

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique Université Ferhat Abbas- Sétif1

Institut : Optique et Mécanique de Précision

Département : Optique et Mécanique de Précision

Domaine: Sciences et Technologies

Filière : Optique et Mécanique de Précision

Spécialité: Mécanique fine

Mémoire de Master

Etude du comportement mécanique d'un composite sandwich en mousse soumis à l'impact dynamique

Etudié par : *Bouriel Amel*

Dirigé Par: *Pr. KESKES Boualem*

Co-encadreurs: *Dr .MERTANI Boubekour Mohammed Bilel.*

Devant le jury:

Dr. ZIANI	Ridha	(Président)
Dr. FACI	AbdElAziz	(Examineur)

Soutenue le: 11/09/2023

Table des matières

Remerciements.....	I
Table des matières	II
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux	X
Résumé.....	XI
ملخص	
Introduction générale	2

Chapitre I: Revue bibliographique

I.1 Généralités sur les panneaux sandwichs	5
I.1.1 Historique	5
I.1.2 Les matériaux composites et les panneaux sandwichs.....	6
I.1.3 Les matériaux composant les panneaux sandwichs.....	8
I.1.4 Constructions d'un sandwich.....	9
I.1.4.1 Les peaux	9
I.1.4.2 L'âme	10
I.1.4.3 L'adhésif.....	13
I.2 Le matériau Mousse de polyuréthane dans les panneaux sandwichs	13
I.2.1 La structure moléculaire	14
I.2.2 Fabrication des mousses polyuréthanes.....	15
I.2.2.1 Fabrication par coulé souple.....	15
I.2.2.2 Fabrication par moulage par injection.....	15
I.2.3 Domaines d'utilisation.....	15
I.2.4 Avantages et inconvénients de PU.....	16
I.3 Modes d'endommagement et ruptures des structures sandwichs	17
I.3.1 Flambage localisé (wrinkling).....	17
I.3.2 Indentation localisée (Poinçonnement).....	18
I.3.3 Flambement global.....	18
I.3.4 Rupture de la peau en traction ou en compression	18

<i>I.3.5 Rupture del'âmemparcisaillage</i>	19
<i>I.3.6 Flambementlocalisée 'dimpling'</i>	19
I.4 Généralitéssurles essaismécaniques d'impact	20
<i>I.4.1 Définitiondel'impact</i>	20
<i>I.4.2 Classificationdesessaisd'impact</i>	20
<i>I.4.3 Lescaractéristiquedel'impact</i>	20
<i>I.4.3.1 effetdelavitessed'impact</i>	21
<i>I.4.3.2 effetdelagéométriédul'impacteur</i>	21
<i>I.4.3.3 Effetdel'épaisseurdelapeau</i>	23
<i>I.4.4 Moyensexpérimentauxdecaractérisationducomportement l'impact</i>	23
<i>I.4.4.1 Mouton Charpy</i>	23
<i>I.4.4.2 Barred'Hopkinson</i>	24
<i>I.4.4.3 Essai deCanondeTaylor</i>	25
I.5 Conclusion	27

ChapitreII:Partieexpérimentale

II.1. Introduction	29
II.2. Matériauxetprocédureexpérimentale	29
<i>II.2.1. Matériaux</i>	29
<i>II.2.2. Procédureexpérimentale</i>	30
<i>II.2.3. Capteur deforce</i>	33
<i>II.2.4. Moduled'acquisitionMX440B</i>	34
<i>II.2.5. Systèmedemesurela vitessed'impact</i>	34
<i>II.2.6. Caméra</i>	35
II.3. Résultatsexpérimentauxobtenus etdiscussions	35
<i>II.3.1. Courbes obtenuset Résultatsexpérimentauxdela force</i>	36
<i>II.3.1.1. L'impacteur plat</i>	36
<i>II.3.1.1.1. Pour l'épaisseur30mm</i>	37
<i>II.3.1.1.2. Pour l'épaisseur35mm</i>	38
<i>II.3.1.1.3. Pour l'épaisseur40mm</i>	39
<i>II.3.1.1.4. Pour l'épaisseur50mm</i>	40
<i>II.3.1.1.5. Pour l'épaisseur80mm</i>	40

