

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Thèse de Doctorat

Présentée par :

Mr. HAMI Brahim

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT** en :

Filière : Sciences et Génie des Matériaux

Option : Matériaux de structure

Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'une structure sandwich multicouches

Devant le jury composé de :

Président de jury	Mr. ZERIZER	Abdellatif	Professeur	UMBB
Directeur de thèse	Mr. BEZZAZI	Boudjema	Professeur	UMBB
Examineur	Mr. AIT TAHAR	Kamel	Professeur	UAMOB
Examineur	Mr. GHERNOUTI	Youcef	Professeur	UMBB
Examineur	Mr. LOUNICI	Hakim	Professeur	UAMOB
Examinatrice	Mme KHELOUI	FATMA	MCA	UMMTO

Remerciements

Je remercie Allah tout puissant de m'avoir donné le savoir et la faculté de pouvoir poursuivre mes études.

Je commence tout d'abord mes remerciements par, le Pr. B. Bezzazi de m'avoir proposé ce sujet de thèse et de m'avoir accueilli au sein du groupe « mécanique des matériaux » du l'unité de recherche matériaux, procédés et environnement (ex: LMMC).

Je présente mes sincères reconnaissances au Pr. BENMOUNAH Abdelbaki, le directeur du l'unité de recherche matériaux, procédés et environnement (ex: LMMC).

Je remercie également les membres de jury : Pr. A. ZERIZER, Pr. K. AIT TAHAR, Pr. H. LOUNICI, Pr. GHERNOUTI Y. et madame KHELOUI F. qui m'ont fait l'honneur d'examiner ma thèse de doctorat.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail, de près ou de loin.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail...

À mes très chers parents, qui ne cessent de m'encourager et de prier pour moi ; pour que ce travail voit le jour.

À tous les membres de ma famille, petits et grands.

À tous mes amis.

Résumé :

Notre projet présente une étude expérimentale qui consiste à déterminer les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un matériau composite de type sandwich multicouches. Ce dernier a été élaboré au niveau du laboratoire de mécanique des matériaux et composites, de l'unité de recherche matériaux, procédés et environnement de l'université de Boumerdes. Cette nouvelle structure sandwich est constituée de couches en matériaux composites, stratifiées, à base d'une résine époxy renforcée par des fibres de verre du type tissé et mat ; entre lesquelles se trouvent des plaques de liège aggloméré, empilées alternativement avec les couches de stratifiés.

Tout d'abord, les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude ont été présentés et caractérisés par des essais physico-mécaniques ; le matériau de l'âme de la structure sandwich est le liège aggloméré. Tandis que la résine époxy et la fibre de verre constituent les peaux de la structure sandwich.

D'après les résultats des essais de flexion trois et quatre points, on a constaté que les trois structures sandwich testées présentent un comportement linéaire élastique depuis le début de chargement. Mais il existe une légère déformation plastique pour des déplacements plus élevés. En fait, la dégradation affectant les structures sandwiches commence par une petite fissure de cisaillement, qui se propage depuis la zone chargée suivant la direction du plan médian vers les bouts de l'échantillon.

Les structures sandwiches des trois séries (S5, S10 et S20) présentent le même mode de rupture lors des essais de traction perpendiculaire : la rupture des éprouvettes se produit la plupart du temps au niveau du matériau de l'âme de la structure sandwich (liège aggloméré). Par la suite, la fissure se propage rapidement d'une façon perpendiculaire à la force du chargement.

Les résultats de cette étude, nous ont permis de valoriser une variété de liège aggloméré blanc produit en Algérie, dans le but de l'utiliser dans la construction, comme des murs de cloison et dans le domaine du transport pour leur bonne isolation thermique.

Mots clés : Liège, fibres de verre, sandwich multicouches, flexion trois points et quatre points.

Abstract:

Our project presents an experimental study which consists in determining the physico-mechanical and thermal characteristics of a new multilayer sandwich composite material developed in the materials and composites mechanics laboratory of the Materials, Processes and Environment Research Unit. This type of sandwich is composed of layers of laminated composite materials based on an epoxy resin reinforced by woven and matte glass fibers; between which agglomerated cork plates are stacked alternately with the laminated layers.

First of all, the materials used in the context of this study were presented and characterized by physico-mechanical tests, the core material of the sandwich structure is agglomerated cork; and the materials that make up the skins of the sandwich structure are epoxy resin and glass fibre.

Three types of multilayer sandwich structures were developed with a pressure of 100 MPa, using a SIMI type hydraulic press for 24 hours with a temperature of 60 ° C. The sandwich structures obtained were characterized by physico-mechanical and thermal tests.

The results of the three- and four-point bending tests have shown that the three types of sandwich structures tested have linear elastic behavior since the start of loading, but there is a slight plastic deformation for higher displacements. In fact, the degradation of the sandwich structures begins with a small shear crack, which propagates from the loaded zone in the direction of the median plane to the ends of the sample.

The failure mode of the sandwich structures of the three series (S5, S10 and S20) during the perpendicular tensile tests is the same, the rupture of the specimens occurs most of the time at the core materials of the sandwich structure, which is agglomerated cork, subsequently the crack propagates rapidly, in a way perpendicular to the loading force.

The results of this study, allowed us to develop a variety of white agglomerated cork produced in Algeria, with the aim of using it in the construction and railway industry.

Key words: cork, glass fibers, multi - layered sandwich structures, three - point and four points bending test.

المخلص:

يقدم مشروعنا دراسة تجريبية التي تهدف لتحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمادة مركبة جديدة من نوع الساندويتشات متعددة الطبقات التي تم تطويرها في مختبر ميكانيكا المواد والمواد المركبة في وحدة البحث في المواد، الطرائق والبيئة. هذا النوع من الساندويتشات يتكون من طبقات من المواد المركبة مغلقة و التي تتكون هي الأخرى من راتنجات الايبوكسي معززة بالألياف الزجاجية المنسوجة. حيث يتم تكديس لوحات الفلين المتكتلة بالتناوب مع الطبقات المغلقة.

المواد المستخدمة في سياق هذه الدراسة تم تقديمها وخضعت للاختبارات الفيزيائية الميكانيكية، والمادة المتواجدة في وسط قلب هيكل الساندويتش هي الفلين المكتل؛ والمواد المتواجدة في جلود هيكل الساندويتش تتكون من راتنجات الايبوكسي والألياف الزجاجية

تم تطوير ثلاثة أنواع من هياكل الساندويتشات متعددة الطبقات مع ضغط 100 ميغاباسكال، وذلك باستخدام ضاغطة هيدروليكية من نوع SIMI ، لمدة 24 ساعة مع درجة حرارة 60 درجة مئوية

خضعت هياكل الساندويتشات التي تم الحصول عليها إلى الاختبارات الفيزيائية، الميكانيكية والحرارية وأظهرت نتائج اختبارات الانحناء الثلاثية وأربع نقاط أن الأنواع الثلاثة من هياكل شظيرة اختبار لها سلوك مرن خطي منذ بدء التحميل، ولكن هناك تشوه طفيف للتشريد العالي. ويبدأ التدهور الذي يؤثر على هياكل الساندويتشات بصدع صغير بسبب القص الذي ينتقل من المنطقة المحملة في اتجاه وسط هياكل الساندويتشات ثم ينتقل إلى نهايات هياكل الساندويتشات خلال اختبارات الشد عمودي هو نفسه، تمزق العينات يحدث (S5، S10 و S20) طريقة الكسر في هياكل الساندويتشات معظم الوقت في لوحات الفلين المتكتلة طريقة الكسر في الموجودة في قلب هياكل الساندويتشات، في وقت لاحق الكسر ينتشر بسرعة، بطريقة عمودي على قوة التحميل

وقد أتاحت لنا نتائج هذه الدراسة تقييم الفلين الأبيض المنتج في الجزائر بهدف استخدامه في البناء والسكك الحديدية

كلمات البحث: الفلين، الألياف الزجاجية، هياكل شظيرة متعددة الطبقات، انحناء ثلاث و أربعة نقاط

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
I. Synthèse bibliographique sur les structures sandwiches	3
I.1. Matériau de l'âme (liège).....	3
I.2. Travaux réalisés sur le matériau liège.....	3
I.2.1. Morphologie du liège	3
I.2.2. Composition chimique du liège.....	4
I.3. Travaux réalisés sur les matériaux composites sandwichs	5
I.3.1. Essais de flexion.....	5
I.3.2. Essais de compression.....	17
I.4. Conclusion	19
II. Matériaux composites et leurs constituants	20
II.1. Introduction	20
II.2. Définition des matériaux composites multicouches	20
II.3. Caractéristiques générales.....	21
II.4. Classification des matériaux composites.....	22
II.4.1. Classification suivant la forme des constituants	22
II.4.1.1. Composites à fibres	22
II.4.1.2. Composites à particules.....	23
II.4.2. Classification suivant la nature des constituants.....	23
II.4.2.1. Composites à matrice organique	23
II.4.2.2. Composites à matrice métallique	23
II.4.3. Classification suivant la structure des matériaux composites.....	24
II.4.3.1. Monocouches	24
II.4.3.2. Stratifiés	24
II.4.3.3. Structures sandwiches	25
II.4.4. Classification suivant le type de matériau composite	26
II.4.4.1. Composites de grande diffusion.....	26
II.4.4.2. Composites de haute performance	27
II.5. Eléments constituant un matériau composite.....	27
II.5.1. Introduction.....	27
II.5.2. Matrice	27
II.5.2.1. Introduction	27

II.5.2.2. Résines thermodurcissables (TD).....	28
II.5.2.3. Résines thermoplastiques (TP).....	32
II.5.3. Charges	33
II.5.3.1. Charges augmentant la résistance mécanique	33
II.5.3.2. Charges ayant un rôle secondaire	33
II.5.4. Renforts (fibres et tissus)	33
II.5.4.1. Renfort en fibres discontinues	34
II.5.4.2. Renfort en fibres continus	34
II.5.4.3. Géométrie des renforts	35
II.5.4.4. Fibres de verres	35
II.5.4.5. Fibres de carbone.....	36
II.5.4.6. Fibres d'aramides	37
II.5.4.7. Fibres Naturelles	37
II.7. Conclusion	38
III. Comportement mécanique des structures sandwiches.....	39
III.1. Introduction	39
III.2. Définition d'un matériau sandwich	39
III.3. Eléments constituant une structure sandwich	40
III.3.1. Peaux d'une structure sandwich	40
III.3.2. Ame (cœur) d'une structure sandwich.....	41
III.4. Domaine d'utilisation des structures sandwiches.....	41
III.5. Comportement mécanique des structures sandwiches	42
III.6. Théorie des poutres sandwiches	42
III.6.1. Rigidité en flexion	43
III.6.2. Comportement des structures sandwiches en flexion.....	44
III.6.2.1. Flexion trois-points	44
III.6.2.2. Flexion quatre points.....	48
IV. Matériaux et méthodes d'élaboration	50
IV.1. Introduction	50
IV.2. Matériaux utilisés.....	50
IV.2.1. Le liège	50
IV.2.1.1. Présentation du liège aggloméré	50
IV.2.2. Résine époxy	51
IV.2.2.1. Définition de la résine MEDAPOXY STR.....	52
IV.2.2.2. Domaines d'application de la résine MEDAPOXY STR.....	52

IV.2.2.3. Caractéristiques de la résine MEDAPOXY STR	52
IV.2.2.4. Conditions d'utilisation de la Résine Epoxy	53
IV.2.3. Fibres de verre	53
IV.3. Méthodes d'élaboration.....	54
IV.3.1. Elaboration des éprouvettes de résine époxy	54
IV.3.2. Elaboration des stratifiés	55
IV.3.3. Elaboration des structures sandwichs.....	57
IV.3.3.1. Moulage au contact.....	57
IV.3.3.2. Préparation du renfort et du liège	57
IV.3.3.3. Préparation de mélange de résine	58
IV.3.3.4. Réalisation des structures sandwiches	58
IV.3.3.5. Démoulage des structures sandwiches.....	60
V. Caractérisation des structures composites élaborées.....	62
V.1. Méthodes de caractérisation	62
V.1.1. Essais sur le liège aggloméré.....	62
V.1.1.1. Analyse thermique	62
V.1.1.2. Essai d'absorption.....	62
V.1.1.3. Séchage en étuve.....	63
V.1.1.4. Essai de traction	63
V.1.2. Essais sur le matériau composite stratifié.....	64
V.1.2.1. Essai de traction	64
V.1.2.2. Essai de calcination.....	65
V.1.3. Essais sur les structures sandwiches	66
V.1.3.1. Essai de flexion trois points et quatre points.....	66
V.1.3.2. Essai de Compression perpendiculaire	68
V.1.3.3. Essai de traction perpendiculaire (essai d'arrachement).....	68
V.1.3.4. Essai de compression longitudinal avec et sans flambement.....	69
V.1.3.5. Essai de cisaillement	70
V.1.3.6. Analyse hygrothermique des structures sandwiches.....	70
V.2. Résultats et discussions	72
V.2.1. Résultats des essais sur le matériau de l'âme (liège).....	72
V.2.1.1. Analyse thermique	72
V.2.1.2. Pouvoir d'absorption d'eau	73
V.2.1.3. Séchage en étuve.....	75
V.2.1.4. Essai de traction sur le liège aggloméré.....	76

V.2.2. Résultats des essais sur le matériau composite stratifié.....	77
V.2.2.1. Essai de calcination	77
V.2.2.2. Essai de traction sur des éprouvettes en résine époxy	78
V.2.2.3. Essai de traction sur des éprouvettes en fibres de verre tissé	79
V.2.2.4. Essai de traction sur le stratifié	79
V.2.3. Résultats des essais sur les structures sandwiches.....	81
V.2.3.1. Essai de flexion trois points	81
V.2.3.2. Essai de flexion quatre points	85
V.2.3.3. Analyse des modes de rupture en flexion trois points.....	90
V.2.3.4. Analyse de mode de rupture en flexion quatre points.....	91
V.2.3.5. Essai de compression perpendiculaire	93
V.2.3.6. Essai de traction perpendiculaire (essai d'arrachement).....	98
V.2.3.7. Essai de cisaillement	102
V.2.3.8. Essai de compression sans flambement	104
V.2.3.9. Essai de compression avec flambement.....	110
Conclusion Générale et Perspectives	117
Références bibliographiques	120

Liste des figures

Figure 1.1. Représentation schématique de la section axiale du chêne-liège.....	4
Figure 1.2. Représentation schématique des assemblages des panneaux sandwichs :	12
Figure 1.3. Représentation photographique des panneaux sandwichs finis.....	13
Figure 1.4. Comportement mécanique des panneaux sandwichs	13
Figure 1.5. Comportement en flexion 3-points du sandwich SMS [0 ₄].....	16
Figure 1.6. Comportement en flexion 3-points du sandwich SMS [0/90 ₂ /0].....	17
Figure 2.7. Composition générale d'un matériau composite.....	21
Figure 2.8. Microstructure d'un matériau composite UD.....	21
Figure 2.9. Matériau composite UD	24
Figure 2.10. Un matériau composite stratifié	25
Figure 2.11. Matériau composite sandwich.....	26
Figure 2.12. Schéma de différents types de matériaux composites.....	26
Figure 2.13. Différentes familles de matrices.....	28
Figure 2.14. Les structures chimiques de DGEBA n=2, MHHPA, APTES et de TEOS	31
Figure 2.15. Les différents types de renfort de base.....	34
Figure 2.16. Les structures géométriques des composites :.....	35
Figure 2.17. À gauche fibre de verre tissé et à droite fibre de verre mat.....	36
Figure 2.18. Les fibres de carbone.	37
Figure 2.19. a) - fibre de jute, b) - le jute tissé.	37
Figure 2.20. La laine du mouton.....	38
Figure 2.21. Le coton.....	38
Figure 3.22. Matériau composite sandwich.....	40
Figure 3.23. Poutre sandwich sur deux appuis chargés au centre.	43
Figure 3.24. Flèche d'une poutre sandwich en flexion.....	44
Figure 3.25. Flexion trois-points	45
Figure 3.26. Répartition des contraintes de cisaillement.....	46
Figure 3.27. Déformation en cisaillement dans l'âme	47
Figure 3.28. Flexion 4 points.....	48
Figure 4.29. Lièges agglomérés de moyenne densité,	51
Figure 4.30. L'éprouvette de résine sous forme haltère.	54
Figure 4.31. Le moule utilisé pour la fabrication des stratifiés.	55
Figure 4.32. Elaboration du matériau composite stratifié.....	56
Figure 4.33. Dimensions de l'éprouvette pour essai de traction.....	57
Figure 4.34. Matériau composite sandwich : 1- Liège aggloméré ; 2- Fibres de	58
Figure 4.35. Les trois séries de structures sandwichs	60

Figure 4.36. La presse hydraulique SIMI.....	60
Figure 4.37. Les structures sandwichs après démoulage.....	61
Figure 4.38. Eprouvettes découpées suivant la norme AFNOR NF T 54-606.....	61
Figure 5.39. Mesure de la conductivité thermique du liège à l'aide d'un CT mètre.....	62
Figure 5.40. Essai d'absorption du liège dans.....	63
Figure 5.41. Essai de traction sur échantillon de liège.....	63
Figure 5.42. La machine universelle.....	64
Figure 5.43. Eprouvette avant essai.....	64
Figure 5.44. Eprouvette après essai.....	64
Figure 5.45. Matériau composite après essai de calcination.....	65
Figure 5.46. Machine universelle Zwick/Rolle ZO10 (essai de flexion 3 points).....	66
Figure 5.47. Machine universelle Zwick/Rolle ZO10 (essai de flexion 4 points).....	66
Figure 5.48. Dispositif pour l'essais de compression perpendiculaire.....	68
Figure 5.49. Essai de traction perpendiculaire.....	69
Figure 5.50. Essai de compression ; 1 : avec flambement et 2 : sans flambement.....	70
Figure 5.51. Dispositif pour l'essai de cisaillement.....	70
Figure 5.52. Chauffage en étuve des structures sandwichs.....	71
Figure 5.53. Détermination du pouvoir d'absorption d'eau des structures sandwichs.....	71
Figure 5.54. La conductivité thermique du liège aggloméré.....	72
Figure 5.55. La conductivité thermique du composite stratifié.....	72
Figure 5.56. Egouttage des échantillons pendant 10 minutes.....	74
Figure 5.57. Immersion partielle.....	74
Figure 5.58. Photo MEB montrant la porosité dans le liège aggloméré.....	75
Figure 5.59. Histogramme du pouvoir d'absorption d'eau des lièges et des sandwichs.....	75
Figure 5.60. Variation de la masse du liège en fonction du temps de chauffage à 100°C.....	76
Figure 5.61. Comportement en traction du liège aggloméré.....	77
Figure 5.62. Comportement en traction de la résine époxy.....	78
Figure 5.63. Comportement en traction de la fibre de verre de type tissé.....	79
Figure 5.64. Comportement en traction des stratifiés (la variante à gauche (six plis).....	79
Figure 5.65. Montage d'essai de flexion trois points.....	81
Figure 5.66. Comportement en flexion 3 points des structures sandwichs « S5 ».....	82
Figure 5.67. Comportement en flexion 3 points des structures sandwichs « S10 ».....	83
Figure 5.68. Comportement en flexion 3 points des structures sandwichs « S20 ».....	84
Figure 5.69. Montage de l'essai de flexion trois points.....	85
Figure 5.70. Comportement en flexion 4 points des structures sandwichs « S5 ».....	86
Figure 5.71. Comportement en flexion 4 points des structures sandwichs « S10 ».....	87
Figure 5.72. Comportement en flexion 4 points des structures sandwichs « S20 ».....	88

Figure 5.73. Le mode de rupture en flexion trois points des structures sandwiches	90
Figure 5.74. Modes de rupture en flexion quatre points des structures sandwiches.....	92
Figure 5.75. Essai de compression perpendiculaire.....	93
Figure 5.76. Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwiches « S5 ».....	94
Figure 5.77. Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwiches « S10 ».....	95
Figure 5.78. Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwiches « S20 ».....	96
Figure 5.79. Comportement en traction perpendiculaire des structures sandwiches « S5 ».....	98
Figure 5.80. Comportement en traction perpendiculaire des structures sandwiches « S10 ».....	99
Figure 5.81. Comportement en traction perpendiculaire des structures sandwiches « S20 ».....	100
Figure 5.82. Rupture de l'éprouvette lors de l'essai d'arrachement.	101
Figure 5.83. Comportement en cisaillement des structures sandwiches.....	102
Figure 5.84. Evolution d'une structure sandwich sous l'effet de l'effort de cisaillement.	104
Figure 5.85. Histogramme des contraintes maximales en compression sans flambement	105
Figure 5.86. Histogramme des déformations en compression sans flambement.....	106
Figure 5.87. Mode de déformation de la structure sandwich après essai	106
Figure 5.88. Comportement en compression sans flambement des structures sandwiches « S5 »....	107
Figure 5.89. Comportement en compression sans flambement des structures sandwiches « S10 »...	108
Figure 5.90. Comportement en compression sans flambement des structures sandwiches « S20 »...	109
Figure 5.91. Histogramme des contraintes maximales en compression avec flambement.....	111
Figure 5.92. Histogramme des déformations en compression avec flambement	111
Figure 5.93. Mode de déformation de la structure sandwich après essai de compression longitudinal avec flambement.....	112
Figure 5.94. Comportement en compression avec flambement des structures sandwiches « S5 »...	113
Figure 5.95. Comportement en compression avec flambement des structures sandwiches « S10 ». .	114
Figure 5.96. Comportement en compression avec flambement des structures sandwiches « S20 ». .	115

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Analyse quantitative de la composition chimique du liège	5
Tableau 1.2. Classification et appellation des sandwichs en fonction	6
Tableau 1.3. Résultats de l'essai de flexion trois points pour les différents sandwichs	7
Tableau 1.4. Résultats d'essais de flexion quatre points pour les différents sandwiches.....	7
Tableau 1.5. Dimensions des éprouvettes (Série de 10, 20 et 40).....	9
Tableau 1.6. Caractéristiques déduites des essais de flexion 3 points.....	10
Tableau 1.7. Caractéristiques déduites des essais de flexion quatre points.....	10
Tableau 1.8. Propriétés mécaniques des constituants utilisés.	11
Tableau 1.9. Les propriétés de la résine STR.....	11
Tableau 1.10. Caractéristiques mécaniques des panneaux sandwichs SN20 et SN40	13
Tableau 1.11. Différentes variantes des sandwichs et mortiers témoins.	14
Tableau 1.12. Résistance à la flexion des différentes variantes sandwichs à 28 jours	15
Tableau 1.13. Résultats des essais statiques des sandwichs SMS [0 ₄]	17
Tableau 1.14. Résultats des essais statiques des sandwichs SMS [0/90 ₂ /0].....	17
Tableau 1.15. Résistance à la compression des différentes variantes des sandwiches.....	18
Tableau 1.16. Dimensions normalisées des différents échantillons de sandwichs.....	18
Tableau 1.17. Appellation des sandwichs en fonction de la masse volumique du liège	19
Tableau 2.18. Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables.....	29
Tableau 2.19. Les caractéristiques physico-mécaniques des résines époxydes.	31
Tableau 2.20. Composition chimique des différents types de fibres de verre	36
Tableau 4.21. Caractéristiques de liège aggloméré blanc de moyenne densité produit	51
Tableau 4.22. Caractéristiques de la résine MEDAPOXY STR	53
Tableau 4.23. Les différentes familles de fibres de renforcement (ASTM D578).....	53
Tableau 4.24. Propriétés mécaniques de la fibre du verre.....	54
Tableau 4.25. Les dimensions des éprouvettes haltère selon la norme NF EN ISO 527-4	55
Tableau 4.26. Dimensions des éprouvettes du stratifié.	56
Tableau 5.27. Les résultats des essais de conductivité thermique pour le liège et le stratifié.	72
Tableau 5.28. Le pouvoir d'absorption d'eau du liège et des structures sandwichs.	73
Tableau 5.29. Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction	77
Tableau 5.30. Caractéristiques mécaniques de la résine époxy.	78
Tableau 5.31. Caractéristiques mécaniques à la traction du stratifié verre / époxy (variante 01).	80
Tableau 5.32. Caractéristiques mécaniques à la traction du stratifié verre/ époxy (variante 02).	80
Tableau 5.33. Les dimensions des éprouvettes et les résultats des essais mécaniques	89
Tableau 5.34. Les modes de rupture des différentes structures sandwichs.	91
Tableau 5.35. Caractéristiques mécaniques en compression perpendiculaire des sandwiches.	93

Tableau 5.36. Epaisseur des structures sandwiches S5, S10 et S20.....	97
Tableau 5.37. Les propriétés mécaniques des différentes structures sandwichs en cisaillement.....	103
Tableau 5.38. Les caractéristiques mécaniques en compression longitudinal sans flambement.....	104
Tableau 5.39. Les modes de rupture des structures sandwiches	110
Tableau 5.40. Les caractéristiques mécaniques en compression longitudinal avec flambement.	110
Tableau 5.41. Les modes de rupture des structures sandwiches	112

Introduction Générale

Introduction Générale

L'augmentation de la demande de nouveaux matériaux a favorisé la croissance de la technologie des matériaux composites sandwichs, qui sont utilisés pour rigidifier diverses structures composites telles que les coques de bateaux, les structures de trains, les panneaux d'aéronefs et l'industrie du bâtiment.

Les matériaux composites à structure sandwich sont constitués de deux peaux en matériaux composites entre lesquelles est collé un noyau à faible densité permettant d'améliorer les propriétés du matériau en flexion, tout en conservant un poids très faible.

Les matériaux de base couramment utilisés pour le noyau des matériaux sandwichs sont les nids d'abeilles, les mousses et le bois de balsa. Cependant, les développements récents ont abouti à de nouvelles alternatives telles que les matériaux naturels ayant une morphologie cellulaire.

Le liège aggloméré peut être considéré comme une alternative pour l'âme du matériau sandwich, puisque le liège est un matériau cellulaire avec quelques propriétés remarquables, comme la tolérance élevée de dommages aux charges d'impact, ainsi qu'une bonne isolation thermique et acoustique. En outre, le liège est un matériau naturel renouvelable, facilement réutilisable.

L'objectif principal de notre travail est la mise en œuvre d'une nouvelle structure sandwich multicouches, qui se compose de liège aggloméré (matériau de l'âme) et des couches de stratifié à base d'une résine époxy renforcée par des fibres de verre, comme matériaux de peaux. Dans un premier lieu, les matériaux constituant la structure sandwich ont été caractérisés par des essais physico-mécaniques. La seconde étape consiste à élaborer la structure sandwich. La dernière étape est axée sur la caractérisation des structures sandwichs obtenues par des essais physico-mécaniques.

La présente thèse est organisée sous forme de cinq chapitres, le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les structures sandwichs, dans lequel nous avons mis l'accent sur la morphologie et la composition chimique du matériau de l'âme de la structure sandwich (le liège). Par la suite quelques travaux de recherche sur les matériaux composites sandwichs ont été présentés.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons une définition des matériaux composites, la classification des matériaux composites et les éléments constituant un matériau composite.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du comportement mécanique des structures sandwichs, dans lequel nous avons présenté les éléments constituant les structures sandwichs, le domaine d'utilisation des structures sandwichs et en fin le comportement mécanique en flexion trois et quatre points a été présenté.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude. Premièrement, nous avons présenté le matériau de l'âme qui est le liège aggloméré ; par la suite, nous avons présenté les matériaux nécessaires à la réalisation des peaux de la structure sandwich, à savoir, la résine époxy et la fibre de verre. Finalement, Les méthodes d'élaboration des matériaux composites stratifiés et des structures sandwichs seront ainsi présentées.

Le dernier chapitre sera consacré aux méthodes de caractérisation des structures sandwichs ainsi qu'à la présentation et l'interprétation des différents résultats obtenus sur les structures sandwichs et leurs constituants.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique sur les structures sandwiches

I. Synthèse bibliographique sur les structures sandwiches

I.1. Matériau de l'âme (liège)

I.1.1. Introduction

Le liège est l'écorce du chêne, qui est périodiquement récoltée de l'arbre, habituellement, tous les 9-12 années, selon la région de culture. *Quercus suber* L. est le nom botanique d'un chêne à croissance lente, à feuilles persistantes qui ne fleurit que dans des régions spécifiques de la Méditerranée (Portugal, Espagne, Sud de la France, partie de l'Italie, de l'Afrique du Nord) et de la Chine [1,7]. Cet arbre nécessite beaucoup de soleil, une combinaison très inhabituelle de faibles précipitations et une humidité légèrement élevée. L'Europe possède environ 60% de la superficie totale de production (les forêts de liège) et produit plus de 80% du liège mondial. Le Portugal qui est le principal producteur de liège, traite environ les trois quarts de tout le liège. La qualité et l'épaisseur de l'écorce varient en fonction des conditions de croissance spécifiques d'un arbre.

Notre objectif, dans ce chapitre, est de présenter brièvement l'historique et les résultats de quelques travaux de recherches réalisés dans le contexte de notre étude.

I.2. Travaux réalisés sur le matériau liège

I.2.1. Morphologie du liège

Le liège a une capacité remarquable à créer du tissu subéreux à partir de son écorce interne. Ce tissu, formé spécifiquement par le phellogène du chêne-liège (le tissu responsable de la formation de nouvelles cellules), tire son nom du latin *suber* (liège).

Le cycle de vie du chêne-liège produit trois qualités de tissu subéreux, à savoir, le liège vierge ; reproduction du liège du deuxième décapage et le liège de reproduction des bandes suivantes.

Le liège agit comme une barrière entre l'atmosphère, le cortex et le tronc du chêne liège. Les lenticelles servent de canaux de transfert de masse pour l'eau et les gaz [8]. Le tissu phellogène du chêne-liège est actif tout au long de la vie de l'arbre. Les membranes cellulaires formées sont très minces, dépourvues de lignes de communication d'une cellule à l'autre et sont principalement formées par la subérine, la lignine et la cellulose [9-12].

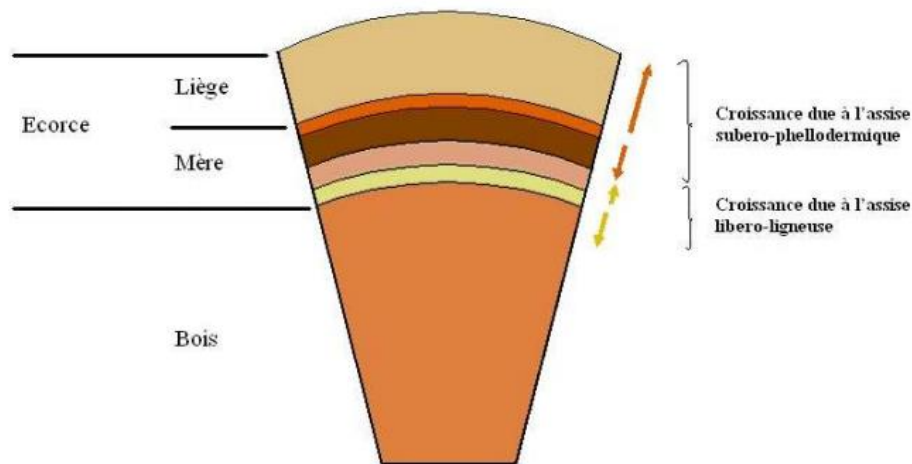


Figure 1.1. Représentation schématique de la section axiale du chêne-liège [13].

Les effets de l'extraction du liège sur l'arbre incluent une perte accrue d'eau de la surface exposée, ce qui peut entraîner une diminution de l'activité stomatique [4-7-8] (réduction de l'activité biologique de l'arbre) et la mort des tissus d'écorce interne, nouvellement exposés, avec formation subséquente d'un périderme traumatique à partir d'environ 30 jours après l'extraction du liège. La croissance des arbres (bois) est également affectée par l'extraction du liège avec une diminution considérable de la largeur des anneaux et une anatomie perturbée. [5-14]

Dans le chêne-liège, la croissance radiale et axiale commence simultanément au début du printemps. La chute des feuilles se produit au début du printemps et à nouveau en automne si les conditions environnementales le permettent [15-16-17]. L'extraction du liège se fait lorsque la croissance est la plus élevée (été), lorsque le phellogène est en pleine activité méristématique permettant une séparation facile des couches de liège.

I.2.2. Composition chimique du liège

La composition chimique du liège a été largement étudiée et dépend de plusieurs facteurs, tels que l'origine géographique, les conditions climatiques et du sol, l'origine génétique, les dimensions des arbres, l'âge (vierge ou de reproduction) et des conditions de croissance. Le liège de *Quercus suber* L. a des propriétés particulières telles qu'une élasticité élevée et une faible perméabilité ; elles résultent, au moins partiellement, de sa composition chimique spécifique (et plus particulièrement de celle de la subérine) [18-19-20-21].

La structure cellulaire de la paroi du liège se compose d'une lamelle moyenne mince, riche en lignine (paroi primaire interne), d'une paroi secondaire épaisse composée de lamelles alternées de subérine, de cire et d'une troisième paroi mince de polysaccharides. Certaines études suggèrent que la paroi secondaire est lignifiée, donc elle n'est pas constituée exclusivement de subérine et de cires [22].

De ces composants de paroi cellulaire, la subérine est la plus abondante (environ 40%), la lignine correspond à 22%, les polysaccharides à 18% et les extractibles à 15% [18-19-20-21-22].

Le tableau I.1 résume les compositions rapportées dans la littérature [12,23]. On constate qu'il existe des différences de composition associées à la formation du liège. Le liège vierge contient en moyenne plus de subérine que le liège qui a subi une transformation après l'extraction initiale. Le liège vierge a également une plus grande teneur en extractible [23].

Tableau 1.1. Analyse quantitative de la composition chimique du liège.

Constituants en %	Liège vierge		Liège transformer	
	Caldas [12]	Pereira [23]	Caldas [12]	Pereira [23]
Subérine	45	45	48	33,5
Lignine	27	21	29	26
Polysaccharides (cellulose et hémicellulose)	12	13	12	25
Extractibles	10	19	8,5	13
Cendre	5	1,2	2,1	2,5
Autres	/	0,8	/	/

La diminution de la teneur en subérine et en lignine dans le liège régénéré, peut être liée à une diminution de l'épaisseur de la paroi secondaire, car ces composants comprennent des couches alternées dans la paroi secondaire des cellules de liège. D'autres recherches seront nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Il convient également de noter que les échantillons de reproduction étudiés ont été obtenus à partir d'arbres sur lesquels le nombre d'extractions de liège déjà effectuées, était inconnu ; très probablement, le nombre différait d'un échantillon à l'autre. Une relation entre la composition chimique et le nombre d'extractions de liège pourrait donc expliquer les variations observées. Les conditions du sol et du climat influenceront également la biogenèse des composants individuels du liège et des études supplémentaires sur les arbres cultivés dans différents environnements sont recommandées [24,25,26].

I.3. Travaux réalisés sur les matériaux composites sandwichs

I.3.1. Essais de flexion

➤ BOUZIT Fatima et al en 2014 [27] ont étudié les caractérisations mécaniques, en statique et en fatigue, des panneaux sandwichs à base de renforts naturels. La caractérisation des échantillons sandwichs est effectuée à travers des essais de flexion 3 et 4 points suivant la norme AFNOR NF T54-606 (1987).

Les plaques sandwiches ont été élaborées au sein de l'URMPE. Elles sont constituées de liège aggloméré blanc d'épaisseur 10 mm pour l'âme, et pour les peaux, ils ont utilisé des nappes en fibres naturelles (fibres de lin, de jute et de sisal). Les plaques de liège ont été découpées suivant les dimensions 300x300mm (NF T 57-105).

Pour les peaux, les nappes qui ont été utilisées, sont unidirectionnelles (sens chaîne).

Le tableau suivant donne la classification et l'appellation des différents types des sandwichs.

Tableau 1.2. Classification et appellation des sandwichs en fonction des types de renforts. [27]

Peau	Liège	Sandwich
Jute/époxy	C260-10	SD-J
Sisal/époxy	C260-10	SD-S
Lin/époxy	C260-10	SD-L
Jute-sisal/époxy	C260-10	SD-J/S
Jute-lin/époxy	C260-10	SD-J/L

a- Essai de flexion trois points

Les essais de flexion 3 points sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle ZO10, dotée d'un capteur de force de capacité 10 kN. La vitesse d'avance est de 2mm/mn.

D'après les Résultats obtenus, ils ont remarqué que les sandwichs dont les peaux composées de deux nappes de différentes natures (jute-sisal, jute-lin) donnent des charges maximales supérieures par rapport à celles des sandwichs dont les peaux sont constituées d'une seule nappe de renfort.

Parmi les trois types de renforts utilisés, le SD-S donne la charge à la rupture la plus faible (environ 416N) par rapport aux deux autres échantillons (jute et lin).

La combinaison de sisal et le jute donnent un sandwich qui peut supporter une charge maximale de 743N pour un allongement de 15mm. Pour le SD-L, la charge maximale atteinte est de 579N, c'est-à-dire, 39% plus grande de celle de SD-S, par conséquent, le SD-J/L possède la charge à la rupture la plus grande (environ 985N pour un allongement de 16mm). [27]

Le tableau 1.3 donne les différentes valeurs obtenues à partir de l'essai de flexion 3 points pour les différents sandwichs.

Tableau 1.3. Résultats de l'essai de flexion trois points pour les différents sandwichs. [27]

Sandwich	h (mm)	e _a (mm)	e _s (mm)	b (mm)	d ₁ (mm)	P ₁ (N)	W ₁ (mm)	σ ₁ (MPa)
SD-J	13.09	10	2.07	41.15	250	620	14.5	39.4
SD-S	13.87	10	1.65	42.64	250	479	10.23	-
SD-L	1.43	10	2.47	43.25	250	579	13.7	-
SD-J/S	16.31	10	2.51	42.4	250	743	15.1	33
SD-J/L	17	10	2.87	24.86	250	985	16.1	37.04

Avec :

d₁ : Distance entre appuis (mm) ;

P₁ : Charge maximale (N) ;

W₁ : Allongement à la charge maximale (mm) ;

σ₁ : Contrainte (MPa).

b- Essai de flexion quatre points

Les essais de flexion quatre points sont effectués sur la machine utilisée pour les essais de flexion trois points. Avec les mêmes conditions expérimentales.

Le SD-S présente toujours la charge la plus faible dans la série des sandwichs testés ; cette charge est de 922 N. Pour le SD-L, la charge maximale est de 1030N, c'est-à-dire, une augmentation de 11% seulement par rapport à la charge maximale atteinte par le SDS, mais pour le SD-J/L supporte une charge maximale de 38% plus grande par rapport à celle de SD-J/S. [27]

Les résultats de l'essai de flexion quatre points sont représentés dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4. Résultats d'essais de flexion quatre points pour les différents sandwichs [27].

Sandwich	h (mm)	e _a (mm)	e _s (mm)	b (mm)	d ₂ (mm)	P ₂ (N)	W ₂ (mm)	σ ₂ (MPa)	τ ₂ (MPa)
SD-J	12.09	10	2.1	40.92	250	991	16.6	32.63	1.09
SD-S	13.73	10	1.7	43.2	250	924	11.9	-	0.9
SD-L	15.54	10	2.36	43.39	250	1030	12.4	-	0.92
SD-J/S	16.52	10	2.58	42.03	250	1263	18.64	-	1.13
SD-J/L	17.53	10	3.05	42.51	250	1750	18.2	-	1.49

➤ En 2009, une autre étude a été faite par ARBAOUI Jamal Eddine [28] sur le sujet d'Étude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches. Il a travaillé sur les matériaux sandwichs multicouches à âme en nid d'abeilles polypropylène. L'assemblage par collage de ce matériau est possible grâce au feutre polyester non tissé qui est intégré à la surface du nid d'abeilles. Les peaux sont des stratifiés composites constitués d'un complexe roving/mât en fibres de verre (T800/M300) et d'une résine polyester iso phtalique. L'épaisseur des peaux est de 1 mm. Le pli composite intermédiaire (PCI) entre les différentes couches du matériau d'âme résulte d'une formulation spécifique. L'épaisseur du PCI est de 0,05 mm.

- Les structures sandwichs multicouches Ont été nommées de la manière suivante

- **Série de 10**

M10/1 : correspond un empilement d'un nida de 10 mm.

M10/2 : correspond un empilement de deux nidas de 5mm.

- **Série de 20**

M20/1 : correspond un empilement d'un nida de 20 mm.

M20/2 : correspond un empilement de deux nidas de 10 mm.

M20/3 : correspond un empilement de deux nidas de 5 mm et un nida de 10 mm positionné au milieu.

M20/4 : correspond un empilement de quatre nidas de 5 mm.

- **Série de 40**

M40/1 : correspond un empilement d'un nida de 40 mm.

M40/2 : correspond un empilement de deux nidas de 20 mm.

M40/3 : correspond un empilement de deux nidas de 15 mm et un nida de 10 mm positionné au milieu.

M40/4 : correspond un empilement de quatre nidas de 10 mm.

- La machine est instrumentée en capteur de force avec une cellule à jauge de contrainte de 10 KN.
- La vitesse de chargement recommandée pour ce type de panneau est de 10 mm/min.

Les principales dimensions des matériaux sandwichs multicouches sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1.5. Dimensions des éprouvettes (Série de 10, 20 et 40) [28].

