

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DU 8 MAI 1945

SPÉCIALITÉ : Génie mécanique

Par :

Wahid BOUKHAROUBA

COMPORTEMENT MECANIQUE DES MATÉRIAUX COMPOSITES SANDWICHS AVEC AME EN NID D'ABEILLE

JURY

| | | |
|--------------------------|-------------|------------|
| BEZAZI Abderrezak | Professeur, | Rapporteur |
| OUELAA Nouredine | Professeur, | Président |
| SEREIR Zouaoui | Professeur, | Examineur |
| REDJEL Bachir | Professeur, | Examineur |
| NECIB Brahim | Professeur, | Examineur |

2014

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM) de l'Université **8 Mai 1945 du Guelma**.

Tout d'abord, je tiens à remercier vivement, professeur **A. BEZAZI** directeur de thèse pour son soutien qu'il n'a cessé de m'apporter, sa disponibilité et ses précieux conseils qui ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie aussi Monsieur **F. Scarpa** pour son aide, sa collaboration aussi efficace qu'agréable tout au long de ce travail.

Je voudrais remercier également le Professeur **N. OULEAA** d'avoir accepté de présider le jury, ainsi que les professeurs **Z.SEREIR**, **B.REDJEL** et **B.NECIB**, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de l'examiner.

Je remercie Monsieur le professeur **I. Abdellatif** et le docteur **F. Zairi** de l'université de polytechnique de Lille, pour leur aide apportée à mettre en place le dispositif expérimental pour les essais de compression.

Je remercie plus particulièrement Mme N. MAIZI et Mme M. BEB pour l'aide qu'elles m'ont apportée.

Enfin, je remercie mes parents, mes frères et ma femme et tous les autres membres de ma famille pour leur soutien, sans quoi ce travail n'aurait pu voir le jour.

Publications et Communication

En plus du mémoire de thèse, ces travaux ont conduit aux publications et communications suivantes :

- 1. Wahid Boukharouba, Abderrezak Bezazi, Fabrizio Scarpa,** Evaluation Par Eléments Finis Des Propriétés Mécaniques De Panneaux Composites Sandwich Sollicité En Compression. *1er Congrès International des Composites et des Matériaux Avancés Khenchela_03* et 04 Mars (2014).
- 2. Wahid Boukharouba, Abderrezak Bezazi, Fabrizio Scarpa,** Identification and prediction of cyclic fatigue behaviour in sandwich panels, *Measurement*, 53, 161-170 (2014)
- 3. w. boukharouba, a. bezazi, f. scarpa,** caractérisation expérimentale du comportement mécanique en statique et en fatigue des matériaux composites sandwichés. *CAM 2011*, November 14 – 17 (2011).
- 4. A. Bezazi, W. Boukharouba, and F. Scarpa,** Mechanical properties of auxetic carbon/epoxy composites: static and cyclic fatigue behavior. *Phys. Status Solidi B* 246, No. 9, 2102–2110 (2009).
- 5. E. H. Harkati, A. Bezazi, W. Boukharouba, and F. Scarpa,** Influence of carbon fibre on the through-the-thickness NPR behavior of composite laminates *Phys. Status Solidi B* 246, 2112 (2009).

Tables de matières

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre 1 Analyse bibliographique | |
| 1.1 Introduction..... | 4 |
| 1.2 Matériaux sandwichs et leurs constituants..... | 5 |
| 1.2.1 Introduction..... | 5 |
| 1.2.2 Peaux stratifiées..... | 5 |
| 1.2.3 Âmes..... | 7 |
| 1.2.4 Adhésifs..... | 22 |
| 1.2.5 Particularités liées à l'allègement des structures..... | 22 |
| 1.3 Applications..... | 23 |
| 1.4 Pourquoi la fatigue est importante..... | 24 |
| 1.5 Endommagement par fatigue..... | 26 |
| 1.6 Effets des paramètres expérimentaux..... | 29 |
| 1.6.1 Effets de la fréquence..... | 29 |
| 1.6.2 Effet de la forme d'onde..... | 32 |
| 1.7 Comportement mécanique des matériaux composites sandwichs sous flexion..... | 33 |
| 1.7.1 Comportement mécanique en statique..... | 34 |
| 1.7.2 Comportement mécanique en fatigue..... | 36 |
| 1.7.2 Energie dissipée et amortissement en fatigue..... | 37 |
| 1.8 Conclusion..... | 39 |
| Chapitre 2 Analyse du comportement mécanique en statique et en fatigue statique des composites sandwichs | |
| 2.1 Introduction..... | 40 |
| 2.2 Comportement des matériaux sandwichs..... | 41 |
| 2.2.1 Introduction..... | 41 |
| 2.2.2 Evaluation des performances en statique des matériaux sandwichs..... | 41 |
| 2.2.2.1 Mise en œuvre..... | 41 |
| 2.2.2.2 Procédures expérimentales..... | 44 |
| 2.2.3 Comportement statique en flexion 3-points..... | 45 |
| 2.2.4 Comportement statique en compression..... | 48 |
| 2.2.5 Observation des endommagements du nid d'abeille Nomex en compression..... | 55 |
| 2.3 Essais de relaxation en flexion 3-Points..... | 58 |
| 2.3.1 Introduction..... | 58 |
| 2.3.2 Protocole d'essais..... | 60 |

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 2.3.3 | Analyse des résultats..... | 60 |
| 2.4 | Conclusion..... | 63 |

Chapitre 3 Analyse du comportement mécanique en fatigue cyclique des panneaux sandwichs en flexion 3-Points

| | | |
|-------|-------------------------------|----|
| 3.1 | Introduction..... | 64 |
| 3.2 | Essais..... | 66 |
| 3.3 | Résultats et discussions..... | 67 |
| 3.3.1 | Rigidité..... | 67 |
| 3.3.2 | Boucles d’hystérésis..... | 70 |
| 3.3.3 | Energie dissipée..... | 78 |
| 3.3.4 | Critère de rupture..... | 80 |
| 3.5 | Conclusion..... | 83 |

Chapitre 4 Modélisation du comportement mécanique des matériaux composites sandwichs en nids-d’abeilles

Partie I

Evaluation par éléments finis des propriétés mécaniques des panneaux composites sandwichs sollicités en compression

| | | |
|-----|------------------------------|----|
| 4.1 | Introduction..... | 84 |
| 4.2 | Etude numérique..... | 87 |
| 4.3 | Modèle Ansys..... | 88 |
| 4.4 | Validation..... | 89 |
| 4.5 | Résultats et discussion..... | 89 |

Partie II

Modélisation du comportement en fatigue cyclique des matériaux composites sandwichs sollicités en flexion 3-Points

| | | |
|-----|-----------------------------|----|
| 4.8 | Introduction..... | 95 |
| 4.9 | Modélisation numérique..... | 97 |

Partie III

Modélisation du comportement en fatigue statique (en Relaxation) des matériaux composites sandwichs sollicités en flexion 3-Points

| | | |
|------|------------------------|-----|
| 4.8 | Introduction..... | 100 |
| 4.9 | modèle de Maxwell..... | 100 |
| 4.10 | Validation..... | 102 |
| 4.11 | Conclusion..... | 106 |

| | | |
|--|---------------------------------|------------|
| | Conclusion Générale..... | 107 |
|--|---------------------------------|------------|

| | | |
|--|---|------------|
| | Références bibliographiques..... | 109 |
|--|---|------------|

| | |
|-----------------------|-----|
| Résumé | 116 |
| Abstract | 117 |

Introduction générale

Introduction générale

Les matériaux sandwichs connaissent un essor important, tant dans les applications les utilisant, que dans les technologies les mettant en œuvre. Ils présentent un intérêt pour les applications qui requièrent à la fois rigidité et légèreté, notamment les transports, la marine, le nautisme, l'aéronautique, l'aérospatial, les sports et loisirs, l'industrie lourde, le génie civil et l'armée. Les matériaux sandwichs sont constitués d'une âme, souvent épaisse et de faible masse volumique qui transfère les forces de cisaillement, enserrée entre deux peaux à la fois rigides et minces, qui résistent à des charges de traction et de compression. Du fait que l'on peut modifier la nature des matériaux constitutifs d'âme et de la peau (densité, propriétés mécaniques, physiques et chimiques), il est possible de concevoir des structures adaptées aux applications bien définies. Par exemple, un poids plus faible crée une opportunité pour économiser du carburant ou transporter plus de marchandises. La conception des structures sandwichs de cette manière a certains avantages par rapport à des structures stratifiées en termes de résistance à la flexion avec un poids réduit. La rigidité et la résistance à la flexion sont seulement deux critères de conception à prendre en considération. Autres propriétés d'un panneau sandwich tels que la tolérance aux endommagements, résistance à la compression, résistance à l'absorption d'eau, le comportement à la température et de résistance au feu, isolation thermique et isolations acoustiques sont largement obtenues par des matériaux de base. Cependant, la liaison entre de différents matériaux dans un seul composant crée inévitablement des interfaces ou l'homogénéité peut entraîner des mécanismes de distribution de contrainte et de ruptures complexes.

Lors de la sollicitation en flexion des matériaux sandwichs, la décohésion (décollement) entre la peau et l'âme est l'un des modes d'endommagement observé par de nombreux chercheurs dans le cas des essais statique et de fatigue cyclique en flexion 3-Points ou 4-Points. Cet endommagement peut aussi survenir à la suite des imperfections dans le processus de fabrication, le dégazage de l'âme

en mousse sous l'exposition directe du soleil, soit résulter des charges externes au cours de la vie d'opération, comme l'impact par des objets étrangers, soit encore résulter par la capacité d'absorption d'eau des âmes cellulaires.

La présence de la décohésion affecte le comportement local et global en statique et en fatigue du matériau sandwich. En outre, lors de l'utilisation du matériau sandwich en présence de la décohésion, celle-ci peut se propager et provoquer de nouveaux modes d'endommagement tels que le flambage localisé de la peau, le délaminage de la peau, la fissuration en cisaillement de l'âme, etc. Ces modes d'endommagement peuvent interagir entre eux et aboutir à une défaillance prématurée de la structure en matériau sandwich.

L'objet de ce présent travail est d'analyser le comportement mécanique en statique sous compression et en flexion 3-Points, en fatigue statique (en relaxation) et en fatigue cyclique des matériaux sandwichs. Le matériau composite sandwich considéré dans le présent travail est constitué d'une âme en nids-d'abeille de différentes masses volumiques et de peaux en tissu de fibres de carbone et de résine époxyde. Ce travail se plaçait dans la continuité des travaux déjà réalisés au sein du laboratoire, sur l'analyse du comportement en statique, en fatigue cyclique et en fatigue statique des matériaux composites sandwichs en nids-d'abeille.

Après l'introduction du travail présenté précédemment, le chapitre 1 est consacré à une analyse bibliographique sur les effets de l'endommagement sur le comportement en statique, en fatigue cyclique et fatigue statique des matériaux composites sandwichs. L'accent est porté sur les paramètres qui influent sur la durée de vie en fatigue des matériaux composites sandwichs, des différentes approches de modélisation en fonction des niveaux microscopiques et macroscopiques sont représentées. Cette revue bibliographique a débuté par une exposition plutôt générale du matériau sandwich (différents constituants). Ensuite, le comportement mécanique en flexion des matériaux sandwichs et les principaux mécanismes d'endommagement d'une structure sandwich sont exposés.

Le chapitre 2 est consacré à la caractérisation des propriétés mécaniques en statique sous l'essai de flexion 3-Points et en compression pour trois différentes configurations (Plat, configuration L et W). La dernière partie du chapitre est consacrée à l'analyse du comportement en fatigue statique de relaxation sur les

mêmes éprouvettes testées en flexion 3-Points. Ces essais sont conduits en contrôlant le signal déplacement qui est de type sinusoïdal avec une fréquence de 2Hz.

Le chapitre 3 est consacré à l'analyse du comportement en fatigue cyclique. Les essais de fatigue sont conduits en contrôlant le signal déplacement qui est de type sinusoïdal avec une fréquence de 2 Hz. la perte de rigidité, boucles d'hystérésis et l'énergie dissipée sont calculés à partir des données expérimentales en contrôle déplacement en fonction du nombre de cycles pour différents niveaux de chargements.

Le chapitre 4 est consacré à l'analyse par éléments finis du comportement mécanique en compression statique des matériaux sandwichs en fonction de différents paramètres. La seconde partie et consacre sur la modélisation du comportement en fatigue cyclique en flexion 3-Ponts. Les résultats obtenus par cette approche sont comparés à ceux obtenus expérimentalement.

Enfin, les divers résultats obtenus lors de ce travail sont repris dans la conclusion générale.

Chapitre 1

Etudes bibliographique

Chapitre 1

Etude bibliographique

Les matériaux sandwichs connaissent un essor important, tant dans les applications les utilisant, que dans les technologies les mettant en œuvre. Ils sont ainsi largement utilisés dans tous les secteurs industriels et notamment les transports, la marine, le nautisme, l'aéronautique, l'aérospatial, les sports et loisirs, l'industrie lourde, le génie civil et l'armée. Leur consommation ne cesse d'augmenter. Les matériaux sandwichs présentent donc un intérêt pour les applications qui requièrent à la fois rigidité et légèreté. Cependant, les propriétés en statique et fatigue des matériaux composites sandwichs peuvent se dégrader sévèrement par l'apparition de l'endommagement. Une revue bibliographique sur les effets des différents paramètres qui influent sur le comportement en statique, en fatigue cyclique et en fatigue -statique des matériaux composites sandwichs est développée dans ce chapitre. Cette revue débutera avec une exposition plutôt générale de la structure en matériau sandwich (différents constituants), le comportement mécanique en flexion et les principaux mécanismes d'endommagement de ces structures en matériau sandwich. Dans un deuxième temps, l'accent sera mis sur le comportement mécanique en statique et en fatigue cyclique des matériaux composites ayant un endommagement. Finalement, nous présentons les travaux existants sur le comportement en fatigue cyclique et fatigue statique des matériaux composites sandwichs.

1.2 Matériaux sandwichs et leurs constituants

1.2.1 Introduction

Les matériaux sandwichs (Figure. 1.1) sont obtenus à partir de deux peaux, de faibles épaisseurs, constituées de matériaux ayant de très bonnes caractéristiques mécaniques, collées sur une âme beaucoup plus épaisse et constituée d'un matériau très léger et ayant de faibles caractéristiques mécaniques. [1]

La colle ou l'adhésif est le troisième composant du matériau sandwich. C'est ce dernier qui permet un bon assemblage de la structure et une bonne transmission des contraintes d'un milieu à un autre [2]. De part la constitution des matériaux sandwichs, on peut adapter leurs propriétés mécaniques en faisant varier la nature des peaux (identiques ou non) et de l'âme ainsi que l'épaisseur de chacun des constituants [4-7].

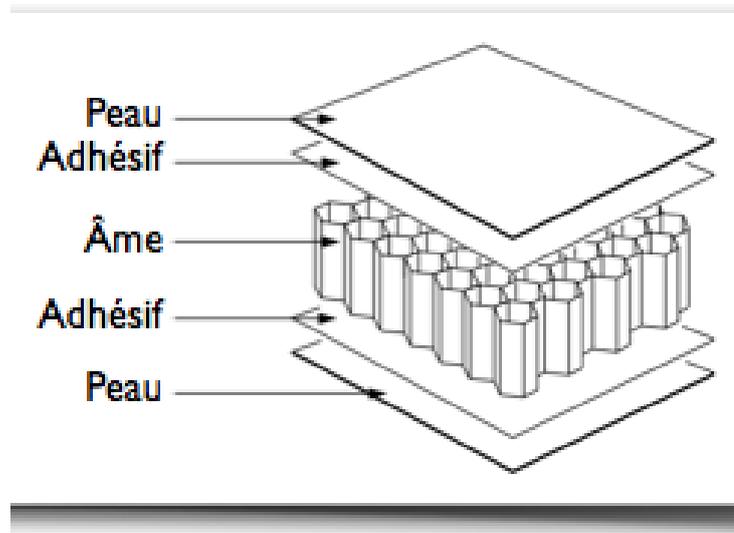


Figure 1.1 Matériau sandwich.

1.2.2 Peaux stratifiées

La stratification est une autre structure couramment rencontrée dans les pièces composites. Dans un stratifié, les fibres sont agencées en couches fines (quelques dixièmes de millimètre) nommées plis, qui sont empilées les unes sur les autres ; après la mise en forme, ces couches seront liées entre elles par l'intermédiaire de la matrice. Au sein d'un pli, les renforts peuvent avoir n'importe quel type de disposition, pourvu qu'elle soit plane :

- Soit l'un des tissus plans décrits ci-dessus (Figure 1.2(a)), ce qui donne un comportement plus ou moins anisotrope selon la proportion de fils dans les deux directions ;
- Soit un mat : les fibres sont disposées "en vrac" sans orientation privilégiée sur quelques couches (Figure 1.2(b)), ce qui donne un comportement quasi-isotrope dans le plan ;

- Soit un tissu unidirectionnel : les fibres sont disposées parallèlement les unes aux autres sur quelques couches (Figure 1.2(c)) et uniquement maintenues dans cette disposition par quelques fils de trame, ce qui donne un comportement fortement anisotrope.

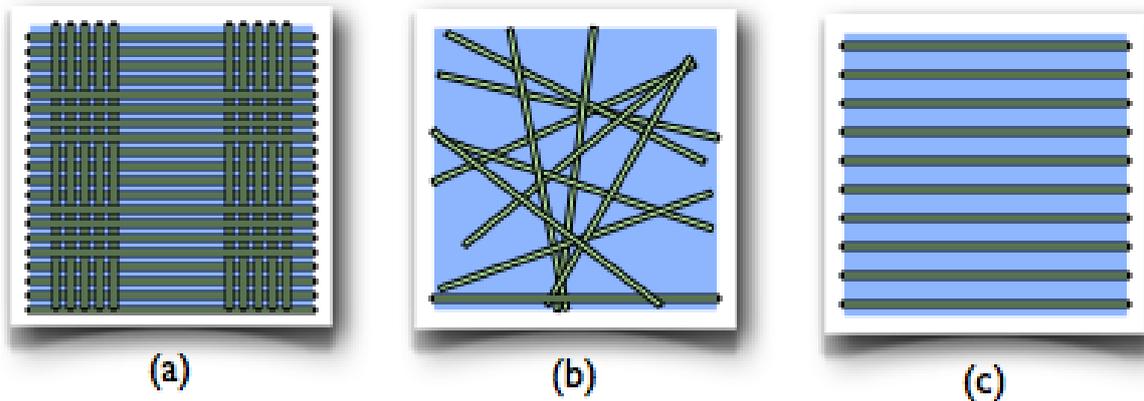


Figure 1.2 Dispositions possibles des fibres dans un pli : (a) tissu plan (ici non équilibré), (b) mat, (c) unidirectionnel [5, 12].

En jouant sur l'ordre et l'orientation des plis (Figure 1.3), il est possible d'adapter finement les propriétés mécaniques du stratifié aux sollicitations extérieures, et donc d'atteindre un haut niveau d'optimisation en mettant la matière là où elle est le plus utile. A l'échelle de la structure, les comportements mécaniques ainsi obtenus peuvent être très complexes, et vont du quasi-isotrope à une anisotropie marquée lorsque l'application le nécessite. Les stratifiés sont globalement moins coûteux à fabriquer que les tissus 3D : en contrepartie, ils sont sujets au délaminage (c'est-à-dire que les plis peuvent se décoller les uns des autres, lorsque la matrice qui les relie se fissure).

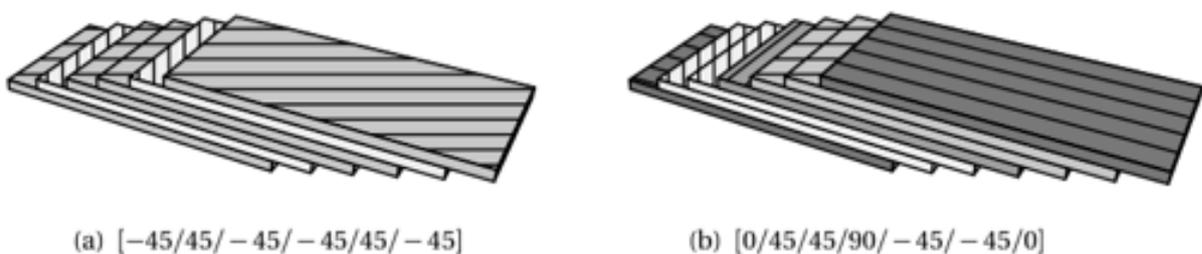


Figure 1.3 Stratifiés à base de plis unidirectionnels [6].

Notons que là encore, cette structure n'est pas spécifique aux composites modernes : les dérivés du bois comme le contreplaqué possèdent souvent une structure stratifiée (Figure 1.4(a)).

Il existe également des stratifiés hybrides tels que le GLARE «Glass Reinforced» utilisé dans l'A380, constitué d'un empilement de fines feuilles d'aluminium alternées avec des plis unidirectionnels de fibres de verre et matrice époxy (Figure 1.3(b)).

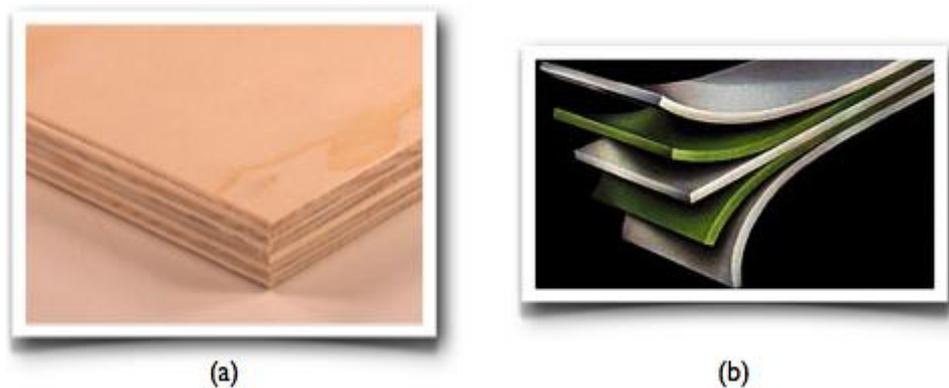


Figure 1. 4 Multi-matériaux stratifiés : (a) contreplaqué, (b) GLARE (aluminium et composite verre/époxy. [7]

1.2.3 Ames

Le rôle principal de l'âme dans le matériau sandwich est de résister aux efforts de cisaillement. Par ailleurs, l'âme doit pouvoir supporter des charges localisées de poinçonnement. Dans les faits, c'est le constituant de l'âme qui permet de classer les différentes structures en matériau sandwich [10].

Parmi les âmes les plus utilisées, citons celles en mousse, en nid d'abeilles et en bois de balsa (figure 1.5):

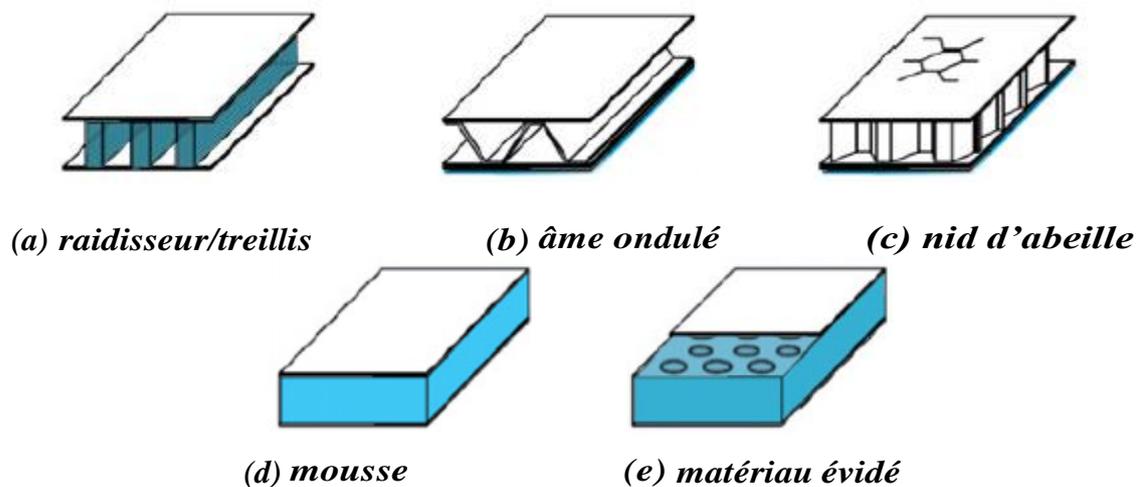


Figure 1.5 Différents types de construction sandwich [10].

– **Les mousses:** ce sont les plus fréquemment utilisées, elles sont produites à partir de polychlorure de vinyle, polystyrène, polyuréthane ou d'autres polymères synthétiques. Elles sont thermo-formables et permettent donc de réaliser des pièces de formes complexes. Leurs propriétés mécaniques sont bonnes, elles adhèrent bien à la résine et absorbent peu d'eau. Néanmoins, leur point faible réside dans une faible résistance à l'impact.

– **Le bois :** il est utilisé pour sa très bonne résistance à la compression notamment pour les supports d'accastillage. Le bois le plus utilisé comme matériau d'âme est le balsa. Les âmes en balsa ont été utilisées pour la première fois dans les années 1940 sur des hydravions. Le bois de balsa est aussi un isolant thermique mais pour conserver cette propriété, il doit être traité avec un produit hydrofuge puisqu'il est très hygroscopique.

– **Le nid d'abeilles :** Une autre famille d'âmes (creuses) regroupe des matériaux constitués de cellules généralement hexagonales espacées faisant penser à un rayon de ruche, d'où l'appellation de « nids d'abeille » (Figure 1.6) ou encore « nida » en abrégé.

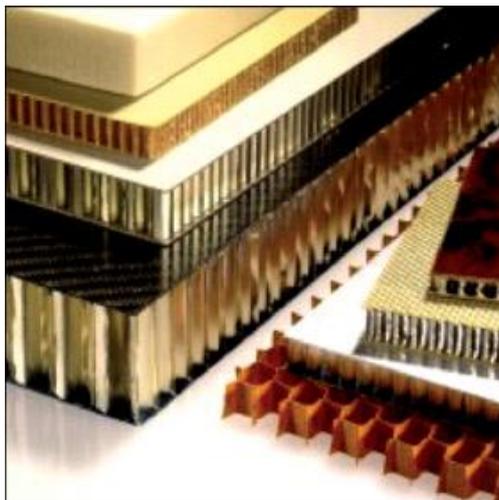


Figure 1.6 Différents exemples de nids d'abeille.

▪ **Modes de fabrication**

Les âmes en nids d'abeille utilisables dans les structures sandwichs couvrent, selon le matériau (papier, thermoplastique, métal, tissu...) constitutif de base, toute une gamme de résistances, rigidités et masses volumiques. Les nids d'abeilles peuvent être mis en œuvre dans des structures composites planes ou incurvées, et ce sans mettre en jeu des efforts mécaniques ou un chauffage excessif.

Les nids d'abeille en thermoplastiques sont en général produits par extrusion (plus rarement par découpe et pliage – Figure 1.7), puis débités à l'épaisseur requise. Les autres nids d'abeille (à base de papier, métal ou tissu) sont fabriqués en plusieurs étapes, soit par expansion, soit par pré-ondulation.

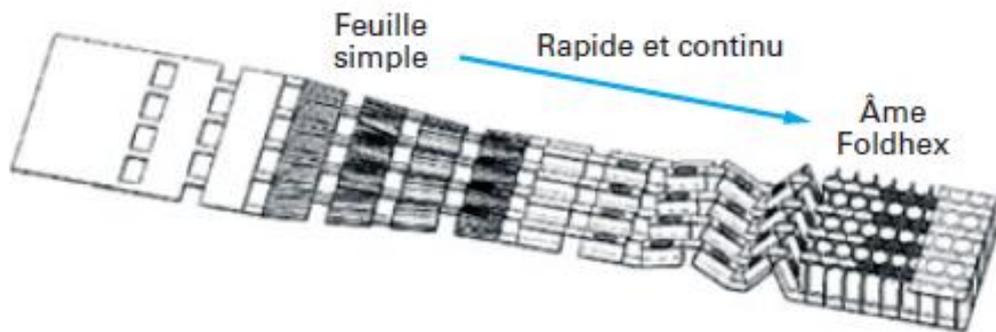


Figure 1.7 Fabrication en continu d'un nid d'abeille thermoplastique par la technologie de découpe et pliage [28].

- La méthode d'expansion est utilisée indifféremment pour fabriquer des nids d'abeille métalliques ou non métalliques. Elle consiste à « imprimer » avec de fines bandes d'adhésif parallèles et positionnées de manière alternative de grands feuillets minces du matériau constitutif (typiquement 1.2 à 2,4 m). Ceux-ci sont ensuite empilés sous une presse à chaud, le temps de la polymérisation de l'adhésif, de manière à former un bloc (Figure 1.8).

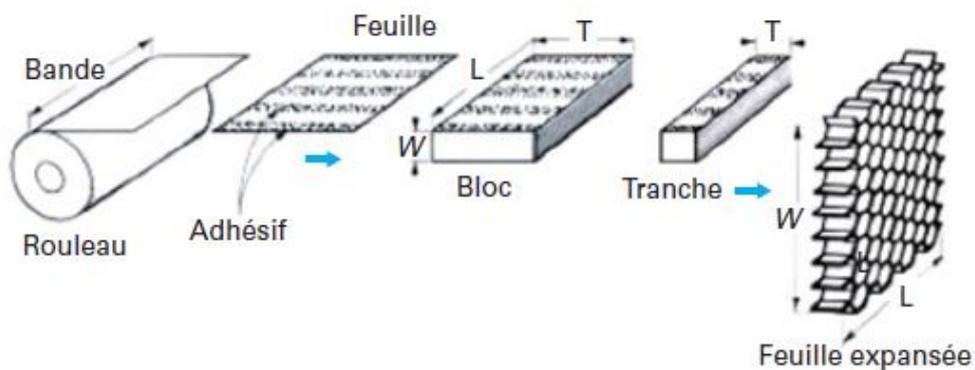


Figure 1.8 Fabrication d'un nid d'abeille par la méthode d'expansion [28,29].

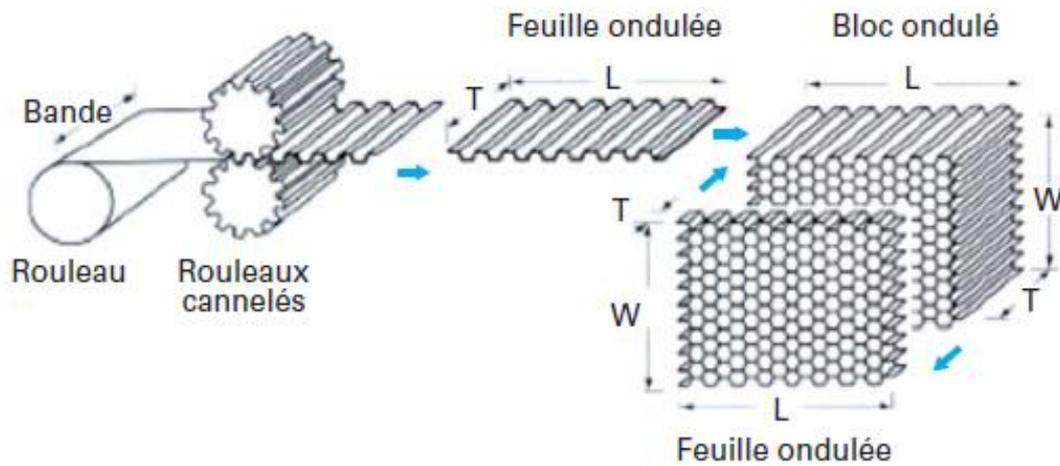


Figure 1.9 Fabrication par la méthode de pré-ondulation d'un nid d'abeille [28, 29].

Dans le cas des nids d'abeille métalliques, l'empilement de feuillets est alors découpé en tranches dans le sens de l'épaisseur, tranches ultérieurement étirées de manière à former une feuille continue de cellules de géométrie hexagonale.

Dans le cas des nids d'abeille en papier ou tissu, l'empilement des feuilles de collées est d'abord précautionneusement étiré de manière à former un large bloc nid d'abeille de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur. Maintenu dans cet état étiré, ce fragile bloc de nid d'abeille est alors trempé dans un bassin de résine, séché et polymérisé dans une étuve. Une fois la résine ainsi imprégnée polymérisée, le bloc a une résistance et une rigidité suffisantes pour être débité en tranches à l'épaisseur requise. Du fait même du mode de fabrication par collage, un nid d'abeille présentera des propriétés différentes dans les directions 0° et 90° de la feuille (anisotropie).

- La **méthode de pré-ondulation** est utilisée pour fabriquer des âmes à haute densité, tenue thermique élevée, ou lorsque des feuillets de base sont relativement épais. Elle consiste à pré-déformer les feuillets à la géométrie désirée, à encoller les zones nodales, à empiler les feuillets déformés, et à opérer une polymérisation de la colle du bloc ainsi obtenu à température élevée (Figure 1.9).

Des tranches sont ensuite découpées à partir du bloc pré-ondulé à l'épaisseur souhaitée. Dans le cas de certains métaux à haute tenue thermique, le collage est remplacé par une soudure ou une brasure.

▪ **Caractéristiques générales et variantes**

Les nids d'abeille existent principalement en trois configurations cellulaires de base (hexagonal, sur-expansé, flexible), avec, en outre, quelques variantes plus rares (carré, renforcé, tubulaire), illustrées en figure 1.10.

- À partir d'une **configuration hexagonale** régulière standard, les cellules « allongées », voire à l'extrême, rectangulaires, sont obtenues en faisant varier le taux d'étirage dans le processus d'expansion, ce qui conduit à des propriétés mécaniques (en cisaillement notamment), mais aussi de drapage et de manipulation, différentes.
- La **configuration flexible** offre, quant à elle, la meilleure aptitude au drapage et peut épouser des formes incurvées (éventuellement sphériques) sans problèmes de flambage des parois des cellules et avec de meilleures propriétés mécaniques résultantes (en cisaillement en particulier) que la configuration hexagonale régulière.
- La **configuration carrée** est utilisée de manière prédominante dans le cas de nids d'abeille pré-ondulés fabriqués par soudage : la zone nodale est très étroite et les parois libres sont souvent pré-déformées pour accroître leur résistance au flambage.
- La **configuration renforcée** comporte une feuille plane positionnée entre les nœuds, de manière à accroître densité et résistance.

Enfin, la configuration tubulaire, utilisée exclusivement pour des applications à haute absorption d'énergie, est obtenue en enroulant sur un mandrin tubulaire plan une feuille pré-ondulée encollée au niveau des zones nodales (les diamètres intérieur et extérieur sont variables).

- Les **propriétés des nids d'abeille** dépendent de la taille (et donc de la fréquence) des cellules, ainsi que de l'épaisseur et de la résistance du matériau constitutif des parois. Les feuilles présentent typiquement des épaisseurs de 3 à 50 mm, et des dimensions de 1,2 à 2,4 m.

Les peaux utilisées en association avec les âmes nids d'abeille sont généralement en composite (stratifié). Toutefois, tout type de matériau en feuille peut aussi être utilisé sous réserve de présenter des propriétés satisfaisantes (bois, thermoplastiques, métaux).

Les cellules d'un nid d'abeille peuvent également être remplies de mousse rigide, de manière à augmenter la surface de collage des peaux, les propriétés mécaniques de l'âme en stabilisant les parois des cellules, et les propriétés d'isolation acoustique et thermique.

Les âmes en nids d'abeille peuvent conduire à la fabrication de stratifiés sandwichs rigides et très légers, mais du fait de leur surface de collage très limitée avec les peaux, elles sont presque exclusivement associées à des systèmes de résine à hautes performances du type époxy, qui permettent d'atteindre le niveau d'adhésion désiré avec les peaux stratifiées.

a) Nids d'abeille en aluminium

Bien que les nids d'abeille métalliques soient fabriqués à partir de métaux très différents (acier, titane, alliage de nickel...), l'aluminium et ses alliages restent le matériau le plus utilisé à cette fin. Les nids d'abeille en aluminium présentent les ratios résistance/poids (résistances spécifiques) les plus élevés parmi les matériaux de structure. Il existe différentes configurations de collage des feuilles d'aluminium qui peuvent conduire à une grande variété de géométries de cellules (en général hexagonales).

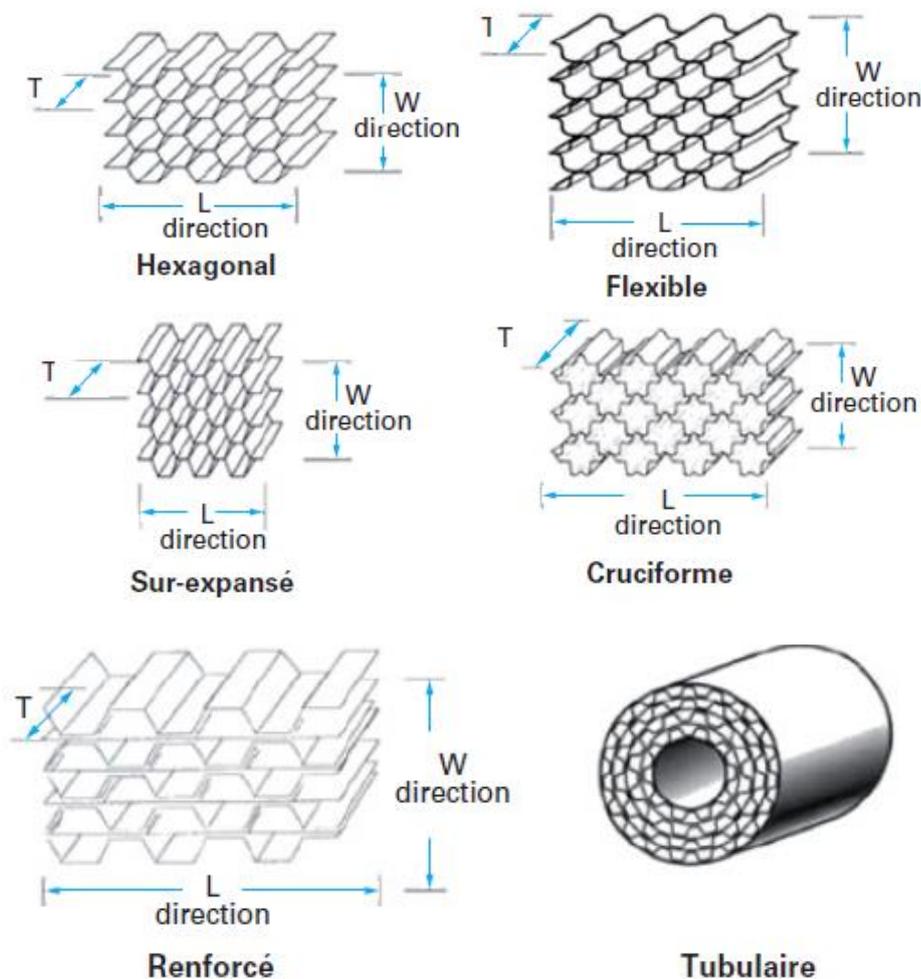


Figure 1.10 Différentes configurations de nids d'abeille [28, 29].

Les propriétés peuvent également être ajustées en faisant varier l'épaisseur de la feuille d'aluminium et la taille des cellules. Le nid d'abeille est généralement livré sous sa forme non étirée, en bloc, et est mis en forme (étiré) sur site.

En dépit de ses propriétés mécaniques intéressantes et de son coût relativement modéré, le nid d'abeille en aluminium doit être utilisé avec précaution dans certaines applications, telles que des pièces structurales de grandes dimensions destinées à la marine, du fait de problèmes de corrosion potentiels en milieu aqueux salé. Il convient également de veiller à l'absence de contact direct avec des peaux stratifiées renforcées de carbone, dont la conductivité peut aggraver la corrosion galvanique.

Le nid d'abeille en aluminium a également l'inconvénient de ne pas présenter de mémoire mécanique. En cas de choc, le nid d'abeille se déforme de manière irréversible, tandis que les peaux composites reviennent à leur position d'origine. Il en résulte l'apparition d'une zone de décollement peau/âme avec affaiblissement de propriétés mécaniques. Le tableau 1.4 rassemble quelques ordres de grandeur de caractéristiques mécaniques.