II.3.1.2. <i>L'impacteur hémisphérique</i>	41
II.3.1.2.1 <i>Pour l'épaisseur 30mm</i>	42
II.3.1.2.2 <i>Pour l'épaisseur 35mm</i>	42
II.3.1.2.3 <i>Pour l'épaisseur 40mm</i>	43
II.3.1.2.3 <i>Pour l'épaisseur 50mm</i>	44
II.3.1.2.3 <i>Pour l'épaisseur 80mm</i>	44
II.3.1.3. <i>L'impacteur pointu</i>	45
II.3.1.3.1. <i>Pour l'épaisseur 30mm</i>	46
II.3.1.3.2. <i>Pour l'épaisseur 35mm</i>	47
II.3.1.3.3. <i>Pour l'épaisseur 40mm</i>	47
II.3.1.3.4. <i>Pour l'épaisseur 50mm</i>	48
II.3.1.3.5. <i>Pour l'épaisseur 80mm</i>	49
II.3.2. <i>Analyses des résultats des courbes et des tableaux</i>	49
II.3.3. <i>Modèles d'endommagement</i>	50
II.3.3.1. <i>Modèle d'endommagement par indentation localisé</i>	51
II.3.3.2. <i>Modèle d'endommagement par délaminage âme/peau</i>	51
II.3.3.3 <i>Modèle d'endommagement par cisaillement de l'âme</i>	52
II.3.4. <i>Effet de l'épaisseur d'échantillons</i>	53
II.3.5. <i>Effet des impacts tombant</i>	55
II.4. Conclusion	59
Conclusion générale.....	61
Bibliographie	XI

Listed figures

Chapitre I

Figure I. 1 : bombardier de Havilland	6
Figure I.2 : classification des matériaux composites selon leur structure	7
Figure I. 3 : Résistance des matériaux en fonction de leur densité	7
Figure I.4 : peau d'un panneau sandwich	8
Figure I. 5 : Schématisation d'une plaque sandwich	8
Figure I.6 : Illustration des matériaux constituant les panneaux sandwichs	9
Figure I.7 : Matériaux pour les peaux	10
Figure I. 8 : l'âme en mousse	11
Figure I.9 : l'âme en Liège	11
Figure I.10 : L'âme Nid d'abeille	12
Figure I. 11 : L'âme ondulée	12
Figure I. 12 : L'âme Y forme	12
Figure I.13 : L'âme pyramide	12
Figure I.14 : Fabrication de PUF. A, Mélange de polyol avec l'isocyanate. B, Mélange mécanique. C, Gonfl ement de la mousse. D. PUF	14
Figure I.15 : Formation du groupement polyuréthane	14
Figure I.16 : Flambement localisé wrinkling.	17
Figure I.17 : Mode de ruptures par indentation localisé	18
Figure I.18 : Flambement global	18
Figure I.19 : Dégradation par rupture des peaux du sandwich	19
Figure I.20 : Rupture de l'âme par cisaillement	19
Figure I.21 : Flambement localisé dimpling	19

FigureI.22: schéma desparamètresd'unessai d'impacte	21
FigureI.23 : Typederéponseselonladuréedel'impact	21
FigureI.24 : Différentformedesimpacteur:(a)plat,(b)pointu,(c)trucagecône,.....	22
FigureI.25 : Effetdel'épaisseurdelapeausurlemodederupturesousimpact	23
FigureI.26: Dispositifde choc.....	24
FigureI.27 : Dispositifdebarre deHopki.....	25
FigureI.28 : Schéamontageexpérimentaldel'essai deCanondeTaylor	26
Figure I.29 : Tourdechute	27

ChapitreII

FigureII.1 : panneausandwichàâmeenmousse	29
FigureII. 2: caractéristiquesgéométriquesd'unpanneausandwich	30
FigureII.3 : système decrochetmobileetbuté.....	31
FigureII. 4 : Lestris impacteursdepuis ledébutdesessais	31
FigureII.5: fixationdeséchantillonsentredeuxplaqueset4vis	31
FigureII. 6 : dispositifutiliséepournosessais	32
FigureII.7 : systèmevisetécrou.....	32
FigureII.8 : capteur deforcedelasérieU9C	33
FigureII.9 : Moduled'acquisitionMX440B	34
FigureII.10 : Dispositifphoto gâte.....	35
FigureII.11 : courbededonnerparlogicielMATLAB(l'épaisseur30mm,impacteurplat.....	35
FigureII. 12 : courbededonnerparlogicielExcel(l'épaisseur30mm,impacteurplat)	36
FigureII.13: l'échantillonavantl'impact(épaisseur30mm,impacteurplat).....	37
FigureII.14 : l'échantillonaprès l'impact(épaisseur30mm,impacteurplat	38
FigureII.15 : (a)Courbesdel'évolutiondelaforced'impactenfondutiondutemps,(b)Courbe de moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps(épaisseur30mm,impacteurplat)	38

FigureII.16 : l'échantillon après l'impact (épaisseur 35mm, impacteur plat)	38
FigureII.17:(a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbe de moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps (épaisseur 35mm, impacteur plat)	39
FigureII.18 : l'échantillon après l'impact (épaisseur 40mm, impacteur plat)	39
FigureII.19:(a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbe de moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps (épaisseur 40mm, impacteur plat)	39
FigureII.20: l'échantillon après l'impact (épaisseur 50mm, impacteur plat)	40
FigureII.21:(a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbe de moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps (épaisseur 50mm, impacteur plat)	40
FigureII.22 : l'échantillon après l'impact (épaisseur 80mm, impacteur plat)	40
FigureII.23:(a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbe de moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps (épaisseur 80mm, impacteur plat)	41
FigureII.24: l'échantillon après l'impact (épaisseur 30mm, impacteur hémisphérique)	42
FigureII.25:(a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbe de moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps (épaisseur 30mm, impacteur hémisphérique)	42
FigureII.26 : l'échantillon après l'impact (épaisseur 35mm, impacteur hémisphérique)	42
Figure II. 27: (a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbe de moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps (épaisseur 35mm, impacteur hémisphérique)	43
FigureII.28: l'échantillon après l'impact (épaisseur 40mm, impacteur hémisphérique)	43

FigureII. 29:(a) Courbesdel'évolutiondelaforced'impactenfionctiondutemps, (b) Courbes demoyennedecourbes(a)présentel'évolutiondelaforced'impactenfionctiondutemps (épaisseur40mm,impacteurhémisphérique)	43
FigureII.30:l'échantillonaprès l'impact(épaisseur50mm,impacteurhémisphérique)	44
Figure II. 31 : (a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbesde moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps(épaisseur50mm,impacteurhémisphérique)	44
FigureII.32 :l'échantillonaprès l'impact(épaisseur80mm,impacteurhémisphérique)	44
Figure II. 33: (a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbesdemoyennede courbes(a)présentel'évolutiondelaforced'impactenfionctiondu temps(épaisseur80mm,impacteurhémisphérique)	45
FigureII.34 :l'échantillonaprès l'impact(épaisseur30mm,impacteurpointu).....	46
Figure II. 35 : (a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbesde moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps(épaisseur30mm,impacteurpointu)	46
FigureII.36 :l'échantillonaprès l'impact(épaisseur35mm,impacteurpointu).....	47
Figure II. 37: (a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbesde moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps(épaisseur30mm,impacteurpointu)	47
FigureII.38:l'échantillonaprès l'impact(épaisseur40mm,impacteurpointu).....	47
Figure II. 39: (a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b) Courbesde moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps(épaisseur40mm,impacteurpointu)	48
FigureII.40 :l'échantillonaprès l'impact(épaisseur50mm,impacteurpointu).....	48