Série (mm)	Sandwichs Multicouches	b (mm)	h (mm)	t_c (mm)	t_f (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L (mm)
10	M10/1	35	12	10	1	120	300	440
	M10/2	35	12.05	10.05	1	120	300	440
20	M20/1	35	22	20	1	120	300	440
	M20/2	35	22.06	20.05	1	120	300	440
	M20/3	35	22.1	20.1	1	120	300	440
	M20/4	35	22.15	20.15	1	120	300	440
40	M40/1	35	42	40	1	120	300	440
	M40/2	35	42.05	40.05	1	120	300	440
	M40/3	35	42.1	40.1	1	120	300	440
	M40/4	35	42.15	40.15	1	120	300	440

Avec :

L , L_1 , L_2 , b , t_f , t_c et h sont respectivement la longueur totale, la distance entre les appuis intérieurs, la distance entre les appuis extérieurs, la largeur, l'épaisseur de peau, l'épaisseur de la couche intermédiaire et l'épaisseur des éprouvettes. t_c est l'épaisseur de cœur (âme) du sandwich.

a- Essai de flexion 3 points

Les structures sandwichs quadruple (trois PCI entre les âmes) sont les plus rigides et possèdent la charge à la rupture la plus grande par rapport à ceux des sandwichs triple (deux PCI). Les structures composites des séries 10, 20 et 40 avec une âme bicouches peuvent supporter une charge supérieure de 20 à 33 %. Par contre, une âme quadruple peut supporter une charge de 45 à 70% (série 20 et 40) par rapport à celle d'une structure à âme monocouche. La charge supportée par des structures sandwichs double couches (10+10) est équivalente à celle supportée par une structure à âme monocouche de 40 mm. Cette technique d'assemblage permet de réduire l'épaisseur des structures composites d'un facteur 2 tout en conservant une masse identique. Par exemple, la masse est de $4,8 \text{ kg m}^{-2}$ pour une structure bicouches de 20 mm, alors que la masse d'une structure monocouche de 40 mm est de $5,2 \text{ kg/m}^2$.

Les valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques déduites des essais de flexion trois points sont reportées dans le tableau 1.6. Ils ont constaté évidemment que la contrainte en flexion, la contrainte en cisaillement et la rigidité en flexion augmentent avec l'accroissement du nombre de couches d'âmes. [28]

Tableau 1.6. Caractéristiques déduites des essais de flexion 3 points [28]

Séries (mm)	Sandwich multicouches	Charge maximale (N)	Contrainte en flexion (MPa)	Contrainte en cisaillement (MPa)	Rigidité en flexion apparente (N.mm ²)
10	M10/1	357.5	58	0.46	195.10 10 ⁵
	M10/2	477.1	74.1	0.59	245.15 10 ⁵
20	M20/1	480	49	0.32	526.66 10 ⁵
	M20/2	607	60.5	0.4	604.81 10 ⁵
	M20/3	659.1	64.2	0.42	635.74 10 ⁵
	M20/4	698	66.5	0.4	673.43 10 ⁵
40	M40/1	692.4	30.2	0.24	592.9 10 ⁵
	M40/2	840.7	36.2	0.28	693.26 10 ⁵
	M40/3	923	39.2	0.31	726.56 10 ⁵
	M40/4	1180.8	49.6	0.39	829.42 10 ⁵

b- Essai de flexion 4 points

Le tableau 1.7 représente les caractéristiques mécaniques déduites des essais de flexion quatre points.

Tableau 1.7. Caractéristiques déduites des essais de flexion quatre points [28].

Sandwich multicouches	$(P/\delta)_{\text{moy}}$ (N)	Contrainte en flexion σ_f [MPa]	Contrainte en cisaillement τ_c [MPa]	Rigidité en flexion apparente [N.mm ²]
M10/1	62	87.1	1	225.95 10 ⁵
M10/2	85	132.7	1.5	309.95 10 ⁵
M20/1	130	64	0.7	473.85 10 ⁵
M20/2	136	90.3	1	495.70 10 ⁵
M20/3	200	113.6	1.3	729.00 10 ⁵
M20/4	205	129.2	1.4	747.00 10 ⁵
M40/1	182	60.3	0.7	663.50 10 ⁵
M40/2	220	66.8	0.7	804.00 10 ⁵
M40/3	259	70.5	0.8	944.00 10 ⁵
M40/4	280	72.2	0.8	1020.50 10 ⁵

D'après ces résultats, ils ont conclu que la rigidité en flexion du sandwich croît avec l'augmentation de l'épaisseur et l'accroissement du nombre de couche d'âme. La charge à la rupture augmente avec l'épaisseur et l'accroissement des couches d'âme.

Elle est plus élevée dans le cas du sandwich quadruple couches de la série 40.

➤ En 2012, une autre étude a été faite par K.AIT TAHAR, K. SAIDANI et H. AIT AIDER [29] sur le thème d'analyse expérimentale d'une structure composite de type sandwich. Leur étude porte sur la caractérisation expérimentale sous flexion 3 points d'un nouveau matériau composite sandwich à âme combinée. Dans cette étude ils ont proposé une sandwich qui est constitué de deux peaux armées de grilles métalliques imprégnées d'une matrice époxyde de type STR et d'une âme hybride composée de carton dont la cannelure présente une forme ondulée et de tissu.

Le renfort métallique utilisé dans le stratifié est une grille de fils d'acier de diamètre 0,17 mm. Sa résistance à la rupture est de 512,9 MPa.

L'âme combinée est constituée de carton ondulé, qui peut être décrit comme un assemblage rigide de feuilles planes. Ce carton ondulé et enveloppé d'un tissu, ce dernier est composé de fils tissés de coton et de lin [29]. Le tableau 1.8 présente les propriétés mécaniques des constituants utilisés.

Tableau 1.8. Propriétés mécaniques des constituants utilisés. [29]

Constituant	Densité	E [GPa]	σ Elastique [MPa]	A %
Tissu (Tissu)	1,5-1.6	5,5-12,6	287-597	7-8
Carton	1,45	19-21	350-700	3-7

Le tableau 1.9 présente les propriétés de la résine STR.

Tableau 1.9. Les propriétés de la résine STR [29].

Constituant	Densité	Rm compression [MPa]	Rm traction par flexion [MPa]
Résine Medapoxy STR	13,5±0,05	>70	25

Ils ont utilisé trois types de matériaux sandwichs qui sont les suivants :

- M-2J-1C : consiste en un empilement de 7 plis alternés de couches de métal de 3mm d'épaisseur, de deux couches de Tissu (jean) de 1mm d'épaisseur chacune et d'une couche de carton de 4mm d'épaisseur.
- M-4J-1C : consiste en un empilement de 7 plis alternés de couches de métal de 3mm d'épaisseur, de 4 couches de Tissu (jean) de 1mm d'épaisseur chacune et d'une couche de carton de 4mm d'épaisseur.
- M-3J-2C : consiste en un empilement de 7 plis alternés de couches de métal de 3mm d'épaisseur, de 3 couches de Tissu (jean) de 1mm d'épaisseur chacune et deux couches de carton de 4mm d'épaisseur chacune.

Le collage est toujours assuré par la résine STR.

D'après une série d'essais mécaniques en flexion, ils ont conclu que le sandwich à âme constitué d'un seul carton, enveloppé du tissu, possède une meilleure limite élastique comparativement au sandwich composé de deux empilements de couches de carton. En effet, le carton ondulé rend le sandwich plus fragile. Comparativement au sandwich traditionnel à âme pleine en polystyrène, le sandwich à âme combinée présente des résistances meilleures. Enfin, ces résultats préliminaires mettent en exergue l'influence de la séquence d'empilement carton tissu, sur les résistances mécaniques.

➤ En 2014, une autre étude faite par LAKREB NADIA [30] sur le thème Elaboration, caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich multicouche à base de liège et bois de déroulage. Deux types de panneaux sandwichs ont été fabriqués, vingt à base de liège aggloméré noir et vingt à base de liège aggloméré blanc.

- SN40 : une âme de 40 mm d'épaisseur en liège aggloméré expansé noir entre deux couches extérieures de placage de bois d'épaisseur de 1.5 mm.
- SN20 : un noyau de deux couches de liège aggloméré noir d'épaisseur de 20 mm séparé par une couche intermédiaire de placage de bois, entre deux couches de placage de bois.
- SB40 : une âme de 40 mm d'épaisseur en liège aggloméré entre deux couches extérieures de placage de bois.
- SB20 : un noyau de deux couches de 20 mm d'épaisseur de liège aggloméré blanc séparé par une couche intermédiaire de placage de bois, entre deux couches de placage de bois.
- SB15 : un noyau de deux couches de 15 mm d'épaisseur de liège aggloméré blanc et une couche de 10 mm d'épaisseur en liège aggloméré blanc dans le milieu, séparé par deux couches de placage de bois et de deux couches extérieures de placage de bois.
- SB10 : un noyau de quatre couches de 10 mm d'épaisseur, de liège aggloméré séparé par trois couches de placage de bois et de deux couches extérieures de placage de bois. [30]

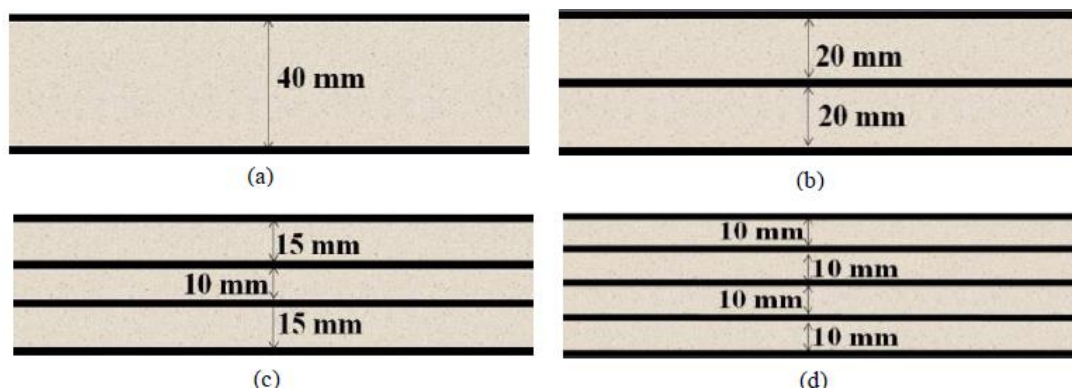


Figure 1.2. Représentation schématique des assemblages des panneaux sandwichs : (a) SN40 ou SB40, (b) SN20 ou SB20, (c) SB15 ou SN15 et (d) SB10 ou SN10. [30]

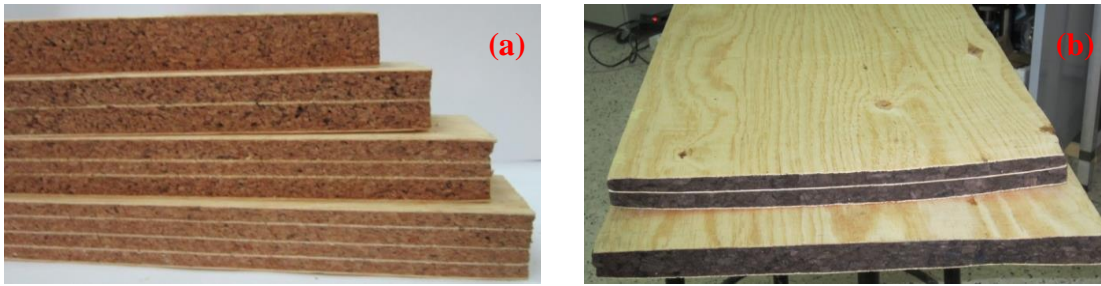


Figure 1.3. Représentation photographique des panneaux sandwichs finis : (a) panneaux sandwichs à base de liège aggloméré blanc, (b) panneaux sandwichs à base de liège expansé. [30]

- **Essai de flexion trois et quatre points**

Les essais ont porté sur la détermination des modules de rigidité en flexion (D), cisaillement en flexion (N) et cisaillement de l'âme (G_a). Pour les deux types de panneaux sandwichs (SN20 et SN40). Avec une vitesse de 2.25 mm/min. les résultats sont représentés sur la figures 1.4 et le tableau 1.10.

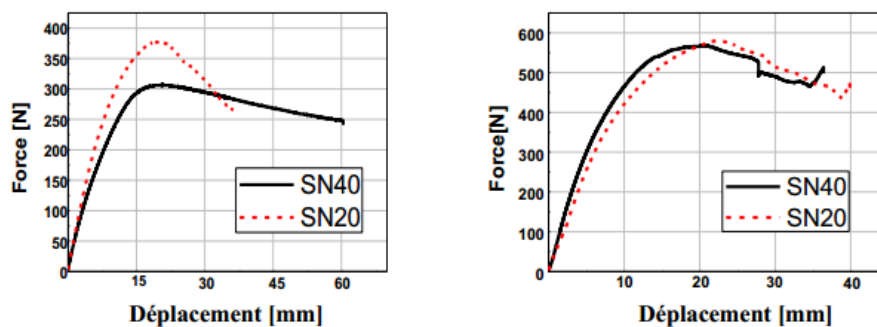


Figure 1.4. Comportement mécanique des panneaux sandwichs SN20 et SN40 sous : flexion 3 points (à gauche) et flexion 4 points (à droite) [30].

Le tableau 1.10 représente les Caractéristiques mécaniques des panneaux sandwichs SN20 et SN40.

Tableau 1.10. Caractéristiques mécaniques des panneaux sandwichs SN20 et SN40. [30]

Panneaux sandwichs	σ_3 [MPa]	σ_4 [MPa]	D [N/mm ²]	N [kN]	G_a [N/mm ²]
SN20	14.85	12.99	58.2×10^9	173.5	41.15
SN40	6.71	6.16	77.3×10^9	51.2	13.98

Avec la contrainte de flexion trois et quatre points (σ_3 , σ_4).

D'après la figure 1.4. Ils ont distingué qu'il existait 3 phases principales, à savoir, une première phase correspondant à une augmentation linéaire de la charge appliquée avec le déplacement, suivie d'une seconde phase où le comportement est non linéaire et où la charge maximale est atteinte, et une diminution de la dernière charge jusqu'à la rupture de l'échantillon.

L'intégration d'une couche intermédiaire de matériau en bois dans la structure composite (SN20) ne modifie pas le comportement général en flexion par rapport à une monocouche du matériau de base (SN40), bien qu'elle augmente la rigidité et la résistance à la flexion. Les résultats ont montré que les panneaux sandwichs SN20 étaient beaucoup plus résistants que les panneaux sandwichs SN40 (Tableau 1.10). [30].

➤ En 2014, une autre étude faite par BENFADEL Karima [31] sur le thème : Élaboration et caractérisation de panneaux sandwichs à matrice cimentaire destinés à la construction. Les matières premières suivantes ont été utilisées dans le cadre de ce travail :

1. Ciment CEM II/B 32.5R de Lafarge Algérie
2. Sable gros laver provenance carrière Tazmalt W-Bejaia.
3. Sable fin (sable de dune) de correction provenant de Boussaâda.
4. Des billes et feuilles de polystyrène provenance SARL Polystyrène des Oasis.
5. Fibres de verre sous forme de grille.
6. Adjuvant Médacel T85.

Les différents sandwichs utilisés dans cette étude sont nommés comme suit :

N plis / N plis / N plis % M (% M : le pourcentage de dosage volumique de la matrice)

Le tableau 1.11 résume les différentes variantes des sandwichs.

Tableau 1.11. Différentes variantes des sandwichs et mortiers témoins. [31]

	Nombre de plis	1 ^{ere} composition 30% Matrice	2 ^{eme} composition 40% Matrice	3 ^{eme} composition 50% Matrice
01	00	T 30%M sandwich	T 40%M sandwich	T 50%M sandwich
02	02	1/1 30%M sandwich	1/1 40%M sandwich	1/1 50%M sandwich
03	04	2/2 30%M sandwich	2/2 40%M sandwich	2/2 50%M sandwich
04	06	3/3 30%M sandwich	3/3 40%M sandwich	3/3 50%M sandwich
Mortiers témoins				
01	00	Sandwich témoin	(S/C=3, E/C=0.5 + feuille de 40mm polystyrène)	

a- Résistance à la flexion

L'essai de flexion 3 points a été réalisé selon la norme NF P18 - 407 (NA 428). Les essais ont été effectués sur une machine de type Zwick équipée d'un capteur de force de 100 KN ou 3000 KN. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 1.12.

Tableau 1.12. Résistance à la flexion des différentes variantes sandwichs à 28 jours d'âge. [31].

	Témoin	1//1	2//2	3//3	/
30 % Matrice	0	0,15	0,08	0,16	/
40 % Matrice	0	0,11	0	0,15	/
50 % Matrice	0	0,18	2,23	2,24	/
Sandwich témoin	/	/	/	/	0

D'après les résultats, ils ont remarqué que les échantillons qui ont un nombre important de fibres, présentent une évolution importante de la résistance à la flexion.

b- Effet des fibres sur l'évolution de la charge en flexion des sandwiches

A partir des essais de flexion, ils ont observé que des sandwichs dosés à 50% de billes de polystyrène avec et sans renfort sont moins résistantes aux efforts de flexion, à cause de la présence de l'âme en polystyrène, malgré la faible densité de ces échantillons.

Le sandwich qui est renforcé par la fibre de verre continue à résister aux efforts de flexion et les sandwichs non renforcés, les éprouvettes perdent rapidement leur résistance et se rompent [31]. Par contre, des sandwichs dosés à 60% et 70% de billes de polystyrène avec et sans renfort, ils résistent très bien aux charges appliquées par flexion trois points.

En fin, ils ont conclu que le béton de polystyrène est un béton très fragile, sa résistance à la flexion est proche de zéro, mais il se comporte comme un matériau ductile, après renforcement par les fibres de verre. [31]

➤ En 2012, une autre étude faite par CHEMAMI Abdenacer [32] sur le thème Etude de la Performance des Matériaux Composites Sandwichs - Application en Fatigue. Dans cette thèse, ils ont effectué une analyse des essais statiques et de fatigue « flexion trois points » sur deux types de matériaux sandwichs à renforts unidirectionnels et croisés. La désignation des stratifiés se fait de cette manière :

- SMS [0₄],
- SMS [0/90₂/0].

Ces deux types de sandwichs, différenciés par le type de peaux, sont utilisés.

Le premier type de peau est un stratifié à quatre couches [04] constituées d'un tissu de fibres de verre unidirectionnelles de masse surfacique (736g [100x30] cm x 0.85) et de résine époxyde SR 1500/SD 2505 (690g de résine et 230g de durcisseur).

Le deuxième type de peau est aussi un stratifié croisé à quatre couches $[0/90_2/0]$ constituées d'un tissu de fibres de verre unidirectionnelles de masse surfacique ($677\text{g } [90 \times 30] \times 0.85\text{cm}$) et de la même résine (600g de résine et 200g de durcisseur).

Les deux peaux ont la même épaisseur $h_p = 2\text{ mm}$.

Les essais statiques en flexion 3 points ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques nécessaires aux essais de fatigue cyclique et mis en évidence leur comportement mécanique. [32]

- **Résultats expérimentaux des essais statiques de flexion trois points**

Les figures 1.5 et 1.6 donnent l'évolution de la charge appliquée en fonction de la flèche prise au milieu de la poutre, pour différentes éprouvettes et pour les deux configurations, dans le cas des essais statiques, sollicités en flexion 3 points dont les caractéristiques sont représentées au tableau 1.13.

Dans le cas des deux types de structures composites testés, le comportement en flexion est similaire et peut se décomposer en trois phases principales, à savoir :

- La première phase correspond à une augmentation linéaire de la charge appliquée P avec la flèche w ;
- La deuxième phase de comportement non linéaire, dans laquelle la charge maximale est atteinte ;
- La troisième et dernière phase où l'on observe une diminution de la charge appliquée jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette.

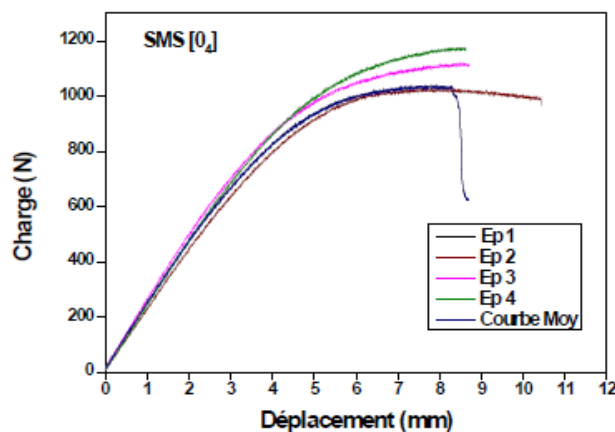
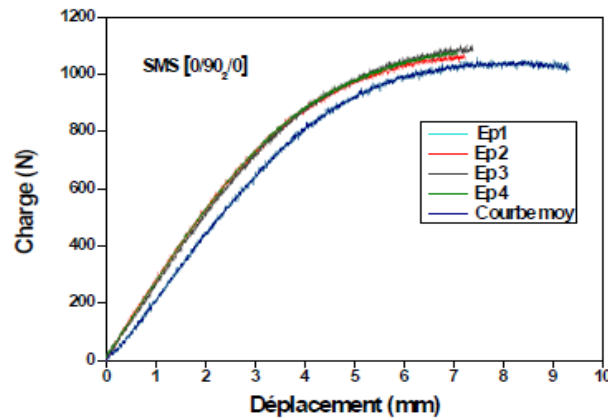


Figure 1.5. Comportement en flexion 3-points du sandwich SMS $[0_4]$ [32]

Le tableau 1.13 représente les résultats des essais statiques des sandwichs SMS $[0_4]$.

Tableau 1.13. Résultats des essais statiques des sandwichs SMS [0₄]. [32]

Nr	a ₀ mm	b ₀ mm	F _{max} N	N° éprouvette	F _{Rup} N	ε-Rupt %
1	11,57	25,16	1037,22	1	621,55	77,94
2	11,39	25,07	1011,98	2	1007,19	77,58
3	11,27	25,11	1028,95	3	968,01	93,56
4	11,82	25,2	1121,23	4	1111,65	75,20
5	11,55	25,03	1174,76	5	1163,01	74,68

**Figure 1.6.** Comportement en flexion 3-points du sandwich SMS [0/90₂/0]. [32]

Le tableau 1.14 représente les résultats des essais statiques des sandwichs SMS [0/90₂/0].

Tableau 1.14. Résultats des essais statiques des sandwichs SMS [0/90₂/0]. [32]

N° éprouvette	a ₀ (mm)	b ₀ (mm)	F _{max} (N)	F _{Rup} (N)	ε- Rupt (%)
1	10,57	24,96	1059,85	1018,94	86,61
2	11,37	25,05	1071,17	1058,11	65,87
3	11,12	24,14	1101,20	1082,05	67,51
4	10,97	25,06	1065,51	1055,07	65,65
5	11,09	25,1	1078,14	1067,69	64,63

D'après les résultats obtenus, ils ont remarqué que la peau influe sur le comportement statique des sandwichs étudiés (tableau 1.14). Les sandwichs ayant les peaux unidirectionnelles SMS [0₄] sont plus rigides. Ils ont constaté aussi que le déplacement et la charge à la limite de la partie linéaire du sandwich constitué de peaux croisées, sont supérieurs à ceux de l'autre sandwich. [32]

I.3.2. Essais de compression

➤ En 2014, une étude a été faite par BENFADEL Karima [31] sur le thème : « Élaboration et caractérisation de panneaux sandwichs à matrice cimentaire destinés à la construction ».

Les essais de compression sur des cubes équivalents de 7x7x7 cm, ont été réalisés sur une machine de compression de type Zwick équipée d'un capteur et piloté par un micro-ordinateur. Sa capacité maximale est de 3000 KN. Elle est programmée pour les essais de compression et cela pour différentes dimensions des corps d'épreuves (éprouvettes cylindriques ou prismatiques). Les résultats sont résumés dans le tableau 1.15.

Tableau 1.15. Résistance à la compression des différentes variantes des sandwiches, à 28 jours d'âge. [31]

	R _C (MPa) Témoin	1/1 R _C (MPa)	2/2 R _C (MPa)	3/3 R _C (MPa)	R _C (MPa)
30 % Matrice	0,88	0,93	0,89	0,9	
40 % Matrice	1,27	2,03	1,42	2,225	
50 % Matrice	1,76	1,97	2,1	2,2	
Sandwich témoin					1,97

D'après les résultats du Tableau 1.14, ils ont conclu que les résistances à la compression augmentent en fonction du dosage en billes de polystyrène quel que soit le nombre et la répartition des fibres de verre.

Ceci est dû à la formulation du béton, d'où la densité de l'échantillon, tel que La résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la densité du béton.

➤ En 2012, une autre étude faite par HACHEMANE Belkacem [33] sur le thème : « Analyse expérimentale du comportement mécanique d'un composite soumis à des sollicitations d'impacts ». Le but de son étude est de voir l'influence de l'énergie d'impact et de la densité du liège sur le comportement mécanique des plaques composites stratifiées et sandwiches.

Les dimensions des éprouvettes et le type d'essai utilisé dans cette étude sont représentés dans le tableau 1.16.

Tableau 1.16. Dimensions normalisées des différents échantillons de sandwichs. [33]

Type d'essai	Epaisseur h (mm)	Longueur L (mm)	Largeur b (mm)
Impact	14.26 ± 0.63	300	100.36 ± 0.10
Flexion			
Compressions perpendiculaire	14.40 ± 0.91	50.10 ± 0.19	50.16 ± 0.03

Les plaques de liège aggloméré utilisées dans l'élaboration des panneaux sandwichs sont de trois types :

1. Les plaques de liège aggloméré de grande densité, sont constituées de petits grains de dimension 1 à 2 mm (une masse volumique de 310 Kg/m³).

2. Les plaques de liège aggloméré de moyenne densité, sont constituées de grains de dimensions 2 à 3 mm et une masse volumique de 270Kg/m³.
3. Les plaques de liège aggloméré de faible densité, sont composées de grains de grosseurs 4 à 16 mm avec une masse volumique de 160 Kg/m³. [33]

Tableau 1.17. Appellation des sandwichs en fonction de la masse volumique du liège. [33]

Masse volumique du liège Kg/m ³	Peaux	Sandwich
160	Jute/époxy	SD 160
270	//	SD270
310	//	SD310

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent sur la morphologie et la composition chimique du matériau de l'âme de la structure sandwich (le liège) ; par la suite, des travaux de recherche sur les matériaux composites sandwichs ont été présentés. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude des matériaux composites et de leurs constituants.

Chapitre 2

Matériaux composites et leurs constituants

II. Matériaux composites et leurs constituants

II.1. Introduction

Une multitude de matériaux naturels, les uns rigides mais légers, comme les os, les autres souples mais résistants, comme le bois, doivent leurs propriétés mécaniques à leur **structure composite**. Ces matériaux font partie de la famille des composites puisqu'ils comprennent des **fibres** noyées dans une **matrice** de nature différente [34]. A titre d'exemple, le bois contient des fibres de cellulose souples et résistantes en traction associées à une matrice de lignine qui les enveloppe et assure la continuité structurale. Sa structure fibreuse se manifeste par le fil du bois.

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les **renforts** qui sont noyés dans une **matrice** dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la **cohésion** et **l'orientation** des fibres, elle permet également de **transmettre les sollicitations** auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont très **hétérogènes** et **anisotropes**. Il faut différencier les charges, des renforts [35].

Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

II.2. Définition des matériaux composites multicouches

Un matériau composite est une combinaison de deux matériaux distincts que l'on appelle généralement la matrice et le renfort, aux propriétés souvent complémentaires, qui associés possèdent des caractéristiques physiques complètement différentes de leurs composants [36].

Les matériaux composites sont des matériaux solides, hétérogènes et anisotropes [37]. Il faut différencier charges et renforts. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés. [35].

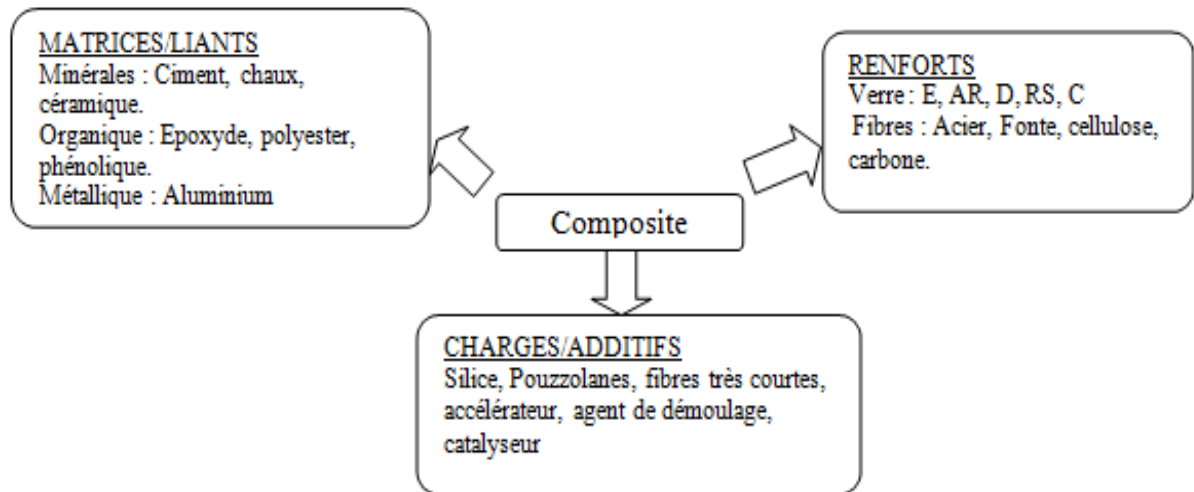


Figure 2.7. Composition générale d'un matériau composite [38].

II.3. Caractéristiques générales

Un matériau composite se compose dans le cas le plus général, d'une ou de plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue ; dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques meilleures que celles de la phase continue. La phase continue c'est la matrice et la phase discontinue est appelée renfort ou matériau renforçant.

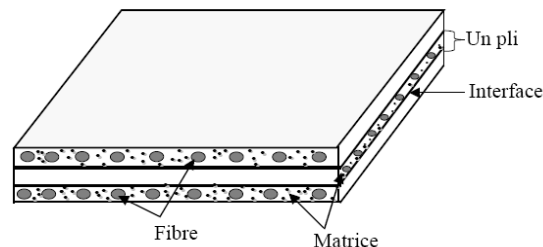


Figure 2.8. Microstructure d'un matériau composite UD [39].

Une exception importante est faite à la description précédente est le cas des polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomères. Pour ce type de matériaux, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont pratiquement pas modifiées par l'adjonction de particules élastomères, alors que les caractéristiques au choc sont améliorées [39].

Les propriétés des matériaux composites résultent [39], [40] :

- Des propriétés des matériaux constituants,
- De leur distribution géométrique,
- De leur interaction, etc.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- La nature des constituants et leurs propriétés,
- La géométrie du renfort, sa distribution,
- La nature de l'interface matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc. la concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse). La concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important. Une distribution uniforme assurera une « Homogénéité » du matériau : les propriétés du composite seront indépendantes du point de mesure. Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

Dans le cas de matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'anisotropie du matériau composite.

Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées.

II.4. Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants, suivant la nature des composants et le type du matériau composite [41], [39], [42], [43].

II.4.1. Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

II.4.1.1. Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibre si le renfort se trouve sous forme de fibre. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc.

L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés des matériaux composites pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécaniques et physiques en jouant sur la nature des constituants, la proportion des constituants et l'orientation des fibres suivant le cahier de charges imposées.

L'importance des matériaux composites à fibres justifié une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques. Notre travail pratique sera essentiellement consacré à l'étude de ce type de matériau.

II.4.1.2. Composites à particules

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres ne possède pas de dimensions privilégiées. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc.

Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charge pour réduire le coût du matériau, sans diminuer les caractéristiques. Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Les cermets sont des exemples de composites métal-céramique à particules, adaptés à des utilisations à température élevées.

Par exemple, les cermets à base d'oxydes sont utilisés pour les outils de coupe à vitesse élevée, et pour les protections à haute température.

Egalement, des particules d'élastomères peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragile, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration.

II.4.2. Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices.

Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autre faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvant citer :

II.4.2.1. Composites à matrice organique

Résine et charge, avec :

- Des fibres minérales : verre, carbone, etc.
- Des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
- Des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

II.4.2.2. Composites à matrice métallique

Alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane, avec

- Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC),

- Des fibres métalliques : bore,
- Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BorSiC).

II.4.2.3 Composites à matrice minérale

Matrice céramique, avec :

- Des fibres métalliques : bore,
- Des particules métalliques : cermets,
- Des particules minérales : nitrures, carbures, etc.

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les matériaux à matrice métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600°C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000°C pour une matrice minérale.

II.4.3. Classification suivant la structure des matériaux composites

II.4.3.1. Monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.



Figure 2.9. Matériau composite UD [43].

II.4.3.2. Stratifiés

Le matériau composite stratifié est composé d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. La figure ci-après représente un matériau composite stratifié [44].

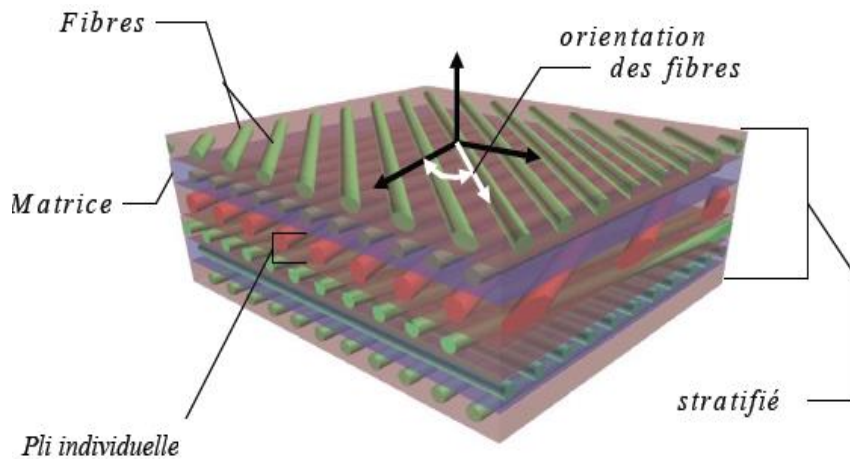


Figure 2.10. Un matériau composite stratifié [45].

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations, permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. Un stratifié possédant l'empilement $(0, +45, +90, -45)_2s$ est un stratifié avec quatre couches dans les directions 0° , -45° , 90° et $+45^\circ$, l'orientation 0° coïncidant avec la direction une du repère principal du composite. Ces plans seront répartis symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.

On pourra avoir des stratifiés de type :

1. Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $+\theta$ que de couches orientées suivant la direction $-\theta$.
2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
3. Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches 90° .

II.4.3.3. Structures sandwiches

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique. La figure ci-après représente un matériau composite sandwich [44].

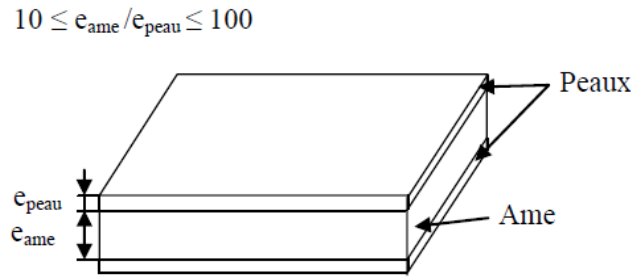


Figure 2.11. Matériau composite sandwich [44].

La figure 2.12 montre une représentation schématique de différents types de matériaux composites.

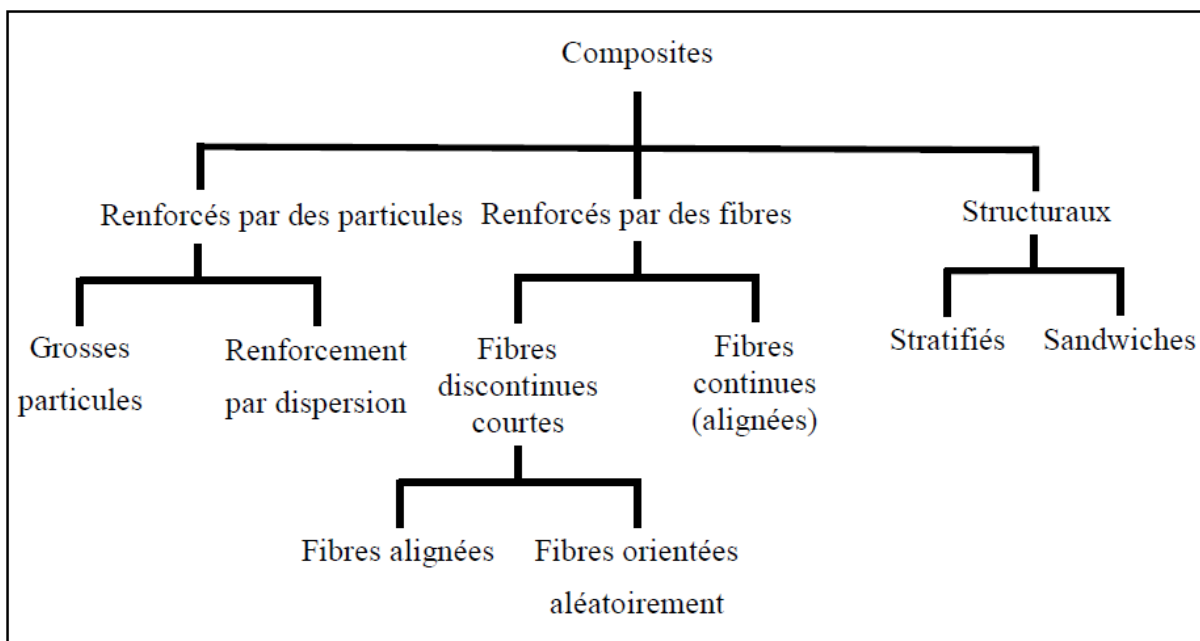


Figure 2.12. Schéma de différents types de matériaux composites [46].

II.4.4. Classification suivant le type de matériau composite

En fonction des performances mécaniques souvent rapportées à la densité, on a introduit la notion de composite grande diffusion et de composites hautes performances [44].

II.4.4.1. Composites de grande diffusion

Ils représentent 95 % des matériaux composites utilisés. En général, ce sont des plastiques armés ou des plastiques renforcés dont le taux volumique de renfort avoisine 30 %.

Les principaux constituants de base sont les résines polyesters (résines thermodurcissables) avec des fibres de verre.

Les demandeurs les plus importants sont l'industrie des transports (Automobile, ferroviaire) et la construction électrique, destinés à des fabrications en grande série, souvent très automatisés.

II.4.4.2. Composites de haute performance

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique, leurs propriétés mécaniques, résistance et rigidité, sont largement supérieures à celles des métaux. Les constituants sont des résines époxydes renforcées par des fibres longues de verre, mais surtout de carbone ou d'aramide, le taux de renfort est supérieur à 50 %.

II.5. Eléments constituants un matériau composite

II.5.1. Introduction

Un composite est un matériau qui diffère des matériaux macroscopiques homogènes habituels comme les métaux et les polymères. Il comprend des fibres continues ou coupées d'un matériau résistant (renfort) qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. Il existe plusieurs types d'arrangement de fibres. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures [39], [40].

II.5.2. Matrice

II.5.2.1. Introduction

La matrice est l'un des constituants de base des matériaux composites. C'est un matériau organique léger, facilement déformable, qui revêt trois fonctions principales : la répartition de la charge mécanique sur tous les renforts, la cohésion des fibres pour une meilleure homogénéisation de l'ensemble et la protection des renforts vis à vis du milieu extérieur (chocs thermiques ou mécaniques). La matrice doit avoir une masse volumique faible afin de conserver au composite des caractéristiques mécaniques élevées [47], [48].

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres, et lie les fibres du renfort entre elles, tout en assurant la répartition de la contrainte c'est « l'emballage ». Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées [49].

Les résines polymères les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables (TD) et les résines thermoplastiques (TP).

Ces deux types de polymères diffèrent par leur structure moléculaire et par leur comportement.

Il existe d'autres catégories de résines : les résines thermostables et les polymères thermoplastiques qui peuvent résister à des sollicitations thermiques continues de 200°C et même plus. Toutefois, l'usage de ces résines reste spécifique, ce qui limite leur fabrication. La figure 2.13 représente les différentes familles de matrices.

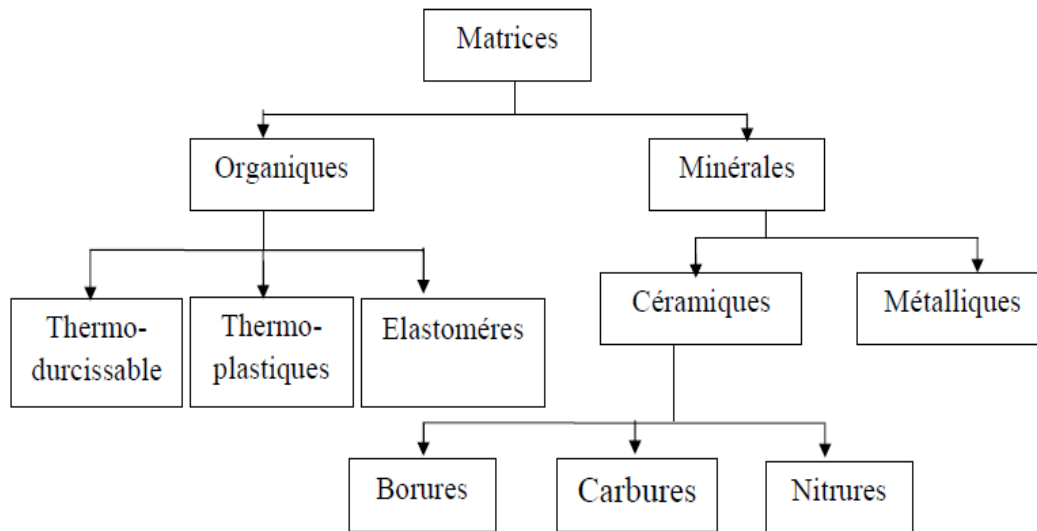


Figure 2.13. Différentes familles de matrices [50].