Tableau 1.4 Propriétés mécaniques et géométriques du nid d'abeille en aluminium [11].

| Propriétés | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Masse volumique du Nida (kg/m^3) | 29 | 54 | 62 | 83 |
| Épaisseur de la paroi des alvéoles (mm) | 0,064 | 0,038 | 0,102 | 0,064 |
| Résistance au cisaillement t_{xz} (MPa) | 0,6 | 1,5 | 1,8 | 2,9 |
| Module de cisaillement G_{xz} (MPa) | 120 | 270 | 310 | 430 |
| Résistance au cisaillement t_{yz} (MPa) | 0,44 | 1,0 | 1,2 | 1,8 |
| Module de cisaillement G_{yz} (MPa) | 70 | 170 | 200 | 270 |
| Résistance en compression s_z (MPa) | 0,7 | 2,1 | 2,9 | 4,6 |
| Taille des alvéoles (mm) | 19 | 6,3 | 13 | 6,3 |

b) Nids d'abeille papier kraft ou Nomex [11]

Les nids d'abeille peuvent aussi être réalisés à partir de différents types de papier (papier kraft, papier Nomex). Largement utilisé, le papier Nomex (marque DuPont) est obtenu à partir de fibres d'aramide plutôt qu'à partir de fibres de cellulose. Le papier nid d'abeille initial est généralement trempé dans une résine phénolique ou polyamide, voire polyester insaturé (d'autres systèmes de résine pouvant aussi être utilisés), de manière à

obtenir une âme nid d'abeille à haute résistance et bonne tenue au feu. Le taux volumique de résine idéal est de l'ordre de 50 %. En conséquence, il convient d'avoir recours à des feuilles de papier d'épaisseurs différentes pour produire des âmes de densités variables, en maintenant le taux de résine à 50 %. Le tableau 5 présente quelques ordres de grandeur de caractéristiques mécaniques.

Ce type d'âme est largement utilisé dans des panneaux intérieurs légers d'avions, en association avec des peaux à base de résines phénoliques. Des grades spéciaux ignifugés (pour habillage intérieur des transports publics) peuvent aussi être fabriqués en remplissant les cellules du nid d'abeille avec une mousse phénolique pour améliorer l'isolation et augmenter la surface de collage.

Tableau 1.5 Propriétés mécaniques et géométriques du nid d'abeille en poly-aramide (Nomex) [21].

| Propriétés | | | | |
|---|------|------|------|------|
| Masse volumique du Nida (kg/m^3) | 24 | 32 | 48 | 64 |
| Épaisseur de la paroi des alvéoles (mm) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,08 |
| Résistance au cisaillement t_{xz} (MPa) | 0,7 | 1,1 | 1,8 | 2,5 |
| Module de cisaillement G_{xz} (MPa) | 25 | 34 | 52 | 70 |
| Résistance au cisaillement t_{yz} (MPa) | 0,35 | 0,6 | 0,9 | 1,1 |
| Module de cisaillement G_{yz} (MPa) | 14 | 20 | 29 | 35 |
| Résistance en compression s_z (MPa) | 0,7 | 1,1 | 2,2 | 3,8 |
| Taille des alvéoles (mm) | 6 | 5 | 3 | 5 |

Le nid d'abeille Nomex est de plus en plus utilisé dans les applications non aéronautiques hautes performances en raison de ses propriétés mécaniques élevées, sa faible densité, et sa bonne stabilité à long terme.

➤ **Nids d'abeille en voiles de renforts (verre, carbone, aramide)**

De fins tissus de verre, carbone ou aramide imprégnés de résines polyester insaturé, phénolique... peuvent également être utilisés pour former des nids d'abeille. Leur mode de fabrication est analogue à celui du nid d'abeille en papier. La variante la plus répandue est à base de tissu de verre, orienté, soit à $0^\circ/90^\circ$, soit à $\pm 45^\circ$ (propriétés en cisaillement améliorées) par rapport à la direction de l'épaisseur de l'âme [22].

Les variantes à base de carbone ou d'aramide, plus récentes, moins répandues et plus chères, sont réservées à des applications spécifiques, aérospatiales par exemple où des coefficients de dilatation thermique extrêmement faibles sont nécessaires.

➤ Nids d'abeille thermoplastiques

Les matériaux d'âme réalisés à partir de polymères thermoplastiques sont légers, aisément mise en forme par thermoformage et peuvent être recyclés facilement. Ils conduisent à la fabrication de sandwichs ayant une grande capacité d'absorption de chocs (par exemple pour un PP, 90 % de l'énergie d'impact) et présentant une réversibilité des déformations même pour des chargements relativement élevés. La nature thermoplastique de ces nids d'abeille facilite leur mise en forme. Ils sont thermiquement isolants grâce à l'air emprisonné dans les alvéoles et bénéficient de propriétés d'isolation acoustique de par la nature viscoélastique du polypropylène [23]. Leurs inconvénients principaux sont, d'une part, la difficulté à obtenir une liaison inter-faciale de qualité entre le nid d'abeille et le matériau de peau et, d'autre part, leur rigidité relativement faible. Bien que rarement utilisés en tant qu'âmes de panneaux fortement sollicités mécaniquement, ils peuvent trouver une application dans de simples panneaux intérieurs. Les principaux polymères employés sont :

- ABS : rigidité, résistance au choc, ténacité, dureté superficielle, stabilité dimensionnelle ;
- Polycarbonate (PC) : stabilité aux UV, excellente transmission de la lumière, bonne tenue thermique, auto-extinguibilité ;
- Polypropylène (PP) : bonne résistance chimique ;
- Polyéthylène (PE) : matériau d'âme bon marché à usage général.

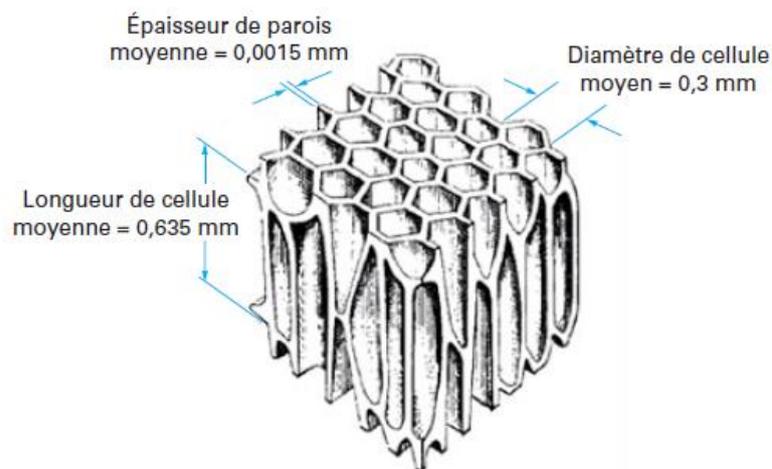


Figure 1.12 Géométrie de la cellule du balsa [28, 29].

Choix du matériau d'âme

La réalisation d'un matériau sandwich nécessite le choix d'une résine, d'un renfort, et d'un matériau d'âme [24]. Le choix de ces matériaux doit d'abord être fait dans l'objectif d'une masse minimale pour les contraintes mécaniques demandées, puis en tenant compte surtout des :

- conditions thermiques (température, ininflammabilité) ;
- ambiances chimiques (corrosion) ;
- possibilités de maintenance (facilité d'inspections et de réparations éventuelles) ;
- prix.

En pratique, la sélection de l'âme contribue largement aux propriétés et donc à la qualité du matériau sandwich obtenu. Le choix de celle-ci s'avère alors particulièrement critique, et doit faire l'objet d'une attention particulière.

Les critères de sélection sont :

■ Résistance au cisaillement [24]

Dans le cadre de l'utilisation des mousses, la résistance au cisaillement et la raideur de la structure sandwich peuvent être améliorées en augmentant la densité du matériau d'âme. On cherchera alors à trouver un compromis dans le choix du matériau entre de bonnes propriétés mécaniques et le poids.

■ Résistance en flexion [24]

Il est possible d'augmenter rigidité et résistance en flexion, en augmentant la distance entre les deux peaux du sandwich, c'est-à-dire en augmentant l'épaisseur de l'âme.

Néanmoins, cette solution a pour limite le poids et les dimensions qui ont été fixés pour le composite que l'on souhaite obtenir. On cherchera alors à trouver un compromis, dans le choix du matériau d'âme, entre les propriétés en flexion de celui-ci, son prix, et les dimensions de la structure composite.

■ Résistance au choc [24]

Cette propriété est liée à l'énergie d'absorption de l'âme. Celle-ci peut être améliorée en augmentant la densité du matériau d'âme, avec le poids pour contrainte. Cependant, le matériau en lui-même peut apporter des différences substantielles.

Sur ce critère, la comparaison entre une âme en mousse et une structure en nid d'abeille illustre des comportements différents.

L'âme en mousse diffuse l'énergie liée au choc au sein du panneau sandwich en l'absorbant dans sa structure cellulaire. C'est pourquoi les mousses PVC d'origine thermoplastique, ainsi que les mousses therm durcissables flexibles ont une bonne capacité d'absorption des chocs.

Dans un nid d'abeille, les parois transfèrent l'énergie perpendiculairement d'une face à l'autre, risquant de générer ainsi des fissures au niveau de la face opposée. La figure 1.18 présente les différents modes d'endommagement subis par une structure sandwich sollicitée en flexion 3-points.

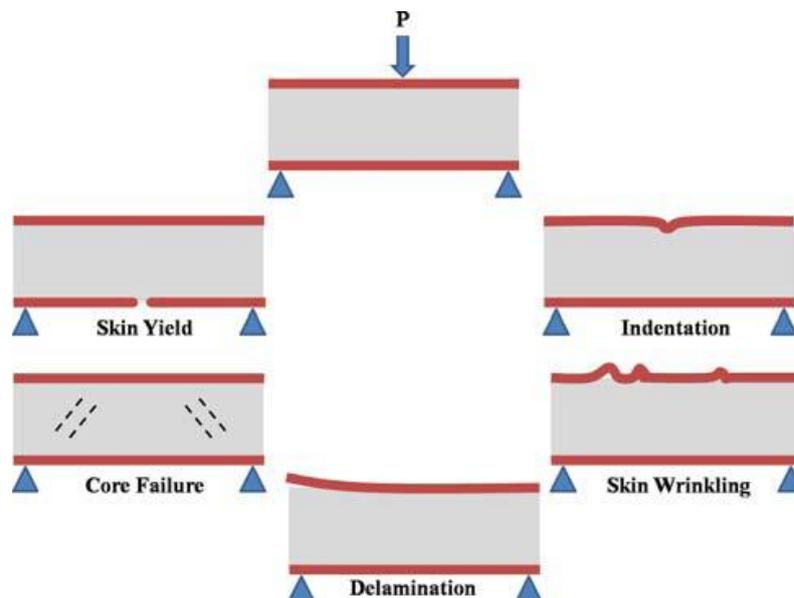


Figure 1.18 Modes d'endommagements en flexion des structures sandwichs [27].

■ Résistance à la compression [27]

Les charges de compression doivent être prises en compte dans le choix du matériau d'âme. Elles sont en effet totalement transférées à celui-ci. Les nids d'abeille permettent d'atteindre des contraintes de compression élevées, perpendiculaires aux panneaux. Mais leur anisotropie est défavorable dans le cas de pièces subissant des charges hydrostatiques. Elles peuvent se rompre si les sollicitations en compression se font suivant plusieurs directions.

Pour certaines applications, une combinaison mousse-nid d'abeille s'avère alors intéressante.

■ **Résistance au pelage** [27]

Une résistance au pelage insuffisante peut conduire au délaminage des peaux et causer des ruptures catastrophiques.

Usuellement, dans les structures collées possédant des âmes en mousse, les forces d'adhésion du joint de colle entre les peaux et l'âme sont supérieures à la force de cisaillement de celle-ci.

Là encore, cette propriété dépend largement du matériau constitutif de l'âme, plutôt que de la forme ou des dimensions données à celle-ci. Par exemple, les PVC linéaires permettent l'obtention d'une force d'adhésion conséquente, de loin supérieure à celles atteintes avec d'autres matériaux comme le balsa ou le polyméthacrylimide (PMI).

Les mousses de polyuréthane (PUR) sont fragiles, ce qui rend leur collage malaisé. Les âmes en nid d'abeille, quant à elles, ont une surface de contact restreinte, ce qui explique que les résistances au pelage qu'elles permettent d'atteindre soient réduites.

■ **Résistance au feu** [28]

Dans le cadre de certaines applications, cette propriété devient primordiale. À titre d'exemple, les panneaux sandwichs utilisés dans l'aéronautique doivent répondre à différentes spécifications, telles que les Federal Aviation Regulations (FAR), standards mondialement reconnus dans le domaine des intérieurs de cabines passagers des avions de ligne.

Le récent accroissement des types de mousses disponibles a conduit au remplacement du « traditionnel » nid d'abeille phénolique (Nomex) dans la réalisation des panneaux sandwichs.

Une meilleure résistance aux chocs, une faible reprise d'humidité, ainsi qu'une plus grande facilité de mise en œuvre sont les principaux atouts qui ont motivé le remplacement du nid d'abeille par diverses mousses. Pourtant, une seule mousse (la mousse de PEI) répond actuellement aux spécifications de la FAR concernant la résistance au feu.

■ **Absorption d'eau** [28]

L'absorption d'eau et d'humidité dans les âmes des panneaux sandwichs peut conduire à des diminutions significatives des propriétés mécaniques. Ainsi, certains matériaux voient leur résistance à la compression chuter de façon significative après une courte période d'exposition à l'eau et ce, à température ambiante.

En service normal, il peut arriver que l'évaporation d'un liquide (eau, solvant...) entraîne un délaminage des peaux du composite.

L'utilisation d'une âme sensible à l'humidité devient alors particulièrement critique. On note également qu'une âme sera d'autant moins sensible à l'humidité que sa densité sera élevée. Le polyéthérimide (PEI) et le PVC réticulé sont donc souvent utilisés pour des applications en milieu critique (eau...).

■ **Isolation** [28]

L'isolation thermique et phonique sont nécessaires dans certaines applications. C'est le cas notamment dans le domaine des transports, où l'allègement des structures et l'amortissement des vibrations sont également requis. Grâce à leur structure cellulaire, beaucoup de mousses permettent d'obtenir de bonnes propriétés isolantes, tandis que les nids d'abeille fournissent des résultats moins concluants. Par conséquent, lorsqu'une application nécessite d'avoir de bonnes caractéristiques en isolation thermique ou acoustique, les panneaux sandwichs à âmes en mousse sont souvent choisis comme solution. Il est aisé de constater que, pour une application précise, seuls quelques matériaux d'âmes, parmi tous ceux qui sont disponibles, peuvent effectivement convenir et répondre aux attentes fixées.

Les propriétés mécaniques, ainsi que l'allègement restent les principaux critères intervenant dans le choix des constituants, et notamment dans celui de l'âme du matériau sandwich. Néanmoins, le coût de production et d'achat, ainsi que la durabilité, sont également pris en compte. De façon générale, lorsque le gain de poids est le seul objectif, les matériaux sandwichs avec âme en structure nid d'abeille sont les plus intéressants, entre autre en raison de leur prix plus faible. À l'inverse, dès que des caractéristiques particulières seront recherchées, il faudra recourir préférentiellement à une mousse.

1.2.4 Adhésifs

Le choix d'un adhésif est principalement guidé car la recherche de performance de la structure par le biais d'une bonne adhésion entre l'âme et les peaux. Il faudra prendre en compte les contraintes de fonctionnement du sandwich pour le définir et des propriétés comme sa résistance, sa tenue à la fatigue, à la chaleur, au vieillissement, au fluage sont d'un grand intérêt.

De plus, il faudra prendre en compte les conditions de mise en œuvre de l'adhésif et donc s'intéresser aux conditions d'hygiène et sécurité, aux techniques d'application, au temps de polymérisation, température et pression de mise en œuvre.

Il existe une grande variété d'adhésifs qui satisfont aux exigences des structures sandwich. Parmi les plus usités, on trouve les époxydes, les phénoliques, les polyuréthanes, les uréthanes acrylates, les polyesters et vinylesters, etc.

Le lecteur intéressé pourra trouver des informations spécifiques à cette question en se rapportant aux articles traitant du collage dans cette collection [14-19].

1.2.5 Particularités liées à l'allègement de structures

Cependant, d'autres facteurs, outre la densité, entrent aussi en jeu lorsque l'on considère le poids d'une structure sandwich. Par exemple, les mousses de faible densité, qui contribuent très peu à la masse du sandwich, ont très souvent une structure cellulaire ouverte en surface, où la résine est susceptible de pénétrer en quantité non négligeable. Plus la densité de la mousse est faible, plus grandes sont les cellules et plus prononcé est le problème d'absorption. *A contrario*, les nids d'abeille se révèlent très performants sous cet angle, dans la mesure où un adhésif bien formulé ne créera qu'un mince film de résine localisé seulement au niveau des parois des cellules (Figure 1.19).

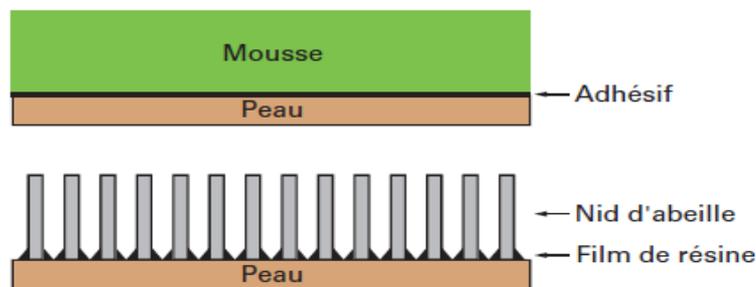


Figure 1.19 Liaisons âme/peau stratifiée pour des mousses et des nids d'abeille.

Enfin, il convient de rappeler qu'une âme doit également être ajustée parfaitement à la pièce, de manière à éviter que des vides et cavités ne soient comblés par de l'adhésif, ce qui réduirait d'autant l'effet d'allègement. C'est la raison pour laquelle les âmes en mousse, ou en balsa, sont souvent prédécoupées en forme de petits carrés supportés par un tissu fin et léger, de manière à épouser au mieux les géométries courbes des pièces complexes.

La réalisation d'entailles dans les âmes en mousse, sur la face opposée à la surface de conformation, poursuit le même objectif. Cependant, même dans ce cas, la consommation d'adhésif a tendance à augmenter car les rainures séparant les carrés de mousse doivent impérativement être remplies de résine. Pour les pièces où la masse constitue un paramètre

critique, l'utilisation d'âmes en mousses thermo-formables doit être considérée. C'est le cas par exemple des mousses en PVC linéaires et en SAN, qui peuvent être chauffées au-dessus de leur point de ramollissement et préformées à la géométrie du moule. Quant aux nids d'abeille, leurs variantes sur-expansées (avec une variété de schémas d'étirage conduisant à une plage de conformabilité importante) sont, en général, retenues dans les pièces sandwiches incurvées.

1.3. Applications

Les fabricants de matériaux pour âmes de structures sandwichs prévoient l'entrée des composites sandwichs dans un nombre croissant d'applications où la résistance, la rigidité, et l'allègement seront des critères importants. Historiquement, le concept de séparation de deux faces travaillant de façon combinée est attribué au français Duleau en 1820. Il faut attendre plus d'un siècle pour voir la première utilisation de masse de cette construction. Ainsi, au cours de la seconde guerre mondiale, l'avion Mosquito, produit par De Havilland en Angleterre, possédait un fuselage en structure sandwich contreplaqué/balsa/contreplaqué (Figure 1.20). De même, l'hydravion Catalina PBV de la marine américaine était réalisé à l'aide de panneaux sandwichs (âme en balsa et peaux en aluminium) afin de résister aux impacts répétés sur l'eau lors des amerrissages. Suite à cette performance, l'industrie nautique a commencé à utiliser les matériaux sandwichs intégrant des peaux en composite. Plus tard, ce fut la sonde lunaire Ranger qui fut pourvue de panneaux sandwichs dans le but d'amortir les chocs lors de l'alunissage.

Actuellement, le principal consommateur de matériaux sandwichs est le secteur des transports.

■ Dans le **domaine de la construction navale**, des panneaux sandwichs avec une âme en balsa étaient déjà utilisés dans les années 1970 pour l'isolation thermique des cuves placées à bord des tankers. Ces matériaux sandwichs étant de plus en plus utilisés, ils ont finalement été testés et reconnus en tant que matériaux de construction navale par plusieurs pays (USA, Japon, France, Angleterre...) et n'ont cessé d'évoluer.

Le plus grand bateau existant, d'une longueur de 73 mètres, vient d'être construit par la marine suédoise à l'aide de panneaux sandwichs formés de fibres de carbone, de résine vinylester, et d'une âme en mousse. Outre le gain de poids et la rigidité apportés par ces structures sandwichs, le bateau présente une signature magnétique restreinte. Les

superstructures utilisent les mêmes matériaux et ont été également dessinées pour diminuer la signature radar et thermique.

■ Dans le **secteur ferroviaire**, les nouveaux modes de transport requièrent des matériaux révolutionnaires. Le matériau sandwich est utilisé, par exemple, dans la construction du train à sustentation magnétique allemand Transrapid (Figure 1.26), capable d'atteindre des vitesses de plus de 550 km/h. Ce matériau possède une telle résistance thermique qu'il est possible de réaliser des soudures au laser pour l'assemblage des panneaux.

■ Dans le **secteur aéronautique**, les propriétés « anti-feu » de certains panneaux sandwichs permettent leur utilisation en intérieur de cabine. Des structures sandwichs sont également utilisées pour la réalisation des radômes protégeant les antennes radar. Ces composites doivent alors être transparents aux ondes électromagnétiques.

■ Dans le **secteur industriel** enfin, les mousses rigides sont les matériaux adéquats pour la fabrication de matériaux sandwichs utilisés en tant que revêtement de façades, par exemple, mais aussi pour la réalisation de pales d'éoliennes ou d'hélicoptères. Il existe également d'autres applications dans le sport automobile, le transport urbain...

■ En changeant les matériaux constitutifs de l'âme (légère, isolante sur les plans acoustique et thermique, etc.) et les peaux (étanches, résistantes aux intempéries, au feu, à l'eau, aux chocs, etc.), il est possible de concevoir des structures adaptées pour des applications précises. C'est pourquoi les structures sandwichs sont aujourd'hui largement utilisées dans de nombreux secteurs industriels. On retrouve des structures sandwichs sous forme d'éléments plans à faces parallèles certes, mais aussi d'autres formes. Parmi les nombreuses applications, on peut citer :

- les transports terrestres (carrosserie industrielle où le remplacement du contreplaqué apporte la légèreté) (Figures 1.23, 1.24 et 1.26) ;
- transport frigorifique (Figure 1.25) ;
- l'aéronautique (ailerons, dérives, ailes, etc.) (Figures 1.21 et 1.22) ;
- l'aérospatiale (Fusées, satellites) (Figures 1.29 et 1.30) ;
- le nautisme (coque, pont et habillage intérieur) (Figure 1.27) ;
- la marine (Figure 1.28) ;
- l'énergie (pales d'éolienne) (Figure 1.31) ;
- la construction (cloisons de parois extérieures de maisons, éléments de façades, portes ou décoration intérieure, baraques de chantier, caravanes) ;
- le génie civil (Figure 1.32) ;

- le stockage des fluides (cuves) (Figure 1.33) ;
- l'électronique (antennes et dômes), etc



Figure 1.20 Avion Mosquito produit par De Havilland au cours de la seconde guerre mondiale.



Figure 1.21 Applications en aéronautique (les chiffres repèrent les zones où les sandwichs sont employés.



Figure 1.22 Applications en transport aérien (les flèches repèrent les zones où les sandwichs sont employés)



Figure 1.23 Applications en transport terrestre



Figure 1.24 Bus « Cito » de Daimler Chrysler



Figure 1.25 Remorque camion frigorifique



Figure 1.26 Transrapid TR08 et Tramway Combino



Figure 1.27 Navire de croisière (les chiffres repèrent les zones où les sandwichs sont employés)



Figure 1.28 Navire VISHBY de la marine suédoise



Figure 1.29 Application aérospatiale (les chiffres repèrent les zones où les sandwichs sont employés)

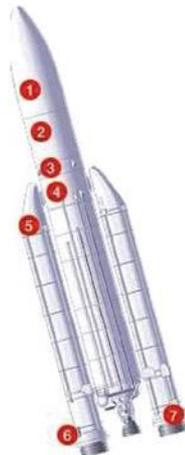


Figure 1.30 Fusées (les chiffres repèrent les zones où les sandwichs sont employés)

1.4 Pourquoi la fatigue est importante

Bien que les matériaux composites soient désignés comme étant insensibles à la fatigue, surtout lorsqu'on les compare à celles du métallique. L'utilisation des matériaux composites dans une large gamme d'applications oblige les chercheurs à tenir compte de la fatigue lorsqu'ils enquêtent sur un matériau composite. Les ingénieurs se rendent compte que la fatigue est un paramètre important qui doit être pris en compte dans les calculs au cours des processus de conception, même pour des structures où la fatigue n'a pas été traditionnellement considérée comme un problème.

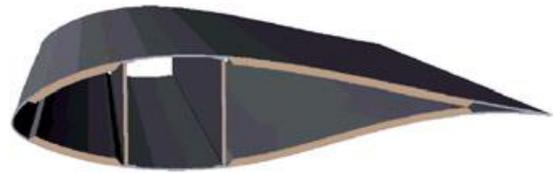


Figure 1.31 Section d'une pale d'éolienne



Figure 1.32 Applications en génie civil



Figure 1.33 Réservoir pour stockage de l'eau

Les composites ont d'abord été utilisés pour remplacer les « matériaux conventionnels » tels que l'acier, l'aluminium ou le bois, et plus tard comme « matériaux avancés » permettant aux ingénieurs d'adopter une approche différente afin de faciliter leurs conceptions. Le comportement en fatigue des matériaux composites est différent de celui des matériaux métalliques, par conséquent, les méthodes déjà développées et validées pour la modélisation et la prédiction de la fatigue des matériaux classiques ne peuvent pas être directement appliquées aux matériaux composites. En outre, le grand nombre de configurations résultant de la multitude de fibres, matrices, méthodes de fabrication, des séquences d'empilement de laminage, etc rend le développement d'une méthode communément acceptée pour couvrir la difficulté de la conception [20].

Il y'a une longue liste des raisons pour lesquelles la fatigue est essentielle pour étudier le comportement d'un matériau composite:

- Les composites sont utilisés pour des composantes d'importantes structures et aujourd'hui ils participent en tant que matériau équivalent à l'acier traditionnellement utilisé, dans les structures émergentes qui doivent supporter d'importantes charges de fatigue au cours du fonctionnement, tels que les avions, les lames de rotor des éoliennes, des loisirs bateaux, des pieds et ponts routiers, etc. Cette évolution modifie la perception commune concernant la sensibilité de chaque structure à la fatigue.
- Les matériaux composites unidirectionnels sont généralement fragiles et se comportent de façon linéaire sous la charge. Depuis leur rupture brutale, sans préavis, un statut en vertu de leur comportement à la fatigue et la prédiction de leur résistance à la fatigue sont d'une importance majeure.
- Une meilleure compréhension du comportement en fatigue des matériaux composites est également utile pour l'amélioration des pratiques de développement des produits. La pratique adoptée sur le développement des produits est basée sur un processus itératif par lequel un prototype a été construit et testé. Cependant, ce processus est coûteux et prend du temps, la possibilité de simuler le comportement en fatigue du matériau, composant structurel et / ou de la structure permet de réduire le coût ainsi de développer une large gamme de produits sans qu'il soit nécessaire d'augmenter le nombre de prototypes physiques.
- La durabilité des structures composites est également un facteur important. Le danger de l'évaluation de la durabilité sur la base des calculs de résistance statique et en fatigue cyclique est susceptible d'être pris en considération. L'introduction des méthodes de

prédiction de la vie en fatigue des matériaux composites permettent l'évaluation de leurs performances au début du développement du produit et du processus de la mise en place.

1.5 Endommagement par fatigue

La communauté scientifique depuis longtemps confirme que la fatigue comme un modèle défini par une charge critique. En 1829, l'ingénieur des mines allemand W.A.S. Albert a été le premier qui à réaliser des essais de fatigue sur les chaînes de transport métalliques [21]. Par la suite, de nombreux mode de rupture qui ne pouvaient pas être expliquées sur la base de la théorie connue ont été attribués à un chargement de fatigue. Avec le développement des chemins de fer au milieu du XIXe siècle, l'échec des essieux des wagons était un phénomène fréquent qu'elle a attiré l'attention des ingénieurs. Entre 1852 et 1870, un autre ingénieur allemand, Août Wöhler, réalisé le premier programme étendu d'expérimentation sur la fatigue des matériaux métalliques [21]. Le programme comprenait complète d'essais de fatigue sur les essieux des wagons mais aussi des tests d'échantillons, considérant les modes de chargement cyclique de traction, des charges de flexion et de torsion. Wöhler construit un banc d'essai sur lequel il pourrait tester essieux des wagons dans les moments de flexion développés par des charges suspendues aux extrémités des essieux. Les contraintes développées ont été enregistrées en même temps que le nombre de rotations jusqu'à la rupture. Les résultats ont été tirés sur le nombre de cycles (N) en fonction de niveaux de chargement (r), pour formuler la première courbe S-N, qui, cependant, a été limitée à la représentation des données expérimentales, sans proposer de formulation mathématique pour décrire ce comportement.

Ces premières tentatives pour analyser le comportement en fatigue des matériaux et des structures ont été réalisées sur l'expérience avec des constructions de fonctionnement sous charge réelle conditions. Défaillances pouvant pas être expliqués par les théories existantes ont été dési-minés ruptures de fatigue. A partir de 1850, les ingénieurs reconnue comme un modèle de fatigue charge critique qui pourrait être la raison pour laquelle un pourcentage important de défaillances structurelles et il a été par la suite largement admis que la fatigue ne doit pas être négligée. Cependant, comme mentionné dans les travaux de Schütz [22], la connaissance relative à certaines méthodes a été très en pointe dans un seul endroit, alors que quelques kilomètres plus loin il était inexistant. Ce n'est qu'en 1946, lorsque la fatigue terme a été incorporée dans le dictionnaire de l'American Society for Testing and Materials (ASTM), que le comité E9 a été créé pour promouvoir le développement de méthodes d'essai de fatigue [23].

Pendant les années suivantes, de nombreux programmes expérimentaux ont été réalisés

pour la caractérisation du comportement en fatigue des matériaux de PRF plusieurs structurelles composites de l'époque. Comme la technologie développée et de nouveaux cadres d'essai et appareils de mesure ont été inventés, il est devenu de plus en plus simple de procéder à des expériences complexes fatigue et les propriétés et les caractéristiques de mesure, ce que quelques années plus tôt n'aurait pas été possible. En conséquence, presque tous les modes de défaillance des composites de PRF ont été identifiés et plusieurs modèles théoriques ont été mis en place pour la modélisation et la prédiction finalement la vie en fatigue de plusieurs systèmes de matériaux différents.

Le comportement mécanique des matériaux composites est influencé par une variété de paramètres. L'homogénéité et la qualité des matériaux manufacturés sont essentielles pour leur intégrité structurelle. Défauts inhérents comme les rides, les désalignements des fibres, et les vides qui peuvent facilement être introduites au cours du processus de fabrication peuvent constituer des points de départ potentiels de dommages et de développer rapidement des mécanismes de défaillance comme fissuration de la matrice, la rupture de fibres, décollement, transversale plis craquage, craquage d'interface, etc. Ces mécanismes de défaillance se produit parfois de façon indépendante et parfois de façon interactive et sont des sources de micro-flambage, la croissance des fissures inter-laminaire et délaminations [24] qui peut rapporter une défaillance catastrophique.

Le degré d'endommagement d'un matériau composite à matrice polymère peut être suivie par la mesure de la diminution d'un métrique pertinent dommage, généralement la résistance résiduelle ou la raideur résiduelle [25].

Une théorie basée sur la résistance résiduelle dégradation suppose que le dommage est accumulée dans le composite et l'échec se produit lorsque la résistance résiduelle diminue au maximum le niveau de stress appliqué cyclique, voir Figure 1.34.

Les théories fondées sur la fatigue dégradation de la résistance présentée trois faiblesses majeures:

- La résistance à la fatigue résiduelle ne peut être évaluée par l'évaluation non destructive car les théories sont basées sur un métrique dommage qui nécessite la rupture du matériau afin de le tirer.
- Dégradation de la résistance résiduelle n'est pas une mesure sensible de dommages accumulation car il change très lentement jusqu'à près de l'échec quand il diminue rapidement.

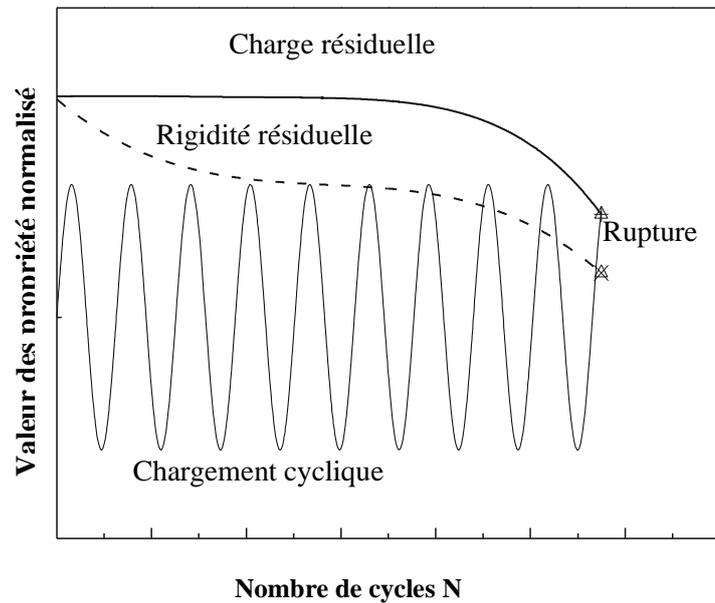


Figure 1.34 Dégradation de la Charge et la rigidité du composite au cours d'un chargement de fatigue en contrôle déplacement.

Le phénomène de fatigue est rencontré fréquemment dans de nombreux domaines industriels qui mettent en jeu des sollicitations cycliques. Par conséquent, un important objectif de la recherche scientifique est de prédire les performances en fatigue des matériaux composites stratifiés et sandwichs afin de concevoir des tolérances structurales aux endommagements. Les premières études fondamentales du phénomène de fatigue ont été entreprises par Wöhler sur les métaux. Les mécanismes d'endommagement par fatigue dans les matériaux composites sont beaucoup plus compliqué alors celles des matériaux métalliques. Ils impliquent généralement diverses combinaisons entre les différents modes d'endommagements tels que le craquage de la matrice, décollement inter-faciale et la rupture des fibres pour les composites stratifié [26]. Ainsi que, pour les composite sandwichs, leur modes de rupture sous chargement cyclique, sont particulièrement sensible à la rupture du noyau par cisaillement [27]. Par conséquent, il est difficile d'élaborer une théorie qui peut prédire le type exact de l'endommagement. Cependant, ces modes d'endommagement ont été trouvés pour provoquer des changements dans les propriétés mécaniques des matériaux, tels que la rigidité résiduelle, la charge et la durée de vie. Ainsi, il est possible d'obtenir une mesure de l'endommagement dans les matériaux composites, en mesurant et en analysant la variation des propriétés au cours d'essais de fatigue. D'un point de vue de la maintenance, il est important de déterminer de manière non destructive l'étendue de l'endommagement à la fatigue qui s'accumule après une certaine période dans une structure dans des conditions de chargement de service.

La rigidité résiduelle est bien défini propriété de l'ingénierie, qui peut être facilement mesurée et interprétée. La variation de la rigidité est directement liée à l'évolution de l'endommagement, et peut éventuellement être utilisé pour prédire l'endommagement. La rigidité est un paramètre qui peut être contrôlé de façon non destructive et maintenant devient un outil puissant pour évaluer la fiabilité d'une structure composite. La rigidité peut être mesurée directement pendant le développement de dommages. Cependant, une base de données complète serait nécessaire dans l'analyse de la fatigue des matériaux composites, sur la base de la perte de la rigidité, à moins d'une relation mathématique peut être développée à rapporter rigidité résiduelle à d'autres propriétés des matériaux tels que la résistance résiduelle et résistance à la fatigue. Si une telle relation n'a pu être établie, l'extrapolation des données à différents niveaux de chargement, il est possible, en réduisant ainsi la quantité de données de test nécessaires pour caractériser le comportement du matériau [28].

Cependant, les Modèles de dégradation de la rigidité fiables doivent être mis au point avant que ces relations peuvent être établies. Dans la section suivante, un examen des différentes conditions expérimentales, ce qui peut affecter les résultats expérimentaux, est présenté.

Il est nécessaire d'avoir connaissance des paramètres tels que la fatigue, la fréquence de chargement, les ratios de stress, appliquées niveau de chargement, etc, de sorte que correcte et significative procédures expérimentales peuvent être adoptées.

1.6 Effets de paramètres expérimentaux

1.6.1 Effets de la fréquence

L'étude de l'influence de la fréquence d'essais sur la réponse mécanique des matériaux est un axe de recherche classique. Cet aspect du comportement se traduit dans le cadre de la fatigue des métaux par la question du rôle de la fréquence de sollicitation sur le comportement cyclique [29].

Les travaux qui s'intéressent à ces aspects consistent généralement à étudier le matériau en le sollicitant à différentes vitesses de déformation/fréquences de sollicitation en ayant (i) soit un regard mécanique (e.g. observation des réponses mécaniques [30] ou des courbes S-N « Stress vs. Number of cycles » [31]) (ii) soit un regard métallurgique (e.g. études de faciès de rupture, des mécanismes d'amorçage de fissures [32]). A. BLANCHE et al [33] ont s'intéresser au rôle de la fréquence de sollicitation sur la réponse énergétique du matériau et plus particulièrement sur l'énergie dissipée dans des cycles de chargement effectués à

différentes fréquences de sollicitation. Ce travail consiste tout d'abord à réaliser des essais de fatigue à « basse » et « haute » fréquence de sollicitation (*i.e.* 50 et 20000 Hz). Les champs de températures sont relevés durant ces deux types d'essais, par thermographie infrarouge (TIR), puis utilisés afin d'estimer, *via* une équation de diffusion de la chaleur, les puissances calorimétriques mises en jeu dans chacune des situations expérimentales. Une comparaison des énergies dissipées par cycle est enfin réalisée afin d'analyser le caractère dépendant ou non de l'évolution des irréversibilités matérielles à la vitesse de déformation [33]. Sous chargement cyclique, en particulier pour les matériaux viscoélastiques, l'augmentation de la fréquence augmente le taux de traitement mécanique qui augmente le taux d'intérieur chauffage. Cet effet de chauffage par hystérésis, qui peut être détectée par une augmentation de la surface température de l'échantillon, est particulièrement évident dans les matériaux polymères, résine riche (Faible fraction volumique) stratifiés ou résine dominé (angle plis) pondent parce que les résines sont moins en mesure de dissiper la chaleur alors verre. La température augmente jusqu'à ce que soit thermique ramollissement se produit, conduisant à une défaillance thermique provoquée par une grave dégradation des matériaux propriétés dues au chauffage interne, ou la température se stabilise (chaleur générée par travail mécanique égale à la dissipation de chaleur) avec défaillance mécanique se produise. L'endommagement par fatigue pour de nombreux matériaux à la température ambiante et à des fréquences sont modestes généralement associés à des défaillances mécaniques dues à la fragilisation progressive ou dommages accumulation en raison de la nature cyclique de la charge. Échantillons plus épais produisent une grande augmentation de la température parce que la chaleur doit être transformée à travers l'échantillon à la surface avant d'être dissipée. D'un point de vue de la fatigue, l'évolution au cours de thermique au comportement mécanique en termes de mode de défaillance est une fonction de la capacité des matériaux à dissiper la chaleur et sa température de ramollissement. En règle générale, l'effet de la fréquence sur résistance à la fatigue de la matière peut être séparé en deux régimes. En plus haute fréquence région, la résistance à la fatigue du matériau est réduite en raison d'une augmentation de la matière température peut provoquer des propriétés statiques de la matière à se dégrader. Finalement, avec augmentation de la fréquence, les matériaux ne par des mécanismes thermiques. Dans la plus basse fréquence région, la fréquence est suffisamment faible pour que l'effet de la chaleur sur les propriétés des matériaux est négligeable et que la fréquence diminue, la durée de vie en fatigue fluage diminue à mesure que la fatigue effets d'interaction devient apparent. Cela a des conséquences évidentes pour Sandwich structures; où, en raison des propriétés d'isolation de l'âme, l'accumulation de chaleur est probable et la fréquence des

tests doivent être conservés minime, de sorte que les effets de chauffage ne se produisent pas [31].

Les études sur l'effet de la fréquence sur les matériaux composites ont été concluants car des résultats expérimentaux variables. Certaines enquêtes de fréquence de fatigue ont montré que des fréquences plus élevées produites supérieur cycles-à l'échec, d'autres travaux ont montré la inverse. Hohne et Mandell [32, 33] ont étudié des effets de la fréquence de sollicitation (type d'onde carrée) sur des stratifiés croisées E-glass/époxy. Ils ont montré que la résistance à la fatigue augmente avec l'augmentation de la fréquence de sollicitation. Cependant Rotem et al. [34], à montrer que lorsque la fréquence passé de 2,8 à 10 Hz, la durée de vie à la fatigue va être dix fois diminué.