FigureII.41 : (a)Courbesdel'évolutiondelaforced'impactenfuctiondutemps,(b)Courbes demoyennedecourbes(a)présentel'évolutiondelaforced'impactenfuctiondutemps (Épaisseur50mm,impacteurpointu)	48
FigureII.42 : l'échantillonaprès l'impact(épaisseur80mm,impacteurpointu).....	49
Figure II. 43 : (a) Courbes de l'évolution de la force d'impact en fonction du temps, (b)Courbesde moyenne de courbes (a) présente l'évolution de la force d'impact en fonction du temps(épaisseur80mm,impacteurpointu)	49
FigureII.44 : moded'endommagementparindentationlocalisée	51
FigureII.45 : moded'endommagementpardé laminageentrel'âmeetlapeau	52
FigureII.46 : moded'endommagementparcisaillementdel'âmempour	53
FigureII.47 : l'évolutiondelachargemaximaleenfuctiondel'épaisseur(impacteurplat)	53
FigureII.48 : l'évolutiondelachargemaximale en fonctiondel'épaisseur(Impacteurhémisphérique)54	
FigureII. 49 : l'évolutiondelachargemaximaleenfuctiondel'épaisseur(Impacteurpointu).....	54
FigureII. 50 : l'évolutiondelachargemaximaleenfuctiondel'impacteur, l'épaisseur30mm	55
FigureII. 51 : l'évolutiondelachargemaximaleenfuctiondel'impacteur, l'épaisseur35mm	56
FigureII. 52 : l'évolutiondelachargemaximaleenfuctiondel'impacteur, l'épaisseur40mm	56
FigureII. 53 : l'évolutiondelachargemaximaleenfuctiondel'impacteur, l'épaisseur50mm	57
FigureII. 54 : l'évolutiondelachargemaximaleenfuctiondel'impacteur, l'épaisseur80mm	57
Figure II. 55 : Comparaison de la charge maximale en fonction de l'épaisseur des échantillons etformed'impacteur	58

Listedetableaux

ChapitreII

TableauII.1: Propriétés mécaniquesdel'âmeenmoussepolyuréthane	29
TableauII.2: Propriétés mécaniquesdespeauxenacier N250dusandwich	29
TableauII.3: Dimensionsde l'éprouvetteutilisée	30
TableauII. 4 : Vitesseeténergieduprojectile($p=3,526\text{Kg}$)enfonctiondelahauteur	32
TableauII. 5: vitessemesurédedel'impacte	33
TableauII. 6 : lesparamètresdesessais	36
TableauII.7: Résultatsexpérimentauxdeladéformationdeséchantillonsparl'impacteur plat	36
Tableau II. 8 : Résultats expérimentaux de la déformation des échantillons par l'impacteurhémisphérique.....	41
TableauII. 9: Résultatsexpérimentauxdeladéformationdeséchantillonsparl'impacteurpointu	45

Résumé

Les panneaux sandwichs sont de plus en plus utilisés dans les applications d'ingénierie (aéronautique, automobile, navigation astronautique, etc.), où la grande rigidité ainsi que la légèreté sont importantes. À cet effet, ces privilèges ont attiré l'attention de nombreux chercheurs.

L'objet du thème est de faire une étude expérimentale du comportement à l'impact des panneaux sandwichs constitués avec des peaux en acier et une âme en mousse polyuréthane.

L'impact est l'étude du comportement de structures aux chocs dynamique ou à la sensibilité des matériaux aux grandes vitesses de chargement. La résistance à l'impact est l'une des propriétés les plus importantes à examiner pour un concepteur et la plus difficile à quantifier.

Les tests d'impact ont été effectués avec un dispositif à masse tombante en chute (chute libre). Pour ces tests d'impact, on a varié le poids en chute en utilisant différentes formes d'impacteur, et aussi l'épaisseur du panneau sandwich.

Mots-clés: impact, choc, structures sandwich en mousse polyuréthane, essai d'impact.