II.5.2.2. Résines thermodurcissables (TD)

Ce sont des polymères qui après traitement thermique se transforment en produits essentiellement infusibles et insolubles.

Ces résines ont la particularité de n'être mises en forme qu'une seule fois (processus irréversible). Ces résines sont exceptionnellement utilisées avec renforts, du fait de leur fragilité. Aussi, leurs caractéristiques thermomécaniques élevées font qu'elles sont les plus employées actuellement. Les principales résines thermodurcissables utilisées sont [39] : les polyesters insaturés (polyester condensé, vinylesters, etc...), les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, etc...) et les résines époxydes.

Contrairement aux composites GD, les demandeurs intéressés par leurs caractéristiques mécaniques et thermiques élevées, mais aussi par des séries de productions très faibles, sont l'industrie aéronautique et spatiale, l'automobile sportive, les chantiers navals. Elles ont une stabilité thermique beaucoup plus élevée en comparaison avec les matériaux thermoplastiques et un grand avantage pour des applications d'une demande très élevée.

Des remplisseurs ou charges sont employés en polymères pour une variété de raisons, à savoir réduire le coût, améliorer le traitement, la densité de commande, la conductivité thermique, la dilatation thermique, les propriétés électriques, les propriétés magnétiques, le retard de flamme, et pour améliorer les propriétés mécaniques [51]. En général, les remplisseurs peuvent changer l'exécution des composés de polymère en changeant la couleur, la viscosité, les propriétés de barrière, les propriétés électriques et thermiques, la finition de surface, le rétrécissement, etc...

Les résines thermodurcissables principalement utilisées sont les suivantes :

- Résines époxydes : font l'objet de notre étude.
- Résines phénoliques : sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée ; c'est pour cette raison qu'on les utilise dans les des transports ferroviaires. Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre.
- Résines polyamides.
- Résines polyesters : se présentent sous forme d'une solution polyacide + polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficiles à stocker.

Le tableau suivant présente une comparaison entre ces types de résines :

Tableau 2.18. Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables [52].

	Polyesters	Phénoliques	Époxydes	Polyamides
Caractéristiques mécaniques	Moyenne	Faible	Très bonne	Excellentes
Tenue aux chocs	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
Tenue en fatigue	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
Pouvoir adhésif	Moyenne	Moyenne	Très bonne	Très bonne
Température maxi d'utilisation	140°C	130°C	190°C	260°C
Tenue au feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
Retrait	Important	Faible	Très faible	Très faible
Durée de polymérisation	Courte	Courte	Longue	Moyenne
Mise en œuvre	Très faible	Difficile	Facile	Difficile

a) Résines polyester insaturé

C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur.

Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante. La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique ([53], [43]). Il existe différents types de résines [43], [54] :

- Orthophtalique : la plus courante ;
- Isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- Chlorée : elle est bromée, dite ignifugées ;
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

Suivant le module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide.

b) Résines époxy

Elles sont préférentiellement utilisées pour les composites hautes performances. Elles possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180°C) et un bon comportement chimique. Par contre elles sont sensibles à l'humidité ainsi qu'aux rayons UV et ont un coût encore très élevé [39].

L'époxy ou scientifiquement nommé polyépoxyde est un thermodurcissable composé d'une résine dite prépolymère qui contient des monomères dont les fonctions époxydes sont les groupements réactifs de la résine, et le durcisseur permettant l'ouverture du cycle époxy et la liaison entre les monomères [55]. Pour cela, les durcisseurs doivent posséder au moins deux fonctions pouvant réagir avec le prépolymère en déclenchant la copolymérisation (réaction de polycondensation) de la résine et en formant un réseau tridimensionnel, non cristallin et infusible. Ce sont souvent des amines ou des anhydrides.

D'autres ajouts peuvent être additionnés et sélectionnés selon le domaine d'application de la résine, tels que les diluants qui sont utilisés dans la formulation de la résine époxy pour réduire la viscosité ou éliminer les solvants.

Ces ajouts permettent à la résine époxyde d'être la famille la plus polyvalente des résines, (peuvent être facilement modifiées) pour avoir des propriétés différentes. Cette modification peut être réalisée par :

- La sélection d'un prépolymère approprié ou une combinaison de différentes familles de prépolymère.
- La sélection d'un agent de durcissement et de mécanisme de réaction associé.
- L'addition simple des charges organiques ou inorganique et les composantes [56].

Selon le nombre de fonctions époxydes que possède le prépolymère (2, 3 ou 4), celui-ci est bi, tri ou tétra-fonctionnel. Il existe de nombreux prépolymères époxydes, le plus connu d'entre eux étant la DGEBA ou DiGlycidyl Ether du Bisphénol A.

C'est le premier prépolymère époxyde apparu sur le marché, et le plus répandu, puisqu'il constitue, à lui seul, 95 % de la production mondiale [57]. Sa structure chimique est présentée sur la figure 2.17 [58].

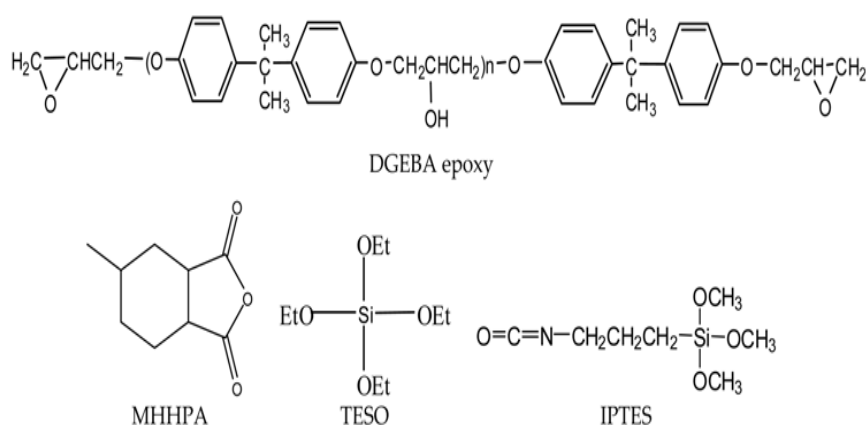


Figure 2.14. Les structures chimiques de DGEBA n=2, MHHPA, APTES et de TEOS [59].

La résine époxy (Fig. 2.14) a été durcie avec 2,4 méthylhexahydrophthalique anhydride (MHHPA). Les alcoxydes, 4,3-isocyanatopropyltriéthoxysilane (IPTES) et le tétraéthoxysilane (TEOS). Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont représentées dans le tableau 2.19.

Tableau 2.19. Les caractéristiques physico-mécaniques des résines époxy [59].

Caractéristiques physico-mécaniques des résines époxydes	
Masse volumique	1100 à 1500 kg/m ³
Module d'élasticité en traction	3 à 5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	60 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	100 à 150 MPa
Allongement à la rupture	(2 à 5) %
Resistance au cisaillement	30 à 50 MPa

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et, surtout, de cuisson très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100°C).

II.5.2.3. Résines thermoplastiques (TP)

Ce sont des résines qu'on appelle communément les plastiques, fréquemment utilisées sans renfort et qui possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement dans un intervalle de température spécifique au polymère étudié.

Dans les matériaux thermoplastiques, les différentes molécules ont une structure linéaire et il n'y a aucun produit chimique liant entre eux. Ces molécules s'associent par des forces de Van der Waals, interactions de dipôle-dipôle, liaison d'hydrogène et égalisent l'empilement des anneaux aromatiques. Le thermoplastique peut être ramolli et fait pour couler avec l'application de la chaleur et de la pression pendant que l'interaction faible entre les molécules peut être temporairement décomposée. Quand le matériau est alors refroidi, les molécules reconstituent la liaison secondaire entre elles et il se solidifie. En raison de cette facilité de fabrication et de formabilité, les matériaux thermoplastiques sont largement répandus dans une variété de produits [60].

Parmi les matrices thermoplastiques, on trouve :

- Le polyéthylène (PE)
- Le polypropylène (PP);
- Le poly (acétate de vinyle) (PAV) (colles à bois et autres adhésifs) ;
- Le poly (chlorure de vinyle) (PVC) (tuyauteries) ;
- Le poly (méthacrylate de méthyle) (PMMA) ;
- Le nylon 6,6 (fibres, vêtements) ;
- L'acétate.

Les matrices thermoplastiques possèdent de faibles propriétés mécaniques. Leur renforcement (le plus souvent par des fibres courtes) confère une meilleure résistance mécanique, une bonne stabilité dimensionnelle, ainsi qu'un accroissement de la tenue en température.

Les résines thermoplastiques, en revanche, peuvent être alternativement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. De plus, ces résines présentent l'aptitude, à l'état liquide, de se mouler facilement par plasticité.

II.5.3. Charges

II.5.3.1. Charges augmentant la résistance mécanique

L'objectif de l'incorporation des charges augmentant la résistance mécanique est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en [61] :

- Charges sphériques ;
- Charges non sphériques.

II.5.3.2. Charges ayant un rôle secondaire

Les charges ayant un rôle secondaire ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines, soit d'améliorer certaines propriétés secondaires des résines telle que la viscosité [62].

II.5.3.3. Additifs

Les additifs sont ajoutés en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage,
- Pigments et colorants,
- Agents anti-retrait,
- Agents anti-ultraviolets.

II.5.4. Renforts (fibres et tissus)

Le renfort a pour rôle de supporter l'essentiel de l'effort mécanique appliqué au matériau composite grâce à ses caractéristiques mécaniques élevées (modules et limite d'élasticité, résistance mécanique...) [40]. Il se présente sous forme fibreuse ou particulaire selon les utilisations. La recherche de renforts performants s'oriente dans le cas des renforts fibreux, à quelques exceptions près, vers les verres, carbone, etc., du fait de leurs hautes performances mécaniques et de la relative maîtrise quant à leur élaboration. D'autres fibres sont également commercialisées, mais restent peu utilisées du fait de leur mise en œuvre plus complexe et de leur coût plus élevé : fibres multibrins de carbure de silicium, d'alumine et de silice.

Les fibres de renforcements des matériaux composites proviennent de deux origines :

- Les fibres minérales : fibre de verre, de carbone, céramiques,
- Les fibres organiques.

Les qualités importantes recherchées lors de l'introduction de fibres dans une matrice sont en premier lieu un module de Young élevé, une résistance à la rupture élevée et tous deux reliés à la légèreté du matériau.

Les renforts constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 à 0,7. Les structures composites sont anisotropes.

La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée. Il existe différentes géométries et textures de renforts [40-41-42] :

- Sous forme linéique (fils, mèches, etc.) ;
- Sous forme de tissu surfacique (tissus simples, mats, etc.) ;
- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une faible masse volumique, une bonne compatibilité avec les résines et une facilité de mise en œuvre [41]. En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines diverses, comme indiqué sur la figure 2.15.

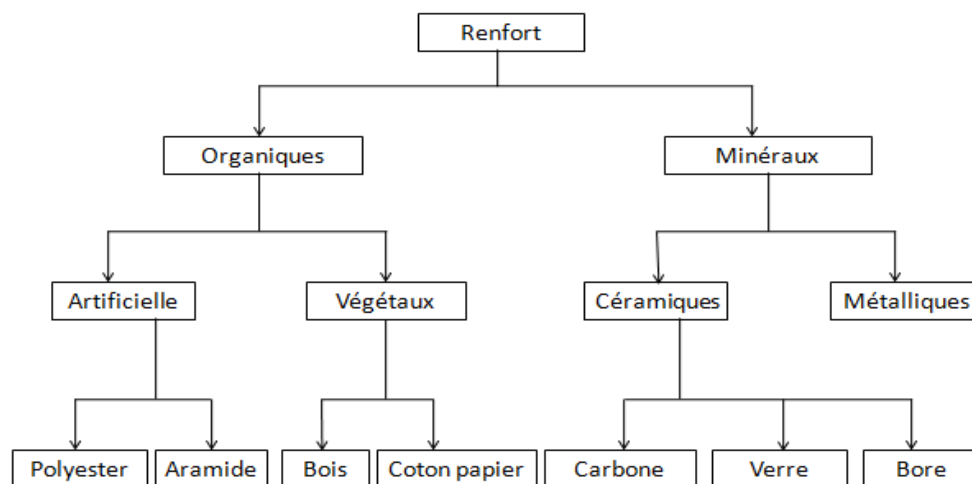


Figure 2.15. Les différents types de renfort de base [41].

Les propriétés physiques et mécaniques sont fortement influencées par la nature des fibres. La forme du renfort est fonction de l'application et du volume des pièces à réaliser ; elle permet de distinguer deux grandes familles.

II.5.4.1. Renfort en fibres discontinues

Des fibres courtes ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids).

II.5.4.2. Renfort en fibres continus

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevé que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois,

ou bien pour le même volume, la surface est multipliée par 100 dans le cas des fibres de verre [63].

Ces renforts ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées.

Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts : unidirectionnelle (nappes ou roving), bidirectionnelle (tissus ou complexes 2D), tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois directions).

II.5.4.3. Géométrie des renforts

D'un point de vue géométrique, on peut distinguer trois grands types de renforts :

- Les fibres longues (longueur comparable aux dimensions de la pièce, figure 2.16 a),
- Les fibres courtes (de longueur faible devant les dimensions de la pièce, figure 2.16 b),
- Les particules, ou charges renforçantes (figure 2.16 c).

Tous ces renforts sont inclus au sein d'une matrice qui répartit les efforts entre eux et les protège des agressions extérieures, comme indiqué ci-dessus. En outre, lorsque les renforts sont des fibres, celles-ci peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées aléatoirement.

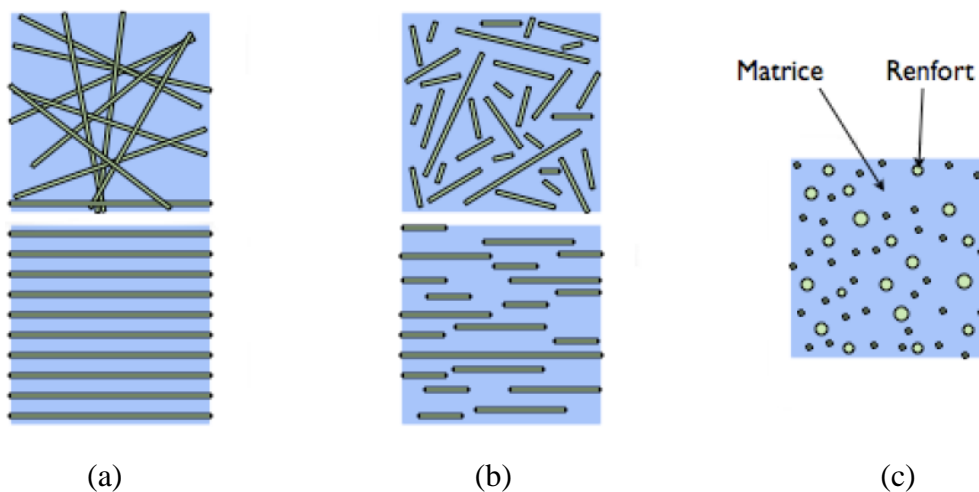


Figure 2.16. Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules [64].

II.5.4.4. Fibres de verres

Les fibres les plus employées sont les fibres de verre. Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elles sont obtenues à partir du sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue trois types de fibres de verre [43] :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;

- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

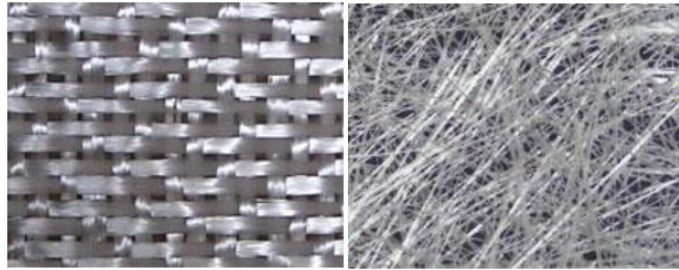


Figure 2.17. À gauche fibre de verre tissé et à droite fibre de verre mat [43].

Le tableau 2.20 représente la composition chimique des différents types de fibres de verre.

Tableau 2.20. Composition chimique des différents types de fibres de verre [65].

Constituants		Composition en masse (%)		
		Verre E	Verre D	Verre R
Silice	SiO ₂	53-54	73-74	60
Alumine	Al ₂ O ₃	14-15.5	/	25
Chaux	CaO	20-24	0.5-0.6	9
Magnésie	MgO			6
Oxyde de bore	B ₂ O ₃	6.5-9	22-23	
Fluore	F	0-0.7		
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	<1	0.1-0.2	
Oxyde de titane	TiO ₂			
Oxyde de sodium	Na ₂ O	<1		
Oxyde de potassium	K ₂ O		1.3	
			1.5	

II.5.4.5. Fibres de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

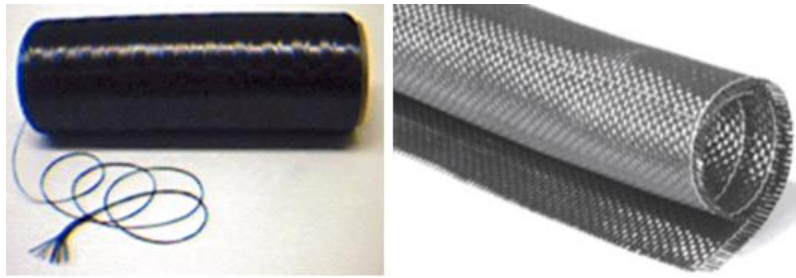


Figure 2.18. Les fibres de carbone [43].

II.5.4.6. Fibres d'aramides

Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- Les fibres de bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles [43] ;
- Les fibres de haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances [66].

II.5.4.7. Fibres Naturelles

Les fibres naturelles sont des substances filamenteuses issues de végétaux et d'animaux, susceptibles d'être filées pour fabriquer des fils et des cordes. Elles sont tissées, tricotées ou tressées pour confectionner des textiles indispensables à la société. Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les matériaux composites (sisal, jute, kenaf...) qui représentent aujourd'hui quelques dizaines de milliers de tonnes [67]. Les fibres naturelles peuvent provenir de plusieurs sources, notamment les plantes, les animaux ou les minéraux. Cependant, dans plusieurs applications, il s'est avéré que les fibres naturelles végétales sont le renfort le plus utilisé [68].

- **Fibre de Jute**

Est une plante des régions tropicales (genre corchorus) appartenant à la famille liliacées. Il existe deux variétés (une blanche et un rouge), ce qui exige un triage préalable avant l'utilisation. La fibre ultime est très courte et très lignifiée [69-70]. La composition chimique des fibres végétales est la cellulose, la lignine et l'hémicellulose [71].



Figure 2.19. a) - fibre de jute, b) - le jute tissé [71].

- **La laine**



Les moutons furent un des premiers animaux à être domestiqués et les premières étoffes étaient probablement en laine. La laine est l'une des principales fibres utilisées au monde ; la structure de ses protéines lui confère des qualités uniques, une résilience et une élasticité exceptionnelles, avec lesquelles les fibres synthétiques ne peuvent rivaliser.

Figure 2.20. La laine du mouton [71].

- **Le Coton**



Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut (figure 1.21). Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters. Le rendement en linters de coton est de seulement 0,05 t/ha/an. Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physiques et mécaniques. En effet, les linters de coton mesurent 2 à 5 mm et ont une largeur de 18 μm .

Figure 2.21. Le coton [71].

II.7. Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout, et connaissent actuellement un essor important dans tous les domaines d'application, particulièrement dans la construction navale, vu leurs très bonnes performances mécaniques. Leurs caractéristiques mécaniques dépendent :

1. Des propriétés intrinsèques des constituants de base,
2. Des distributions géométriques des constituants,
3. De l'interaction entre les différents constituants, etc.

Le choix des constituants de base ainsi que les techniques et le procédé de mise en œuvre ont une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau composite.

Chapitre 3

Comportement mécanique des structures sandwiches

III. Comportement mécanique des structures sandwiches

III.1. Introduction

Les structures sandwichs occupent un large créneau dans la construction des pièces composites. Historiquement, ce sont les premières structures composites allégées et performantes [40]. 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.

Les structures composites sandwiches offrent de grandes potentialités aux concepteurs dans des domaines très divers. Elles peuvent être utilisées pour des applications structurales classiques pour lesquelles il faut allier légèreté et rigidité, comme l'industrie aérospatiale [72], ou généralement le transport, puisque ce type de matériau est utilisé, parmi d'autres, pour les TGV à deux niveaux. Leur résistance à la corrosion, quand les divers constituants ne sont pas métalliques, ont fait des matériaux sandwichs, des matériaux de choix pour la construction navale. Ces matériaux sont employés comme structures primaires dans le cas des petites et moyennes unités. L'usage des sandwichs se répand aussi dans l'industrie du bâtiment et cette fois, se sont leurs excellentes caractéristiques d'isolation thermique et acoustique qui sont considérées.

L'objectif de ce deuxième chapitre est de définir les éléments constituant un matériau composite sandwich dans un premier temps ; par la suite, nous étudions les propriétés mécaniques des matériaux composites sandwichs.

III.2. Définition d'un matériau sandwich

Une structure sandwich résulte de l'assemblage par collage ou soudure de deux semelles ou peaux (Figure 1) et d'un matériau d'âme. Les peaux sont de faibles épaisseurs et possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques (module élevé, grande résistance). Entre les deux peaux est intercalé un matériau d'âme de forte épaisseur et de faible densité. En gardant une distance constante entre les deux peaux, l'insertion de cette âme permet d'augmenter le moment d'inertie de la structure et, par conséquent, sa rigidité en flexion, tout en minimisant la masse de l'ensemble. A partir de 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 chacune des phases. En règle générale, les peaux ont la même épaisseur t_f . Le rapport t_f/t_c (t_c étant l'épaisseur de l'âme) est compris entre 0,1 et 0,01. D'après Allen [73], on peut classer les sandwichs en trois catégories selon la valeur du rapport d/t_f (d étant la distance séparant l'axe neutre de chacune des peaux). Pour un sandwich symétrique (peaux de même épaisseur) $d = t_c + t_f$. La figure 3.22 représente un matériau composite sandwich.

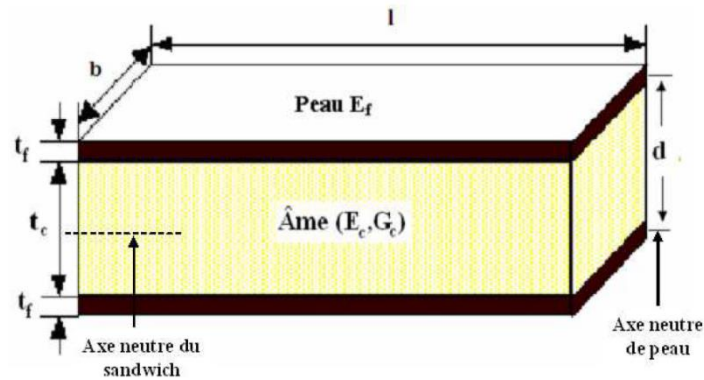


Figure 3.22. Matériau composite sandwich [74].

En fonction des valeurs du rapport d/t_f , on peut classer les sandwichs de la manière suivante :

- Si le rapport d/t_f est supérieur à 100, on parle de sandwichs à peaux très fines ;
- Pour un rapport d/t_f compris entre 100 et 5,77 le sandwich est considéré comme ayant des peaux fines ;
- Dans le cas où d/t_f est inférieur à 5,77 la structure est dite à peaux épaisses.

III.3. Eléments constituant une structure sandwich

Les polymères ont été souvent employés comme matériaux de revêtement grâce à leurs propriétés spécifiques favorables. Les nids d'abeilles d'aluminium et de nomex ont été trouvés satisfaisants comme âme pour les structures sandwichs fortement chargées. En d'autres termes, ils permettent de réaliser le meilleur rapport rigidité/poids. Cependant, leur coût élevé limite leur utilisation dans les domaines de haute technologie et dans l'industrie aérospatiale [67]. Généralement, les matériaux utilisés pour le noyau des matériaux sandwichs sont des nids d'abeilles, des mousses, et du bois de balsa, mais les développements récents ont abouti à de nouvelles solutions, telles que les matériaux naturels avec une morphologie cellulaire [75].

Dans le cadre de cette étude, nous allons utiliser le liège aggloméré comme alternative pour l'âme du matériau sandwich, puisque le liège est un matériau cellulaire naturel avec quelques propriétés remarquables, telles que la tolérance élevée de dommages aux charges d'impact et une bonne isolation thermique et acoustique. En outre, le liège, est un matériau naturel, renouvelable et facilement réutilisable [76].

III.3.1. Peaux d'une structure sandwich

Les Peaux sont généralement de faible épaisseur ; elles sont destinées le plus souvent :

- Pour les composites à moyennes et hautes performances, de stratifiés à matrice therm durcissable (polyesters, époxydes) et d'un renfort en fibres de verre [77] et de carbone ou d'aramide ;

- Pour les structures portantes, de feuilles métalliques (aluminium, acier) ;
- Pour des structures de faibles à moyennes performances, de bois, laminé, stratifié, contre-plaqué.

Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation des matériaux composites. Les peaux ont pour but de reprendre les efforts de flexion traduit par des contraintes normales (traction ou compression).

III.3.2. Ame (cœur) d'une structure sandwich

Dans les matériaux sandwichs, l'âme doit être constituée d'un matériau ayant une faible masse volumique et de bonnes propriétés en cisaillement pour transmettre les contraintes de traction-compression supportées par les peaux. Par ailleurs, l'âme doit pouvoir supporter des charges localisées de poinçonnement [78]. Les matériaux d'âme les plus utilisés pour le noyau des matériaux sandwichs sont des nids d'abeilles, des mousses, du bois de balsa et des matériaux naturels avec une morphologie cellulaire. Le matériau de l'âme présente une faible résistance à la flexion. Son but est de reprendre les efforts de compression et de cisaillement. Les matériaux d'âme les plus utilisés se présentent principalement sous deux formes :

- **Âmes pleines** [79], parmi lesquelles on trouve le balsa (ou bois cellulaire), diverses mousses cellulaires et des résines chargées de microsphères creuses de verres (mousses syntactiques) ;
- **Âmes creuses** [79], essentiellement de type nid d'abeilles et profilé (réseaux métalliques légers, réseaux en papier enduit ou non, réseaux en polycarbonate et en polypropylène).

L'assemblage de l'âme et des peaux des structures sandwichs peut être réalisé soit par collage, soit par soudage.

III.4. Domaine d'utilisation des structures sandwichs

Les matériaux sandwichs connaissent un essor important, tant pour 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. Depuis les années 40 jusqu'à aujourd'hui, les matériaux composites sandwichs ne cessent de se développer.

Le balsa, premier matériau d'âme employé pour matériaux composites sandwichs, est toujours en service où le poids n'est pas critique comme dans les yachts et les lanceurs de croisières [80].

Les matériaux composites sandwichs augmentent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Les performances remarquables des matériaux sandwichs sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

III.5. Comportement mécanique des structures sandwiches

Les structures sandwichs sont déjà couramment utilisées dans l'industrie, et l'arrivée des composites a multiplié leur utilisation dans les applications automobiles ou aéronautiques. Leur faible poids et leurs excellentes propriétés en flexion en font un matériau de choix, et la théorie qui régit leur comportement en flexion est donc largement traitée dans la littérature. Les travaux d'Allen [81] ou de Zenkert [82] modélisent le comportement mécanique des structures sandwich avec des noyaux de différentes natures en utilisant un modèle simplifié. Le comportement des peaux est alors considéré comme linéaire et le noyau comme étant rigide. Dans ces modèles, les déplacements dans le noyau sont considérés comme linéaires. Frostig et al. [83] ont actualisé et amélioré ces travaux grâce à la prise en compte des chargements localisés en utilisant un modèle d'ordre élevé. L'expression « ordre élevé » fait référence à la non-linéarité qui caractérise les déplacements dans le noyau (un modèle quadratique est alors utilisé) et qui permet d'expliquer les phénomènes d'indentation. De tels chargements peuvent endommager prématurément les peaux des sandwichs à cause de contrainte anormalement élevées et conduire à des ruptures plus rapides que ce que prévoit la théorie. Les travaux de Sokolinsky et al. [84-85] reprennent les études précédentes en tenant compte des propriétés de l'adhésif entre le noyau et les peaux, ajoutant ainsi à la théorie des paramètres qui ne sont pas toujours négligeables. Dans les tentatives de modélisation des poutres sandwichs, les travaux de Gibson et al. [86] et de Zhang [87-88] présentent des études des modes de déformation et du comportement mécanique des matériaux utilisés comme noyaux dans les composites sandwichs, notamment les nids d'abeille. Une méthode indirecte de mesure des propriétés du noyau par flexion du sandwich permet d'obtenir une bonne évaluation du module de cisaillement de l'âme [89] grâce à un test de flexion trois points.

III.6. Théorie des poutres sandwiches

La théorie des poutres simples est facilement adaptée aux poutres sandwiches avec quelques modifications mineures. L'utilisation de cette théorie permet de disposer d'une méthode simple permettant de calculer la rigidité en flexion, la rigidité en cisaillement, les contraintes dans les peaux et les contraintes de cisaillement dans l'âme.

Cette théorie des poutres s'appelle habituellement la théorie de Timoshenko [90] et reprise dans de nombreux ouvrages (Plantema [91] et Zenkert [92]).

III.6.1. Rigidité en flexion

La poutre sandwich schématisée dans la figure 3.23 présente une rigidité en flexion équivalente $(EI)_{eq}$ [92-93], exprimée par la formule suivante :

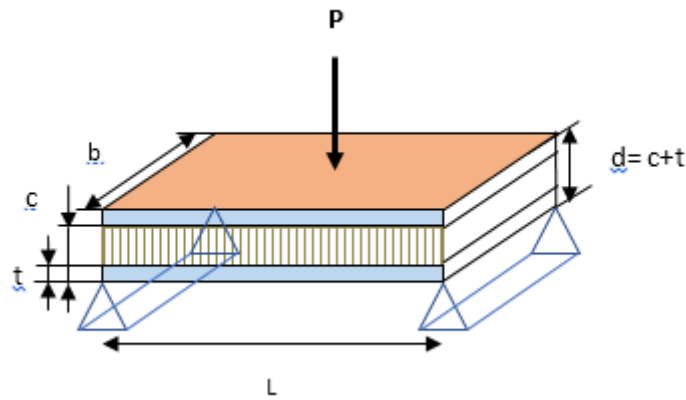


Figure 3.23. Poutre sandwich sur deux appuis chargés au centre [92].

$$(EI)_{eq} = \frac{E_f \times b \times t^3}{6} + \frac{E_c \times b \times c^3}{12} + \frac{E_f \times b \times t \times d^2}{2} \quad (3.1)$$

Avec : E_f et E_c respectivement le module d'Young des peaux et de l'âme.

Les deux premiers termes représentent les rigidités en flexion des peaux (indice f) et de l'âme (indice c) par rapport à l'axe neutre de chacun des éléments. Ils fournissent la rigidité de la poutre si les faces n'étaient pas collées à l'âme. Dans la conception des structures sandwiches, ces deux termes sont en général faibles, comparés au troisième qui décrit la rigidité en flexion des peaux par rapport à l'axe neutre de la poutre elle-même.

En pratique, les peaux sont souvent beaucoup plus fines que l'âme, de telle sorte que l'épaisseur totale de la poutre sandwich sont proche de celle de l'âme (c). De fait, en première approximation, la rigidité en flexion de l'ensemble est bien approchée par la relation :

$$(EI)_{eq} = \frac{E_f \times b \times t \times c^2}{2} \quad (3.2)$$

La rigidité équivalente en cisaillement est, quant à elle, donnée par :

$$(AG)_{eq} = \frac{b \times d^2 \times G_c}{c} \quad (3.3)$$

Qui, pour des peaux fines, peut s'écrire aussi en première approximation :

$$(AG)_{eq} = b \times c \times G_c \quad (3.4)$$

Lorsque la charge concentrée P est appliquée, la poutre fléchit. La flèche d de la poutre est la somme d'une composante d_b due à sa rigidité en flexion et d'une composante d_s due à la déformation par cisaillement de l'âme (figure 3.24).

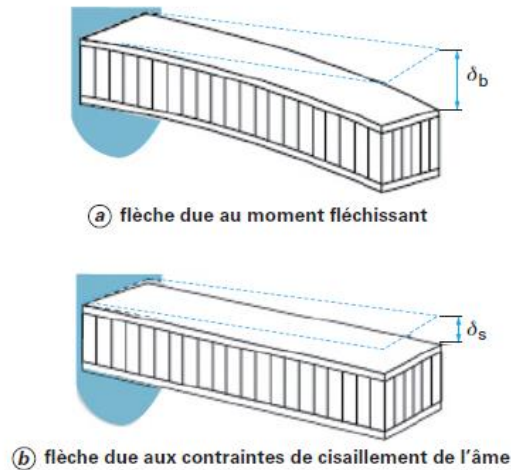


Figure 3.24. Flèche d'une poutre sandwich en flexion [93].

$$\delta = \delta_b = \delta_s = \frac{P \times l^3}{B_1 \times (EI)_{eq}} + \frac{P \times l}{B_2 \times (AG)_{eq}} \quad (3.5)$$

Avec : l : portée,

B_1 et B_2 : constantes, appelées « coefficients d'encastrement », résultant des conditions limites (type de distribution de la charge, conditions d'encastrement aux extrémités, etc.).

III.6.2. Comportement des structures sandwiches en flexion

III.6.2.1. Flexion trois-points

La figure 3.25 représente un schéma de l'essai de flexion trois points.

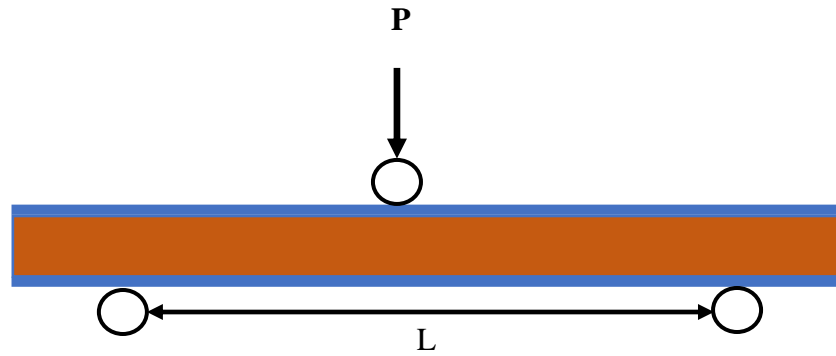


Figure 3.25. Flexion trois-points [93].

Dans le cas d'un chargement central d'une poutre (Fig. 3.40), le moment fléchissant s'écrit :

$$M = \frac{P_x}{2} \quad \text{pour } 0 < x < L/2 \quad (3.6)$$

$$M = \frac{P(L-x)}{2} \quad \text{pour } L/2 < x < L \quad (3.7)$$

P : étant la charge appliquée et x la distance par rapport à l'origine.

L'effort tranchant T :

$$T = \frac{P}{2} \quad \text{pour } 0 < x < L/2 \quad (3.8)$$

$$T = \frac{P}{2} \quad \text{pour } L/2 < x < L \quad (3.9)$$

Les contraintes de traction ou de compression dans les peaux sont alors :

$$\sigma_f = \frac{M_z}{D} \times E_f \quad \text{pour } \frac{t_c}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{t_c}{2} \quad (3.10)$$

Le maximum étant obtenu pour $z = \pm h/2$ et $x = L/2$, on obtient :

$$\sigma_{fmax} = \pm \frac{P \times L \times h}{8D} \times E_f \quad (3.11)$$

Pour l'âme nous obtenons :

$$\sigma_c = \frac{M \times z}{D} \times E_c \quad \text{si } -\frac{t_c}{2} \leq z \leq \frac{t_c}{2} \quad (3.12)$$

Les contraintes planes maximales supportées par l'âme s'expriment alors par :

$$\sigma_{c.max} = \frac{P \times L \times t_c}{8D} \times E_c \quad (3.13)$$

En ce qui concerne la contrainte de cisaillement τ_c dans l'âme, du fait de l'hétérogénéité de la structure, on tient compte du changement de module d'élasticité dans la section transversale, d'où :

$$\tau_c = \frac{T}{Db} \sum S \times E \quad (3.14)$$

Où : b : largeur au niveau z_1 et S moment statique par rapport à l'axe Oy pour lequel $z > z_1$.

La distribution des contraintes de cisaillement est illustrée sur la figure 3.26.

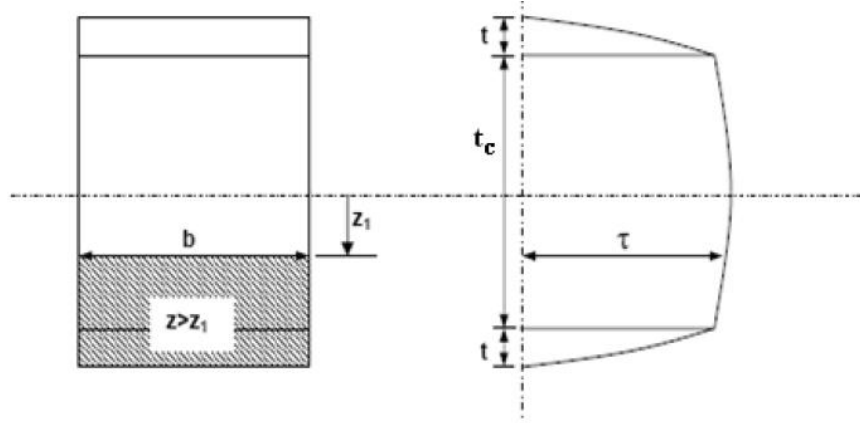


Figure 3.26. Répartition des contraintes de cisaillement [94]

Dans l'expression (3.14), D est la rigidité en flexion de la structure et $(\sum S.E)$ représente la somme des produits de toutes parties de la section pour lesquelles $z < z_1$. Cette somme peut s'écrire sous la formule suivante :

$$\sum S \times E = E_f \frac{b \times t_f \times d}{2} + \frac{E_c \times b}{2} \left(\frac{t_c}{2} - z \right) \left(\frac{t_c}{2} + z \right) \quad (3.15)$$

D'où, la contrainte de cisaillement dans l'âme au niveau z :

$$\tau_c = \frac{T}{D} \left[E_f \times \frac{t_f \times d}{2} + \frac{E_c}{2} \left(\frac{t_c^2}{4} - z^2 \right) \right] \quad (3.16)$$

Cette contrainte est maximale au centre du sandwich et vaut :

$$\tau_{c,max} = \frac{P}{4.D} \left[E_f \times t_f \times d + E_c \times \frac{t_c^2}{4} \right] \quad (3.17)$$

De plus, sachant que $E_f > E_c$, on peut négliger le terme tenant compte du module d'Young de l'âme de sandwich. La contrainte de cisaillement maximale s'écrit alors :

$$\tau_{c,max} = \frac{P}{4.D} \times E_f \times t \times d \quad (3.18)$$

La rigidité en flexion D peut être réduite au second terme du second membre de son expression globale (équation (1.1)). La contrainte maximale de cisaillement dans l'âme se réduit à :

$$\tau_{c.max} = \frac{P}{2 \times b \times d} \quad (3.19)$$

Nous pouvons constater que $\tau_{c.max}$ est constante dans l'épaisseur de l'âme.

Si maintenant, on observe une portion de la poutre soumise à la flexion (Fig.3.27), nous pouvons constater que les points a, b, c et d qui étaient alignés avant le chargement ne le restent pas. Les sections droites des peaux, par rapport à leur propre axe neutre, restent droites. Ceci n'est pas le cas pour l'âme, qui subit une forte déformation en cisaillement.

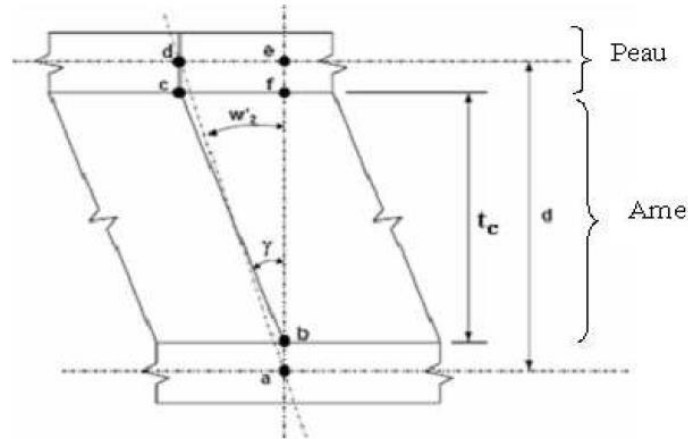


Figure 3.27. Déformation en cisaillement dans l'âme [94]

Le déplacement mesuré, pour un matériau sandwich soumis à la flexion trois points, se compose de deux parties indépendantes [95-96] :

- Le déplacement dû à la flexion w_1 ;
- Le déplacement dû au cisaillement w_2 ;

Avec : $w_t = w_1 + w_2$.

La flèche due à la flexion peut être calculée par la théorie classique de la flexion :

$$w_1 = \frac{P \times L^3}{48 \times D} \quad (3.20)$$

Le déplacement dû au cisaillement w_2 est obtenu par l'intégration de l'expression $\frac{\partial w_2}{\partial x} = \gamma \times \frac{c}{d}$ ce qui donne :

$$w_2 = \frac{P \times L}{4 \times S} \quad (3.21)$$

Finalement, la flèche totale s'exprime par :

$$w_t = w_1 + w_2 = \frac{P \times L^3}{48D} + \frac{P \times L}{4S}$$

III.6.2.2. Flexion quatre points

La figure 3.28 représente le schéma de l'essai de flexion quatre points.