Olsson et Lönnö [35] ont montré qu'une augmentation de la température se produit dans l'âme en PVC pour des éprouvettes en matériaux sandwichs soumises à la fatigue. Après une phase transitoire, la température atteint une valeur constante qui dépend fortement de la fréquence f . L'augmentation de la température mesurée est inférieure à 5°C pour $f=1\text{Hz}$ et plus élevée que 15°C pour $f=5\text{Hz}$. Puisque la température de transition vitreuse du PVC est d'environ 80°C , il est raisonnable de s'attendre à ce que cette variation de température affecte de manière significative les propriétés mécaniques de l'âme.

Kanny et al. [36] ont étudié les effets de la fréquence sur le comportement en fatigue d'un composite sandwich constitué de mousse en PVC pour l'âme et de stratifiés à fibres de verre et de résine vinylester pour les peaux. Les essais de flexion en fatigue ont été effectués sur des poutres en matériau sandwich avec une âme de densité de 130 et 260 kg m^{-3} , à des fréquences de 3 et 15 Hz, à un taux de chargement $R=0.1$ et quatre niveaux de chargement différents 90%, 85%, 80% et 75%. Les conclusions suivantes ont été tirées :

— la charge à la rupture et la rigidité du matériau sandwich augmentent avec l'augmentation de la densité de l'âme,

— la résistance à la fatigue diminue avec l'augmentation de la densité de l'âme,

— le nombre de cycles jusqu'à la rupture (N_f) a augmenté avec la fréquence, mais le temps mis jusqu'à la rupture (t_f) a diminué,

— Une augmentation significative de la température au niveau de l'âme a été mesurée, pour la poutre en matériau sandwich avec une âme de densité 130 kg/m^3 à 15 Hz. À une fréquence de 3 Hz, l'augmentation de la température a été de $2\pm 1^{\circ}\text{C}$ et à la fréquence de 15 Hz l'augmentation de la température de l'âme a été de $12\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Sharma et al. [37] ont étudié le comportement en fatigue d'un matériau sandwich avec une âme en polyuréthane. Les essais ont été effectués en flexion trois points en contrôlant la charge (60% de la charge à la rupture). Ils ont testés trois types des éprouvettes de matériaux sandwichs, la première éprouvette est fabriquée en utilisant la résine époxyde, la seconde avec une résine polyester et la troisième est fabriquée en utilisant un mélange de la résine époxyde et de la résine polyester. Ces éprouvettes ont été testées à trois fréquences différentes (1, 3 et 5Hz) jusqu'à un million de cycles. A la fréquence de 1 Hz, les trois types d'éprouvettes n'ont pas été complètement endommagés. A la fréquence de 3 Hz, l'éprouvette fabriquée à partir de la résine époxyde est partiellement endommagée par décollement entre la peau et l'âme, alors que les deux autres sont complètement endommagées par décollement entre la peau et l'âme et par fissuration de l'âme. A 5 Hz, toutes les éprouvettes sont complètement endommagées par décollement peau/âme et par fissuration de l'âme. Ces auteurs ont conclu aussi que la dégradation de la rigidité augmente avec l'augmentation de la fréquence.

1.6.2 Effet de la forme d'onde

La forme d'onde cyclique peut avoir une influence sur la durée de vie en fatigue. Pendant une période donnée de vague (fréquence constante), la forme de l'onde est caractérisée par le type du signal, le taux de chargement et le temps à la charge maximale. La forme d'onde la plus commune est le chargement sinusoïdal mais les formes d'ondes carré et triangulaire représentent les limites extrêmes qui peuvent affecter la durée de vie en fatigue. D'une manière générale, l'onde carrée représente la dissipation maximum d'énergie par cycle. La forme d'onde sinusoïdale est un niveau intermédiaire tandis que la forme d'onde triangulaire représente le niveau le plus bas de dissipation d'après Trantima et Ninmer [38]. Mandell et Meier [39] ont constaté qu'une forme d'onde carrée a donné des durées de vies en fatigue inférieures que celles d'une forme d'onde sinusoïdale lors d'essais sur des stratifiés croisés 0/90 verre/époxyde. Les formes d'onde jouent un rôle important dans le taux de déformation en fluage par cycle. Ceci dépend essentiellement du temps de la charge maximale pendant chaque cycle. Une charge constante et une onde impulsion (avec une composante du temps négligeable) représentent respectivement les limites qui sont essentiellement le fluage pur et la fatigue pure. Entre ces limites, les taux relatifs de la fatigue et du fluage peuvent être contrôlés en variant le temps à la contrainte maximale dans chaque cycle de chargement. Dans ce type de chargement, les éléments de la fatigue et du fluage sont intimement mélangés provoquant ainsi des effets possibles d'interaction de fluage / fatigue et réduisant les durées de vies d'après Bowman et Baker [40]. C'est particulièrement le cas pour beaucoup de

polymères sollicités à des fréquences cycliques basses (typiquement en dessous de 1 Hz) où le temps de la charge maximale est plus grand provoquant des effets significatifs de fluage. Ainsi, la forme d'onde sinusoïdale est un peu plus compliquée car le changement de la fréquence change le taux de contrainte, mais généralement la même tendance globale est obtenue. Ainsi, la forme d'onde cyclique a une influence sur les mécanismes d'endommagement en fluage/fatigue et sur le taux de propagation des fissures.

1.7 Comportement des matériaux sandwichs en flexion

Kulkarni et al. [38] ont constaté que la rupture en fatigue par flexion du sandwich est contrôlée par la rupture de l'âme. Ces auteurs ont mis en place des essais de fatigue de telle sorte que l'endommagement se manifeste par la propagation des fissures dans l'âme. Ils ont montré que la propagation de la fissuration se fait en trois phases: d'abord la décohésion entre l'âme et la peau supérieure, ensuite le cisaillement de l'âme suivie par une autre décohésion entre la peau inférieure et l'âme. La première phase représente environ 85% de la durée de vie en fatigue et correspond à une dégradation de la rigidité d'environ 10%.

Clark et al. [41] ont constaté lors de l'étude des matériaux sandwichs, que le processus d'endommagement en fatigue se déroule en deux phases: une première phase d'initiation de l'endommagement suivie d'une deuxième phase de la multiplication et la propagation de cet endommagement. En se basant sur les résultats expérimentaux, les auteurs ont développé un modèle analytique permettant d'évaluer la réduction du module au cours de la fatigue.

L'évolution de la déformation en fonction de nombre de cycles est explicitée suivant une fonction de type exponentielle. A partir de cette expression, le module en fatigue est déterminé en fonction du nombre de cycles et du niveau de chargement. Enfin, les auteurs ont utilisé les courbes de Wöhler pour caractériser la durée de vie des composites sandwichs.

Dans les travaux de Bezazi et El Mahi [42], l'influence de la densité et l'épaisseur de l'âme sur le comportement en fatigue des matériaux sandwichs a été analysée. Les matériaux sandwichs considérés dans ce travail sont constitués de peaux en fibres de verre et de résine époxyde d'épaisseur constante et des âmes de différentes masses volumiques et de différentes épaisseurs. Les essais ont été menés en flexion trois points avec différents niveaux de chargement en contrôlant le signal déplacement. L'analyse des résultats obtenus a permis de constater que :

– La rigidité et la résistance des matériaux sandwichs en fatigue augmentent avec l'épaisseur et la densité de l'âme,

- La diminution de la rigidité au cours de la fatigue jusqu'à la rupture se déroule en trois phases pour l'ensemble des matériaux : une première phase avec une chute rapide de la rigidité, une deuxième phase où la réduction de la rigidité devient lente et enfin une chute brutale de la rigidité conduisant à la rupture du matériau. La durée de chaque phase dépend du niveau de chargement, de la densité et de l'épaisseur de l'âme,
- La rupture des matériaux sandwichs dépend de la densité et l'épaisseur de l'âme ainsi que la distance entre appuis. Elle se fait soit par rupture de la peau supérieure soit par rupture de l'interface peaux/âme ou par rupture en cisaillement de l'âme,
- La durée de vie des matériaux augmente avec l'augmentation de la densité et l'épaisseur de l'âme Les résultats expérimentaux obtenus dans les essais de fatigue ont conduit à développer une approche analytique permettant de décrire le comportement en fatigue des matériaux sandwichs [43]. Cette approche est basée sur l'interpolation par des fonctions simples de l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles. Les durées de vie des matériaux sandwichs en fonction des conditions de chargement ont été déterminées à partir de cette approche et comparées aux résultats expérimentaux en utilisant le critère N_{10} . Les résultats obtenus ont été caractérisés par les courbes de Wöhler et ont permis de mettre en évidence l'influence de l'épaisseur et de la densité de l'âme sur la durée de vie et sur le taux de dégradation des matériaux.

1.7.1 Comportement mécanique en statique

Zenkert et Vikstrom [44] ont présenté des études complètes sur les fissures de cisaillement dans les principaux panneaux sandwich en mousse qui ont été testés en statique. Ils ont utilisé l'infrarouge (IR) et une techniques d'approche basé sur la mécanique de la rupture pour but de détecter et analyser les panneaux contenant des fissures simulé en cisaillement, où ils ont utilisés des données fondamentales des matériaux, tels que la ténacité, la résistance des panneaux à la présence de fissures sont prédits.

Zenkert [45] a également montré dans son étude précédente que le décollement dans le plan médian du noyau de façon drastique réduit la force de l'âme en mousse de la poutres sandwich. Les fissures de cisaillement dans le noyau des panneaux sandwichs peuvent être trouvées à la suite d'une surcharge, de choc ou de fatigue. L'objectif de leur étude était de simuler des fissures de fatigue, pour calculer la résistance au cisaillement en présence de ces fissures en utilisant la méthode des éléments finis et enfin à vérifier les forces calculées avec les données expérimentales. Généralement, dans les structures sandwiches, surcharge

entraînera trois types de fissures désignées comme en face-à-main, les fissures de l'interface et des fissures en face-à-face. Normalement, fissures se lancer dans le plan médian du noyau où la contrainte de cisaillement est au maximum, ou une discontinuité de matériau, tel que de grands vides, puis a augmenté typiquement à 45° vers les faces et continuer à se développer le long de la face à l'interface de l'âme [46]. Ils font artificiellement ces types de fissures par fabrication de panneaux en insérant films en téflon. A panneau sans fissures a servi de référence. Essais de flexion quatre points ont été effectuées sous le contrôle du déplacement jusqu'à la rupture. La raideur de chaque poutre a été mesurée. Résultat expérimental a montré que le faisceau de référence sans fissures échec par les autorités locales indentation de la face dans le noyau, ce qui a été supposé que cisaillement de l'âme fracture. Le faisceau avec le visage au mi fissure exposée propagation de la fissure instable, et il est donc difficile de déterminer qui front de fissure initiée par un échec global. Pour le face à face poutre fissurée, le début de la propagation de la fissure était aussi instable et initié à pic charge. Les fissures prolongées à l'intérieur du noyau, le long de l'interface, en laissant une mince couche du matériau d'âme sur les visages. Pour le faisceau de types d'interface de crack, tous les faisceaux ont montré propagation de la fissure inter-faciale pure, qui est, les fissures propagées de manière instable dans l'interface de quitter les surfaces de fissures sur les faces de nettoyage à partir de la matière du noyau. La charges de rupture mesurées et les charges prévus dans trois types de fissure simulé poutres étaient trouvé dans le 20% des points, qui a été considérée comme un critère acceptable pour des fins d'ingénierie.

Danial et al. [47] ont présenté une étude sur le comportement en flexion poutres en composite sandwich et de comparer les résultats avec les prédictions des modèles théoriques. Les tensions sur la peau stratifiée et du noyau ont été mesurées avec des jauges de contrainte. Là où ils ont obtenues expérimentalement des relations entre la le moment et la déformation de la peau stratifié sollicité en tension et du noyau sollicité en compression. Sous un essai de flexion trois points, tous les panneaux endommagées prématurément en raison du cisaillement de l'âme. La charge de rupture, étant deux fois la force de cisaillement, est restée à peu près constant pour une portée différente longueurs. Ceci implique que la longueur d'intervalle de mesure diminue, le moment maximal appliqué, et de ce fait les efforts maximums de la peau stratifiée à la rupture diminuent. Les résultats ont également indiqué que, même en cas de charge accrue de base, le moment de flexion a été réalisé entièrement par les peaux stratifiées. Dans cette étude, deux modèles ont été mis en œuvre, par une hypothèse linéaire de la variation de la déformation à travers l'épaisseur de la peau stratifié et l'autre en supposant une constante la souche à travers l'épaisseur de la peau stratifié. Dans les deux modèles, la

contribution de base a été négligée et feuilles de surface sont supposés se comporter comme membrane. Par conséquent, le moment / déformation relations de la peau supérieure qui présentent le même type de comportement non linéaire du matériau composite lui-même. Les résultats expérimentaux sont en bon accord avec la prédiction de la modèle simple.

1.7.2 Comportement mécanique en fatigue

Shenoi *et al.* [48] ont effectué des essais de fatigue sur des poutres sandwich sollicitée en flexion avec différentes conditions de chargement. Trois matériaux de base différents (AIREX, R63.80, C70.130, R90.200) de 80, 130, 200 kg/m³ de densité ont été testés. La déflexion et la rigidité ont été utilisées pour identifier le type d'endommagement dans les poutres sandwich. Les résultats expérimentaux indiquent que la déflexion est linéaire jusqu'à une force de cisaillement de 75 à 85% de la rupture final, au-delà de cette limite, la déflexion augmentent considérablement avec très peu d'augmentation de cisaillement vigueur. La Rigidité est restée constant à une certaine valeur et après laquelle il est pointu diminution des valeurs de rigidité. Courbe de déviation spectacle de deux linéaires distincts et non régions linéaires. Bien que la déviation augmente en raison de l'effet du fluage et de la dégradation comme le nombre de cycles augmente, le panneau est considéré comme sûr dans la région linéaire. La déviation devient rapidement très importante résultant de la perte de résistance et la rigidité dans la région non linéaire. Ceci indique l'échec de la poutre. Une relation empirique a été développé relatives à deux régions. Il est supposé que la déviation est fonction du cycle de nombre et de la charge appliquée. Il a été montré que les limites supérieure et inférieure de la région linéaire pour tous les faisceaux testés et courbe empirique satisfaisant l'équation développée. Tout poutres testées indiquent échecs dans le noyau en raison de contraintes de cisaillement excessives. Ils proposent que la fatigue n'est pas grave problème pour des charges jusqu'à 30% des charges de rupture ultimes même après six mois de charges. Pour les charges comprises entre 30-55% de la charge ultime, ils ont observé une grande dispersion dans les résultats. Ils attribuent cela au fourré varié la densité de matériaux de mousse. Caractéristiques de défaillance craquaient et grand plastique déformation dans les noyaux. Alors que des niveaux de charge plus élevés, les poutres ont échoué entre 600 cycles et 10⁴ cycles. Déformation plastique et très faible fissuration étaient le principal type des échecs. Ils ont également mené des expériences sur les échantillons sollicités en fatigue pour le but d'étudier la résistance et la rigidité après la fatigue. Trois poutres ont été soumis à la fatigue à un niveau relativement faible charge cyclique. Pour chaque panneau, l'essai de fatigue a été arrêté avant la rupture. Les poutres ont ensuite été immédiatement testées en

charge statique. Ils ont observé une réduction marginale force après la fatigue qui était due à des effets indirects de l'endommagement par fatigue.

Dans des structures sandwich, le noyau de densité relativement faible est généralement trouvé sensible à la température. Ils ont trouvé très peu de différence (2%) de la pente de S-N courbes, qui étaient obtenus à des fréquences plus basses. pour une fréquence de 5 Hz, soit une baisse de 10% en cisaillement propriétés n'a été observée. Ils ont également étudié l'effet de la densité de base sur le noyau de cisaillement échecs et ont trouvé une correspondance linéaire avec la densité croissante de base. Ils ont déclaré que pour un niveau de contrainte de cisaillement donné R , plus le ratio de stress la plus courte des poutres résistance à la fatigue. Pour comparer les résultats de fatigue sur la base des tests effectués à différents fréquences, une approche de Rotem modifié a été modifié par la normalisation des données à un «Référence» rapport de contrainte. L'effet des conditions de chargement et le type de forme d'onde n'avait pas influence considérable sur la forme de S-N courbes, si testé à même ratio moyen de stress et contrainte moyenne.

Burman et Zenkert [49] ont présenté les études concernant la caractéristique de fatigue de noyau de mousse poutres sandwich. Trois configurations de sandwich sont étudiées, dont deux avec Les mousses cellulaires et avec un matériau d'âme en nid d'abeilles. Les matériaux étudiés sont Divinycell H100 et WF51 et ont été définies comme des mousses alvéolaires rigides réticulées avec structure à cellules fermées. Ces correspond à des matériaux typiques et dimensions utilisées dans la marine et l'industrie aéronautique. Un banc de flexion quatre points modifiés, ce qui permet Chargement en cours inversé, est utilisé avec succès pour des essais de fatigue à amplitude constante de toutes les matières configurations. Cette flexion quatre points a été mise en place une configuration de test approprié pour extraire la fatigue de cisaillement pertinent pour les matériaux de base de sandwich. Ils ont indiqué que la fracture l'initiation et la rupture de fatigue se produit dans une large zone de l'âme avec bien répartie micro-fissures plutôt qu'une seule fissure de multiplication. Les résultats des essais de fatigue ont été tracés dans le stress des schémas de vie, y compris une fonction de type Weibull qui fournit une bonne courbe de précision correspond aux résultats. La durée de vie en fatigue des matériaux d'âme est jugée réduite avec une augmentation du rapport de charge, R . Il a également été signalé que la rigidité n'est pas une bonne surveillance mesure pour la «santé» de l'échantillon en particulier dans leurs conclusions.

1.7.3 Energie dissipée et amortissement en fatigue

Le comportement viscoélastique des fibres et de la mousse polymère joue un rôle

important dans l'absorption et la dissipation de l'énergie dans des composites stratifiés et des matériaux sandwichs et en particulier pendant le chargement cyclique. Plusieurs auteurs ont utilisé la dissipation d'énergie ou l'amortissement pour l'analyse du comportement en fatigue des composites stratifiés ou sandwichs. Parmi ces auteurs nous citons :

Hacker et *al.* [50] ont utilisé le cycle d'hystérésis pour analyser le comportement des stratifiés en bois/époxyde. Ces stratifiés ont été soumis à des essais de fatigue cyclique en traction, en compression et en chargement inverse, en contrôlant la force. Les auteurs ont constaté que l'aire intérieure du cycle d'hystérésis augmente avec le nombre de cycles. Dharan et *al.* [51] ont utilisé la même approche pour étudier le comportement d'un stratifié à fibres de verre/époxy avec une entaille de forme circulaire au centre de l'éprouvette. Ce stratifié a été soumis à des essais de fatigue cyclique en traction avec cinq niveaux de chargements. Les auteurs ont constaté que l'énergie dissipée décroît avec la diminution du niveau de chargement et avec l'augmentation du nombre de cycles.

Barron et *al.* [52] ont utilisé le facteur d'amortissement pour examiner les effets de la fréquence sur le comportement en fatigue d'un stratifié. Les essais de fatigue ont été effectués à des niveaux de chargement différents et à trois fréquences différents (5, 10 et 20 Hz) pour trois séquences d'empilement (plis unidirectionnels à (0)₈, plis croisés à (0/90)_{4s} et plis à (± 45)_{4s}). Pour les stratifiés unidirectionnels il n'y a pas de tendances perceptibles pour le facteur d'amortissement. Le facteur d'amortissement augmente sensiblement lorsque la fréquence a augmenté de 5 à 20 Hz. Pour les stratifiés à plis orientés à (± 45)_{4s}, une diminution de l'amortissement est observée entre les valeurs de la fréquence de 5 Hz à 10Hz, alors qu'une augmentation est constaté pour des valeurs de fréquences de 10 à 20 Hz.

Zhang et *al.* [53] ont déterminé le facteur amortissement au cours des essais de fatigue cycliques de matériaux composites à fibres unidirectionnelles. Ils ont constaté que l'amortissement augmente avec nombre de cycles de fatigue.

Samirkumar et *al.* [54] ont utilisé l'amortissement pour étudier les effets de la température (20°C à -60°C) sur le comportement en fatigue cyclique d'un matériau sandwich. Le matériau considéré est constitué de fibres de verre et de résine vinylester pour la peau et d'une âme en mousse PVC. Ils ont constaté que l'amortissement augmente avec la température pour un nombre de cycles et pour un niveau de chargement donnés.

Farooq et *al.* [55-57] ont utilisé les cycles d'hystérésis pour analyser l'influence de la fréquence sur le comportement en fatigue des matériaux sandwichs. Trois matériaux

sandwichs constitués de peaux en stratifiés à fibres de verre et d'une âme en mousse PVC de différentes densité ont été considérés dans cette étude. Les essais se sont déroulés en fatigue cyclique en flexion 3-points avec une fréquence allant de 0,1 à 10 Hz. Ils ont constaté que l'évolution de la rigidité de ces matériaux au cours d'essai de fatigue est indépendante de la fréquence et aucun changement important dans le cycle d'hystérésis n'est constaté. Ils ont constaté que l'aire du cycle d'hystérésis diminue avec l'augmentation du nombre de cycles en raison du l'endommagement subi par ces matériaux. La même démarche a été utilisée par Bezazi et *al.* [58] où ils ont analysé l'évolution du comportement en fatigue d'une mousse polyuréthane et d'une mousse auxétique (coefficient de poisson négatif) sollicitées en traction. ils ont constaté que pour un niveau de chargement donné, l'aire intérieure du cycle d'hystérésis diminue lorsque le nombre de cycles augmente pour les deux mousses. Ils ont montré aussi que l'aire du cycle d'hystérésis dans la mousse auxétique est plus élevée que celle dans la mousse polyuréthane.

I.8 Conclusion

Les sandwichs sont des matériaux particulièrement utilisés dans le domaine de l'aéronautique, bâtiments et de l'aérospatial. Leurs avantages résident principalement dans la forte rigidité en flexion, l'excellente résistance à la fatigue, l'isolation thermique et le faible poids. Ces derniers ont poussé d'autres industries telle que l'automobile et le ferroviaire à s'y intéresser. Le seul problème est leur mode de rupture ou de ruines qui reste imprévisible : Indentation du cœur, Cisaillement du cœur, Rupture des peaux, Dégradation de l'adhésive. Il est donc nécessaire de connaître leur comportement en statique et en fatigue afin d'exploiter entièrement toutes leurs possibilités.

La recherche bibliographique concernant les sandwichs, nous a permis de montrer que leur comportement a été décrit en détail, cependant très peu d'études sont répertoriées sur leur fatigue. Les travaux existants sur la fatigue de ces matériaux portent essentiellement sur le type d'endommagement, l'influence de la densité de la mousse et l'influence de la fréquence d'essais. Les modèles d'endommagement appliqués sont basés essentiellement sur la dégradation de la rigidité. Le modèle choisi dépend fortement du mode de rupture observé lors des essais de fatigue. Dans le cas où la rupture est due à un cisaillement de l'âme, l'endommagement est basé sur le module de cisaillement en fatigue G . Si la rupture est due à une fissuration par contrainte traction/compression des peaux, l'endommagement est basé sur le module d'élasticité longitudinal de fatigue E .

Chapitre 2

Analyse du comportement mécanique en statique et en fatigue statique des composites sandwichs

Chapitre 2

Analyse expérimentale du comportement mécanique en statique et en fatigue statique des composites sandwichs

2.1 Introduction

Aujourd'hui, la construction de structures composites est devenue très opportune quant aux conséquences particulières qu'elle entraîne à savoir la réduction du poids et les améliorations structurales.

Les structures sandwichs sont constituées par deux peaux de grande rigidité, séparées l'une de l'autre par un matériau d'âme de faible densité. Pour obtenir des propriétés mécaniques intéressantes, on ne se focalise pas seulement sur la rigidité des peaux mais on fait aussi appel à des matériaux d'âmes présentant à la fois des qualités de performances mécaniques et des qualités de légèreté.

Dans ce chapitre, nous présentons les matériaux de l'étude, leurs mises en forme ainsi que les dispositifs expérimentaux utilisés.

Lorsque les matériaux sandwichs en nids-d'abeilles sont sollicités en flexion, l'endommagement se manifeste par la décohésion entre la peau et l'âme, le délaminage des peaux et la fissuration par l'écrasement de l'âme. Les propriétés mécaniques de ces matériaux peuvent être sévèrement dégradées par la présence de cet endommagement.

Il peut survenir à la suite de répercussion du mouvement des vagues sur les coques des bateaux ou bien par l'influence des vibrations des ailes des avions à la rencontre d'un trou d'air dans l'espace. C'est ainsi, dans ce chapitre nous nous intéressons à l'étude du comportement mécanique en statique et en quasi-statique relaxation des composites sandwichs sollicité en flexion 3-points, ainsi des essais de compression sur une âme en nids-d'abeilles.

2.2 Comportement des matériaux sandwich

2.2.1 Introduction

Le comportement mécanique élastique d'une structure en matériaux sandwichs est généralement analysé par la théorie des plaques sandwichs [48, 49]. Cette théorie est dérivée de la théorie des stratifiés prenant en compte le cisaillement transverse. Elle est basée sur une évaluation des champs des déplacements qui considère qu'une normale au plan moyen d'un stratifié reste un segment de droite lors de la déformation, cette déformée ne restant toutefois pas normale à la déformée du plan moyen.

La formulation ainsi mise en place permettra d'évaluer les caractéristiques statiques à partir des résultats d'essais expérimentaux.

2.2.2 Évaluation des performances en statique des matériaux sandwichs

2.2.3.1 Mise en œuvre

Les matériaux sandwichs étudiés dans ce travail sont mis en œuvre en utilisant une âme en nids-d'abeilles de masse volumique 64 kg/m^3 et des peaux en stratifiés en tissu à fibres de carbone avec une séquence d'empilement de $[\pm 45/(0/90)]$. Les peaux sont constituées de fibres bidirectionnelles de masse surfacique de 300 g/m^2 et d'une résine époxyde. L'ensemble de la matière première est fournie par la société Hexcel.

La mise en œuvre des sandwichs est réalisée par moulage sous vide, par la technique dite du "sac". Les différentes couches sont stratifiées et imprégnées à température ambiante, puis moulées sous vide entre le moule et le contre moule après interposition de divers tissus de moulage (figure 2.1).

Le Peeltex est un tissu de délaminage dont la fonction est de préparer les surfaces du stratifié pour assurer, après délaminage du tissu, une bonne interface pour toute opération de collage (sur l'âme par exemple) ou de finition.

Le tissu Peeltex est ensuite recouvert d'un film plastique perforé, le "Perforex". Ce film permet d'assurer l'homogénéité de la résorption de la résine. Enfin un composant final, le "Pleedex" est déroulé sur le Perforex, de manière à assurer un vide uniformément réparti. Cet ensemble est mis dans une poche dans laquelle on fait un vide (dépression de 30 kPa) pendant 10 heures à température ambiante.

L'interposition d'un moule et d'un contre moule évite la formation de plis dûs à la poche plastique.

La découpe des plaques est réalisée ensuite avec une tronçonneuse à disque diamanté. Les dimensions géométriques des éprouvettes sont présentées dans le tableau 2.1. Les caractéristiques mécaniques des peaux stratifiées en carbone/époxyde et de L'âme en nids d'abeilles d'une cellule ouverte avec une densité de 64 kg/m^3 , avec la taille de la cellule est de $3,2 \text{ mm}$. Les propriétés géométriques et mécaniques des panneaux sont décrites respectivement dans les tableaux (tableaux 2.2 et 2.3).

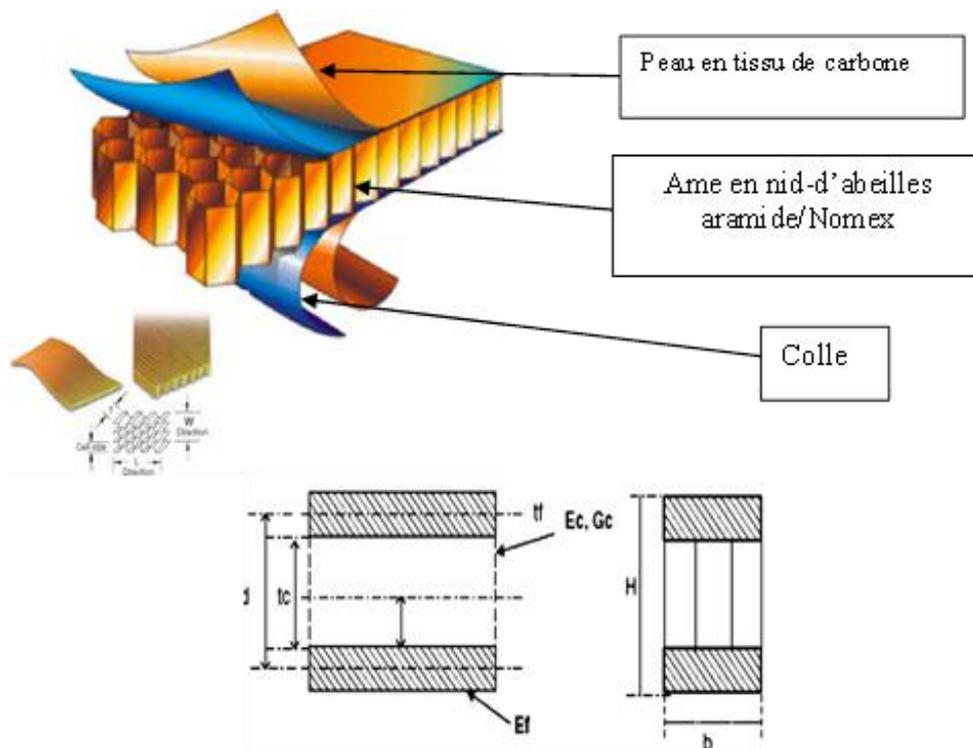


Figure 2.1. Configuration géométrique d'un panneau sandwich

Tableau 2.1. Dimensions des éprouvettes

| L (mm) | b (mm) | h (mm) | H _C (mm) | t _f (mm) | L (mm) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|--------|
| 200 | 25 | 10 | 8.8 | 0.6 | 150 |

Tableau 2.2 Caractéristiques mécaniques de peaux stratifiées en carbone/époxyde

| Propriétés mécaniques | Carbone/époxyde |
|--|-----------------|
| Densité surfacique (g/m ²) | 300 |
| Contrainte à la rupture en traction (MPa) | 800 |
| Contrainte à la rupture en compression (MPa) | 700 |
| Coefficient de Poisson | 0.05 |
| Module de Young en traction (GPa) | 70 |
| Module de Young en compression (GPa) | 60 |

Tableau 2.3. Propriétés mécaniques de l'âme Nomex HRH10.

| Taille de la Cellule | Densité (kg/m ³) | Contrainte de cisaillement L (MPa) | Module de cisaillement L (MPa) | Contrainte de cisaillement W (MPa) | Module de cisaillement W (MPa) | Contrainte de compression (MPa) |
|----------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 3.2 | 64 | 1.25 | 40 | 0.73 | 25 | 2.4 |

2.2.2.2 Procédures expérimentales

Des essais en flexion 3-points sur des éprouvettes en composites sandwichs, réalisés en utilisant une machine universelle Zwick / Roell Z005, équipée d'une cellule de charge de 5 kN et contrôlée par un logiciel Testexpert V10.11.

Quatre échantillons ont été soumis à un chargement jusqu'à rupture conformément à la norme ASTM C393-00 standard [50], avec une vitesse d'essai de 2 mm/min. Un traitement statistique des données a été réalisé à la fin de chaque série de manière à obtenir les valeurs des données médianes.

Les essais de compression sont effectués sur une machine d'essais hydraulique universelle de type INSTRON modèle 8801, munie d'une cellule de charge de 10 kN pour la mesure de la force et d'un capteur LVDT pour la mesure du déplacement (figure 2.4), dont le pilotage et l'acquisition se font par ordinateur.

Les essais sont effectués avec deux vitesses de déplacement de 2 mm/mn et 5 mm/mn.

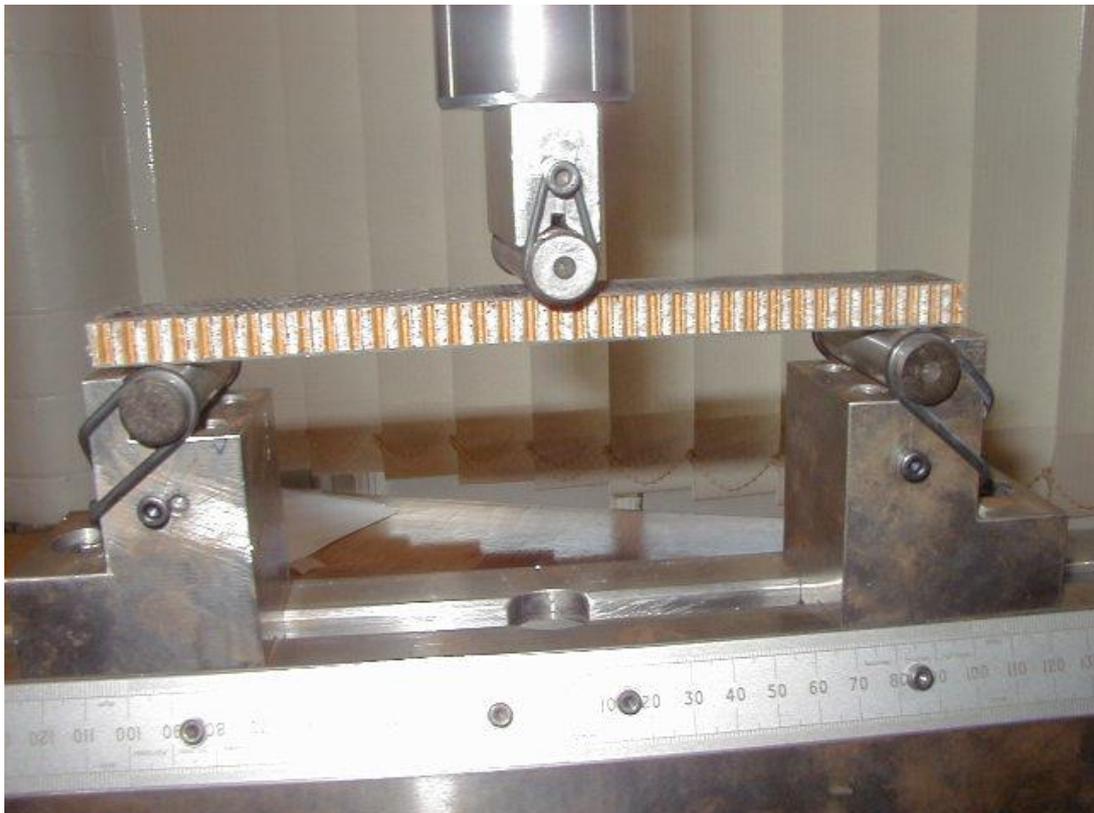


Figure 2.2 Dispositif expérimental de la flexion trois-points.



Figure 2.3 Dispositif expérimental de la compression.

2.2.3 Comportement statique en flexion 3-points

La figure 2.4 représente l'évolution de la charge en fonction de déplacement obtenue à partir des essais statiques en flexion trois points pour matériaux sandwichs en nids-d'abeilles. L'analyse de ces résultats montre que cette évolution s'effectue en trois étapes:

- Zone I: augmentation de la charge linéairement avec le déplacement jusqu'à l'obtention de la charge maximale.
- Zone II: cette étape très courte est caractérisée par une diminution brutale de la charge correspondant à la rupture de l'éprouvette.
- Zone III: une légère augmentation de la charge (non-linéaire), puis stabilisation.
- La zone I linéaire correspond au comportement des peaux stratifiées en traction et compression, alors que le comportement non-linéaire est dû aux caractéristiques de l'âme en nids d'abeilles.

La diminution de la charge correspond à la rupture de la peau supérieure du sandwich.

- Le suivi de l'endommagement permet de révéler un délaminage entre le nid d'abeille et la peau supérieure au voisinage de l'appui centrale. Le développement de ce délaminage conduit à la rupture de la peau supérieure, ce qui provoque la rupture brutale des éprouvettes (Figure.2.6).

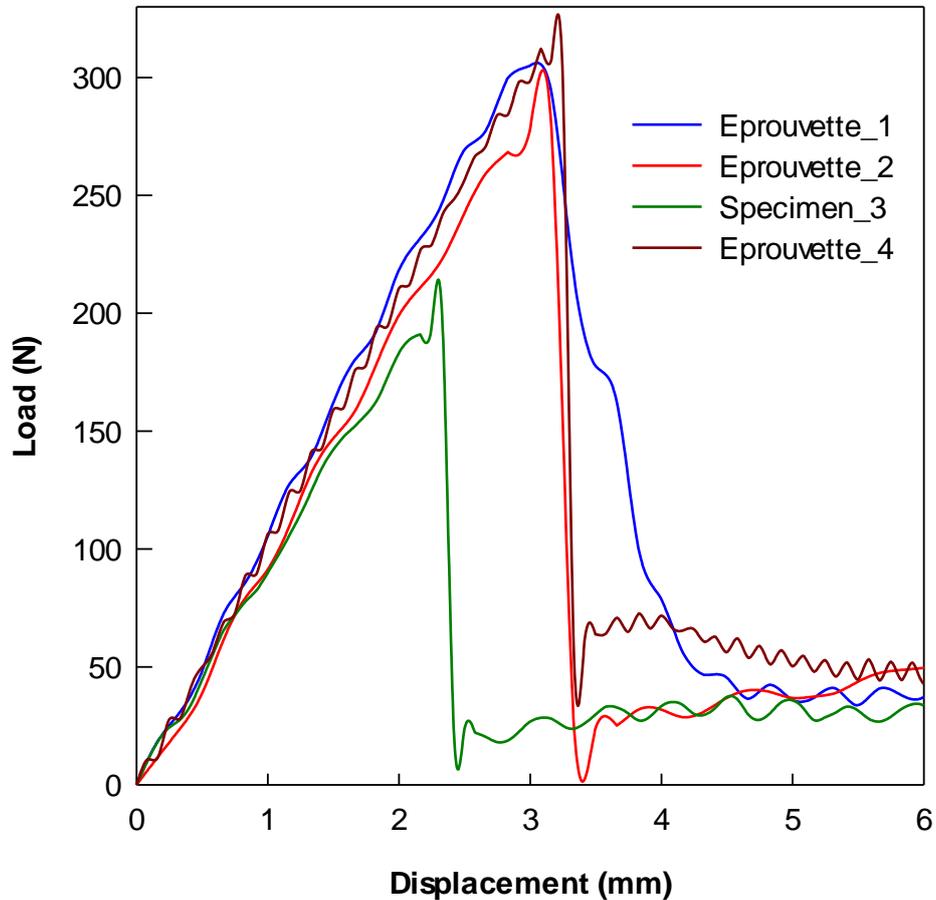


Figure 2.4 Courbe Charge-Déplacement des éprouvettes sandwichs en nids-d'abeilles testées en flexion 3-Points

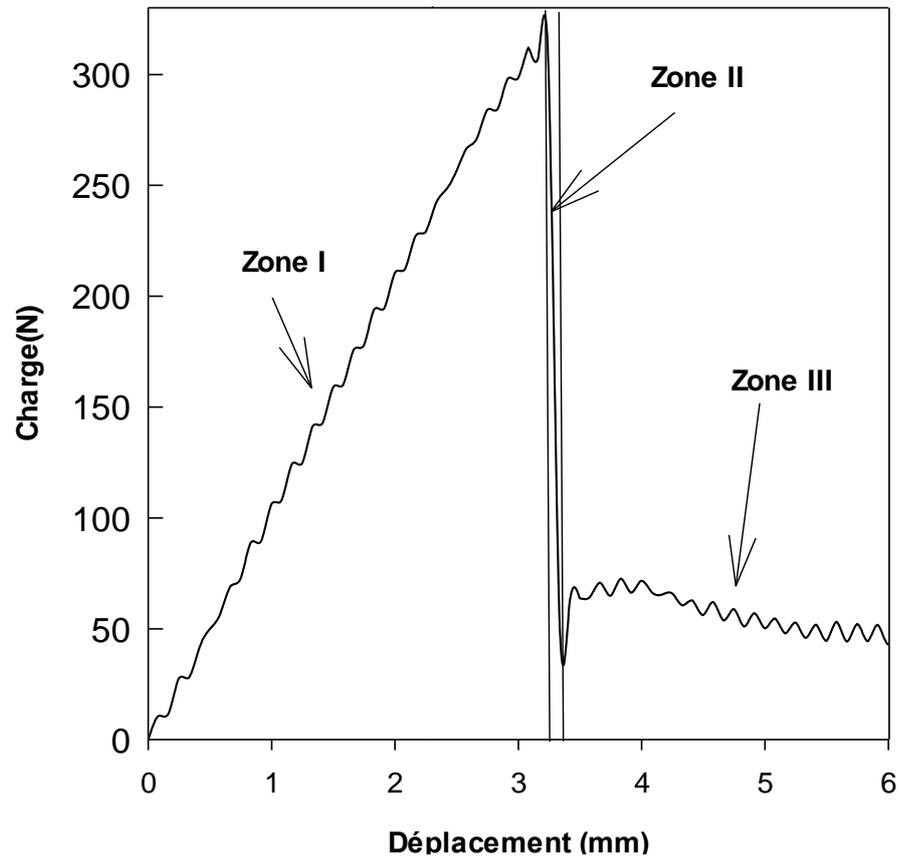
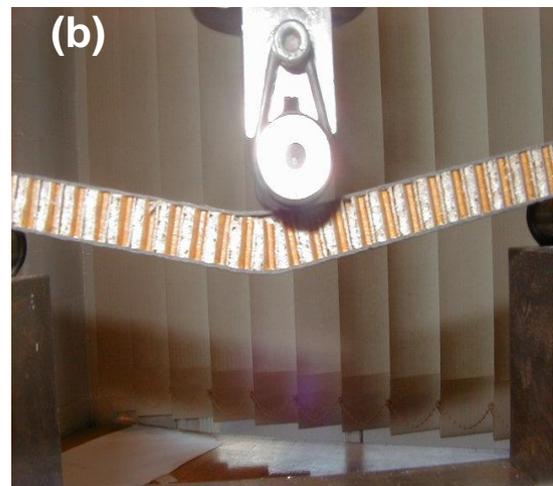
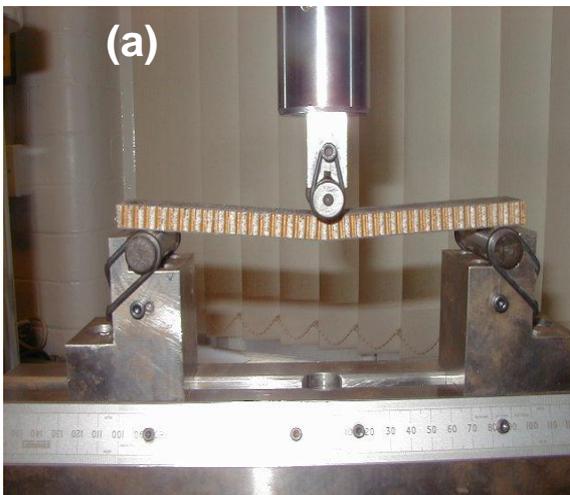


Figure 2.5 Courbe type Charge-Déplacement des éprouvettes sandwichs en nids-d'abeilles.