ملخص

تُستخدم الألواح العازلة بشكل متزايد في التطبيقات الهندسية (الطيران، والسيارات، والملاحة الفضائية، وما إلى ذلك)، حيث تكون الصلابة الكبيرة وكذلك الخفة مهمة. تحقيقاً لهذه الغاية، جذبت هذه الامتيازات انتباه العديد من الباحثين. الموضوع هو إجراء دراسة تجريبية لسلوك التأثير على الألواح العازلة المصنوعة من جلود الفولاذ ونواة البولي إيثان ودراسة سلوك الهياكل تجاه الصدمات الديناميكية أو حساسية المواد لسرعات التحميل العالية. تعتبر مقاومة التأثير من أهم الخصائص التي يجب على المصمم مراعاتها والأكثر صعوبة في تحديدها كميًا. لدينا جهاز اختبار تأثير الكتلة المتساقطة وفقاً للمواصفات (سقوط حر) لاختبار الاصطدام بتغيير في الأوزان المتساقطة، واستخدام أشكال مختلفة من المصادم، وسمك المواد والهيكلي المراد اختباره.

الكلمات المفتاحية: الاصطدام، هيكل الشظيرة الرغوية بولي إيثان، اختبار الصدم

Introduction générale

Introduction générale

Les essais mécaniques sont une étape clé pour obtenir les propriétés des matériaux, du module de Young à la limite d'élasticité, en passant par la résistance aux chocs et la résistance à la fatigue, dans des conditions variables telles que la température et le taux de contrainte.

Bien que les structures sandwichs occupent actuellement une place considérable dans tous les secteurs industriels notamment le secteur aéronautique, leur forte sensibilité aux chocs même à de faibles vitesses soulève certaines inquiétudes chez les constructeurs. En effet, les structures sandwichs sont susceptibles d'être exposées à des chocs accidentels de diverses origines (chutes d'outils lors de maintenance, chocs entre deux panneaux lors de l'assemblage, impact d'oiseaux pendant la vie en service de l'avion...) dont les conséquences sont souvent redoutables. C'est dans cette optique que nous nous sommes intéressés à l'étude avec un dispositif tour de chute d'essai d'impact à masse tombante (tour de chute).

Cette approche intégrée permet aux ingénieurs et aux chercheurs d'obtenir une meilleure compréhension du comportement mécanique des panneaux sandwich à l'impact. Ces informations peuvent être utilisées pour optimiser la conception des panneaux, évaluer leur durabilité, identifier les défauts potentiels et améliorer leur performance dans diverses applications. En fin de compte, cela contribue à la création de panneaux sandwich plus fiables, plus sûrs et plus performants dans de nombreux domaines industriels.

Le propos de cette étude est de présenter une technique expérimentale permettant de caractériser le comportement mécanique à l'impact dynamique des panneaux sandwich en mousse PUF et des panneaux en acier. L'essai d'impact sert à tester la capacité d'un matériau à résister aux chargements sous vitesse donnée. La résistance à l'impact est l'une des propriétés les plus importantes à examiner pour un concepteur et la plus difficile à quantifier. Les tests d'impact ont été effectués avec un dispositif à masse tombante en chute (chute libre). Pour ces tests d'impact, on a varié l'épaisseur du panneau sandwich en utilisant différentes formes d'impacteur, et aussi l'épaisseur du panneau sandwich.

Le mémoire est composé de deux chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique sur les structures composites de type sandwich. Il présente les différents modes de rupture dans les structures composites des panneaux.

del'âme). Les essais d'impact utilisés pour la détermination de la résistance des matériaux à l'impact ont été présentés.

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation de la partie expérimentale concernant les essais d'impact réalisés sur des sandwichs à âmes en mousse. Il présente les panneaux sandwichs utilisés dans notre étude et la procédure expérimentale de l'essai d'impact tel que : la mise au point de la tour de chute de l'essai d'impact, la description de l'essai d'impact, paramètre d'essai. Il regroupe aussi les principaux résultats expérimentaux obtenus de l'essai d'impact. Et des observations des différents modes d'endommagements.

Enfin, une conclusion générale qui permet de proposer une synthèse des principaux résultats obtenus et d'envisager les perspectives découlant de cette étude.