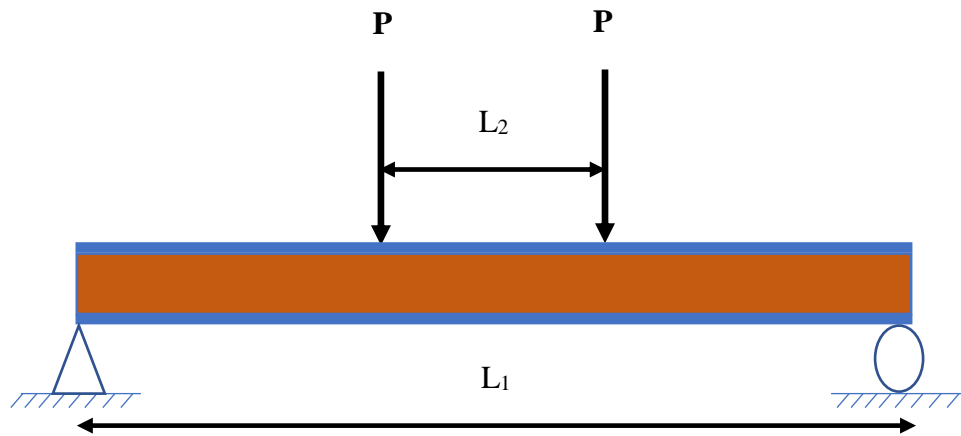


Figure 3.28. Flexion 4 points [97].

Dans le cas du chargement central d'une poutre (Fig. 2.28), le moment fléchissant s'écrit :

$$M = \frac{P(L_2 - L_1)}{2} \quad \text{pour } B < X < C \quad (3.23)$$

Où :

- L_1 est la distance entre les appuis intérieurs (BC)

- L_2 est la distance entre les appuis extérieurs (AD)

L'effort tranchant T :

$T = 0$ pour : $B < x < C$

$T = -P$ pour : $A < x < B$

$T = P$ pour : $C < x < D$

Les contraintes de traction, ou de compression dans les peaux sont alors :

$$\sigma_f = \pm \frac{M}{t_f \times d} \quad (3.24)$$

La contrainte maximale entre les appuis intérieurs s'écrit :

$$\sigma_{f,max} = \pm \frac{P(L_2 - L_1)}{2 \times t_f \times b \times d} \quad (3.25)$$

La contrainte de cisaillement maximale dans l'âme est donnée par la formule suivante :

$$\tau_{c,max} = \frac{P}{2 \times b \times d} \quad (3.26)$$

Le déplacement mesuré pour une poutre sandwich aux points de chargement $L_2/2$ et $(L_2-L_1)/2$ est donc la somme d'une contribution classique due à la flexion w_1 et d'une contribution due au cisaillement de l'âme w_2 de sorte que $w_t = w_1 + w_2$, avec :

- Au point $L_2/2$ (en raisonnant comme dans le cas de la flexion 3 points) :

$$w_1 = \frac{11 \times P \times L_2^3}{768D} \quad (3.27)$$

$$w_2 = \frac{P \times L_2}{8S} \quad (3.28)$$

$$w_t = P \left(\frac{11 \times L_2^3}{768D} + \frac{L_2}{8S} \right) \quad (3.29)$$

- Au point de chargement $(L_2 - L_1)/2$:

$$w_1 = \frac{P(L_2 - L_1)^2(L_2 + 2L_1)}{48D} \quad (3.30)$$

$$w_2 = \frac{(L_2 - L_1)}{4S} \quad (3.31)$$

$$w_t = w_1 = w_2 = \frac{P(L_2 - L_1)^2(L_2 + 2L_1)}{48D} + \frac{P(L_2 - L_1)}{4S} \quad (3.32)$$

Chapitre 4

Matériaux et méthodes d'élaboration

IV. Matériaux et méthodes d'élaboration

IV.1. Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse principalement à la présentation des différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude. Premièrement nous avons présenté le matériau de l'âme, qui est le liège aggloméré blanc produit en Algérie par l'entreprise Taliza liège, par la suite nous avons présenté les matériaux qui constituent les peaux de la structure sandwich, à savoir la résine époxy et la fibre de verre. En deuxième lieu les méthodes d'élaboration des matériaux composites stratifiés et des structures sandwiches ont été présentées. Finalement, les méthodes de caractérisation des structures sandwiches et de leurs constituants ont été présentées.

IV.2. Matériaux utilisés

IV.2.1. Le liège

Généralement les matériaux utilisés pour le noyau des matériaux sandwichs sont des nids d'abeilles, des mousses, et le bois de balsa, mais les développements récents ont abouti à de nouvelles solutions, telles que les matériaux naturels avec une morphologie cellulaire [98]. Le liège, une production méditerranéenne typique (Portugal, Espagne, Maroc, Algérie, et France) est un matériau poreux ayant des possibilités considérables d'utilisation [75-99]. Dans le Cadre de cette étude le matériau de l'âme qui a été utilisé est le liège aggloméré de moyenne densité.

IV.2.1.1. Présentation du liège aggloméré

Le liège aggloméré peut être considéré comme alternative pour l'âme du matériau sandwich, puisque le liège est un matériau cellulaire naturel avec quelques propriétés remarquables, telles que la tolérance élevée de dommages aux charges d'impact et une bonne isolation thermique et acoustique. En outre, le liège, est un matériau naturel, renouvelable et facilement réutilisable [79]. Le liège est un matériau naturel de structure cellulaire possédant des propriétés très intéressantes : faible densité, grande compressibilité dimensionnelle, d'après les travaux de H. Pereira [100]. Le liège est un bon isolant thermique, acoustique et vibratoire et stable chimiquement. D'après les travaux de (Li Y., Mai Y.W, Ye L. 2000) [101], les cellules de liège se composent principalement de la subérine et de la lignine (40% et 22%, respectivement), et de la cellulose (9%). Plusieurs études scientifiques ont porté sur le chêne-liège (croissance et production du liège), le liège naturel (biologie, chimie, propriétés et qualités du liège), le liège aggloméré (élaboration et caractérisation mécaniques et hygrothermiques). [67-102]. La transformation du liège naturel se fait dans l'Entreprise Nationale des lièges dénommée « Taleza Lièges » située à l'Est de l'Algérie.

Cette entreprise produit des panneaux de liège aggloméré blanc de moyenne densité (granulés utilisés : 1 à 2 mm, 2 à 3 mm, 3 à 5 mm) et de basse densité (granulés 4 à 16 mm), et ceci, pour différentes épaisseurs allant de 2 mm jusqu'à 30 mm en fonction de leurs applications industrielles. Dans cette étude, nous avons utilisé le liège aggloméré de moyenne densité avec des granulés de 3 à 5 mm (figure 4.29).



Figure 4.29. Lièges agglomérés de moyenne densité, granulé 3 à 5 mm.

Tableau 4.21. Caractéristiques de liège aggloméré blanc de moyenne densité produit en Algérie [6]

Masse volumique	180 à 270 kg/m ³
Dimension de granulé utilisé	3 à 5 mm
Allongement	5%
Comportement aux rayons solaires	Léger jaunissement après une année d'exposition,
Résistance aux acides	Après une heure dans l'acide chlorhydrique concentré de 201.19 gr/litre : aucune désagrégation de l'aggloméré.
Résistance à l'eau bouillante durant trois heures	Aucune désagrégation
Effet d'isolation :	Isolation thermique et phonique
Résistance au feu	Brûle difficilement

IV.2.2. Résine époxy

Le terme époxyde désigne une grande variété de prépolymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques qui, après polycondensation avec un durcisseur, conduisant à des produits thermo-durcis dont les principales applications concernent le collage et les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibre de verre ou de carbone). Les propriétés uniques de la résine époxyde, telles que la résistance thermique, un excellent produit chimique, un faible rétrécissement, un haut module et une contrainte élevée l'a rendue l'une des matrices les plus importantes utilisées en polymère renforcé de fibres.

Dans l'industrie, elle est largement répandue dans les applications telles que les structures aérospatiales, l'électronique, les enduits et les adhésifs. [103-104-105].

La fabrication des matériaux composites à matrice organique a été réalisée à partir de résines thermodurcissables sous toutes leurs formes, mais la forme liquide a été souvent choisie car elle favorise l'imprégnation des fibres à la température ambiante.

Nous pouvons probablement expliquer de cette façon le choix initial de matières thermodurcissables plutôt que celui des matières thermoplastiques qui possédaient pourtant les caractéristiques mécaniques nécessaires pour constituer des matrices intéressantes pour les composites, comme le montrent les études et les développements industriels actuels.

Les matières thermodurcissables sont des produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermodurcies ou thermorigides. Les matières thermorigides, dont la cohésion est assurée par des liaisons covalentes, ont des propriétés mécaniques qui sont peu affectées par la température : elles ne fondent pas, ne possèdent pas d'état caoutchouteux ; elles sont insolubles dans les solvants ; leurs coefficients de dilatation linéique, est plus faibles que ceux des matières thermoplastiques, sont encore abaissés par la présence des charges minérales qui leur sont souvent associées [106-107]. La résine époxyde utilisée dans le cadre de cette étude est la résine MEDAPOXY STR, fabriquée par l'entreprise algérienne GRANITEX, sise à la zone industrielle d'Oued Smar (Alger).

IV.2.2.1. Définition de la résine MEDAPOXY STR

C'est une résine époxy destinée à la stratification sur différents supports. Elle se présente sous forme de kit pré dosé de deux composants : élément A (la résine) et élément B (le durcisseur).

IV.2.2.2. Domaines d'application de la résine MEDAPOXY STR

- Stratification à la fibre de verre des réservoirs ou bassins contenant des produits chimiques (acides, bases, solvants, pétrole, etc.).
- Vitrification (sans fibre de verre) des bassins et réservoirs en béton et en acier.

IV.2.2.3. Caractéristiques de la résine MEDAPOXY STR

Le tableau 4.31 représente les caractéristiques de la résine MEDAPOXY STR, selon la fiche technique du produit.

Tableau 4.22. Caractéristiques de la résine MEDAPOXY STR

Caractéristiques	Valeurs
Densité	1,1 ± 0,05
Viscosité	11000 mPaS à 25°C
Durée pratique d'utilisation	1 heure et 15mn à 20°C et 65% HR
Temps de durcissement	16 heures à 20°C et 65% HR
Résistance à la compression	70 MPa
Résistance à la flexion	25 MPa
Adhérence sur béton	3 MPa

IV.2.2.4. Conditions d'utilisation de la Résine Epoxy

- Ne pas appliquer lorsque à la température ambiante ou celle du supporte est inférieure à 10°C ou supérieure à 30°C.
- L'humidité relative de l'air doit être inférieure à 80%.

IV.2.3. Fibres de verre

Les fibres de verre sont largement utilisées pour le renforcement des matériaux composites, pour ses qualités spécifiques, à savoir sa très bonne résistance mécanique, sa forte résistivité électrique, son inertie thermique et chimique. De plus, à l'inverse des fibres naturelles comme le lin et le chanvre aussi utilisées pour renforcer des thermoplastiques ou thermodurcissables, les fibres de verre humides ne moisissent pas. Sur la base de ces propriétés, les différents acteurs verriers ont développé et industrialisé de nouvelles compositions de fibres de verre pour le renforcement, Ainsi qu'ils classent les différents types de fibres de verres à l'aide d'une initiale E, D, A... se référant à la propriété majeure apportée par la fibre (tableau 4.23).

Tableau 4.23. Les différentes familles de fibres de renforcement (ASTM D578) [108].

Type	Propriétés générales	Composition
E (0 à 10% en masse B ₂ O ₃)	A usage général	Boro-aluminosilicate
E (5 à 10% en masse B ₂ O ₃)	A usage électronique	Boro-aluminosilicate
E-CR	Verre E modifié, présentant une résistance en milieu acide améliorée.	Aluminosilicate
D	Propriétés diélectriques améliorées.	Borosilicate
A	Forte teneur en alcalins (Li ₂ O, Na ₂ O et K ₂ O)	Verre sodocalcique (verre Float)
C	Bonne résistance en milieu acide (excepté acide HF).	Borosilicate d'alcalins.
R, S, S ₂ et H	Haute résistance mécanique.	Aluminosilicate
AR	Bonne résistance en milieux acides et basiques.	Zirconosilicate

Nous avons utilisé la fibre de verre tissé et de mat de type E, dans les fibres de verre tissé, les fils de chaîne et de trame s'entrecroisent alternativement, conduisant à un tissu très plats, stable, et peu déformable. Cette armure confère au tissu des propriétés mécaniques sensiblement identiques dans les deux directions (0° et 90°) chaîne et trame, avec une épaisseur de 0.39 mm. Les fibres de verre mat utilisé dans notre travail sont le mat de verre 450 g/m^2 . Le tableau 4.24 regroupe les caractéristiques mécaniques principales de la fibre de verre.

Tableau 4.24. Propriétés mécaniques de la fibre du verre.

Propriétés	Masse volumique (kg/m^3)	Module de flexion (GPa)	Résistance en flexion (MPa)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)	Module de cisaillement (GPa)
Fibre de verre	2600	74	1100	900	3200	30

IV.3. Méthodes d'élaboration

IV.3.1. Elaboration des éprouvettes de résine époxy

Les éprouvettes de la résine ont été élaborées à l'aide d'un moule métallique conçu spécialement pour la réalisation des éprouvettes à base de résine seulement, ces dernières ont les dimensions en forme d'haltère conformément à la norme NF EN ISO 527-4 type 2 [109], comme indiqué dans la figure 4.30 et le tableau 4.25.

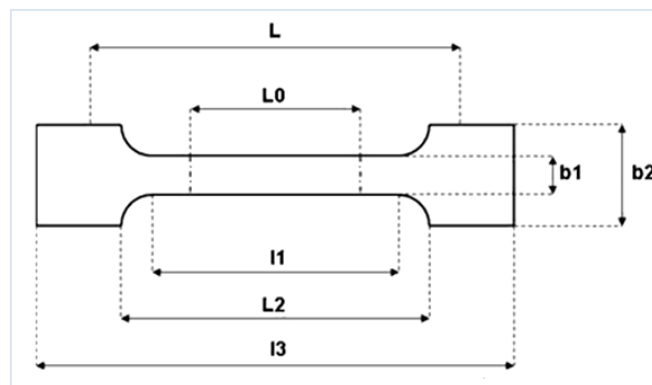


Figure 4.30. L'éprouvette de résine sous forme haltère.

Le tableau 4.25 représente les dimensions des éprouvette haltère selon la norme NF EN ISO 527-4.

Tableau 4.25. Les dimensions des éprouvettes haltère selon la norme NF EN ISO 527-4 [109]

Symboles	Les différentes dimensions	Les valeurs en « mm »
L3	Longueur totale	≥ 150
L1	Longueur de la partie étroite parallèle	$60 \pm 0,5$
R	Rayon	≥ 60
b ₂	Largeur aux extrémités	$20 \pm 0,2$
b ₂	Largeur de la partie étroite	$10 \pm 0,2$
h	Epaisseur	2 à 10
L ₀	Longueur de référence	$50 \pm 0,5$
L	Distance initiale entre mors	0,5 à 2

IV.3.2. Elaboration des stratifiés

Pour les besoins de notre travail pratique, nous avons réalisé un moule avec deux plaques en bois, sur lesquelles nous avons fixé du papier en cellophane pour faciliter le démoulage du matériau composite après durcissement.



Figure 4.31. Le moule utilisé pour la fabrication des stratifiés.

Les stratifiés ont été obtenus avec la méthode de moulage au contact. On mélange la résine soigneusement afin d'éviter la formation de bulles d'air.

Ensuite on verse une quantité de résine sur la plaque du moule, et ensuite on étale la résine sur toute la surface à l'aide d'ébulleur et puis on dépose sur la couche de résine un pli de fibre tissé, et on ajoute une couche de résine et puis un pli de fibre tissé, et ainsi de suite jusqu'à obtenir le nombre de plis voulu, par la suite la plaque supérieure de moule y est déposée et pressée avec une pression de 100 Kg/cm^2 à l'aide d'une presse hydraulique de type SIMI.

Le démoulage se fait après 24 heures, une fois les plaques durcies et polymérisées dans une étuve de séchage à 80°C pendant 8 heures, elles sont découpées en éprouvettes normalisées à l'aide d'une scie circulaire diamantée pour obtenir les dimensions $250 \times 25 \text{ mm}$ pour les essais de traction.

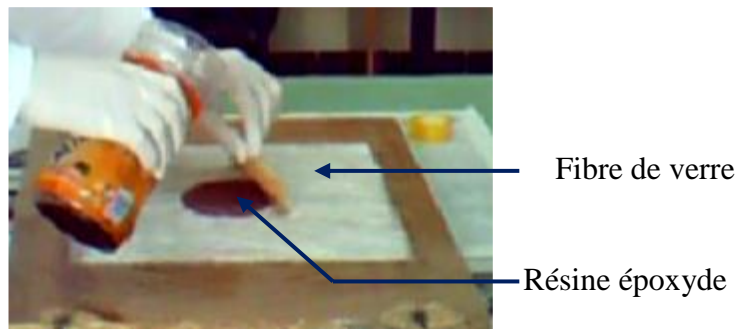


Figure 4.32. Elaboration du matériau composite stratifié.

Les plaques du composite obtenues sont découpées suivant la norme international NF EN ISO 527-4 [109], aux nombres de onze (11) éprouvettes, et sont divisées en deux (02) variantes suivant le nombre de plis que compose le stratifié fibre de verre/ résine époxy comme suit :

- Variante 01 : contient six (06) éprouvettes composées de six (06) plis.
- Variante 02 : contient cinq (05) éprouvettes composées de huit (08) plis.

Les dimensions des éprouvettes sont portées dans le tableau 4.26.

Tableau 4.26. Dimensions des éprouvettes du stratifié [109].

Symboles	Les différentes dimensions	Les valeurs en « mm »
L_3	Longueur totale	250
L_2	Distance entre talons	150 ± 1
b_1	Largeur moyenne	25
h	Epaisseur	4,00
L_0	Longueur recommandée pour les extensomètres	50 ± 1
L	Distance initiale entre mors	136
L_T	Longueur des talons	50
h_T	Epaisseur des talons	1

La figure 4.33 représente les dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais de traction pour les matériaux composites stratifiés [109].

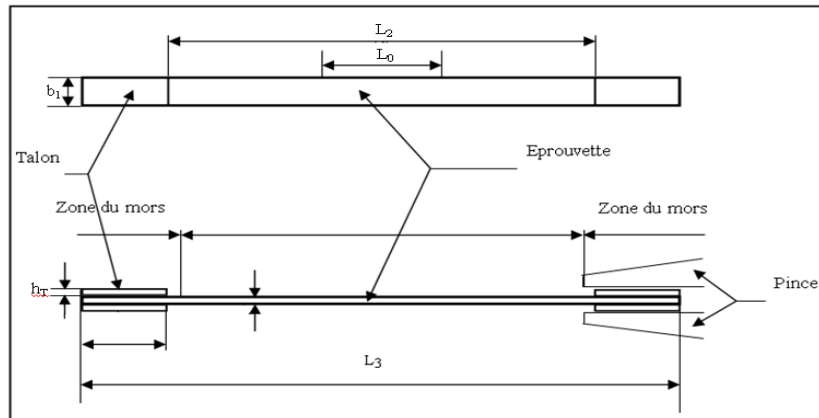


Figure 4.33. Dimensions de l'éprouvette pour essai de traction.

IV.3.3. Elaboration des structures sandwichs

Les techniques de fabrication jouent un rôle considérable dans les matériaux composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le produit fini. De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépendent surtout des caractéristiques mécaniques, de la géométrie du produit et l'importance des séries.

Dans ce travail, nous avons utilisé une des technologies manuelles de transformation qui est le moulage au contact.

IV.3.3.1. Moulage au contact

Le procédé de moulage au contact est manuel, il consiste à nettoyer d'abord le moule avec la cire qui est un agent de démoulage (dans notre cas on recouvre le moule par un papier cellophane sur laquelle on met le mélange de la résine pour coller les renforts et les plaques de liège). Ensuite, on procède à la disposition des couches successives de renfort et de liège imprégné avec de la résine époxy polymérisant à température ambiante, au moyen d'un pinceau et d'un d'égulleur qui sert à compacter et chasser les bulles d'air. L'ensemble est maintenu dans cet état sous pression (100 bar) pendant 24 heures. A la fin de la polymérisation nous procédons au démoulage.

Les plaques sandwichs ont été élaborées au sein de l'atelier bois de l'URMPE. Différentes plaques sandwichs sont élaborées. Elles sont constituées du liège aggloméré d'épaisseur de 16 mm et 4 mm pour l'âme, et pour les peaux, nous avons utilisé des nappes en fibre de verre (tissu).

IV.3.3.2. Préparation du renfort et du liège

Le renfort (fibres de verre tissé) et le liège doivent être découpés attentivement tout en respectant les dimensions (450×450 mm) à l'aide de scie métallique.

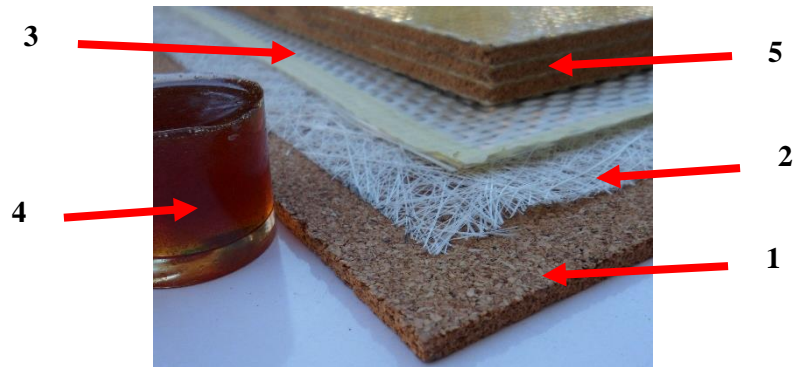


Figure 4.34. Matériau composite sandwich : 1- Liège aggloméré ; 2- Fibres de verre Mat ; 3- Fibres de verre tissé ; 4- Résine époxy (STR) et 5- Structure sandwich.

IV.3.3.3. Préparation de mélange de résine

La résine époxy est constituée de deux composants A (la résine) et B (le durcisseur), qui sont mélangés de la manière suivante : Élément **B** = 1/3 et l'élément **A** = 2/3.

- Pour chaque plaque de sandwich on utilise 200g de l'élément A et 100g de l'élément B.
- On agite pendant 3 à 5min pour assurer une dispersion totale du mélange.
- La durée de réticulation du mélange est courte, pour cela il faut l'utiliser juste après sa préparation.

IV.3.3.4. Réalisation des structures sandwichs

Nous avons élaboré des structures sandwichs multicouches, elles sont constituées avec des couches stratifiées à base d'une résine époxy renforcée par des fibres de verre tissé et mat ; entre lesquelles se trouvent des plaques de liège aggloméré empilées alternativement avec les couches stratifiées selon le type de la structure à réaliser, trois types de structures sandwichs ont été réalisés, pour chaque type il y a trois variantes, les structures sandwichs sont nommées comme suit :

➤ Série S20 :

- **S20T** : Structure sandwich avec une âme en liège de 20mm d'épaisseur placée entre deux couches de stratifié à base de fibre de verre tissé et la résine époxy.
- **S20M** : Structure sandwich avec une âme en liège de 20mm d'épaisseur placée entre deux couches de stratifié à base de fibre de verre mat et la résine époxy.
- **S20M+T** : Structure sandwich avec une âme en liège de 20mm d'épaisseur placée entre deux couches de stratifié à base de fibre de verre (tissé + mat) et la résine époxy.

➤ **Série S10 :**

- **S10T :** Structure sandwich avec empilement de trois couches de stratifiés à base de fibre de verre tissé et la résine époxy, entre lesquelles se trouve deux couches de liège de 10mm d'épaisseur.
- **S10M :** Structure sandwich avec empilement de trois couches de stratifiés à base de fibre de verre mat et la résine époxy, entre lesquelles se trouve deux couches de liège de 10mm d'épaisseur.
- **S10T+M :** Structure sandwich avec empilement de trois couches de stratifiés à base de fibre de verre (tissé + mat) et la résine époxy, entre lesquelles se trouve deux couches de liège de 10mm d'épaisseur.

➤ **Série S5 :**

- **S5T :** Structure sandwich avec empilement de cinq couches de stratifiés à base de fibre de verre tissé et la résine époxy, entre lesquelles se trouve quatre couches de liège de 5mm d'épaisseur.
- **S5M :** Structure sandwich avec empilement de cinq couches de stratifiés à base de fibre de verre mat et la résine époxy, entre lesquelles se trouve quatre couches de liège de 5mm d'épaisseur.
- **S5T+M :** Structure sandwich avec empilement de cinq couches de stratifiés à base de fibre de verre (tissé + mat) et la résine époxy, entre lesquelles se trouve quatre couches de liège de 5mm d'épaisseur.

La figure 4.35 représente les trois séries de structures sandwiches qui ont été réalisées.

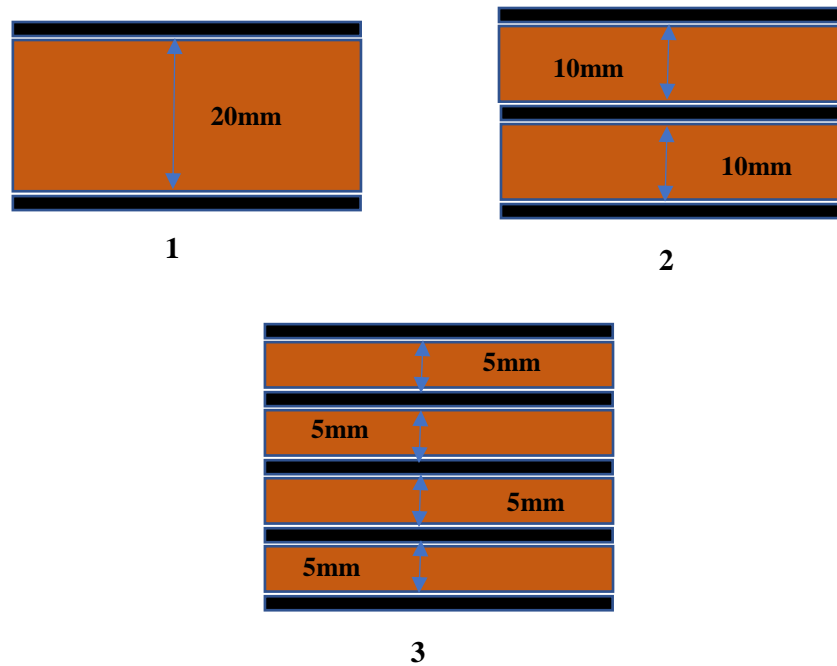


Figure 4.35. Les trois séries de structures sandwichs : 1) La structure S20, 2) La structure S10 et 3) La structure S5.

Une fois la préparation des matériaux est terminée, la réalisation des structures sandwichs est faite avec une pression de 100 MPa à l'aide d'une presse hydraulique de type SIMI (figure 4.36), pendant 24 heures.

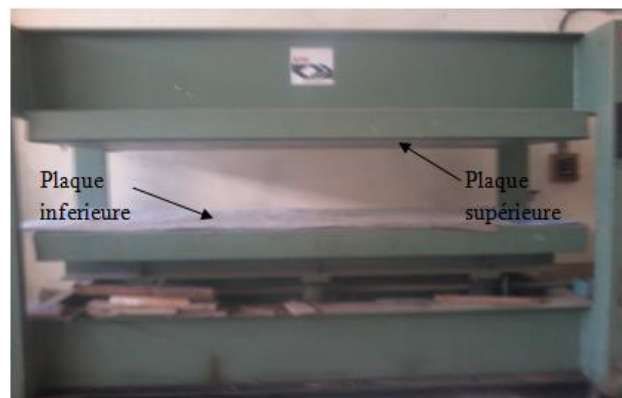


Figure 4.36. La presse hydraulique SIMI.

IV.3.3.5. Démoulage des structures sandwichs

Après 24 heures on enlève la plaque de la presse et puis on enlève le papier cellophane (figure 4.37).

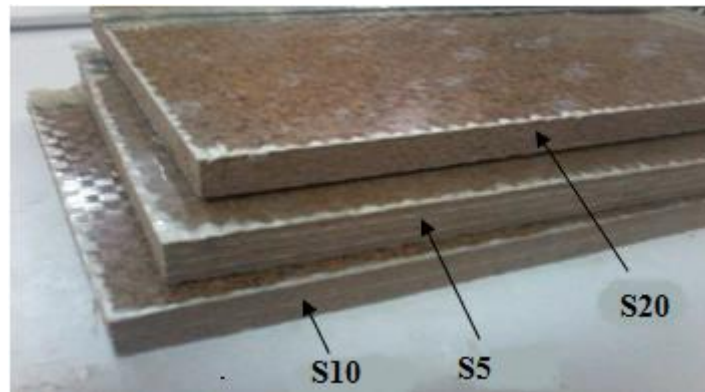


Figure 4.37. Les structures sandwichs après démoulage.

Une fois les plaques durcies et polymérisés dans une étuve de séchage à 80°C pendant 8 heures, elles sont découpées en éprouvettes normalisées (figure 4.38) à l'aide d'une scie circulaire diamantée.



Figure 4.38. Éprouvettes découpées suivant la norme AFNOR NF T 54-606.

Chapitre 5
Caractérisation des structures
composites élaborées

V. Caractérisation des structures composites élaborées

V.1. Méthodes de caractérisation

V.1.1. Essais sur le liège aggloméré

V.1.1.1. Analyse thermique

L'analyse thermique du liège aggloméré et des matériaux composites stratifiés a été effectuée à l'aide d'un CT mètre au niveau du Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du bâtiment (CNERIB).

➤ CT mètre

Le CT mètre est un appareil de mesure rapide, ayant les caractéristiques thermiques des matériaux homogènes et isotropes. Le principe de fonctionnement consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans la même sonde), à mesurer l'élévation de température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisée.

Une sonde fil est placée entre deux échantillons du liège (figure 4.39). Cette sonde est disposée dans une membrane en kapton montée en série avec un voltmètre et un générateur de courant qui contrôle, grâce à la loi de joule, la chaleur émise à la surface du liège. Après acquisition des données, la conductivité thermique est mesurée selon la norme NF EN 13170 [110].



Figure 5.39. Mesure de la conductivité thermique du liège à l'aide d'un CT mètre.

V.1.1.2. Essai d'absorption

Cet essai a été réalisé selon la norme NF EN 1609 [111], des échantillons ont été immergés partiellement dans l'eau pendant 24 heures, la masse m_0 (masse des spécimens examinés avant immersion) a été déterminée, ensuite les spécimens partiellement immergés dans l'eau pendant 24 heures ont été maintenus par un poids, de sorte qu'ils ne flottent pas sur l'eau (la figure 4.61). Après 24 heures d'immersion dans l'eau, l'égouttage des échantillons a été fait pendant 10 minutes, les échantillons sont placés verticalement.

La masse m_{24} (masse des spécimens après 24 heures d'immersion partielle dans l'eau) a été mesurée.



Figure 5.40. Essai d'absorption du liège dans.

V.1.1.3. Séchage en étuve

L'analyse de la variation de la masse du liège en fonction du temps est effectuée à une température de 100°C dans une étuve pendant 24 heures.

Les échantillons de lièges testés se caractérisent par les dimensions suivantes 50 x 50mm. Les échantillons ont été pesés avant l'essai, par la suite, des pesées ont été effectuées chaque heure pendant 10 heures pour quantifier la perte de masse.

V.1.1.4. Essai de traction

Les essais de traction sur des échantillons de liège aggloméré de moyenne densité ont été effectués suivant les sens longitudinal. Les échantillons de liège ont été découpés à l'aide d'une scie métallique aux dimensions 250x50x10mm (figure 5.41).

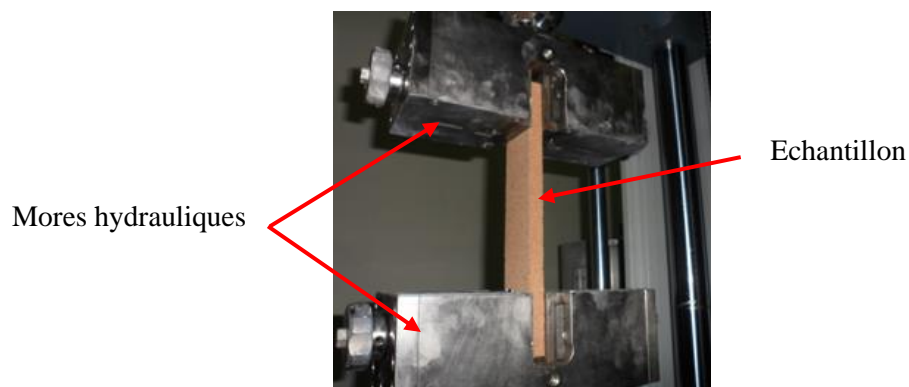


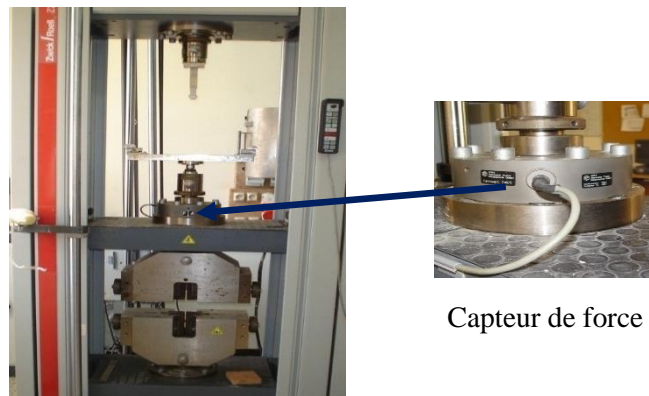
Figure 5.41. Essai de traction sur échantillon de liège.

V.1.2. Essais sur le matériau composite stratifié

V.1.2.1. Essai de traction

Les essais mécaniques de traction sur les différentes éprouvettes sont effectués sur des machines universelles pilotée par ordinateur ; équipé de logiciel testXpert V12 et munie d'un capteur de force 250 KN selon la norme NF EN ISO 527-4 [109] ; pour les essais sur des éprouvettes en fibres de verre tissé et en matériaux composites stratifiés.

Les essais de traction effectués sur des éprouvettes en résine époxy sont effectués à l'aide d'une machine munie d'un capteur de 10 KN. Les deux machines sont reliées à une chaîne d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la contrainte et de la déformation.



Capteur de force

Figure 5.42. La machine universelle.

Nous intéressons à la détermination des propriétés mécaniques usuelles telles que le module de déformation longitudinal (E), la contrainte maximale et la contrainte à la rupture (σ_{\max} et σ_{rup}) et la déformation maximale à la rupture (ϵ_{rup}) sur des éprouvettes de résine époxy, de fibre de verre et de matériau composite stratifié.

- **Principe de l'essai de traction**

Le principe de l'essai est de placer l'éprouvette normalisée entre les mors de la machine, et puis nous fixons les extensomètres au centre de l'éprouvette ; une force est appliquée sur l'éprouvette avec une vitesse de 2 mm/mn.



Figure 5.43. Eprouvette avant essai.



Figure 5.44. Eprouvette après essai.

V.1.2.2. Essai de calcination

L'essai de calcination permet de déterminer, pour un matériau composite, le taux de fibres en masse et celui de la résine selon la norme NF T 57-102 [112] et permet aussi de voir l'architecture des fibres dans chaque type de matériau utilisé.

- **Principe de l'essai**

Nous avons effectué des essais de perte au feu pour les deux variantes de matériaux composites stratifiés (6 plis et 08 plis). Les échantillons ont été pesés à sec et placés dans des creusets préalablement pesés, le tout est placé dans un four.

L'essai est réalisé à 600°C, température pour laquelle la résine est entièrement calcinée (environ 120 mn), après calcination l'ensemble est alors mis dans le dessiccateur, pour refroidissement pendant 30 min. Les fibres de verre récupérées après calcination ont été pesées pour déterminer le taux massique de la fibre de verre et déduire celui de la matrice.

La figure 5.45 représente la fibre de verre récupérée après essai de calcination sur le matériau composite stratifié.



Figure 5.45. Matériau composite après essai de calcination

- **Calcul du taux de renfort et de la résine :**

$$T_f = (m_f \times 100) \div m_s \quad (5.1)$$

$$T_R = (m_R \times 100) \div m_s \quad (5.2)$$

Avec :

T_f: taux de fibres et **T_R** : taux de résine.

m_s : masse de stratifié et **m_f**: masse des fibres.

m_R : masse de la résine.

V.1.3. Essais sur les structures sandwiches

V.1.3.1. Essai de flexion trois points et quatre points

Les essais de flexion trois et quatre points sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle ZO10 au niveau de l'unité de recherche UR-MPE (Figure 3.22 et 3.23), dotée d'un capteur de force de capacité 10 kN, selon la norme NF T 54-606 [113].

Cette machine est pilotée par ordinateur à l'aide de logiciel TextXpert 12.0 qui enregistre la courbe (force – déplacement). La vitesse de l'essai est de 2mm/mn.

Les figure 4.46 et 4.47 représentent respectivement les dispositifs des essais de flexion trois et quatre points.

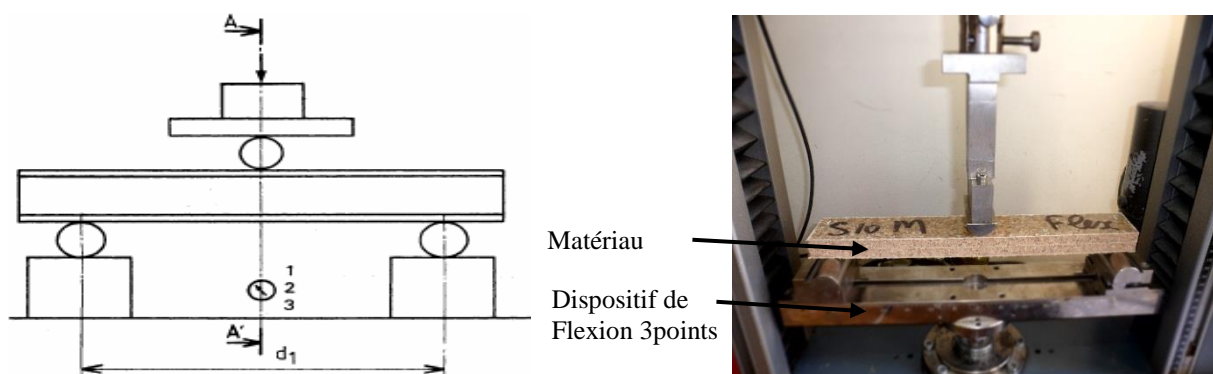


Figure 5.46. Machine universelle Zwick/Rolle ZO10 (essai de flexion 3 points).

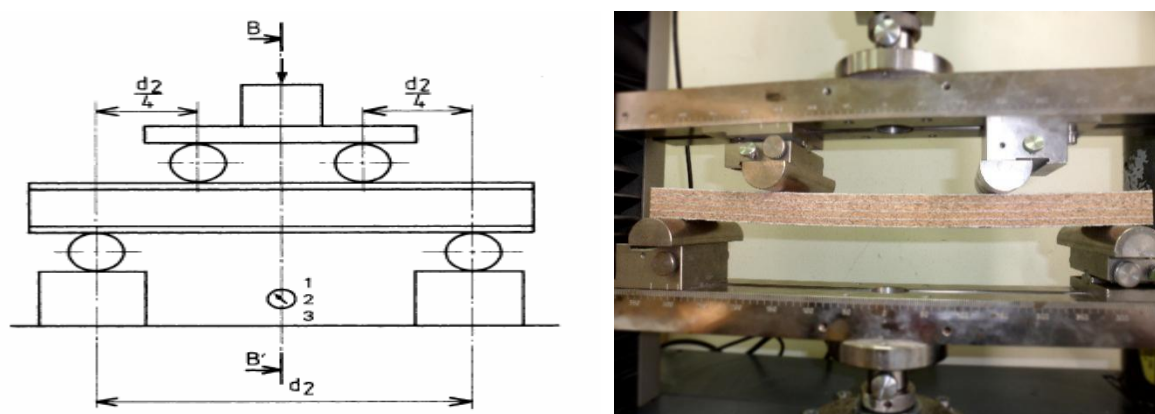


Figure 5.47. Machine universelle Zwick/Rolle ZO10 (essai de flexion 4 points).

➤ **Calcul de la contrainte normale**

La contrainte normale en flexion σ exprimée en N/mm² ou MPa est appelée aussi résistance à la traction ou à la compression des semelles (NF T 54-606) [113].

- Cas de la flexion 3 points :

$$\sigma = \frac{P_1 d_1}{2es (h + ea)b} \quad (5.3)$$

Avec :

P_1 : la charge à la rupture des semelles, exprimée en newtons, pour l'essai de flexion 3 points ;

d_1 : distance entre appuis (mm) pour l'essai de flexion 3 points ;

es : épaisseurs des semelles (mm) ;

ea : épaisseur de l'âme (mm) ;

h : hauteur totale de l'éprouvette (mm) ;

b : largeur de l'éprouvette (mm).

- Cas de la flexion 4 points :

$$\sigma = \frac{P_2 d_2}{4es (h+ea)b} \quad (5.4)$$

Avec :

P_2 : la charge à la rupture des semelles, exprimée en newtons, pour l'essai de flexion 4 points ;

d_2 : distance entre appuis (mm) pour l'essai de flexion 4 points ;

es, ea, h et b : ont la même signification que dans le cas de la flexion trois points.