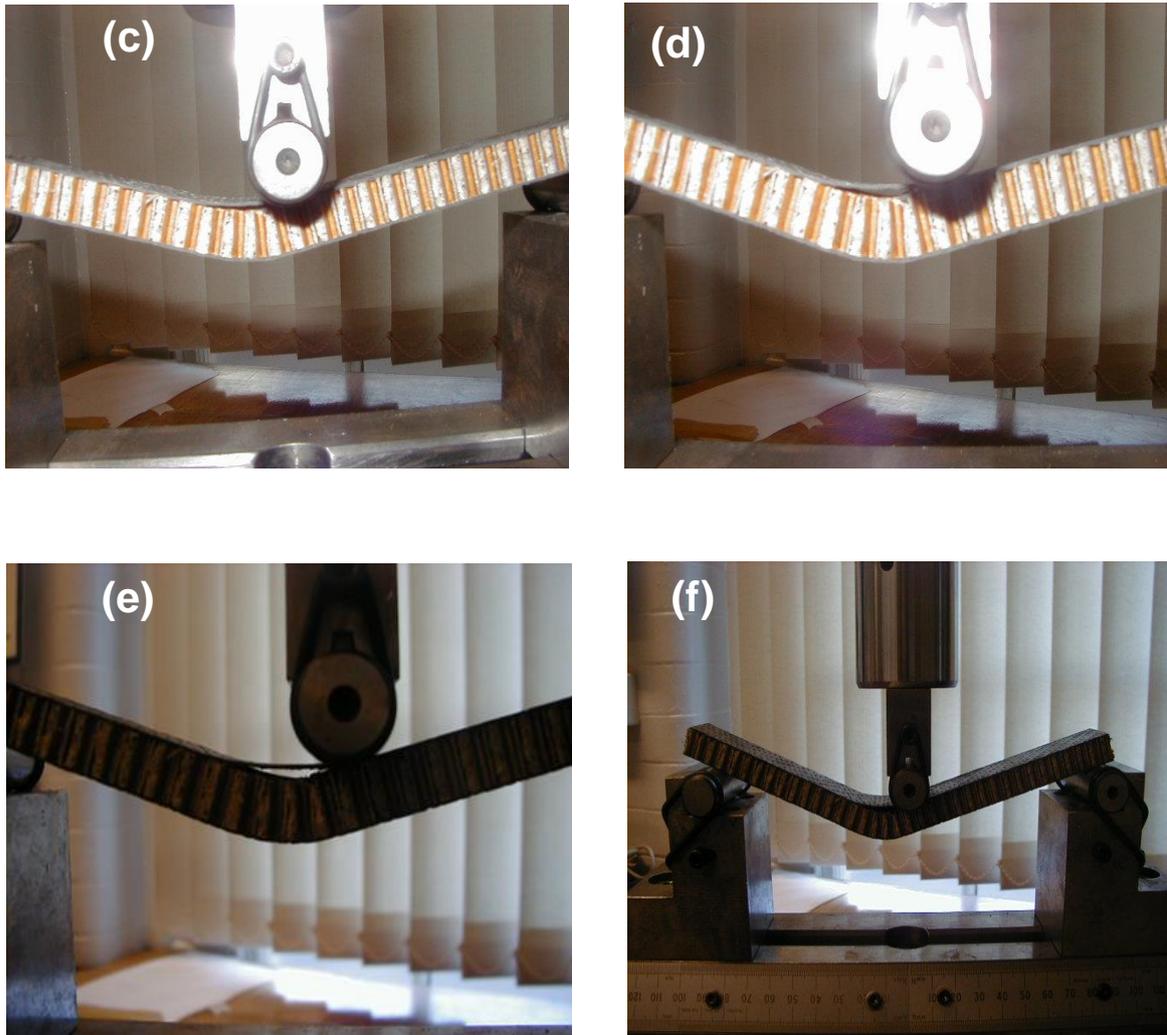


Figure 2.6. Photographies des différentes étapes de l'essai statique ; (a) début de l'essai avec une charge nulle jusqu'à la rupture de la peau supérieure du sandwich (f).

2.2.4 Comportement statique en compression

Quinze éprouvettes à âme en nids-d'abeilles ont été considérées pour les essais statiques en compression, les éprouvettes, ayant des dimensions nominales de $65 \times 65 \times 25 \text{ mm}^3$ ont été découpées à partir de panneaux de dimension $130 \times 130 \text{ mm}^2$ selon la norme standard ASTM C 365-09. Chaque essai a été répété cinq fois dans les mêmes conditions nominales pour déterminer l'importance de la réponse de la variabilité. Ces échantillons ont été comprimés à deux vitesses constante de $2 \text{ mm} / \text{min}$ et $5 \text{ mm} / \text{min}$. Ces essais ont été effectués sur trois configurations : plat (Figure 2.7), direction-L et direction-W (Figure 2.8 et 2.9); en contrôle déplacement, à deux vitesses de déplacement égales à 2 mm/mn et 5

mm/min, selon les normes ASTM D 364-07. La contrainte de compression a été calculée en divisant la charge de surface de section transversale des échantillons. La souche a été obtenue en divisant la course avec l'épaisseur de l'échantillon initial. Le module a été estimé à partir de la pente de la courbe contrainte - déformation.

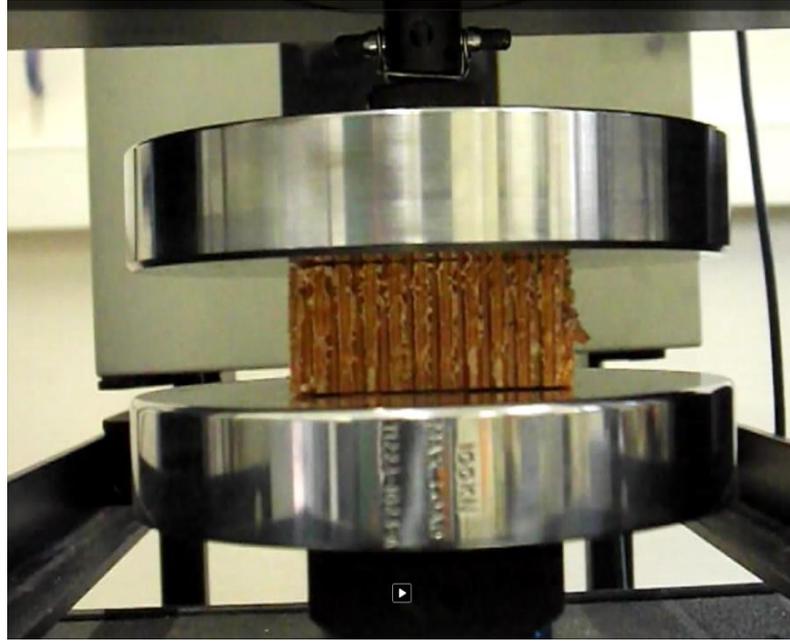
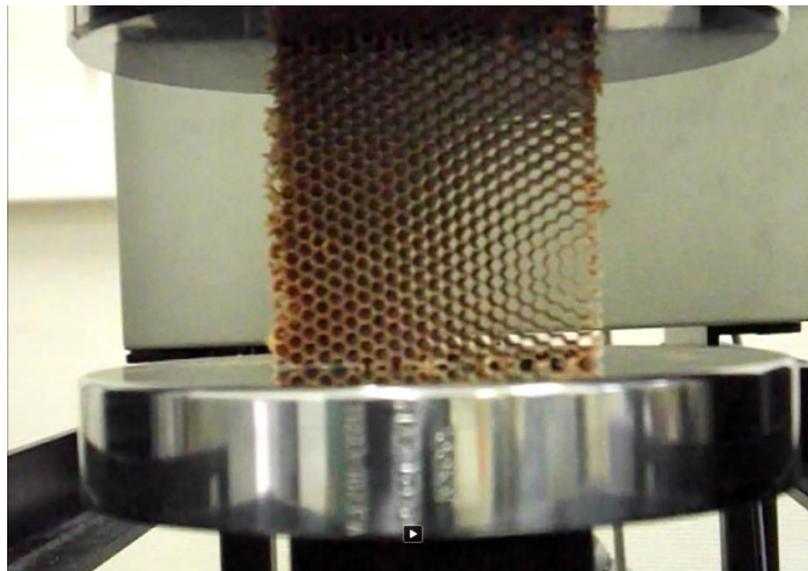
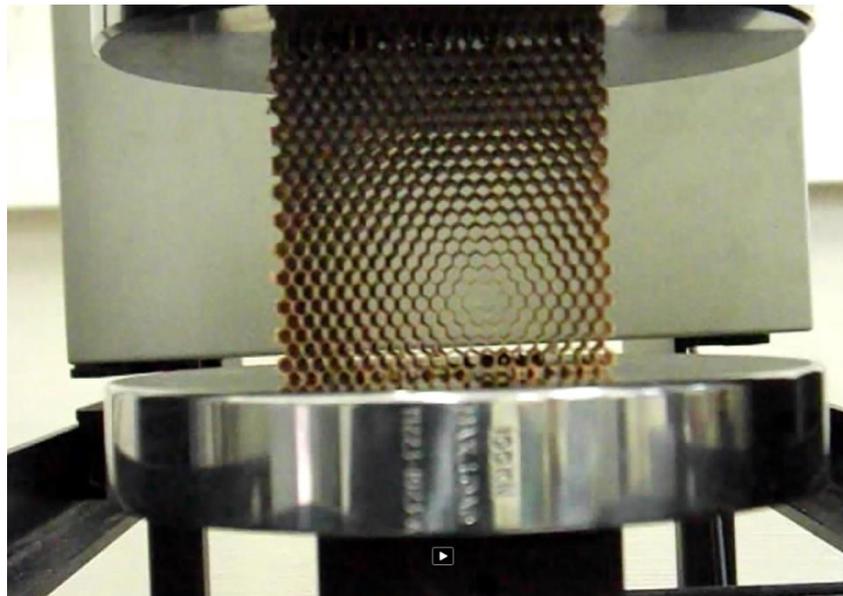


Figure 2. 6 Essais de compression sur Éprouvette à plat.



(a)



(b)

Figure 2. 7 Essais de compression sur éprouvette sur chant : (a) Configuration L, (b) Configuration W.

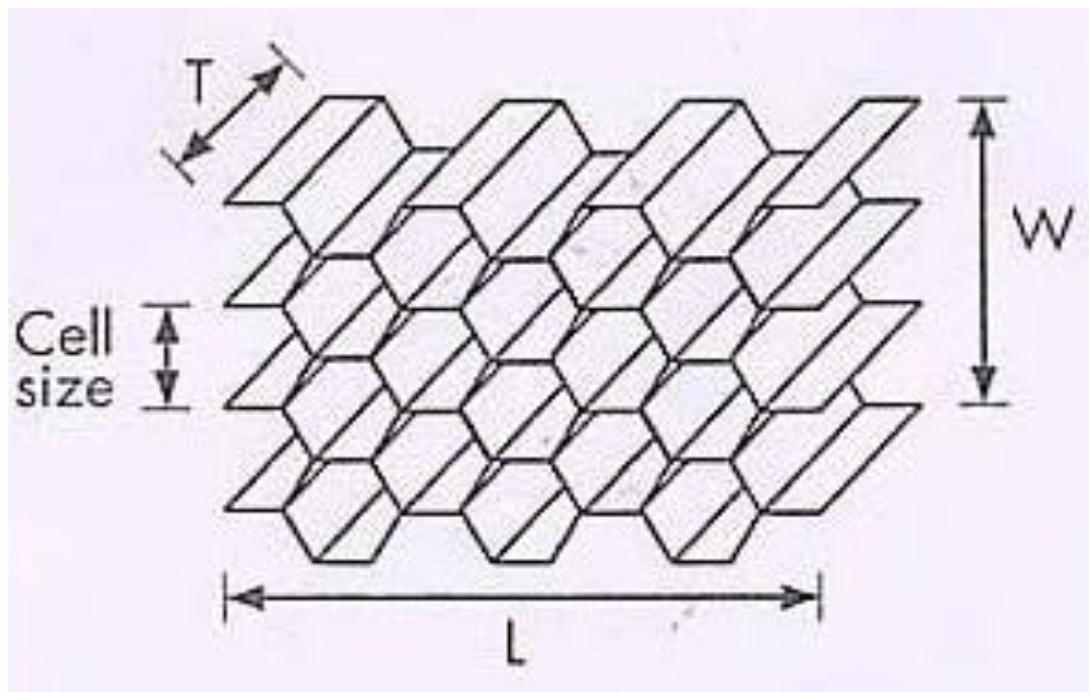


Figure 2.8 Direction d'observations.

Pendant les essais, le déplacement de la traverse supérieure de la plate-forme de compression et la charge totale appliquée ont été acquis. A partir de ces données la rigidité

des éprouvettes a été calculée comme la pente de la partie initiale de la courbe de charge-déplacement au moyen d'une régression linéaire.

La résistance à la compression à plat (σ) a été calculée en utilisant l'équation suivante:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Où P est la charge à la rupture et A est la surface en coupe transversale de l'éprouvette. Les valeurs du module de Young E de compression ont été calculées à partir de l'équation suivante;

$$E = \frac{S.c}{A} \quad (2.2)$$

Où S est la pente de la partie linéaire initiale de la courbe Charge-Déplacement et c est l'épaisseur de l'âme.

Les figures 2.9 et 2.10 montrent l'évolution de la charge en fonction du déplacement appliqué sur les éprouvettes en nids-d'abeilles, obtenus par compression statique, respectivement le long des deux différentes configurations L et W. la comparaison de l'évolution de charge en fonction de déplacement entre les deux est représentée dans la figure 2.11.

Deux régions distinctes peuvent être identifiées à partir de ces courbes. Chaque configuration affiche une région initiale élastique à un endommagement initial, suivi par une région de densification. Chacune des deux phases est corrélée à des mécanismes de rupture spécifiques que le nid-d'abeilles subit lors de la compression.

A petites déformations, généralement moins de 5%, le comportement est linéaire élastique, avec une pente égale au module de Young du nid-d'abeilles.

Pour les nids-d'abeilles suivant la configuration plate, la région linéaire est commandée par pliage des bords de la cellule et l'étirage de parois cellulaires au cours de l'application de la charge (figure 2.11).

Lorsque la charge augmente, la compression de l'air ou du gaz piégé dans les parois cellulaires augmente entraînant la rupture des parois cellulaires, les cellules en nids-d'abeilles commencent également à s'effondrer par effondrement plastique, en plastique souple ou écrasement fragile.

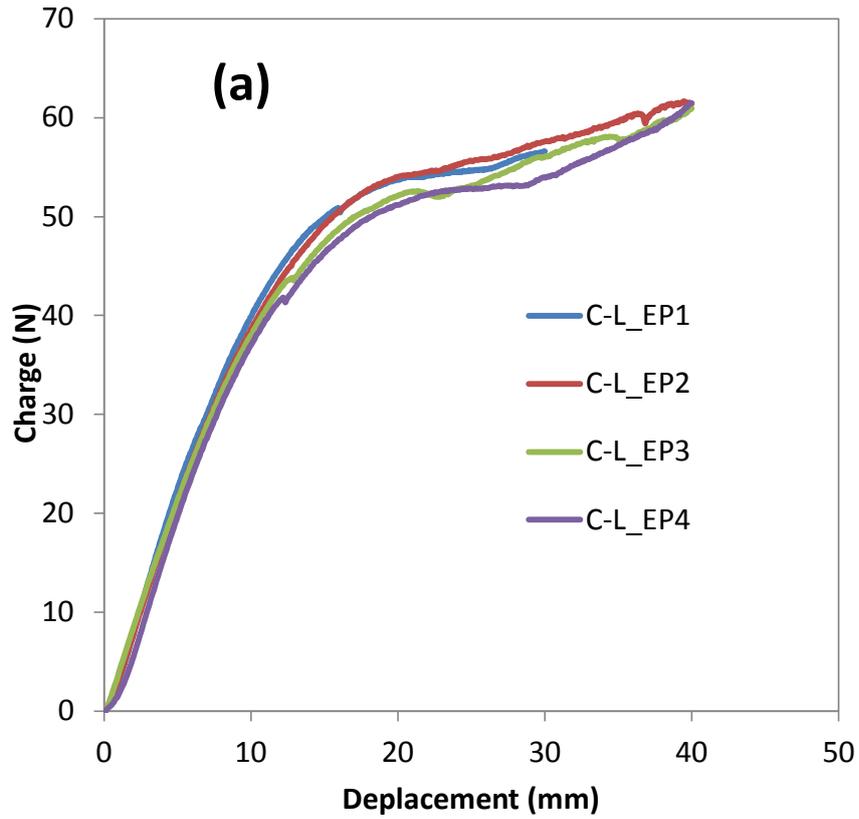


Figure 2.9 Evolution charge-déplacement suivant la configuration L.

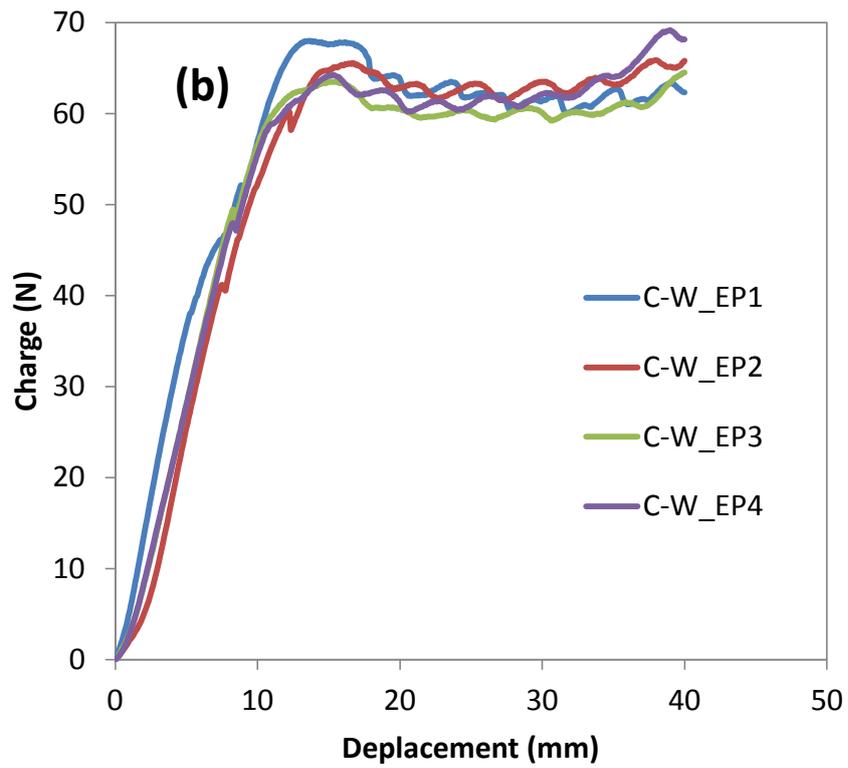


Figure 2.10 Evolution charge-déplacement suivant la configuration W.

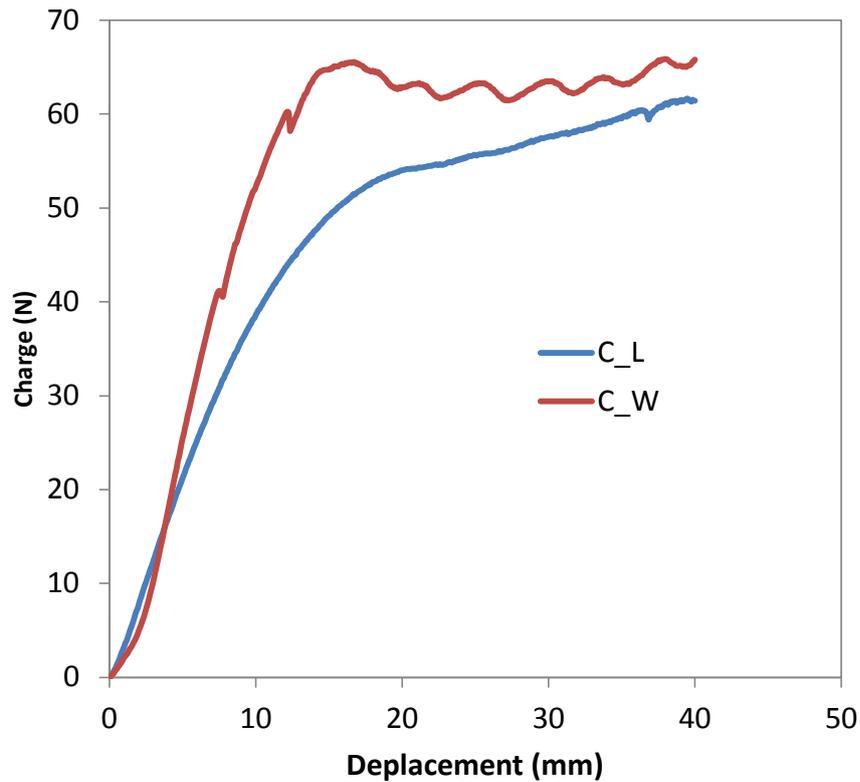


Figure 2.11 Comparaison entre configuration L et W.

L'étude de l'influence de la vitesse d'essais sur la réponse mécanique des plaque sandwichs testé en compression (en configuration plat), telle que on a choisi comme vitesse d'essai : 2 mm/min et 5 mm/min, nous a permet de tracer les courbes qui représentent l'évolution de la charge en fonction de déplacement pour les deux vitesses d'essais (figure 2.12). La figure 2.13 représente la comparaison de l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour les deux vitesses d'essais. . Ces résultats ont montrés que la vitesse d'essai choisi n'a aucune influence sur le comportement mécanique de nos plaques sandwichs.

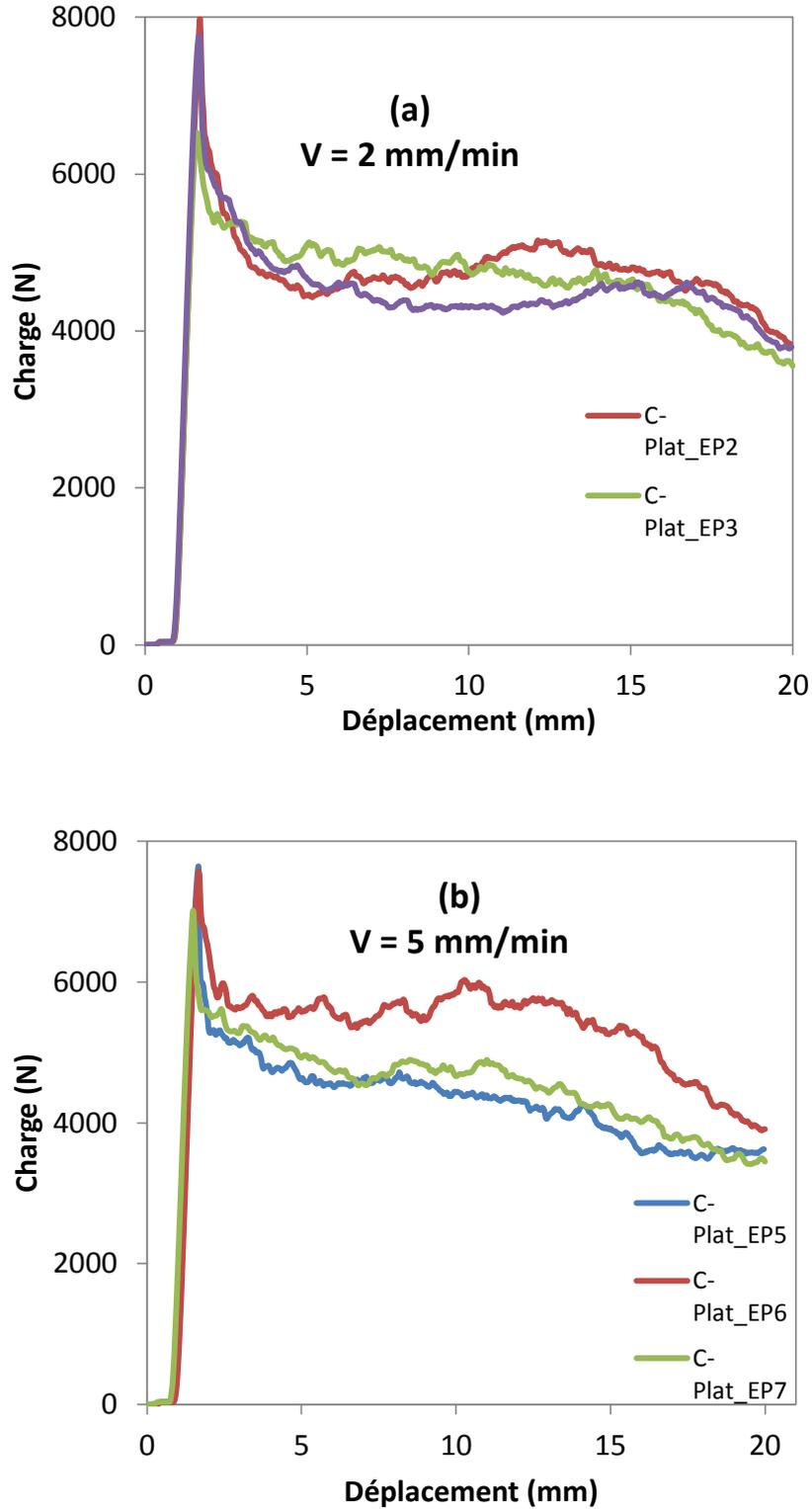


Figure 2.12 Evolution de charge en fonction de déplacement pour deux vitesses d'essais :
(a) 2 mm/min, (b) 5 mm/min.

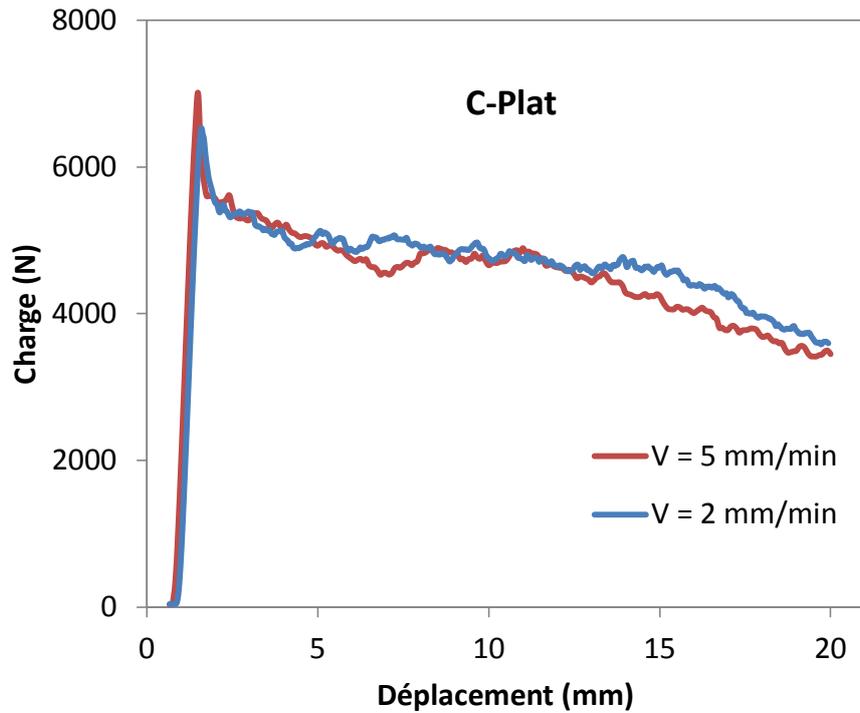
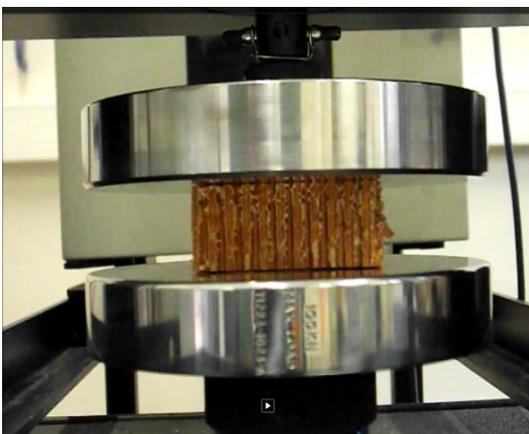


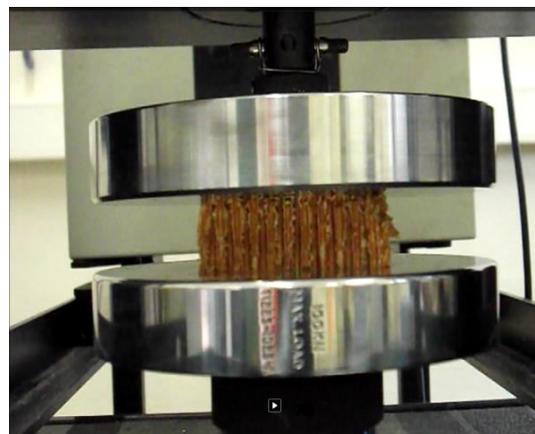
Figure 2.13 Comparaison de l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour les deux vitesses d'essais.

2.2.5 Observation des endommagements du nid d'abeilles Nomex en compression

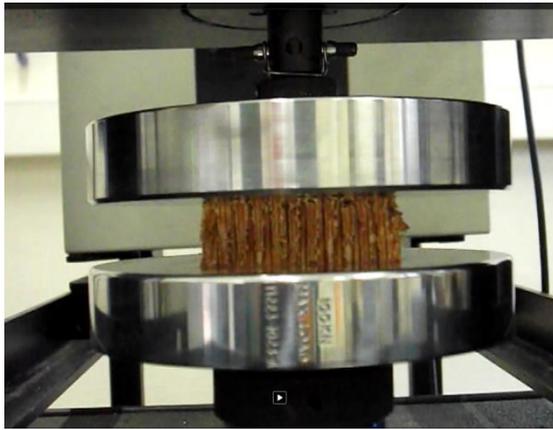
L'observation de l'évolution de l'endommagement des plaques en nids-d'abeilles, et pour différentes configurations (L et W) permet de constater que la résine casse sur toute la hauteur du nid d'abeilles (figure 2.15 et 2.16). Ce phénomène est présent jusqu'à la force critique de la courbe charge-déplacement.



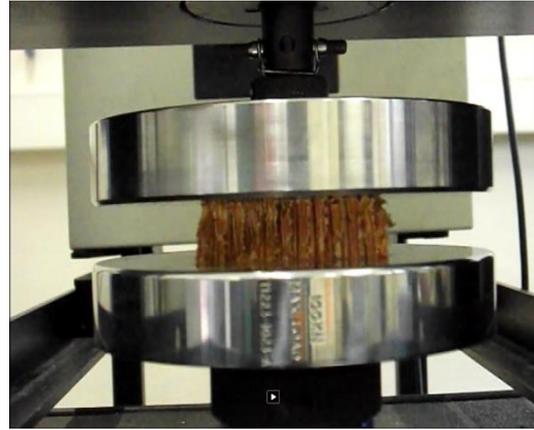
(a)



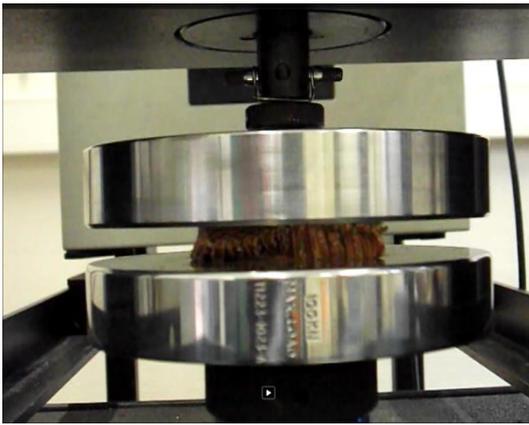
(b)



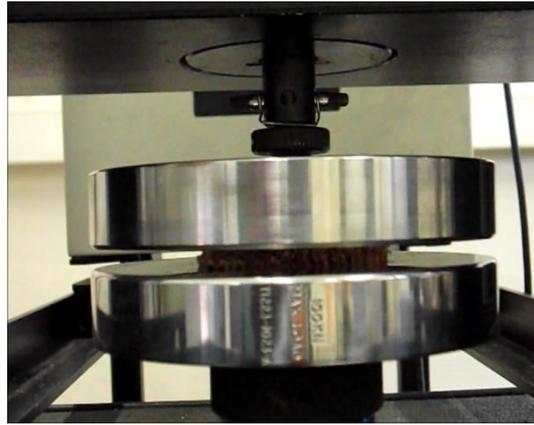
(c)



(d)

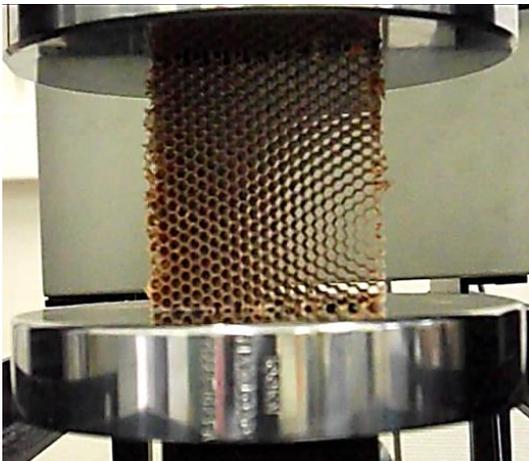


(e)

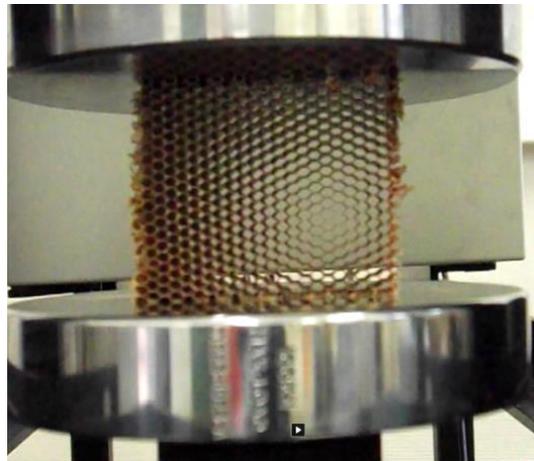


(f)

Figure 2.14 Observation de l'évolution de l'endommagement en configuration plate.



(a)



(b)

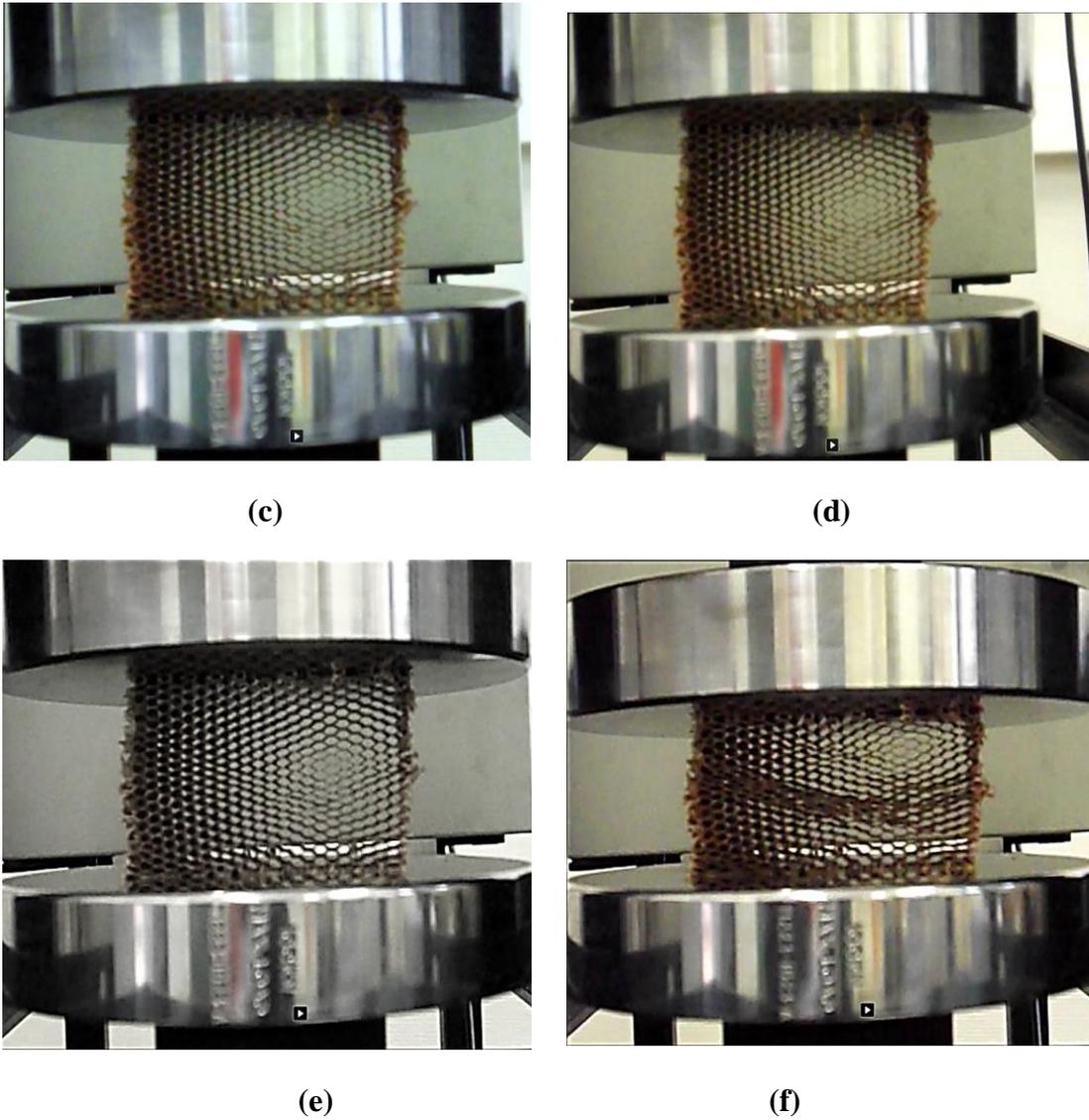
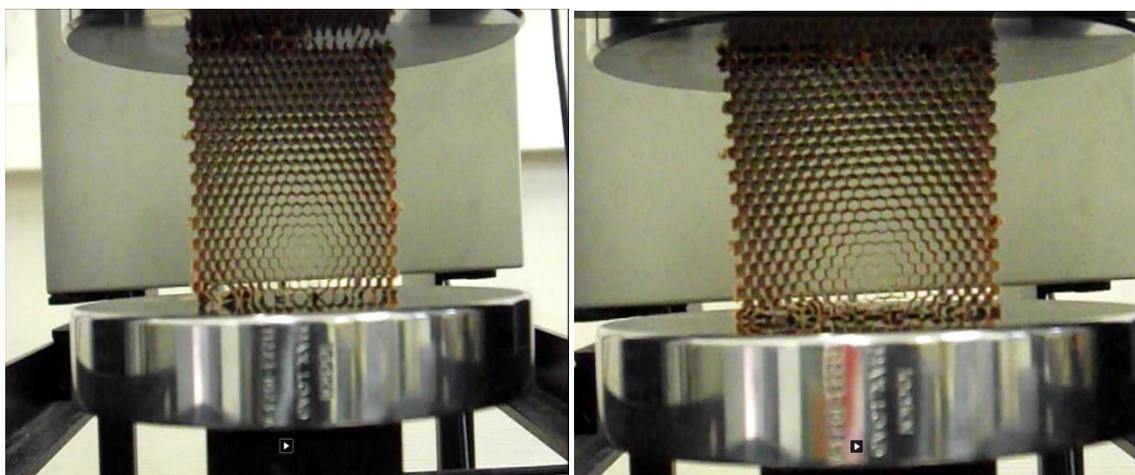


Figure 2.15 Observation de l'évolution de l'endommagement en configuration L.



