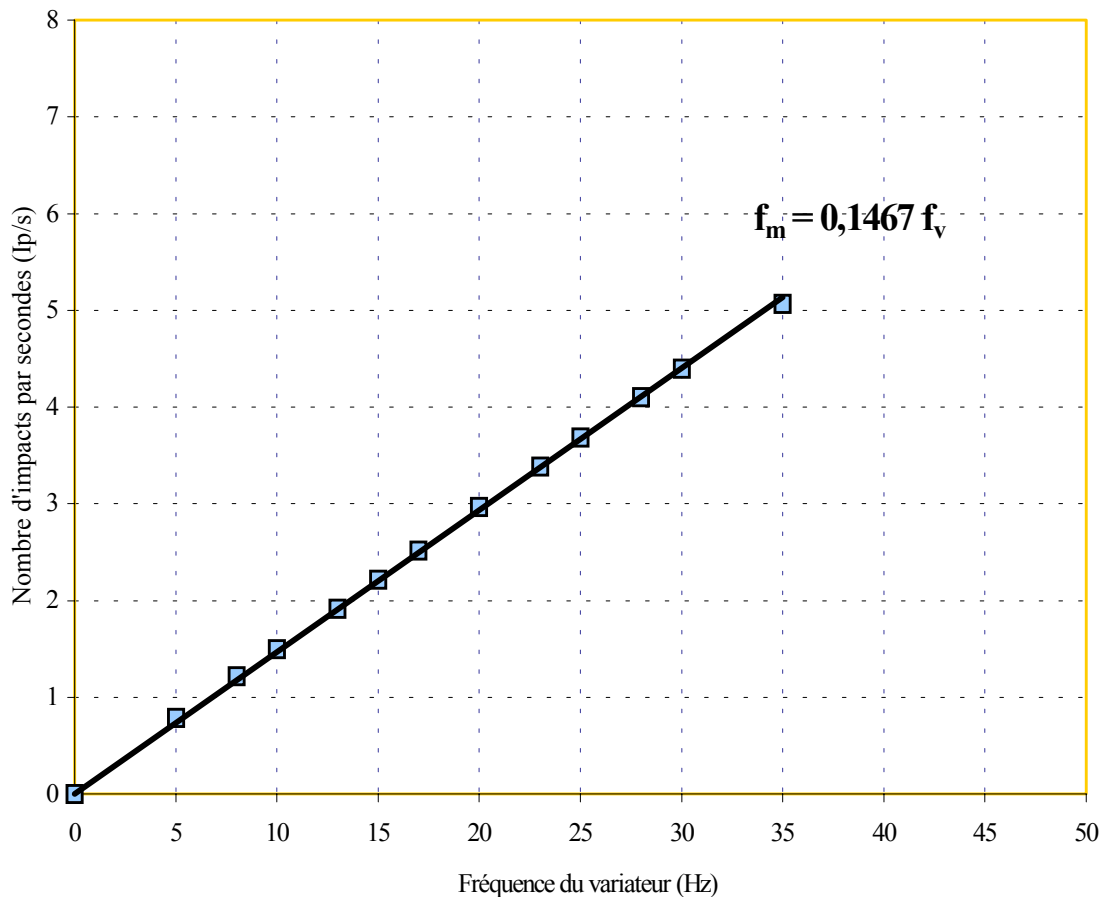
- Il comprend :

- Une prise d'alimentation secteur (avec fréquence réseau 50 Hz)
- Câbles destinés à l'alimentation du moteur à une fréquence réglable de 0 à 50 Hz
- Bouton marche Arrêt
- Potentiomètre pour varier la valeur de la fréquence
- Afficheur indiquant la valeur de la fréquence .

A3- Valeurs des fréquences de la machine en fonction des fréquences du variateur de vitesses

| Fréquence du variateur -hz- | Nombre d'impacts par minute | Fréquence de la machine -hz- |
|--|--|---|
| 5 | 47 | 0.783 |
| 8 | 73 | 1.216 |
| 10 | 90 | 1.5 |
| 13 | 115 | 1.916 |
| 15 | 133 | 2.216 |
| 17 | 151 | 2.516 |
| 20 | 178 | 2.966 |
| 23 | 203 | 3.383 |
| 25 | 221 | 3.683 |
| 28 | 246 | 4.1 |
| 30 | 264 | 4.4 |
| 35 | 304 | 5.066 |

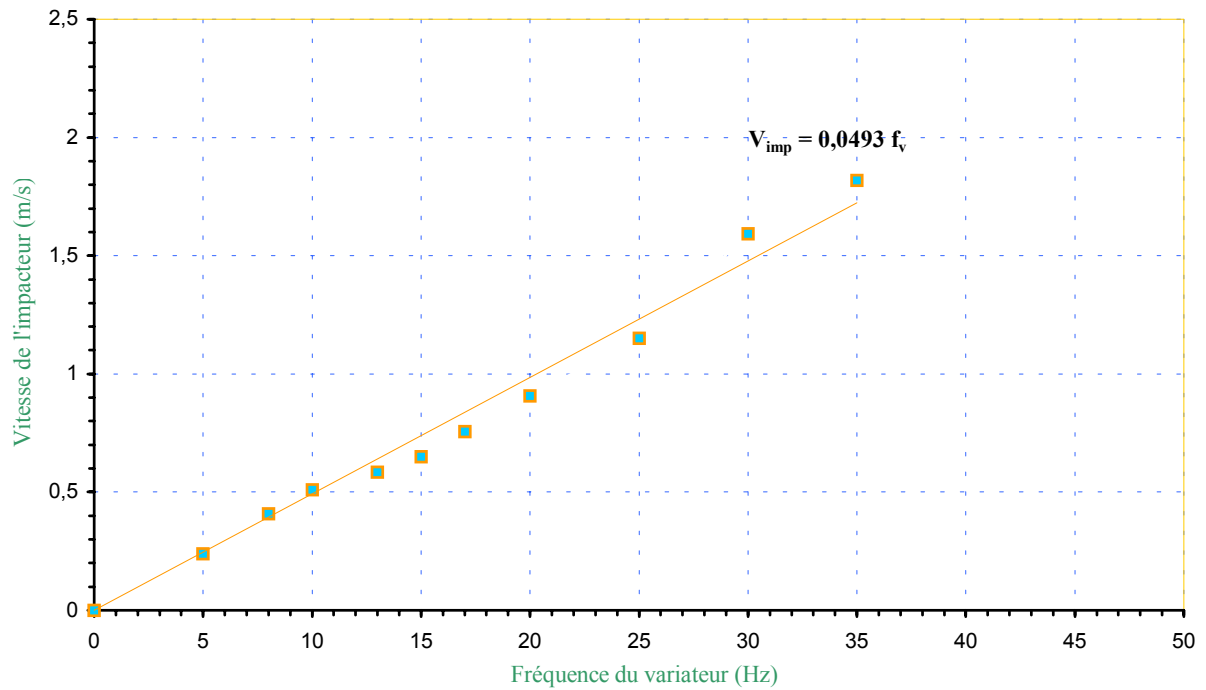
A4- Courbe représentant la fréquence de la machine en fonction de la fréquence du variateur de vitesse



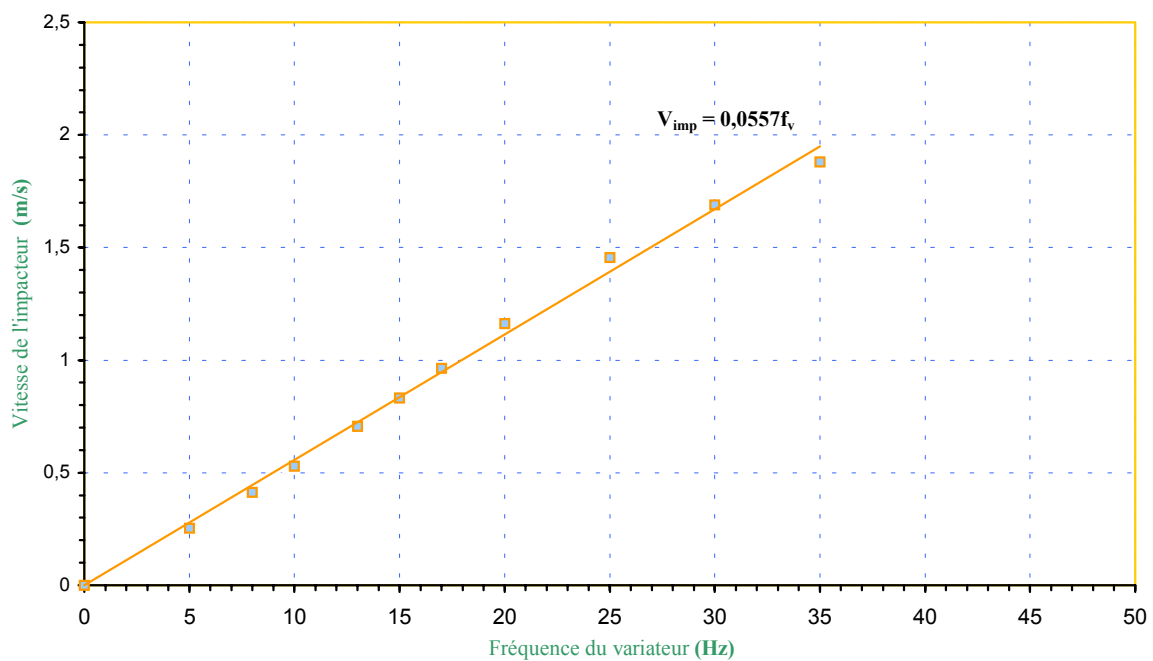
A5- Amortisseur de chocs

Nous constatons que lorsque qu'il y' a absence de l'amortisseur de chocs, la vitesse d'impact prend des valeurs différentes en augmentant le nombre d'impacts, bien que la fréquence du variateur est inchangée. Les essais de fatigue par chocs ne pouvant être réalisés dans ces conditions car l'énergie ne peut être constante pendant le même essai, il est donc impératif de monter un amortisseur de chocs (en fin de course de l'impacteur) qui servira de régulateur de chocs, puisque celui est auto compensé amortissant les chocs selon la vitesse de rebond de l'impacteur voir courbes (A5-1 et A5-2).

A5-1- Vitesse de l'impacteur en fonction de la fréquence du variateur de vitesses (sans présence de l'amortisseur de chocs)



A5-2 Vitesse de l'impacteur en fonction de la fréquence du variateur de vitesse (avec présence de l'amortisseur de chocs)



**A7- Tableau récapitulatif représentant tous les paramètres
caractérisant la machine de fatigue par chocs**

| Energie d'impact (*) - J - | Fréquence du variateur de vitesse (*) - Hz - | Fréquence de la machine - Hz - | Vitesse d'impact - m/s - |
|-------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 10.75 | 1.577 | 0.598 |
| 1.5 | 13.17 | 1.932 | 0.733 |
| 2 | 15.21 | 2.231 | 0.847 |
| 2.5 | 17 | 2.494 | 0.947 |
| 3 | 18.625 | 2.732 | 1.037 |
| 3.5 | 20.12 | 2.951 | 1.120 |
| 4 | 21.51 | 3.155 | 1.198 |
| 4.5 | 22.81 | 3.346 | 1.27 |
| 5 | 24.045 | 3.527 | 1.34 |
| 5.5 | 25.22 | 3.7 | 1.4 |
| 6 | 26.35 | 3.865 | 1.467 |
| 6.5 | 27.415 | 4.022 | 1.527 |
| 7 | 28.15 | 4.13 | 1.538 |
| 7.5 | 29.45 | 4.32 | 1.64 |
| 8 | 30.415 | 4.462 | 1.69 |
| 8.5 | 31.35 | 4.6 | 1.746 |
| 9 | 32.26 | 4.732 | 1.797 |
| 9.5 | 33.144 | 4.862 | 1.846 |
| 10 | 34 | 4.987 | 1.894 |
| 10.5 | 34.845 | 5.111 | 1.94 |
| 11 | 35.66 | 5.23 | 1.986 |
| 11.5 | 36.47 | 5.35 | 2.031 |
| 12 | 37.25 | 5.46 | 2.075 |
| 12.5 | 38.02 | 5.577 | 2.117 |
| 13 | 38.77 | 5.687 | 2.16 |
| 13.5 | 39.51 | 5.796 | 2.2 |
| 14 | 40.23 | 5.9 | 2.24 |
| 14.5 | 40.95 | 6 | 2.28 |
| 15 | 41.65 | 6.11 | 2.32 |
| 15.5 | 42.33 | 6.21 | 2.357 |
| 16 | 43.01 | 6.31 | 2.395 |
| 16.5 | 43.68 | 6.407 | 2.433 |
| 17 | 44.34 | 6.5 | 2.47 |
| 17.5 | 44.98 | 6.598 | 2.505 |
| 18 | 45.62 | 6.692 | 2.541 |
| 18.5 | 46.25 | 6.78 | 2.576 |
| 19 | 46.87 | 6.875 | 2.61 |
| 19.5 | 47.48 | 6.965 | 2.644 |
| 20 | 48.09 | 7.05 | 2.68 |
| 20.5 | 48.69 | 7.14 | 2.712 |
| 21 | 49.28 | 7.23 | 2.745 |
| 21.5 | 49.86 | 7.31 | 2.777 |
| 22 | 50.43 | 7.4 | 2.808 |

(*) $R_G = 60 \text{ mm}$ et $M = 5.575 \text{ kg}$.

Références bibliographique

- [1] David A. Wyrick and Donald F. Adams. “ Residual strength of a carbone/epoxy composite material subjected to repeated impact.” *Journal of composite Materials*, volume 22, August 1988.
- [2] B. P. Jang, W. Kowbel and B. Z. Jang “Impact behavior and impact-fatigue testing of polymer composites.” *Composites Science and technology*, 44, 1992, pp. 107-118
- [3] Chang Lhymn “Impact fatigue of PPS / glass composite, Part I Theoretical analysis.” *Journal of Materials Science letters* 4, 1985, pp. 1221-1224.
“Impact fatigue of PPS / glass composite - Microscopy.” *Journal of Materials Science, letters* 4, 1985, pp. 1429-1433.
- [4] A. Mittelman, “Low-energiy repetitive impact in carbon-epoxy composite” *Journal of Materials Science*, 27, 1992, pp. 2458-2462.
- [5] K. Azouaoui, S. Rechak, Z. Azari, S. Benmedakhen, A. Laksimi and G. Pluinage. “Modelling of damage and failure of glass/epoxy composite plates subject to impact fatigue.” *International Journal of Fatigue* 23 (2001), pp. 877-885.
- [6] P. Yang, Y. liu and F. Xu “Low-cycle impact fatigue of SiC_w / 7475Al composite” *Journal of Materials Engineering and Performance*, volume 7(5) October 1998, pp. 677-681.
- [7] Cantwel. W. J .P T. Curtis and J. Morton “An assessment of the impact performance of CFRP reinforced with high-strain carbone fibres “, *composite scienceand technology*, 25 : pp. 133-148
- [8] Levin, K. “ Effect of Low-Velocity Impact on Compressive Strength of Quasi-Isotropic Laminate, “ *Proceeding of the American Society of Composites, First Technical Conference*, pp. 313-326 (Octobre 1986).
- [9] Caprino, G., I. CrivelliVisconti et A D’Ilio. “ Elastic Behavior of Composite Structures Under Low Velocity Impact,” *Composites*, 15 : pp. 231-234, (1984).
- [10] Wardle, M. W. et E. W. Tokarsky. “Drop Weight Impact Testing of Laminates Reinforced with Kevlar Aramid Fiber, E-Glass, et Graphite,” *Composites Technology Review*, 5(1) : pp. 4-10, (Spring 1983)
- [11] Winkel, J. D. et D. F. Adams. “Instrumented Drop Weight Impact Testing of Cross-Play and Fabric Composites,” *Composits*, 16 : pp. 268-278, (1985).

- [12] Chaturvedi, S. K. et R. L. Sierakowski, “ Effects of Impactor Size on Impact Damage-Growth and Residual Properties in an SMC-R50 Composites,” *J. of Composite Materials*, 19 : pp. 100-113, (1985).
- [13] Lal , K. M. “ Relationship Between Phase Difference et Coefficient of Restitution During Low Velocity Foreign Object Transverse Damage of Composite Plate , *Composites Technology Review*, 6(3) : pp. 109-111, (Fall 1984).
Lal , K. M. “Low Velocity Transverse Impact Behavior of 8 ply, Graphite-Epoxy Laminate, “*J. of Reinforced Plastics and Composites*, 2 : pp. 216-225, (1986).
- [14] Rotem A. “ The strength of laminated composite materials under repeated impact loading”. *Journal of Composites Science and technol. Res.* , Summer (1988), 74-9.
- [15] Prank. A. S. and Tamuz, V. P., Fiber-glass laminate fatigue under the effect of repeated shock loas. *Mekh. Polym*, (4) (1969) 195-9.
- [16] C. Bathias, “Fatigue des matériaux composites à matrice polymère et fibres longues.” *Technique de l’ingénieur, traité généralités, matériaux composites A 7760* p. 1-11. (2001)
- [17] Mankowsky VA. Non-linear parametric creep function. *Mech Compos Mater* 1982 ; 4 : 579-84 [in Russian].
- [18] P. Krawczak, “Caractéristiques Instantanées.” *Technique de l’ingénieur, traité Plastiques et Composites AM 3 510*, p. 1-19. (2001)
- [19] P. Krawczak, “Caractéristiques à long terme et ténacité.” *Technique de l’ingénieur, traité Plastiques et Composites AM 3 511* p. 1-29. (2001)
- [20] A. Negrier, et J-C. Rigal “Présentation des matériaux composites.” *Technique de l’ingénieur, traité Généralités A 7 790* p. 1-19. (2001)
- [21] J-P. Favre “Interface dans les composites fibreux.” *Technique de l’ingénieur, traité Généralités A 7 765* p 1-21. (2001)
- [22] P. Odru “Calcul et conception des structures composites.” *Technique de l’ingénieur, traité Généralités A 7 792* p. 1-24. (2001)
- [23] Y. Chevalier “Comportements élastique et viscoélastique des composites.” *Technique de l’ingénieur , traité Généralités A 7 750* p. 1-18. (2001)

[24] Y. Chevalier "Critère de rupture Approche macroscopique." Technique de l'ingénieur, traité Généralités A 7 755 p. 1-16. (2001)

[25] Y. Chevalier "Micromécanique des composites. Prévisions en élasticité, en viscoélasticité et à la rupture." Technique de l'ingénieur , traité Généralités A 7 780 p. 1-19. (2001)

[26] M. Chatain "Matériaux composites : Présentation générale." Technique de l'ingénieur, traité Plastiques et Composites. AM 5 000 p. 1-11. (2001)

[27] Daniel Gay " Matériaux composites" - collection matériaux 4^e édition revue et augmentée. HERMES, Mars 1997.