➤ **Calcul de la rigidité en flexion D et la rigidité en cisaillement N de la structure sandwich**

La norme NF T 54-606 permet, à partir de résultats obtenus d'essais mécaniques flexion trois et quatre points sur des sandwichs, de définir le module de rigidité en flexion D, le module de cisaillement en flexion N et le module de cisaillement de l'âme G_a .

$$D = \frac{P_1 d_1^3 [1 - (11 d_2^2 / 8 d_1^2)]}{48 \cdot W_1 \cdot [1 - (2 \cdot P_1 \cdot \frac{d_1 \cdot W_2}{P_2 d_2 \cdot W_1})]} \quad (5.5)$$

$$N = \frac{P_1 d_1 \left(\frac{8 d_1^2}{11 d_2^2} - 1 \right)}{4 \cdot W_1 \cdot \left(\frac{16 \cdot P_1 d_1^3 W_2}{11 \cdot P_2 \cdot d_2^3 \cdot W_1} - 1 \right)} \quad (5.6)$$

➤ **Calcul du module de cisaillement de l'âme G_a**

$$G_a = N \cdot \frac{4 \cdot ea}{(h + ea)^2 \cdot b} \quad (5.7)$$

V.1.3.2. Essai de Compression perpendiculaire

Les essais de compression sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle Z250 au niveau de l'unité de recherche UR-MPE (Figure 5.48), dotée d'un capteur de force de capacité 250 kN. Cette machine est pilotée par ordinateur à l'aide du logiciel TextXpert 12.0 qui enregistre la courbe (contrainte – allongement). La vitesse de l'essai est de 2mm/mn.

Les essais de compression perpendiculaire sont réalisés suivant la norme NF T54-602 [114], l'éprouvette est à base carrée de section (50 x 50 mm).

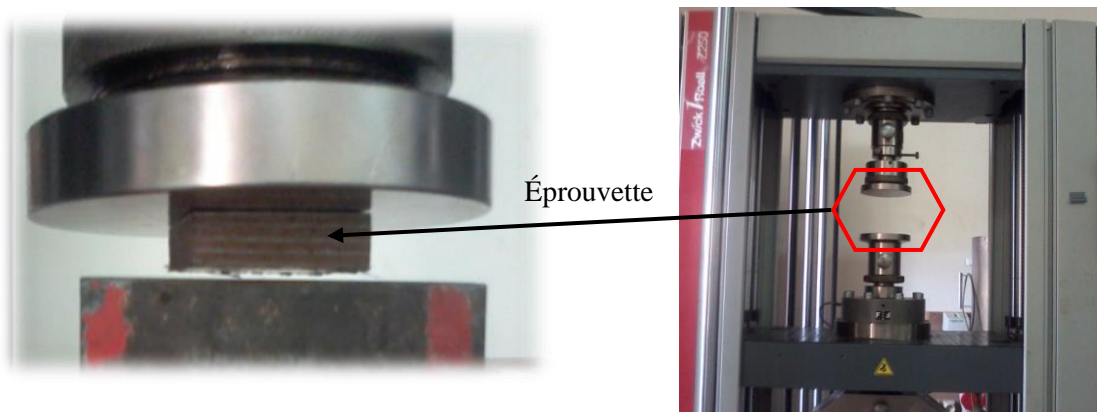


Figure 5.48. Dispositif pour l'essai de compression perpendiculaire.

V.1.3.3. Essai de traction perpendiculaire (essai d'arrachement)

L'essai de traction perpendiculaire d'une structure sandwich a été réalisé conformément à la norme NF T 54-603 (Novembre 1983) [115]. L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction normal aux semelles du sandwich, transmis à l'éprouvette par l'intermédiaire de dispositifs d'attache constitués par des plaques métalliques d'attaches épaisses indéformables, collés sur ces semelles avec une résine époxy. Les dimensions des spécimens sont de (50 x 50) mm².

Les tests ont été effectués sur une machine universelle du type Zwick, avec une vitesse de déplacement de la charge constante, fixée à 2 mm/min selon la norme en vigueur. La contrainte à la rupture en traction perpendiculaire, est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\sigma_r = \frac{F_r}{S_0} \quad (5.8)$$

Où : F_r : est la force à la rupture en N, de la structure sandwich ; S_0 : est l'aire initiale de la section droite de l'éprouvette (mm^2).



Figure 5.49. Essai de traction perpendiculaire.

V.1.3.4. Essai de compression longitudinal avec et sans flambement

Les essais de compression longitudinaux, avec ou sans flambement ont été réalisés afin de déterminer la résistance à la compression pour les deux cas, les essais ont été spécifiés dans la norme (NF T 54-604, 1986) [116] :

- Compression pure, si la longueur de l'échantillon est deux fois l'épaisseur totale de la structure sandwich.
- Compression avec flambement, si la longueur de l'échantillon est comprise entre 10 à 12 fois l'épaisseur totale de la structure sandwich.

Les échantillons ont été coupés avec une largeur de 30 mm et une longueur de 45 mm et 200 mm respectivement pour la compression pure et compression avec flambage. Les deux extrémités de section rectangulaire des échantillons ont été soigneusement usinés pour être plats, parallèles entre elles et perpendiculaires à la charge. Les essais ont été réalisés à une vitesse de traverse constante de 2 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. La contrainte maximale à la compression où déformation de la structure en sandwich est exprimée en MPa telle que :

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (5.9)$$

Où : F_m : est la force maximale en (N), et S_0 : est la section initiale de l'éprouvette (mm^2).

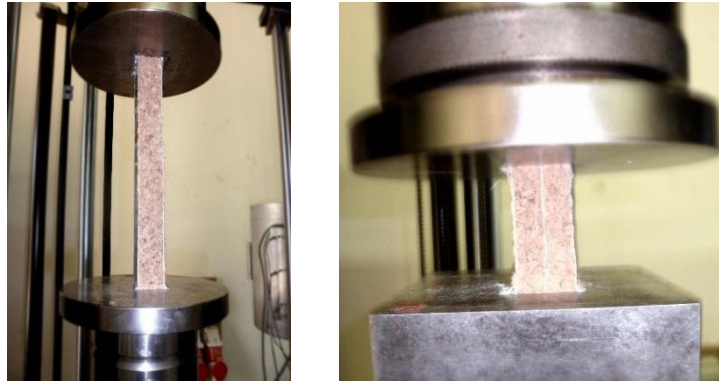


Figure 5.50. Essai de compression ; 1 : avec flambement et 2 : sans flambement.

V.1.3.5. Essai de cisaillement

La méthode d'essai de cisaillement est réalisée suivant la norme NF T 54-605 [117], qui permet la détermination des propriétés de cisaillement des structures sandwichs. L'essai consiste à soumettre une éprouvette d'essai avec des dimensions (250 x 50 x 20) mm³ à un effort de cisaillement transmis par l'intermédiaire du support métallique indéformable collé sur les semelles de l'éprouvette avec une résine époxy.

L'échantillon est fixé aux mors mécaniques de la machine grâce aux deux supports métalliques indéformables. La vitesse de déplacement du mors mobile est de 2mm/min. La figure 5.51 montre le montage que nous avons réalisé pour effectuer les essais de cisaillement.

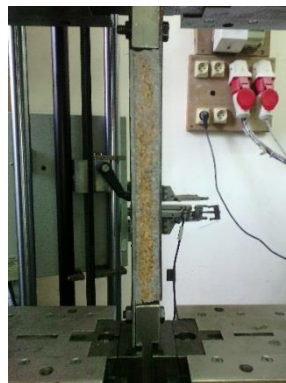


Figure 5.51. Dispositif pour l'essai de cisaillement.

V.1.3.6. Analyse hygrothermique des structures sandwichs

L'analyse hygrothermique a été effectuée sur les trois séries des structures sandwichs multicouches, l'analyse hygrothermique a été réalisée suivant deux types de caractérisation. La première consiste à étudier l'influence de la température et du temps de chauffage sur la perte de masse des structures sandwichs. La seconde caractérisation concerne l'analyse du pouvoir d'absorption d'eau des différentes structure sandwichs multicouches pour une durée de 24 heures suivant la norme NF EN 1609 [111].

➤ **Chauffage en étuve.**

L'analyse de la perte de masse des structures sandwichs sous l'effet de la température, a été effectuée dans une étuve ($T=100 \pm 5^\circ\text{C}$) pour une durée de 10 heures, (figure 5.52). Les échantillons des structures sandwichs testés ont été pesés avant l'essai ; par la suite, des pesées ont été effectuées chaque heure, pendant 10 heures pour quantifier la perte de masse.



Figure 5.52. Chauffage en étuve des structures sandwichs.

➤ **Analyse du pouvoir d'absorption d'eau des structures sandwichs multicouches**

L'essai consiste dans un premier temps à sécher les échantillons dans une étuve jusqu'à obtention d'une masse constante, ensuite, pesé les échantillons avant de les mettre en contact avec l'eau. Puis, immerger les échantillons dans l'eau jusqu'à la moitié de leurs épaisseurs, pendant une période de 24 heures selon la norme NF EN 1609 Juillet 1997 [111]. Les éprouvettes sont maintenues dans un bain-marie (figure 5.53). Après 24 heures, les éprouvettes sont retirées et placées verticalement pour être égouttées pendant 10 minutes. Une fois égouttées, les échantillons sont pesés. Le pouvoir d'absorption d'eau de ces échantillons est déterminé par l'équation suivante :

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \quad (5.10)$$

Avec : W_p : le pouvoir d'absorption (kg/m^2), m_0 : la masse initiale de l'échantillon en (kg), m_{24} : la masse de l'échantillon après 24h en(kg) et A_p : l'aire de l'échantillon en (m^2).



Figure 5.53. Détermination du pouvoir d'absorption d'eau des structures sandwichs.

V.2. Résultats et discussions

V.2.1. Résultats des essais sur le matériau de l'âme (liège)

V.2.1.1. Analyse thermique

Les spécimens utilisés pour la mesure de conductivité thermique ont été découpés suivant les dimensions 100mm de largeur et 150 millimètres de longueur, le liège aggloméré présente une épaisseur de 20mm et celle du matériau composite stratifié est de 4mm. Les résultats des essais de conductivité thermique sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5.27. Les résultats des essais de conductivité thermique pour le liège et le stratifié.

Conductivité thermique	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Liège (λ_L en W/m.°K)	0,042	0,043	0,039
Matériau stratifié (λ_s en W/m.°K)	0,078	0,081	0,077

La figure 5.54 représente la conductivité thermique du liège aggloméré.

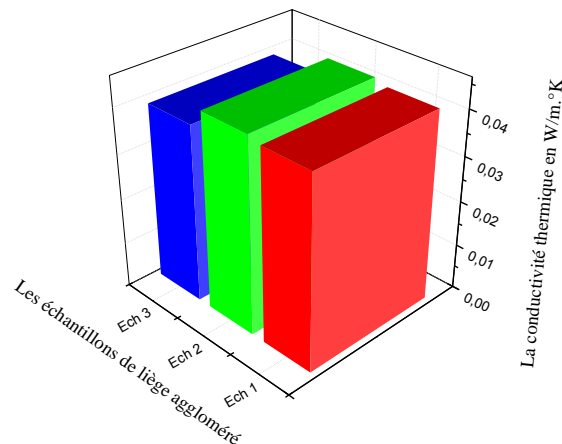


Figure 5.54. La conductivité thermique du liège aggloméré.

La figure 5.55 représente la conductivité thermique du composite stratifié.

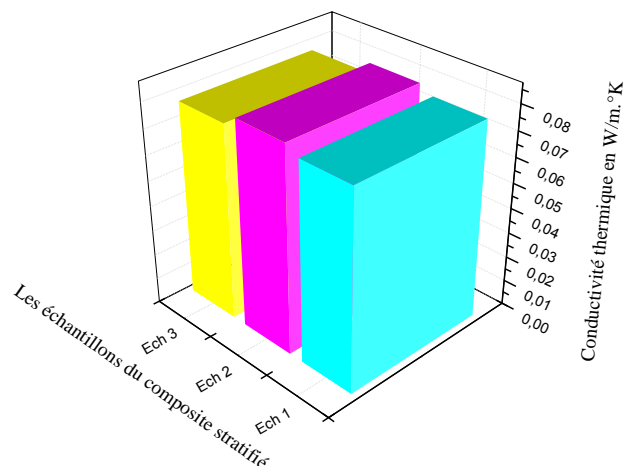


Figure 5.55. La conductivité thermique du composite stratifié.

Le tableau 5.27 et les figures 5.54 et 5.55 représentent la conductivité thermique du liège et du composite stratifié, d'après les résultats obtenus, en remarque que la conductivité moyenne des panneaux du liège aggloméré est de 0,041 W/m.°K, ce résultat est conforme à la norme NF EN 13170 [110]. La conductivité thermique du matériau composite stratifié est de 0,078 W/m.°K, les résultats obtenus sont conformes aux résultats existants dans la littérature, sachant que la conductivité thermique de la résine époxy est de l'ordre de 0,25 W/m.°K, celle de la fibre de verre est dans les alentours de 0,045 W/m.°K et les matériaux composites renforcés par des fibres de verres leurs conductivité est de l'ordre de 0,7 à 1,06. Les structures sandwichs réalisées dans le cadre de cette étude présentent de bonnes caractéristiques d'isolation thermique.

V.2.1.2. Pouvoir d'absorption d'eau

Ces essais ont été réalisés suivant la norme NF EN 1609 Juillet 1997 [111]. Les spécimens partiellement immergés dans l'eau durant 24 heures sont maintenus par un poids pour ne pas flotter sur l'eau (voir figure 5.76). Après 24 heures en immersion dans l'eau, l'égouttage des échantillons se fait pendant 10 minutes, les échantillons sont placés verticalement (figure 5.77). Le tableau 5.1 représente la masse initiale m_0 des spécimens testés avant l'immersion dans l'eau, la surface en contact avec l'eau, la masse après 24 heures d'immersion dans l'eau ainsi que pouvoir d'absorption W_p (kg/m²) des trois types de structures sandwichs.

Le calcul du pouvoir d'absorption d'eau W_p (kg/m²) a été déterminé suivant l'équation 5.1.

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \quad 5.11$$

Avec :

W_p : pouvoir d'absorption (kg/m²) ; m_0 : masse initiale (kg) ;

m_{24} : masse après 24h (kg) ; A_p : (aire) longueur x largeur (m²).

Le tableau 5.28 représente les masses « m_0 », « m_{24} », l'aire des échantillons « A_p » ainsi que la capacité d'absorption « W_p ».

Tableau 5.28. Le pouvoir d'absorption d'eau du liège et des structures sandwichs.

Matières	Masse initiale m_0 (Kg)	Aire A_p (m ²)	Masse après 24h m_{24} (kg)	Pouvoir d'absorption W_p (kg/m ²)
Liège 20mm	10.07 x10 ⁻³	2.5x10 ⁻³	15.96 x10 ⁻³	2.356
Liège 5mm	2.74 x10 ⁻³	2.5x10 ⁻³	6.73 x10 ⁻³	1.596
S5	18.95 x10 ⁻³	2.5x10 ⁻³	19.32 x10 ⁻³	0.148
S10	21.41 x10 ⁻³	2.5x10 ⁻³	22.08 x10 ⁻³	0.268
S20	23.67 x10 ⁻³	2.5x10 ⁻³	24.64 x10 ⁻³	0.388

Les figures 5.56 et 5.57 représentent l'essai d'absorption d'eau pour le liège aggloméré et les structures sandwichs multicouches.

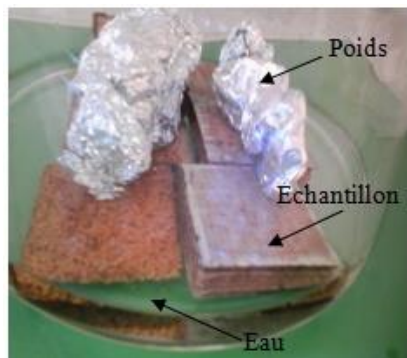


Figure 5.57. Immersion partielle du liège dans un bac à eau.



Figure 5.56. Egouttage des échantillons pendant 10 minutes.

La figure 5.59 représente l'histogramme des valeurs du pouvoir d'absorption d'eau du liège aggloméré (5 et 20 mm) et celui des structures sandwichs en immersion partielle dans un bac d'eau pendant 24 heures.

On remarque que le pouvoir d'absorption du liège aggloméré est plus élevé comparé à celui des structures sandwichs S20, S10 et S5. Le liège 20 mm possède un pouvoir d'absorption de l'ordre de $2,356 \text{ Kg/m}^2$ et le liège 5 mm a un pouvoir d'absorption de l'ordre de $1,596 \text{ Kg/m}^2$. Cette capacité d'absorption d'eau est certainement liée au taux de porosité élevée que présente le liège aggloméré, elle peut être expliquée par de petites dimensions des pores de liège aggloméré [67-30], qui permet une bonne conservation de l'eau.

Même remarque pour les structures sandwichs, d'après l'histogramme du pouvoir d'absorption d'eau de la figure 5.59, on note que le pouvoir d'absorption des trois types de structures sandwichs varie entre 0.148 et 0.388 kg/m^2 , ces dernières valeurs sont faibles comparativement à celles du liège aggloméré, cette diminution du pouvoir d'absorption des structures sandwichs est due principalement à la présence des couches de stratifié et aussi la résine qui pénètre dans les pores du liège aggloméré et de ce fait l'absorption des structures sandwichs sera réduite. Cette différence est liée à l'existence de résine entre les granules de liège qui empêche l'eau de pénétrer à l'intérieur des pores du liège (figure 5.58). Les travaux réalisés par Lakreb et al [118], sur l'absorption des structures sandwichs à base du liège aggloméré possèdent un pouvoir d'absorption de l'ordre de 0.19 Kg/m^2 à 0.58 Kg/m^2 , ces derniers résultats montrent une certaine concordance avec les résultats obtenus dans le cadre de notre étude.

Les figures 5.58 représente une photo MEB montrant la porosité dans le liège aggloméré.

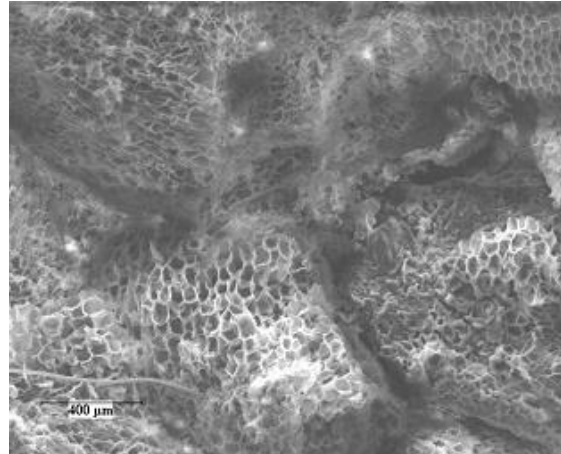


Figure 5.58. Photo MEB montrant la porosité dans le liège aggloméré [67].

La figure 5.59 représente l'historgramme du pouvoir d'absorption d'eau des lièges et des sandwichs.

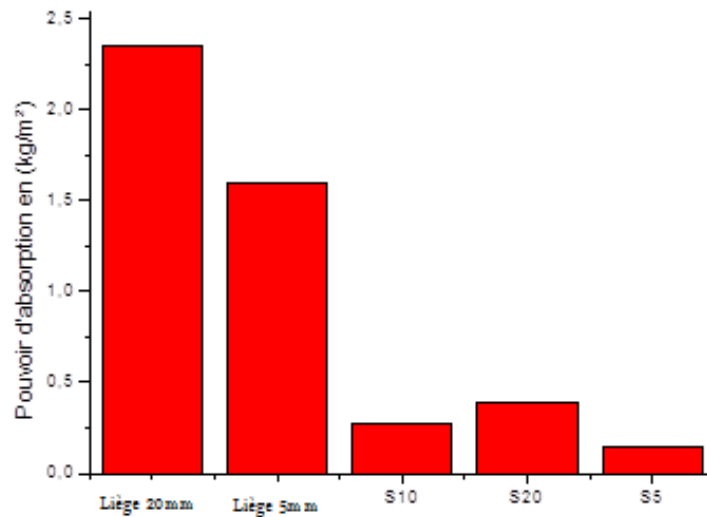


Figure 5.59. Histogramme du pouvoir d'absorption d'eau des lièges et des sandwichs.

V.2.1.3. Séchage en étuve

L'analyse de la variation de la masse du liège et des structures sandwichs en fonction du temps est effectuée à une température de 100°C dans une étuve pendant 10 heures. Les échantillons ont été pesés avant l'essai, par la suite, des pesées ont été effectuées chaque heure pendant 10 heures pour quantifier la perte de masse.

La figure 5.60 montre la variation de la masse du liège aggloméré en fonction du temps de séchage en étuve à 100°.

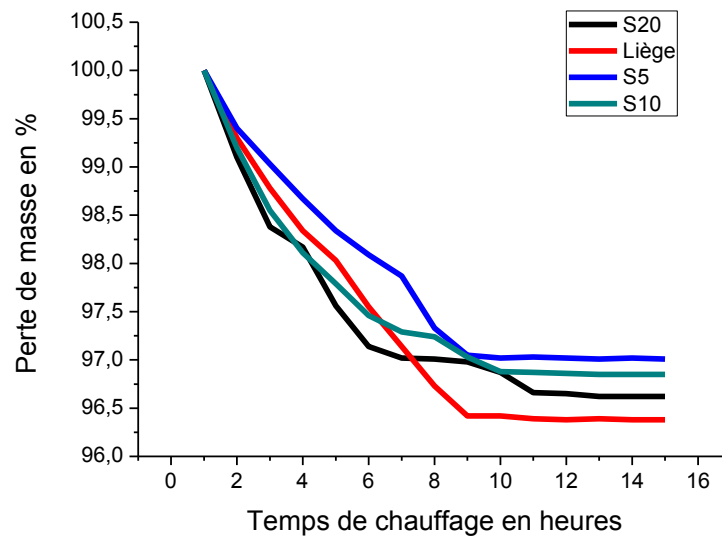


Figure 5.60. Variation de la masse du liège en fonction du temps de chauffage à 100°C.

D'après les résultats de la figure 5.80, on remarque que le liège perd dans les 10 premières heures entre 3 et 3,5% de sa masse, ensuite la perte de masse est presque nulle jusqu'à la fin de la durée de chauffage des échantillons de structures sandwichs. D'après les travaux de MIR [67] sur les matériaux composites sandwichs avec âme à base de liège, il a constaté que le sandwich SC190-20 perd dans les 10 premières heures de séchage en étuve 3 % de sa masse, par la suite de 10 heures jusqu'à 24 heures il perd 0,8 % de sa masse.

V.2.1.4. Essai de traction sur le liège aggloméré

La figure 5.61 montre l'évolution de la contrainte de traction en fonction de l'allongement de liège aggloméré de moyenne densité, la contrainte maximale moyenne de rupture est $\sigma_{\max} = 0,35$ MPa, cette dernière est faible parce que le liège est un matériau cellulaire naturel qui présente un taux de porosité très élevé, par conséquent un allongement moyen de 9,5%, ces résultats sont conformes aux résultats obtenus par Hasim [77].

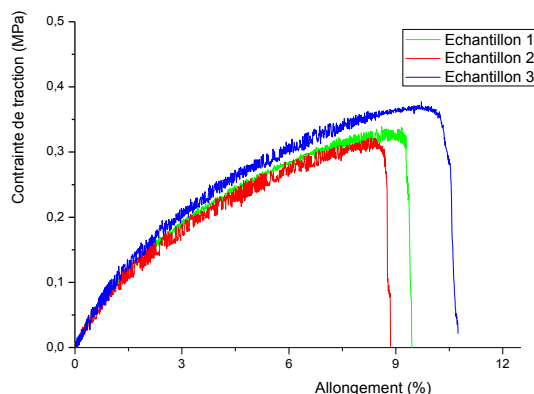


Figure 5.61. Comportement en traction du liège aggloméré.

V.2.2. Résultats des essais sur le matériau composite stratifié

V.2.2.1. Essai de calcination

Le tableau 5.29 représente les résultats de l'essai de calcination appliqué sur les deux types de stratifiés (6 plis et 8 plis).

Tableau 5.29. Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction

Type de stratifier	(Six plis)				(Huit plis)			
N° d'échantillon	1	2	3	Moy	1	2	3	Moy
La masse du stratifie (m) (avant la calcination)	2.06	2.05	2.07	2.06	2.91	2.91	2.91	2.91
La masse du stratifie (m _s) (après la calcination)	1.02	0.99	1.03	1.01	1.50	1.50	1.50	1.50
La masse de fibre (m _f)	1.02	0.99	1.03	1.01	1.50	1.50	1.50	1.50
La masse de la résine (m _R)	1.04	1.04	1.04	1.04	1.41	1.41	1.41	1.41
Taux de renfort (T _f) en (%)	49.47	48.92	49.75	49.38	51.54	51.56	51.55	51.55
Taux de Résine (T _R) en (%)	50.53	51.08	50.25	50.62	48.46	48.41	48.48	48.45

• Interprétation des résultats

D'après les résultats du tableau 5.38 on remarque que le taux de renfort est de 49,38% pour le matériau composite stratifié avec six plis de fibres de verre tissé et de 51,55% pour le stratifié avec huit plis de fibre de verre tissé. Par contre le taux de matrice est de 50,62% pour le matériau composite stratifié avec six plis et de 48,45 pour le stratifié avec huit plis de fibres de verre tissé. Les taux de renfort et de résine sont presque semblables pour les deux matériaux composites stratifiés, cette ressemblance peut être expliquée par le fait que nous avons utilisé un même procédé de fabrication, qui est le moulage au contact [40].

V.2.2.2. Essai de traction sur des éprouvettes en résine époxy

La Figure 5.62 représente la contrainte de traction en fonction de la déformation de la résine époxy.

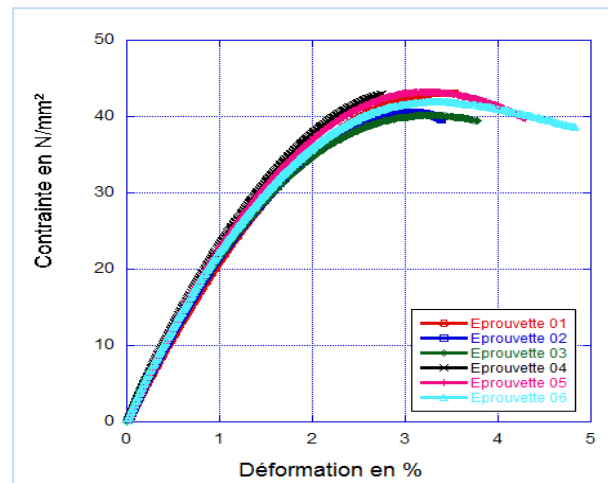


Figure 5.62. Comportement en traction de la résine époxy.

• Interprétation des résultats

La figure 5.62 représente l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale, on remarque un comportement mécanique en traction similaire pour toutes les éprouvettes testées, ce qui signifie que la résine époxy utilisée dans cette étude est d'une bonne homogénéité, la contrainte maximale à la rupture dépasse les 40 MPa, ce qui est conforme avec la fiche technique du produit.

Les caractéristiques mécaniques des éprouvettes élaborées avec de la résine époxy sont représentées dans le tableau 5.30.

Tableau 5.30. Caractéristiques mécaniques de la résine époxy.

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	Moyenne
Module de YOUNG en (MPa)	2370	2610	2540	2710	2610	2650	2581.66
Contrainte maximale en (MPa)	43.12	40.52	40.12	42.89	43.21	41.91	41.96
Déformation en (%)	3.49	3.05	3.22	2.75	3.24	3.32	3.17

D'après les résultats du tableau 5.30, on constate que le module de YOUNG moyen obtenu expérimentalement est de l'ordre de 2581 MPa, la contrainte maximale moyenne est de 41,96 MPa avec une déformation moyenne de l'ordre de 3,17 %.

V.2.2.3. Essai de traction sur des éprouvettes en fibres de verre tissé

La figure 5.63 représente la Variation de la force en fonction du déplacement de la fibre de verre (tissé).

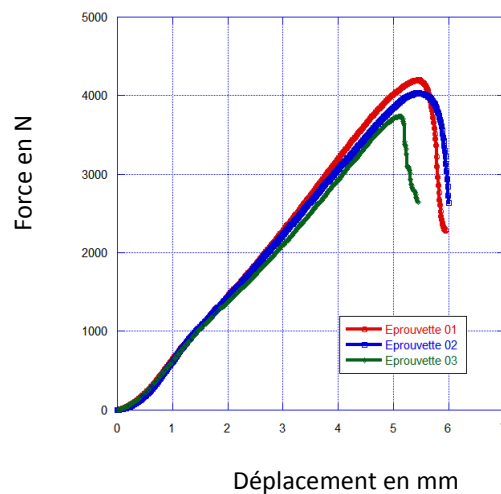


Figure 5.63. Comportement en traction de la fibre de verre de type tissé.

- **Interprétation des résultats**

On remarque que le comportement de la fibre de verre de type tissé en traction (figure 5.63) est linéaire jusqu'à une force maximale moyenne de 3990 N, dont le déplacement moyen correspondant est de 5.35 mm, au-delà de cette valeur il y a rupture des éprouvettes en fibres de verre de type tissé, c'est-à-dire la rupture des fibres de verres est fragile [119].

V.2.2.4. Essai de traction sur le stratifié à base de fibres de verre (tissé) et de résine époxy

La figure 5.64 illustre la variation de la contrainte en fonction de la déformation en traction pour le matériau composite stratifié verre/époxy suivant deux variantes, la variante 01 à gauche (composée de 6 plis de fibres de verre) et la variante 02 à droite (composée de 8 plis de fibres de verre).

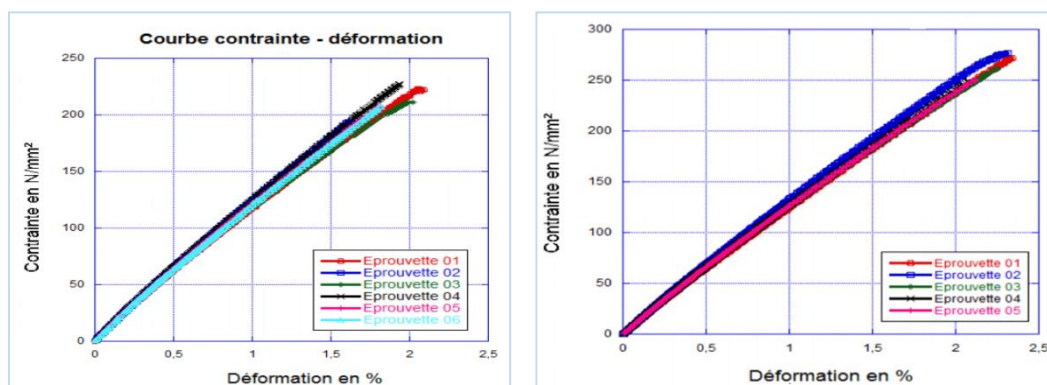


Figure 5.64. Comportement en traction des stratifiés (la variante à gauche (six plis) et à droite huit plis).

La même méthode de calcul pour la résine époxy est utilisée pour la détermination des caractéristiques mécaniques en traction du stratifié fibre de verre /résine époxy, les résultats sont portés dans le tableau 5.31.

Tableau 5.31. Caractéristiques mécaniques à la traction du stratifié verre / époxy (variante 01).

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	6	Moyenne
Module de YOUNG en (MPa)	13000	13400	13100	13600	13400	13500	13333.33
Contrainte maximale en (MPa)	222.69	195	211.09	226.93	208.20	207.71	211.93
Déformation en (%)	2.05	1.62	1.99	1.93	1.80	1.82	1.86

Le tableau 5.32 représente les caractéristiques mécaniques (module de YOUNG, contrainte maximale et déformation relative) du stratifié verre/ résine variante 02 à la traction.

Tableau 5.32. Caractéristiques mécaniques à la traction du stratifié verre/ époxy (variante 02).

N° de l'éprouvette	1	2	3	4	5	Moyenne
Module de YOUNG en (MPa)	13600	14500	13800	14000	13700	13920
Contrainte maximale en (MPa)	272.18	276.95	262.60	249.41	250.61	262.35
Déformation en (%)	2.34	2.30	2.24	2.08	2.11	2.21

• Interprétation des résultats

La figure 5.64 (variante 01 et variante 02) représente l'évolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation longitudinale, les courbes présentent clairement une déformation élastique, caractérisée par un comportement linéaire de toutes les éprouvettes jusqu'à la rupture ce qui indique que le matériau stratifié fibre de verre/résine époxy présente une rupture fragile. En comparant les contraintes maximales de la variante 01 et 02 (figure 5.64), on constate que la contrainte maximale de la variante 02 (autour de 262.352 N/mm²) est légèrement supérieure à la contrainte maximale de la variante 01 (autour de 215 N/mm²), cette différence peut être expliquée par le nombre de plis de fibres de verre tissé que contient la variante 02, cette dernière est réalisée avec 8 plis de fibres de verre tissé.

Par contre la variante 01 est réalisée avec 6 plis, par ce que c'est les fibres qui assurent la tenue mécanique du matériau composite stratifié, donc en augmentant le nombre de plis la résistance mécanique du matériau composite stratifié augmente.

On constate aussi que le module de YOUNG du stratifié de la variante 01 et 02 (autour de 13.5 GPa) est 5 fois plus supérieur aux valeurs de la résine époxy (autour de 2.6 GPa) et 3 fois inférieur aux valeurs de la fibre de verre (tissé) (autour de 41GPa). Cela est le résultat de la combinaison de deux matériaux différents qui sont la résine époxyde et la fibre de verre.

La résine a pour rôle de maintenir la fibre de verre dans sa position initiale, et lui transmis les charges extérieures d'une manière uniforme. De son côté la fibre de verre, apporte au stratifié la résistance mécanique.

V.2.3. Résultats des essais sur les structures sandwichs

V.2.3.1. Essai de flexion trois points

Les essais de flexion trois points sont effectués sur trois types de structures sandwichs, les dimensions des éprouvettes qui ont été découpées des structures sandwichs sont de (320 x 20) mm². Ces essais ont été effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle ZO10 au niveau de l'unité de recherche UR-MPE, cette machine est dotée d'un capteur de force de capacité 10 kN. La figure 5.65 représente le montage d'essai de flexion trois points.

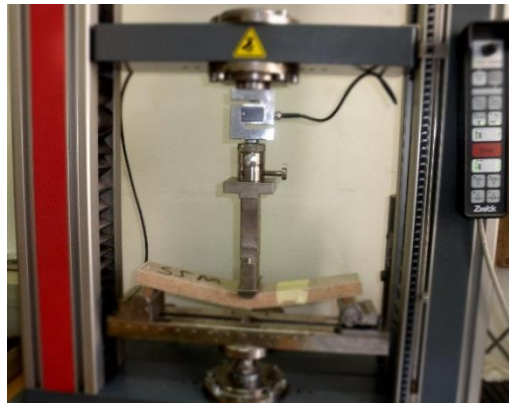


Figure 5.65.Montage d'essai de flexion trois points.

Les figures 5.66, 5.67 et 5.68 représentent les courbes force-déplacement en flexion 3 points des structures sandwichs : S5M, S5T et S5M+T.

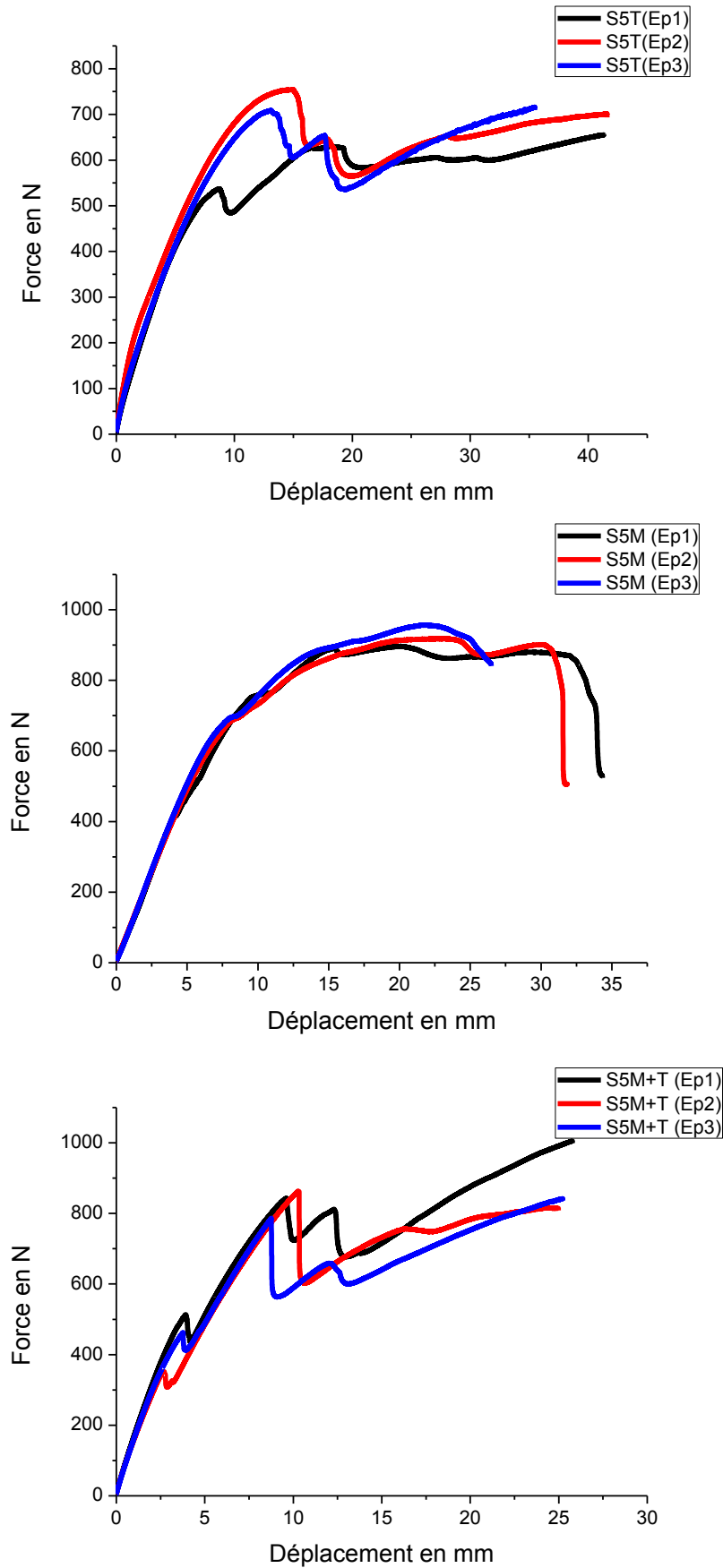


Figure 5.66. Comportement en flexion 3 points des structures sandwiches « S5 ».

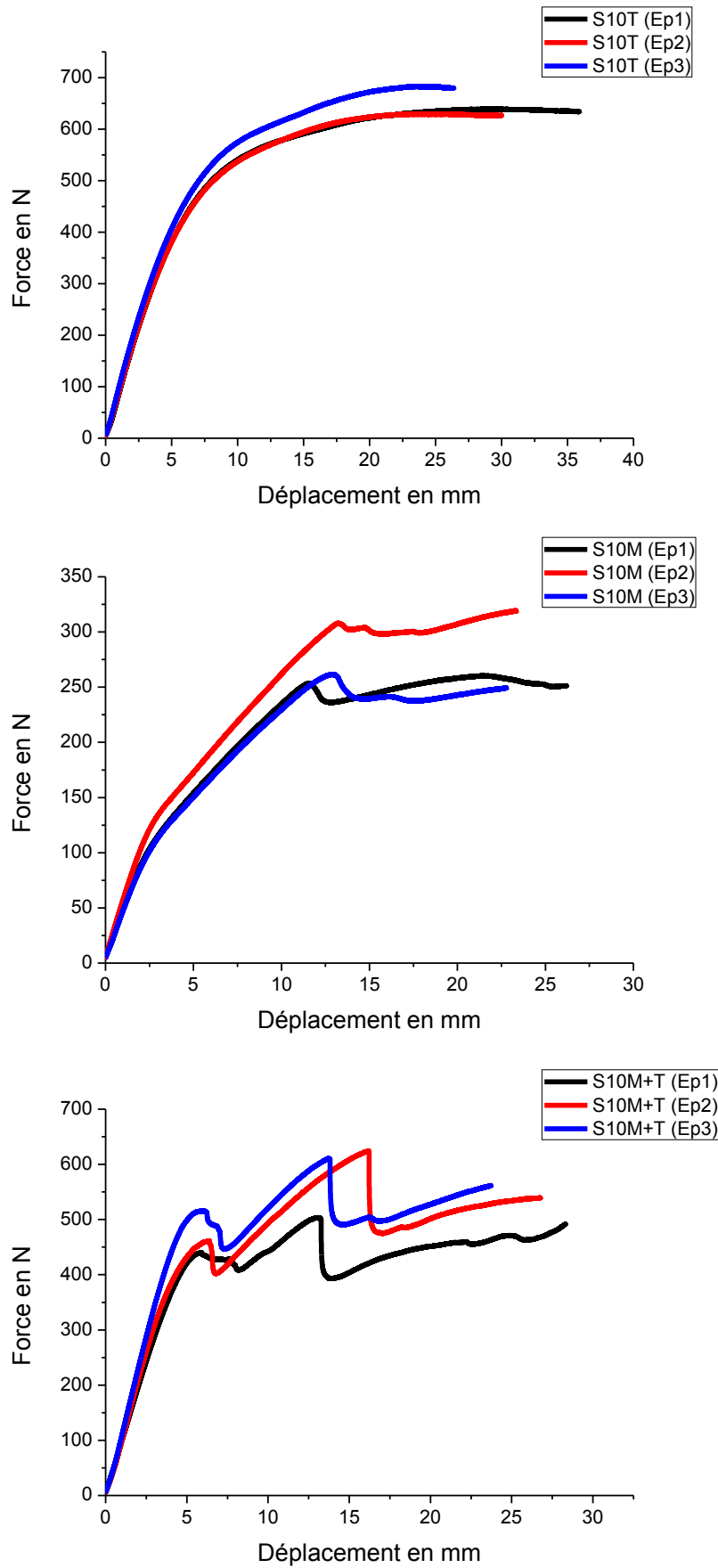


Figure 5.67. Comportement en flexion 3 points des structures sandwichs « S10 ».