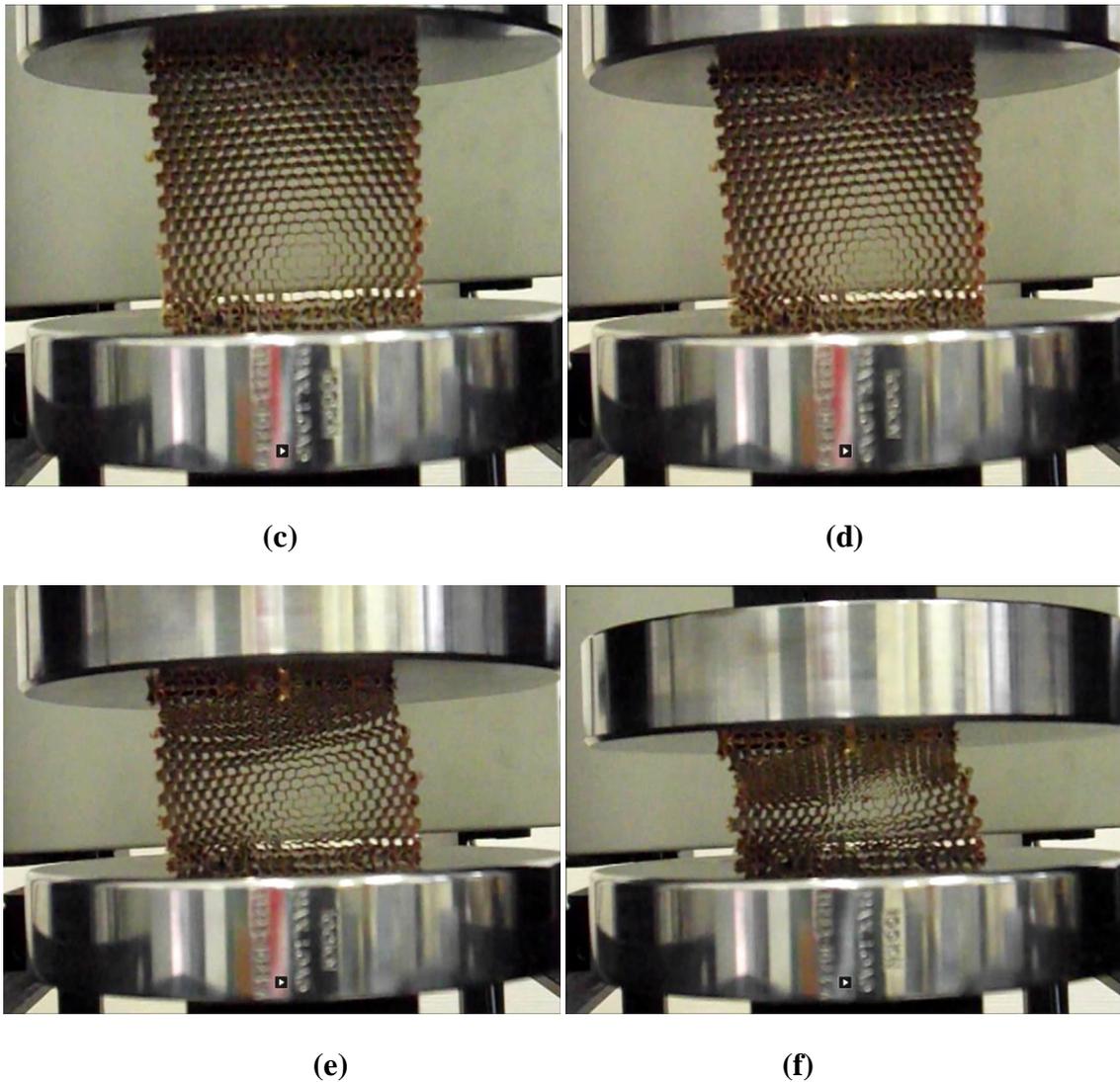


Figure 2.16 Observation de l'évolution de l'endommagement en configuration W.

2.3 Essais de relaxation en flexion 3-Points

2.3.1 Introduction

Le facteur le plus important dans les matériaux composites, stratifiés et sandwichs est leur perte de rigidité au cours du temps en raison de nombreux mécanismes, y compris la fatigue non-cyclique (fluage et relaxation), les essais de fluage se font pour mesurer la déformation en fonction du temps d'un matériau sous une charge constante alors que les essais de relaxation, pour mesurer la diminution de la charge lors d'une déformation constante appliquée sur le matériau. Les paramètres majeurs pour caractériser les matériaux viscoélastiques de ces essais sont le taux du régime permanent en fluage et en relaxation, la déformation et la charge à la rupture ainsi que le temps, et d'autres facteurs

environnementaux tels que La température et l'humidité qui sont des facteurs secondaires influant sur le comportement des matériaux composites.

Dans de nombreuses applications, une structure sera soumise à un profil de chargement qui est une combinaison de la fatigue cyclique et non cyclique. Ainsi, il est nécessaire de comprendre et de quantifier ce genre de comportement pour assurer l'intégrité structurale.

En raison de la nature viscoélastique des matériaux polymères, le comportement mécanique en fonction du temps est très important pour la durée de vie de la structure et des composants structuraux. Les composants peuvent également s'endommager prématurément si elles sont soumises à des charges importantes sur une longue période de temps. Il est bien connu que le comportement mécanique des matériaux composites dépendant du temps peut être influencé de manière significative par diverses conditions environnementales telles que la température, humidité, charges mécaniques, etc. Actuellement, les recherches sont relativement peu connues sur le comportement des matériaux sandwichs en relaxation ou en fluage en flexion 3-Points.

Zhang et Zhao [50, 51] ont étudié le comportement des éprouvettes en tissu de verre / époxyde soumises à la flexion trois points. Des essais de fluage et de relaxation pour déterminer les déformations et les charges en fonction du temps dans les poutres ont été effectués. La durée de l'essai pour chaque expérience était de 100 minutes à une température de 50°C. Les éprouvettes avec une séquence d'empilement [± 45] montre un bon comportement de fluage des échantillons testés, alors que les spécimens avec 0 ° affichent des résultats moindres .Les auteurs ont fait valoir que l'inclusion des déformations dans le plan de cisaillement explique le taux de fluage avancé pour les spécimens [± 45]. Les résultats expérimentaux ont été utilisés pour déterminer des coefficients dans une équation généralisée de fluage en fonction des hypothèses de petites déformations et du comportement d'un matériau sollicité en traction et en compression. L'analyse théorique de déviation de faisceau en tenant compte des effets de cisaillement transversal a été réalisée. Un bon accord entre la prédiction théorique de déviation de faisceau et les résultats expérimentaux ont été obtenus.

Ericksen [52] a étudié le comportement à long terme d'un composite stratifié en verre/époxyde ainsi que les performances des composants. Les échantillons ont été testés à

différents niveaux de chargement pour une durée totale de 1000 heures. Les auteurs ont découvert qu'il y avait une relation entre le comportement en fluage du stratifié lui-même et le comportement de la matrice et du renfort. Le fluage initial du composite peut être mis en corrélation avec le comportement de la matrice. Le fluage du stratifié sur de longues périodes a été lié à un comportement au fluage des fibres.

L'étude du comportement mécanique des matériaux sandwichs pendant la relaxation en contrôle déplacement s'avère nécessaire. Vu qu'il est possible de mettre en évidence le phénomène de la perte de rigidité en fonction du temps qui entraîne directement la détérioration et de prévoir la défaillance de la structure.

Pour comprendre ce phénomène, des expériences ont été effectuées avec des éprouvettes sandwichs à différents niveaux de chargement appliqués r .

2.3.2 Protocole d'essais

Les éprouvettes sollicitées précédemment, en statique en flexion trois points seront sollicitées en relaxation. Ces essais ont été effectués à température ambiante. Plus de 15 éprouvettes ont été utilisés pour réaliser tous les niveaux de chargement r . Une durée de 170 heures a été choisie. Cette durée est relativement longue comparée aux essais de courte durée qui peut nous permettre de vérifier la pertinence des taux de relaxation calculés d'après les mesures ainsi réalisées. Elle reste cependant faible comparé à des essais de fluage présentés dans la littérature pouvant durer jusqu'à plusieurs mois.

Afin de déterminer l'influence du niveau de chargement en relaxation sur les éprouvettes sandwichs, plusieurs niveaux ont été appliqués de $r = 0,60$ jusqu'à $r = 0.85$. La vitesse de la traverse lors du chargement est de 2 mm/min.

On a une première phase, généralement une augmentation non linéaire de la charge en fonction du temps, correspondant à la phase de chargement de l'essai. A la fin de l'essai, la charge atteint un pic quand le niveau de déplacement désiré est atteint.

2.3.3 Analyse des résultats

L'évolution de la charge en fonction du temps pour différents de niveaux de chargement r est représentée dans la figure 2.17. La durée des essais a été fixée à 170 heures, suffisante pour étudier le comportement de ces matériaux en particulier les stades initiaux de l'endommagement sous l'effet de la relaxation.

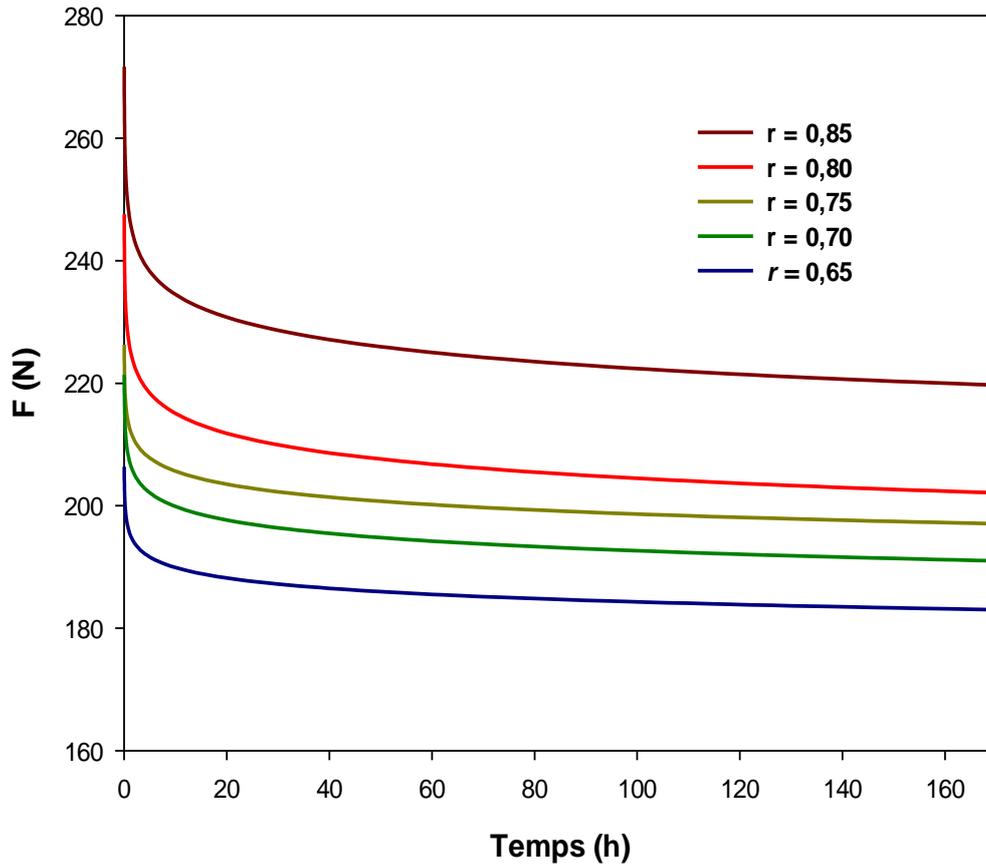


Figure 2.17. L'évolution de la charge en fonction du temps pour des différents niveaux de chargement au cours des essais de relaxation.

Étant donné que le traçage de ces courbes commence à différents pics de charge, le comportement en relaxation est difficile à comparer directement. Pour avoir une idée sur la manière à laquelle la charge se relaxe sur l'ensemble des échantillons testés, la charge au cours de la relaxation est rapportée à la force maximale F_{\max} atteinte à la fin de la phase de chargement (figure 2.18).

Cela donne des courbes charge-temps ajustées commençant par le point (0;1). Ceci peut être considéré comme représentant du pourcentage de la charge totale induite restant dans l'éprouvette à tout moment après le début de la période de relaxation.

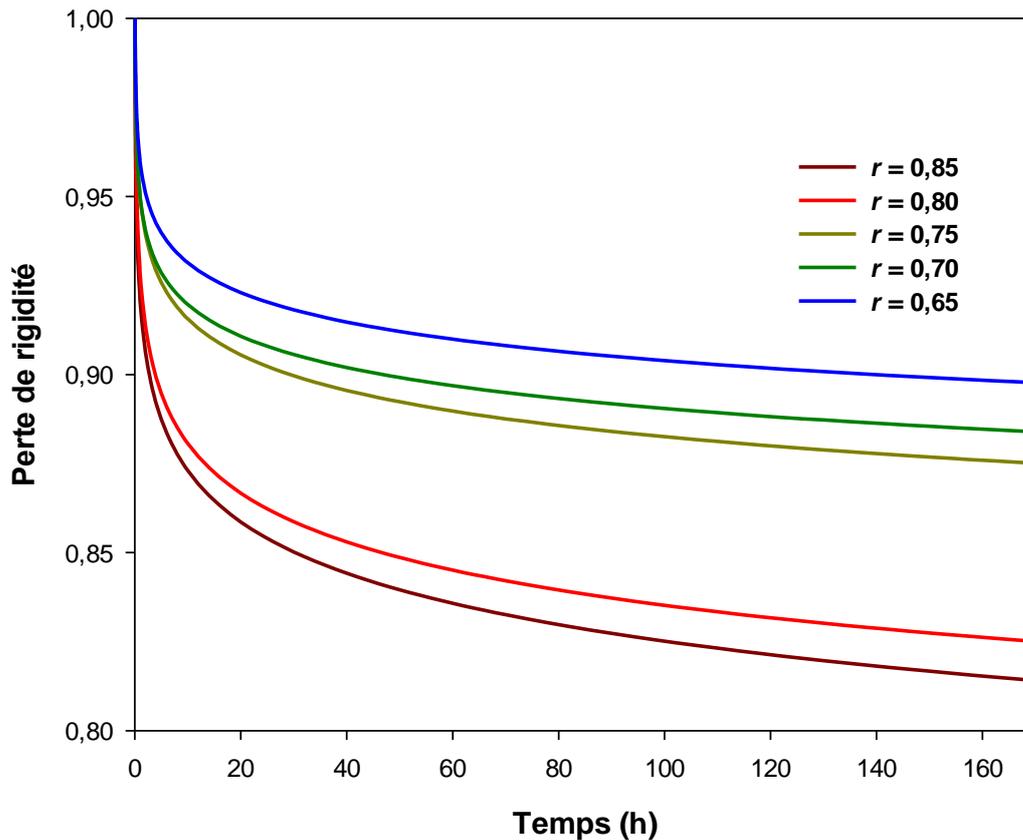


Figure 2.18. L'évolution de la perte de rigidité en fonction du temps pour des différents niveaux de chargement au cours des essais de relaxation.

On constate que la tendance des courbes en relaxation est similaire à celles de la perte de charge dans le cas de la fatigue cyclique en flexion 3-points (chapitre 3). Cela nous laisse penser que le même mécanisme de relaxation régit la fatigue.

L'évolution de la perte de rigidité des éprouvettes sandwichs en nids-d'abeilles testées sous l'essai de relaxation (c'est-à-dire à déplacement constant) est classée en deux étapes :

- Première étape est appelée initiation et le développement de l'endommagement à la peau en raison du développement des fissures dans la matrice et les fibres résultant de la dégradation de la rigidité.
- Dans la deuxième phase de relaxation et au cours du temps, il y'a une croissance lente et la progression de l'endommagement initialement développé dans la peau, provoque l'endommagement dans le noyau résultant de la perte totale de la rigidité dans la structure sandwich.

2.3 Conclusion

Le travail de ce chapitre s'intéresse à l'étude du comportement en statique en flexion 3-points, en compression et en fatigue non-cyclique des matériaux sandwichs en nids-d'abeilles. Les matériaux utilisés dans ce travail sont constitués de stratifiés en tissus de fibres de carbone et de résine époxyde pour les peaux et d'une âme en nids-d'abeilles.

Dans l'étude expérimentale du comportement statique des matériaux sandwichs en nids-d'abeilles sollicités en flexion 3-points a permis d'observer l'endommagement et de déterminer les paramètres nécessaires aux essais de fatigue non-cyclique. Elle a permis, aussi, de montrer l'importance du phénomène de décohésion entre la peau et l'âme au voisinage de l'appui central, ce qui entraîne la rupture du sandwich.

L'analyse des résultats d'essais de fatigue non-cycle sur les même éprouvettes teste en statique a montré que le domaine de comportement linéaire est limité à de faibles valeurs des déformations.

Le suivi de la perte de rigidité des sandwichs, en fatigue non-cyclique, jusqu'à la rupture se déroule en deux phases. L'influence du niveau de chargement r sur le comportement en fatigue non-cyclique du sandwich étudié a été mise en évidence par une modélisation analytique citée dans le chapitre 4.

Chapitre 3

Analyse du comportement mécanique en fatigue cyclique des composites sandwichs en nid-d'abeille

Chapitre 3

Étude expérimentale du comportement en fatigue cyclique des panneaux sandwichs en flexion 3-points

3.1 Introduction

Le phénomène de fatigue du matériau se caractérise par sa rupture après application d'un grand nombre de sollicitations dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture statique du matériau. Ce phénomène est rencontré fréquemment dans de nombreux domaines industriels qui mettent en jeu des sollicitations cycliques, sollicitations par vibration, etc. Les premières études fondamentales du phénomène de fatigue ont été entreprises par Wöhler sur les métaux. A l'heure actuelle, ce sont les matériaux ordinaires pour lesquels on dispose des connaissances les plus étendues. Alors que pour les matériaux composites, en particulier les composites sandwichs, le phénomène de fatigue reste peu maîtrisé ce qui limite leur utilisation. Au cours de ces dernières années les travaux effectués dans la littérature ont montré que le phénomène de fatigue dépend de plusieurs paramètres (nature de sollicitations, chargement, fréquence de sollicitations, etc.). Parmi les travaux qui ont abordé l'influence de ces paramètres sur la fatigue des matériaux composites, nous n'avons considéré que quelques-uns d'entre eux qui ont conduit à des résultats importants. Le comportement mécanique élastique d'une structure constituée de matériaux sandwichs est généralement analysé par la théorie des plaques sandwichs [35, 53].

Des travaux expérimentaux ont été développés [36, 37, 54, 55] sur les matériaux composites sandwichs. Ils ont montré qu'au cours des essais de fatigue l'augmentation de la fréquence des sollicitations se traduit par l'augmentation de la température interne des éprouvettes et en particulier pour les matériaux polymères. Shenoï et al [56] ont montré qu'au cours des essais de fatigue sur des matériaux sandwichs, la fréquence ne doit pas être élevée, afin d'éviter une augmentation significative de la température de la mousse. Cette augmentation de la température entraînerait une diminution des propriétés en cisaillement de l'âme.

D'autres essais ont été effectués par Burman et al [57, 58] sur l'influence du rapport de chargement R et du niveau de chargement r sur le comportement et les mécanismes d'endommagement au cours de la fatigue des sandwichs.

Zenkert et Vikstrom [43] ont étudié le comportement en cisaillement de l'âme dans les structures sandwichs. Ils ont utilisé deux méthodes pour analyser et détecter la fissuration par cisaillement. La première méthode est de nature non destructive qui est basée sur la technique d'infrarouge. Alors que la deuxième méthode consiste à faire une estimation de la contrainte résiduelle en cisaillement dans la poutre sandwich en utilisant l'approche de la mécanique d'endommagement. Ils ont trouvé un bon accord entre les deux méthodes et les résultats obtenus expérimentalement. D'autres travaux de Zenkert [59] ont montré que la décohésion au niveau du plan médian de l'âme réduit rigoureusement la résistance du sandwich. Ils ont montré que la propagation des fissures dans l'âme peut être produite par un sur chargement par fatigue ou par impact. Une simulation par éléments finis de la propagation des fissures au cours de la fatigue a été développée, en se basant sur le calcul de la diminution de la contrainte en cisaillement. Les résultats obtenus par cette simulation ont été validés par ceux obtenus expérimentalement.

Clark et al. [39] ont développé un modèle analytique permettant d'évaluer la réduction du module au cours de la fatigue. Ils ont considéré que le processus d'endommagement en fatigue se déroule en deux périodes: une première période d'initiation de l'endommagement, puis une deuxième de l'évolution et de la multiplication de cet endommagement. L'évolution de la déformation en fonction du nombre de cycles est ensuite explicitée suivant une fonction de type exponentielle. A partir de cette expression, le module en fatigue est déterminé en fonction du nombre de cycles et du niveau de

chargement r . Enfin les auteurs ont utilisé les courbes de Wöhler pour caractériser la durée de vie des composites sandwichs.

Kulkarni et al [60] ont constaté que la rupture en fatigue par flexion du sandwich est contrôlée par la rupture de l'âme. En effet, ils ont montré que la propagation de la fissuration se fait en trois phases: d'abord la décohésion entre l'âme et la peau supérieure, ensuite le cisaillement de l'âme suivie par une autre décohésion entre la peau inférieure et l'âme. La première phase représente environ 85% de la durée de vie en fatigue et correspond à une dégradation de la rigidité de 10% environ. Les auteurs ont mis en place des essais de fatigue de telle sorte que l'endommagement se manifeste par la propagation des fissures dans l'âme. En se basant sur ces résultats, ils ont développé un modèle de fatigue qui consiste à simuler la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles pour différents niveaux de chargement r . Ce modèle a permis d'obtenir des résultats avec une erreur inférieure à 7.5% par rapport aux résultats expérimentaux.

El Mahi et al [41] ont étudié l'influence de l'épaisseur de l'âme sur le comportement en flexion du sandwich au cours de la fatigue. Ils ont choisi le critère N_{10} correspondant à une réduction de 10% de la rigidité par rapport à sa valeur initiale pour tracer les courbes de Wöhler de ces matériaux. Ces auteurs ont montré que pour un niveau de chargement donné, la durée de vie du sandwich diminue lorsque l'épaisseur de l'âme augmente

Dans ce chapitre nous proposons une analyse plus approfondie des mécanismes d'endommagement par fatigue cyclique des matériaux sandwichs présentés dans le paragraphe précédent. Ce type de matériau, qui associe de bonnes performances mécaniques et acoustiques, est bien adapté aux applications industrielles. Le présent travail a pour but d'étudier l'influence des niveaux de chargement sur le comportement en fatigue de ces matériaux, et d'en déduire la durée de vie en fonction du niveau de chargement r .

3.2 Essais

Ces essais sont menés en flexion trois points conformément à la norme ASTM C393 – 11 standard [61-62]. Les essais sont effectués avec une vitesse de déplacement de 2 mm/mn. Quatre éprouvettes ont été soumises à un chargement jusqu'à rupture. Un traitement statistique des données a été réalisé à la fin de chaque série de manière à obtenir les valeurs des données médianes. Après, les échantillons sont soumis à une sollicitation cyclique, avec une forme d'ondes sinusoïdale d'une fréquence de 2 Hz et une amplitude de 2

mm/min. menés en contrôle déplacement correspondant à 50% de la rupture en statique. Le niveau de chargement r appliqué sur les éprouvettes est défini par la relation $r = d_{max}/d_{rup}$ [63]. Le déplacement moyen est maintenu constant égal à 50% du déplacement à la rupture en statique ($d_{moy}/d_{rup} = 50\%$).

Où d_{max} est le déplacement maximal pendant le chargement cyclique, et d_{rup} est le déplacement à la rupture mesurés à partir des essais statiques. Les niveaux de chargement r utilisés dans ces tests varient de 0,60 à 0,85, et pour chaque valeur de r trois échantillons ont été soumis à la charge de fatigue. Ces éprouvettes sont testées en fatigue jusqu'à 1000000 cycles.

Dans cette partie du travail nous nous intéressons au comportement en fatigue cyclique pour les mêmes éprouvettes sandwichs testées en statique. Nous analysons l'influence du niveau de chargement sur la rigidité, sur la boucle d'hystérésis et sur le facteur de perte au cours des essais de fatigue cycliques. La charge maximale (F_{max}) est rapportée à celle obtenue dans le premier cycle (F_{0max}).

Pour tracer les diagrammes d'endurance, nous avons considéré plusieurs niveaux de chargement $r(d_{max}/d_{rup})$ variant entre 60% et 85%.

3.3 Résultats et discussions

3.3.1 La rigidité

Nous avons reporté dans la figure 3.1 avec une échelle semi-logarithmique, l'évolution de la charge maximale (F_{max}) en fonction du nombre de cycles (N) pour différents niveaux de chargement r . Les résultats sont obtenus dans le cas d'un déplacement moyen de 50% du déplacement à la rupture en statique. Ces résultats montrent que la charge maximale supportée par l'éprouvette en matériau sandwich dépend du nombre de cycles de fatigue et de niveaux de chargement. D'une manière générale, la charge diminue avec l'augmentation des niveaux de chargement et du nombre de cycles.

Pour des niveaux de chargement élevés, correspondant à de grandes amplitudes, la résistance à la fatigue est très courte et la rupture totale est atteinte après seulement quelques milliers de cycles. Par exemple, pour $r = 0,85$, la rupture est obtenue après 100 cycles. Cependant, pour un faible niveau de chargement correspondant à une faible amplitude, les mécanismes de l'endommagement sont activés avec une propagation très

lente et la résistance à la fatigue est très importante. En effet, à un million de cycles la rupture n'est que partielle pour un niveau de chargement $r = 0,60$.

L'évolution de la rigidité (F/F_0) jusqu'à la rupture des éprouvettes se déroule en trois phases: dans un premier temps, elle se manifeste par une diminution brutale dès les premiers cycles ; dans la deuxième phase, la diminution devient très lente, correspondant à la quasi-totalité de la durée de vie de l'éprouvette, enfin, la troisième phase qui est très courte où la perte de charge s'accélère brutalement jusqu'à rupture de l'éprouvette. Les trois phases de la courbe peuvent être associées à la multiplication des fissurations de la résine dans les peaux. Pendant la première phase. L'initiation et la propagation de la décohésion entre la peau en contact avec l'appui central et l'âme, durant la deuxième phase la propagation de la décohésion s'est développée et enfin l'écrasement de l'âme et la rupture des fibres de la peau supérieure entraînant l'endommagement partiel de l'éprouvette dans les faibles niveaux de chargement r et un endommagement total pour les niveaux élevés.

L'analyse des résultats montre que le comportement jusqu'à la rupture, sous sollicitations cycliques, dépend fortement du niveau de chargement r .

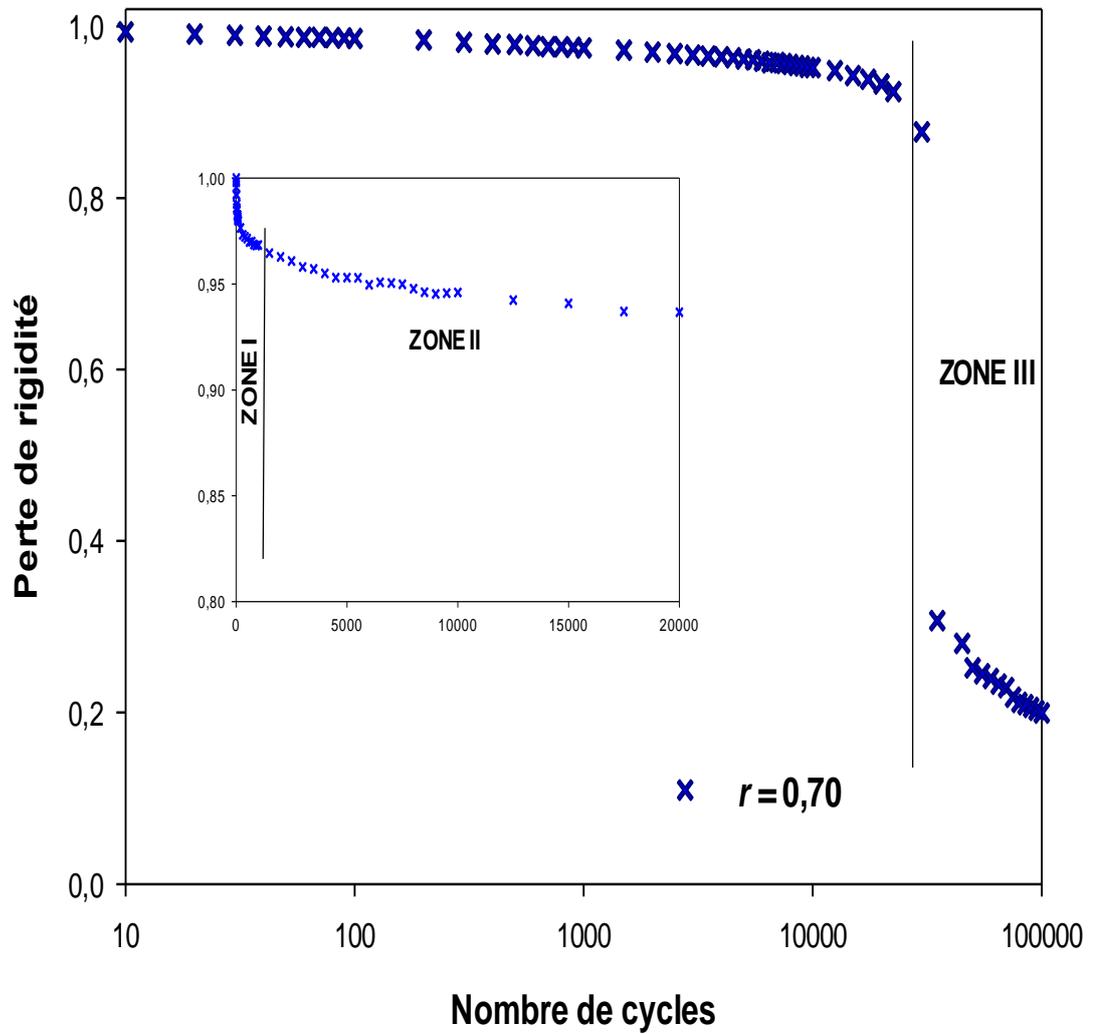


Figure 3.5. Courbe type de l'évolution de la perte de rigidité en fonction du nombre de cycles.

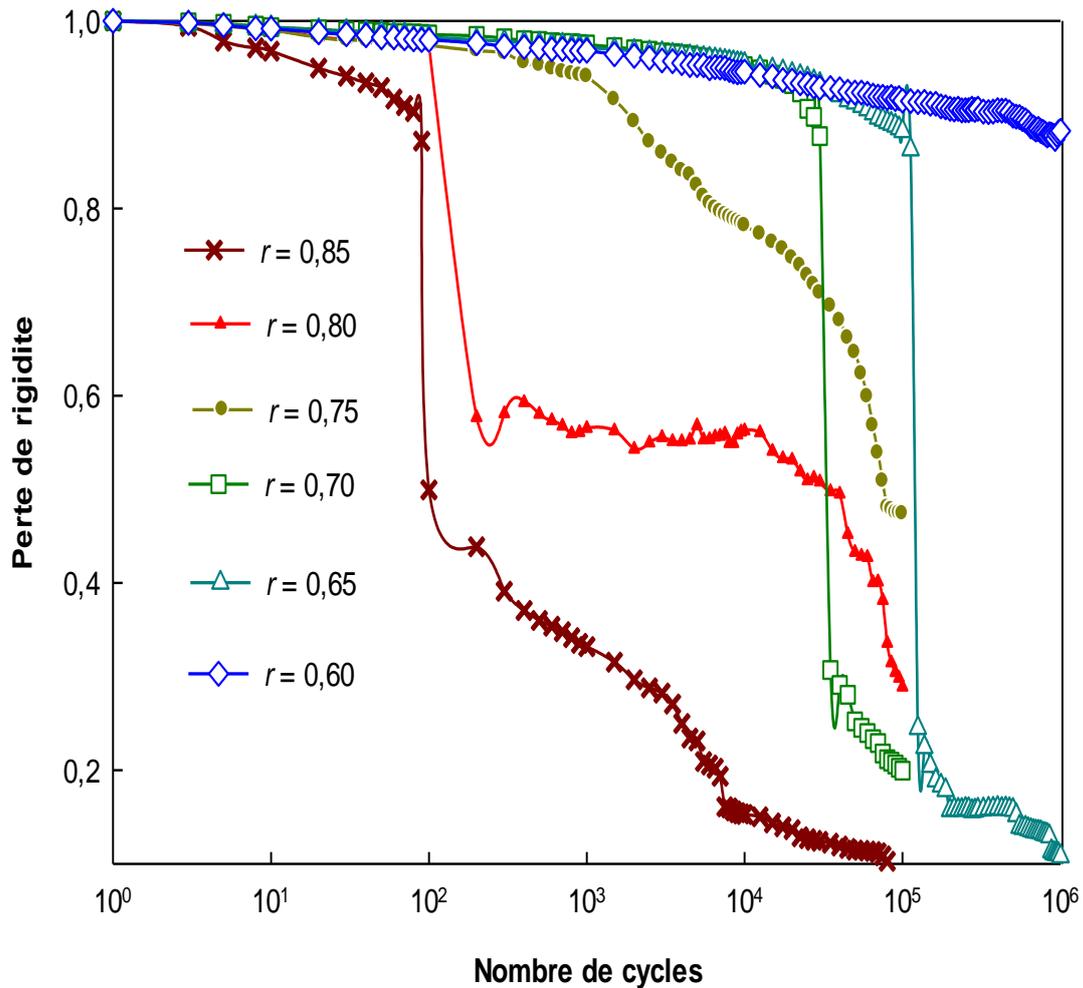
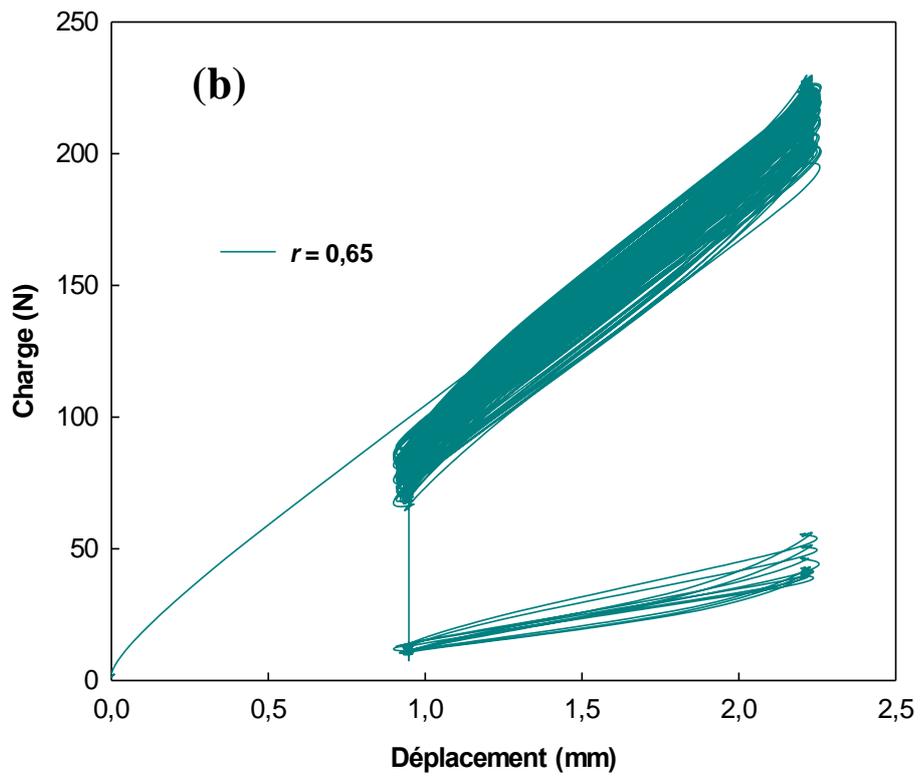
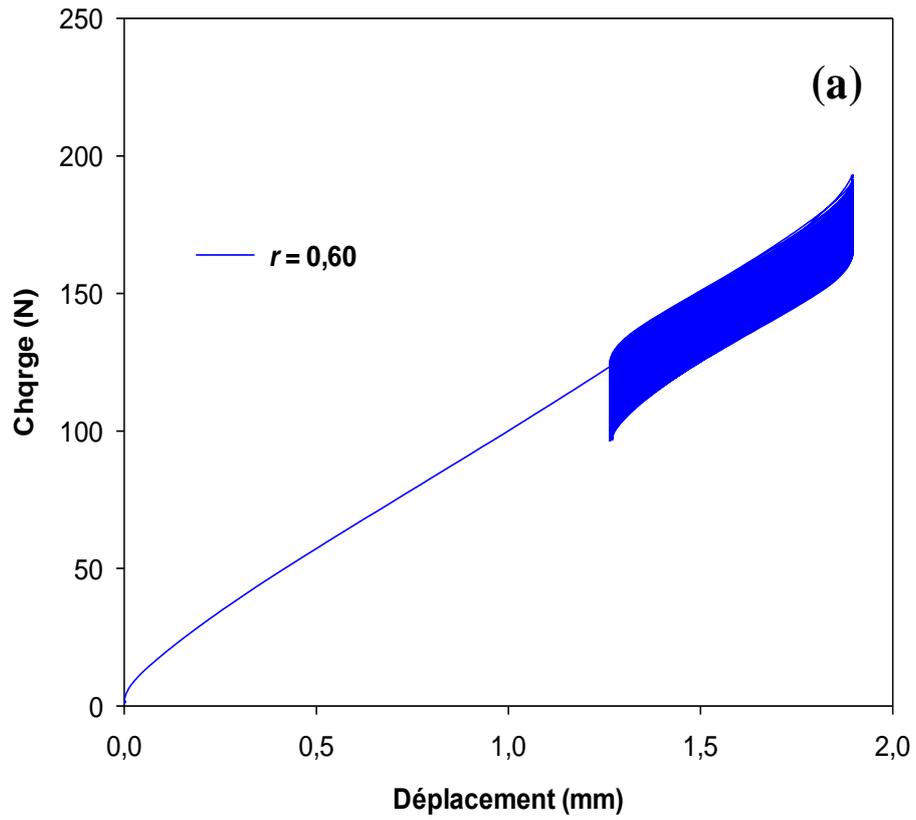


Figure 3.2. Evolution de la perte de rigidité en fonction du nombre de cycles pour différents niveaux de chargement r .

3.3.2 Boucles d'hystérésis

L'initiation et l'évolution ultérieure de l'endommagement dans une éprouvette peuvent être identifiées et approfondies grâce aux courbes d'hystérésis en fonction du nombre cycles et cela pour différentes conditions de chargement [63, 64].

Au cours des essais de fatigue, 200 points expérimentaux au moins sont enregistrés pour chaque cycle. Les cycles d'hystérésis sont ensuite obtenus à partir des données expérimentales de la charge et du déplacement en fonction du temps. Nous avons reporté dans la figure 3.3, l'évolution des boucles d'hystérésis en fonction du nombre de cycles pour différents niveaux de chargement.