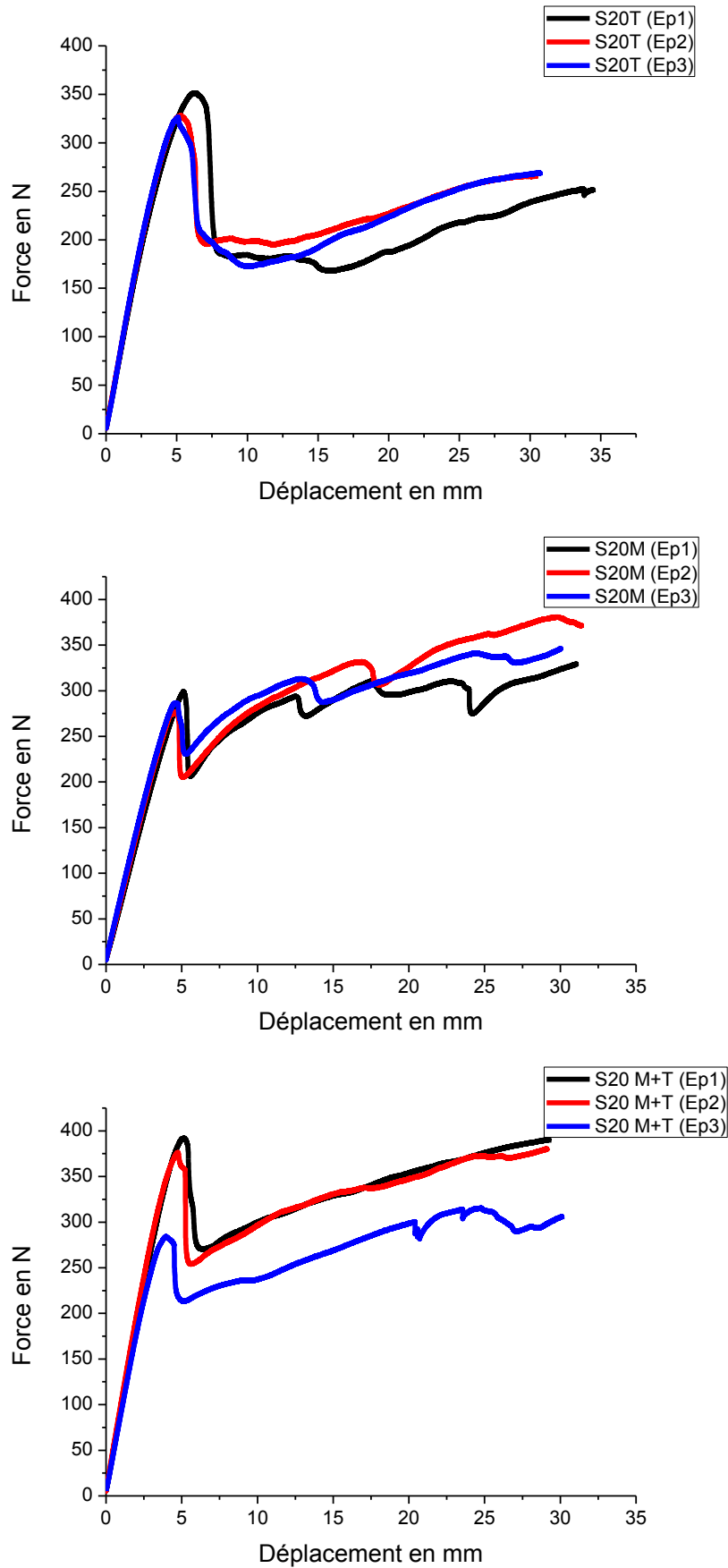


Figure 5.68. Comportement en flexion 3 points des structures sandwiches « S20 ».

V.2.3.2. Essai de flexion quatre points

Les essais de flexion quatre points sont effectués sur la machine utilisée pour les essais de flexion trois points. Nous avons gardé les mêmes conditions expérimentales.

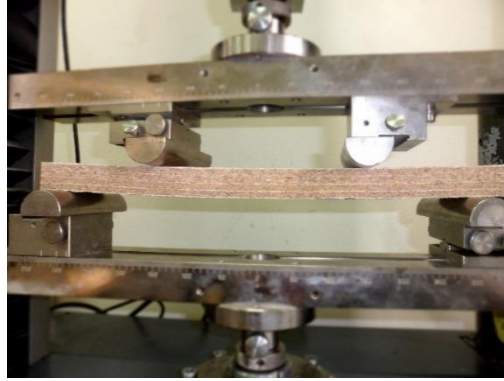


Figure 5.69. Montage de l'essai de flexion trois points.

Les figures 5.70, 5.71 et 5.72 représentent les courbes force-déplacement en flexion quatre points des structures sandwiches S5, S10 et S20.

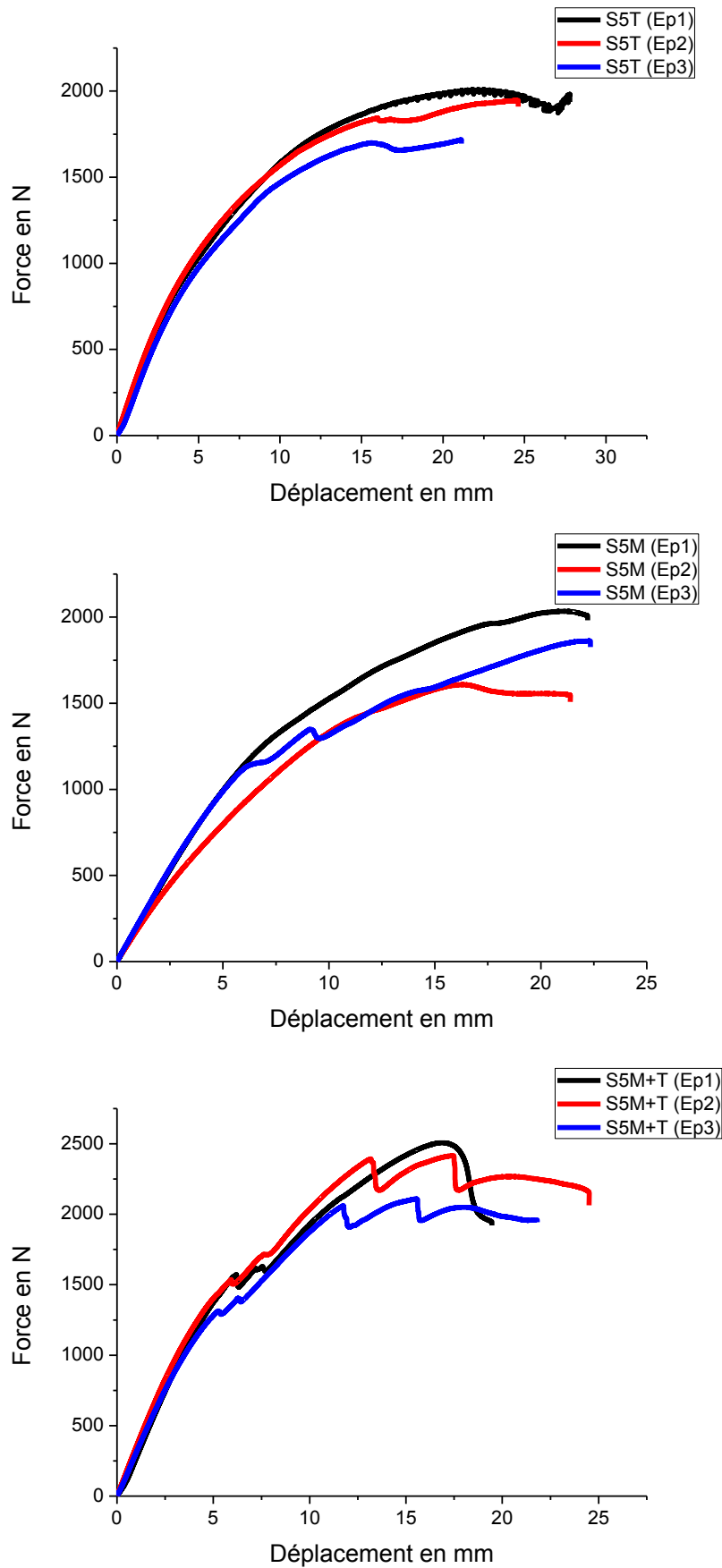


Figure 5.70. Comportement en flexion 4 points des structures sandwiches « S5 ».

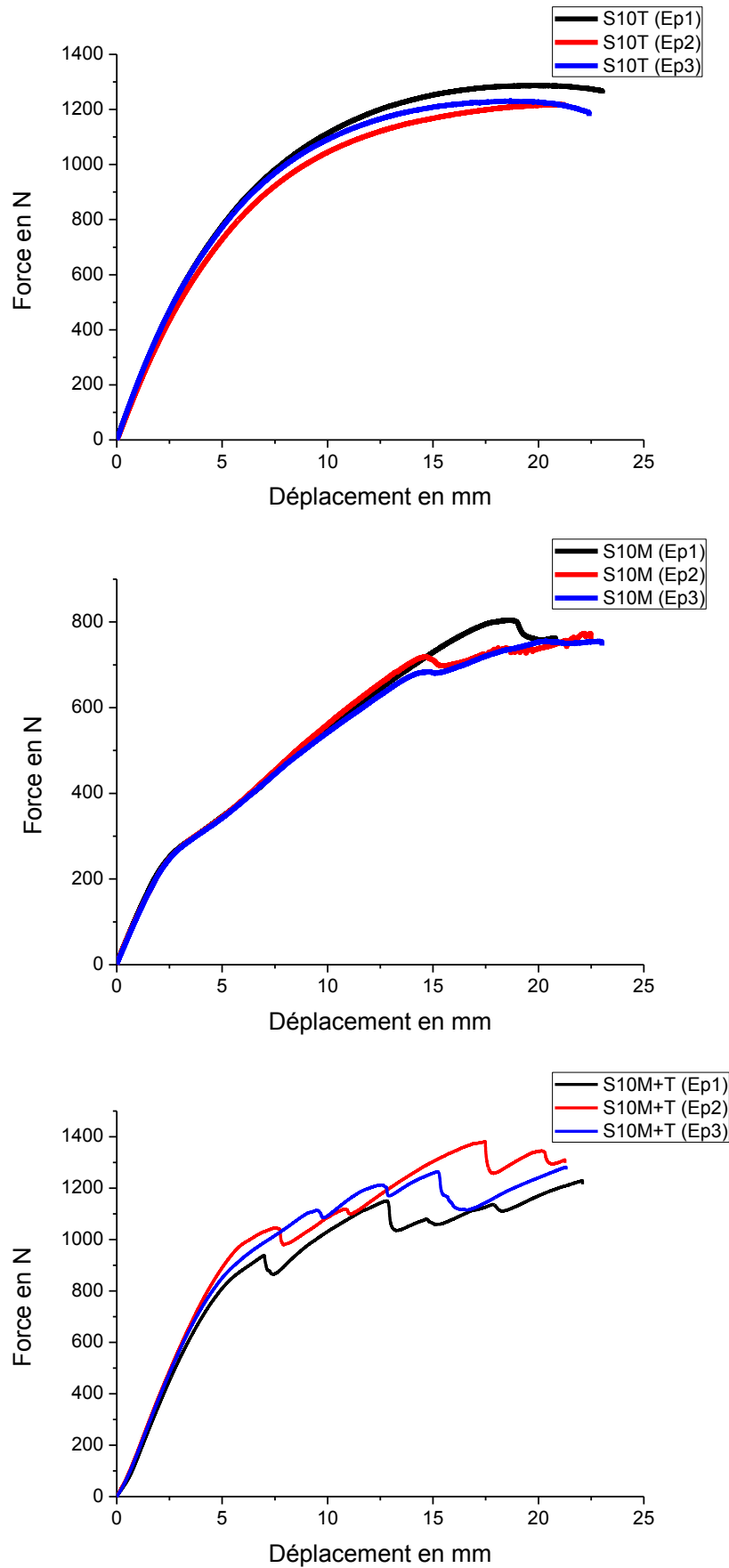


Figure 5.71. Comportement en flexion 4 points des structures sandwiches « S10 ».

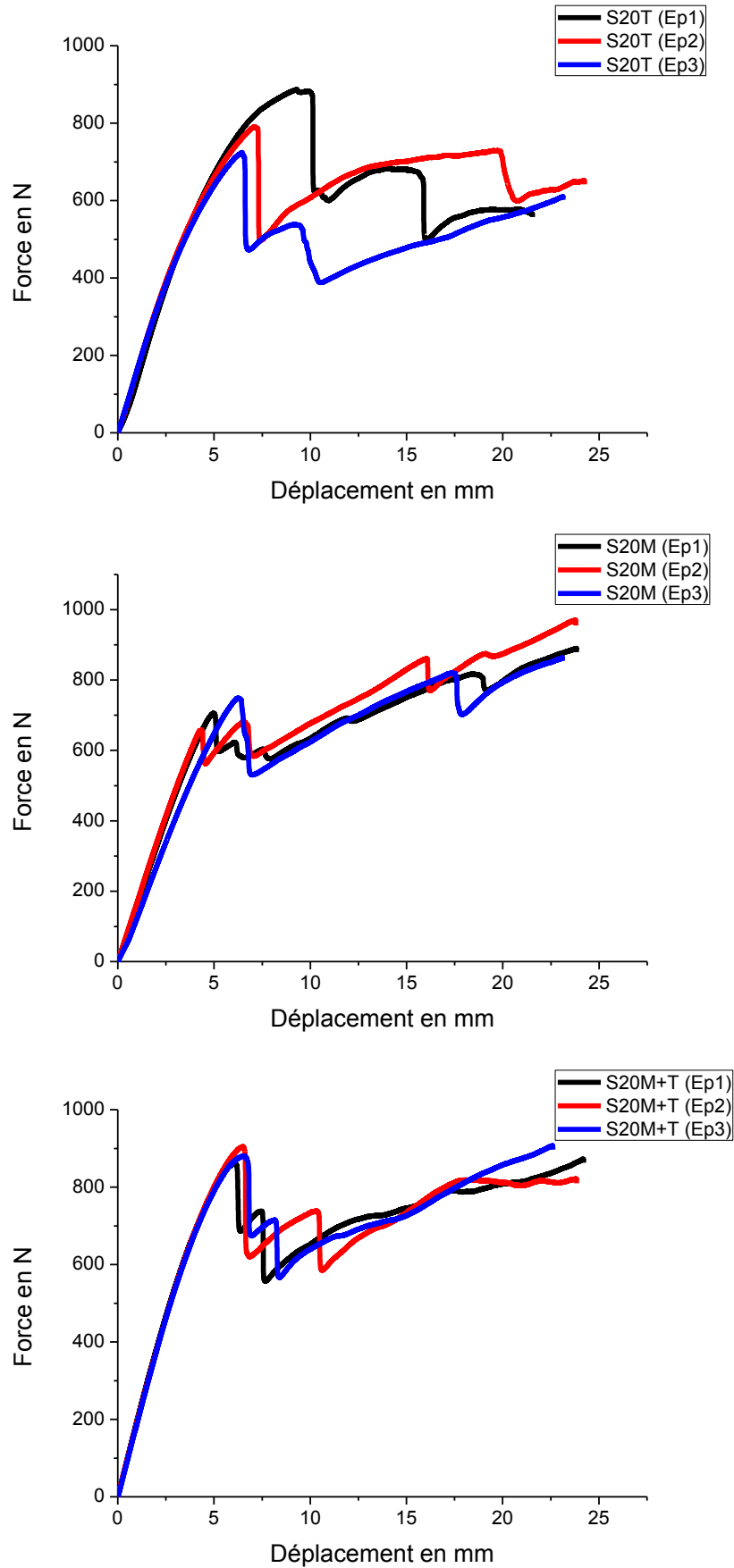


Figure 5.72. Comportement en flexion 4 points des structures sandwiches « S20 ».

Les valeurs de la contrainte en flexion 3 et 4 points, ainsi que les rigidités en flexion et en cisaillement sont représentées dans le tableau 5.33.

Tableau 5.33. Les dimensions des éprouvettes et les résultats des essais mécaniques en flexion trois points des trois types des sandwiches. (NF T54-606)

Structure sandwich	Contrainte de flexion trois points σ_3 (MPa)	Contrainte de flexion quatre points σ_4 (MPa).	Rigidité en flexion D (kN.mm ²).	Rigidité en cisaillement N (N).
S5	55,39	56,87	8654,8	1085,73
S10	30,59	36,43	5347,36	668,71
S20	22,10	28,59	4251,68	530,84

• Interprétation des résultats

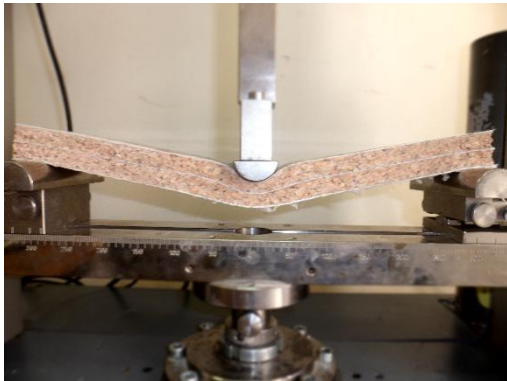
Les figures 5.66, 5.67 et 5.68 montrent l'évolution de la force appliquée en fonction de déplacement pour les éprouvettes des structures sandwiches (S5, S10 et S20) pendant l'essai de flexion trois points. Toutes les courbes présentent un comportement linéaire élastique depuis le début de chargement, mais il existe une légère déformation plastique pour des déplacements plus élevés. En fait, la dégradation affectant les structures sandwiches commence par une petite fissure due aux efforts de cisaillement au niveau de l'âme (liège), qui se propage depuis la zone chargée suivant la direction du plan médian vers les bouts de l'échantillon [120, 127].

Parmi les trois structures sandwiches testées, on trouve que, la structure sandwich S20, donne la force à la rupture la plus faible (environ 349,88 N pour un déplacement de 18mm) par rapport aux deux autres structures (S5 et S10). Pour la structure sandwich S10, la force maximale de rupture est de 503,11 N c'est-à-dire 30% plus grande à celle de S20, par contre, la structure S5 possède la force à la rupture la plus grande (environ 644.77 N pour un déplacement de 23 mm). D'après le tableau 5.33 on remarque que, les contraintes en flexion 3 et 4 points augmentent d'une structure sandwich à une autre, cela peut être expliqué par le nombre des nappes de fibres de verre existant dans chaque type de structure sandwich (c'est-à-dire le nombre de couches de stratifiés dans chaque structure sandwich).

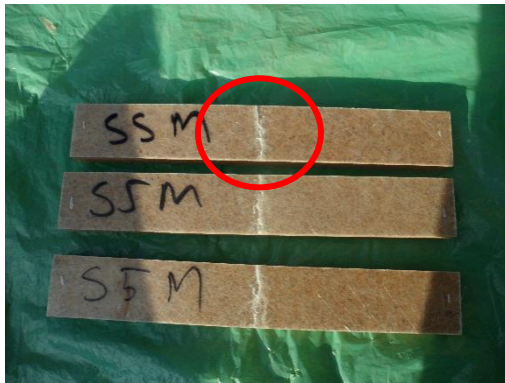
Pour la structure sandwich S5 représente la contrainte la plus élevée 55,39 MPa en flexion 3 points et 56,87 MPa en flexion 4 points (5 nappe de stratifié) et la structure S10 présente des contraintes de 30,59 MPa pour la flexion 3 points et 36,43 MPa pour la flexion 4 points (3 nappe de stratifié), par contre, la structure sandwich S20, possède les contraintes les plus faibles, 22,10 MPa pour la flexion 3 points et 28,59 MPa pour la flexion 4 points (2 couches de stratifié).

V.2.3.3. Analyse des modes de rupture en flexion trois points

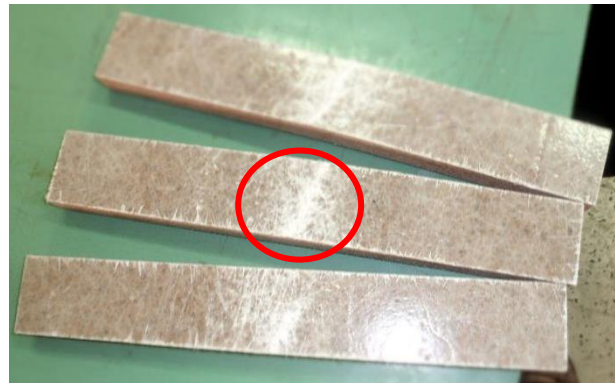
La figure 5.73 représente les modes de rupture des structures sandwiches (S5, S10 et S20) en flexion 3 points.



1



2



3

Figure 5.73. Le mode de rupture en flexion trois points des structures sandwiches :

- 1) poinçonnement de l'éprouvette, 2) Rupture de l'éprouvette en compression dans la semelle supérieure et 3) Rupture de l'éprouvette en traction dans la semelle inférieure.

Lorsque on exerce une force de flexion trois point sur cette structure sandwich, la semelle supérieure est soumise à la compression par contre la semelle inférieure est soumise à la traction [67]. D'après la figure 5.73 des éprouvettes des trois types de structures sandwichs (S5, S10 et S20) testés, deux modes de rupture ont été observés, le premier mode est une rupture en compression et indentation au niveau de la semelle (stratifié) supérieure de l'éprouvette, ce mode est remarqué au niveau de toutes les séries S20 et S10, et également le même pour les éprouvettes des séries S5Tet S5T+M.

Le deuxième mode de rupture est une rupture complète en traction de la semelle inférieure, ce mode de rupture a été observé uniquement pour les éprouvettes de la série S5M.

La rupture de la semelle inférieure sous l'effet de l'effort de traction peut être expliqué par la faible résistance de la fibre mat en traction parce que ce sont des fibres courtes, par contre la fibre tissée résiste mieux aux efforts de traction parce que ce sont des fibres longues.

V.2.3.4. Analyse de mode de rupture en flexion quatre points

Le tableau 5.34 représente les modes de rupture des différentes structures sandwichs.

Tableau 5.34. Les modes de rupture des différentes structures sandwichs.

Type de structure	Mode de rupture
S5T	Poinçonnement et rupture en compression de la semelle supérieure des éprouvettes et fissure au niveau du liège.
S5M	
S5T+M	
S10T	Des fissures au niveau de l'âme de l'éprouvette.
S10M	Poinçonnement et rupture en compression indentation de la semelle supérieure des éprouvettes.
S10T+M	
S20T	Poinçonnement et rupture en compression indentation de la semelle supérieure des éprouvettes.
S20M	
S20T+M	

La figure 5.74 représente les modes de rupture en flexion quatre points des structures sandwichs.

- **Interprétation des résultats**

D'après la figure 5.74 et le tableau 5.34, qui représentent les modes de rupture en flexion quatre points des structures sandwichs, les structures sandwiches S5T, S5M et S5T+M présentent un mode de rupture sous forme d'un poinçonnement et une rupture en compression de la semelle supérieure des éprouvettes, ainsi que des fissures au niveau de l'âme de la structure sandwich (liège). La structure S10T présente des fissures au niveau de l'âme de l'éprouvette, la rupture débute par une fissuration au niveau de l'âme (liège) de la structure sandwich avec l'augmentation de la charge, la fissure se propage parallèlement dans le matériau de l'âme ce qui entraîne la rupture du liège (Figure 5.74). Ce mode de rupture observé dans les échantillons des structures sandwichs S10T et S5T, S5M et S5T+M est la rupture par cisaillement de l'âme. Les structures S10M, S10T+M, S20T, S20M et S20T+M présentent un mode de rupture sous forme d'un poinçonnement et une rupture en compression de la semelle supérieure des éprouvettes.

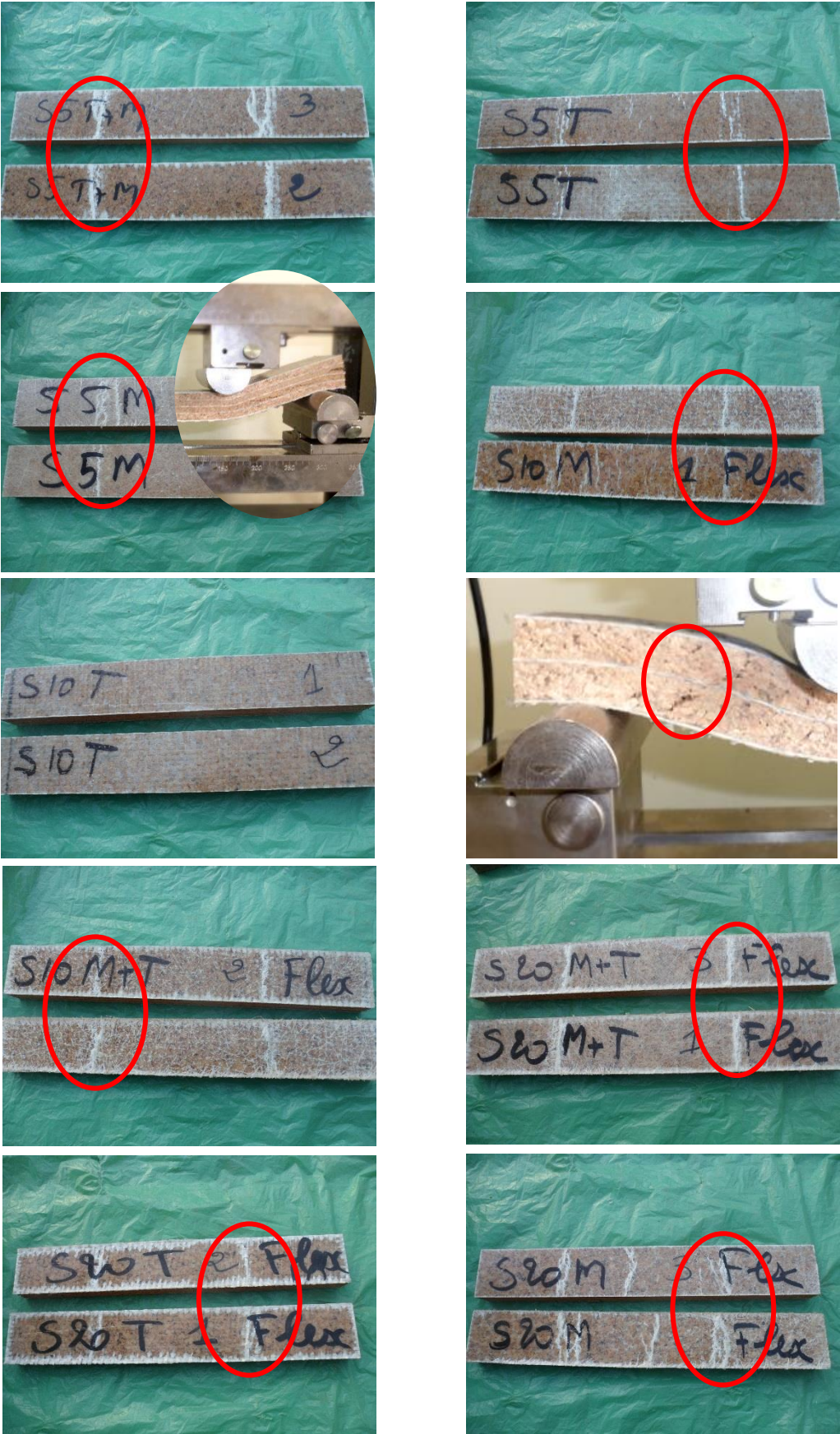


Figure 5.74. Modes de rupture en flexion quatre points des structures sandwiches.

V.2.3.5. Essai de compression perpendiculaire

La rigidité en flexion d'un matériau sandwich dépend de la distance entre les peaux, et lors de l'application des charges, cette distance doit être maintenue pour conserver une bonne rigidité en flexion. Par ailleurs, sous l'effet de la charge localisée, le matériau sandwich est soumis à des poinçonnements localisés. Ainsi, pour avoir un matériau sandwich de bonnes caractéristiques mécaniques pour des charges élevées. Le matériaux sandwich doit avoir un bon comportement mécanique à la compression. L'essai de compression perpendiculaire a été réalisé suivant la norme NF T54-602 [114].

L'essai a été effectué sur des éprouvettes à base carrée de section 50x50 mm. Ces dernières ont été placées entre deux plateaux parallèles d'une machine universelle type Zwick 250 de capacité 250 kN, avec un pilotage et acquisition des données par ordinateur à l'aide du logiciel TextXpert 12.0, l'essai a été exécuté avec une vitesse de 2mm/mn.



Figure 5.75. Essai de compression perpendiculaire sur les structure sandwiches.

L'essai de la compression dans la direction perpendiculaire a été effectué avec des échantillons de 50 x 50 mm² (longueur x largeur) à une vitesse de traverse constante de 2 mm.min⁻¹. Le module d'élasticité a été déterminé entre les déformations 2.5% (ϵ_1) et 7.5% (ϵ_2). La contrainte à 10% (σ_{10}) a également été calculée correspondant à $\epsilon = 10\%$. Les figures 5.76, 5.77 et 5.98 représentent l'évolution de la contrainte de compression perpendiculaire des structures sandwiches S5, S10 et S20. Le tableau 5.35 représente les caractéristiques mécaniques en compression perpendiculaire des structures sandwiches S5, S10 et S20.

Tableau 5.35. Caractéristiques mécaniques en compression perpendiculaire des sandwiches.

Sandwich	Contrainte à $\epsilon=10\%$, σ_{10} (MPa)	Module d'élasticité Apparent E (MPa)
S5	11,85	58,6
S10	11,96	61,8
S20	8,93	52,4

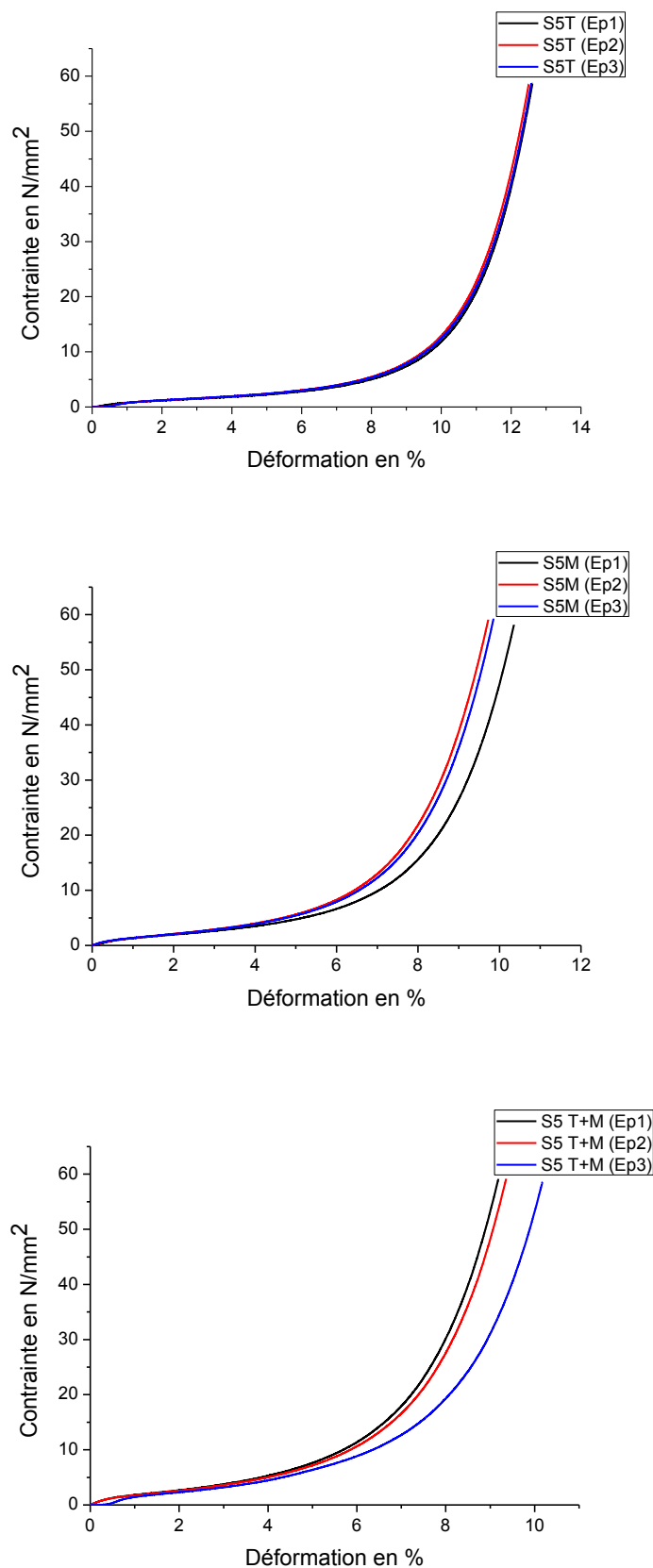


Figure 5.76. Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwiches « S5 ».

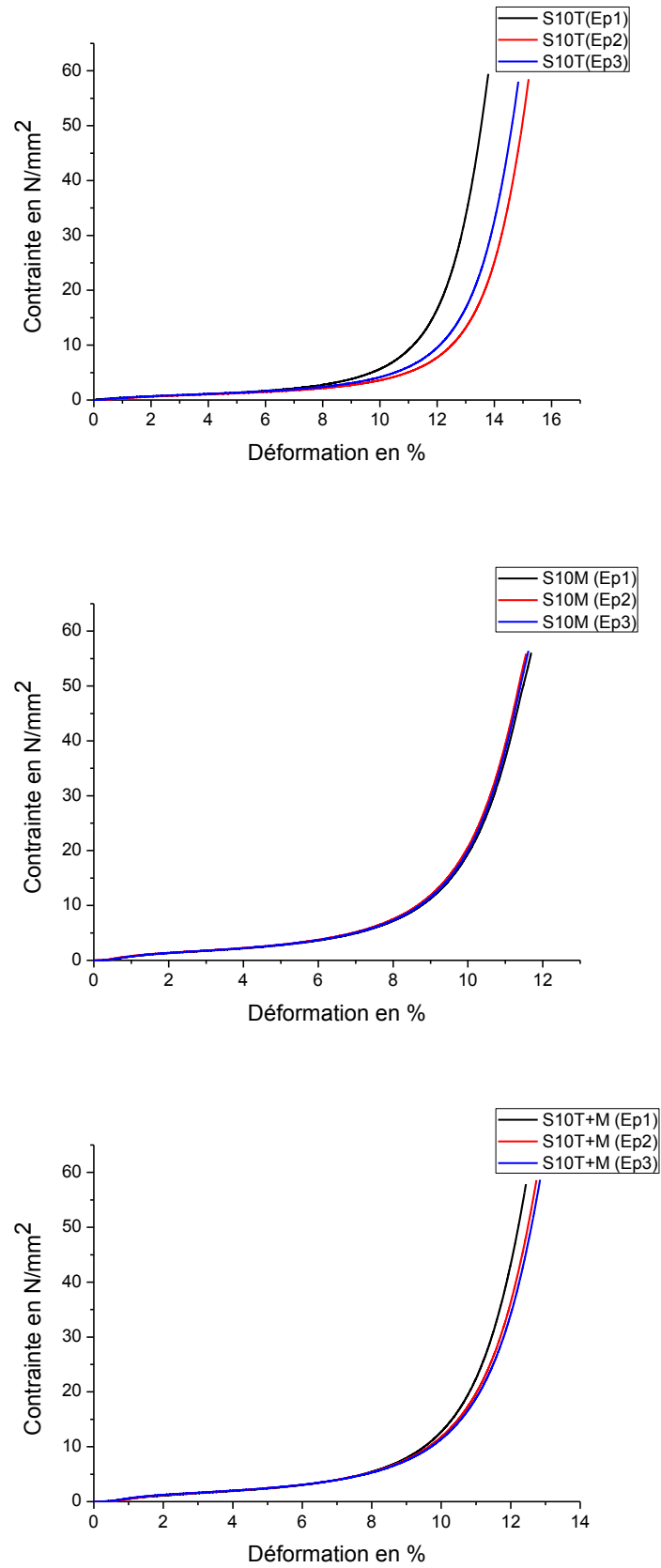


Figure 5.77. Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwiches « S10 ».

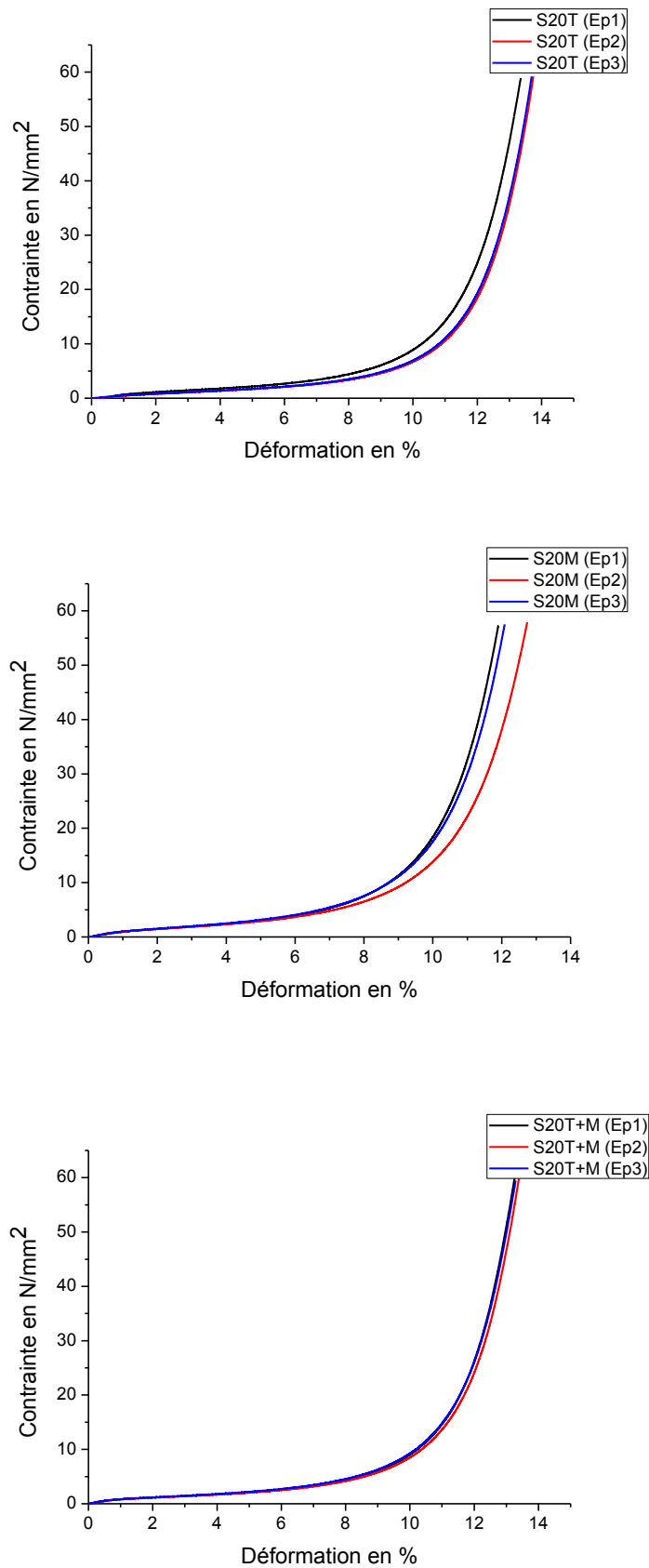


Figure 5.78. Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwiches « S20 ».

Le tableau 5.36 représente l'épaisseur des structures sandwiches S5, S10 et S20 avant et après essai de compression perpendiculaire.

Tableau 5.36. Épaisseur des structures sandwiches S5, S10 et S20 avant et après essai de compression perpendiculaire.

Structures	Épaisseur avant l'essai en mm	Épaisseur après l'essai en mm	La déformation en mm	La déformation en %
S5T	23,92	11,79	12,13	- 50,71
S5M	21,47	11,86	09,61	- 44,76
S5T+M	20,41	10,98	09,43	- 46,20
S10 T	24,84	11,2	13,64	- 54,91
S10 M	20,39	8,54	11,85	- 58,11
S10 T+M	21,35	9,08	12,27	- 57,47
S20T	21	8,12	12,88	- 61,33
S20M	20,69	7,28	13,41	- 64,81
S20T+M	21,51	8,49	13,02	- 60,52

• Interprétation des résultats

Le comportement à la compression du liège dans les structures sandwiches est représenté dans les figures 5.76, 5.77 et 5.78. D'après les courbes contrainte-déformation, On observe un comportement qui se déroule en 3 étapes : d'abord un comportement élastique linéaire pour des petites déformations, qui ne dépassent pas 5mm et une contrainte ne dépassant pas les 2 MPa pour toutes les structures sandwiches. Par la suite, la progression de la contrainte est quasi-constante jusqu'à une déformation qui avoisine 11mm pour les structures sandwichs S5T, S5M et S5T+M, par contre elle avoisine les 12mm pour les structures S10T, S10M, S10T+M, S20T, S20M et S20T+M. Cette progression constante de la contrainte s'explique par l'effondrement des granules du liège aggloméré. En fin, une reprise de la rigidité (l'effondrement complet des granulés) de la structure qui conduit à une augmentation prononcée de la contrainte pour atteindre des valeurs maximales de l'ordre de 60 MPa pour toutes les structures sandwichs. Les travaux réalisés par des chercheurs [1-121-122-123-124-125], montrent un comportement élastique linéaire dans la phase initiale, suivie d'une phase de déformation plastique et en fin ils ont observé une phase de densification.

D'après le tableau 5. 36 on remarque que la déformation de la structure S5 se situe entre 44 et 50 %, pour la structure S10 la déformation est de l'ordre de 54 à 58 % et la déformation de la structure S20 est de l'ordre de 60 à 64 %, l'augmentation de la déformation de la structure S20 par rapport aux structure S10 et S5 peut être expliquer par l'épaisseur du liège ainsi que le nombre de couches stratifiés qui constitue la structure sandwich, de temps plus que l'épaisseur de liège est élevée, la déformation de la structure sandwich est importante.

V.2.3.6. Essai de traction perpendiculaire (essai d'arrachement)

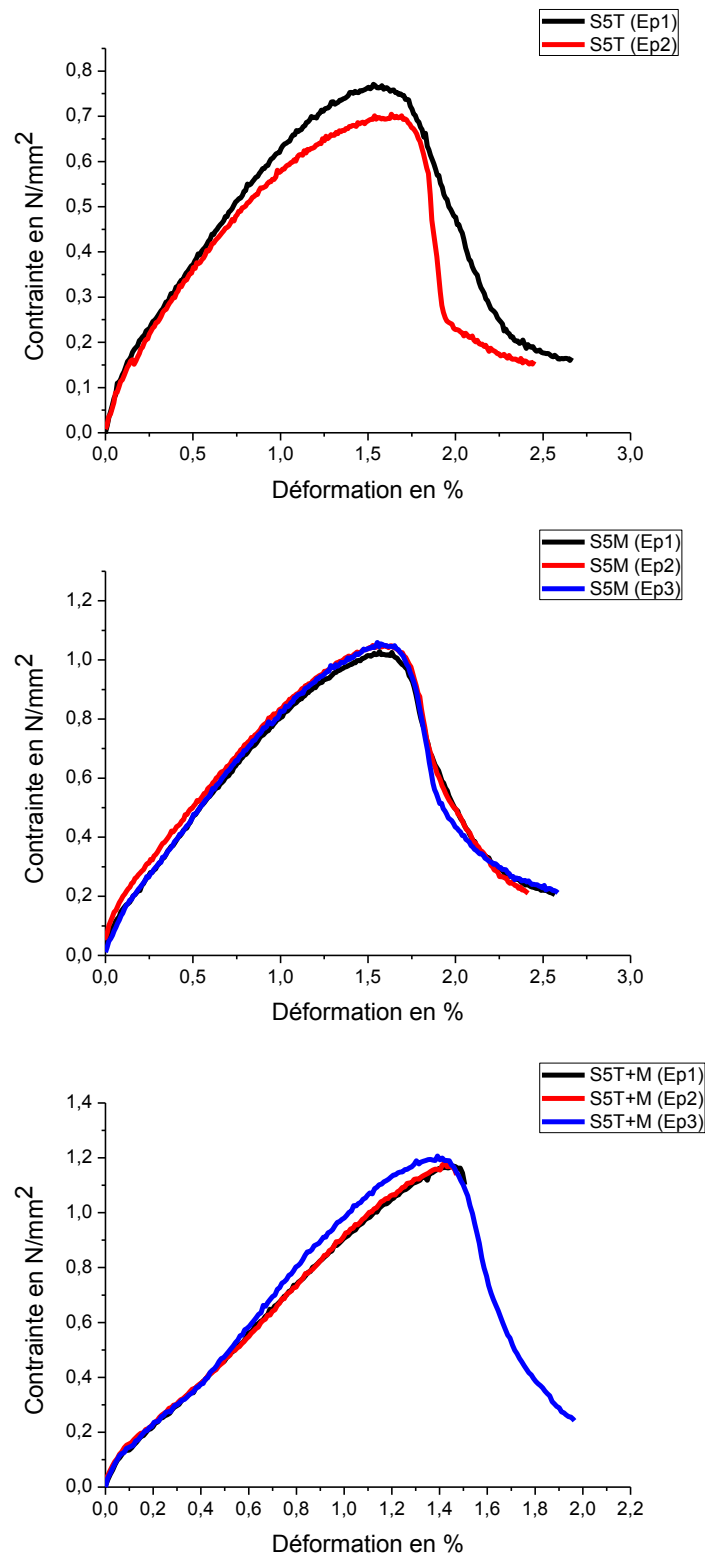


Figure 5.79. Comportement en traction perpendiculaire (essai d'arrachement) des structures sandwiches « S5 ».

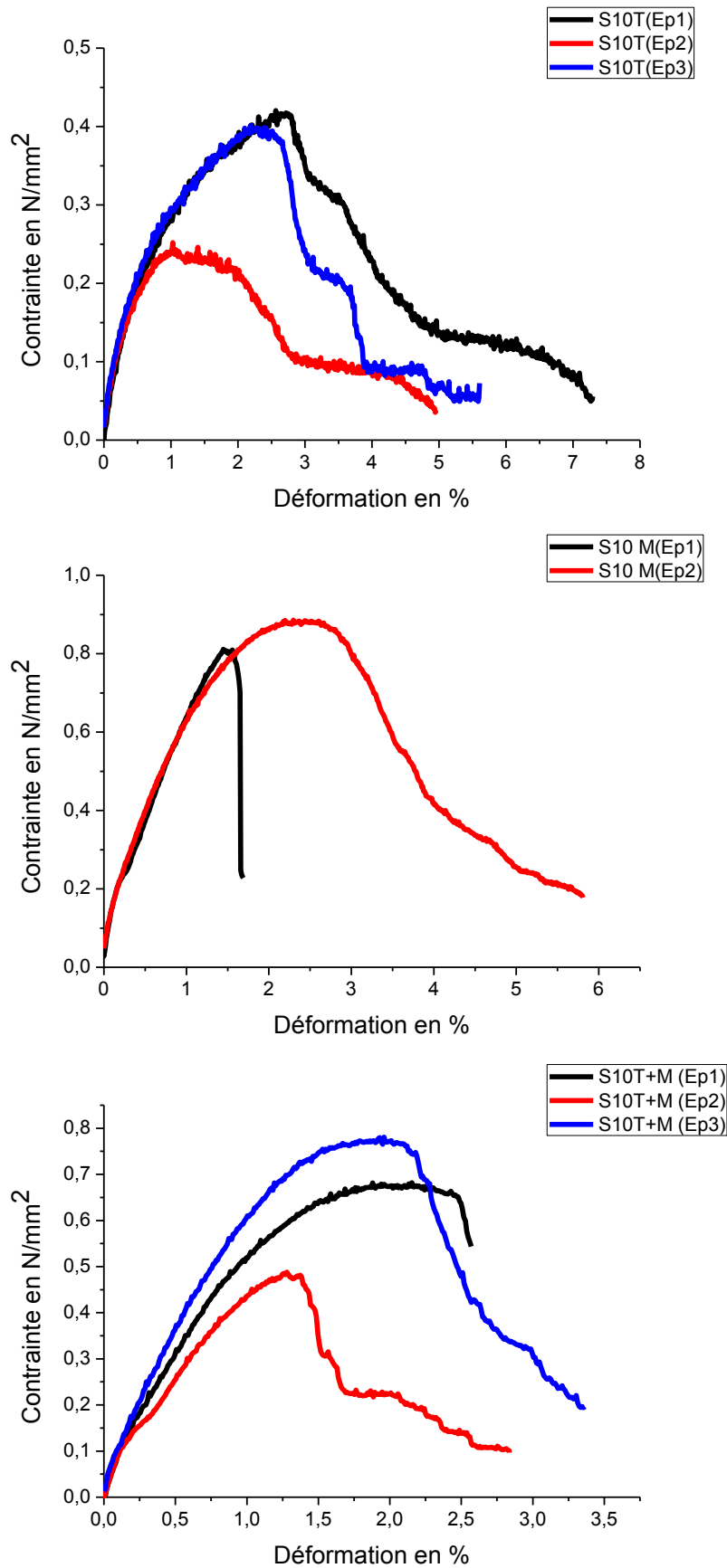


Figure 5.80. Comportement en traction perpendiculaire (essai d'arrachement) des structures sandwiches « S10 ».

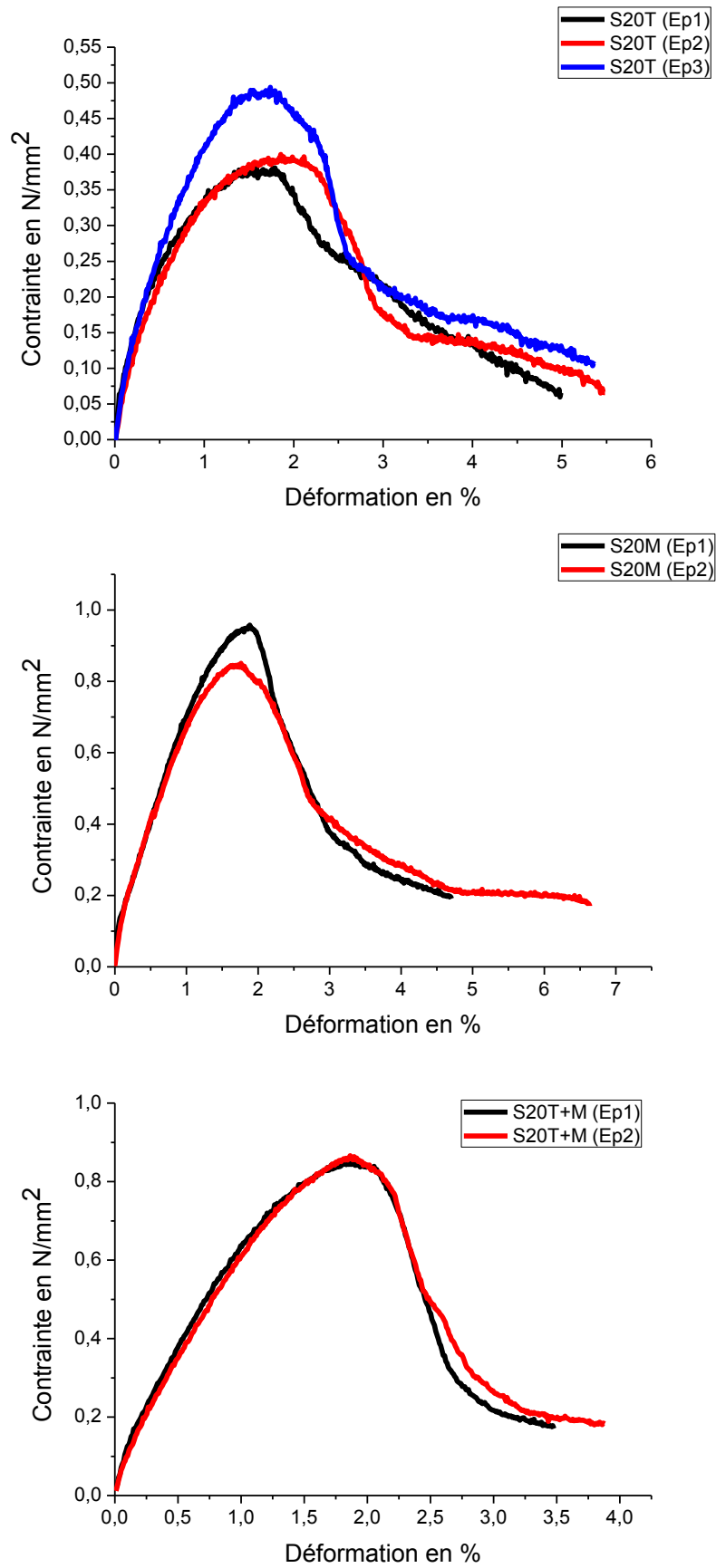


Figure 5.81. Comportement en traction perpendiculaire (essai d'arrachement) des structures sandwiches « S20 ».

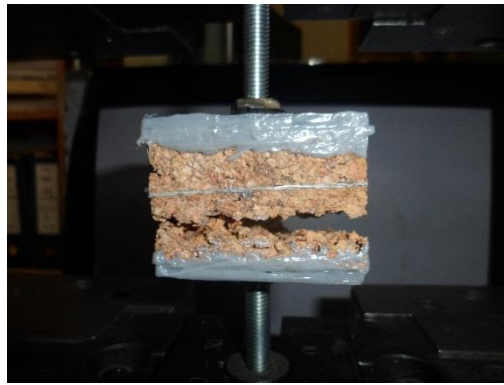


Figure 5.82. Rupture de l'éprouvette lors de l'essai d'arrachement.

- **Interprétation des résultats**

Les figures 5.79, 5.80 et 5.81 représentent les courbes contrainte déformation de l'essai de traction perpendiculaire (essai d'arrachement) des structures sandwiches S5, S10 et S20.

Le comportement mécanique en traction des structures sandwiches présente trois phases essentielles : d'abord une augmentation linéaire de la charge appliquée jusqu'à une contrainte de 1 MPa et un déplacement de 1,5 % pour les structures de la série S5, pour les structures sandwiches des séries S10 et S20, la contrainte varie de 0,5 à 0,8 MPa et une déformation aux alentours de 2 %, suivie d'un comportement non linéaire jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte et, enfin, une diminution de la contrainte une fois la rupture totale de l'éprouvette est atteinte.

Le mode de rupture des structures sandwiches des trois séries (S5, S10 et S20) est le même, la rupture des éprouvettes se produit la plupart du temps au niveau du matériau de l'âme de la structure sandwich, qui est le liège aggloméré, par la suite la fissure se propage rapidement, d'une façon perpendiculaire à la force de chargement (Figure 5.82). Ce comportement peut être expliqué par la zone de liaison inter-granulaire du liège aggloméré relativement faible par rapport au stratifié, qui est constitué de la résine époxy et des fibres de verre, le liège est le matériau le plus faible en terme de résistance au cisaillement dans la structure sandwich, étant donné que les structures sandwiches étudiées dans le cadre de notre projet sont réalisées avec une âme en liège aggloméré de 5, 10 et 20 mm qui ont été renforcées par des stratifiés à base de résine époxy et des fibres de verre.

V.2.3.7. Essai de cisaillement

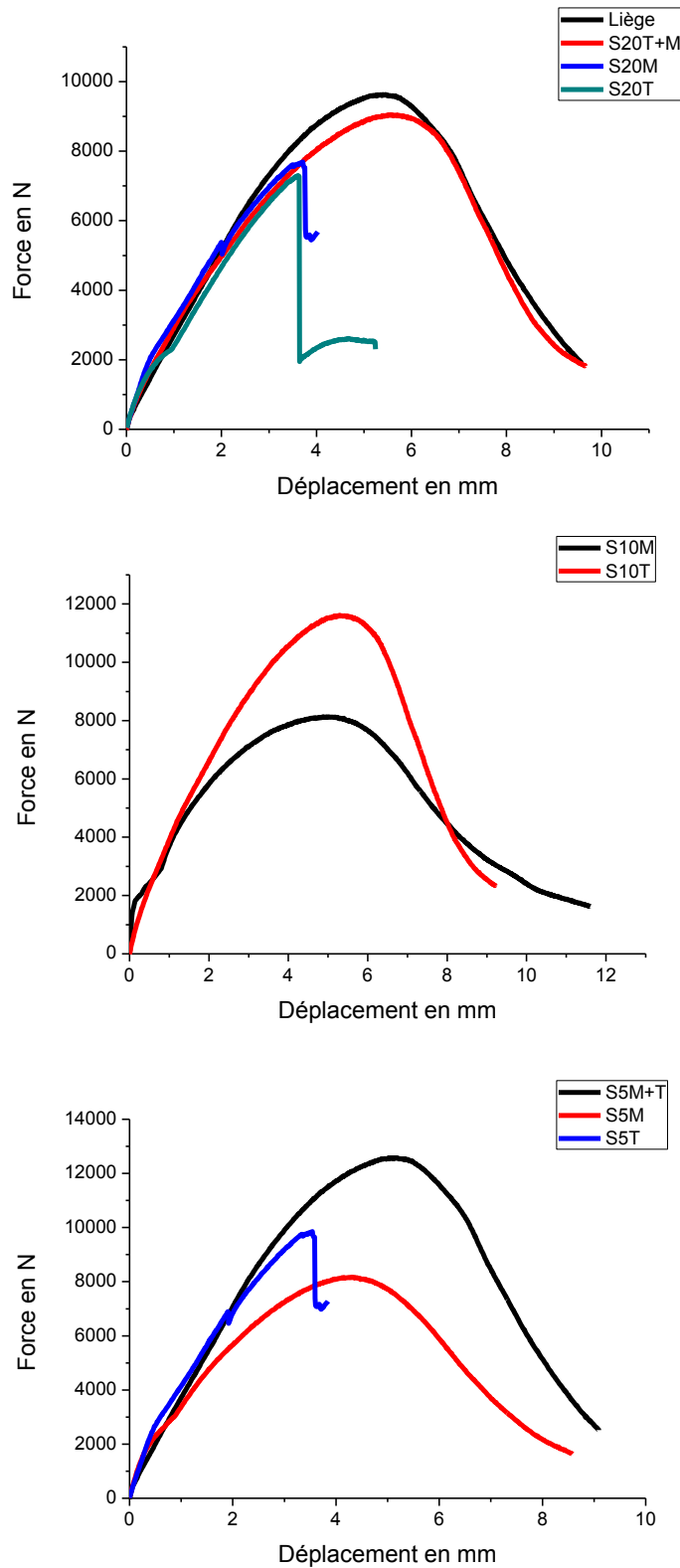


Figure 5.83. Comportement en cisaillement des structures sandwiches.

La contrainte maximale de cisaillement et le module de cisaillement sont calculés selon les deux relations suivantes :

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{l \times b} \quad 5.2$$

$$G = \frac{F_2 - F_1}{d_2 - d_1} - \frac{h}{l \times b} \quad 5.3$$

Avec : σ_{max} : est la contrainte maximale de cisaillement (MPa) ; F_{max} : est la force maximale appliquée sur l'éprouvette au cours de l'essai (N) ; l : est la longueur initiale de l'éprouvette (mm) ; b : est la largeur initiale de l'éprouvette (mm), G : est le module de cisaillement (MPa) ; F_1 : est la force relevée à l'extrémité basse de la partie linéaire de la courbe force-déplacement (N) ; F_2 : est la force relevée à l'extrémité haute de la partie linéaire de la courbe force déplacement (N) ; d_1 : est le déplacement relatif des supports métalliques collés sur les semelles de l'éprouvette, correspond à F_1 (N) ; d_2 : est le déplacement relatif des supports métalliques collés sur les semelles de l'éprouvette, correspond à F_2 (N) ; h : est l'épaisseur initiale de l'éprouvette (mm). Le tableau 5.37 résume les principales propriétés des trois types de structures sandwichs après essai de cisaillement, les propriétés mécaniques sont la force maximale (F_{max}), la déformation à la rupture (ϵ_r), la contrainte maximale (σ_{max}) et le module de cisaillement (G).

Tableau 5.37. Les propriétés mécaniques des différentes structures sandwichs en cisaillement.

Les structures sandwichs	La force maximale (F_{max}) en N.	Déformation à la rupture (ϵ_r) mm.	La contrainte maximale (σ_{max}) en N/mm ² .	Module de cisaillement (G) en kN.
S5	10 000	5	0,78	4,45
S10	9500	6	0,73	3,65
S20	7800	4,5	0,60	3,28
Liège	9800	4,5	0,75	3,07

• Interprétation des résultats

La figure 5.83 montre les courbes force-déplacement de l'essai de cisaillement, pour les trois types de structures sandwichs (S5, S10 et S20), d'après ces résultats on constate que les trois types de structures sandwichs présentent un comportement similaire en cisaillement, le comportement se déroule en deux phases, La première phase présente un comportement élastique linéaire, le plus souvent influencée par la propriété viscoélastique du liège, elle a pris fin lorsque la première fissure s'est produite.

Pendant la deuxième phase, le comportement mécanique est non linéaire qui peut être expliqué par une instabilité de la déformation due à la défaillance progressive des couches en liège aggloméré (figure 5.84).

La rupture s'est produite lorsque la charge appliquée dépasse le seuil de la résistance de la matière. En général, cela s'est produit dans les régions entre les grains de l'agglomérat de liège. La rupture du liège dans les structures sandwiches étudiées est identique aux travaux réalisés par Reis et al [126].

D'après les résultats du tableau 5.37 on remarque que la contrainte maximale des structures sandwiches multicouches étudiées se situe entre 0,60 à 0,78 N/mm², ainsi que le module de cisaillement calculé pour les structures sandwiches est de 3,07 KN pour le liège, 3,28 pour la structure sandwich S20, 3,65 kN pour la structure sandwich S10 et 4,45 KN, cette augmentation du module de cisaillement peut être expliquée par l'accroissement du nombre de couches de stratifié dans les structures sandwiches. Les résultats obtenus sur le module de cisaillement des structures sandwiches sont conforme aux travaux réalisés par d'autres chercheurs [30-67].



Figure 5.84. Evolution d'une structure sandwich sous l'effet de l'effort de cisaillement.

V.2.3.8. Essai de compression sans flambement

Le tableau 5.37 présente les caractéristiques mécaniques en compression longitudinal sans flambement des structures sandwichs S5, S10 et S20.

Tableau 5.38. Les caractéristiques mécaniques en compression longitudinal sans flambement.

Structures	Contrainte maximale en MPa	Déplacement en mm
S5T	11,99	0,80
S5M	11, 20	0,62
S5T+M	15,66	1,15
S10 T	6,56	0,54
S10 M	2,41	0,68
S10 T+M	3,36	4,36
S20T	2,73	3,46
S20M	2,72	1,9
S20T+M	2,41	4,06

D'après les résultats du tableau 5.37 on remarque que les structures S5T, S5M et S5T+M présentent des contraintes en compression plus élevées comparativement aux autres structures S10 et S20, cette augmentation est due à la présence de quatre couches de stratifié qui est responsable de la résistance mécanique dans les structures sandwiches.

La figure 5.85 représente un histogramme des contraintes maximales des structures sandwiches multicouches.

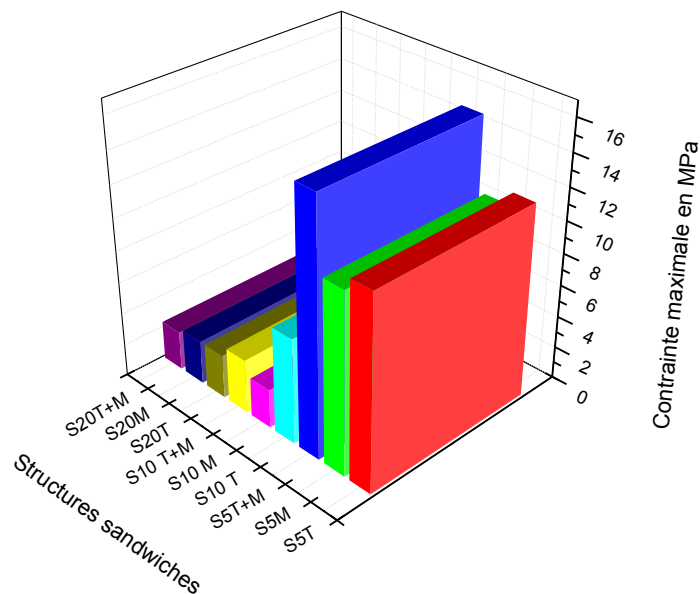


Figure 5.85. Histogramme des contraintes maximales en compression sans flambement des structures sandwiches multicouches.

D'après la figure 5.85 et le tableau 5.37 on remarque que les contraintes maximales enregistrées pour les structures sandwiches multicouches S5 qui sont de l'ordre de 11,20 à 15,66 MPa, sont plus élevées comparativement aux structures S10 et S20, cette augmentation peut être expliquée par le nombre de couches stratifiées que contiennent les structures sandwiches multicouches S5.

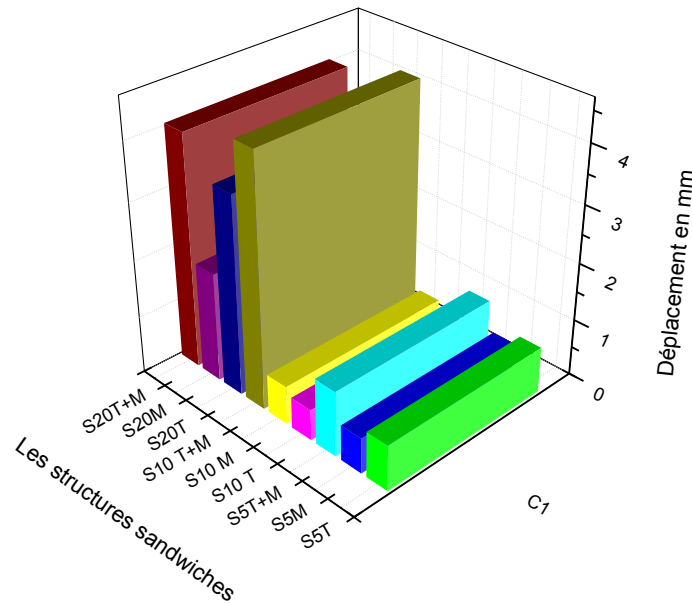


Figure 5.86. Histogramme des déformations en compression sans flambement des structures sandwichs multicouches.

D'après la figure 5.86 et le tableau 5.37 on remarque que les déformations enregistrées pour les structures sandwichs multicouches S20 qui sont de l'ordre de 1,9 à 4,06, sont plus élevées comparativement aux structures S10 et S5, cette augmentation peut être expliquées par l'épaisseur de matériau de l'âme (le liège) qui est un matériau compressible, les épaisseurs de matériau de l'âme des structures sandwichs sont de l'ordre de 20mm pour la structure S20, 10 mm pour S10 et 5mm pour S5, la déformation des structures sandwichs augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du matériau de l'âme. La figure 5.87 représente le mode de déformation de la structure sandwich après essai de compression longitudinal sans flambement.



Figure 5.87. Mode de déformation de la structure sandwich après essai de compression longitudinal sans flambement.

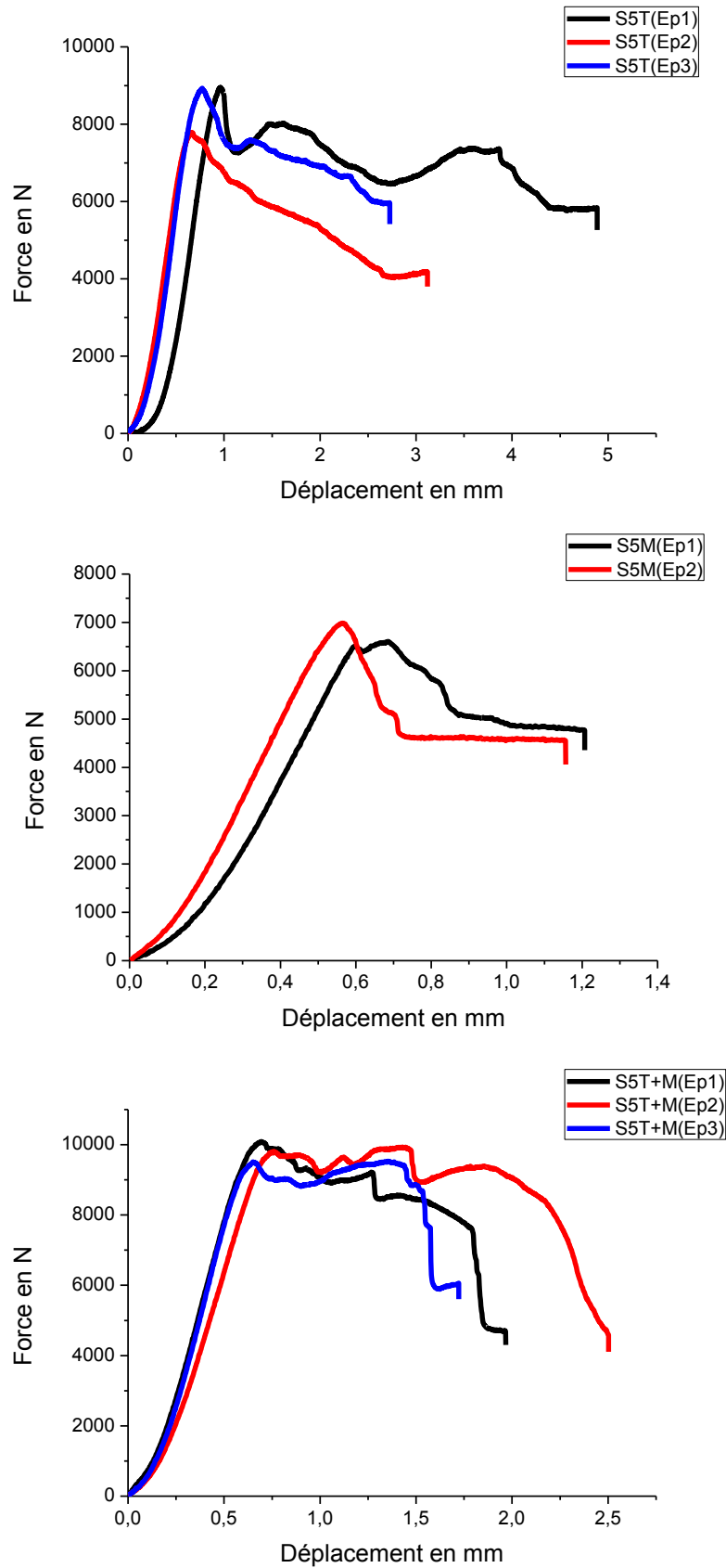


Figure 5.88. Comportement en compression sans flambement des structures sandwiches « S5 ».

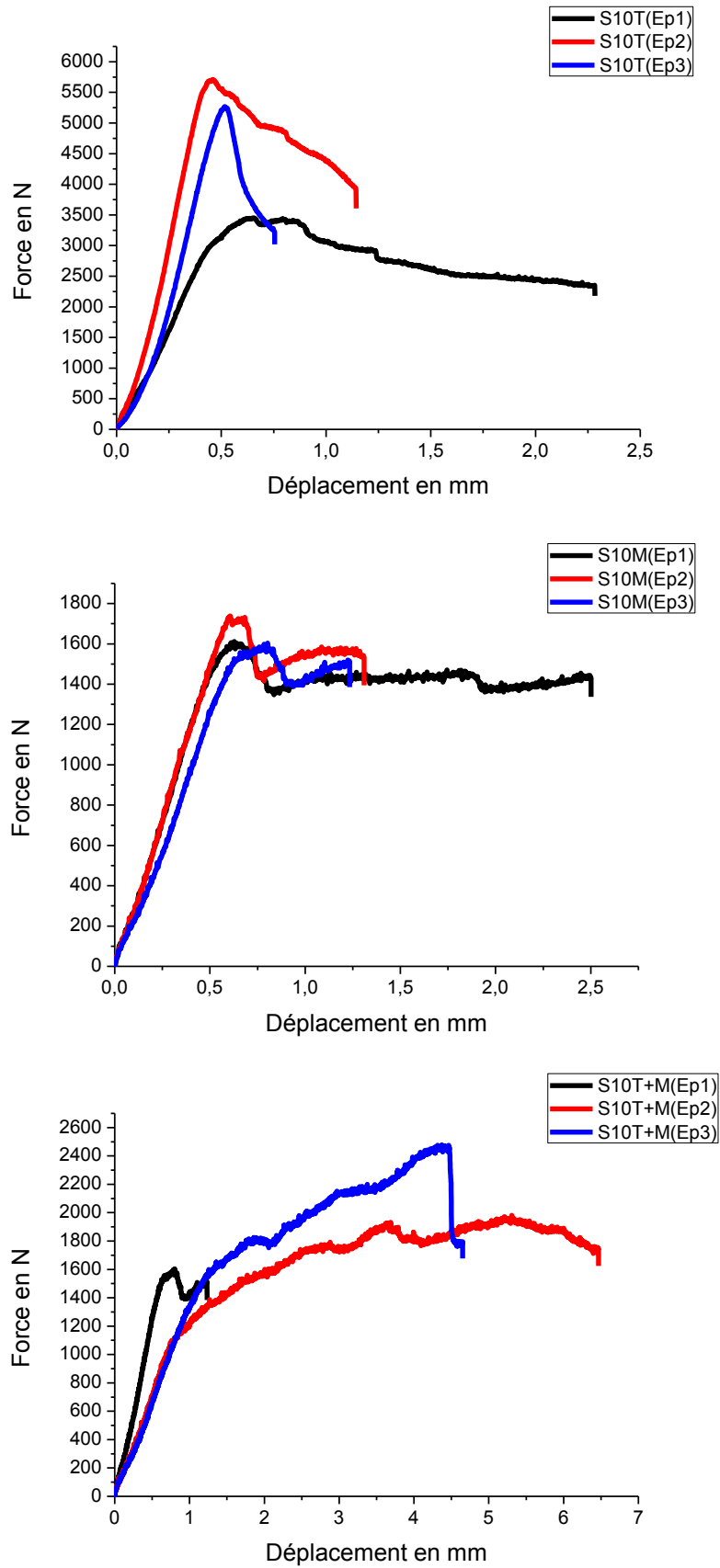


Figure 5.89. Comportement en compression sans flambement des structures sandwiches « S10 ».

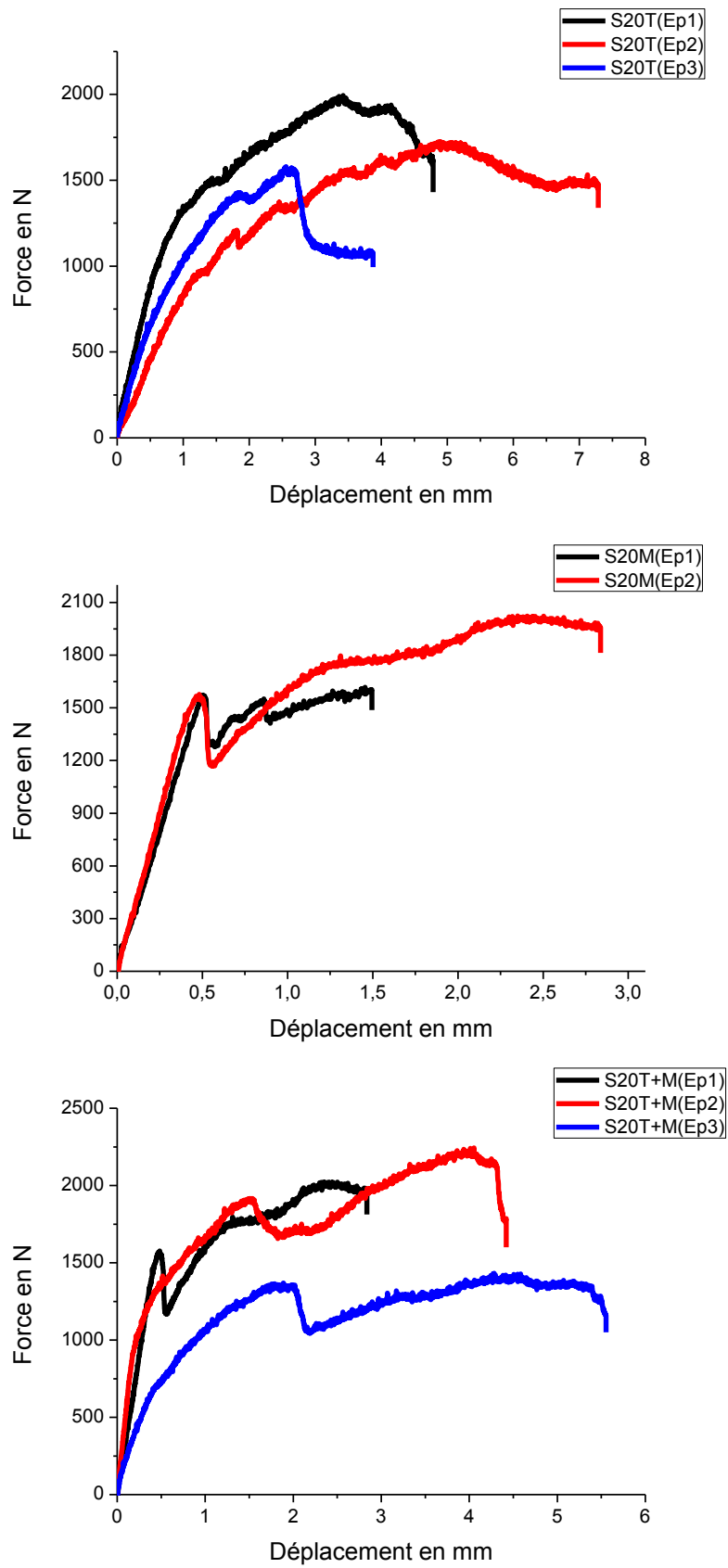


Figure 5.90. Comportement en compression sans flambement des structures sandwiches « S20 ».

Le tableau 5.38 représente les modes de rupture des structures sandwichs sous l'effet de la contrainte de compression.

Tableau 5.39. Les modes de rupture des structures sandwichs sous l'effet de la contrainte de compression.

Structures	Observations sur le mode de ruptures des éprouvettes
S5T	Des déformations aux niveau de la partie inférieure de l'éprouvette.
S5M	Rupture des stratifiés qui se trouvent sur les surfaces externes des éprouvettes (la position de la rupture est au milieu de l'éprouvette).
S5T+M	Rupture des stratifiés qui se trouvent sur les surfaces externes des éprouvettes (la position de la rupture est au côté bas de l'éprouvette).
S10 T	Des déformations aux niveau de la partie inférieure de l'éprouvette.
S10 M	Rupture des stratifiés qui se trouvent sur les surfaces externes des éprouvettes (la position de la rupture est au milieu de l'éprouvette).
S10 T+M	Des déformations aux niveau de la partie inférieure de l'éprouvette.
S20T	Des déformations aux niveau de la partie inférieure et de la partie supérieure de l'éprouvette.
S20M	Des déformations aux niveau de la partie inférieure de l'éprouvette.
S20T+M	Des déformations aux niveau de la partie inférieure de l'éprouvette.

• Interprétation des résultats

Les figures 5.86, 5.87 et 5.88 montrent les courbes contrainte déformation de l'essai de compression sans flambement des structures sandwichs.

Les courbes montrent dans la première phase, l'augmentation linéaire de la charge appliquée, correspondant à de faibles déformations, suivie d'une phase non linéaire courte jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte ; puis on observe une diminution de la charge appliquée, cela peut être expliqué par des ruptures des fibres de verre qui se trouve aux niveaux des stratifiés.

V.2.3.9. Essai de compression avec flambement

Le tableau 5.39 présente les caractéristiques mécaniques en compression longitudinal avec flambement des structures sandwichs S5, S10 et S20.

Tableau 5.40. Les caractéristiques mécaniques en compression longitudinal avec flambement.

Structures	Contrainte maximale en MPa	Déplacement en mm
S5T	7,72	1,51
S5M	8,89	1,32
S5T+M	12,84	1,93
S10 T	4,82	0,72
S10 M	1,44	0,94
S10 T+M	2,8	1,95
S20T	2,19	3,75
S20M	1,74	1,53
S20T+M	2,4	2,48

La figure 5.91 représente un histogramme des contraintes maximales en compression longitudinal avec flambement des structures sandwichs multicouches.

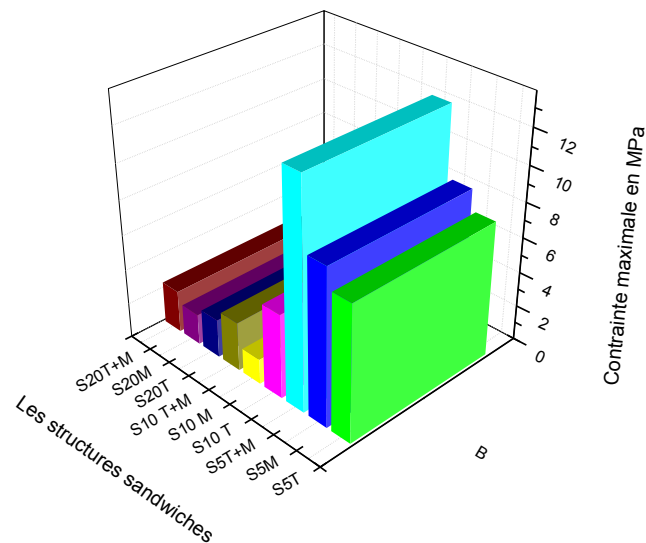


Figure 5.91. Histogramme des contraintes maximales en compression avec flambement des structures sandwichs multicouches.

D'après la figure 5.91 et le tableau 5.38 on remarque que les contraintes maximales enregistrées pour les structures sandwichs multicouches S5 qui sont de l'ordre de 7,72 à 12,84 MPa, sont plus élevées comparativement aux structures S10 et S20, cette augmentation peut être expliquée par le nombre de couches stratifiées que contiennent les structures sandwichs multicouches S5.

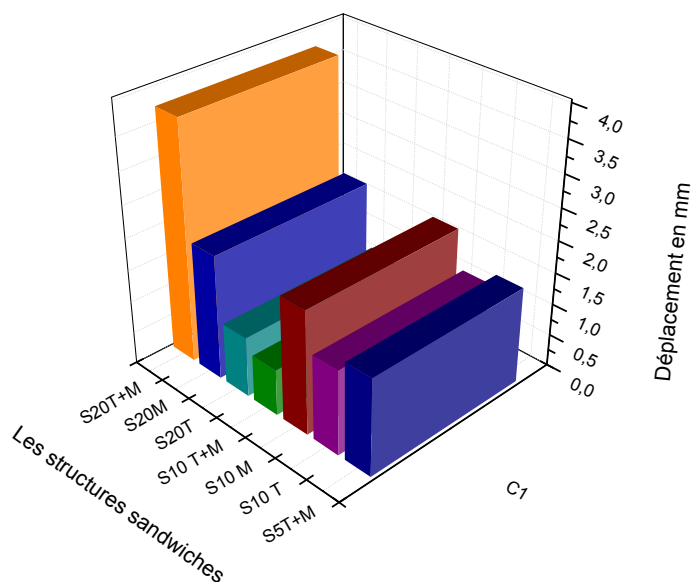


Figure 5.92. Histogramme des déformations en compression avec flambement des structures sandwichs multicouches.