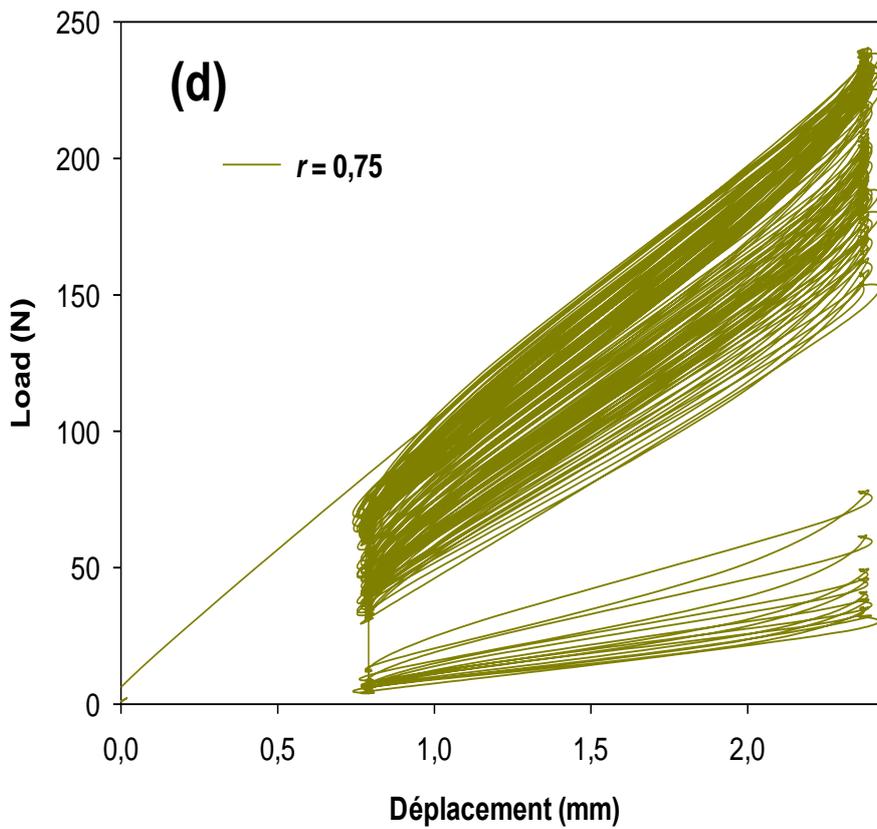
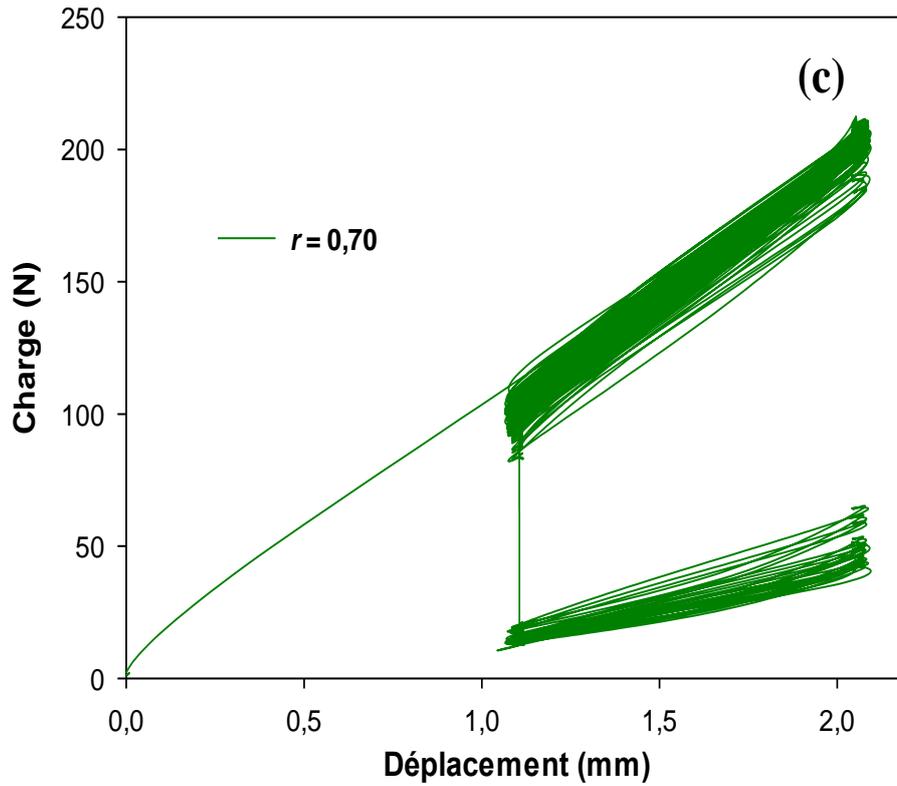
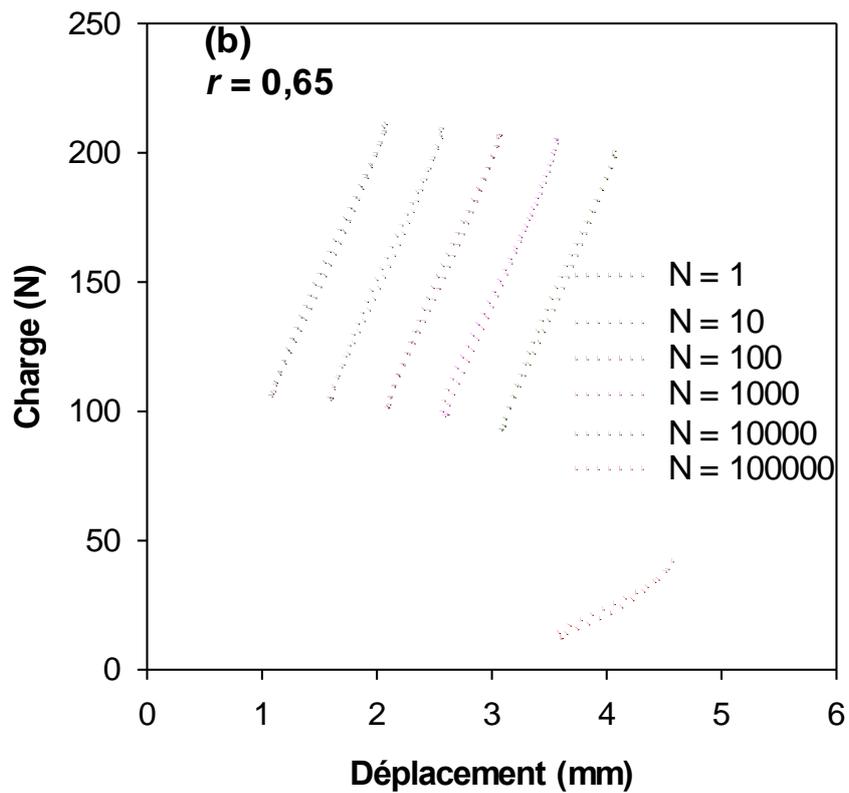
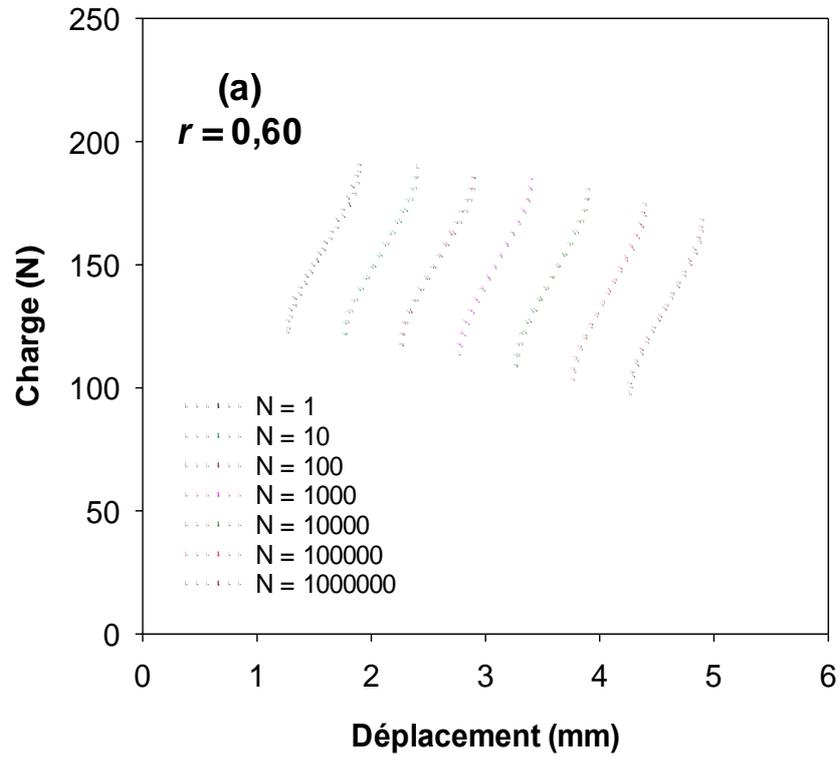
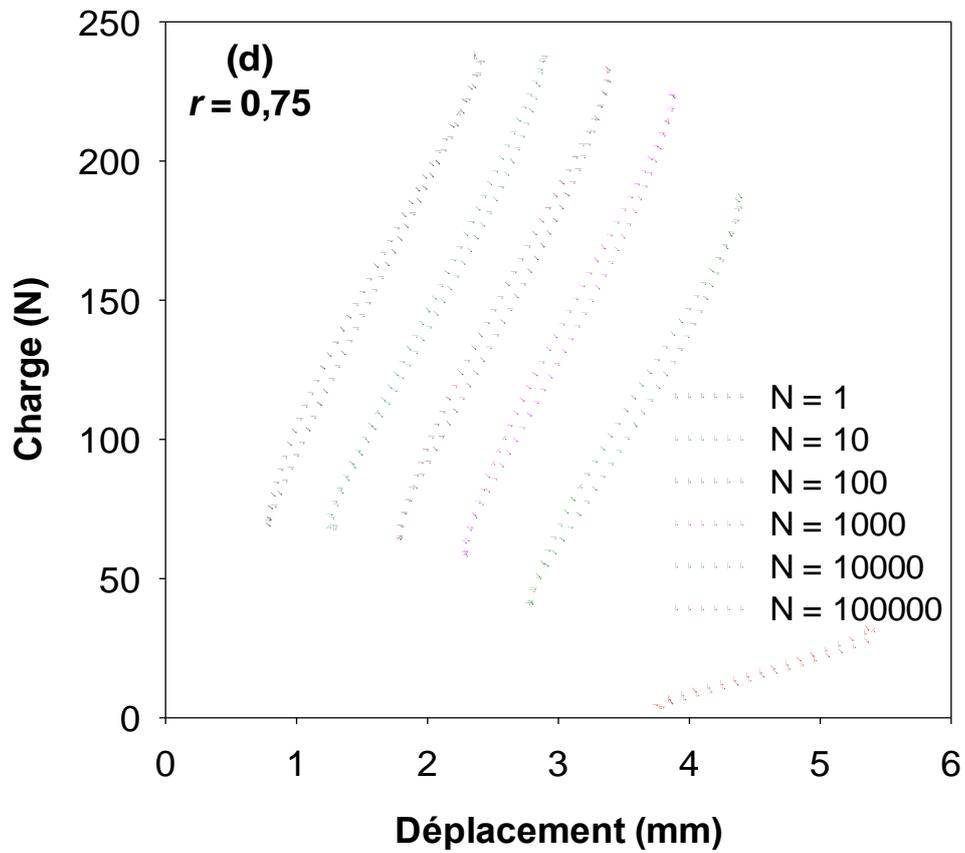
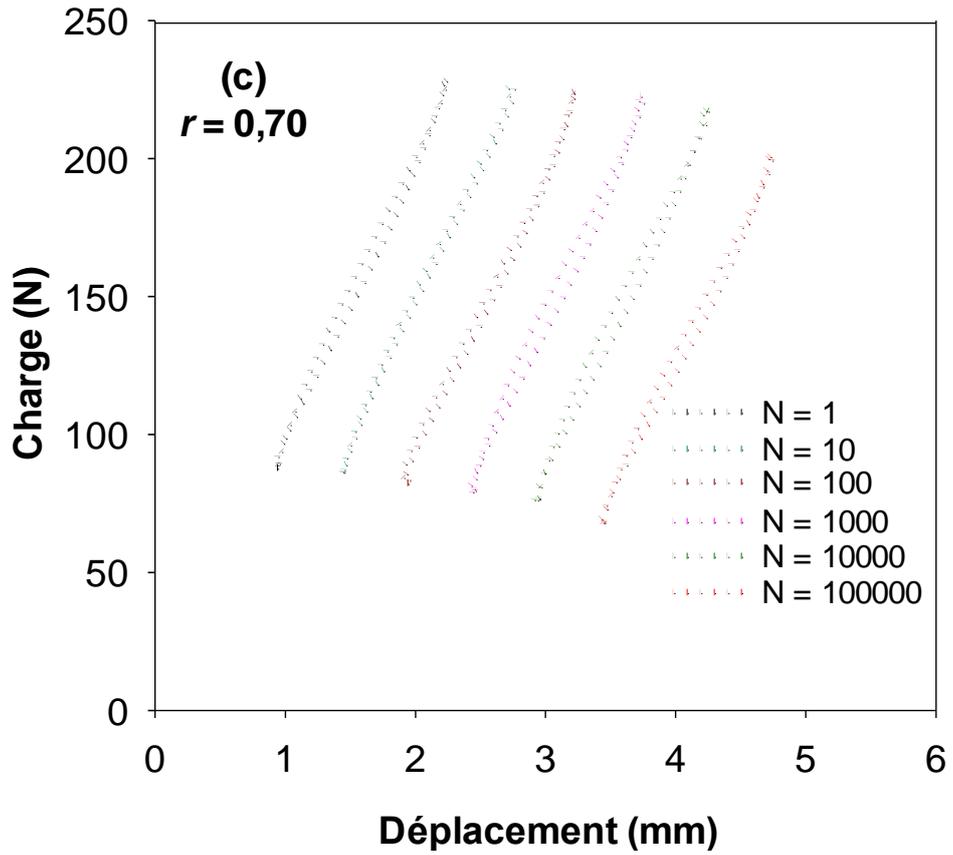


Figure 3.3 Courbe Charge-déplacement des éprouvettes sandwichs pour N cycles et pour différents niveaux de chargement r .

Pour la clarté de la présentation des figures, ces courbes ont été translatées suivant l'axe des abscisses (déplacement).





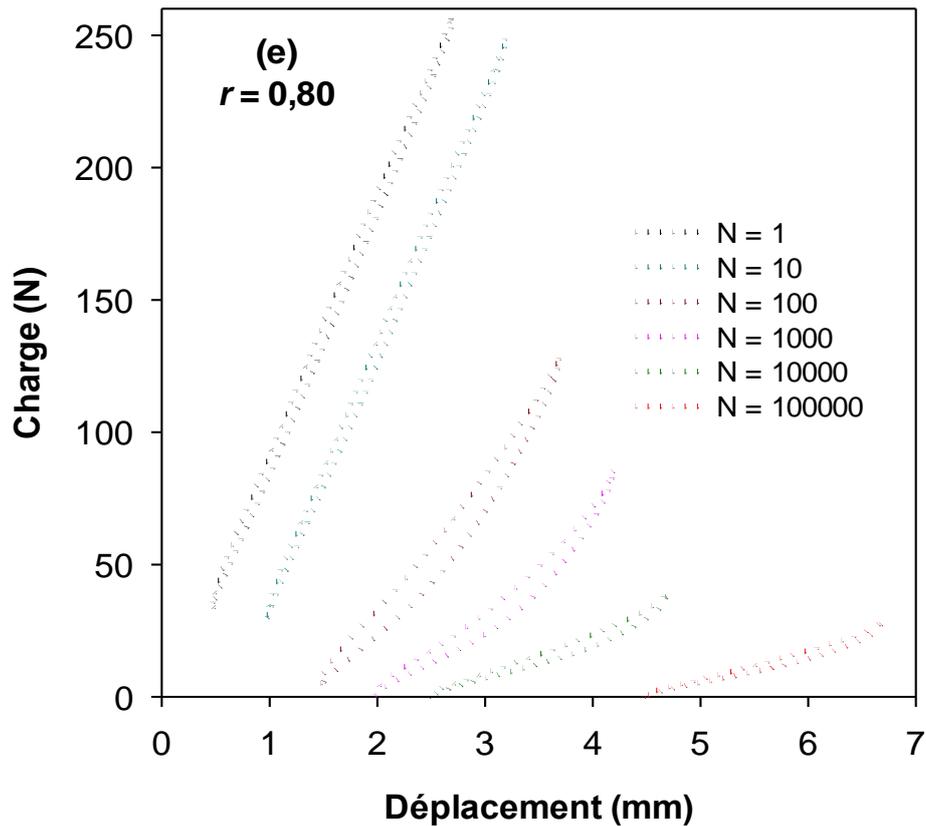


Figure 3.4. Courbes d'hystérésis pour $N = 1 \div 10^5$ et pour différents niveaux de chargement r .

La charge maximale représentée par le pic de la courbe Charge-déplacement diminue lorsque le nombre de cycles augmente, alors que l'aire intérieure du cycle d'hystérésis diminue avec l'augmentation du nombre de cycles (Figure 3.4).

La diminution de la charge maximale et de l'aire du cycle d'hystérésis en fonction du nombre de cycles est la conséquence du développement de l'endommagement régie par la dégradation au cours de la fatigue cyclique des cellules formant l'âme du sandwich.

Ce phénomène est beaucoup plus marqué dans le sandwich pour des niveaux de chargement élevés. Pour un nombre de cycles donné, l'aire intérieure du cycle d'hystérésis augmente avec l'augmentation du niveau de chargement r (figure 3.5).

La figure 3.2 représente le comportement des éprouvettes au cours d'un chargement cyclique, en contrôle déplacement avec un chargement variant de $r = 0.6$ à 0.8 .

Le comportement des éprouvettes sandwichs en nid-d'abeilles est assez similaire pour tous les niveaux de chargement considérés.

Après l'atteinte de la charge maximale (191 N, 227 N et 248 N, lors du premier cycle, respectivement pour $r = 0,65$; 0.75 et 0.80), les charges maximales ont tendance à augmenter de façon significative pendant le chargement cyclique.

La topologie des courbes d'hystérésis montre également une dépendance remarquable sur le taux de chargement et le nombre de cycle considéré.

Pour $r = 0,80$ (Fig. 3.4 (e)), on remarque que l'aire engendrée par les boucles d'hystérésis a tendance à diminuer d'un maximum à $N = 1$ à un minimum (avant la rupture) à $N = 1000$. Par conséquent, la charge maximale tend à diminuer de plus en plus de 75 N pour $N = 1$ à 54 pour $N = 1000$.

En outre, les courbes moyennes des pseudo-ellipses suivent une évolution exponentielle, avec une baisse des exposants correspondants aux plus grands nombres de cycles N .

La même tendance globale est maintenue également pour les niveaux de chargement inférieurs ou égaux à $r = 0,70$ (Figure 3.4(c)). Pour la plus petite valeur de r considérée ($r = 0,60$ Figure 3.4 (a)), on peut observer une diminution des zones d'hystérésis accompagnées par une diminution des charges pour des niveaux croissants de cycles, mais la topologie étroite elliptique de la courbe, avec un axe à peu près parallèle est plutôt maintenu à des valeurs différentes de N . Par contre pour $r = 0.65$ et pour un nombre de cycles $N = 100000$ une diminution brutale de la charge a été constatée et cela est dû à une décohésion causé par un défaut de fabrication

La charge maximale représentée par le pic de la courbe Charge-déplacement diminue lorsque le nombre de cycles augmente, alors que l'aire intérieure du cycle d'hystérésis diminue avec l'augmentation du nombre de cycles (Figure 3.4).

La diminution de la charge maximale et de l'aire du cycle d'hystérésis en fonction du nombre de cycles est la conséquence du développement de l'endommagement régié par la dégradation au cours de la fatigue cyclique des cellules formant l'âme du sandwich.

Ce phénomène est beaucoup plus marqué dans le sandwich pour des niveaux de chargement élevés. Pour un nombre de cycles donné, l'aire intérieure du cycle d'hystérésis augmente avec l'augmentation du niveau de chargement r (figure 3.5).

L'effet global donné par le niveau du chargement peut être également apprécié en observant l'hystérésis correspondant au premier cycle ($N = 1$) à différentes valeurs de r (Figure 3.8).

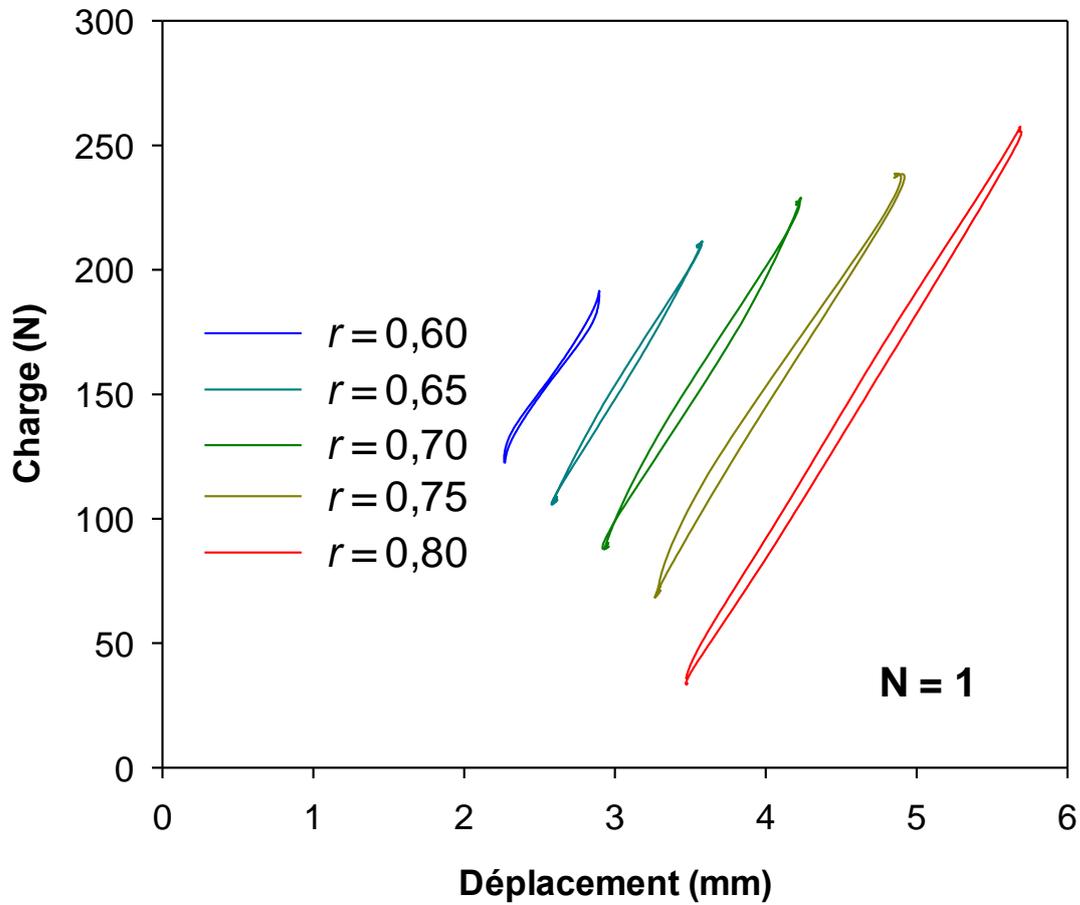


Figure. 3.5. Boucles d'hystérésis du premier cycle pour différent niveau de chargement r .

3.3.3 Energie dissipée

L'énergie dissipée est une quantité utile pour l'estimation du comportement en fatigue des matériaux cellulaires. L'âme en nid-d'abeille du sandwich joue le rôle de l'absorption de l'énergie, cette énergie est dissipée dans l'âme du sandwich lorsque ce matériau subit un impact ou une indentation.

Dans notre étude, les éprouvettes en matériau sandwich sont chargées en flexion, puis soumises à la fatigue cyclique. Lorsque la charge est suffisamment grande la déformation plastique et l'endommagement sont induits, et la courbe de la charge en fonction du déplacement est de la forme d'une boucle, due à l'hystérésis, c'est-à-dire à la perte de l'énergie.

L'aire intérieure engendrée par ces courbes représente l'énergie dissipée au cours du cyclage tandis que l'aire sous la partie supérieure (partie de chargement) du cycle d'hystérésis représente l'énergie potentielle maximale au cours du cyclage.

L'énergie potentielle maximale E_p et l'énergie dissipée E_d sont calculées numériquement en utilisant une simple sommation de l'aire à l'aide de la formule de trapèze.

Les parties supérieures et inférieures du cycle d'hystérésis sont divisées par un grand nombre n pour minimiser l'erreur dans le calcul de l'aire dans l'intervalle $[a, b]$ (fig.3.6). Pour un nombre de cycles donné (N), l'énergie potentielle maximale E_p et l'énergie dissipée E_d sont donnés par:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (d_{i+1} - d_i) [f(d_{i+1}) + f(d_i)] \quad (3.1)$$

$$E_d = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (d_{i+1} - d_i) \{ [f(d_{i+1}) + f(d_i)] - [g(d_{i+1}) + g(d_i)] \} \quad (3.2)$$

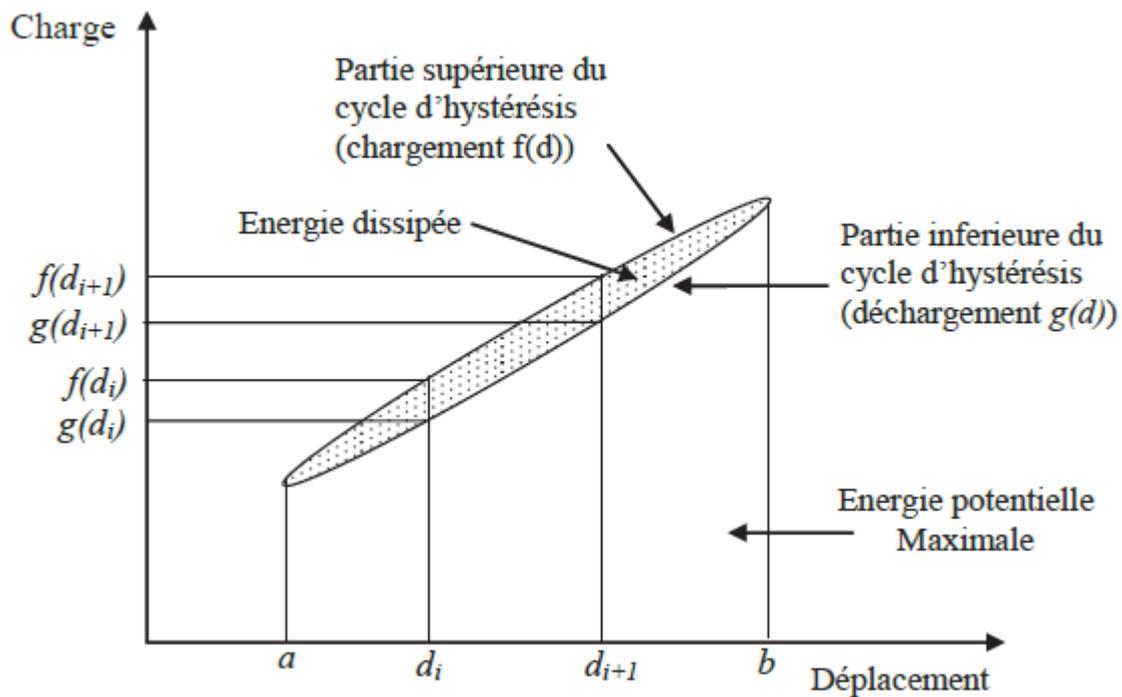


Figure 3.6 Energie potentielle maximale et énergie dissipée.

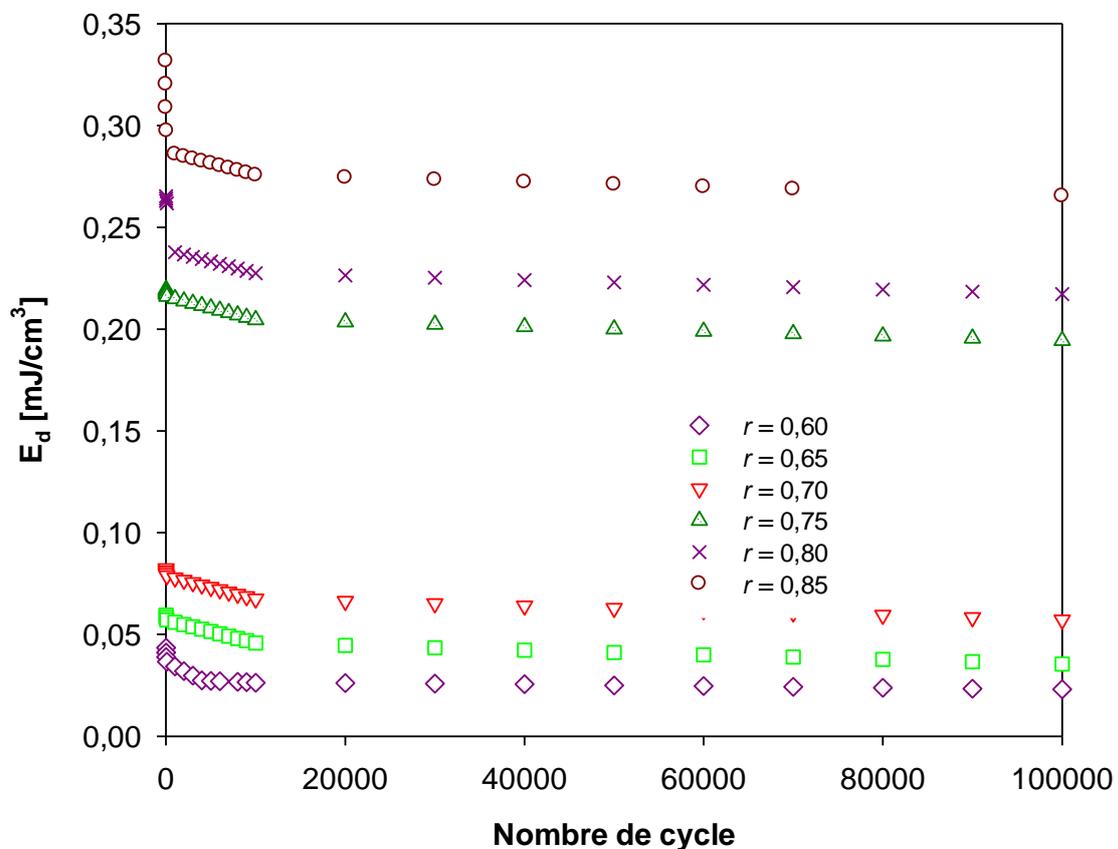


Figure 3.7. Evolution de l'énergie dissipée par unité de volume en fonction du nombre de cycles.

La figure 3.7 présente l'évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles des éprouvettes sandwichs étudiées et pour différents niveaux de chargement r (0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80 et 0,85). L'énergie dissipée diminue lorsque le nombre de cycles augmente. Cette diminution est beaucoup plus marquée dans les premiers cycles, et devient pratiquement constante pour un nombre de cycles important.

Au début du cyclage, la déformation des cellules de l'âme à l'interface peaux/âme du sandwich se fait de manière réversible, ensuite les parois des cellules commencent à s'endommager permettant ainsi l'évacuation de l'air enfermé à l'intérieur des cellules. Au bout de quelques centaines de cycles les cellules à l'interface sont écrasées et l'âme à cet endroit du sandwich se comporte comme un solide non poreux.

On peut identifier deux phases distinctes concernant l'évolution de l'énergie dissipée:

- Une diminution rapide après quelques cycles (généralement jusqu'à $N = 50$ pour les niveaux de chargement pris en compte) ;
- Suivie d'une région stabilisée, où aucune dépendance significative de l'énergie dissipée est observée au cours de l'augmentation du nombre de cycles.

L'énergie dissipée par unité de volume dans la région stabilisée de $0.025 \text{ mJ} / \text{cm}^3$ pour $r = 0,60$ a une moyenne de $0.28 \text{ mJ}/\text{cm}^3$ pour $r = 0,85$.

3.3.4 Critère de rupture

Le suivi de la rigidité constitue une des méthodes les plus utilisées pour suivre la progression de l'endommagement par fatigue des composites sandwichs. Dans le cas de la fatigue en flexion en contrôle déplacement, une rupture franche des éprouvettes n'est généralement pas observée.

La définition de la durée de vie repose donc sur des critères conventionnels définis pour un pourcentage donné de perte de rigidité N_5 et N_{10} correspondant respectivement à des chutes de 5 % et 10 % de la rigidité par rapport à sa valeur initiale. Les durées de vie peuvent être données dans un diagramme d'endurance donnant le niveau maximal de déplacement ou de charge en fonction des durées de vie N_5 et N_{10} qui sont les plus utilisées dans la littérature [18].

Pour mieux prendre en compte l'effet du niveau de chargement sur la durée de vie du sandwich, nous avons considéré les expressions du type :

$$\begin{aligned} r &= A - B \log(N_5) \\ r &= A - B \log(N_{10}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Ces formes de description permettent de mieux visualiser la tenue en fatigue des matériaux en composites sandwichs par l'intermédiaire de la valeur intrinsèque B , représentant la pente de la droite d'endurance. Cette valeur correspond au taux de chute du niveau de chargement admissible exprimé en % décade par cycle.

Les diagrammes d'endurance de Wöhler présentés dans la figure 3.8 permettent l'évaluation des durées de vie en fonction du niveau de chargement r .

Ces diagrammes donnent l'évolution du niveau de chargement (r) en fonction du nombre de cycles pour les critères de rupture N_5 et N_{10} . L'analyse des résultats obtenus, montre une certaine dispersion de la durée de vie.

D'une manière générale, cette dispersion est principalement liée à la nature hétérogène des sandwichs. En outre, les éprouvettes n'ont pas toujours des caractéristiques comparables : fraction volumique, distribution des défauts, résistance à la rupture en statique, etc. La rupture en fatigue dépend d'une série de processus aléatoires dont la conjugaison se traduit par une dispersion dans les résultats de durée de vie entre les éprouvettes soumises à un même niveau de chargement r et sollicitées dans les mêmes conditions.

Il ressort que l'ensemble des résultats converge vers l'unité pour un faible nombre de cycles ; ce qui montre que lorsque le niveau de chargement est voisin de celui de la rupture en statique, la rupture est obtenue dès les premiers cycles, par contre pour des faibles niveaux de chargement, la rupture est obtenue pour des nombres de cycles élevés.

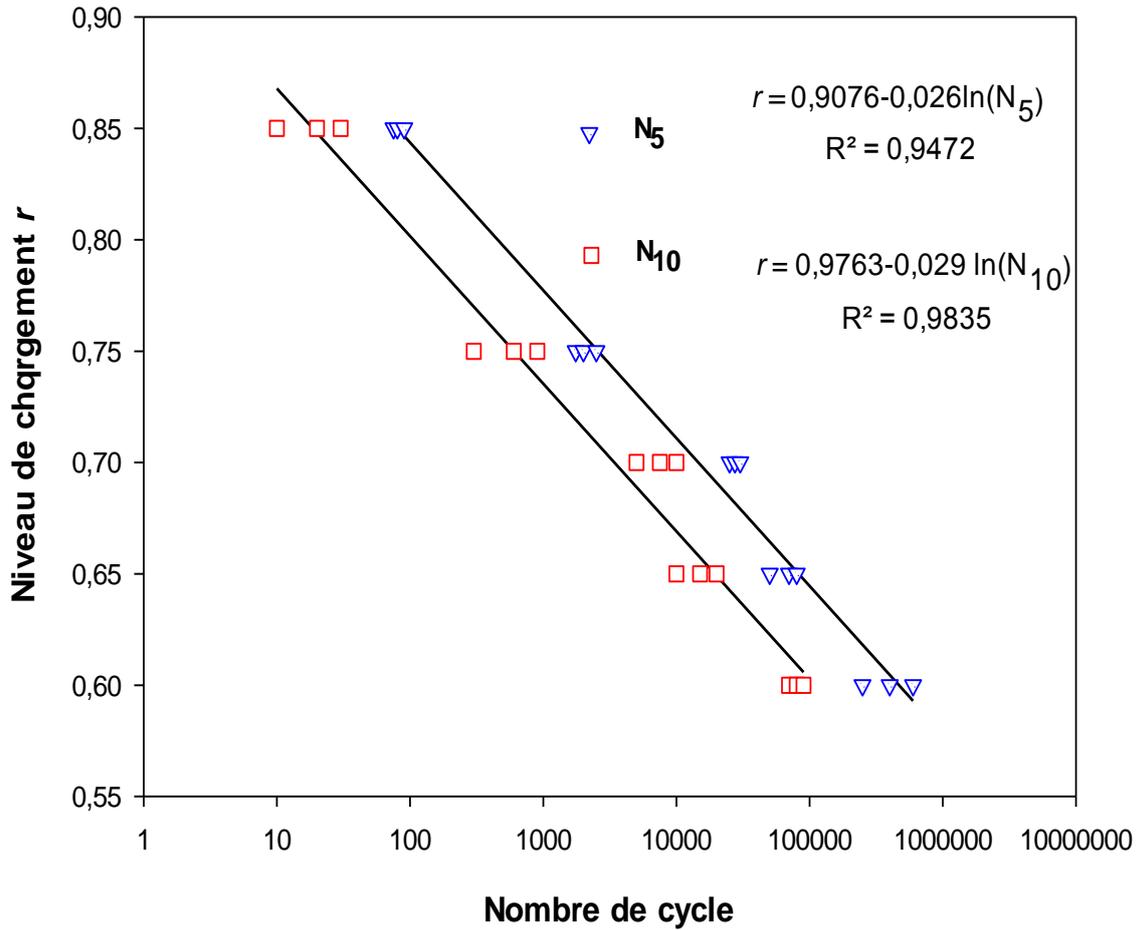


Figure 3.8. Courbe de Wöhler des composites sandwichs selon les critères de rupture N_5 et N_{10} .

Les résultats du modèle expérimental et analytique ont été tracés (Figure 3.8) avec les deux critères N_5 et N_{10} . Une forte corrélation a été trouvée entre les résultats expérimentaux et ceux analytiques. Une des limitations de ce travail est que l'initiation et la progression de la rupture n'a pas été observée expérimentalement et il n'y a aucune mention au sujet du mode de rupture finale. Encore une fois il est à craindre sur la validité de l'approche lorsque les modifications des modes de rupture.

Nous constatons que les résultats issus des modèles analytiques décrivent bien l'évolution des points expérimentaux, et ceci pour l'ensemble des modèles et des matériaux étudiés. En effet, les coefficients de corrélation sont très proches de l'unité, ce qui conforte nos hypothèses.

3.4 Conclusions

Dans ce chapitre on s'est intéressé à l'étude expérimentale du comportement flexion 3-points en fatigue cyclique des matériaux composites sandwichs en nids-d'abeilles. L'étude statique étudiée dans le chapitre précédent a permis de déterminer les paramètres nécessaires aux essais de fatigue cyclique.

Le travail de ce chapitre s'intéresse à l'étude du comportement en fatigue cyclique, en flexion 3-points de matériaux sandwichs en nids-d'abeille. Les matériaux utilisés dans ce travail sont constitués de stratifiés en tissu à fibres de carbone et de résine époxyde pour les peaux et d'une âme en nids-d'abeilles.

L'analyse des résultats d'essais de fatigue sur les éprouvettes testées a montré que le domaine de comportement linéaire est limité à de faibles valeurs des déformations. L'énergie dissipée au cours du cyclage, est calculée à partir des données expérimentales de la charge et du déplacement en fonction du temps pour différents niveaux de chargement r .

L'analyse des résultats obtenus a montré que la rigidité, les cycles d'hystérésis et l'énergie dissipée sont sensibles aux niveaux de chargement r et au nombre de cycles de fatigue et peuvent être proposés en tant qu'indicateurs d'endommagement pour le suivi de l'état de santé de l'éprouvette au cours de la fatigue cyclique. Une décohésion à l'interface réduit rigoureusement la résistance et la durée de vie des matériaux sandwichs.

Le suivi de la perte de rigidité (F/F_0) des sandwichs, en fatigue cyclique, jusqu'à la rupture se déroule en trois phases. L'influence du niveau de chargement r sur le comportement en fatigue cyclique du sandwich étudié a été mise en évidence par l'établissement de deux critères de la durée de vie à partir des courbes de Wöhler. Les résultats obtenus montrent que le niveau du chargement r joue un rôle important sur la durée de vie des matériaux.

Chapitre 4

Modélisation du comportement en fatigue statique et cyclique des composites sandwichs en nids-d'abeilles

Chapitre 4

Modélisation du comportement mécanique des matériaux composites sandwichs en nids-d'abeilles

Partie I

Evaluation par éléments finis des propriétés mécaniques des panneaux composites sandwichs sollicités en compression

4.1 Introduction

Les panneaux composites sandwichs sont de plus en plus utilisés dans les domaines d'industrie aérospatiale et aéronautique à cause de leur très bon rapport légèreté rigidité [28].

Les matériaux composites sandwichs résultent de l'association de deux peaux de faibles épaisseurs constituées de matériaux de haute résistance et haut module, et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible masse volumique [20, 65]. Ces structures peuvent être utilisées sous des charges dans le plan et aussi hors-plan, ces structures présentent une bonne stabilité en compression, en gardant une excellente rigidité [23]. Pour utiliser ces matériaux dans différentes applications, la connaissance de leur comportement en statique

est nécessaire et une meilleure compréhension des différents mécanismes de rupture dans des conditions de chargement statique est aussi hautement souhaitable [66].

Marguerre [67] est le premier qui a travaillé sur le comportement mécanique des panneaux sandwichs sollicités en compression dans le plan.

S. Belouettar et A. Abbadi [68] ont présenté une étude expérimentale du comportement statique d'un matériau composite sandwich en nid d'abeilles constitué de fibres d'aramide et d'un cœur en aluminium sollicité en flexion 4-points. Les paramètres locaux et globaux considérés, évaluent le comportement du composite sandwich, aucune comparaison avec d'autres méthodes d'analyse n'a été effectuée. Meyer-Piening [69] a montré que les ruptures locales dans les structures sandwichs sont souvent produites en raison d'un manque de connaissance des concepteurs de certains aspects importants telles que la distribution des déplacements à travers l'épaisseur, les forces axiales dans les peaux stratifiées, et la différence entre les déviations verticales des peaux stratifiées supérieures et inférieures. Une étude expérimentale et numérique a été effectuée sur des panneaux en nid-d'abeilles Nomex sollicités en traction et en compression par C. Foo *et al* [70] qui a permis de déterminer les propriétés mécaniques élastiques linéaires qui sont ensuite utilisées dans une simulation par éléments finis pour déterminer le module de Young de la structure en nid d'abeilles dans les trois directions. Dans le travail réalisé par L. Aktay *et al* [71], plusieurs techniques numériques pour la modélisation du comportement en compression d'une âme en nid d'abeilles sont comparées avec les résultats expérimentaux effectués sur des panneaux en nid d'abeilles Nomex en aluminium.

A. Bezazi *et al.* [72], ont analysé la rigidité des panneaux sandwichs et de leurs composants lors des essais statiques. Les panneaux sandwichs étudiés sont en fibres de verre et résine époxyde soumis à un essai de flexion 3-points, le cœur en polychlorure de vinyle (PVC) de différentes densités. L'effet de la densité du cœur et son épaisseur sur le comportement a été mis en évidence, et les auteurs ont prouvé que les structures sandwichs possèdent de meilleures caractéristiques mécaniques par rapport à leurs composants.

Une étude expérimentale effectuée pour la détermination du module de cisaillement et du module de Young à travers l'épaisseur d'un panneau sandwich en âme nid-d'abeilles a été réalisée par F. Mujika *et al.* [73]. Dans ce travail le comportement en flexion, en

cisaillement et en compression résume de vastes programmes expérimentaux qui discutent de nombreux paramètres pour évaluer les comportements des panneaux sandwichs. Cette étude a été suivie par une approche analytique et par éléments finis et les résultats obtenus par ces différents moyens ont été comparés.

Une connaissance précise des propriétés équivalentes des matériaux à cœur orthotrope est une préoccupation majeure dans l'analyse des structures sandwichs. Différentes techniques analytiques ont été proposées pour prédire les propriétés mécaniques efficaces du noyau en fonction de ses caractéristiques géométriques et mécaniques [74-76].

Gibson et Ashby [23] ont réalisé une formulation analytique de la rigidité dans le plan à travers l'épaisseur, ainsi que les limites supérieures et inférieures des modules de cisaillement transversales, pour un nid d'abeilles hexagonale régulier. Leurs modèles qui contiennent les propriétés de ce matériau ont été étudiés par Triplett *et al.* [78], qui ont mené une analyse numérique sur les plaques sandwichs en nid d'abeilles circulaires soumises à des chocs à faible vitesse. Ils ont constaté que les résultats numériques sont inexacts lors de l'écrasement en nid d'abeilles qui ont été ignoré pour le modèle par éléments finis.

Meraghni *et al.* [75] ont modifié la théorie classique des stratifiés et appliqué sur une cellule unité pour dériver les rigidités élastiques équivalentes pour l'âme en nid d'abeilles.

Hohe *et al.* [76] ont également proposé une technique d'homogénéisation qui sert à déduire les propriétés élastiques effectives de toute structure cellulaire générale en considérant un volume élémentaire représentatif. Toutefois, la formulation théorique des constantes élastiques efficaces pour le noyau pourrait être fastidieuse, voir impossible, si la construction en sandwich est trop compliquée. Même s'il est possible, les dérivations mathématiques pour un type de noyau sandwich pourraient ne pas être applicables à d'autres types.

Le processus de production et le choix exact de la géométrie du cœur résultant en sandwich légère crée un matériau hautement orthotrope ayant des caractéristiques nettement différentes de celles du matériau à cœur isotrope.

L'objectif de cette étude est la détermination de la contrainte maximale de compression, l'énergie de déformation et le module du Young hors plan par une méthode

respectivement. Le collage entre chaque cellule a été supposé parfait. Le module de Young et le coefficient de Poisson du papier Nomex ont été pris pour être 70 MPa et 0,3 respectivement.

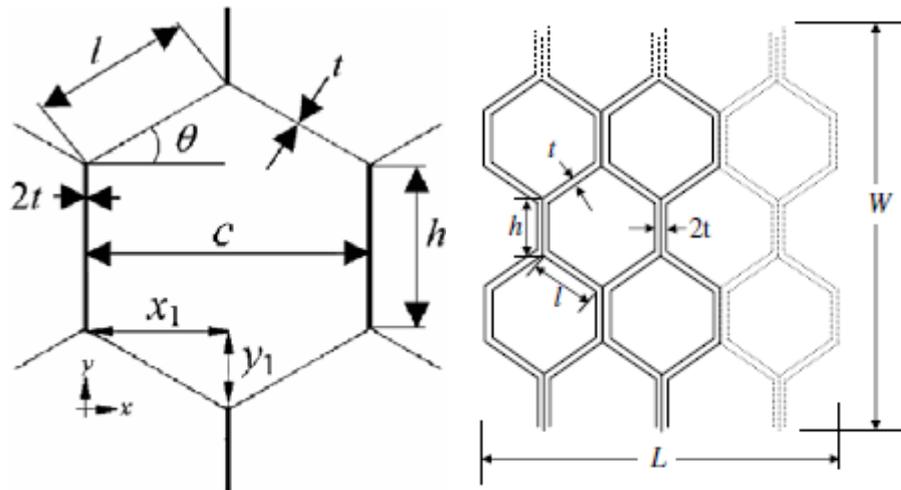


Figure 4.2 Paramètres géométriques de cellules en nid d'abeilles.

Tableau 4.1. Paramètres géométriques.

| Paramètres | Définition |
|------------|--------------------------------|
| θ | Angle de cellule |
| c | Diamètre de cellule |
| l | Longueur d'une paroi |
| $2t$ | Epaisseur d'une paroi centrale |
| t | Epaisseur d'une paroi inclinée |
| h | Hauteur du nid d'abeilles |

4.3. Modèle Ansys

Le modèle de nid d'abeille prend en compte 220 cellules qui ont été maillées avec des éléments Shell-63 à 4 nœuds et à 6 degrés de liberté par nœud. Pour ce modèle, le maillage

choisi permet de ne pas trop alourdir le calcul tout en gardant une bonne précision au niveau des résultats. Un raffinement excessif ne donne pas de meilleurs résultats. Le maillage utilisé est représenté sur la Figure 3 et donne une précision acceptable.

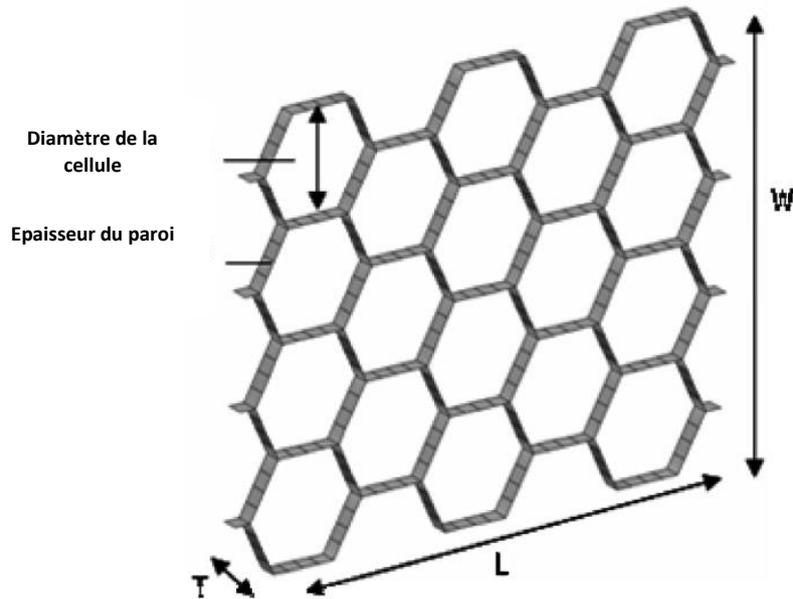


Fig. 4.3. Modèle de base.

4.4 Validation

Le choix du V.E.R est dicté par le souci de comparaison et de vérification de nos résultats. La géométrie de base est celle de cellules hexagonales régulières. Les caractéristiques sont les suivantes :

$c = 3.175$ mm, Les longueurs L , W et H du volume élémentaire représentatif sont (Figure 3) : $L = 60,5$ mm, $W = 63$ mm. Le matériau considéré est de l'aluminium avec les caractéristiques suivantes :

$$E_s = 70 \text{ MPa}, G_s = 26,9 \text{ MPa}, \nu_s = 0,30$$

4.5 Résultats et discussions

La figure 4.4 représente le comportement mécanique en statique sous compression du panneau en nid d'abeilles pour différentes épaisseurs des parois, l'évolution linéaire de ces courbes représente le comportement élastique en compression réalisé par une simulation par Ansys.

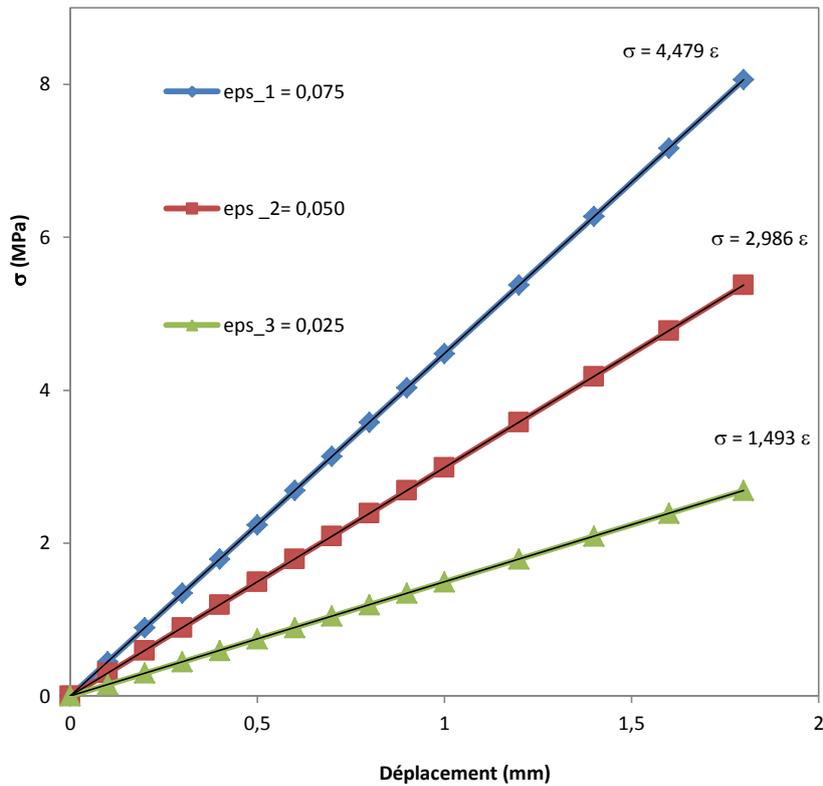


Figure 4.4 Comportement en statique des panneaux en nid-d'abeilles pour différentes épaisseurs de la paroi.

La figure 4.5 représente l'évolution de la contrainte maximale en compression en fonction de la hauteur de la plaque nid-d'abeilles et pour différents déplacements appliqués.

On remarque d'après cette figure que la contrainte en compression augmente avec l'augmentation de la hauteur de la plaque et pour n'importe quel déplacement appliqué. Ce qui montre que la plaque en nid-d'abeilles résiste mieux en compression dont sa hauteur est plus grande.

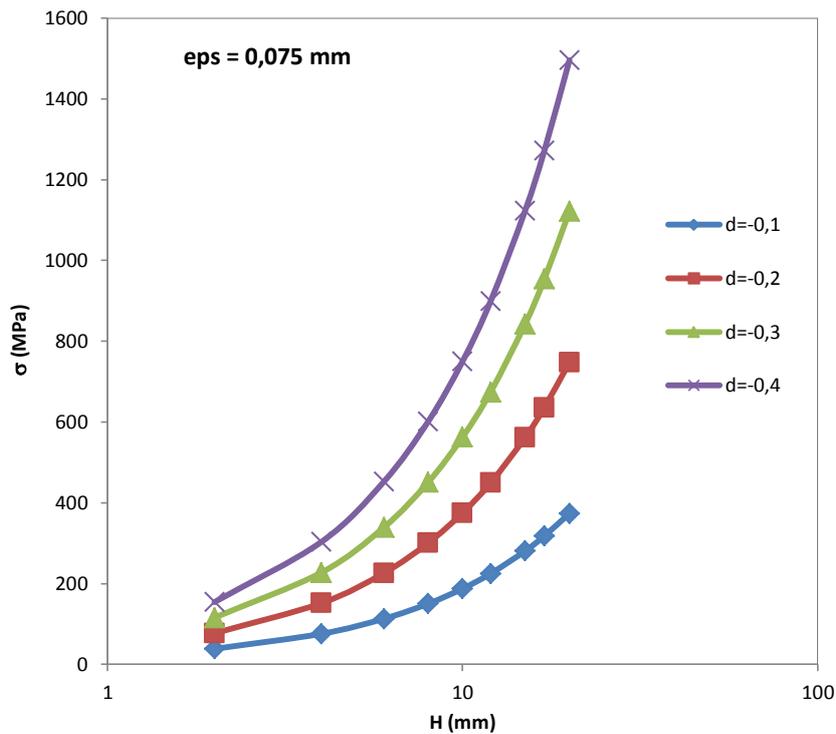
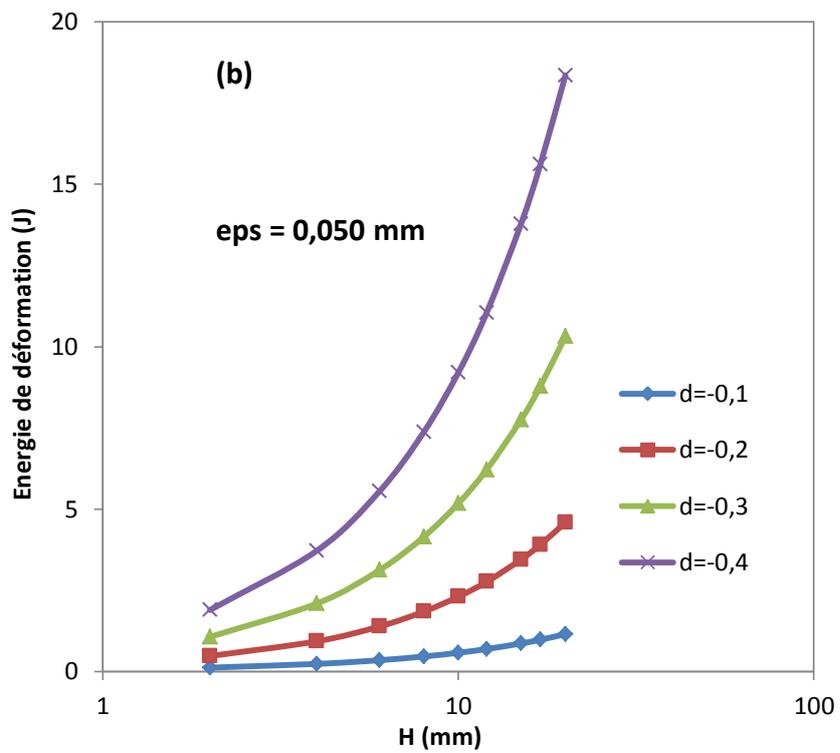
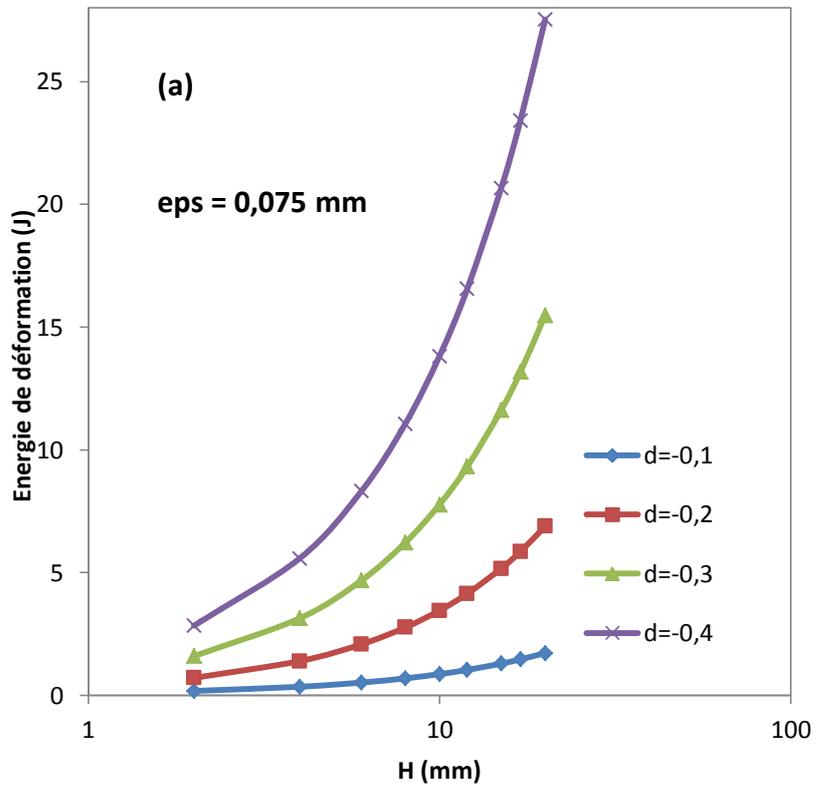


Figure 4.5 Evolution de la contrainte en fonction de la hauteur de la plaque, pour différents déplacements appliqués.

La figure 4.6 représente l'évolution de l'énergie de déformation en fonction de la variation de la hauteur et pour différentes dimensions de l'épaisseur de la paroi de la plaque nid-d'abeilles.

Pour la plaque dont l'épaisseur de la paroi $\epsilon_{ps} = 0,075$ mm (figure 4.6a), on remarque que leur énergie de déformation est deux fois plus grande que l'énergie de déformation de la plaque dont l'épaisseur de la paroi $\epsilon_{ps} = 0,050$ mm (figure 4.6b), et trois fois plus grande que l'énergie de déformation de la plaque dont l'épaisseur de la paroi $\epsilon_{ps} = 0,025$ mm (figure 4. 6c).



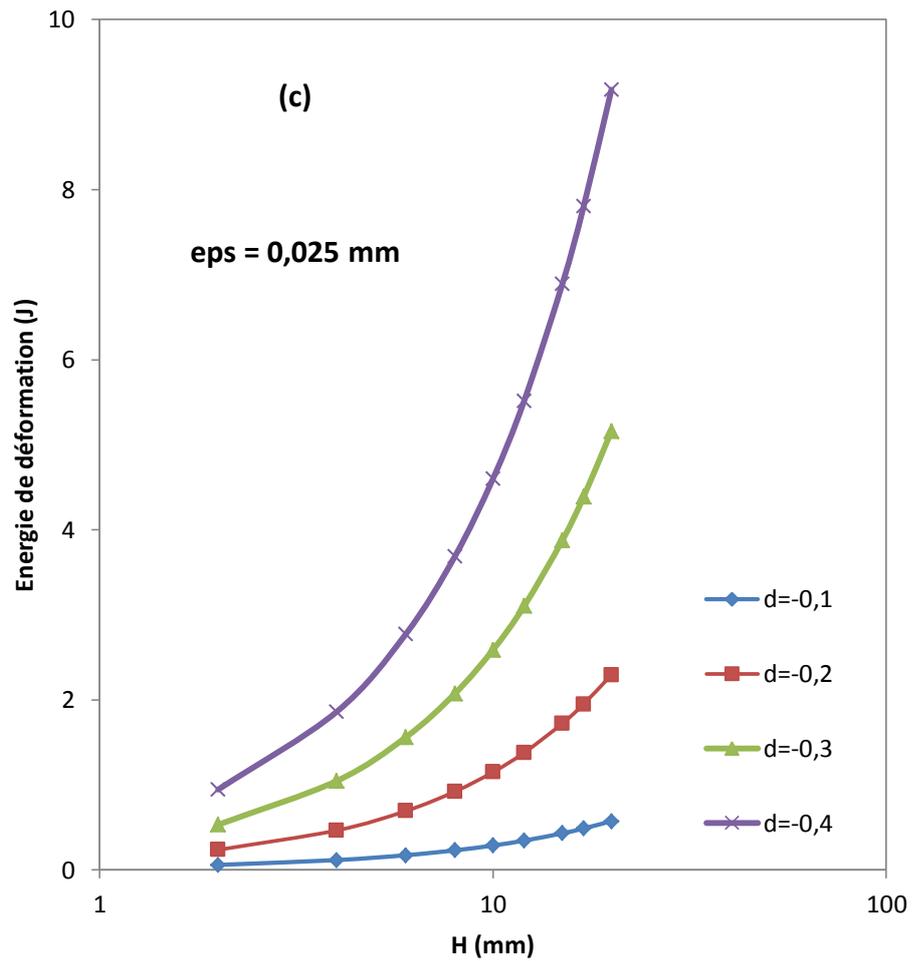


Figure 4.6. Evolution de l'énergie de déformation en compression en fonction de la hauteur H.

La figure 4.7 montre l'influence de l'épaisseur de la paroi pour une valeur de déplacement appliqué $d = -0.4$ mm.

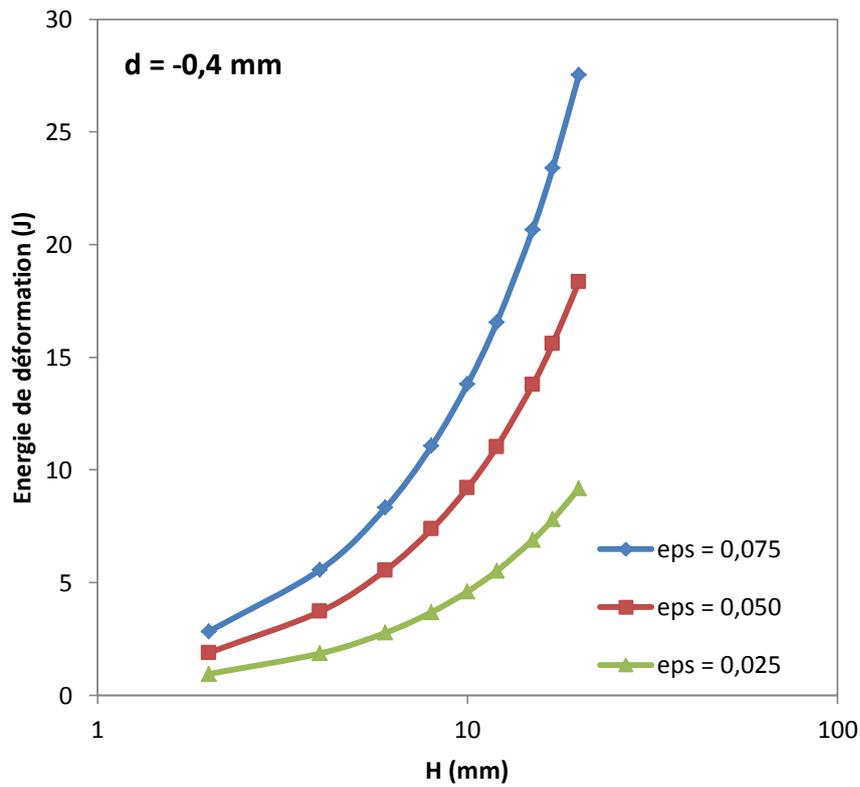


Figure 4. 7 L'influence de l'épaisseur de la paroi et pour une $d = -0,4$ mm.

La figure 4.8 représente l'évolution du module de Young hors plan en fonction de la variation de la hauteur, et en fonction de l'épaisseur des parois de la plaque nid-d'abeilles. Cette évolution montre que la valeur du module de Young pour une épaisseur de la paroi $\text{eps} = 0,075$ mm est deux fois plus grande que pour une épaisseur de la paroi $\text{eps} = 0,05$ mm et trois plus grande pour une épaisseur de la paroi $\text{eps} = 0,025$ mm.

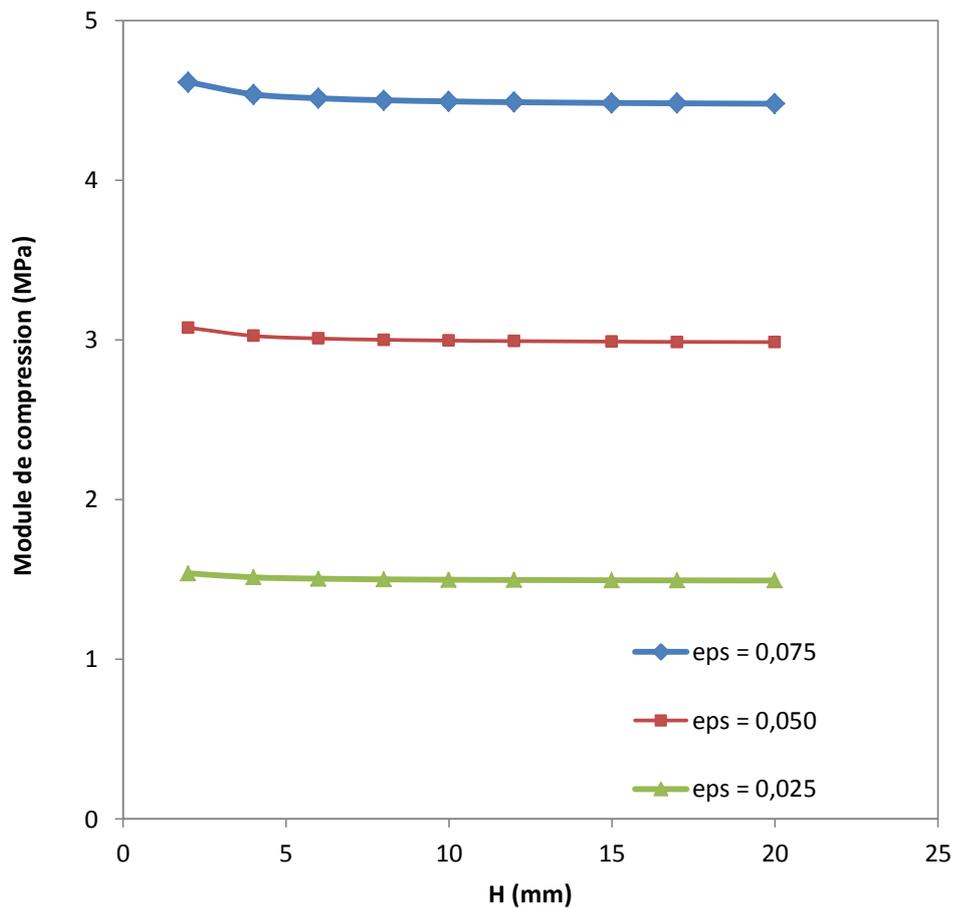


Figure. 4.8 L'évolution du module de Young hors plan en fonction de la variation de H.

Partie II

Modélisation du comportement en fatigue cyclique des matériaux composites sandwichs sollicités en flexion 3-Points

4.6 Introduction

Compte tenu de la complexité des mécanismes de défaillance dans le composite sandwich sous la fatigue, la nécessité pour le développement de modèles plus simples avec moins de limitations est tout à fait évidente. D'un point de vue phénoménologique, l'endommagement par fatigue dans les matériaux composites peut être évalué en mesurant les dégâts dans les propriétés des matériaux, par exemple, la raideur ou la résistance. Des

recherches approfondies ont été menées pour étudier la dégradation de la résistance résiduelle et la raideur. Comme la mesure de la résistance résiduelle des matériaux composites implique la destruction des éprouvettes d'essai, un modèle d'endommagement par fatigue sur la base de la résistance résiduelle peut ne pas convenir pour la prédiction et le suivi de l'endommagement par fatigue. D'autre part, les mesures de raideur résiduelle peuvent être effectuées de manière non destructive et peuvent donc être liées au développement de dommages et de résistance à la fatigue de l'éprouvette. Ainsi, le modèle de dégradation de la rigidité peut être plus applicable à la conception pratique de composites des structures composites et sandwichs. Cependant, une base de données complète serait nécessaire dans l'analyse en fatigue des composites sandwichs, sur la base de la réduction de la rigidité, à moins que les relations mathématiques puissent être développées pour relier la rigidité résiduelle à d'autres propriétés matérielles facilement. Si une telle relation n'a pu être établie, l'extrapolation des données à différents niveaux de stress serait établie, réduisant ainsi la quantité de données de test nécessaires pour caractériser le comportement des matériaux.

La modélisation du comportement en fatigue des matériaux composites au cours de trois essais moment de flexion ont été proposées par différents auteurs [79-81]. Ils sont basés sur la réduction de la fatigue de module de composites stratifiés et des composites en sandwich. Hwang et Han [82] ont introduit la notion de fatigue module. Ils ont proposé un modèle de gestion des modules de fatigue sur la base de l'hypothèse que la dégradation de la fatigue du module suit une fonction de puissance de cycles de fatigue. Le module de fatigue se produit lorsque la souche résultante fatigue atteint la déformation ultime. Whitworth [83, 84] ont présenté un modèle phénoménologique de caractérisation de la dégradation de la rigidité et de sa relation possible avec la résistance résiduelle. Le module de fatigue qui est généralement désigné comme la raideur peut être défini comme étant le rapport entre la contrainte appliquée et la déformation à un nombre donné de cycles [80, 82]. Ce module est fonction de cycles de charge n et le niveau de contrainte appliqué r . Le taux de diminution de la fatigue module peut également être liée à une fonction de puissance empirique du nombre de cycles de fatigue [80].

Hwang et Han [84] ont proposé quatre fonctions de dommages différents basés sur le module de fatigue et souches de matériels. Ces modèles ont été développés principalement dans le but de prédire plusieurs stress de la vie de fatigue. Sept modèles courbe SN de

différentes caractérisation ont été appliqués à ces fonctions, pour produire 23 modèles cumulatifs . Ils ont appliqué ces modèles à deux le chargement de scène pour la fatigue oligo-cyclique de courte fibres de verre et carbone renforcé, thermoplastique.

4.7. Modélisation analytique

Les essais de fatigue en contrôle déplacement pour différents niveaux de chargement ont été réalisés et les courbes de la perte de rigidité en fonction du nombre de cycles ont été tracés dans la figure 3.9 du chapitre précédent. Dans les équations (4.1 et 4.4), les deux constantes sont obtenues à partir des résultats expérimentaux. En effet, les résultats expérimentaux ont montré que la perte de la rigidité peut être exprimée par deux fonctions comme suit :

$$\frac{F}{F_0} = \left\{ \begin{array}{l} b_{0d} - b_d \ln(n) \\ C_{0d} n^{-C_d} \end{array} \right\}, \quad (4.1)$$

Où b_{0d} et C_{0d} sont des paramètres qui dépendent des conditions initiales, Alors que les paramètres b_d et C_d dépendent du niveau de chargement r .

Dans le premier cycle, la charge maximale (F) est égale à la charge au début de cyclage (F_0), alors l'expression (1) devient :

$$\frac{F}{F_0} = \left\{ \begin{array}{l} 1 - b_d \ln(n) \\ n^{-C_d} \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

Les deux paramètres b_d et C_d peuvent être exprimés, à partir de résultats expérimentaux, par une fonction à tendance exponentielle :

$$\left\{ \begin{array}{l} b_d = b_{A0d} \cdot \exp(b_{Ad} \cdot r_d) \\ C_d = C_{A0d} \cdot \exp(C_{Ad} \cdot r_d) \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

Où b_{A0d} , b_{Ad} , C_{A0d} et C_{Ad} sont des paramètres qui dépendent des niveaux de chargement et qui peut être tiré expérimentalement. L'équation (2) devient :

$$\frac{F}{F_0} = \left\{ \begin{array}{l} 1 - b_{A0d} \cdot \exp(b_{Ad} \cdot r_d) \cdot \ln(n) \\ n^{-C_{A0d} \cdot \exp(C_{Ad} \cdot r_d)} \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

Dans notre cas où les essais de fatigue sont fait en contrôle déplacement, le nombre de cycle critiques N_d correspondant à une perte de rigidité de 5% est illustré par l'équation (3.4) qui conduit à:

$$N_{od} = \left\{ \frac{\exp\left[\frac{\alpha}{b_{A0d} \cdot \exp(b_{Ad} \cdot r_d)}\right]}{\beta \frac{1}{C_{A0d} \cdot \exp(C_{Ad} \cdot r_d)}} \right\} \quad (4.5)$$

Avec:

$$\beta = 1 - \frac{\alpha}{100} \quad (4.6)$$

Les valeurs des coefficients b_d et C_d peuvent être déterminées pour différents niveaux de chargement en utilisant l'équation (4.4). Ainsi, une fois tous les paramètres déterminés, la durée de vie en fatigue peut être prédite en utilisant les équations (4.5 et (4.6). La variation des coefficients b_d et C_d en fonction du niveau de chargement r est montrée dans la figure 4.9.

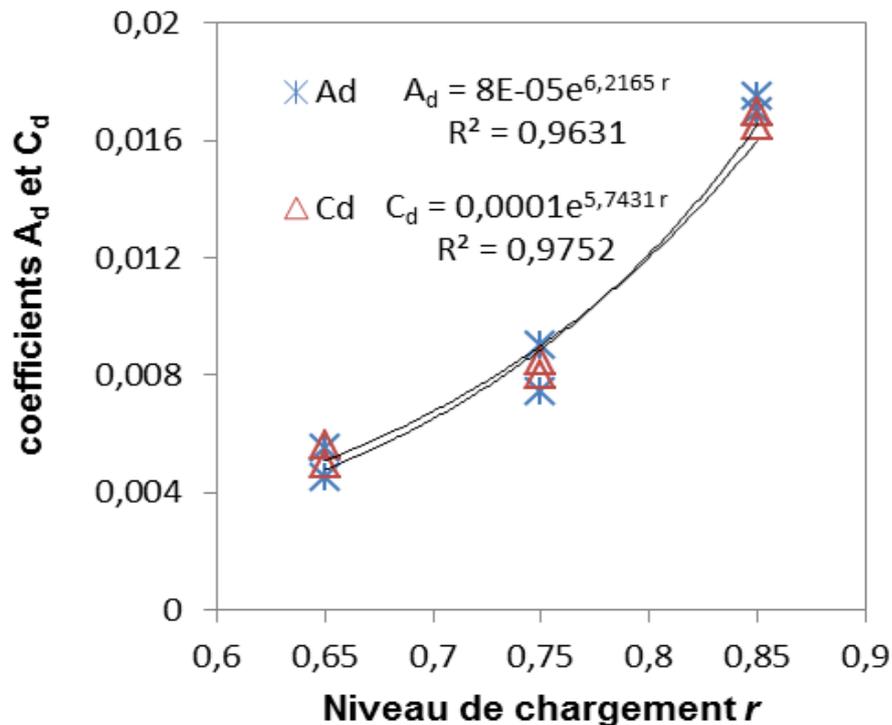


Figure 4.9. Variations des coefficients A_d et C_d en fonction du niveau de chargement r .

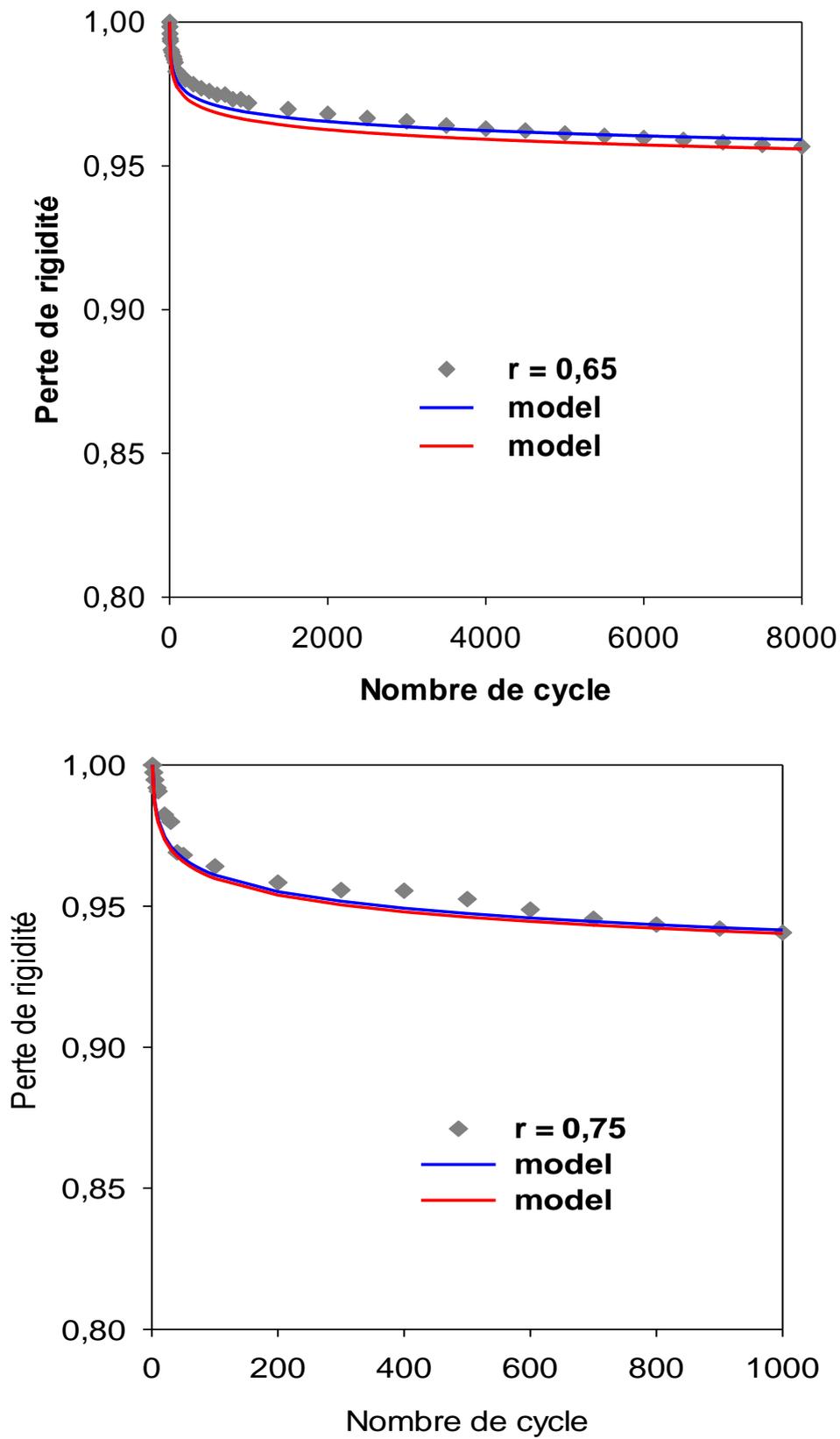


Figure 4.10 Prédiction de la perte de rigidité en fonction du nombre cycle pour les niveaux intermédiaire (0,65; 0,75).

Partie III

Modélisation du comportement en fatigue statique (en Relaxation) des matériaux composites sandwich sollicité en flexion 3-Points

4.8 Introduction

Quand un déplacement instantané est appliqué à un matériel viscoélastique on induit un effort qui est proportionnel à ce déplacement. Cet effort varie avec le temps pendant que l'écoulement viscoélastique remplace la déformation élastique provisoire. Dans un système de tension l'effort réduit et un modèle de ressort-amortisseur peut être employé comme représentation mathématique de ce comportement viscoélastique.

4.9 Modèle de Maxwell

Le modèle de Maxwell se compose d'un ressort et d'un amortisseur en série suivant les indications de la figure 4.11. Une prolongation au système est provoquée par l'application d'une charge de tension. Les ressorts se prolongent à l'état élastique jusqu'à ce que la force équilibre le chargement appliqué en ressorts avec le piston d'amortisseur restant dans sa position initiale. Actuellement le système est dans un état de tension d'équilibre avec chacun de ses composants de série sous la tension. Quand la charge maximum est atteinte, on assume que la prolongation du système demeure constante. Les ressorts reliés aux pistons d'amortisseur tirent lentement les pistons hors des amortisseurs, libérant la force en ressorts. Toute la force pour produire la prolongation se réduit et le système est viscoélastique déformé par le mouvement du piston d'amortisseur et la déformation permanente de simple-ressort.

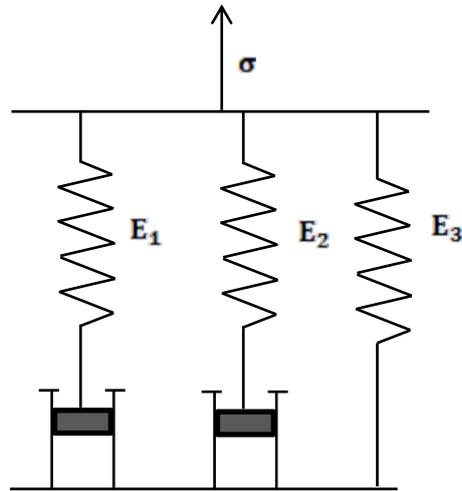


Figure 4.11. Représentation symbolique du modèle de Maxwell.

L'exactitude du modèle de Maxwell est augmentée avec chaque composant additionnel d'amortisseur de ressort. Le modèle simple amortisseur -ressort n'est pas assez précis, ainsi le double modèle est choisi pour son équilibre de simplicité et de précision. L'équation associée décrivant le système [66]

$$\sigma(t) = Ae^{(-t/B)} + Ce^{(-t/D)} + E \quad (4.7)$$

$$A = \varepsilon_1 E_1$$

$$B = \frac{\eta_1}{E_1}$$

$$C = \varepsilon_2 E_2$$

$$D = \frac{\eta_2}{E_2}$$

$$E = \varepsilon_3 E_3$$

Avec

ε : Déformation

E_1, E_2 et E_3 : Modules de Young

σ : La contrainte dirigée par le système

A et C : La contrainte dans des ressort-amortisseurs 1 et 2 respectivement

B et D : constantes de temps des ressort-amortisseurs 1 et 2 respectivement

E : la rigidité du ressort 3

t : le temps

$$\sigma = \frac{My}{I} \text{ et } M = \frac{Fz}{2} \quad (4.10)$$

Par conséquent

$$\sigma = \frac{Fzy}{2I} \quad (4.11)$$

Avec

M: Moment de flexion

F: La charge appliquée au système

z : La distance entre appui (dans ce cas-ci 150 mm)

y=distance d'axe neutre sur la surface de l'éprouvette qui est la moitié de la hauteur du l'éprouvette

I : Le moment quadratique transversal qui égale à $bh^3/12$

4.10 Validation

Chacun des éprouvettes examinées pour chaque niveau de chargement s'est comporté de la même manière, mais le point auquel l'effort changé était une fonction d'âge. Pour les éprouvettes chargées avec des niveaux de chargement plus haut, moins de contrainte élastique provisoire initiale a été remplacée par contrainte viscoélastique; l'affaiblissement de l'éprouvette testée pour des niveaux de chargement plus haut était moins notable que celui de l'éprouvette testée pour des niveaux de chargement plus faibles (Figure 4.16).

Les données expérimentales sont bien rapprochées par le modèle double-exponentiel de Maxwell. Les constantes A, B, C, D et E sont modélisées au cours du temps t , et peuvent être employées pour prévoir la quantité du chargement en relaxation à de diverses périodes de temps. Comme exemple, les constantes pour le niveau de chargement $r = 0,85$ sollicité en relaxation pendant 170 heures (Figure 4.12) sont : 3.51, 5.10, 10.52, 159.31 et 10.70, pour les constantes A, B, C, D et E respectivement. On estime que la réduction totale de l'effort sur une période de 8 h d'une valeur initiale de 24.6MPa est approximativement 13.4 MPa, c.-à-d. environ 54%.

Si un investigateur incorpore des périodes de repos à un essai de chargement cyclique et souhaite réduire le temps global d'essai (c.-à-d. sans laisser des périodes de repos de 8

h), la modélisation du comportement de relaxation en contrainte permet un calcul du temps requis pour réaliser n'importe quelle quantité de relaxation en contrainte.

D'après ce qui précède nous avons tenté d'interpréter nos résultats par le modèle de Maxwell généralisé. Le logiciel sigma-plot nous a permis d'extraire les valeurs des paramètres cités précédemment et de développer les courbes d'ajustement du modèle de Maxwell, puis comparer avec les courbes expérimentales correspondantes et qui sont représenté dans les figures 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 et 4.16 Le meilleur modèle ajusté aux données expérimentales a ensuite été sélectionné pour l'analyse de tous les résultats expérimentaux. De là on peut dire que le nombre de paramètres n'est pas aussi important, mais plutôt la nature de l'équation qui décrit les résultats expérimentaux.

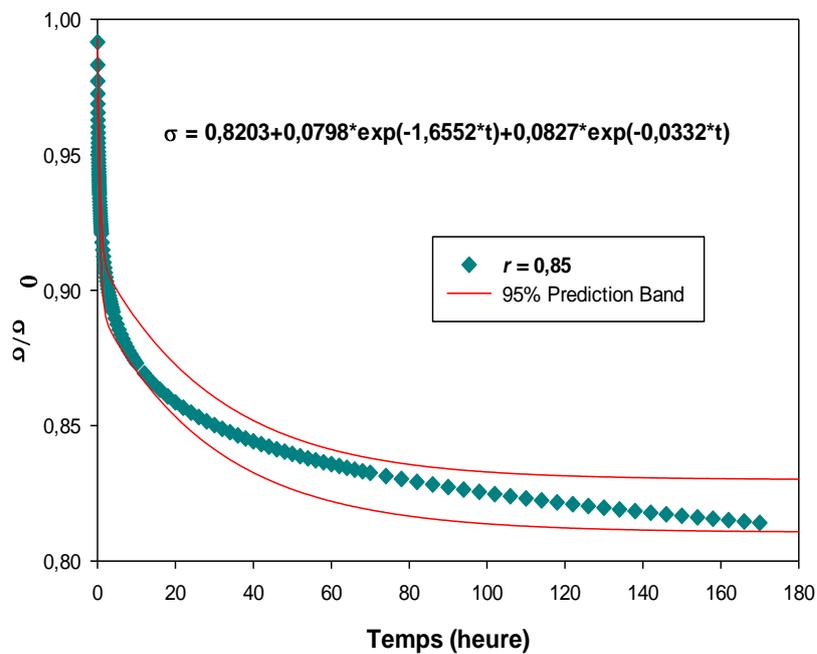


Figure 4. 12 Courbes d'ajustement du module de relaxation pour le niveau du chargement $r = 0.85$.

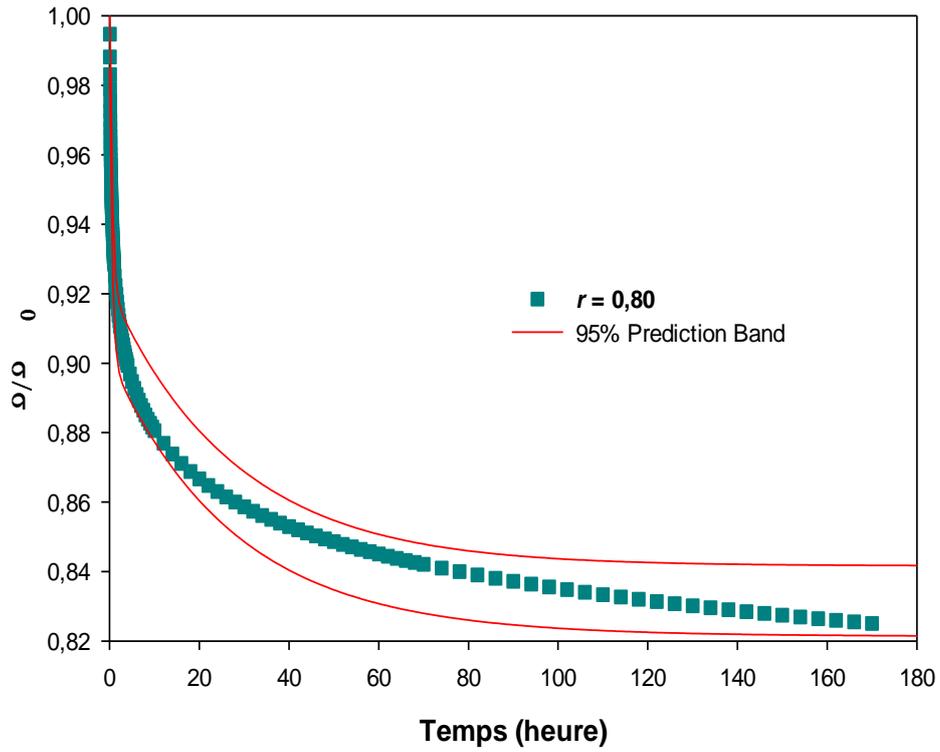


Figure 4. 13 Courbes d'ajustement du module de relaxation pour le niveau du chargement $r = 0.80$.

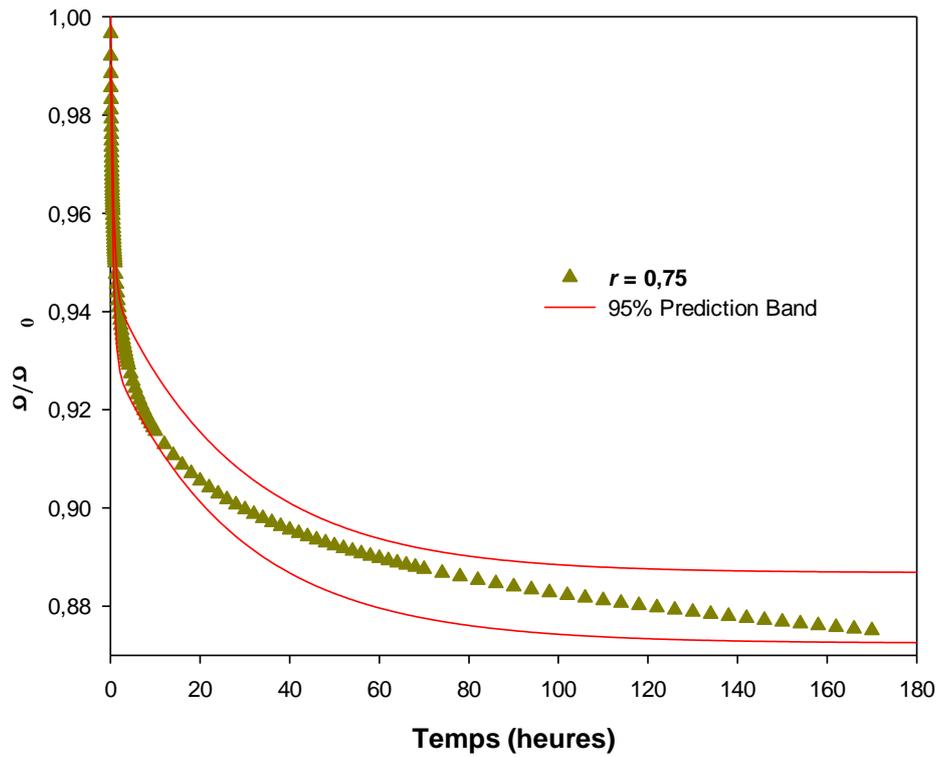


Figure 4. 14 Courbes d'ajustement du module de relaxation pour le niveau du chargement $r = 0.75$.

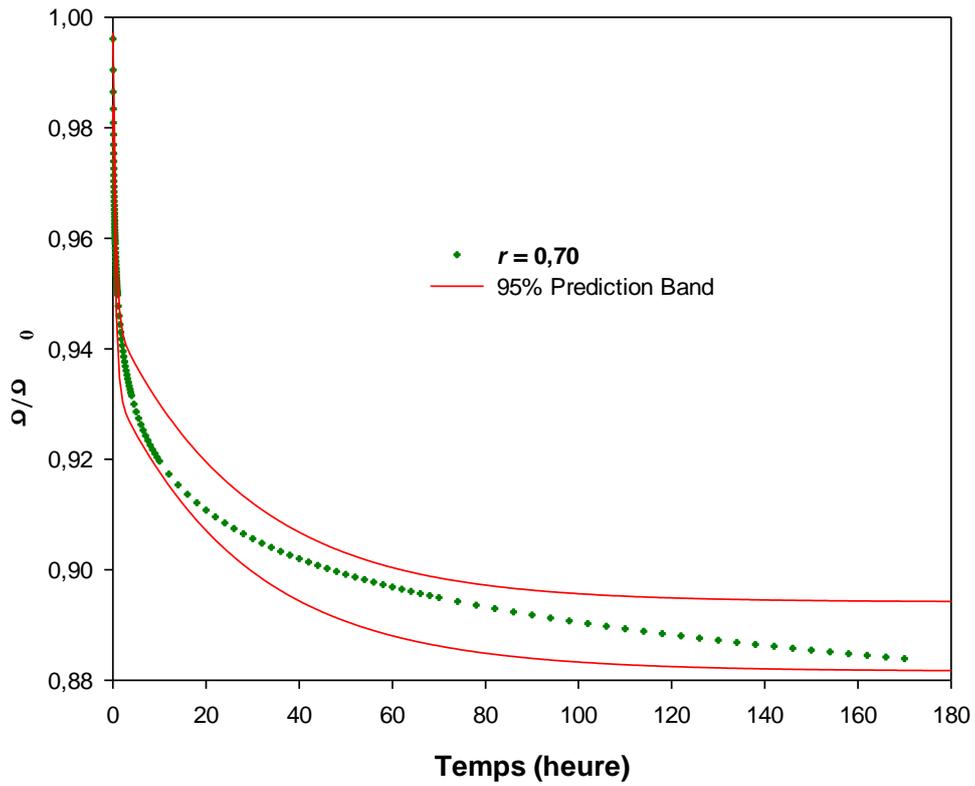


Figure 4. 15 Courbes d'ajustement du module de relaxation pour $r = 0.70$.

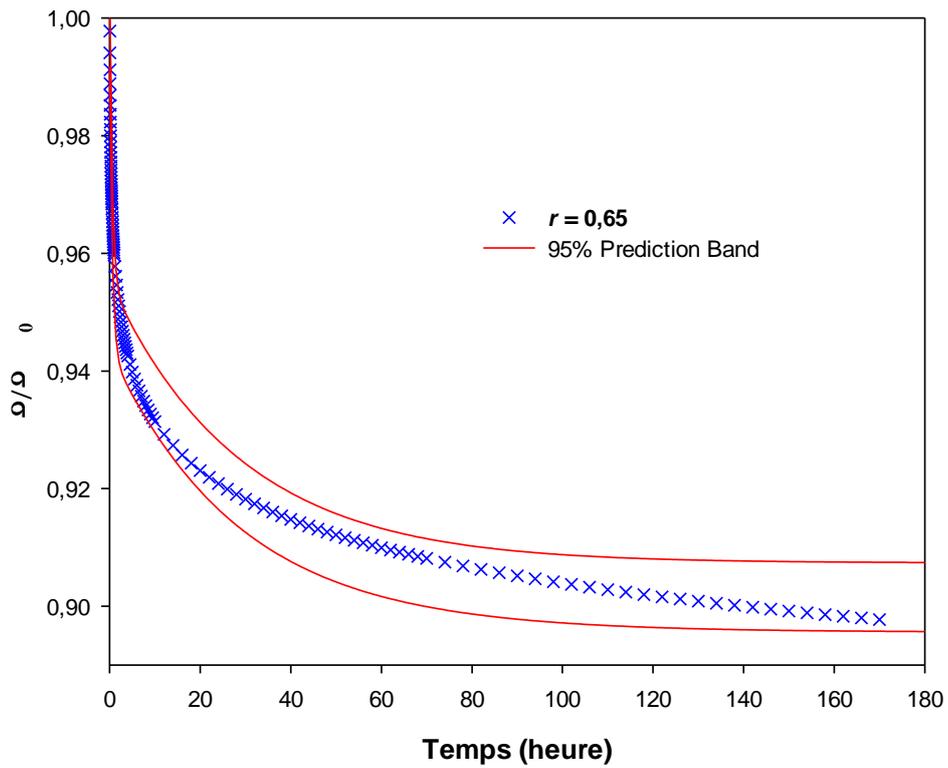


Figure 4. 16 Courbes d'ajustement du module de relaxation pour $r = 0.65$.

4.11 Conclusions

Dans ce chapitre en premier lieu on s'est intéressé à la simulation par éléments finis du comportement d'une âme en nids d'abeilles sollicitée en compression, par la suite une modélisation du comportement mécanique en flexion 3-points en statique et en fatigue cyclique et non-cyclique (relaxation) des matériaux sandwichs en nids-d'abeilles a été effectuée. La connaissance des caractéristiques mécaniques est la première étape dans la compréhension des matériaux sandwichs. Les formulations analytiques sur l'homogénéisation ont permis de déterminer les matrices de rigidité bidimensionnelle du nid d'abeilles en aluminium. Cette étude a permis de montrer que malgré les difficultés que pose le nid d'abeille, on arrive à déterminer son comportement en utilisant les modélisations numériques.

Les différentes configurations géométriques de la plaque nid-d'abeilles (variation de l'épaisseur de la paroi), nous ont permis d'illustrer des résultats très importants, concernant la variation de la contrainte maximale, la variation de l'énergie de déformation et la variation du module de Young hors plan en fonction de la variation de la hauteur de la plaque et en fonction de l'épaisseur de la paroi du nid-d'abeilles.

Dans la partie II on s'est intéressé à la modélisation du comportement en fatigue cyclique, en flexion 3-points de matériaux sandwichs avec différents niveaux de chargement r . Elle a permis d'évaluer la perte de rigidité en flexion 3-points de l'éprouvette en fonction du niveau de chargement r en utilisant les résultats expérimentale du chapitre 3.

Dans la partie III on s'est intéressé à la modélisation du comportement en fatigue non-cyclique, en flexion 3-points de matériaux sandwichs avec différents niveaux de chargement r . Elle a permis d'évaluer la perte de rigidité en flexion 3-points de l'éprouvette en fonction du temps, avec la variation du niveau de chargement r et en utilisant les résultats expérimentale du chapitre 2.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse avait pour objectif l'étude du comportement en statique en flexion 3-Points et en compression, en fatigue statique et cyclique des matériaux sandwichs. Le matériau utilisé dans ce travail est constitué de stratifiés en tissu à fibres de carbone et de résine époxyde pour les peaux avec une séquence d'empilement du type [90/±45] et d'une âme en nids-d'abeilles avec une densité 64kg/m³.

La première partie de ce travail est consacrée à une analyse bibliographique sur les effets de l'endommagement sur le comportement en statique, en fatigue cyclique et fatigue statique des matériaux composites sandwichs. L'accent est porté sur les paramètres qui influent sur la durée de vie en fatigue des matériaux composites sandwichs, des différentes approches de modélisation en fonction des niveaux microscopiques et macroscopiques sont représentées.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale du comportement en statique, en compression, en flexion 3-Points et en fatigue statique. Quand à la troisième partie, elle a fait l'objet d'une étude en fatigue cyclique des éprouvettes en matériaux sandwichs en nids-d'abeilles. Ces études nous ont permis d'observer l'endommagement des éprouvettes pour les différentes sollicitations, de déterminer les paramètres nécessaires aux essais de fatigue statique et cyclique en flexion 3-Points et de montrer l'importance du phénomène de décohésion entre la peau et l'âme au voisinage de l'appui central, ainsi que l'influence des trois configurations (Plat, L et W) sur le comportement en compression de l'âme en nids-d'abeilles.

L'analyse des résultats d'essais statique en compression et en flexion trois points a montré que le domaine du comportement linéaire est limité à de faibles valeurs des déformations.

L'analyse expérimentale du comportement en fatigue cyclique cas de la flexion trois points en contrôle déplacement. a montré que l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles se déroule en trois phases: une diminution rapide de la rigidité dès les premiers cycles dans la première phase, la diminution devient ensuite très lente dans la deuxième phase, correspondant à la quasi-totalité de la durée de vie des éprouvettes, et enfin dans la troisième phase, très courte, où la perte de rigidité s'accélère brutalement jusqu'à la rupture totale des matériaux.

L'énergie dissipée est calculée à partir des données expérimentales de la charge et du déplacement en fonction du temps pour différents niveaux de chargement r . L'analyse des résultats obtenus a montré que la rigidité, les cycles d'hystérésis et l'énergie dissipée sont sensibles au niveau du chargement r et au nombre de cycles de fatigue et peuvent être proposés en tant qu'indicateurs d'endommagement pour le suivi de l'état de santé de l'éprouvette au cours de la fatigue cyclique. Une décohésion à l'interface peaux/âme réduit rigoureusement la résistance et la durée de vie des matériaux sandwichs.

Finalement la dernière partie de ce travail a été consacrée à une étude par éléments finis du comportement mécanique en compression d'une âme en nids-d'abeille dans le but de voir l'influence de quelques paramètres géométriques, tel que l'épaisseur du ligament de l'âme et l'épaisseur du panneau sur leur comportement. L'influence du niveau de chargement r sur le comportement en fatigue statique et en fatigue cyclique du sandwich étudié a été mise en évidence par une modélisation analytique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] J.C. JANNEL. Polyesters insaturés. *Technique d'ingénieur* (2004).
- [2] P. BARDONNET. Résines époxydes (EP), Composants et propriétés. *Technique d'ingénieur* (1992).
- [3] M. BIRON. Propriétés des thermoplastiques, Tableaux comparatifs. *Technique d'ingénieur* (1998).
- [4] D. GUILLON. Fibres de verre de renforcement. *Technique d'ingénieur* (1995).
- [5] M. MALINOWSKY. Structures textiles. *Technique d'ingénieur* (1993).
- [6] C.-L. ARAMARO. Fibres et fils à usage technique. *Technique d'ingénieur* (2005).
- [7] P. CHOMEL. Sélection des matériaux métalliques, Familles de matériaux. (2001).
- [8] M. BIRON. Polymères alvéolaires, Présentation et propriétés. *Technique d'ingénieur* (2003).
- [9] M. BIRON. Polymères alvéolaires, Monographies et transformation. (2003).
- [10] P. PARNEIX, D. LUCAS. Les matériaux composites en construction navale militaire. *Technique d'ingénieur* (2000).
- [11] P. PARNEIX. Fibres aramides pour matériaux composites. *Technique d'ingénieur* (1995).
- [12] G. NEMOZ. Textures textiles tridimensionnelles. *Technique d'ingénieur* (2003).
- [13] L. CARAMARO. Textiles à usage technique. *Technique d'ingénieur* (2006).
- [14] P. COGNARD. Collage des composites. *Technique d'ingénieur* (2005).

- [15] P. COGNARD. Assemblage des composites, Les points forts du collage. *Technique d'ingénieur* (2003).
- [16] P. COGNARD. Collage des composites – Généralités. *Technique d'ingénieur* (2003).
- [17] P. COGNARD. Collage des composites – Secteur aéronautique. *Technique d'ingénieur* (2003).
- [18] P. COGNARD. Collage des composites –Secteurs routiers et ferroviaires. *Technique d'ingénieur* (2003).
- [19] P. COGNARD. Collage des composites –Secteur de la construction navale. *Technique d'ingénieur* (2003).
- [20] H.G. ALLEN. Analysis and design of structural sandwich panels. 1st ed, Oxford New York : Pergamon, xvi, p. 283. (1969).
- [21] S. Suresh, Fatigue of materials, Cambridge University press, 1-8. (1991).
- [22] A. Casal and R.S. Porter, “Polymer stress reactions” vols.1 and 2, Academic press, New York. (1978).
- [23] R. P. Kambour and R. E. Robertson, in “Polymer Science. A Material Science Handbook”(A.D. Jenkins, ed.); North Holland Publ. Amsterdam, P 687 (1972).
- [24]. S. Rabinowitz and P. Beardmore, CRC Crit, Rev. Macromol. Sci. **1**, 1 (1972).
- [25]. R. W. Lang, J. A. Manson, R. W. Hertzberg and R. Schirrer, Craze development in poly (Methyl Methacrylate) during stable fatigue crack propagation, *Polym. Eng. Sci.*, 24, 883-842. (1984).
- [26] R. W. Hertzberg and J. A. Manson, Fatigue of engineering plastics, Academic press, New York, , 9- 42. (1980).
- [21] J.M. Berthelot. Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures. Tec & Doc Lavoisier (2005).
- [22] R.M. Christensen. Mechanics of low density materials. *J. Phys. Solids*, 34, p. 563-578 (1986).
- [23] L.J. Gibson, M.F. Ashby. Cellular Solids. Pergamon, Oxford (1988).
- [24] Documentation Hexcel Composites, HexWeb Honeycomb sandwich design technology, Publication no AGU 075b. (2000).

- [25] Hexcel Composites, Sandwich panel fabrication technology, Publication no LTU 018. (1997).
- [26] Documentation SP SYSTEMS, Introduction to core materials, CR Rom. (2003)
- [27] J.R. VINSON (. – The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials. Lancaster, Pa. : Technomic Publishing Co (1999).
- [28] D. Zenkert. An introduction to sandwich construction. Warley : EMAS Publishing (1997).
- [29] D. Zenkert, F. Nordic. Industrial : The handbook of sandwich construction, North European engineering and science conference series, Cradley Heath : *EMAS Publishing* (1997).
- [30] Ebara, R., The present situation and future problems in ultrasonic fatigue testing - Mainly reviewed on environmental effects and materials' screening, *International Journal of Fatigue* 28 (11), 1465 – 1470, 2006.
- [31] Avril, S.; Pierron, F.; Sutton, M. A. & Yan, J., Identification of elasto-visco-plastic parameters and characterization of Lüders behavior using digital image correlation and the virtual fields method, *Mechanics of Materials* 40(9), 729 – 742. (2008).
- [32] Furuya, Y.; Matsuoka, S.; Abe, T. & Yamaguchi, K., Gigacycle fatigue properties for high-strength lowalloy steel at 100 Hz, 600 Hz, and 20 kHz, *Scripta Materialia* 46(2), 157 – 162, 2002.
- [33] Tsutsumi, N.; Murakami, Y. & Doquet, V., Effect of test frequency on fatigue strength of low carbon steel, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 32(6), 473-483, 2009.
- [34] Stanzl-Tschegg S. ,Mughrabi H., Schönbauer B., Life time and cyclic slip of copper in the VHCF regime, *International Journal of Fatigue*, 29, 2050-2059, (2007).
- [35] G.Trantima, R. Nimmer, “Structural analysis of thermoplastic components technical” Standards Service U K, 1993.
- [36] J.F. Mandell, U. Meier, “Effects of stress ration frequency and loading time on the tensile fatigue glass-rienforced epoxy”, long therm behavior of composites ASTM STP 813,55-77. (1983).
- [37] J. Bowman, M. B. Barker, A methodology for describing-creep –fatigue interactions in thermoplastic components, *Polymer engineering and science*, 26, 1582-90 (1986).

- [38] Nitin Kulkarni, Hassan Mahfuz, Shaik Jeelani, A. Leif Carlsson, Fatigue crack growth and life prediction of foam core sandwich composites under flexural loading, *Composite Structures*, 59, 499–05 (2003).
- [39] S. D. Clark, R. A. Shenoï and H. G. Allen, “Modelling the fatigue behaviour of sandwich beams under monotonic, 2-step and block-loading regimes”, *Composites Science and technology*, 59, 471-86 (1999).
- [40] A. Bezazi, A. El Mahi, J.-M. Berthelot, and B. Bezzazi, Experimental analysis of behavior and damage of sandwich composite materials in three-point bending, part 2. fatigue test results and damage mechanisms, *Strength of Materials*, 41, 257-67 (2009).
- [41] El Mahi A., Farooq M. K., Sahraoui S., Bezazi A., “Modelling the flexural behaviour of sandwich composite materials under cyclic fatigue. *Materials and Design*, 25, 199–08, (2004).
- [42] Zenkert, D. and Vikstrom, M., “Shear cracks in foam core sandwich panels: Non-destructive testing and damage assessment”, *journal of Composites Technology & Research*, 14 (2), 95-103. (1992).
- [43] Zenkert, D. Strength of sandwich beam with mid plane debondings in core, *Composite Structures*, (15), 279-299 (1990).
- [44] Olsson, K. A. and Lonno, A., Test procedures for foam core materials, In: K. A. Olsson and R. P. Reichard, Eds., *Proceeding of the First International Conference on Sandwich Constructions*, EMAS Ltd, UK, 293-318. (1989).
- [45] Daniel, M. I. and Jandro, L. A., Fabrication, testing and analysis of composite sandwich beams, *Composite Science and Technology*, 60, 2455-2463 (2000).
- [46]. Shenoï, R. A., Aksu., A. and Allen H. G. Flexural fatigue characteristic of FRP sandwich beam”, *Fatigue Fracture and Engineering Material*, 16 (6), 649-662 (1993).
- [47] Burman, M. and Zenkert, D. Fatigue of foam core sandwich beams-2: effect of initial damage, *International Journal of Fatigue*, 19 (7), 551-561 (1997).
- [48] J.-M. Berthelot, MATÉRIAUX COMPOSITES, “Comportement mécanique et analyse des structures, Éditions TEC & DOC, 4^{ième} édition, (2006).
- [49] J.-M. Berthelot. Mechanical Behaviour and Structural Analysis, *Composites Materials*, New York Springer, U. S. A, (1999).
- [50] Zhang, S. Y. and Zhao, B. Creep behaviour of woven roving GRP in three point bending. *Proceeding of the seventh ICCM*, 21-26 (1989).

- [51] Zhang, S. Y. and Zhao, B. Creep behaviour of laminated GRP in three point bending. *Composite Structures*, 13, 217-234 (1990).
- [52] Ericksen, R. H. Room temperature creep of kevlar 49/epoxy composites, *Composites*, 7, 189-194 (1976).
- [53] C. Binétruy. Structures sandwichés”, *Techniques de l’Ingénieur*.
- [54] H EL Kadi, F. Ellyin, “effect of stress ration on the fatigue of unidirectional glass fibre/epoxy composite laminate” *Composites*, 25, 917-24 (1994).
- [55] A. Rotem, The fatigue behavior of composite laminate under various mean stress, *Composite Structures*, 17, 113-26 (1991).
- [56] Shenoi, R. A., Clark, S. D., and Allen, H. G. Fatigue behaviour of polymer composite sandwich beams, *Journal of Composite Materials*, 29 (18), 2423-2445 (1995).
- [57] M. Burman, D. Zenkert, Fatigue life of damaged and undamaged sandwich beams, *Sandwich Constructions 3*, Engineering Materials Advisory service Ltd. U.K., 2, 839-48, 1991.
- [58]. Burman, M. and Zenkert, D. Fatigue of foam core sandwich beams-1: undamaged specimens, *International Journal of Fatigue*, 19 (7), 551-561 (1997).
- [59] Zenkert, D. Strength of sandwich beam with mid plane debondings in core, *Composite Structures*, 15, 279-299 (1990).
- [60] Kulkarni Nitin , Hassan Mahfuz, Shaik Jeelani, A. Leif Carlsson. Fatigue crack growth and life prediction of foam core sandwich composites under flexural loading, *Composite Structures*, 59, 499–05 (2003).
- [61] Standard test method for measuring vibration damping properties of materials ASTM E756-04e1. *Book of standard*, (4) (2004).
- [62] Standard test method for flexural properties of sandwich constructions, ASTM C393-00. .West Conshohocken (PA): *American Society for Testing and Materials*. (2004)
- [63] Bezazi, A.; Pierce, S. G.; Worden, K. & Harkati, E. H. Fatigue life prediction of sandwich composite materials under flexural tests using a Bayesian trained artificial neural network. *International Journal of Fatigue*, 29, 738 – 747 (2007)

- [64] Bezazi, A. & Scarpa, F. Mechanical behaviour of conventional and negative Poisson's ratio thermoplastic polyurethane foams under compressive cyclic loading. *International Journal of Fatigue*, 29, 922 – 930 (2007).
- [65] F. Plantema. Sandwich construction. *New York: Wiley*; (1966).
- [66] Berthelot J.-M. Mécanique des matériaux et structures composites, *Institut supérieur des matériaux et mécanique avancés*, le Mans; (2010).
- [67] Marguerre, K., The optimum buckling load of flexibly supported plate composed of two sheets joined by a light weight filler, when under longitudinal compression, *Deutsche Vierteljahrsschrift für Naturwissenschaft und Geistesgeschichte*, D.V.L. (ZWB UM 136/2), (1944).
- [68] S. Belouettar and A. Abbadi. Experimental investigation of static and fatigue behavior of composites honeycomb materials using four point bending tests. *Composite Science and Technology*, 70, 2556–2564, (2003)
- [69] Meyer-Piening H-R. Remarks on higher order sandwich stress and deflection analysis. In: *Olsson K-A, Reichard RP, editors. Proceedings of the first international Conference on Sandwich Constructions*, 107–127, (1989).
- [70] C. C. Foo, Gin Boay Chai, Leong Keey Seah. Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure, *Composite Structures*, 80, 588–594, (2007).
- [71] L. Aktay, F. Alastair. Johnson, B-H. Kröplin. Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 2616–2630, (2008).
- [72] A. Bezazi, A. El Mahi. Experimental analysis of behavior and damage of sandwich composite in three-point bending. Part 1: Static tests and stiffness degradation at failure studies, *Strength of Materials*, 39 (2), 170-177. (2007).
- [73] F. Mujika, J. Pujana, M. Olave. On the determination of out-of-plane elastic properties of honeycomb sandwich panels, *Polymer Testing*, 30, 222–228, (2011).
- [74] W.S. Burton, A.K. Noor. Assessment of continuum models for sandwich panel honeycomb cores; *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 145 (3-4). 341–360, (1997).
- [75] F. Meraghni, F. Desrumaux, M.L. Benzeggagh. Mechanical behavior of cellular core for structural sandwich panels, *Composites: Part A*, 30, 767–779, (1999).

- [76] J. Hohe, W. Becker. A mechanical model for two-dimensional cellular sandwich cores with general geometry, *Computational Materials Science*, 19, 108–115, (2000).
- [77] H Triplett Matt, P. Schonberg William. Static and dynamic finite element analysis of honeycomb sandwich structures. *Structures Engineering and Mechanic*, 6, 95–113, (1998).
- [78] Caprino, G. and Giolelo, G. “Fatigue life of glass fabric/epoxy composites”, *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*”, 30, 299-304 (1999).
- [79] Hwang W., Lee C. S. Park H. C. and Han K. S., “Single and multi-stress level fatigue life prediction of glass/epoxy composites”, *Journal of Advanced Materials*, 3-9 (1995).
- [80] D’amore A., Caprino G., Stupak R., Zhou J., and Nicolais L. Effect of stress ratio on the flexural fatigue behaviour of continuous stand mat reinforced plastics, *Science and Engineering of Composites Materials*, 5(1), 1-8 (1996).
- [81] Hwang, W. and Han, K. S., “Cumulative damage models and multi-stress fatigue life predictions”, *Journal of Composite Materials*, 20, 125-133 (1986).
- [82] Whitworth, H., A. Modelling stiffness reduction of graphite/epoxy composite laminates”, *Journal of Composite Materials*, 21, 362-372 (1987).
- [83] Whitworth H. A. A stiffness degradation model for composite laminates under fatigue loading, *Composite Structures*, 40 (2), 95-101 (1998).
- [84] Hwang W. and Han S. K. Fatigue modulus concept and life prediction Composite Materials: Fatigue and Fracture, Second Volume, ASTM STP 1012, Paul A. Lagace, Ed., *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 87-102. (1989).

Résumé Les composites sandwichs sont des matériaux multicouches réalisés par collage de deux peaux stratifiées de haute résistance sur les deux faces d'une âme de faible densité. Les principaux avantages de l'utilisation du concept de sandwich dans les composants structurels sont la rigidité élevée et la légèreté. Pour utiliser ces matériaux dans différentes applications, la connaissance de leur comportement statique et en fatigue est nécessaire. La première partie de cette étude présente les résultats expérimentaux, liés au comportement mécanique en statique, en compression, en flexion 3-Points et en fatigue statique suivie d'une étude en fatigue cyclique des éprouvettes en matériaux sandwichs en nids-d'abeilles. Les essais de fatigue cyclique montrent une évolution, caractérisée par trois phases différentes de la dégradation de la rigidité en fonction du nombre de cycles pour un niveau de chargement donné. L'évolution de l'énergie dissipée en fonction des niveaux de chargement et du nombre de cycles a été également évaluée dans ce travail. Une modélisation numérique du comportement des panneaux à âmes en nids d'abeilles a été menée en compression. Le mode de ruine dominant dans ces structures est causé par le phénomène de flambement de l'âme et plus exactement celui des parois des cellules de cette dernière car le comportement en compression du nid-d'abeilles dépend essentiellement du comportement en flambement des parois cellulaires soumises à la compression. La simulation a été établie en utilisant le code de calcul élément finis ANSYS. Cette étude a pour but de déterminer les contraintes de compression et l'énergie de déformation correspondante. Par ailleurs, l'étude a mis en évidence l'importance de la hauteur de l'âme, l'épaisseur des parois des cellules sur le comportement en compression des panneaux en nids-d'abeilles. Le travail a été achevé par une approche analytique, de l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles, basé sur l'interpolation par des fonctions empiriques des résultats expérimentaux. Cette approche permet de prédire la durée de vie en fatigue des matériaux composites sandwichs tout en évitant le grand nombre d'expériences qui seraient exigé dans les essais de fatigue.

Mots clés: flexion 3-points, compression, panneaux sandwichs, tissu en carbone, cellule nid-d'abeilles, sollicitation cyclique, modes d'endommagements, modélisation analytique.

Abstract *The composite sandwiches are multilayer materials produced by bonding two laminated skins of high resistance on both sides of a core of low density. The main advantages of the use of the sandwich concept in the structural components are the high rigidity and lightness. To use these materials in different applications, the knowledge of their static and fatigue behavior is required. The first part of this paper presents the experimental results related to static mechanical behavior, compression; bending and 3-point static fatigue followed by a study of cyclic fatigue specimens sandwich honeycomb materials. The cyclic fatigue tests show a change, characterized by three different phases of degradation of the stiffness based on the number of cycles for a given level of loading. The evolution of the energy dissipated as a function of load levels and the number of cycles was also evaluated in this work. Numerical modeling of the behavior of panels souls honeycomb was conducted in compression. The dominant mode of failure in these structures is caused by the phenomenon of buckling of the web and more precisely that of the cell walls of the latter because the compression behavior of honeycomb depends mainly on the buckling behavior of the cell walls subjected to compression. The simulation was constructed using the finite element computer code ANSYS. This study aims to determine the compressive stresses and energy corresponding deformation. In addition, the study highlighted the importance of the height of the core, the thickness of the cell walls on the compression behavior. Panels honeycomb. The work was completed by an analytical approach, changes in the rigidity of the number of cycles, based on the interpolation function by empirical experimental results. This approach allows to predict the fatigue life of sandwich composites while avoiding the large number of experiments that would be required in the fatigue tests.*

Keywords: *3-point bending, compression, sandwich panels, carbon fabric, honeycomb cell, cyclic loading, damage modes, analytical modeling.*

ملخص

السندويشات المركبة هي مواد متعددة الطبقات التي تنتجها الترابط اثنين من جلود مغلقة مقاومة عالية على جانبي مجموعة أساسية من منخفض الكثافة. المزايا الرئيسية لاستخدام مفهوم شطيرة في المكونات الهيكلية هي صلابة عالية وخفة. لاستخدام هذه المواد في التطبيقات المختلفة، لا بد من معرفة سلوكهم ثابت والتعب. الجزء الأول من هذه الورقة يعرض النتائج التجريبية المتعلقة ثابت السلوك الميكانيكي، ضغط؛ الانحناء والتعب 3 نقاط ثابتة تليها دراسة من الارهاق دوري عينات المواد شطيرة العسل. وتشير الاختبارات التعب دوري تغيير، وتتميز بثلاث مراحل مختلفة من تدهور صلابة على أساس عدد من الدورات لمستوى معين من التحميل. تم تقييم تطور الطاقة تبدد بوصفها وظيفة من مستويات الحمل وعدد من الدورات أيضا في هذا العمل. وقد أجريت النمذجة العددية لسلوك وحام النفوس العسل في الضغط. ويتسبب النمط السائد للفشل في هذه الهياكل التي كتبها ظاهرة التواء على شبكة الإنترنت وأكثر من ذلك على وجه التحديد من جدران الخلايا من هذا الأخير لأن السلوك ضغط من العسل يعتمد بشكل رئيسي على السلوك التواء من جدران الخلايا يتعرض للضغط. تم بناء محاكاة باستخدام محدود ANSYS عنصر رمز حاسوبي. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد الضغوط الضغط والطاقة المقابلة تشوه. وبالإضافة إلى ذلك، أبرزت الدراسة أهمية ذروة الأساسية، وسماكة جدران الخلايا على سلوك الضغط. وحام العسل. وقد تم الانتهاء من العمل من قبل نهج تحليلي، والتغيرات في صلابة من عدد من الدورات، استنادا إلى وظيفة الاستيفاء من النتائج التجريبية. هذا النهج يتيح للتنبؤ التعب حياة المركبة شطيرة مع تجنب عدد كبير من التجارب التي ستكون مطلوبة في الاختبارات التعب.

كلمات البحث: الانحناء 3 نقاط، ضغط، والألواح، والنسيج الكربون، خلية العسل، تحميل دوري، وسائط الضرر، والنمذجة التحليلية.