D'après la figure 5.92 et le tableau 5.38 on remarque que les déformations enregistrés pour les structures sandwiches multicouches S20 qui sont de l'ordre de 1,53 à 3,75mm, elles sont plus élevées comparativement aux structures S10 et S5, cette augmentation peut être expliquées par l'épaisseur de matériau de l'âme (le liège) qui est un matériau compressible, les épaisseurs du liège dans les structures sandwiches sont de l'ordre de 20mm pour la structure S20, 10 mm pour S10 et 5mm pour S5, la déformation enregistrée pour les structures sandwiches augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du matériau de l'âme. La figure 5.93 représente le mode de déformation de la structure sandwich après essai de compression longitudinal avec flambement.



Figure 5.93. Mode de déformation de la structure sandwich après essai de compression longitudinal avec flambement.

Le tableau 5.40 représente les modes de rupture des structures sandwiches sous l'effet de la contrainte de compression.

Tableau 5.41. Les modes de rupture des structures sandwiches sous l'effet de la contrainte de compression.

Structures	Observations sur le mode de ruptures des éprouvettes
S5T	Flambement dans la partie inférieure de la structure sandwich.
S5M	Flambement dans la partie inférieure de la structure sandwich avec rupture des stratifié.
S5T+M	Flambement dans la partie supérieure de la structure sandwich.
S10 T	Des déformations aux niveau de la partie inférieure de la structure sandwich.
S10 M	Flambement dans au niveau médiane de la structure sandwich.
S10 T+M	Flambement dans la partie supérieure de la structure sandwich.
S20T	Compression de l'âme (liège) avec délaminage au niveau des deux côtés de la structure sandwich.
S20M	Flambement dans la partie inférieure de la structure sandwich avec des ruptures au niveau de stratifié.
S20T+M	Flambement dans au niveau médiane de la structure sandwich avec des ruptures du stratifié d'un seul côté de la structure sandwich.

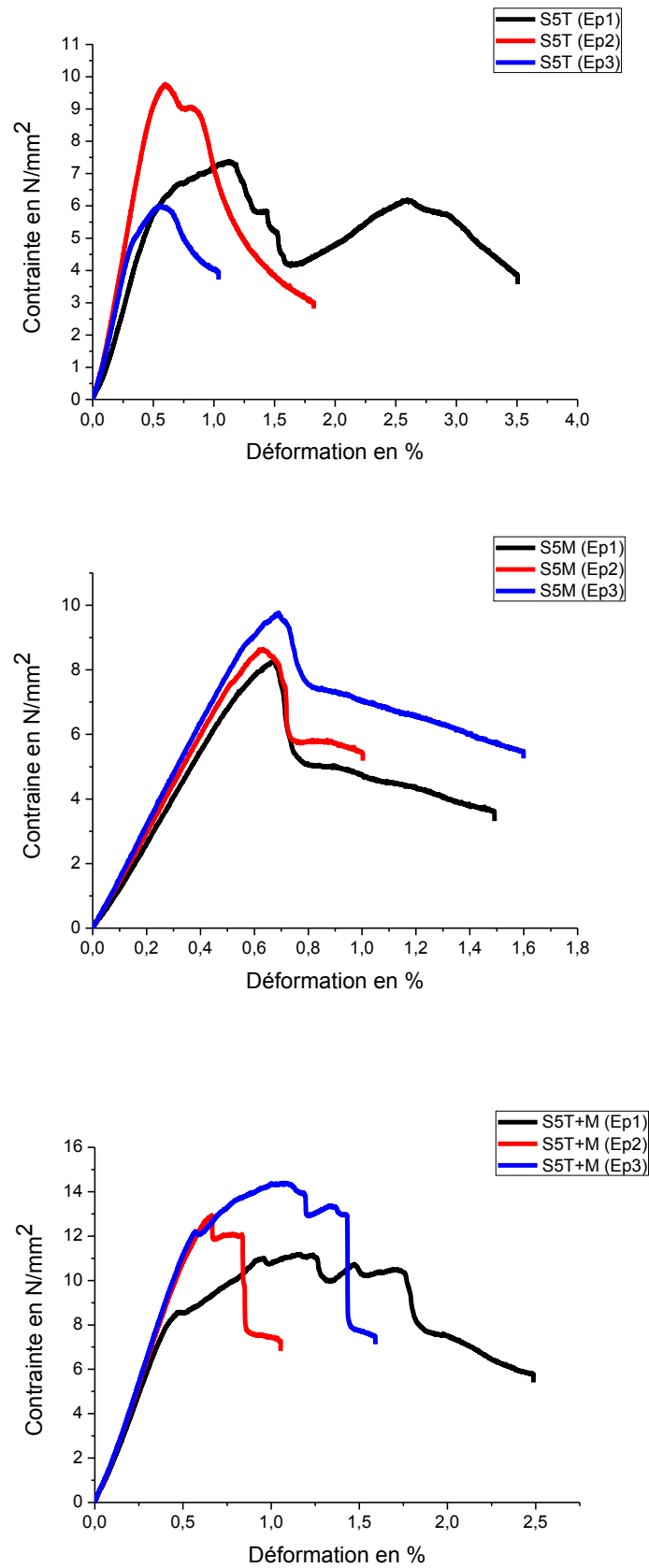


Figure 5.94. Comportement en compression avec flambement des structures sandwichs « S5 ».

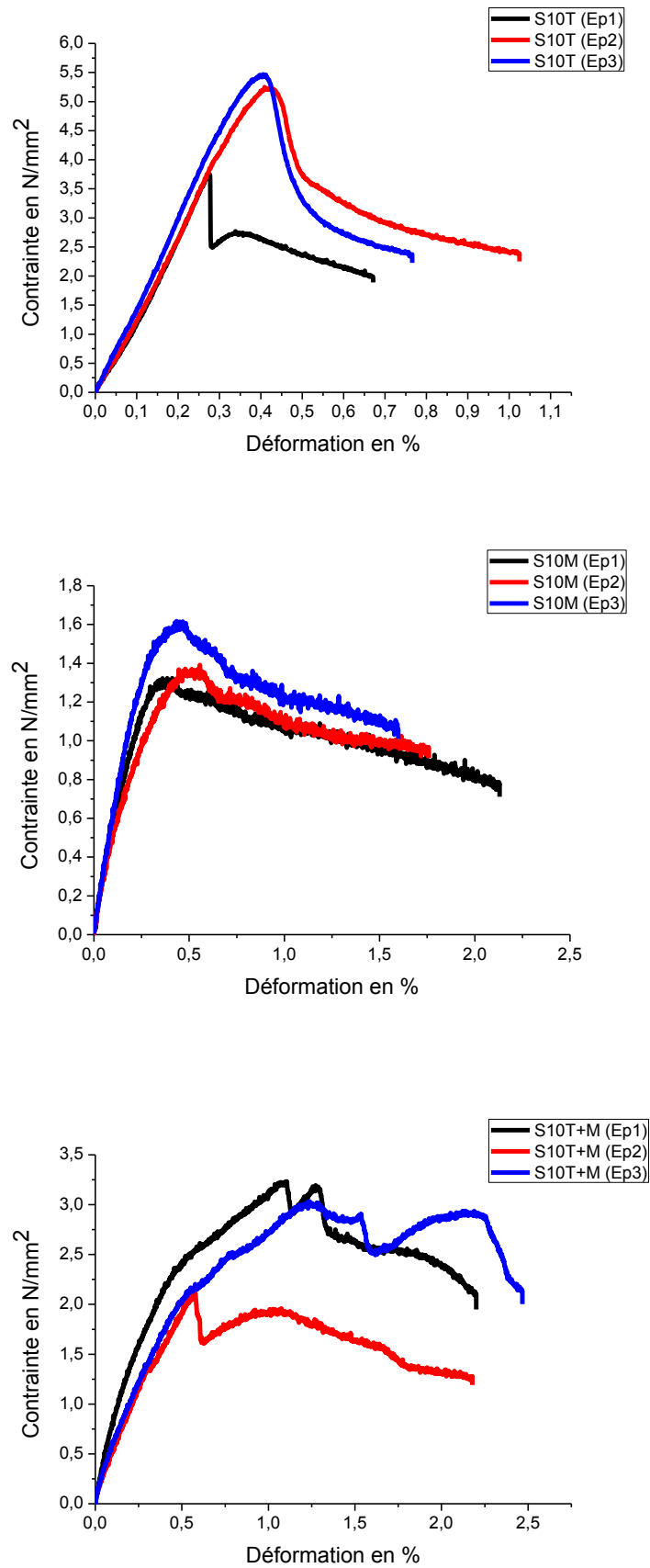


Figure 5.95. Comportement en compression avec flambement des structures sandwiches « S10 ».

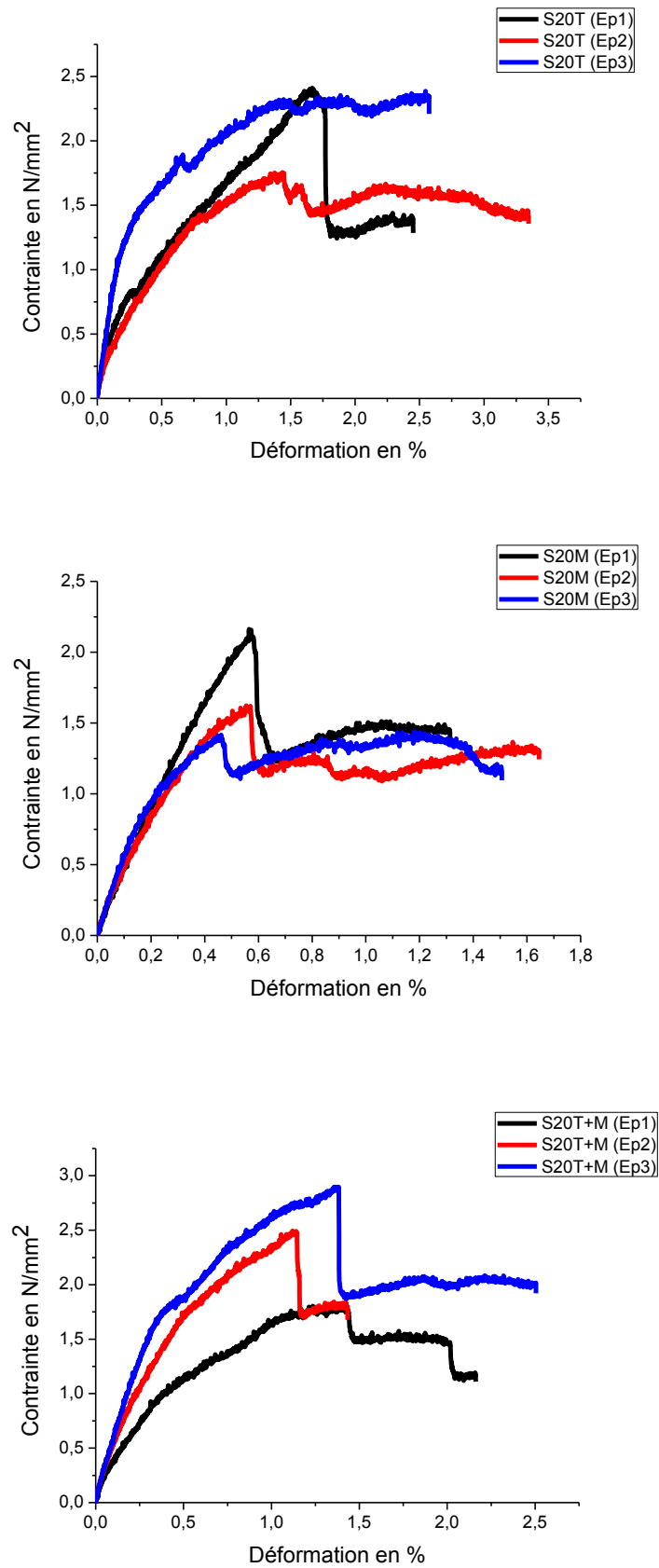


Figure 5.96. Comportement en compression avec flambement des structures sandwiches « S20 ».

- **Interprétation des résultats**

Les figures 5.94, 5.95 et 5.96 montrent les courbes contrainte déformation de l'essai de compression avec flambement des structures sandwichs S5, S10 et S20.

Les courbes montrent dans la première phase, l'augmentation linéaire de la charge appliquée, correspondant à de faibles déformations, suivie d'une phase non linéaire courte jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte ; puis on observe une diminution de la charge appliquée, cela peut être expliqué par des ruptures des fibres de verre qui se trouve aux niveaux des stratifiés.

D'après les résultats du tableau 5.40 on remarque que les structures S5T, S5M et S5T+M présentent des contraintes en compression avec flambement relativement plus élevées comparativement aux autres structures S10 et S20, cette augmentation est due principalement à la présence de quatre couches de stratifié qui est responsable de la résistance mécanique dans les structures sandwiches.

Conclusion
Générale et Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

Les travaux de cette thèse constituent une contribution à la recherche d'un matériau sandwich et de valoriser une ressource naturelle végétale abondante existante en Algérie. Cette étude vise alors à l'exploitation de liège aggloméré pour l'élaboration de nouvelles structures sandwich multicouches.

Trois types de structures sandwich ont été réalisés (S20, S10 et S5). Elles sont composées de couches en matériaux composites stratifiées à base d'une résine époxy renforcée par des fibres de verre de type tissée et mat ; entre lesquelles se trouvent des plaques de liège aggloméré empilées alternativement avec les couches stratifiées.

D'après les résultats obtenus sur toutes les structures sandwich testées, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La conductivité moyenne des panneaux du liège aggloméré est de $0,041 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$, celle des matériaux composites stratifiés est de $0,078 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$; ce qui signifie que les structures sandwich réalisées dans le cadre de cette étude présentent de bonnes caractéristiques d'isolation thermique.
- Le pouvoir d'absorption des trois types de structures sandwich varie entre $0,148$ et $0,388 \text{ kg/m}^2$, ces dernières valeurs sont relativement faibles comparativement à celles du liège aggloméré qui se situent entre $1,596 \text{ Kg/m}^2$ à $2,356 \text{ Kg/m}^2$. Cette diminution du pouvoir d'absorption des structures sandwich est due principalement à la présence des couches de stratifié et aussi la résine qui pénètre dans les pores du liège aggloméré et de ce fait l'absorption des structure sandwich seras réduite.
- La série d'essais de flexion trois et quatre points, nous a permet de constater que les trois types de structures sandwich testées présentent un comportement linéaire élastique depuis le début de chargement, mais il existe une légère déformation plastique pour des déplacements plus élevés. En fait, la dégradation affectant les structures sandwich commence par une petite fissure de cisaillement au niveau de l'âme (liège), qui se propage depuis la zone chargée suivant la direction du plan médian vers les bouts de l'échantillon. Les contraintes en flexion 3 et 4 points augmentent d'une structure sandwich à une autre, cela peut être expliqué par le nombre des nappes ainsi que le type de fibres de verre existant dans chaque type de structure sandwich.
- D'après les résultats des essais du comportement à la compression perpendiculaire des structures sandwich, on a constaté des déformations importantes des structures sandwich.

La structure S5 présente déformation moyenne de 47 %, pour la structure S10 la déformation est de l'ordre de 56 % et la déformation de la structure S20 est de l'ordre de 62 %. L'augmentation de la déformation des structures sandwichs est due au fait que le liège est un matériau cellulaire compressible parce qu'il présente un taux de porosité élevé.

- La rupture des éprouvettes lors des essais de traction perpendiculaire se produit la plupart du temps au niveau du matériau de l'âme de la structure sandwich, qui est le liège aggloméré, par la suite la fissure se propage rapidement, d'une façon perpendiculaire à la force de chargement. Ce comportement est dû à la présence d'une zone de liaison inter granulaire du liège aggloméré relativement faible par rapport au stratifié.
- La rupture des structures sandwichs lors des essais de cisaillement s'est produite lorsque la charge appliquée dépasse le seuil de la résistance de matériau de l'âme. En général, cela se produit dans les régions entre les grains de l'agglomérat de liège, à cause de sa porosité élevée et de son module de cisaillement faible par rapport au stratifié.

Les résultats de cette étude, nous a permet de valoriser une variété de liège aggloméré blanc produit en Algérie pour la réalisation de nouvelles structures sandwichs multicouches, dans le but de leur éventuelle utilisation dans la construction comme des panneaux de séparation dans le bâtiment, ainsi que dans l'industrie ferroviaire pour leur faible densité et leurs bonnes propriétés d'isolation thermique.

En perspectives, il serait intéressant de compléter ces travaux de thèse avec d'autres études, à savoir le comportement à la fatigue, la durabilité, ainsi que des essais d'isolation phonique et acoustique.

Il est intéressant également de réaliser des essais d'impact sur les structures sandwichs élaborées, car le matériau de l'âme qui est le liège aggloméré possède une bonne aptitude d'absorption d'énergie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] L. Gil, Cortiça: produção, tecnologia e aplicação (Liège: Production, technologie et applications), Ed. I.N.E.T.I., Lisbonne, 1998.
- [2] A. Barberis, S. Dettori and M. R. Filiggheddu, Management problems in Mediterranean cork oak forests: post-fire recovery, *J. Arid Environ.*, 2003, 54, 565–569.
- [3] H. Pereira: Bulletin de l'Institut des produits forestiers - Cortiça, 1984, 545, 99-112.
- [4] C. Fialho, F. Lopes and H. Pereira, The effect of cork removal on the radial growth and phenology of young cork oak trees, *Forest Ecology and Management*, 2001, 141, 251–258.
- [5] M. I. d. F. Carrasquinho: Boletim do Instituto dos Produtos Florestais – Cortiça, 1987, 583, 17–18.
- [6] Ofelia Anjos, Helena Pereira, M. Emilia Rosa, Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork, *European Journal of Wood and Wood Products*, (2008) 66: 295–301
- [7] Augusta Costa, Helena Pereira and Ângelo Oliveira, Influence of climate on the seasonality of radial growth of cork oak during a cork production cycle, *Ann. For. Sci.* 59 (2002) 429–437.
- [8] B. Groh, C. Hubner and K. J. Lenzian, Water and oxygen permeance of phellem isolated from trees: the role of waxes and lenticels: *Planta*, 2002, 215, 794–801.
- [9] Lei Yafang et al, Chemical composition of cork from *quercus variabilis*, *Wood and Fiber Science*, 44(2), 2012, pp. 214-219.
- [10] M. F. S. Bento et al, A study of variability of suberin composition in cork from *Quercus suber* L. using thermally assisted transmethylation GC–MS, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 57 (2001) 45–55.
- [11] Klaas G.J. Nierop, Temporal and vertical organic matter differentiation along a vegetation succession as revealed by pyrolysis and thermally assisted hydrolysis and methylation, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 61 (2001) 111–132.
- [12] M. M. Caldas, J. L. Ferreira and M. Borges: Boletim do Instituto dos Produtos Florestais – Cortiça, 1986, 578, 339–342.
- [13] Guide technique pour la gestion des forêts de chêne liège en corse, division forestière de l'Office du Développement Agricole et Rural de Corse, Edition 2008.
- [14] Lawton, J.R. (1980): Observations on the structure of epidermal cells, particularly the cork and silica cells, from the flowering stem internode of *Lilium temulentum* L. (Gramineae). *J. Linn. Soc. Bot.* 80 :161-177.
- [15] Vicelina B. Sousa et al, Characterization of cork oak (*quercus suber*) wood anatomy, *IAWA Journal*, Vol. 30 (2), 2009: 149–161.

- [16] M. L. Molinas and D. Verdaguer, lignotuber ontogeny in the cork-oak (*quercus suber*; fagaceae) I. late embryo, *American Journal of Botany* 80(2):172-181, February 1993.
- [17] M. L. Molinas and D. Verdaguer, Lignotuber ontogeny in the cork-oak (*quercus suber*; fagaceae) II. Germination and young seedling, *American Journal of Botany*, 1993, 80(2), 182–190.
- [18] H. Pereira, Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. *Wood Science and Technology*, 1988, 22, 211–218.
- [19] L. J. Gibson, K. E. Easterling and M. F. Ashby, The structure and mechanics of cork, *Proc. R. Soc. London*, A377, 99–117, 1981.
- [20] Cordeiro, N., Neto, C. P., Gandini, A., & Belgacem, M. N., Characterization of the cork surface by inverse gas chromatography. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1995 (174), 246–249.
- [21] M. A. Bernards and N. G. Lewis, The macromolecular aromatic domain in suberized tissue: a changing paradigm, *Phytochemistry*, 1998, 47, 915–933.
- [22] M. F. S. Bento et al, A mass spectrometry study of thermal-dissociation of cork. *International Journal of Mass Spectrom.* 1992 (112), 191–204.
- [23] Pereira H., Studies on the chemical composition of virgin and reproduction cork of *Quercus suber* L. *Anais Instituto Superior de Agronomia de Lisboa*, 1981 (40), 17-25.
- [24] P. J. Holloway, The suberin composition of the cork layers from some ribes species, *Chemistry and Physics of Lipids*, Volume 9, Issue 2, October 1972, Pages 171-179.
- [25] José Graça and Helena Pereira, Diglycerol Alkenedioates in Suberin: Building Units of a Poly(acylglycerol) Polyester, *Biomacromolecules*, 2000, 1(4), 519–522.
- [26] C. Quilchano and T. Marañón, Dehydrogenase activity in Mediterranean forest soils, *Biology and Fertility of Soils*, April 2002, Volume 35, Issue 2, pp 102–107.
- [27] Bouzit Fatima, Elaboration et caractérisation mécanique, en statique et en fatigue des panneaux sandwichs à base de renfort naturels. Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2014.
- [28] Arbaoui Jamel Eddine, Etude comparative et caractérisation mécanique des structures sandwichs multicouches. Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine-Metz. 2009.
- [29] K. Ait Tahar, K. Saidani et H. Ait aider, Analyse expérimentale d'une structure composite de type sandwich. *Journal d'ingénierie clé matériaux* vol. 482, ACMA, 2012, Fès, Maroc.
- [30] Lakreb Nadia, Elaboration et caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich de panneau sandwich à base de liège et bois de déroulage. Thèse de doctorat, Université de Boumerdes, 2014.

- [31] Benfadel Karima, Elaboration et caractérisation de panneaux sandwichs à matrice cimentaire destinés à la construction. Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2014.
- [32] Chemami Abdenacer, Etude de la performance des matériaux composite sandwichs-application en fatigue. Thèse de doctorat, Université B.M Annaba, 2012.
- [33] Hachemane Belkacem, Analyse expérimentale du comportement mécanique d'un composite soumis à des sollicitations d'impacts, Thèse de doctorat, Université de Boumerdes, 2012.
- [34] Spaulding K.B., Fiberglass Boats in Naval Service, Naval Engineers Journal, April 1966, volume 78, numéro 2, pp 333/342.
- [35] Site web : www.google.fr, "Glossaire des matériaux composites", Centre d'animation régional en matériaux avancés, 2006.
- [36] Mebarki Abd Elyamine, Analyse dynamique libre des plaques composites multicouches, Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [37] Mustapha Malha, Mise en œuvre, caractérisation et modélisation des matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de doum. Thèse de doctorat, Université Mohamed V- Agdal, Rabat (2013).
- [38] Nourredine Arabi, Contribution à l'étude du composite ciment verre et durabilité des fibres de verre. Thèse de doctorat, Université BM-ANNABA, 2006.
- [39] Soo-Jin Park, Fan-Long Jin, Changjin Lee, Preparation and physical properties of hollow glass microspheres-reinforced epoxy matrix resins, Materials Science and Engineering A 402 (2005) 335–340.
- [40] Gay Daniel, "Matériaux composites", Ed. Hermès Sciences Publication, Paris, 5 édition révisée, 2005.
- [41] Ronald F. and Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, McGraw Hill publishing Co. ISBN-13: 978-0-07-292139-7, 1994.
- [42] Tsai, S.W and Hahn, Introduction to Composite Materials, H.T., Technomic Publishing Co., Lancaster, P.A (1980).
- [43] Y. Perrot, Contribution à l'étude des matériaux composites utilisés en construction navale de plaisance, Thèse de l'Université de Bretagne Sud, U.F.R Sciences et Sciences de l'Ingénieur, 2006.
- [44] Matériaux composites : Introduction à l'usage des ingénieurs et des techniciens, Ecrit par la Société Européenne de Propulsion (S.E.P), éditeur TEKNEA, TEKNEA, ISBN : 9782877170079, 1989, 288 p.

- [45] S. Bensaïd, Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotrope, Engineering Sciences, Hal id : tel-00424804, Université de Nantes, 2006. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00424804>.
- [46] Laurent Gornet, Généralités sur les matériaux composites, Ecole d'ingénieur, Hal Id : cel-00470296, 2008. <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00470296v1/document>.
- [47] Haudin J.M., "Structures et morphologies des polymères semi-cristallins", Introduction à la mécanique des polymères, ed. C. G'Sell, J.M. Haudin, Institut national polytechnique de lorraine, p. 97-115, 1995.
- [48] Kelly A., Zweben C., Comprehensive composite materials : polymer matrix composites, volume 2, Elsevier, 2000.
- [49] K. Mimura, H. Ito, Characteristics of epoxy resin cured with in situ polymerized curing agent, Polymer 43 (2002) 7559–7566.
- [50] Zaidi Ali, Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet de vieillissement), mémoire de magister, Université de Tizi Ouzou, 2014.
- [51] Christiane El Hage, Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel, Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne, 2006.
- [52] Rouam Kamila, Elaboration et caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles. Mémoire de Magister, Université de Boumerdes.
- [53] Kausch H.H, Heymans N., Plummer C.J., Decroly P., Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques", Traité des matériaux, volume 14. Presses polytechniques et universitaires romandes, p. 195-199, 2001.
- [54] Pascal. Rosier, Résines polyester, Moulage, Guide N°5, 2000. http://www.pascalrosier.com/pdf/guides/guide_5_resine_polyester.pdf
- [55] A. Raskin, Les résines composites, Support de cours (version PDF), Université médicale virtuelle francophone, 2009.
- [56] S. Boukais, Comportement mécanique et dureté de la résine époxy renforcée de charges, 9^{ème} Congrès de mécanique FS, Senlalia, Marrakech, 2009.
- [57] S. Grishchuk, Structure, thermal and fracture mechanical properties of Benzoxazine-modified amine-cured DGEBA epoxy resins. Express Polymer Letters Vol. 5, N°3(2011) 273-282, 2011. www.expresspolymlett.com.
- [58] Amar Boudefel, Propriétés diélectriques de polymères composites et leurs applications en microélectronique, Thèse de doctorat, Université de Annaba, 2009.

- [59] Cheng Fu Yang, Li-Fen Wang, Sang-Mao Wu and Chean-Cheng Su, Characterization and curing kinetics of Epoxy / Silica nano-hybrids. *Materials* 2015 Article, 8 (10) 7032-7040, 2015.
- [60] Zabata Massot Céline, Synthèse des matériaux composites par Co-broyage en voie sèche, caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux, Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Toulouse, 2004.
- [61] M.I. Giannotti, M.J. Galante, P.A. Oyanguren and C.I. Vallo, Role of intrinsic flaws upon flexural behaviour of a thermoplastic modified epoxy resin, *Polymer Testing* 22 : 429–437, 2003.
- [62] Sandali Abdeldjalil, Rabhi Nabila, Comportement au choc des stratifiés composites renforcés par des fibres naturelles (fibres de cactus), Université Kasdi Marbah, Ouargla, 2012.
- [63] Yamina Aimane, Hyper-élastique pour la simulation des renforts fibreux en grandes transformations. Thèse de doctorat, Institut National des sciences appliquées de Lyon, 2007.
- [64] http://www.hexcel.com/Ressources/DataSheets/BrochureDataSheets/Prepreg_Technology.pdf.
- [65] Yahyaoui Souad, étude expérimentale de la durabilité des éléments fissurés en béton armé rigidifiés par les matériaux composites, Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2006.
- [66] Mustapha Assarar, Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs. Thèse de doctorat, Université de Maine, 2007.
- [67] A. Mir, Etude mécanique, thermomécanique et hygrothermique d'un matériau composite sandwich à âme en liège et peaux en jute/époxy. Thèse de doctorat, Université de Boumerdes 2010.
- [68] Brahmakumar M.; Pavithran C.; Pillai .RM.; Coco nut fiber reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fiber on fiber/matrix interfacial bonding and strength of composites. *Compos Sci Technol* 2005,65 : 563–569.
- [69] Belkacemi Cherifa, Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort en matière végétale. Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2006.
- [70] Mohamed El Hadi Bourahli, Caractérisation d'un composite verre/époxy, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif 1, 2013.
- [71] Satyanarayana KG.; Arizaga GGC. and Wypych F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview. *Prog Polym Sci* 2009 ; 34 : 982–1021.
- [72] Amir Shahdin et al., Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams: A comparison with honeycomb and foam sandwich beams, *Composite Structures* 90 (2009) 404–412.

- [73] Allen H. G., Analysis and design of structural sandwich panels, Pergamon Press, London, U.K. 1961.
- [74] Craig A. Steeves, Norman A. Fleck, Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part II: experimental investigation and numerical modelling, *International Journal of Mechanical Sciences* 46 (2004) 585–608.
- [75] Castro O, Silva JM, Devezas T, Silva A, Gil L. Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Mater Design* 2010; 31: 425-32.
- [76] S. Sanchez-Saez, E.Barbero, J.Cirne, 2011. Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts. *Journal of Materials Letters* 65; 2152-2154.
- [77] Hasim Pihtili, An experimental investigation of wear of glass fibre–epoxy resin and glass fibre–polyester resin composite materials, *European Polymer Journal* 45 (2009) 149-154.
- [78] Jesús Rives, Ivan Fernandez-Rodriguez, Joan Rieradevall, Xavier Gabarrell, Environmental analysis of the production of natural cork stoppers in southern Europe (Catalonia e Spain), *Journal of Cleaner Production* 19 (2011) 259-271.
- [79] J. M. Berthelot, *Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des Structures*, 4^{ème} édition, 1996.
- [80] Bezzazi A. Etude théorique et expérimentale du comportement mécanique en statique et en fatigue des matériaux composites stratifiés et sandwichs en flexion 3 points. Thèse 2003. Université d'Annaba.
- [81] H. Allen, Analysis and design of structural sandwich panels, volume 51: Pergamon press Oxford, 1969.
- [82] D. Zenkert, et al., An introduction to sandwich construction, Engineering Materials Advisory Services, Chameleon Press, London, 1995.
- [83] Y. Frostig, et al., High Order Theory for Sandwich Beam Behavior with Transversely Flexible Core, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 118, p. 1026, 1992.
- [84] V. Sokolinsky, et al., Special behavior of unidirectional sandwich panels with transversely flexible core under statical loading, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 37, pp. 869-895, 2002.
- [85] V. Sokolinsky, et al., Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams, *Composite Structures*, vol. 60, pp. 219-229, 2003.
- [86] E.W. Andrews, L.J. Gibson, M.F. Ashby, The creep of cellular solids, *Acta Materialia*, 2853-2863, 1999.

- [87] T.C.Triantafillou, J. Zhang, T.L. Shercliff, L.J.Gibson and M.F.Ashby, Failure surfaces for cellular materials under multiaxial loads—II. Comparison of models with experiment, *International Journal of Mechanical Sciences*, 665-678,1989.
- [88] J. Zhang and M. Ashby, The out-of-plane properties of honeycombs, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 34, pp. 475-489, 1992.
- [89] K. Lingaiah and B. Suryanarayana, Strength and stiffness of sandwich beams in bending, *Experimental Mechanics*, vol. 31, pp. 1-7, 1991.
- [90] Timoshenko S. P., *Résistance des matériaux*, Dunod, Paris, Tome 1, 1968.
- [91] Plantema F. J., *Sandwich Construction*, New York, John Wiley and Sons, 1966.
- [92] Zenkert, D., Strength of sandwich beams with interface debondings, *Composite Structures* 17 (4), 331–350, 1991.
- [93] Vinson J.R., *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*. Lancaster, Pa.: Technomic Publishing Co (1999).
- [94] Engin M. R., *Characteristics of Innovative 3-D FRP Sandwich Panels*. Ph.D thesis, North Carolina State University, Raleigh, 2005.
- [95] Kelsey S, Gellatly RA, Clark BW., *Aircraft Engng*, 30 (3): 249-308, 1958.
- [96] Arias F, Kenis Paul J. A, Xu B., *Fabrication and characterization of microscale sandwich beams*, *J. Mater. Res*, 16: 597-605, 2001.
- [97] Magnus B., *Fatigue crack initiation and propagation in sandwich structures*. PhD thesis Department of Aeronautics Division of Lightweight Structures Stockholm Sweden. 1998.
- [98] Jin Dai, Hahn Th., *Flexural behavior of sandwich beams fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding, composite structure*, 61: 247-253, 2003.
- [99] Ali Sen, Jan Van den Bulcke, Nele Defoirdt, Joris Van Acker, Helena Pereira, *Thermal behaviour of cork and cork components*, *Thermochimica Acta* 582 (2014) 94–100.
- [100] A. Belghit, A. Bennis, *Experimental analysis of the drying kinetics of cork*, *Energy Conversion and Management*, 50 (2009) 618–625.
- [101] H. Pereira (2007). *Cork: Biology, production and uses*. Book 336 pages. Elsevier, Amsterdam.
- [102] Li Y., Mai Y.W, Ye L. (2000), *Sisal fibre and its composites: a review of recent developments*. *Composites Science and Technology*, vol.60 issue 11, p.2037-2055.
- [103] Ali Sen, António Velez Marques, Jorge Gominho, Helena Pereira, (2012), *Study of thermochemical treatments of cork in the 150÷400°C range using colour analysis and FTIR spectroscopy*, *journal of Industrial Crops and Products*.

- [104] Shih Y.F., Mechanical and thermal properties of waste water bamboo husk fiber reinforced epoxy composites. *Mater. Sci. Eng. A* 2007;445–446:289–95.
- [105] Deng S, Zhang J, Ye L, Wu J. Toughening epoxies with halloysite nanotubes. *Polymer* 2008; 49:5119–27.
- [106] Maurer O. New reactive, halogen-free flame retardant system for epoxy resins. *Polym. Degrad. Stab.* 2005;88(1):70–3.
- [107] Low IM, McGrath M, Lawrence D, Schmidt P, Lane J, Latella BA. Mechanical and fracture properties of cellulose fibre reinforced epoxy laminates. *Composites Part A* 2007; 38:963–74.
- [108] De Rosa IM, Santulli C, Sarasini F. Mechanical and thermal characterization of epoxy composites reinforced with random and quasi-unidirectional untreated phormium tenax leaf fibres. *Mater Des* 2010; 31:2397–405].
- [109] NF EN ISO 527-4. Détermination des propriétés en traction –Partie 4 : Conditions d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres isotropes et orthotropes, Avril 1997.
- [110] NF EN 13170, « Produits isolants thermiques pour le bâtiment - Produits manufacturés en liège expansé : détermination de la conductivité thermique », avril 2009.
- [111] NF EN 1609, Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment-détermination de l'absorption d'eau à court terme : essai par immersion partielle, Juillet (1997).
- [112] NF T 57-102, mesure de la teneur en verre avec l'essai de calcination.
- [113] NF T 54-606, Norme Française, Structures sandwich à base de plastique, essai de flexion. Afnor 87461 ; Octobre 1987.
- [114] NF T 54-602, Norme Française, Structures sandwich à base de plastique, essai de la compression perpendiculaire. Afnor 83647 ; Novembre (1983).
- [115] NF T 54-603, Norme Française, Structures sandwich à base de plastique, essai de traction perpendiculaire, Afnor 83648 ; Novembre (1983).
- [116] NF T 54-604, Norme Française, Structures sandwich à base de plastique, essai de la compression longitudinale sans ou avec flambage, Afnor 86618 ; Décembre (1986).
- [117] NF T 54-605, Norme Française, Structures sandwich à base de plastique, essai de cisaillement, Afnor 83650 ; Novembre (1983).
- [118] Lakreb N., Bezzazi B., Pereira H., Mechanical strength properties of innovative sandwich panels with expanded cork agglomerates. *European Journal of wood and Wood Products*. Springer Berlin Heidelberg. 10 Apr 2015. DIO 10.1007/s00107-015- 0908-y.

- [119] Jamal Arbaoui, Yves Schmitt, J-L Pierrot, François Xavier Royer, Modélisation numérique et expérimentale du comportement de structures sandwich multicouche en nid d'abeille polypropylène, 15^e Colloque National de la recherche en IUT, Lille, 8-10 Juin 2009.
- [120] Giovanni Metelli, Nicola Bettini, Giovanni Plizzari, Experimental and numerical studies on the behaviour of concrete sandwich panels, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Volume 15 – No. 10/2011, pages 1465 to 1481.
- [121] Prak S., Gunata Z., Guiraud J.P., Schorr-Galindo S., Fungal strains isolated from cork stoppers and the formation of 2, 4, 6-trichloroanisole involved in the cork taint of wine. *Food Microbiology*, 24: 271-280, (2007).
- [122] Rosa M.E., Fortes M.A. Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork. *Journal of Materials Science*; 23(3):879–85, (1988).
- [123] Anjos O., Pereira H., Rosa M.E., Effect of quality; porosity and density on the compression properties of cork, *Holz Roh Werkst* 66(4):295–301, (2008).
- [124] Moreira Ras, de Melo FJQ, Rodrigues JFD. Static and dynamic characterization of composition cork for sandwich beam cores. *J Mater Sci* 2010; 45:3350–66.
- [125] Gameiro CP, Cirne J, Gary G. Experimental study of the quasi-static and dynamic behaviour of cork under compressive loading. *J Mater Sci* 2007; 42:4316–24.
- [126] L. Reis, A. Silva. Mechanical behavior of sandwich structures using natural cork agglomerated as core materials. *Journal of sandwich structures and materials*, 2009.
- [127] **B. Hami**, A. Irekti, C. Aribi, B. Bezzazi, A. Mir, Experimental study of sandwich multilayer reinforced by glass fibre and agglomerated cork, *journal of Advanced Composites Letters*, Vol. 23, Iss.5, PP. 121-125, November 2014.

Les travaux de thèse ont fait l'objet des publications internationales et nationales, ainsi que des communications internationales et nationales.

Publication Internationale

B. Hami, A. Irekti, C. Aribi, B. Bezzazi, A. Mir, Experimental study of sandwich multilayer reinforced by glass fibre and agglomerated cork, journal of Advanced Composites Letters, Vol. 23, Iss.5, PP. 121-125, November 2014.

Publication Nationale

Hami B., Irekti A., Bezzazi B, Etude du comportement au choc d'un Matériau Composite stratifié renforcé par des Fibres de Verre. Journal of Materials, Processes and Environment 1 (00) (2012).

Communications Internationales

Brahim Hami, Amar Irekti, Chouaib Aribi and Boudjema Bezzazi. «Experimental Study of Sandwich Multilayer Reinforced by Glass Fiber and Agglomerated Cork». Fifth Annual International Workshop on Advanced Materials (IWAM 2013). February 24 – 26, 2013. Ras Al Khaimah, United Arab Emirates. <https://sites.google.com/site/2013iwam/iwam-2013/program>

Hami Brahim, Irekti Amar, Mir Abdellah, Bezzazi Boujema. « Behavior bending of three and four points formed a sandwich hybrid envelopes and soul cork». The 4th International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials. Sinaia, Romania, 7-11 September 2011, ICSAAM2011. ISSN: 2247 – 8337. p.151. <http://icsaam2011.resist.pub.ro>

Hami Brahim, Irekti Amar, Bezzazi Boujema. « Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'un matériau composite à base de fibres de verre et de résine polyester ». 1^{er} Congrès International sur la mécanique avancée. Annaba 2010 les 23, 24 et 25 Mai 2010.

Irekti Amar, **Hami Brahim**, Bezzazi Boujema. « Synthèse des matériaux composites a matrices therm durcissables et charges minérales », Colloque International ; VII^{ème} journées sur les polymères organiques et leurs applications, JPOA VII, du 5 au 7 Mai 2011. Av. Mohamed VI-Tanger- Maroc. www.fstt.ac.ma/jpoa2011/Liste_Participants_jpoa2011.pdf

Irekti Amar, **Hami B**, Bezzazi B., Iratni A. « Synthetic Nanocomposite Materials Array and Thermosetting Mineral Fillers » The International Workshops on Advanced Materials (IWAM), in Ras Al Khaimah, United Arab Emirates, from the 20th-22nd of February 2011. <http://sites.google.com/site/iwam2011/iwam-2011/poster-sessions>

Irekti Amar, **Hami Brahim**, Bezzazi Boujema. « Valorisation des déchets de liège pour la fabrication des matériaux composites », 1^{er} Congrès International sur les Matériaux et Environnement CME 2010, CRAPC, Alger, 5 au 7 Octobre 2010.

Communications Nationales

Hami Brahim, Bezzazi Boujema. « Elaboration et caractérisation mécanique d'un matériau composite renforcé par des fibres de verre », conférence nationale sur les matériaux et structures (CNMS'2013) à l'Ecole National Polytechnique, 29 et 30 Octobre 2013.

Hami Brahim, Bezzazi Boujema. « Valorisation de la fibre de verre dans l'industrie navale », 1^{ère} CNEER' 2010 Organisé le 10 et 11 Mai 2010, à l'université de M'Hamed Bougara de Boumerdès. [Http://www.everyone.fr/cner2010/](http://www.everyone.fr/cner2010/)

Hami Brahim, Irekti Amar, Aribi Chouaib, Bezzazi Boudjema « Détermination des caractéristiques mécaniques d'une structure Sandwich multicouche renforcé par des fibres de verres ». IV^{ème} SNMPE, 15 au 16 Mai 2012, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès.