

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

LABORATOIRE : LAMOMS



EN VUE DE L'OBTENSION DU DIPLOME DE MASTER
ACADEMIQUE EN GENIE CIVIL

Option : Structures et Matériaux

THEME

**Elaboration et caractérisation d'un
composite à base de plâtre renforcé
par des fibres végétales**

Dirigé par :

M^{me} F.KHELOUI

Réalisé par :

SEDKAOUI Lamara

-Promotion 2016-

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tien a remercié Avon tout, Dieu de m'avoir donné la patience, ainsi que la volonté et le courage de réalisé ce travail.

*Je tien a exprimer mes sincères remerciements à ma promotrice **M^{me} KHALOUI Fatma**, pour avoir accepté de m'encadrer et pour sa disponibilité, son soutien et ses conseils qui mon permis de mener à bien ce projet.*

*Mes remerciements sincères s'adressent également au **professeur AIT TAHAR Kamel** pour son assistance continue durant la réalisation des essais et sa disponibilité durant tout le cursus de master*

*Mes remerciements vont à monsieur **SI SALAM** pour ses motivation et conseils qui m'ont beaucoup servies*

*Je voudrais remercier les ingénieurs du laboratoire de génie civil monsieur **BOUHERAOUA** pour sa disponibilité et les moyens mis à notre disposition pour le bon déroulement des essais, et monsieur **MAMMOU** pour sa présence et sa gentillesse.*

*J'adresse également mes remerciements au groupe de travail **MOUGARI Brahime, KOULOU GHALI Yamina.***

Que les membre de jury trouvent ici mes remerciements les plus vifs pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Mes sincères sentiments vont à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce projet, particulièrement ma chère famille, mes amis.

DEDICACES

*On premier lieu je tien a dédié ce travail à mes chers parents
Mes frères et sœurs, mes beaux-frères, mes belles sœurs*

Je le dédié aussi a la famille KOUDACHE

A mes amis de l'habitat(A28)

Et pour toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce projet



RESUME

L'utilisation des panneaux d'isolation à base de matériau composite, employé pour les façades des structures en génie-civil ne cesse de croître, et de se développer en mettant en place de nouvelles techniques et de nouvelles technologies. Une avancé très prometteuse permettant la réduction de la consommation énergétique et l'amélioration de l'isolation à la fois thermique, acoustique et phonique, tout en respectant les exigences environnementales. C'est dans ce contexte là que notre travail de recherche est proposé.

Ce travail a pour but d'étudier expérimentalement le comportement mécanique d'un panneau 36x36x4 en matériau composite, ayant du plâtre comme matrice et de la sciure de bois comme charges renforçantes, envelopper avec du tissu et plaque en polymère collés sur ses façades à l'aide d'une résine époxyde, sous chargement en poinçonnement et voilement.

L'ensemble des résultats obtenus a manifesté d'excellentes propriétés mécaniques et physiques, affirmant l'efficacité de ces nouveaux panneaux multicouches, notamment en terme de résistance à la rupture, légèreté, et la rapidité de réalisation.

Mots clés : sciure de bois, plâtre, essais mécanique, analyse.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	2
Chapitre I.....	4
Historique	5
I.1.Introduction.....	5
I.2. Matériau Plâtre.....	6
I.2.1. Présentation générale.....	6
I.2.2. Le matériau Gypse.....	7
I.2.2.1. Le gypse naturel	7
I.2.2.2. Le gypse de synthèse	8
I.2.2.3. Les phases semi-hydratées α et β	9
I.3. Formation du plâtre pris	10
I.3.1. Formation de l'édifice cristallin, origine des propriétés mécaniques	10
I.4. Comportement mécanique du plâtre sec	11
I.4.1. Caractérisation initiale	11
I.4.1. 1.Module d'Young	11
I.4.1. 2. Dureté	12
I.4.1. 3.Comportement à la rupture du plâtre	13
I.4.1. 3. 1. Contrainte à la rupture	13
I.5. Comportement mécanique du plâtre en présence d'eau	14
I.5.1 Loi de comportement	14
I.6. Fluage	15
I.7. Les différents types de bois	17
I.7.1 Propriétés physiques et mécaniques du bois	17
I.7.1.1 Propriétés physiques	17
I.7.1.2 Propriétés mécaniques	20
I.8. Sciure de bois	23
I.8.1.Présentation générale.....	23

I.8.1.1. Caractérisation du matériau	23
I.8.2. Les copeaux de bois	24
I.9. Le chanvre	24
I.9.1 La plante de chanvre	24
I.9.2 Morphologie de la tige du chanvre	25
I.9.3 La Chènevotte	26
I.9.4. Domaine d'application du chanvre	27
I.9.5. Propriétés des fibres de chanvre	28
I.10. Le liège	29
I.10.1. Les différents types de liège	29
I.10.2 Domaine d'utilisation du liège	31
I.10.3 Avantages et inconvénients du liège	32
I.10.4 Propriétés des lièges	32
I.11. Conclusion	34
Chapitre II	35
Introduction	36
II.1. Définition d'un matériau composite	36
II.2. Domaines d'utilisation des composites	36
II.3. Constituants des matériaux composites	38
II.3.1. Matrices	38
II.3.1.1. Résines thermodurcissables	38
II.3.1.2. Résines thermoplastiques	39
II.3.2. Additifs	39
II.3.3. Renforts	39
II.3.3.1. Fibres de verre	40

II.3.3.2. Fibres de carbone	40
II.3.3.3. Fibres aramides	40
II.3.3.4. Fibres céramiques	41
II.3.3.5. Caractéristiques mécaniques des fibres	42
II.4.Cycle de vie des matériaux composites	43
II.5.Architecture du composite	43
II.5.1.Matériau sandwich	43
II.5.1.1. Les éléments constituant les matériaux sandwichs	44
II.5.1.2 Intérêt des structures sandwichs	45
II.5.1.3. Rigidité flexionnelle des matériaux sandwichs	45
II.5.1.4. Contraintes et déformations des matériaux sandwichs	47
II.5.1.5 Comportement des sandwichs en flexion	48
II.5.1.6. Comportement des sandwichs au flambement	51
II.6. Les stratifiées	52
II.7. Les monocouches	53
II.8.Avantages et inconvénients des composites	54
II.9.Conclusion	55
Chapitre III	56
Introduction	57
III.1.Présentation des matériaux étudiés	57
III.1.1 Le Plâtre	57
III.1.1.1Propriétés.....	58
III.1.2 La sciure de bois	58
III.1.3 Le Liège	59
III.1.3.1 Propriétés du liège	60
III.1.3.2 Composition chimique du liège	61

III.1.3.3	Caractéristiques du liège	61
III.1.4	Le polymère (POLYMÈRE)	62
III.1.4.1	Propriétés mécaniques et physiques du polymère	63
III.1.4.2	Propriétés chimiques	63
III.1.4.3	Qualités économiques	63
III.1.4.4	Qualités environnementales	63
III.1.5	Résine époxyde	63
III.1.5.1	Propriétés	64
III.1.5.2	Caractéristiques	64
III.1.6	Le polypropylène	65
III.1.6.1	Propriétés	66
III.1.6.2	Caractéristiques	66
III.2	Analyse granulométrique	67
III.2.1	Machine utilisé	67
III.2.2	Procédures de tamisage	67
III.2.3	Présentation des différents refus du liège et sciure de bois	69
III.2.4	Définition des gammes	69
III.3	Elaboration des éprouvettes et des dalles d'essais	70
III.3.1	Moules utilisés	71
III.3.2	Moulage au contact	71
III.3.3	Mode opératoire	72
III.4	Présentation des essais mécanique	79
III.4.1	Machine d'essais	79
III.4.2	Essais de compression et de flexion	80
III.4.3	Essais de poinçonnement	81
III.4.4	Essais de flambement	82
III.5	Conclusion	83

Chapitre IV	84
Introduction	85
IV.1 Essais de compression sur les éprouvettes	85
IV.2 Essais de flexion	95
IV.3 Essais de poinçonnement sur les panneaux	107
IV.4 Essais de voilement sur les panneaux	115
IV.5 Conclusion	123
CONCLUSION GENERALE	125

Liste des Figures

Chapitre I :

Figure I.1. Modifications de structure au cours de la déshydratation de $\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	7
Figure I.2. Différents systèmes de cristallisation du gypse.....	8
Figure I.3. Photos prises au MEB des deux formes de semihydrate.....	9
Figure I.4. Cycle des systèmes sulfates de calcium — eau.....	10
Figure I.5. Variation de volume du plâtre, d'après.....	11
Figure I.6. Correspondance entre le diamètre des pores les plus courants (n_i) et la dureté Shore C pour des plâtres pris non adjuvés (\circ) et adjuvés (\bullet).....	12
Figure I.7. Essai de flexion sur des éprouvettes de plâtre sèches et saturées en eau, vitesse de traverse $1 \text{ mm} \cdot \text{mn}^{-1}$, d'après les résultats de Coquard.....	14
Figure I.8. Loi de comportement du plâtre pris à $E/P = 0,8$ dans différentes atmosphères, éprouvettes $160 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$	15
Figure I.9. Courbe schématique de fluage.....	16
Figure I.10. Comportement en fluage à différentes humidités relatives de plâtre pris gâché à $E/P = 0,8$, éprouvettes $250 \times 124 \times 15,6 \text{ mm}^3$, contrainte appliquée 28 kPa	16
Figure I.11. Formes de bois utilisées en construction.....	17
Figure I.12. Taux d'humidité en accord avec les conditions d'utilisation.....	19
Figure I.13. Comportement du bois en flexion.....	20
Figure I.14. Comportement du bois en cisaillement.....	21
Figure I.15. Comportement du bois en traction et compression parallèle au fil.....	21
Figure I.16. Comportement du bois en traction et compression perpendiculaire au fil.....	22
Figure I.17. Morphologie superficielle de la sciure de bois non traitée (a) et traitée chimiquement (b).....	23
Figure I.18. Les copeaux de bois.....	24
Figure I.19. Micrographie d'une coupe transversale de tige de chanvre.....	26
Figure I.20. Comparaison entre les fibres de chanvre: (a) défibrées et (b) fibrées (CHAMOIN, 2013).....	27
Figure I.21. coupe transversale d'une tige de chêne-liège.....	29
Figure I.22. liège de type mâle.....	30

Figure I.22' .liège de type femelle.....	30
Figure I.23. Liège sur épaisse.....	31
Figure I.24. Liège brûlé.....	31

Chapitre II :

Figure II.1 : Evolution du pourcentage d'utilisateurs des matériaux composites.....	37
Figure II.2 : Constituants d'un matériau composite.....	38
Figure II.3: Types de matrice.....	38
Figure II.4 :Types de renfort.....	40
Figure II.5 :structure aléatoire.....	41
Figure II.6 :Structure unidirectionnelle (nappe).....	41
Figure II.7 :Mode d'entrecroisement des fibres.....	42
Figure II.8 :Cycle de vie d'une pièce en matériau composite.....	43
Figure II.9: Schéma d'un sandwich.....	44
Figure II.10 : Charge appliquée sur une poutre sandwich.....	47
Figure II.11 Flexion trois-points.....	48
Figure II.12: Répartition des contraintes de cisaillement.....	49
Figure II.13 : Déformation en cisaillement dans l'âme.....	50
Figure II.14: Flexion 4 points.....	50
Figure II.15 : a) flambement global du sandwich; b) flambement local du sandwich.....	52
FigureII. 16: Composite stratifié.....	53
Figure II. 17: Exemple du plan du drapage d'un composite stratifié.....	53

Chapitre III :

Figure III.1: Plâtre utilisé.....	57
Figure III.2: Sciure de bois utilisée.....	59
Figure III.3: Liège aggloméré.....	59
Figure III.4: Liège à l'état brut.....	60
Figure III.5: Liège broyé.....	60

Figure III.6: Plaques en Polymère.....	62
Figure III.7: Résine utilisée.....	64
Figure III.8 : Forme du Tissu en fibres de Polypropylène.....	65
Figure III.9 : Tamiseuse.....	67
Figure III.10 : Fractionnement de la sciure de bois.....	68
Figure III.11 : Les gammes obtenues pour chaque matériau.....	70
Figure III.12 : Formes de moules.....	71
Figure III.13: Principe de mise en œuvre des renforts.....	71
Figure III.14: Détermination de la masse volumique apparente du plâtre.....	72
Figure III.15:Éprouvettes (sciure de bois / résine).....	74
Figure III.16: Epreuve de référence en Plâtre uniquement.....	77
Figure III.17 : Principales étapes de réalisation.....	77
Figure III.18 : Principales étapes de réalisation des panneaux.....	79
Figure III.19 :Machine d'essais IBERTEST.....	80
Figure III.20: Mode d'essai.....	81
Figure III.21: Mode d'essai de poinçonnement.....	82
Figure III. 22: disposition des accessoires pour l'essai de flambement.....	83

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes de références (témoins) du plâtre.....	86
Figure IV.2 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme1) 40%.....	87
Figure IV.3 :Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme1) 50%.....	87
Figure IV.4 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme2) 40%.....	88
Figure IV.5 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme2) 50%.....	88

Figure IV.6 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme3) 40%.....	89
Figure IV.7 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme3) 50%.....	89
Figure IV.8 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 40% - Liège (gamme1) 60%.....	90
Figure IV.9 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante :plâtre 50% - Liège (gamme1) 50%.....	90
Figure IV.10 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante :plâtre 40% - Liège (gamme2) 60%.....	91
Figure IV.11 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante :plâtre 50% - Liège (gamme2) 50%.....	91
Figure IV.12 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes plâtre 40% - Liège (gamme3) 60%.....	92
Figure IV.13 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante :plâtre 50% - Liège (gamme3) 50%.....	92
Figure IV.14 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes (Plâtre - Sciure de bois).....	93
Figure IV.15 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes (Plâtre - liège).....	94
Figure IV.16 : Confrontation des courbes Force-déplacement des meilleures variantes (plâtre-sciure de bois) et (plâtre-liège).....	94
Figure IV.17: Histogramme des forces (KN).....	95
Figure IV.17' : Histogramme des résistances à la compression (Mpa).....	95
Figure IV.18 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante de référence : témoin en plâtre.....	97
Figure IV.19 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme1) 40%.....	97
Figure IV.20 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme1) 50%.....	98
Figure IV.21 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme2) 40%.....	98

Figure IV.22 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme2) 50%.....	99
Figure IV.23 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme3) 40%.....	99
Figure IV.24 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme3) 50%.....	100
Figure IV.25 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante :plâtre 40% - Liège (gamme1) 60%.....	100
Figure IV.26 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante :plâtre 50% - Liège (gamme1) 50%.....	101
Figure IV.27 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante :plâtre 40% - Liège (gamme2) 60%.....	101
Figure IV.28 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 50% - Liège (gamme2) 50%.....	102
Figure IV.29 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante :plâtre 40% - Liège (gamme3) 60%.....	102
Figure IV.30 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante :plâtre 50% - Liège (gamme3) 50%.....	103
Figure IV.31 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes (Plâtre - Sciure de bois).....	104
Figure IV.32 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes (Plâtre - liège).....	104
Figure IV.33 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes (plâtre-sciure de bois) et (plâtre-liège).....	105
Figure IV.34: Histogramme des forces (KN).....	105
Figure IV.34': Histogramme de résistance à la flexion (Mpa).....	106
Figure IV.35 : Courbe Force-Déplacement Du Panneau témoin.....	108
Figure IV.36 : Courbe Force-Déplacement du Panneau Tissu/Tissu.....	109
Figure IV.37 : Courbe Force-Déplacement du Panneau Tissu/Poly/coté Tissu.....	109
Figure IV.38 : Courbe Force-Déplacement du Panneau Tissu/Poly/coté poly.....	110
Figure IV.39 : Courbe Force-Déplacement du Panneau Poly/Poly.....	110
Figure IV.40 : Confrontation des courbes Force-Déplacement des panneaux.....	111

Figure IV.41 :Histogramme des forces.....	111
Figure IV.42 : Courbe Force-Déplacement vertical.....	116
Figure IV.43 : Courbe Force-Déplacement vertical Panneau Tissu/Tissu.....	116
Figure IV.44 : Courbe Force-Déplacement vertical.....	117
Figure IV.45 : Courbe Force-Déplacement vertical Panneau Polymère/Polymère.....	117
Figure IV.46 : Courbe Force-Déplacement horizontal.....	118
Figure IV.47 : Courbe Force-Déplacement horizontal Panneau Tissu/Polymère.....	118
Figure IV.48 : Confrontation des courbes Force-Déplacement vertical des panneaux.....	119
Figure IV.49 : Histogramme des forces verticales.....	119
Figure IV.50 : Histogramme des déplacements horizontale.....	120

Liste des Tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1. Caractéristiques des phases de déshydratation du gypse.....	7
Tableau I.2. Différences entre les sulfates de calcium semihydratés α et β	9
Tableau I.3 : Contraintes à la rupture (MPa) mesurées en flexion 3 points sur du plâtre prisgâché à E/P = 0,82.....	13
Tableau I.4. Caractéristiques des fibres de chanvre [MOH05].....	28
Tableau I.5. Exemple de propriétés élémentaires (résistance mécanique et module d'Young) pour des fibres de chanvre	28
Tableau I.6. Fiche technique du granulat de liège.....	33

Chapitre II :

Tableau II.1: Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	39
Tableau II.2 : Caractéristiques des résines thermoplastiques.....	39
Tableau II.3 : Caractéristiques mécaniques des fibres.....	42

Chapitre III

Tableau III.1 : Variation de la résistance en fonction du temps.....	58
Tableau III.2 : Composition minérale du liège	61
Tableau III.3 : Composition chimique du liège.....	61
Tableau III.4 : Fiche technique de granulat de liège.....	62
Tableau III.5 : Les caractéristiques de la résine époxy.....	65
Tableau III.6 : Propriétés mécaniques du polypropylène.....	66
Tableau III.7 : Caractéristiques du tissu de polypropylène.....	66
Tableau III.8 : Les refus obtenus par tamisage du liège.....	69
Tableau III.9 : Les refus obtenus par tamisage de la sciure de bois.....	69
Tableau III.10 : Masses des gammes pour 2 kg de chaque matériau.....	70

Tableaux III.11 : Composition des éprouvettes d'essais selon les différentes Gammes et fractions.....	75
Tableau III.12:Composition des panneaux.....	78

Chapitre IV :

Tableau IV.1: Résultats des essais de compression.....	85
Tableau IV.2: Résultats des essais de flexion.....	96
Tableau IV.3: Résultats des essais de poinçonnement.....	108
Tableau IV.4: Résultats des essais de voilement.....	115

Introduction générale

Introduction Générale

Les recherches dans le domaine de nouveaux matériaux connaissent actuellement un essor important. La réduction de la consommation énergétique est devenue un objectif à atteindre dans le domaine de la construction. Beaucoup de procédés et techniques sont développés chaque année pour réduire la consommation ou la déperdition énergétique. Le développement de nouveaux matériaux à base des composites peut constituer une solution prometteuse. En général, en Algérie les différentes façades des structures sont réalisées par des murs en briques, ceci alourdit le poids de la structure, le temps de réalisation est plus important, et les différentes isolations (phoniques, thermiques, acoustiques, ..) ne sont pas vraiment satisfaisantes.

Dans ce travail de cette recherche, nous nous sommes intéressés à élaborer et analyser expérimentalement un nouveau matériau composite hybride constitué d'un mélange de plâtre, considéré comme matrice, de copeaux de sciure de bois et/ou de liège, considérés comme des charges renforçantes. Après durcissement, un tissu est collé sur une face de l'éprouvette à l'aide d'une résine STR, et sur l'autre face, une plaque en polymère. Ce procédé permet de donner une finition au parement constitué par l'assemblage de l'ensemble des plaques composites, alors que le tissu permet de coller les plaques composites au mur métallique dans le cas des structures métalliques. Plusieurs fractions ont été considérées dans le but d'optimiser la formulation.

Le travail de thèse entrepris est structuré en quatre chapitres et est terminé par une conclusion générale et des perspectives :

Le premier et le deuxième chapitres sont dédiés à la présentation d'une synthèse bibliographique très riche sur les différents matériaux utilisés dans notre travail, à savoir, le matériau plâtre, la sciure de bois et liège, les composites. Le comportement mécanique des matériaux multicouches, leurs avantages, et l'intérêt de leurs utilisations ainsi que les différents domaines d'application. L'analyse critique nous a permis de lister les principaux constituants de ces matériaux, les procédés essentiels de leurs mises en forme, ainsi que l'intérêt de ces matériaux révolutionnaires dans divers domaines. En deuxième lieu, nous avons présenté les principales propriétés physique et mécanique de ces structures composites, ainsi que leur mode de rupture le plus fréquent, qui est généralement le délaminage des semelles de l'âme dû à une forte concentration des contraintes au niveau des interfaces.

Le troisième chapitre comporte une description détaillée sur les étapes d'élaboration des différents spécimens réalisés, la constitution, les fractions, la composition optimisée, le procédé de confection des éprouvettes, les différentes configurations (variantes considérées), la réalisation des éprouvettes et enfin les modes d'essais considérés dans ce travail.

Le quatrième chapitre, est totalement dédié à la présentation et discussion des résultats obtenus. Les résultats mettent en évidence l'influence des différentes grandeurs (fraction optimisée, la granulométrie des charges, la nature de la matrice, le type de tissu et plaque polymère, ...) sur la résistance de ces multicouches composites.

Ce travail est finalisé par une conclusion générale et des perspectives.

Recherche bibliographique

Chapitre I

Généralités sur les matériaux

Historique

Le plâtre est un des plus vieux matériaux de construction utilisé par l'homme, avec la chaux et la terre cuite. Les premiers signes d'emploi de plâtre remontent à environ 9000 ans, sous forme de support pour fresques murales (fouilles en Anatolie). La faible température nécessaire à la production de poudre de plâtre et l'abondance de gypse naturel dans la nature expliquent cette ancienneté d'utilisation. L'un des premiers exemples d'utilisation du plâtre en construction est l'assemblage de blocs de pierre constituant la grande pyramide de Kéops.

Plus récemment, la généralisation de l'emploi du plâtre est liée à un édit de Louis XIV promulgué en 1667, imposant l'utilisation d'un enduit de plâtre dans les maisons à ossature de bois. Cet édit faisait suite à l'incendie de Londres l'année précédente, le plâtre étant déjà connu pour sa résistance au feu.

Actuellement, le plâtre est utilisé soit directement en enduits, ou bien en éléments préfabriqués, carreaux ou plaques (couche de plâtre entre deux cartons). C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation en intérieur, grâce à ses propriétés d'isolation thermique et acoustique et sa résistance au feu. La conductivité thermique d'un enduit de plâtre est de l'ordre de $0,26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, contre 1,15 pour un enduit de ciment ou 50 pour de l'acier.

Ces propriétés s'expliquent par la très grande porosité du matériau (l'air est un excellent isolant) et par la présence d'eau de structure (environ 20%). Le plâtre dégage de l'eau en présence de chaleur, stabilisant ainsi la température murale à des valeurs inférieures à 200°C. Une couche de plâtre de 1 m² et de 10 mm d'épaisseur représente une réserve d'eau de 1,4 litres, qui vont se dégager et limiter la progression du feu, sans aucun dégagement de gaz toxiques ou de fumées.

I.1 INTRODUCTION

Le plâtre, sulfate de calcium hydraté, est l'un des plus anciens matériaux de construction. On peut alors s'étonner de réaliser encore des recherches sur ce matériau connu de l'homme depuis la préhistoire. En réalité, le plâtre, souvent mis de côté en raison de ses faibles propriétés mécaniques au profit d'études sur le ciment ou le béton, a fait l'objet de quelques travaux de recherche concernant essentiellement son mécanisme d'hydratation mais ses propriétés d'isolation en tant que matériau ignifuge, ainsi que son comportement physique et mécanique en le renforçant avec d'autres matériaux (liège, sciure de bois ...) n'ont été que peu étudiées.

Dans ce chapitre on s'intéressera à la composition et au comportement du plâtre, la sciure de bois, liège, ainsi que d'autres matériaux (provenance, caractéristique ...), pour pouvoir ensuite déterminer les caractéristiques de l'assemblage de ces matériaux.

Le plâtre est cependant un matériau très intéressant sur le plan scientifique : c'est un liant hydraulique dont le mécanisme de prise avec l'eau est encore très controversé et qui présente de nombreux avantages par rapport aux autres matériaux de construction (béton, mortier, ciment).

Les points forts du plâtre sont essentiellement sa faible densité apparente, ses bonnes propriétés d'isolant thermique en raison de sa teneur élevée en eau et de son importante porosité. Il présente aussi l'avantage d'avoir un coût de production peu élevé. [1]

Le bois est utilisé dans l'industrie, la menuiserie, les charpentes ou le chauffage. Dans tous les cas, il génère une grande quantité de déchets. Généralement, le bois est un matériau de construction dont la transformation industrielle génèrent des sous-produits et des sciures qui peuvent être valorisés pour d'autres usages, tel que la valorisation énergétique comme combustible et comme adsorbant propre, naturel et à faible coût. Ces matériaux ne peuvent être mis en décharge directement à cause de la pollution que cela engendrerait.

C'est pourquoi, l'utilisation de la sciure de bois dans le domaine de la construction en isolation, fabrication de bétons légers contribue à valoriser certains sous-produits de l'industrie du bois. Plusieurs études ont porté sur l'utilisation de bois sous forme de cendres comme renfort [2-3]. Une utilisation sous forme de sciure de bois dans une matrice de ciment [4] ou de plâtre, ou bien dans une matrice de ciment et d'argile [5] est également envisageable.

Dans ce contexte, une étude au laboratoire a été menée afin de caractériser expérimentalement les comportements mécanique et physique d'un plâtre renforcé de sciure de bois.

A cet effet, après avoir présenté le protocole de préparation des échantillons, nous déterminerons et analyserons les principales caractéristiques de ce composite.

I.2. Matériau Plâtre

I.2.1. Présentation générale

Le plâtre est un matériau qui fait prise avec l'eau. Il est issu du gypse qui est un sulfate de calcium di-hydraté de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et que l'on trouve à l'état naturel sous forme d'albâtre ou de cristaux de sélénite. Le minerai gypse est généralement extrait de mines ou de carrières souterraines puis partiellement déshydraté par cuisson aux alentours de $110\text{ }^\circ\text{C}$ - $150\text{ }^\circ\text{C}$. Il est ensuite broyé pour donner la poudre blanche du plâtre : on obtient alors le semi hydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$. Selon les pressions de vapeur d'eau du milieu de cuisson du gypse, on peut obtenir deux variétés de semi-hydrate : le semi-hydrate α et le semi-hydrate β [6]. Un chauffage à plus haute température du gypse, $290\text{ }^\circ\text{C}$, donne de l'anhydrite CaSO_4 III, II ou I, sulfate complètement déshydraté, appelé "surcuit" [7]. Les différentes phases obtenues lors de la déshydratation du di-hydrate et leurs caractéristiques sont présentées Figure I-9 et Tableau I-2.

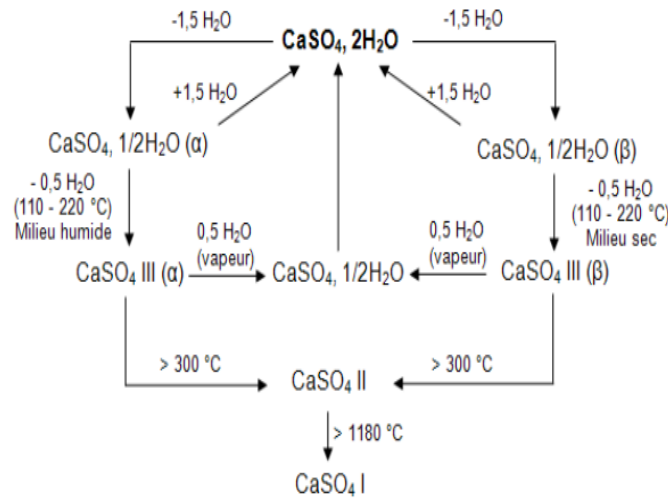


Figure I.1. Modifications de structure au cours de la déshydratation de $\text{CaSO}_4, x\text{H}_2\text{O}$ [6].

Tableau I.1. Caractéristiques des phases de déshydratation du gypse.

	$\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$		CaSO_4		
		Forme α	Forme β	Forme III	Forme II	Forme I
Appellation	Gypse	semi-hydrate α	semi-hydrate β	Anhydrite III	Anhydrite II	Anhydrite I
Système cristallin	Monoclinique	Rhomboédrique		Hexagonal	Orthorombique	Cubique faces centrées
Teneur en eau (% massique)	20,92	6,20	6,20	0	0	0
Masse volumique (g.cm^{-3})	2,31	2,76	2,63	2,58	2,93 à 2,97	2,93 à 3
Masse molaire (g.mol^{-1})	172,17	145,15	145,15	136,14	136,14	136,10
Volume molaire ($\text{cm}^3.\text{mol}^{-1}$)	74,50	52,40	55,20	52,80	45,8 à 46,4	

I.2.2. Le matériau Gypse

I.2.2.1. Le gypse naturel

Le gypse appartient à la famille des évaporites qui sont les roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau. On considère généralement que le gypse résulte de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées. Les gisements les plus importants datent de l'ère secondaire ou

tertiaire. Le gypse est présent en quantités relativement importantes dans la nature. Il existe de nombreux gisements dans le monde : en France, au Mexique, en Espagne, etc...

Le gypse cristallise dans le système monoclinique. À l'échelle moléculaire, il présente une structure feuilletée dans laquelle alternent une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium. Les principales variétés que l'on rencontre dans la nature sont :

- sous forme macro-cristallisée : le gypse lamellaire, le fer de lance, le gypse lenticulaire, la rose des sables (Fig I-2).
- sous forme micro-cristallisée : l'albâtre, le gypse fibreux, le gypse saccharoïde (Fig I.2), le gypse éolien.



Figure I.2. Différents systèmes de cristallisation du gypse.[1]

Le gypse exploité dans l'industrie plâtrière est une roche micro-cristallisée à grains généralement fins (gypse saccharoïde). Il est rarement pur et se trouve mélangé à des impuretés en nombre et proportion variables d'une carrière à l'autre : argile, calcaire, silice, dolomie, anhydrite, etc.

I.2.2.2. Le gypse de synthèse

Le gypse de synthèse est le produit d'une réaction chimique industrielle. Les principales sources de gypse chimique sont :

- la fabrication de l'acide phosphorique (phospho-gypse) par attaque sulfurique du phosphate naturel.
- la fabrication d'autres acides minéraux (acide borique : boro-gypse, acide fluorhydrique : fluoro-gypse) ou organiques : organo-gypses (acide citrique, tartrique, etc...). La fabrication de l'oxyde de titane (TiO₂) conduit également à une production de gypse appelé titano-gypse.
- la désulfuration des gaz et fumées : l'oxydation de l'anhydride sulfureux SO₂ (énanhydride sulfurique) puis sa réaction avec de la chaux, produit un gypse appelé désulfo-gypse.

Pour des raisons techniques et économiques, la production de gypse de synthèse est limitée. En effet, l'élimination des impuretés produites au cours de ce type de réaction nécessite des traitements chimiques coûteux.

I.2.2.3. Les phases semi-hydratées α et β :

Le semi-hydrate α est obtenu par cuisson du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en autoclave sous une pression de 1 bar et une température comprise entre 105 et 110 °C. On parle de préparation par voie humide. Le semi-hydrate α se présente sous forme de cristaux bien formés. Si le chauffage a lieu à l'air sec sans eau, on parle dans ce cas de préparation par voie sèche, on obtient la forme β du semi-hydrate. Le départ d'eau du gypse est violent et le semi-hydrate β cristallise mal. La Photo I-3 permet de comparer les deux formes de semi-hydrate ainsi obtenues.

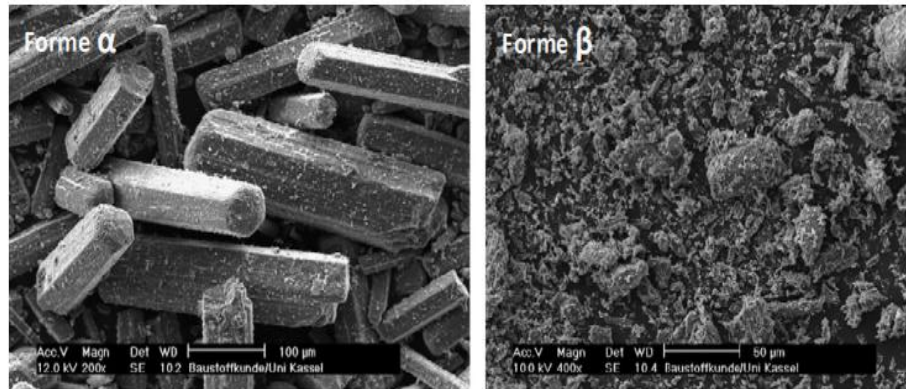


Figure I.3. Photos prises au MEB des deux formes de semi-hydrate[6].

Le semi-hydrate β se présente sous forme de particules floconneuses d'où un taux de porosité assez élevé, des propriétés mécaniques plus faibles et une plus grande surface spécifique que la forme α ce qui entraîne une vitesse d'hydratation plus rapide pour le semi-hydrate β . Une étude menée par Lewry et Williamson [8] pour un rapport eau/plâtre de 0,6 montre effectivement que la forme α présente une vitesse d'hydratation plus faible et un temps d'induction plus court que la forme β [6]. C'est pour cette dernière raison que la forme β du plâtre est souvent préférée dans le milieu industriel.

D'un point de vue structural, les études par diffraction de rayons X ou par spectrométrie infrarouge n'ont révélé aucune différence entre ces deux structures [9]. Les principales différences entre les formes α et β du semi-hydrate sont récapitulées dans le Tableau I-3.

Tableau I.2. Différences entre les sulfates de calcium semi-hydratés α et β . [7]

Paramètres	α - semihydrate	β - semihydrate
Dimensions des cristaux	10 - 20 μm	1 - 5 μm
Porosité de la matrice	non poreuse	poreuse
Cinétique de prise	faible	haute
Résistance finale	haute	basse

I.3. Formation du plâtre pris

Le plâtre pris est obtenu en hydratant de la poudre de semi-hydrate ou hémihydrate (souvent appelée poudre de plâtre), elle-même produite à partir de gypse extrait en carrière ou d'origine artificielle. Par exemple, les centrales thermiques sont une source importante de désulfo-gypse, obtenu à partir de l'épuration de gaz sulfurés. Le phospho-gypse, issu de l'industrie des phosphates, est également couramment utilisé. Le cycle des sulfates de calcium dans l'eau est présenté dans la figure 1.4.

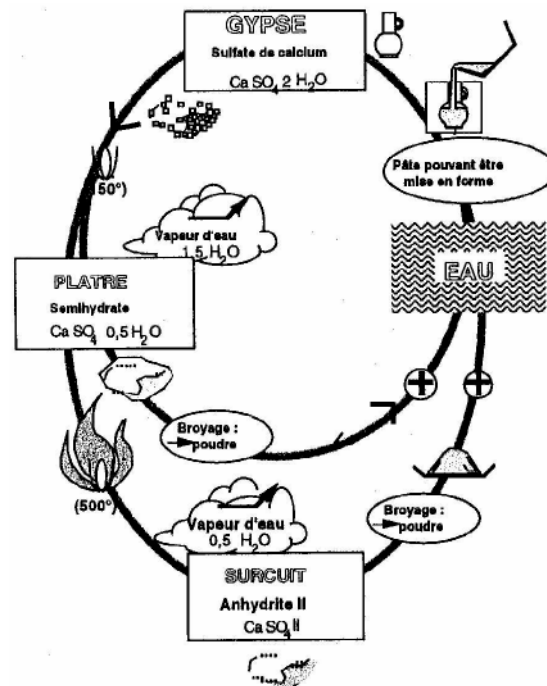


Figure 1.4. Cycle des systèmes sulfates de calcium — eau.[10]

Le gypse naturel ou artificiel est chauffé pour donner du semi-hydrate ou poudre de plâtre. Celle-ci est ensuite gâchée avec de l'eau pour former du plâtre pris de même formule chimique que le gypse de départ. Le rapport minimal entre la masse d'eau et la masse de poudre de plâtre (rapport E/P) nécessaire à l'hydratation est de 18,6% en masse ($E/P = 0,186$). Les plâtres sont habituellement gâchés à des rapports E/P plus élevés (typiquement égal à 0,8) pour obtenir une pâte fluide et facile à utiliser. Toutefois, plus la quantité d'eau utilisée pour le gâchage est importante, plus le matériau final est poreux, entraînant une diminution des propriétés mécaniques.

I.3.1. Formation de l'édifice cristallin, origine des propriétés mécaniques

Les aiguilles naissent et croissent dans la solution. Elles vont se rencontrer et créer une structure résistante. La formation de ce réseau est à l'origine des propriétés mécaniques que l'on cherche à caractériser. La variation volumique du plâtre lors de la prise apporte des

renseignements sur la naissance du réseau solide. Une courbe habituellement obtenue est présentée dans la figure 1.5.

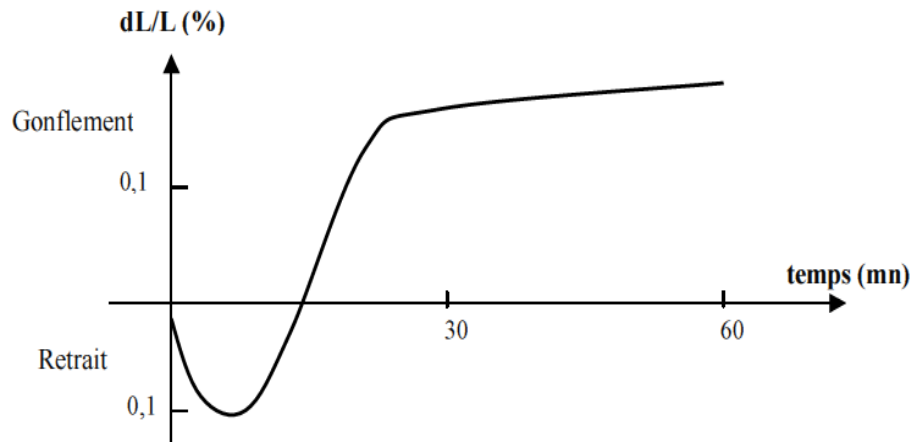


Figure I.5. Variation de volume du plâtre, d'après [11].

I.4. Comportement mécanique du plâtre sec

I.4.1. Caractérisation initiale

Le plâtre est considéré à l'état sec lorsqu'il a subi un séchage en étude à 45°C et environ 20% HR pendant plusieurs jours, jusqu'à obtenir un poids constant des éprouvettes. Il est très important de fixer un protocole de séchage car, comme il sera présenté dans la partie 1-4, l'humidité influence très nettement les propriétés mécaniques.

La loi de comportement du plâtre pris sec est traditionnellement enregistrée en flexion 3 ou 4 points. Le comportement obtenu est linéaire, avec une rupture brutale et fragile, quelle que soit la vitesse d'essai imposée. Les premières propriétés étudiées sont les plus facilement mesurables : dureté, module d'Young et contrainte à la rupture. Afin de les relier à la structure du matériau, le paramètre le plus simple et le plus couramment utilisé est la porosité totale. Elle est habituellement déterminée à partir des densités du gypse pur et du plâtre étudié ou en tenant compte de la masse minimale d'eau nécessaire à l'hydratation du semi-hydrate. Une relation entre les propriétés mécaniques et la porosité totale est alors déterminée.

I.4.1. 1. Module d'Young

L'évolution du module d'Young avec la porosité totale a souvent été enregistrée pour les matériaux céramiques et les lois d'ajustement des données expérimentales sont du type :

$$E = E_0 (1 - hp)$$

$$E = E_0 e^{(-bp)} \text{ (Spriggs)}$$

Avec : E_0 module d'Young à porosité nulle,
 p porosité totale,
 h, A et b constantes.

I.4.1. 2. Dureté

La variation de la dureté du plâtre en fonction de sa porosité totale est très proche de celle du module d'Young [12], et les lois utilisées pour simuler l'évolution avec la porosité sont identiques, seules les constantes des équations changent. Une étude sur des plâtres gâchés à un même rapport $E/P = 1$, mais avec des cristallisations différentes (ajout de gypse broyé, broyage du semi-hydrate de départ, utilisation d'adjuvants) montre des variations de dureté à porosité identique [15]. Le paramètre de microstructure utilisé pour modéliser les résultats est le diamètre des pores le plus courant, obtenu en poro-symétrie mercure :

$$D = D_0'' - K'' \varnothing$$

Avec : \varnothing diamètre le plus courant des pores,
 D dureté mesurée,
 D_0'' et k'' constantes.

Une corrélation entre les résultats expérimentaux et le diamètre le plus courant des pores est notée pour les plâtres non adjuvés, mais pas pour les plâtres adjuvés (figure I.6).

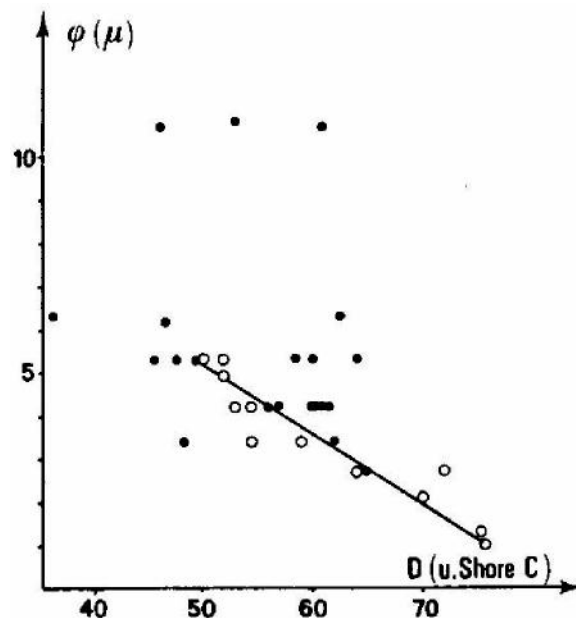


Figure I.6. Correspondance entre le diamètre des pores les plus courants (en μm) et la dureté Shore C pour des plâtres pris non adjuvés (o) et adjuvés (•) [15].

Les approches précédentes ont surtout cherché à rapprocher les propriétés mécaniques de la microstructure à travers un paramètre simple, la porosité globale p. Les lois d'ajustement des

données expérimentales sont souvent empiriques. Ainsi le point E_0 (module d'Young d'un plâtre pris supposé sans porosité) devrait être équivalent au module élastique du cristal de gypse. La microstructure très particulière du plâtre pris décrite précédemment (cristaux enchevêtrés, pores inter-cristallins et bulles d'air entraîné) n'est pas prise en compte. L'influence primordiale des liaisons entre cristaux n'est également pas considérée ici.

I.4.1. 3. Comportement à la rupture du plâtre

L'étude des propriétés à la rupture permet de prendre en compte des paramètres microstructuraux, notamment les défauts responsables de la rupture du plâtre pris.

I.4.1. 3. 1. Contrainte à la rupture

Coquard a déterminé la contrainte à la rupture de plâtres gâchés à $E/P = 0,82$ en flexion 3 points, en utilisant trois géométries d'éprouvettes. Les valeurs obtenues sont dépendantes de la taille des éprouvettes, un volume plus important entraînant une diminution de la contrainte à la rupture.

Tableau I.3 : Contraintes à la rupture (MPa) mesurées en flexion 3 points sur du plâtre pris gâché à $E/P = 0,82$ [14].

Géométrie de l'éprouvette (cm ³)	Volume (cm ³)	Contrainte à la rupture (MPa)	Ecart-type (MPa)
4x1,2x1,5	9	4,5	0,66
6x1,5x3	27	3,85	0,44
10x1,5x5	75	3,65	0,38

Les valeurs mesurées sont faibles, le plâtre pris n'est pas très résistant mécaniquement. La dispersion sur les valeurs expérimentales, à taille donnée, est comprise entre 10 et 15%. Pour étudier cette dispersion, Coquard a appliqué la statistique de Weibull sur le plâtre sec [16]. Cette théorie suppose que le matériau contient des défauts répartis aléatoirement et dont la rupture entraîne celle de l'échantillon. La probabilité de rupture d'un échantillon en fonction de son volume et de la contrainte appliquée d'après la théorie de Weibull est donnée par :

$$P_f = 1 - \exp\left(-V \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right)$$

Avec :

- P_f** probabilité de rupture à une contrainte σ ,
- m** module de Weibull,

- V volume sollicité mécaniquement,
- σ contrainte appliquée à l'échantillon,
- σ_u contrainte seuil,
- σ_0 facteur de normalisation.

Le paramètre m traduit la dispersion des propriétés à la rupture : plus il est faible, plus le matériau présente une grande dispersion des contraintes à la rupture. Pour des céramiques, le paramètre m varie entre 10 et 30, et pour des métaux, il peut atteindre 100.

I.5. Comportement mécanique du plâtre en présence d'eau

Après la détermination des propriétés du plâtre pris sec, il convient d'étudier l'effet de l'humidité. L'influence néfaste de l'eau sur les propriétés mécaniques du plâtre pris est bien connue : dans une atmosphère humide ou après une inondation, des plaques de plâtre installées au plafond d'une pièce se voilent sous leur propre poids.

I.5.1 Loi de comportement

Les lois de comportement du plâtre pris sec et saturé en eau sont connues depuis longtemps. Coquard [14] les a déterminées en flexion 3 points, pour une vitesse de traverse de 1 mm.mn^{-1} . La figure I.7 schématise les résultats obtenus.

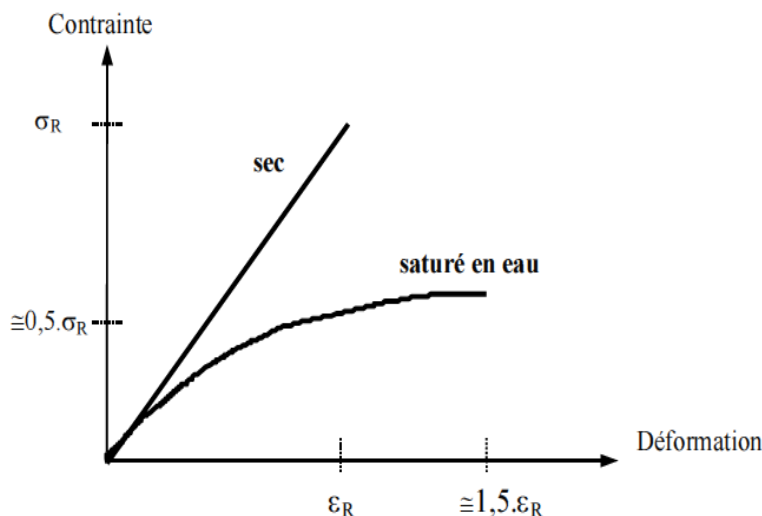


Figure I.7. Essai de flexion sur des éprouvettes de plâtre sèches et saturées en eau, vitesse de traverse 1 mm.mn^{-1} , d'après les résultats de Coquard.[14]

La loi de comportement du plâtre pris est fortement modifiée par la masse d'eau reprise par le matériau. A une vitesse d'essai donnée, un plâtre pris sorti d'étuve présente un comportement linéaire élastique, tandis qu'un plâtre pris saturé en eau présente un endommagement important. Peu de matériaux montrent une telle différence de comportement, en faisant simplement varier la quantité d'eau absorbée.

Les lois de comportement en flexion 3 points à différents taux d'humidité relative ont été enregistrées par Badens [Bade 98] (figure I.8).

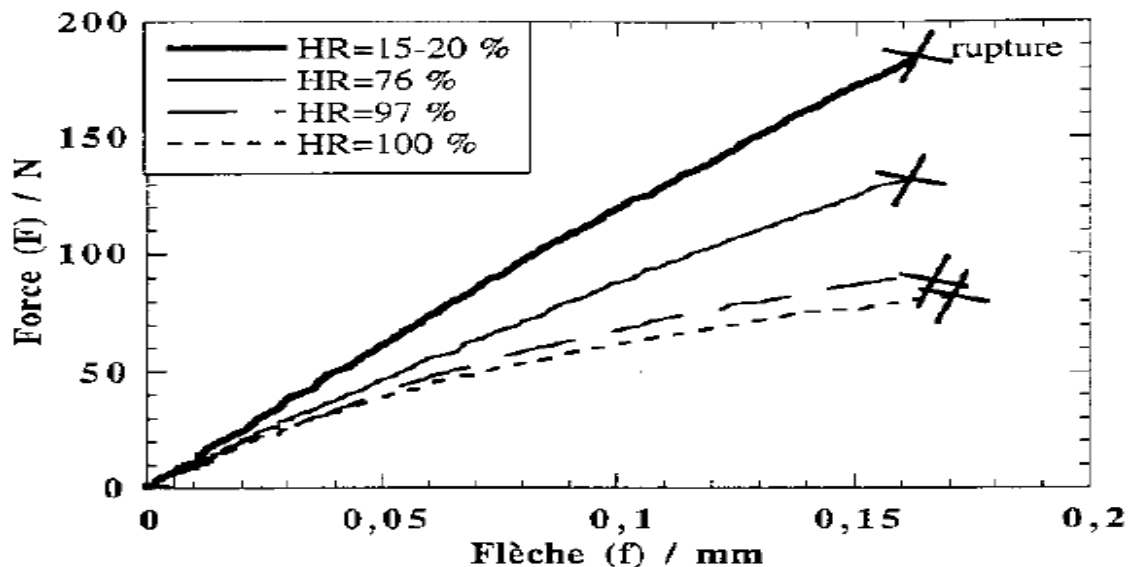


Figure I.8. Loi de comportement du plâtre pris à E/P = 0,8 dans différentes atmosphères, éprouvettes 160 x 20 x 20 mm³ [Bade 98].

Il apparaît là aussi que les premières quantités d'eau absorbées conduisent à une forte diminution de la contrainte à la rupture, mais sans entraîner une non-linéarité importante de la loi de comportement, alors que pour des taux d'humidité relative plus élevés (97 %), la non-linéarité devient importante, la diminution de la résistance étant moins rapide.

En conclusion, la dissolution des contacts entre cristaux et la modification du faciès cristallin semblent avoir une influence seulement à une échéance d'au minimum quelques jours sur les propriétés mécaniques.

I.6. Fluage

Les essais précédents ont montré l'importance de la non-linéarité du comportement lors d'essais de rupture, menés à vitesse élevée. Une autre méthode pour suivre l'endommagement d'un matériau est le suivi de sa déformation sous une charge constante : le fluage. Une courbe classique de fluage est présentée dans la figure I.9.

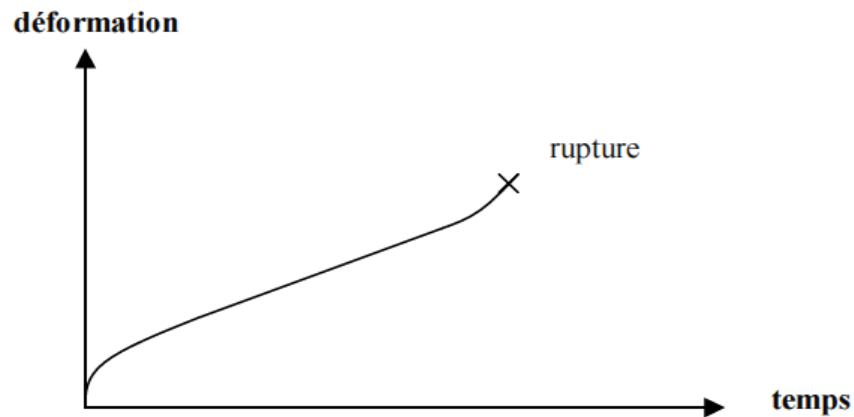


Figure I.9. Courbe schématique de fluage.

Si la vitesse de déformation est constante, elle peut s'écrire sous la forme [22]:

$$\dot{\epsilon} = A(sh(a \cdot \sigma))^n$$

Avec : A et a constante,

σ contrainte appliquée,

n constante (exposant de contrainte).

L'étude du fluage se déroule sur une longue période (plusieurs jours, voire plusieurs mois). Les phénomènes actifs dans ce type d'essai peuvent donc être différents de ceux opérant lors d'un essai mécanique habituel.

Badens a étudié le fluage du plâtre pris en flexion 3 points, à différents taux d'humidité relative. Seuls des taux supérieurs à 95% HR permettent d'enregistrer des déformations reproductibles sur des plaques de 250x124x15,6 mm³ sous une contrainte de 28 kPa (figure I.10).

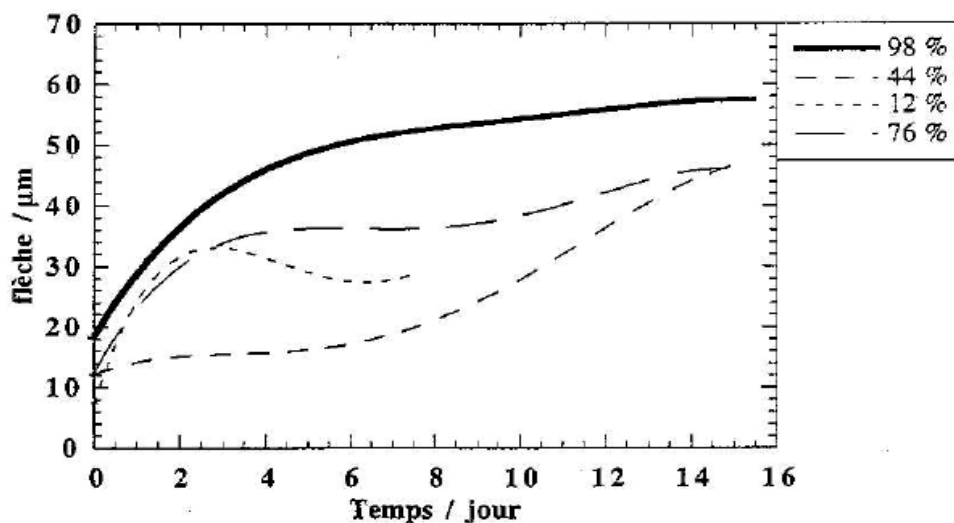


Figure I.10. Comportement en fluage à différentes humidités relatives de plâtre pris gâché à E/P = 0,8, éprouvettes 250x124x15,6 mm³, contrainte appliquée 28 kPa [Bade 98]

En conclusion de ces études, le fluage du plâtre semble s'expliquer par différents mécanismes : des glissements intercrystallins favorisés par l'eau, la possibilité de dissolution — recristallisation au niveau des contacts, le gypse étant soluble dans l'eau (solubilité 2,6 g.l-1 à température ambiante, valeur pouvant être différente dans les pores du matériau), avec transport de matière en présence d'eau liquide dans l'échantillon.

I.7. Les différents types de bois :

Dans la construction, le bois est utilisé principalement sous deux formes :

- Bois massif
- Bois reconstitué

Le bois massif est utilisé essentiellement pour les éléments de charpente traditionnelle. Le bois reconstitué peut être fabriqué à partir de deux sous-produits tels que les sciures ou des bois de moindre qualité, ou à partir de composants en bois (lamelles par exemple). On distingue ainsi :

- Les panneaux : ces produits de grand format sont constitués d'éléments de placage fins, de lames de bois, de particules ou de fibres assemblés par collage, pressage et/ou thermo durcissement d'un liant. De nombreux panneaux ont été mis au point en fonction de divers usages spécifiques.
- Les poutres reconstituées : bois lamellé collé (BLC).

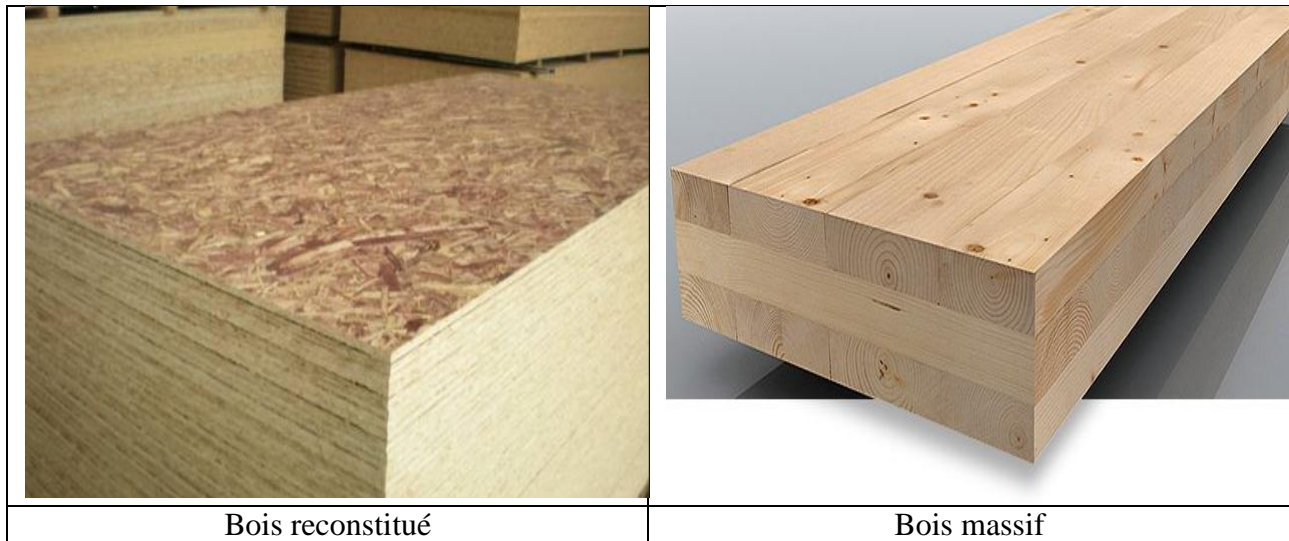


Figure I.11. Formes de bois utilisées en construction. [25]

I.7.1 Propriétés physiques et mécaniques du bois :

I.7.1.1 Propriétés physiques :

Le bois est un matériau particulier dont ses propriétés varient en fonction de différents facteurs. Les arbres étant des êtres naturels, vivants et très diversifiés, les propriétés du bois varient selon le type d'essence, les conditions de croissance et le taux d'humidité. Le bois est

considéré comme étant un matériau anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés varient selon les différentes directions. L'aptitude que possède le bois à absorber l'humidité (hygroscopicité) est une caractéristique majeure qui vise ce matériau. Lorsqu'il varie, le taux d'humidité provoque des changements dimensionnels du matériau (retrait et gonflement). L'humidité est également responsable de la pourriture du bois quand elle est en présence de certaines autres conditions environnantes. [25]

➤ **Hygroscopicité**

La teneur en humidité est le rapport exprimé en pourcentage de la masse de l'eau présente dans le bois sur la masse du bois anhydre (sec).

Le bois est un matériau qui contient de l'eau sous deux formes. Lorsque la teneur en humidité est maximale, il y a présence d'eau absorbée à l'intérieur des parois cellulaires ainsi que de l'eau libre contenue dans les vides à l'intérieur des cellules. Quand le bois sèche, c'est l'eau libre à l'intérieur des cavités cellulaires qui s'évapore en premier, jusqu'à l'obtention du taux d'humidité (TH) correspondant au point de saturation des fibres. Ce dernier se situe à une teneur en humidité d'environ 30 % pour la plupart des essences de bois. Au-delà de cette teneur en humidité, il ne se produit plus de changements dimensionnels (gonflement).

Teneur en humidité d'équilibre : En dessous du point de saturation des fibres, le bois perd ou absorbe de l'humidité jusqu'à ce que la teneur en humidité soit en équilibre avec celle de l'air ambiant. À cette teneur en humidité d'équilibre, le bois ne gagne ni ne perd d'humidité quand il est exposé à une température et à une humidité données.

L'eau peut être éliminée par séchage, naturellement ou au séchoir de façon à obtenir du bois ayant une teneur en humidité la plus près possible de celle prévue en service. [25]

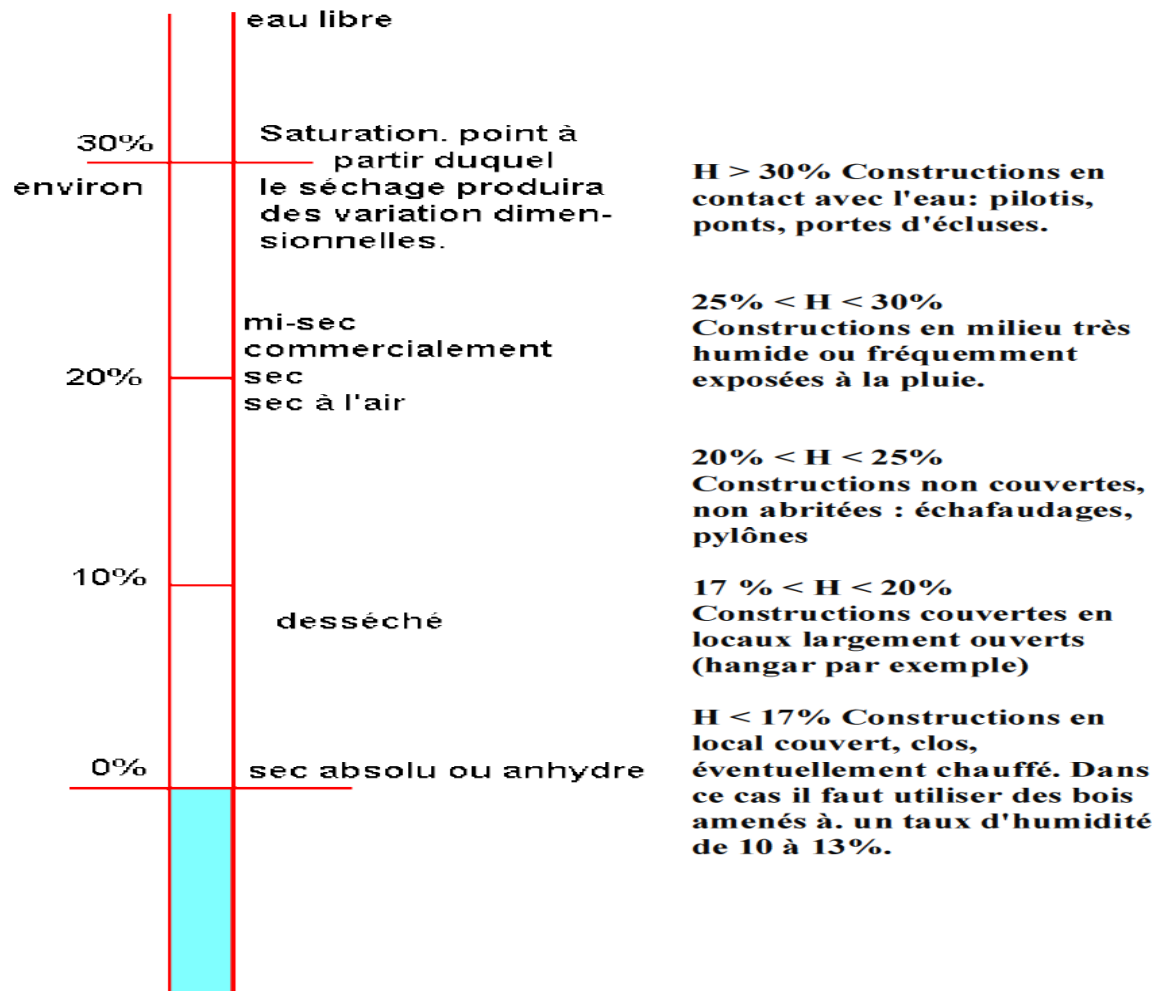


Figure I.12. Taux d'humidité en accord avec les conditions d'utilisation.[25]

➤ Retrait

En dessous du point de saturation des fibres ($TH < 30\%$), l'eau contenue dans les parois des cellules s'évapore et provoque un retrait du bois proportionnellement à la perte d'humidité. Le retrait à une teneur en humidité TH (en %) peut se déterminer avec la formule suivante :

- Le retrait tangentiel, c'est-à-dire dans le sens des cernes de croissance, est le plus important.
- Le retrait radial se produit perpendiculairement au fil du bois et représente environ 60 % du retrait tangentiel. Le bois rétrécit très faiblement dans le sens longitudinal des fils (de l'ordre de 0,1 à 0,2 %).

Le fait qu'il y ait une différence entre les retraits tangentiel et radial peut entraîner un phénomène appelé le voilement. Si le voilement est trop important, les pièces de bois ne sont pas acceptées comme éléments d'ossature. De plus, un phénomène de fendillement peut être remarqué lorsque le bois sèche trop rapidement. La surface du bois, qui sèche plus rapidement

que le noyau interne, tente en effet de se rétrécir mais en est empêché par le noyau qui conserve un taux d'humidité élevé plus longtemps. [25]

➤ **Gonflement**

Le gonflement est en principe le phénomène inverse du retrait. Lorsque le bois absorbe de l'eau, sa teneur en humidité augmente et le bois a tendance à augmenter de volume. Tout comme le retrait, le gonflement est proportionnel au gain d'humidité jusqu'au point de saturation des fibres. Lorsque la teneur en humidité se trouve supérieure à ce dernier (TH = 30 %), le bois subit peu ou pas de changements dimensionnels.

I.7.1.2 Propriétés mécaniques

Le ratio résistance mécanique/masse volumique est très élevé, ce qui est à l'avantage du bois comparativement à ses concurrents. Ce ratio élevé a une incidence considérable du point de vue de la charge permanente d'une structure. À résistance mécanique égale, le bois est le matériau de structure le plus léger.

➤ **Direction de chargement**

Le bois est un matériau possédant une structure interne particulière. Les cellules sont toutes orientées verticalement et parallèlement dans les parois cellulaires, permettant ainsi aux arbres de résister à des forces extérieures comme le vent. Cette caractéristique fait du bois un matériau possédant une meilleure résistance dans la direction parallèle au fil (longitudinalement) que dans la direction perpendiculaire à celui-ci (radialement et tangentielllement).

➤ **Résistances mécaniques**

a) Flexion : Selon des principes de base d'ingénierie, un couple de flexion est le résultat d'efforts de compression et/ou de traction excentriques par rapport à l'axe neutre d'un élément. Puisqu'il résiste très bien à la compression et à la tension axiale, le bois est donc également efficace en flexion.



Figure I.13. Comportement du bois en flexion. [25]

b) Cisaillement : Le cisaillement longitudinal est un autre aspect à considérer au moment des calculs de résistance d'un élément en bois. La réduction de l'aire transversale d'une section en bois causée par des ouvertures pour les connecteurs ou par des entailles influence la résistance au cisaillement.



Figure I.14. Comportement du bois en cisaillement. [25]

c) Compression et traction parallèle au fil (grain) : Puisque les cellules du bois sont toutes orientées dans le sens longitudinal, la structure interne du bois est comparable à une multitude de petits tubes soudés les uns aux autres. Cela fait en sorte que le bois est très résistant à la compression exercée dans le sens du fil (compression axiale). On doit cependant tenir compte du flambement au cours du calcul de la résistance à la compression d'éléments porteurs.

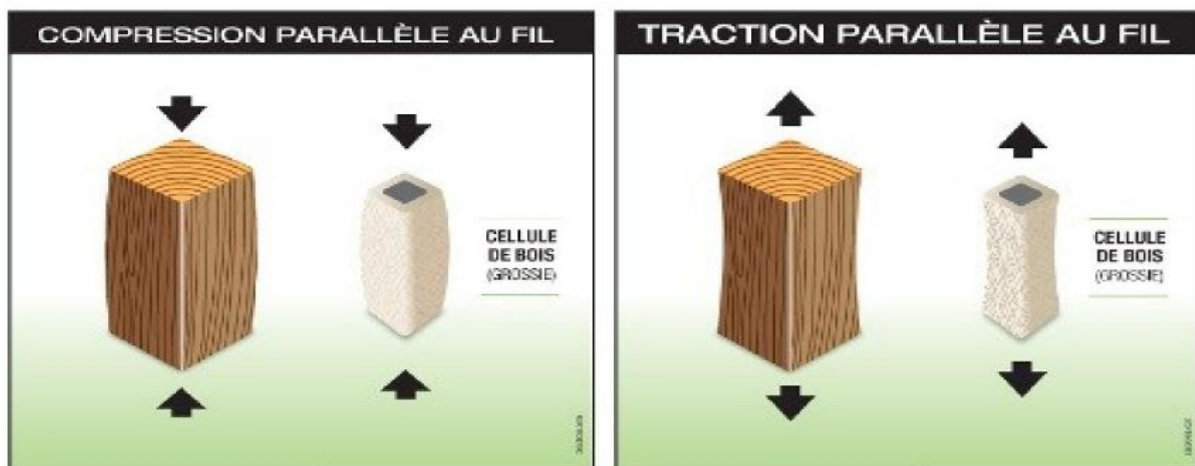


Figure I.15. Comportement du bois en traction et compression parallèle au fil. [25]

De plus, en raison de sa structure interne, le bois possède également une très bonne capacité en traction lorsque celle-ci est exercée parallèlement au fil. Par contre, la présence de nTmuds dans une pièce tendue réduit la résistance en traction de celle-ci.

c) Compression et traction perpendiculaire au fil (grain) : La résistance à la compression exercée perpendiculairement au fil est inférieure à celle appliquée parallèlement au fil. Elle est principalement causée par la présence de charges concentrées ou par des contraintes exercées aux appuis des éléments fléchis. On utilise généralement des plaques d'appuis en acier afin d'augmenter la surface d'appui et ainsi de diminuer les effets de la compression perpendiculaire au fil.

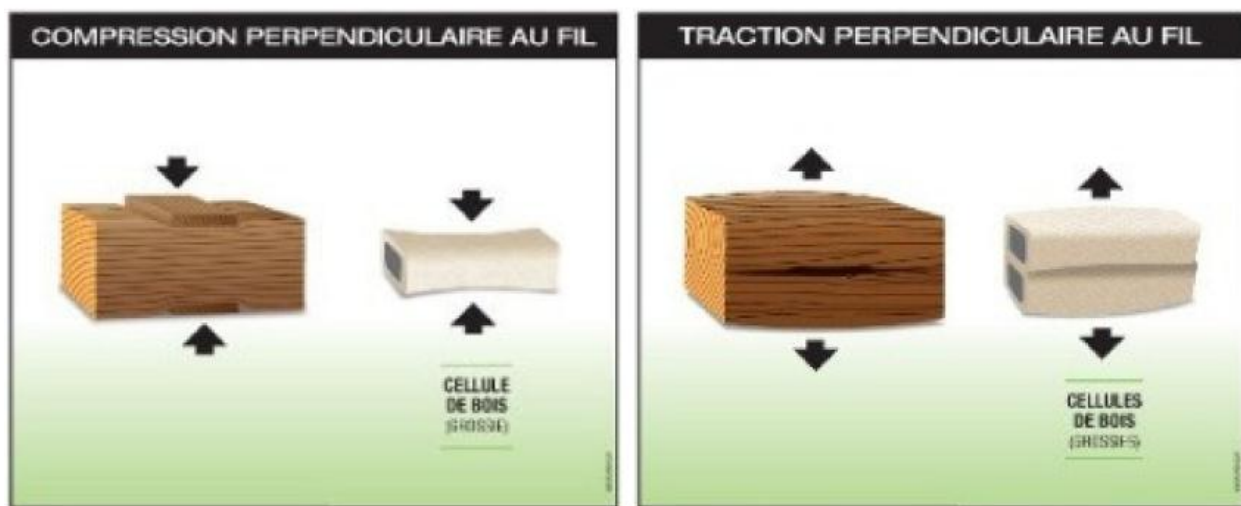


Figure I.16. Comportement du bois en traction et compression perpendiculaire au fil .[25]

La traction exercée perpendiculairement au fil doit être le plus souvent possible limitée car le bois possède très peu de résistance dans cette direction. Un effort radial exercé dans un élément courbé tel qu'une arche peut provoquer ce genre de sollicitation indésirable.

➤ Durabilité

Le bois est un matériau qui résiste bien aux attaques chimiques. Il est résistant aux matières organiques, aux solutions acides, aux émissions gazeuses et à l'air marin, par exemple. Les bâtiments en bois peuvent durer des siècles. Dans le cas de constructions dont les conditions d'utilisation présentent un risque accru de teneur élevée en humidité, l'emploi d'essences de bois durables ou d'un bois ayant subi un traitement de préservation garantira la longévité. Un exemple notoire de bâtiment de bois durable d'une incroyable longévité est le Todaiji (« Grand temple oriental »). La construction de ce temple, l'un des plus célèbres au Japon, remonte à l'an 752 et c'est aussi le plus grand bâtiment de bois au monde.

La règle fondamentale de durabilité demeure toujours la même : assurer la sécheresse du bois.

Cette règle s'applique autant aux habitations en colombages qu'aux grandes constructions à ossature de bois. [25]

I.8. Sciure de bois

I.8.1.Présentation générale

La sciure est constituée des fines particules désignent l'ensemble des résidus produits par le sciage de bois. La sciure est produite au cours d'opérations d'usinage effectuées sur la matière première (bois). La sciure de bois résultante d'une manufacture peut être ainsi récupérée et valorisée pour le domaine de la construction.

I.8.1.1. Caractérisation du matériau

Les macromorphologies de la sciure de bois non traitée et traitée chimiquement, sont illustrées dans la figure (a) et figure (b), respectivement.



Figure I.17. Morphologie superficielle de la sciure de bois non traitée (a) et traitée chimiquement (b). [26]

Les résultats de l'analyse physique montrent que la sciure de bois utilisée renferme 2,1 % d'humidité, 1,5 % de matière minérale alors que son pH et sa densité apparente sont respectivement de 5,2 et $0,1041\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. L'analyse par EDX donne 59,4% en C et 40,6% en O. La surface spécifique du matériau avant modification chimique a été estimée à $2,786\text{ m}^2/\text{g}$, à l'aide de la méthode BET (Brunauer, Emmet and Teller) [26].

La composition chimique de la sciure de bois non traitée, déterminée selon les normes TAPPI, révèle qu'elle est essentiellement composée de 39,7% ($\pm 0,01$) de cellulose (norme TAPPI T 203 om-88 [27]), suivie par l'hemicellulose avec un taux de 26,9% ($\pm 0,03$), déterminé par la différence entre le taux des holocelluloses et le taux de cellulose puis la lignine ($25,4\% \pm 0,01$) (norme TAPPI T 222 om-06 [28]).

L'holocellulose, mélange des constituants cellulosiques et hémicellulosiques, est présent à 66,59%(±0,04) et dont le taux est déterminé par dosage par le chlorite de sodium NaClO₂ catalysé par l'acide acétique. Avec 4,32% (±0,01) en matière extractible (norme TAPPI T 204 cm-97 [37]), le pinussylvestris en renferme une quantité qui reste dans la normale (environ 5% en masse), dans le cas des bois résineux. Enfin, le taux de cendres a été estimé à 4,92% (± 0,01) (norme TAPPI T 211 cm-86 [29]).

I.8.2. Les copeaux de bois

Les copeaux de bois désignent l'ensemble des résidus produits par le sciage de bois. Les copeaux sont produits au cours d'opérations d'usinage effectuées sur la matière première (bois). Les copeaux résultants d'une manufacture peuvent être ainsi récupérés et valorisés pour le domaine de la construction. [DJOU 07].



Figure I.18. Les copeaux de bois.

I.9. Le chanvre :

I.9.1 La plante de chanvre :

Le chanvre (*Cannabis Sativa*) est une plante annuelle de hauteur variant entre 1 et 3 m. Il est cultivé dans les zones à climat tempéré (par exemple la France, l'Italie, ou certains pays d'Europe de l'Est). C'est une plante respectueuse de l'environnement qui participe à l'amélioration de la qualité des sols grâce à son réseau racinaire important qui favorise la mise en jachère. Il résiste bien aux maladies et aux parasites et ne nécessite aucun traitement phytosanitaire (désherbant, fongicide, insecticide...).

Le chanvre produit les graines appelées « chènevis », les fibres de chanvre provenant de la partie cortex et la chènevotte provenant de la partie bois. Le chènevis offre de nombreuses perspectives dans l'industrie agroalimentaire et cosmétique tandis que les fibres de chanvre sont utilisées dans

la confection de matières textiles, cordages, pâte à papier, laine d'isolation pour le bâtiment, etc. La chènevotte est utilisée pour les litières animales, dans les agro-matériaux, etc.[30]

I.9.2 Morphologie de la tige du chanvre

L'observation au microscope électronique d'une coupe transversale révèle différentes couches des tissus végétaux. De l'extérieur vers l'intérieur, on distingue :

- L'**épiderme**, constitué d'une couche de cellules à paroi cellulosique ainsi que d'une couche de nature lipidique à la périphérie qui forme la cuticule. Cette cuticule est imperméable et s'interrompt par endroits en laissant apparaître des ouvertures appelées stomates.
- Le **cortex** est riche en fibres corticales regroupées en amas, et celles-ci sont englobées à leur tour au sein de divers tissus.
- Le **bois ou xylème** assure la conduction de la sève brute des racines vers les organes aériens. Il est constitué de cellules de parenchyme, de fibres ligneuses et de vaisseaux conducteurs (SEDAN, 2007).
- La **moelle** constituée de parenchyme médullaire est un espace creux au cœur de la tige pouvant occuper plus de la moitié du diamètre chez les plantes âgées.

La Figure I.19 montre l'aspect de la plante, une coupe transversale d'une tige à droite et une micrographie par microscope optique d'une tige de chanvre en bas. La partie rose est plus riche en cellulose tandis que la partie en vert est beaucoup plus lignifiée (VIGNON, et al., 1995).

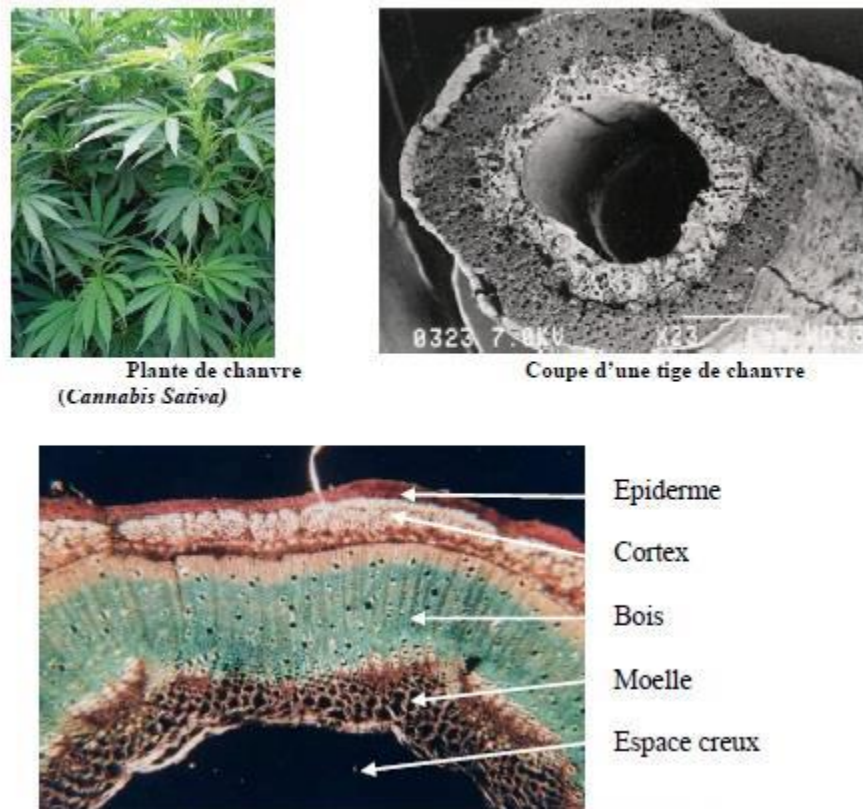


Figure I.19. Micrographie d'une coupe transversale de tige de chanvre.[30]

I.9.3 La Chènevotte

Les fibres de chènevottes KANABAT sont utilisées en tant que granulat végétal. Elles sont cultivées par la coopérative « la chanvrière de l'Aube » en Champagne-Ardenne (LCDA). La longueur des particules est environ 20 mm avec une largeur maximale de 4 mm et une épaisseur maximale de 1,3 mm. La masse volumique est de 110 kg.m⁻³. Les fibres sont conservées dans une chambre climatisée à 23 °C et 50 % d'humidité relative.

La transformation du chanvre peut se faire sans défibrage pour donner la chènevotte fibrée (Figure b) ou par le processus de défibrage mécanique qui permet d'obtenir la chènevotte et la fibre de chanvre séparées (Figure a). A l'issue de cette étape, les particules de chènevottes sont dépoussiérées, calibrées et ensuite valorisées dans la formulation des bétons ou autres domaines.

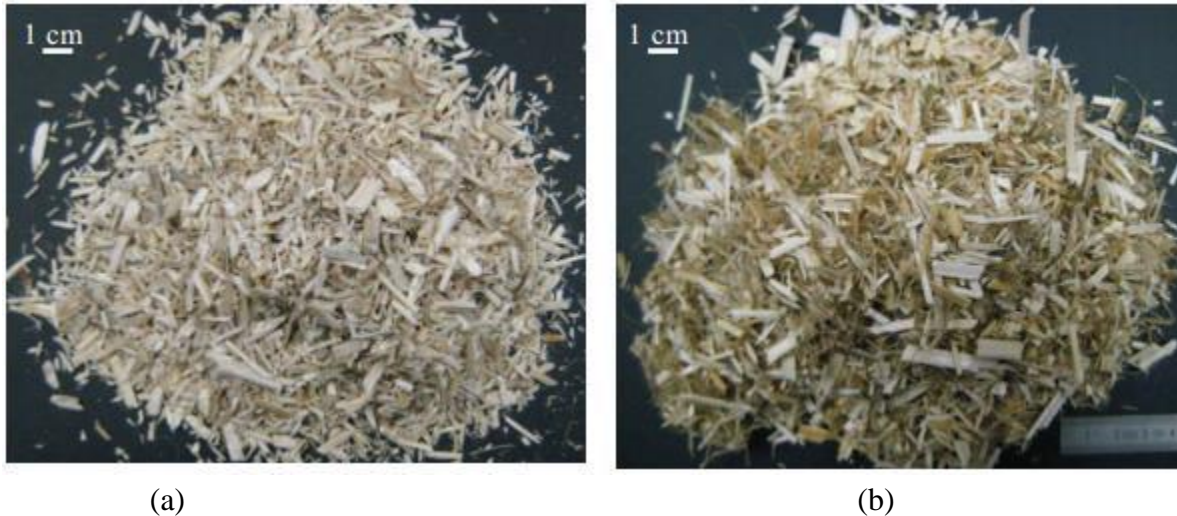


Figure I.20. Comparaison entre les fibres de chanvre : (a) défibrées et (b) fibrées (CHAMOIN, 2013).[30]

I.9.4. Domaine d'application du chanvre

Deux domaines d'application du chanvre sont actuellement en pleine essor pour les composites thermoplastiques :

- Le transport (exemple : l'automobile)
- le bâtiment

Concernant le secteur du bâtiment, le chanvre est inséré dans une matrice de ciment ou de chaux pour fabriquer des murs ou des blocs isolants. Par contre leurs propriétés mécaniques ne permettent pas de les utiliser pour fabriquer des murs porteurs, ainsi ils sont le plus souvent utilisés comme remplissage des ossatures en bois. Un autre exemple d'application sont les profilés en PVC / chanvre (50 – 50 en masse) pour fabriquer par exemple des encadrements de fenêtres. Dans ce secteur, le chanvre est souvent utilisé pour ses propriétés thermiques. En effet celui-ci est un excellent isolant, il est ainsi utilisé en remplacement des laines de verre. Dans les années et décennies à venir, des pièces plus techniques avec des caractéristiques mécaniques supérieures, pourront être réalisées pour une utilisation dans des systèmes beaucoup plus performants.[31]

Avantages :

- Matériau renouvelable recyclable, non consommable par les rongeurs et peu dégradé.
- Bonne durabilité et stabilité dimensionnelle, mise en œuvre et densité suffisantes.
- Sans effet négatif sur la santé.
- Bon isolant acoustique (bruits aérien). [32]

Inconvénients :

- Sensibilité au feu.
- Matériau putrescible en cas d'humidité prolongée.[32]

I.9.5. Propriétés des fibres de chanvre

- Les caractéristiques des fibres de chanvre sont présentées dans le Tableau I.5. La longueur est de 8 à 14mm pour un diamètre d'environ 20µm. La teneur en cellulose est de 67% conférant une rigidité dépassant les 30GPa pour certaines variétés de chanvre. La résistance en traction est très variable montrant la forte dispersion des propriétés mécaniques des fibres de chanvre.

Tableau I.4. Caractéristiques des fibres de chanvre [MOH05] [31]

Propriétés	Valeurs
Longueur (mm)	8.3 – 14
Diamètre (µm)	17 – 23
Rapport entre la longueur et le diamètre	549
Densité (g/cm ³)	1,5
Angle micro-fibrillaire (°)	6.2
Taux d'humidité (%)	12
Teneur en cellulose (%)	67
Résistance en traction (MPa)	310 – 750
Résistance en traction spécifique (MPa)	210 – 510
Module d'Young (GPa)	30 – 60
Module d'Young spécifique (GPa)	20 – 41
Déformation à rupture (%)	2 – 4

- La résistance mécanique et le module d'Young des fibres de chanvre sont assez diverses et dépendent de la nature et de la variété de chanvre comme le montre le Tableau I.6. La contrainte maximum varie de 300 à 900 MPa en moyenne avec un module d'Young évoluant de 25 à 60 GPa.

Tableau I.5. Exemple de propriétés élémentaires (résistance mécanique et module d'Young) pour des fibres de chanvre [31]

Fibre de chanvre	σ_{max} (MPa)	E (GPa)
[BER08]	514	24,8
[DAS13]	697	28,3
[DUV11]	788	45
[MOH05]	310-750	30-60
[MUN07]	450	25
[MOY11]	550	26,0
[PLA09]	285	14,4
[ROM04]	943	57

I.10. Le liège

Le chêne-liège est un des rares arbres à pouvoir régénérer son écorce, c'est-à-dire à la reconstituer après qu'elle ait été enlevée. Le liège est un tissu végétal formé de cellules mortes aux parois surépaissies qui protègent les parties vivantes du tronc et des branches du chêne-liège. Le liège est le résultat de la croissance en diamètre de l'arbre. Il se développe à partir de l'assise subéro-phellodermique, assise génératrice plus couramment appelée le mère. [32]

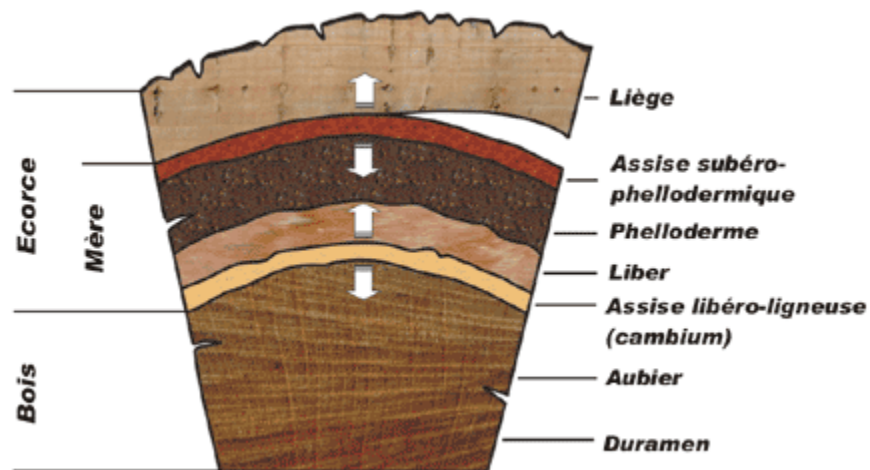


Figure I.21. coupe transversale d'une tige de chêne-liège [32]

I.10.1. Les différents types de liège

Sur un même arbre on peut observer au cours de sa vie deux types de liège :

❖ Le liège mâle :

Il s'agit de l'écorce qui se développe naturellement sur le tronc et les branches de l'arbre. S'il n'est jamais récolté, ce liège peut atteindre jusqu'à 25 cm d'épaisseur. Cependant il se crevasse fortement en vieillissant, il devient compact, siliceux et dépourvu d'élasticité, ce qui ne permet pas de l'utiliser en bouchonnerie. Il reste néanmoins approprié pour la trituration ; sa valeur commerciale est quasiment nulle. Le liège mâle est enlevé lors de l'opération appelée démasclage.



Figure I.22.liège de type mâle [32]

❖ **Le liège femelle :**

Liège qui se développe après le démasclage. Contrairement au liège mâle, il est moins crevassé, plus homogène et plus élastique. On distingue :

- **Le liège de première reproduction :** liège obtenu lors de la première récolte suivant le démasclage ; il peut être bouchonné mais sa qualité est encore moyenne (beaucoup de déchets). sa valeur commerciale n'est pas très élevée par rapport au liège de reproduction proprement dit.

- **Le liège de reproduction :** Liège récolté lors de la levée suivante. c'est à partir de ce moment-là que le liège atteint sa valeur optimale. Il possède toutes les qualités requises pour la fabrication de bouchons.



Figure I.22'.liège de type femelle[32]

On peut rencontrer deux autres catégories de liège :

❖ Liège sur épaisse :

Lorsque le liège femelle n'a pas été récolté à temps (plus de 20 ans), il augmente en épaisseur et se crevasse, perdant ainsi en qualité. Ce type de liège perd énormément de valeur du fait que des défauts peuvent apparaître et que la qualité de déchets augmente.



Figure I.23. Liège sur épaisse

❖ Liège brûlé :

Liège provenant d'un peuplement qui a été parcouru par le feu. Il n'a aucune valeur commerciale puisqu'il est inutilisable en bouchonnerie. Les industriels l'emploient à des usages marginaux tels les panneaux d'isolation ou encore les bouchons de pêche.



Figure I.24. Liège brûlé

I.10.2 Domaine d'utilisation du liège

Au-delà du traditionnel bouchon, il faut aussi souligner que le liège est employé en quantité très faible, mais parfois irremplaçable dans de nombreux domaines. Les produits, après transformation, sont principalement destinés aux activités industrielles suivantes :

- La construction en général (isolant thermique et acoustique, revêtement, décoration, cloisons,....)
- L'industrie du froid (chambres froides et transports frigorifiques)
- La construction navale (isolation, revêtement, décoration)
- L'industrie des transports (isolation thermique, acoustique et vibration)
- L'industrie spatiale (comme isolant thermique dans les navettes spatiales)
- L'industrie des emballages (granulés et laine de liège)

I.10.3 Avantages et inconvénients du liège

Avantages :

- Matériau imputrescible, insensible aux rongeurs et recyclable.
- Sans effet négatif sur la santé.
- Pas de dégagement de flamme ni de gaz toxique.
- Bonne résistance aux bruits d'impacts.
- Aucunes remontées capillaires, résistant à la vapeur d'eau.
- Bonne résistance à la compression. [32]

Inconvénients :

- Coût élevé.
- Matériau renouvelable mais faiblement disponible. [32]

I.10.4 Propriétés des lièges

Le liège possède des qualités uniques, inégalables et qu'aucune invention humaine n'ait, de nos jours réussi à imiter ou à dépasser. [32]

- Elasticité et compressibilité.
- Amortisseur d'impacts.
- Faible combustibilité.
- Absence de toxicité.
- Légèreté.
- Pouvoir d'absorption.
- Isolation thermique.
- Haute imperméabilité.

➤ **Très léger :**

Chaque centimètre cube pèse à peine 0,16 grammes et c'est une matière que est capable de flotter.

➤ **Imperméable aux liquides et au gaz :**

Grace à la subérine et aux céroïdes présentes dans les parois des cellules que le constituent, le liège est pratiquement étanche aux liquides et au gaz. Sa résistance à l'humidité lui permet de vieillir sans se détériorer.

➤ **Elasticité et compressibilité :**

Un morceau de liège peut être comprimé jusqu'à la moitié de sa longueur sans perdre sa flexibilité, et peut récupérer sa forme et le volume initial à partir du moment où la pression ne s'exerce plus. C'est le seul solide qui, s'il est comprimé d'un côté, n'augmentera pas en volume de

l'autre ; grâce à cette élasticité propre, le liège s'adapte, par exemple, aux variations de température et pression, et ne subit aucune transformation du fait d'être soumis à ces conditions.

➤ **Un excellent isolant thermique et acoustique :**

Le liège démontre une faible conductivité en relation à la chaleur, au son et aux vibrations. Ceci parce que les éléments gazeux que ce matériau contient sont renfermés dans des petits compartiments imperméables et isolés, résistant à l'humidité.

➤ **Très résistant aux frictions :**

Le liège est extraordinairement résistant à l'usure et a un coefficient de friction élevé. Grâce à sa structure en alvéoles, comparable à celle du miel, le liège est moins vulnérable à l'impact ou à la friction que les autres matériaux à surface dure. Mais, c'est avant tout un matériau 100% **naturelle, recyclable, réutilisable et renouvelable.**[33]

Tableau I.6. Fiche technique du granulat de liège.

Caractéristiques	Tolérance
Densité	0,24 g/cm ³
Granulométries	4 / 8 mm
Coefficient de conductibilité thermique 20°C	$\lambda=0,040$ W/m°k
Stabilité dans le temps	Illimitée. Produit imputrescible.
Réaction au feu	Très difficilement inflammable
Attaque des insectes, rongeurs et autres	Peu propice
Temps de déphasage chaud/froids	+/- 12Heures
Résistance à la conductibilité de la chaleur	R = 0,5 / 0,75 / 1 / 1,25 m ² K/W
Chaleur spécifique	1,67 KJ/Kg°c
Résistance à la flexion	1,8 Kg/cm ²
Résistance à la compression	0,20 Kg/cm ²

I.11. Conclusion

Le choix des matériaux utilisés pour la construction des structures représente un enjeu considérable pour la réduction des consommations énergétiques et le respect de l'environnement dans le secteur de bâtiment. Généralement, les matériaux utilisés dans le domaine de la construction et du génie civil sont des matériaux de diverses provenances. Une idée forte de laquelle il en ressort plusieurs travaux essayant de proposer de nouveaux matériaux ainsi que des solutions techniques des plus efficaces et des plus économiques possibles.

A partir de cette synthèse bibliographique, une étude expérimentale du comportement des panneaux d'isolation à base de plâtre renforcé avec de la sciure bois ou avec du liège, qui sont des matériaux naturels abondant dans notre nature et qui mérites une attention toute particulière vu leurs caractéristiques, est réalisée pour mettre en évidence tous les aspects positifs de telles combinaison des performances des matériaux d'origine différente. Mais présentant une certaine compatibilité vis-à-vis des constantes élastiques, répondant aux exigences des règlements du Génie-Civil et surtout respectueux à la nature et de l'environnement.

Recherche bibliographique

Chapitre II

Matériaux composite

Introduction

Les matériaux composites disposent de grandes importances par rapport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, libertés de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. [12]

L'objectif de ce chapitre est d'apporter une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constitutions, de leurs propriétés et de leurs structures. Étant donné l'importante diversité de ces matériaux, il serait aussi hors de propos de se livrer à un exposé complet de tous types de composites.

II.1. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Nous étudions plus particulièrement les matériaux composites à renfort fibre longue continue utilisés dans l'industrie nautique, automobile, aéronautique et spatiale. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application visée.[13]

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice : [12]

- Les composites à matrices organique (CMO) qui constituent, de loin les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle.
- Les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire.
- Les composites à matrices métallique (CMM) intéressent les concepteurs des industries automobiles, électronique et de loisirs pour répondre à des exigences mécaniques spécifiques.

II.2. Domaines d'utilisation des composites

Les matériaux composites associent matière plastique, renfort en fibres généralement de verre ou de carbone, et bien d'autres matières. Bien que leur coût soit plus élevé que celui des matériaux traditionnels, ils apportent à leurs utilisateurs des avantages importants grâce à leurs propriétés, notamment légèreté et résistance. Ces avantages leur ont ouvert des marchés

importants dans la construction automobile, l'aéronautique, ou encore le bâtiment comme le montre la figure II.1. [12]

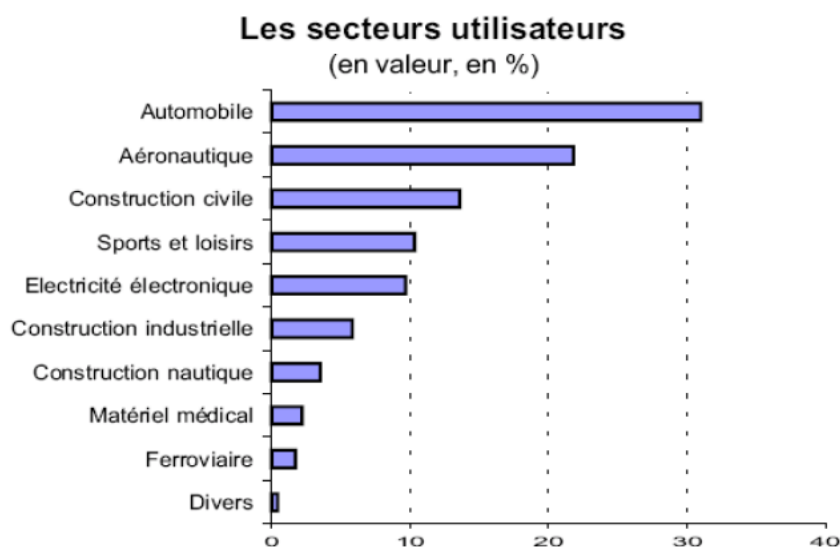


Figure II.1 : Evolution du pourcentage d'utilisateurs des matériaux composites [12].

Pour atteindre ces objectifs, ce secteur doit se développer par l'innovation. Cette innovation passe désormais par la maîtrise de l'ensemble du cycle du produit, de la conception au recyclage et par une meilleure caractérisation des produits et de leurs performances. La maîtrise du cycle de vie des matériaux composites est un problème à la fois technologique et scientifique. En effet, la réalisation et l'utilisation de ces matériaux font intervenir les différents domaines de la science tels que la chimie, la mécanique, la thermique ou l'électromagnétisme. Les matériaux généralement utilisés dans les différentes structures (mécaniques, électriques, ...) peuvent être classifiés en quatre catégories : métaux, polymères, céramiques et composites.

Les matériaux composites disposent d'atouts considérables par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels [12] tels que:

- La possibilité d'adapter le matériau aux fonctions de la pièce,
- Une optimisation possible sur le poids et les contraintes,
- La définition de pièces multifonctionnelles et donc simplification des mécanismes,
- L'obtention de performances nouvelles telle que: Allègement sans concession sur d'autres propriétés, Tenue mécanique particulière (fatigue...), Résistance chimique, Tenue électrique, ...

II.3. Constituants des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement:

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites, des charges et adjuvants,
- D'un renfort (Figure II.2),

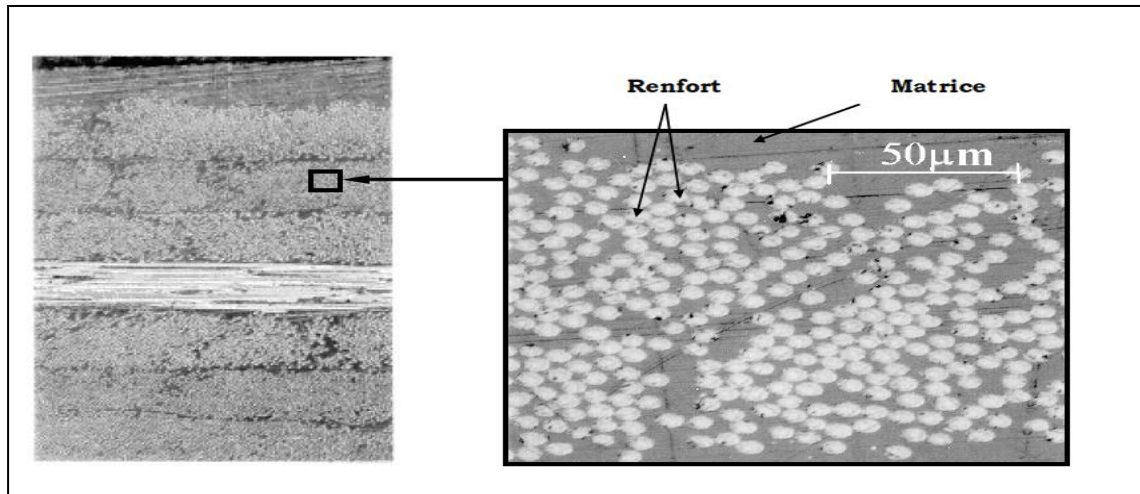


Figure II.2: Constituants d'un matériau composite [12]

Les propriétés physiques d'un matériau composite dépendent directement de ses différents constituants. L'imprécision sur l'orientation et la position des fibres, par exemple, lors de la fabrication du composite, augmentera les incertitudes dans l'estimation de ses propriétés physiques [12].

II.3.1. Matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée comme suit [13]

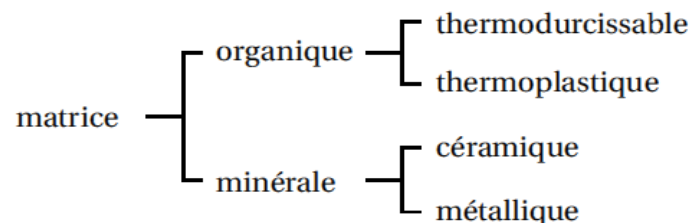


Figure II.3: Types de matrice.

II.3.1.1. Résines thermdurcissables

Les résines thermdurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère

non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyester saturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556. Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau II.1.[13]

Tableau II.1: Caractéristiques des résines thermodurcissables

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	ρ (Kg/m ³)	$\epsilon_t^R(\%)$	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
polyesters	60 à 100	1 140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
phénoliques	120	1 200	2,5	40	250	3 à 5
epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

II.3.1.2. Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le tableau II.2.[13]

Tableau II.2 : Caractéristiques des résines thermoplastiques.

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	ρ (kg/m ³)	$\epsilon_t^R(\%)$	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
polyamide	65 à 100	1 140		60 à 85		1,2 à 2,5
polypropylène	900	1 200		20 à 35		1,1 à 1,4

II.3.2. Additifs

Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques (charges renforçantes). Des charges non renforçantes peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine. Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites.

II.3.3. Renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés

pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus) etc....La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure II.4. [13]

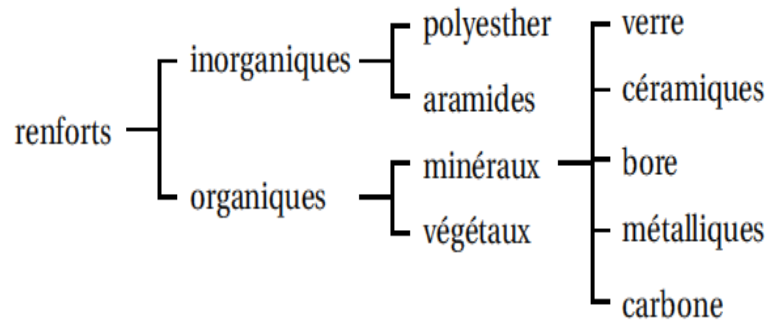


Figure II.4 : Types de renfort.

II.3.3.1. Fibres de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance – prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.

II.3.3.2. Fibres de carbone

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres précurseur utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone. Quelques exemples de fibres de carbone classiquement rencontrées : T300, T800, MR40, TR50, IM6, IM7, GY, M55J.[13]

II.3.3.3. Fibres aramides

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre–kevlar ou carbone–kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis). Quelques exemples de fibres aramides : KEVLAR (Dupont de Nemours, USA), TWARON (Akzo, Allemagne-Hollande), TECHNORA (Teijin, Japon). [13]

II.3.3.4. Fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500.C et 2 000.C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbure de Silicium
- fibres de Bore
- fibres de Bore carbure de silicium

Le renfort peut se présenter suivant deux structures distinctes:

- Les structures aléatoires, Figure II.5, sont réalisées à partir de fibres coupées ou broyées. Ces fibres sont dispersées de façon aléatoire et maintenues par un liant soluble afin d'obtenir un mat à fibres courtes. Ce type de renfort est utilisé lorsqu'on recherche une bonne résistance à la compression.

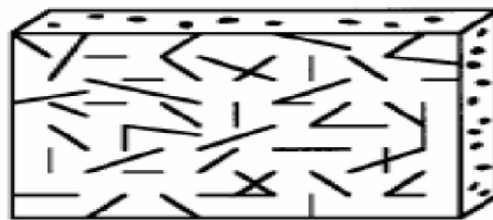


Figure II.5 : structure aléatoire.

- Les structures orientées, Les structures orientées se divisent en deux catégories:

Les structures unidirectionnelles (UD), dans ces structures, les fibres sont orientées dans une même direction qui sera la direction principale de contrainte voir Figure II.6. Certaines propriétés physiques, telles que les conductivités électriques et thermiques, d'un pli unidirectionnel sont plus grandes dans un sens que dans l'autre.

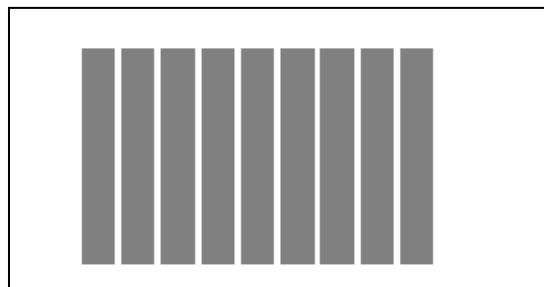


Figure II.6 : Structure unidirectionnelle (nappe).

Les structures tissées qui sont généralement obtenues par tissage (bi ou tri directionnel) ou par superposition de nappes unidirectionnelles. Les tissus diffèrent par le

mode d'entrecroisement des fibres appelé armure. On distingue le satin, le serge et le taffetas [12] [14] [15], Figure II.7. Le satin est surtout employé lorsqu'on souhaite obtenir une grande résistance mécanique, le taffetas et la serge sont les plus couramment utilisés.

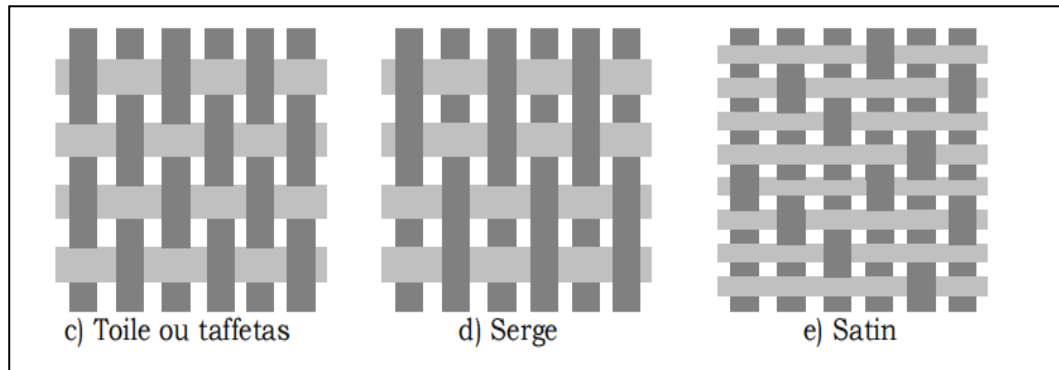


Figure II.7 : Mode d'entrecroisement des fibres.

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes.

II.3.3.5. Caractéristiques mécaniques des fibres

Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible.[13]

Tableau II.3 : Caractéristiques mécaniques des fibres.

renforts	ρ (Kg/m ³)	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
AS4	1 800		3 599	235
T300	1700	1,2	3 654	231
IM6		0,88	1 460	
IM8	1 800		5 171	310
kevlar 49	1 440	2,5	3 620	124
verre E	2 580	3,5	3 450	69

II.4 cycle de vie des matériaux composites

Le cycle de vie d'un matériau composite est présenté sur la figure II.8.

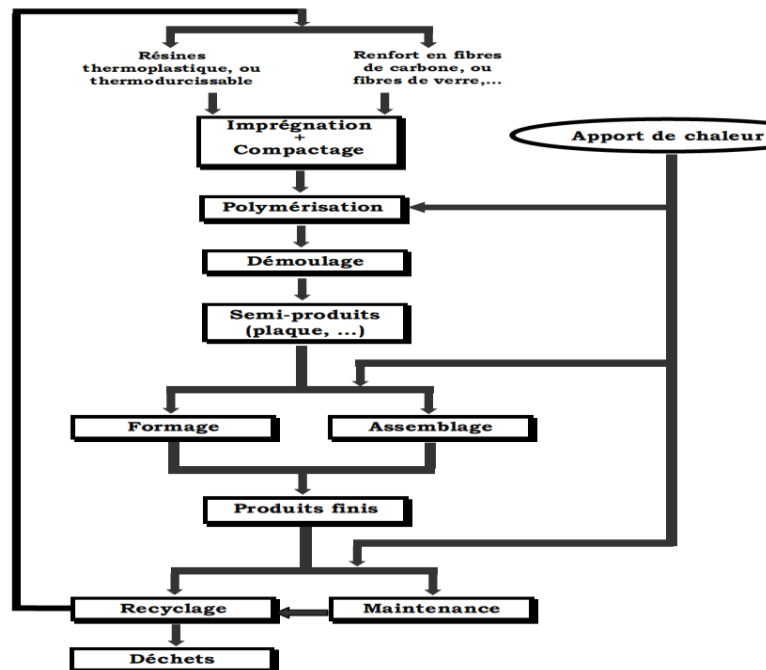


Figure II.8 : Cycle de vie d'une pièce en matériau composite.

II.5 Architecture du composite

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les sandwichs
- Les stratifiées
- Les monocouches

II.5.1 Matériau sandwich

Une structure sandwich résulte de l'assemblage par collage ou soudure de deux semelles ou peaux 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. Dans un sandwich, il ne faut pas oublier un troisième composant: l'adhésif. C'est ce dernier qui permet un bon assemblage de la structure et aussi une bonne transmission des contraintes d'un milieu à l'autre. Sa principale caractéristique doit être une bonne résistance en cisaillement. D'après Allen [5], 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) $d = t c + t f$.

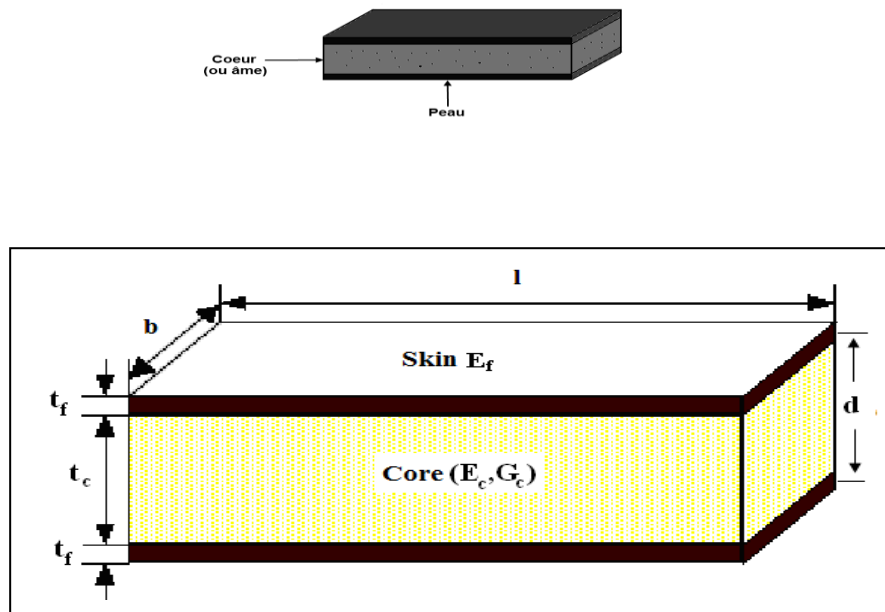


Figure II.9: Schéma d'un sandwich [5]

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.

On définira les bornes limites par rapport à la contribution de chaque constituant vis-à-vis de la rigidité en flexion et en cisaillement du sandwich. En plus de leur bonne rigidité en flexion, de leur bonne résistance au flambement et de leur légèreté, les matériaux sandwichs possèdent également de bonnes propriétés d'isolation thermique et phonique. Ceci explique leur emploi de plus en plus fréquent comme cloison. Ces matériaux sont de plus en plus utilisés dans l'aéronautique ou l'industrie du transport en tant que structures primaires ou secondaires, comme par exemple les coques de bateaux rapides, les planchers d'avions.

II.5.1.1. Les éléments constituant les matériaux sandwichs

a- Les peaux

Généralement de faibles épaisseurs, les peaux sont constituées de tout matériau pouvant être obtenu sous forme de couche. Elles peuvent être en bois, métal ou matériau composite. 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).

b- L'âme

Légère, l'âme a en général une très 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 telles que les âmes pleines [6], parmi lesquelles on trouve le balsa (ou bois cellulaire), diverses mousses cellulaires et des résines chargées de microsphères creuses de verres (mousses syntactiques) et les âmes creuses [6] essentiellement de type nid d'abeilles et profilé (réseaux métalliques légers, réseaux en papier enduit ou non, réseaux en polycarbonate et en polypropylène).

c-L'interface

L'assemblage de la structure sandwich peut être réalisé par collage, soudage ou brasage. Lors des simulations numériques, on suppose que, quel que soit le mode d'assemblage des différentes couches, le lien est parfait entre les constituants.

II.5.1.2 Intérêt des structures sandwichs

L'intérêt principal des structures sandwichs, par opposition aux composites traditionnels dits monolithique, réside dans leur rigidité spécifique très élevée. La densité de l'âme est couramment de l'ordre de 100 kg.m^{-3} . En modifiant la nature et l'épaisseur de la peau et/ou de l'âme, on parvient à donner à la structure le matériau qui convient le mieux. Ainsi, l'amélioration de la rigidité qui traduit le comportement en flexion du matériau, s'obtient en augmentant soit l'épaisseur de l'âme qui conduit à l'augmentation de son moment d'inertie, soit le module d'élasticité des peaux. Puisque l'âme du sandwich possède une faible densité, la masse du composite n'évolue pas de façon importante. Les matériaux composites sandwichs disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels: légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.[5]

II.5.1.3. Rigidité flexionnelle des matériaux sandwichs

Les structures sandwichs sont généralement sollicitées en flexion ou en compression flambement. Afin d'optimiser les caractéristiques des matériaux de l'âme et de la peau pour une application donnée, il convient donc de connaître leur comportement pour ce type de sollicitation. La grandeur caractéristique d'un matériau sandwich est sa rigidité en flexion, D , est donnée par la relation suivante [7] :

$$D = \int E b z^2 dz = \frac{E_f b t_f^3}{6} + 2 E_f b t_f \left[\frac{d^2}{4} \right] + \frac{E_c b t_c^3}{12} = 2 D_f + D_0 + D_c \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- t_f et E_f sont respectivement l'épaisseur et le module d'élasticité du matériau peau
- t_c et E_c sont respectivement l'épaisseur du matériau d'âme.

$2D$: rigidité des peaux par rapport à leur propre axe neutre.

D : contribution à la rigidité en flexion des peaux par rapport à l'axe neutre du sandwich au centre de l'âme pour un sandwich symétrique

D_c : rigidité apportée par l'âme par rapport à son axe neutre

En fonction des caractéristiques, un certain nombre d'approximations sont utilisées :

- les approximations de peaux minces :

$$\frac{2D_f}{D_0} < 0,01 \text{ si } 3 \left(\frac{d^2}{t_f^2} \right) < 100 \text{ or } \frac{d}{t_f} > 5,77 \quad (\text{II.2})$$

- les approximations d'âme faible:

$$\frac{D_c}{D_0} < 0,01 \text{ Si } \frac{6E_f t_f d^2}{E_c t_c^3} > 100 \quad (\text{II.3})$$

- Si les deux relations ci-dessus sont satisfaites, la rigidité en flexion est limitée à:

$$D \approx E_f \frac{b t_f d^2}{2} \quad (\text{II.4})$$

En cisaillement, la rigidité S est principalement gouvernée par les caractéristiques de l'âme, la contribution des peaux étant négligeable. Cette rigidité s'exprime par la formule:

$$S = G_c \frac{b d^2}{t_c} \quad (\text{II.5})$$

G_c : Le module de cisaillement du matériau d'âme

b : La largeur du sandwich

II.5.1.4. Contraintes et déformations des matériaux sandwichs

Dans le cas général, la répartition des sollicitations dans une poutre sandwich est décrite sur la Figure I.10. Pour simplifier l'étude, la poutre est uniquement soumise à un moment de flexion M_x et à une force transversale T_x [8].

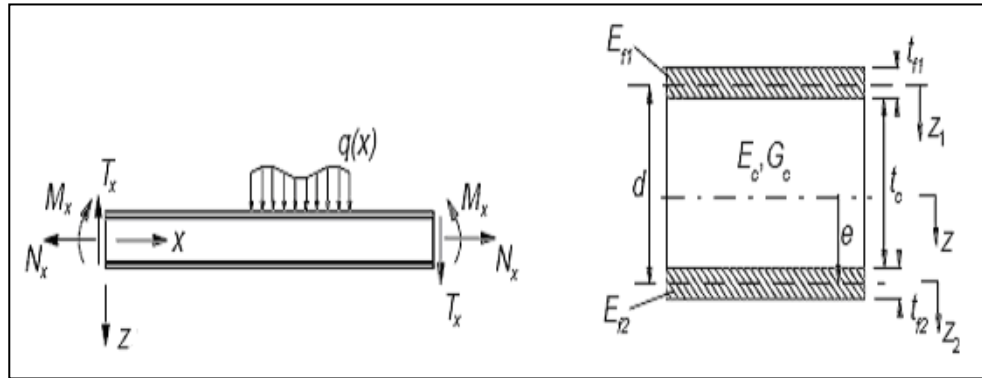


Figure II.10 : Charge appliquée sur une poutre sandwich [8]

La déformation à une distance z par rapport à l'axe neutre du sandwich est donnée par:

$$\varepsilon_x = \frac{M_x z}{D} \quad (\text{II.6})$$

Dans cette étude, la position de l'axe neutre vérifie la condition suivante:

$$\int \sigma_x d_z = 0 \quad (\text{II.7})$$

Pour une intégration sur la totalité de la section transversale (figure II.10), cela devient:

$$E_{f1} t_{f1} \left(\frac{t_{f1}}{2} + t_c + \frac{t_{f2}}{2} \right) + E_c t_c \left(\frac{t_c}{2} + \frac{t_{f2}}{2} \right) = e [E_{f1} t_{f1} + E_c t_c + E_{f2} t_{f2}] \quad (\text{II.8})$$

(E_{f1}, t_{f1}) et (E_{f2}, t_{f2}) sont respectivement les modules d'élasticité et les épaisseurs des peaux supérieure et inférieure.

Pour un sandwich symétrique (même peau avec un module d'élasticité élevé et une faible épaisseur), la position de l'axe neutre est au milieu du cœur (de l'âme). Les contraintes de traction ou de compression dans les peaux peuvent être calculées en utilisant l'équation 1.9:

$$\sigma_x = E \varepsilon_x = E \frac{M_x z}{D} \quad (\text{II.9})$$

La contrainte de compression dans la peau supérieure est donnée par:

$$\sigma_1 \approx -\frac{M_x}{t_{f1}bd} \quad (\text{II.10})$$

La contrainte de traction dans la peau inférieure est exprimée par:

$$\sigma_2 \approx +\frac{M_x}{t_{f2}bd} \quad (\text{II.11})$$

II.5.1.5 Comportement des sandwichs en flexion: a-Flexion trois-points:

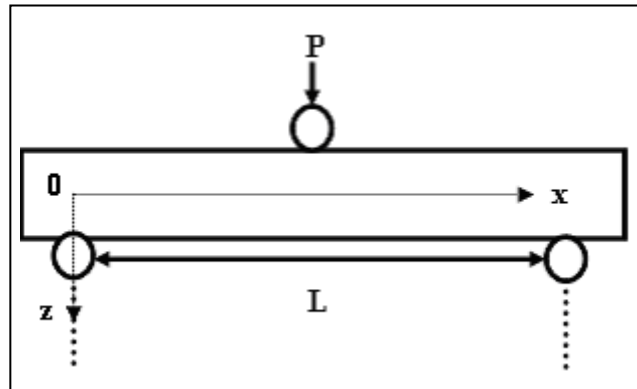


Figure II.11 Flexion trois-points

Dans le cas d'un chargement central d'une poutre, le moment fléchissant s'écrit:

$$M = \frac{Px}{2} \quad \text{pour } 0 < x < \frac{L}{2}$$

$$M = \frac{P(L-x)}{2} \quad \text{pour } \frac{L}{2} < x < L \quad (\text{II.12})$$

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

L'effort tranchant T :

$$T = -\frac{P}{2} \quad \text{pour } 0 < x < \frac{L}{2}$$

$$T = \frac{P}{2} \quad \text{pour } \frac{L}{2} < x < L \quad (\text{II.13})$$

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

$$\sigma_f = \frac{Mz}{D} E_f \quad \text{pour } \frac{t_c}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{t_c}{2} \quad (\text{II.14})$$

Le maximum étant obtenu pour $Z = \pm \frac{h}{2}$ et $x = \frac{L}{2}$, on obtient:

$$\sigma_{f\max} = \pm \frac{PLh}{8D} E_f \quad (\text{II.15})$$

Pour l'âme nous obtenons:

$$\sigma_c = \frac{MZ}{D} E_c \text{ si } -\frac{t_c}{2} \leq z \leq \frac{t_c}{2} \quad (\text{II.16})$$

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

$$\sigma_{c\max} = \frac{PLt_c}{8D} E_c \quad (\text{II.17})$$

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:

$$\tau_c = \frac{T}{Db} \sum S \cdot E \quad (\text{II.18})$$

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 II.12.

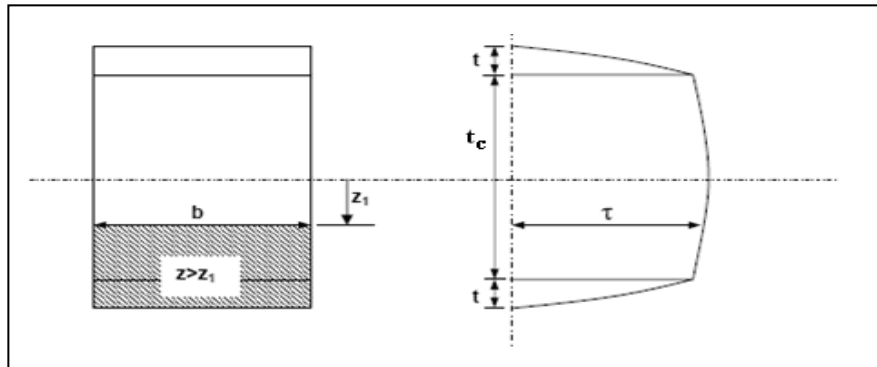


Figure II.12: Répartition des contraintes de cisaillement [10]

D est la rigidité en flexion de la structure et représente la somme des produits de toutes parties de la section pour les quelles $z < z_1$. Cette somme peut s'écrire sous la formule suivante:

$$\sum SE = E_f \frac{bt_f d}{2} + \frac{E_c b}{2} \left(\frac{t_c}{2} - Z \right) \left(\frac{t_c}{2} + Z \right) \quad (\text{II.19})$$

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

$$\tau_c = \frac{T}{D} \left[E_f \frac{t_f d}{2} + \frac{E_c}{2} \left(\frac{t_c^2}{4} - \tau^2 \right) \right] \quad (\text{II.20})$$

Cette contrainte est maximale au centre du sandwich et vaut:

$$\tau_{c\max} = \frac{P}{4D} \left(E_f t_f + E_c \frac{t_c^2}{4} \right) \quad (\text{II.21})$$

De plus, sachant que $E_f > E_c$ on peut négliger le terme tenant compte du module d'Young de l'âme de sandwich, et aussi la rigidité en flexion D peut être réduite au second terme du second membre de son expression globale. La contrainte maximale de cisaillement dans l'âme se réduit à :

$$\tau_{c\max} = \frac{P}{2bd} \quad (\text{II.22})$$

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 Figure II.13, 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.

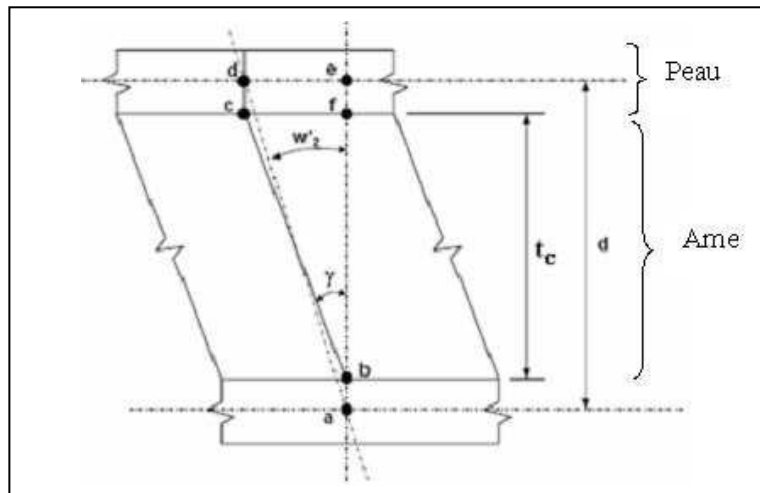


Figure II.13 : Déformation en cisaillement dans l'âme [10]

b-Flexion quatre points :

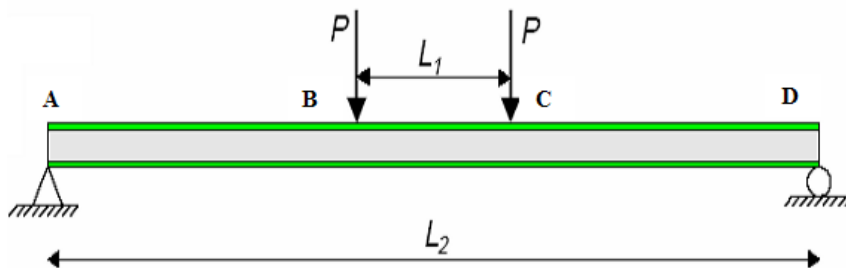


Figure II.14: Flexion 4 points [8]

Dans ce cas du chargement central d'une poutre, le moment fléchissant s'écrit:

$$M = \frac{P(L_2 - L_1)}{2} \text{ pour } B < x < C \quad (\text{II.23})$$

Avec:

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

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

L'effort tranchant T:

$$T = 0 \text{ pour } B < x < C$$

$$T = -P \text{ pour } A < x < B$$

$$T = P \text{ pour } C < x < D$$

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

$$\sigma_f = \pm \frac{M}{t_f} \quad (\text{II.24})$$

La contrainte maximale entre les appuis intérieurs s'écrit:

$$\sigma_{f\max} = \pm \frac{P(L_2 - L_1)}{2t_f b d} \quad (\text{II.25})$$

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

$$\tau_{c\max} = \frac{P}{2bd} \quad (\text{II.26})$$

II.5.1.6. Comportement des sandwichs au flambement

Dans le domaine de la résistance des matériaux, le flambement est la tendance qu'a une poutre sollicitée en compression longitudinale à fléchir et donc à se déformer dans une direction perpendiculaire à la force appliquée. Les déformations dues à la compression ne jouent pas toujours un rôle déterminant sur les éléments de structure verticaux. En revanche, un phénomène d'instabilité appelé « flambement » apparaît à partir d'une certaine charge et en fonction du rapport existant entre la section et la hauteur de l'élément considéré.

Le flambement est une forme d'instabilité propre aux éléments comprimés élancés tels que les poteaux, colonnes, barres comprimées. Le flambement est possible suivant les deux axes principaux de la section de l'élément. Si les conditions d'appuis sont les mêmes selon ces deux axes, le flambement se fera suivant l'axe présentant l'inertie la plus faible. La Figure II.15 présente le cas d'une poutre sandwich chargée sur son axe. Ce cas de chargement peut entraîner des instabilités globales (flambement de la poutre) ou locales (voilement des peaux) si la charge appliquée est trop importante.

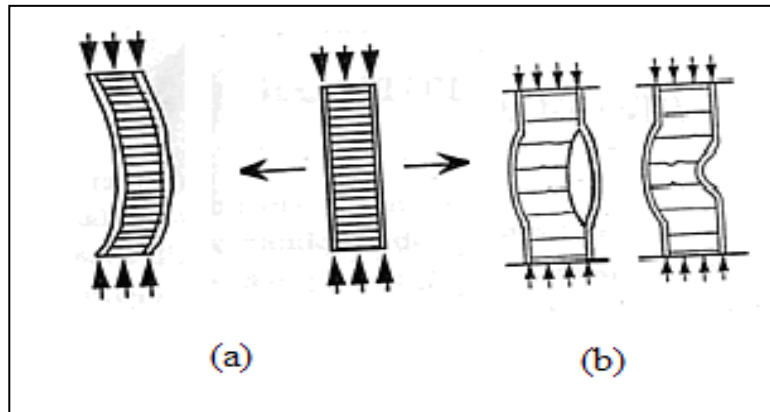


Figure II.15 : a) flambement global du sandwich; b) flambement local du sandwich [15]

En général, on appelle charge d'Euler P_{Eu} la force maximale applicable sans instabilités. Cette charge dépend de la longueur L de la poutre testée et de sa rigidité en flexion D :

$$P_{Eu} = \frac{\pi^2 D}{L^2} \quad (\text{II.27})$$

Dans le cas du sandwich à peaux fines, on doit tenir compte des déformations de cisaillement. Ceci a pour effet de diminuer la charge limite. La charge critique de flambement P_{cr} dépend alors de la rigidité en cisaillement S du sandwich [7].

$$\frac{1}{P_{cr}} = \frac{1}{P_{Eu}} + \frac{1}{S} \quad \text{avec} \quad S = P_c = \frac{bd^2}{c} G \quad (\text{II.28})$$

Pour des sandwichs à peaux épaisses, on doit tenir compte de la charge d'Euler des peaux

$$P_{Euf} = \frac{\pi^2 EI_f}{L^2} \quad (\text{II.29})$$

Ce qui nous donne une charge critique qui exprime par la formule suivante:

$$P_{cr} = P_{Eu} \left\{ \frac{1 + \frac{P_{Euf}}{P_c} - \frac{P_{Euf} P_{Euf}}{P_c P_{Eu}}}{1 + \frac{P_{Eu}}{P_c} - \frac{P_{Euf}}{P_c}} \right\} \quad (\text{II.30})$$

I.6. Les stratifiées

Le composite stratifié ou multicouches est un ensemble de couches empilées et orientées suivant un ordre de drapage défini et rendues solidaires par l'opération de polymérisation (Voir figure II.16). Le drapage c'est l'orientation des plis par rapport à un référentiel donné. Il définit les propriétés mécaniques, électromagnétiques et thermiques globales du matériau composite.

La figure II.17 montre un exemple de plan de drapage d'un stratifié.

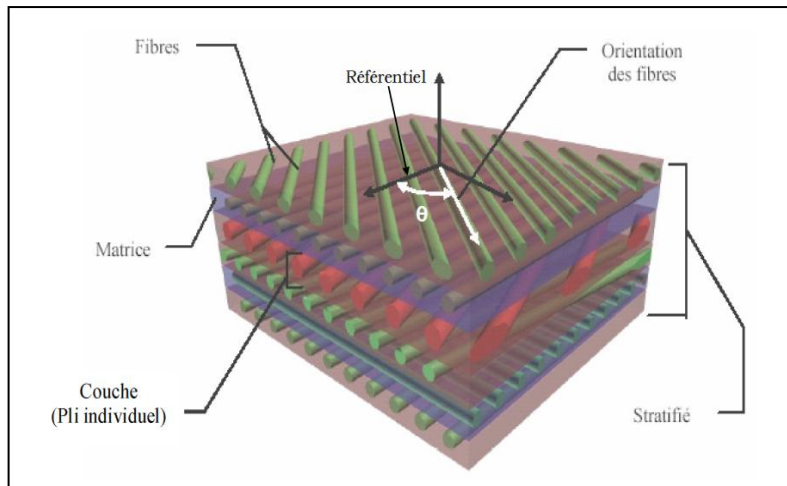


Figure II. 16: Composite stratifié [6]

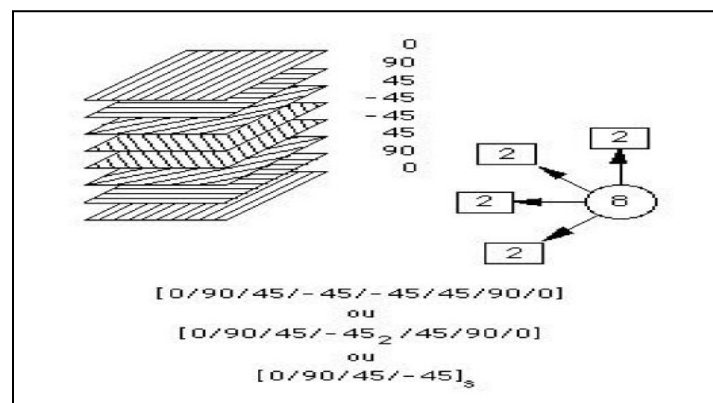


Figure I. 17: Exemple du plan du drapage d'un composite stratifié [6]

Les stratifiés peuvent être de trois types:

- Équilibrés: le stratifié contient autant de couches orientées suivant la direction $+\theta$ que de couches suivant la direction $-\theta$,
- symétriques: les couches du stratifié sont disposées symétriquement par rapport à un plan moyen (miroir),
- orthogonaux: le stratifié comporte autant de couches à 0° que de couches à 90° .

Lorsque la symétrie miroir est réalisée, elle entraîne la symétrie des contraintes et empêche ainsi l'apparition des déformations d'ensembles de la pièce (voilement, gauchissement) [16]. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure.

I.7. Les monocouches

Le composite monocouche (couche élémentaire ou strate) correspond à l'unité élémentaire d'épaisseur, elle est constituée d'un ou plusieurs plis identiques (tissé, UD, mats,...) assemblés sans aucune orientation. Un pli est un semi produit de composites

(fibres+matrice) présenté sous forme quasi- bidimensionnelle, feuille d'épaisseur faible (≈ 0.125 mm). On distingue, le pli UD (Le renfort est à structure UD), le pli tissé (Le renfort est à structure orienté) et le pli mat (Le renfort est à structure aléatoire).

La superposition de la monocouche dans l'ordre du plan de drapage va constituer le stratifié (Figure II. 17).

II.8. Avantages et inconvénients des composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à:

- Leur légèreté;
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue;
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants;
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion:

- les coûts des matières premières et des procédés de fabrication;
- la gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que :

- La maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène;
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous entend une très bonne connaissance des constituants mis en place;
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites. De plus, dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très coûteux et fournissent une matière de faible qualité.

Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables.

I.9. Conclusion

L'objectif des producteurs des matériaux composites est de concurrencer et de surpasser les métaux qui, de leur côté, ne cessent d'optimiser leur propres caractéristiques. La diversité des matériaux composites et leur souplesse, qui permet de fabriquer ou de composer des caractéristiques à la carte, rendent cet objectif légitime. Pour atteindre ces objectifs, ce secteur doit se développer par l'innovation.

Les composites trouvent leur principales applications dans le transport, le bâtiment, l'aérospatiale, etc. Ces applications nécessitent une connaissance des propriétés thermo-physique et des méthodes de mesures de ces matériaux.

En conclusion, cette recherche bibliographique nous a permis de lister les différents avantages majeurs des structures composites multicouches. Par conséquent, l'objectif assigné dans les deux chapitres à suivre est de déterminer expérimentalement leurs propriétés physiques et mécaniques et leurs procédés de fabrication et de mise en œuvre.

***INVESTIGATION
EXPERIMENTALE***

***Chapitre III
Matériaux et élaboration des
éprouvettes***

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les matériaux utilisés, les différentes étapes d'élaboration des éprouvettes, le mode opératoire et le mode d'essai et acquisition des résultats. Cette partie est réalisée au niveau du laboratoire de Génie Civile de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. L'objectif de notre travail consiste à identifier la meilleure variante (fractions optimales de chaque constituant) qui va être utilisée dans la réalisation des panneaux pour assurer l'isolation thermique, phonique et acoustique. Trois matériaux sont considérés dans la réalisation de l'âme du panneau, à savoir : le plâtre, la sciure de bois et le liège. Une fois le panneau durci, deux semelles sont collées sur les faces externes. Deux matériaux sont utilisés : un tissu et un polymère.

Remarque : *Hormis le matériau plâtre, les différentes définitions et présentations (préparations) de la sciure de bois, le liège, le tissu et le polymère ont été réalisées en binôme avec M Mougari, en effet, deux approches sont proposées : la mienne consiste à utiliser un liant de plâtre alors que l'autre consiste à utiliser un mortier de ciment et sable.*

III.1.Présentation des matériaux étudiés :**III.1.1 Le Plâtre :**

Le plâtre est un matériau très disponible et très connu pour ses qualités : c'est un matériau écologique et ne présente aucune menace pour l'environnement. Le plâtre est assez malléable, de faible densité, aux propriétés fonctionnelles remarquables (coupe-feu, isolant thermique, régulateur de l'hygrométrie des enceintes).

Le plâtre est un matériau qui fait prise avec l'eau. Il est issu du gypse qui est un sulfate de calcium, que l'on trouve à l'état naturel sous forme d'albâtre ou cristaux de sélénite.



Figure III.1: Plâtre utilisé.

III.1.1.1 Propriétés :

- **Résistance thermique**

Le plâtre est un mauvais conducteur de la chaleur et donc un bon isolant thermique. Cette propriété est due à la structure poreuse du plâtre, qui résulte du départ de l'eau lors du séchage. L'isolation thermique est caractérisée par le coefficient de conductivité thermique $\lambda=0,35$ W/m.K pour le plâtre en moyenne.

Plus précisément, λ varie avec la masse volumique et la teneur en eau, c'est pourquoi le λ du plâtre peut varier de 0,3 W/m.K à 0,6 W/m.K pour des masses volumiques comprises entre 800 et 1 300 kg·m⁻³.

- **Résistance mécanique**

La dureté du plâtre varie d'environ 55 à 80 sur l'échelle de dureté Shore. Elle dépend de la proportion d'eau utilisée lors du gâchage, de la qualité de cette eau et du plâtre et de la température et vitesse de séchage. La variation de la résistance en fonction du temps est donnée dans le tableau III.1

Tableau III.1 : Variation de la résistance en fonction du temps.

Durée [jours]	Traction [MPa]	Compression[MPa]
1	4	5
2	7	12
4	8	28

III.1.2 La sciure de bois:

La sciure de bois est constituée des fines particules qui désignent l'ensemble des résidus produits par le sciage de bois. La sciure est produite au cours d'opérations d'usinage effectuées sur la matière première (bois). La sciure de bois résulte d'une manufacture, elle est récupérée et valorisée par des applications diverses notamment dans le domaine de la construction. Les résultats de l'analyse physique montrent que la sciure de bois renferme 2,1 % d'humidité, 1,5 % de matière minérale alors que son pH et sa densité apparente sont respectivement de 5,2 et 0,1041g.cm⁻³. La sciure de bois utilisé provienne des menuiseries de proximité.



Figure III.2: Sciure de bois utilisée.

III.1.3 Le Liège

Le liège est un matériau renouvelable, recyclable, et réutilisable. Sans additifs, aggloméré par la propre résine du liège sous l'action de la vapeur et de la pression on obtient un matériau de très bonne isolation phonique et une absorption acoustique, ainsi qu'une grande stabilité dimensionnelle et résistant à l'écrasement.



Figure III.3: Liège aggloméré

Concernant notre étude nous avons utilisé un matériau 100% naturel, extrait de forêts gérées durablement dans la région de YAKOUREN de TIZI-OUZOU

Le liège est récupéré à l'état brut.



Figure III.4: Liège à l'état brut

Le liège est en suite broyé avec un broyeur spécial, le matériau est obtenu sous forme de granulats de diamètres allant jusqu'à 25mm.



Figure III.5: Liège broyé.

III.1.3.1 Propriétés du liège:

Le liège possède 30 millions de cellules/cm³ et à une densité de 0,12 à 0,25. Sa composition et sa structure lui confèrent de nombreuses propriétés :

- Un très bon retour élastique.
- Une imperméabilité totale le rendant imputrescible.
- Une faible conductivité thermique, acoustique et vibratoire
- Très peu inflammable et faiblement fumeux, sans émanation de gaz toxique (à part de très faibles quantités de monoxyde de carbone et d'anhydride carbonique)
- Non absorption des poussières.
- Ne craint aucune attaque de ravageurs.
- Léger (densité : 0,15 en moyenne).
- Chimiquement quasiment neutre (après bouillage).

Des analyses minérales du liège sont réalisées, le Tableau III.2 présente l'ordre de grandeur des teneurs en éléments minéraux du liège.

Tableau III.2 : Composition minérale du liège

Eléments	Proportions
P	0.03-0.04 % m.s
K	0.14-0.27 % m.s
Ca	0.11-0.20 % m.s
Mg	0.01-0.02 mg/kg m.s
N	0.47-0.61 % m.s
Mn	25-52 mg/kg m.s
Cu	10.6-16.4 mg/kg m.s
Zn	7.2-11 mg/kg m.s
Fe	132-191 mg/kg m.s

III.1.3.2 Composition chimique du liège:

Tableau III.3 : Composition chimique du liège

Composants	Subérine	Lignine	Cellulose et Polysaccharides	Tanins	Cires	Cendres et autres
Proportions	45%	27%	12%	6%	5%	5%

III.1.3.3 Caractéristiques du liège :

Sans liant à une température de l'ordre de 300°C la résine naturelle contenue dans le liège tient lieu de liant.

Tableau III.4 : Fiche technique de granulat de liège.

Caractéristiques	Tolérance
Densités	0.24g/cm ³
Granulométries	4 / 8 mm
Coefficient de conductibilité thermique 20°C	$\lambda = 0,040 \text{ W/m}^\circ\text{K}$
Stabilité dans le temps	Illimitée. Produit imputrescible.
Réaction au feu	Très difficilement inflammable.
Attaque des insectes, rongeurs et autres	Peu propice.
Temps de déphasage chaud/froids	+/- 12 heures
Résistance à la conductibilité de la chaleur	R = 0,5 / 0,75 / 1 / 1,25 m ² K/W
Chaleur spécifique	1,67 KJ/Kg°C
Résistance à la flexion	1,8 Kg/cm ²
Résistance à la compression	0,20 Kg/cm ²

III.1.4 Le polymère (POLYMÈRE) :

Composé à 57% de chlore et à 43% d'éthylène, le polymère est la seule matière plastique d'usage courant constituée par plus de 50% de matière première d'origine minérale existant à profusion dans la nature. La résine polymère ainsi obtenue est alors mélangée à des additifs (stabilisants, colorants, antichocs, et...), choisis pour permettre son utilisation industrielle et pour conférer au produit final des propriétés adaptées à son application. Le mélange utilisé par la fabrication de tubes est désigné par le sigle polymère.

**Figure III.6:** Plaques en Polymère.

III.1.4.1 Propriétés mécaniques et physiques du polymère :

- résistance à l'abrasion.
- résistance aux charges extérieures (profondeur, charges roulantes).
- taux de fluage faible.
- excellent comportement au feu (M1, BdS3d0, NF Me).
- tenue à la pression.
- étanchéité.

III.1.4.2 Propriétés chimiques :

- résistance à la corrosion et aux divers agents atmosphériques.
- inertie chimique vis-à-vis des principaux fluides transportés.
- excellente résistance chimique (H₂S, dioxyde de chlore).

III.1.4.3 Qualités économiques :

- pérennité : durées de vie entre 50 et 100 ans.
- compétitivité : facilité de mise en œuvre, simplicité d'entretien.

III.1.4.4 Qualités environnementales :

- conformité sanitaire pour les fluides destinés à la consommation humaine.
- le polymère est recyclé (filères de collectes spécifiques).
- FDES (Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire) disponibles sur le site : www.str-polymère.org, rubrique "actualités".

III.1.5 Résine époxyde :

Les adhésifs époxydiques destinés au génie civil sont des systèmes bi-composants, constitués d'une base époxy (pré polymère comportant des fonctions réactives oxyranes) et d'un durcisseur qui est le plus souvent constitué d'un mélange d'amines aliphatiques ou cycliques ou de polyimides. Les groupements fonctionnels de la résines et du durcisseur sont capables de réagir par polycondensation à température ambiante pour former un réseau polymère réticulé avec une réaction entre le diglycidyl éther de bisphénol A ou DGEBA (qui est une des bases époxydes les plus couramment utilisée) et une diamine aliphatique.

La résine qui constitue notre matrice est une résine époxy destinée à la stratification sur différents supports, elle se présente sous forme de kit pré dosé de 2 composants :

- Élément A : résine STR.

- Élément B : résine durcisseur STR.

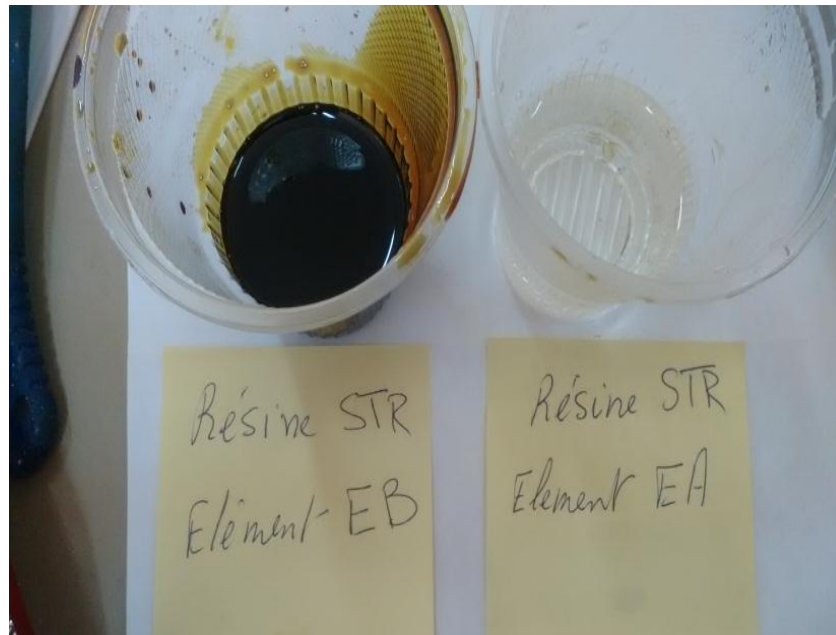


Figure III.7: Résine utilisée.

III.1.5.1 Propriétés:

- Très bonne tenue aux produits chimiques
- Très bonne adhérence sur supports béton et acier, mortier de ciment
- Bonne mouillabilité du support et de la fibre de verre
- Durcissement rapide
- Etanchéité aux liquides et à la vapeur d'eau
- Résistances mécanique élevées
- Sans solvant

III.1.5.2 Caractéristiques:

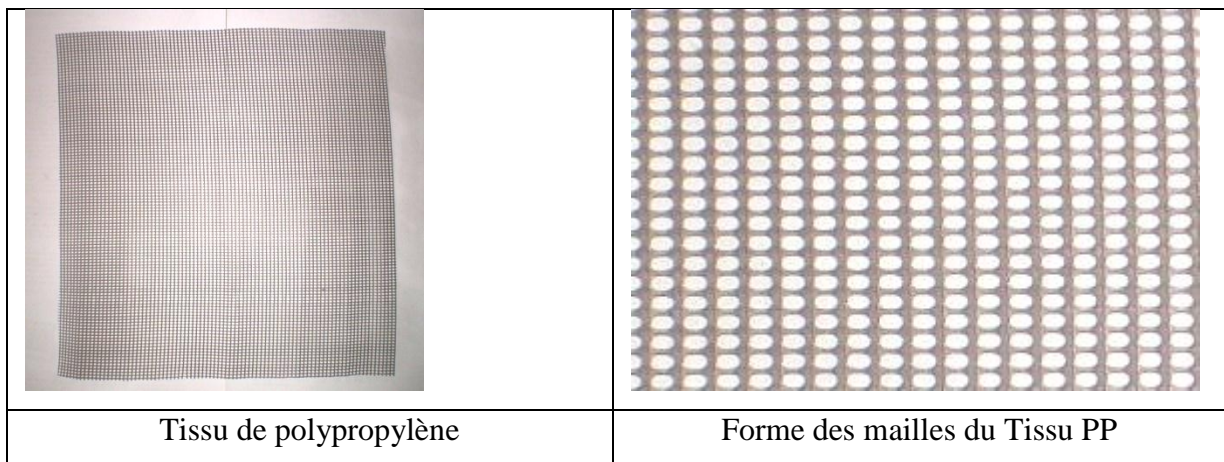
Le tableau III.5 résume les caractéristiques de la résine fournies par le fabricant :

Tableau III.5 : Les caractéristiques de la résine époxy.

Densité (ISO 758)	1.1±0.05
Viscosité (NF T76- 102)	11000 mPaS à 25°C
DPU (NFP 18 810)	1h15mn à 20°C et 65% HR
Temps de durcissement à 20°C et 65% HR	Hors poisse 6h dur 16h
Rc (NA 427)	>70 MPa
Rf(NA 234)	>25 MPa
Adhérence sur le béton (NFP 18 858)	3 MPa
Durée de mise en service	10j à 20°
Rapport pondérale	Résine : 1 kg Durcisseur : 0.666 Kg
Résistivité à 20°C ($\Omega .m$)	10^{10} à 10^{13}

III.1.6 Le polypropylène:

Le tissu de polypropylène étudié est unidirectionnel constitué de fibre de polypropylène à maille ellipsoïde.

**Figure III.8** : Forme du Tissu en fibres de Polypropylène.

III.1.6.1 Propriétés :

- Léger
- Faible coût
- Résistant à la traction
- Résistant aux chocs

III.1.6.2 Caractéristiques :

- Les Propriétés mécaniques du polypropylène à température ambiante sont données dans le tableau III.6:

Tableau III.6 : Propriétés mécaniques du polypropylène

Matériau	E [GPa]	v	Re [MPa]	Rm [MPa]	A %	K_{1c} [MPa.m ^{1/2}]
polypropylène	0.9 - 1.7	0.41	20 – 35	35 – 70	60 – 100	3 – 3.5

Le Tableau III.7 résume les caractéristiques géométriques et physiques du tissu de polypropylène.

Tableau III.7 : Caractéristiques du tissu de polypropylène.

Masse surfacique (g/m²)	140g/m ²
Masse volumique (g/cm³)	0.90
Dimensions des mailles (mm)	2mmx1.5mm
Nombre de maille/m²	150000 mailles/m ²
Epaisseur du tissu (mm)	0.5 mm

III.2 Analyse granulométrique:

L'analyse granulométrique par tamisage permet de déterminer la distribution des tailles des éléments composant l'échantillon analysé.

- **Refus** : on appelle refus sur un tamis la quantité du matériau qui est retenu sur le tamis.
- **Tamisa (passant)** : La quantité du matériau qui passe à travers le tamis.

III.2.1 Machine utilisé:

Le tamisage des matériaux prévus pour le besoin de notre étude est réalisé sur une machine appelée Tamiseuse (figure III.9). La machine est équipée d'une série de tamis de diamètres différents posés l'un sur l'autre dans la machine du plus petit diamètre au plus grand diamètre. Les vibrations procurées par la machine permettent aux matériaux versés de se dissiper à travers les tamis, et ainsi déterminer les refus retenus dans chaque tamis.



Figure III.9 : Tamiseuse.

III.2.2 Procédures de tamisage:

Nous avons apporté des quantités suffisantes de la sciure de bois et du liège (2 Kg de chaque matériau), puis procédé au tamisage du contenu, afin de séparer les grains des différents diamètres et définir les différentes gammes à utiliser.

Pour procéder au tamisage de la sciure de bois, il fallait d'abord la frictionner à la main à fin d'obtenir des granulats de diamètres différents, pour obtenir plusieurs gammes après tamisage (figure III.10).



Figure III.10 : Fractionnement de la sciure de bois

- les différents tamis utilisés

Ø 0,125 / Ø 0,315 / Ø 0,8 / Ø 1,25 / Ø 3,15 / Ø 5 / Ø 6,3 / Ø 8 / Ø 10 / Ø 12,5.

Les principales étapes de tamisage sont illustrées ci-après :

<p>Verser le matériau dans le dernier tamis</p>	<p>Tenir les tamis à l'aide d'un couvercle et faire démarré la machine</p>	<p>Récupérer les refus des différents tamis séparément</p>		

III.2.3 Présentation des différents refus du liège et sciure de bois :

Les différentes quantités de refus sont illustrées dans les tableaux suivants :

Tableau III.8 : Les refus obtenus par tamisage du liège.




















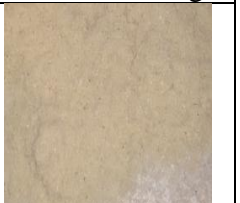
				
Tamis : Ø 12 Refus : 123 g	Tamis : Ø 10 Refus : 204,5 g	Tamis : Ø 8 Refus : 130 g	Tamis : Ø 6,3 Refus : 111,5 g	Tamis : Ø 5 Refus : 155 g
				
Tamis : Ø 3,15 Refus : 421,5 g	Tamis : Ø 1,25 Refus : 687,5 g	Tamis : Ø 0,8 Refus : 85,5 g	Tamis : Ø 0,315 Refus : 66,5 g	Tamis : Ø 0,125 Refus : 6,5 g

Tableau III.9 : Les refus obtenus par tamisage de la sciure de bois.

				
Tamis : Ø 12 Refus : 2,5 g	Tamis : Ø 10 Refus : 24,5 g	Tamis : Ø 8 Refus : 438 g	Tamis : Ø 6,3 Refus : 313 g	Tamis : Ø 5 Refus : 623,5 g
				
Tamis : Ø 3,15 Refus : 90 g	Tamis : Ø 1,25 Refus : 346,5 g	Tamis : Ø 0,8 Refus : 76,5 g	Tamis : Ø 3,15 Refus : 63,5 g	Tamis : Ø 0,125 Refus : 15 g

III.2.4 Définition des gammes :

Pour définir des gammes à considérer, nous avons procédé de la manière suivante :

- **Gamme 1**

Les tamis considérés: Ø8 / Ø10 / Ø12,5.

- **Gamme 2**

Les tamis considérés : Ø3,15 / Ø5 / Ø6,3.

- **Gamme 3**

Les tamis considérés : Ø0,125 / Ø0,315 / Ø0,8 / Ø1,25.

Les différentes gammes sont illustrées par la figure III. 10 et leurs quantités sont résumées dans le tableau III.10:



Figure III.11 : Les gammes obtenues pour chaque matériau.

Tableau III.10 : Masses des gammes pour 2 kg de chaque matériau.

		Gamme 1	Gamme 2	Gamme 3
Tamis utilisé (Ø mm)		8 / 10 / 12,5	3,15 / 5 / 6,3	0,125 / 0,315 / 0,8 / 1,25
Quantités (g)	Liège	457,5	688	846
	Sciure de bois	465	1026,5	501,5

L'analyse granulométrique du liège et de la sciure de bois nous a permis de définir les différentes gammes à utiliser pour confectionner les éprouvettes d'essais.

III.3 Elaboration des éprouvettes et des panneaux d'essais:

La réalisation des éprouvettes d'essais est une étape préliminaire permettant l'évaluation des différentes variantes qui constituent les éprouvettes en terme de caractéristique mécanique, pour pouvoir en suite relever la meilleure variante et la composition optimale à considérer dans la réalisation des panneaux.

III.3.1 Moules utilisés:

Nous avons utilisé deux moules avec des dimensions différentes pour la réalisation des corps d'épreuves prévus pour les essais.

- Un coffrage en bois de dimensions intérieures 36x36x3 cm est fabriqué au laboratoire. ce coffrage permet de confectionner dix panneaux à la fois destinés aux essais de poinçonnement et de flambement.
- Plusieurs moules métalliques prismatiques de dimensions intérieures 16x4x4 cm sont utilisés pour la réalisation des éprouvettes destinées aux essais de compression et de flexion.

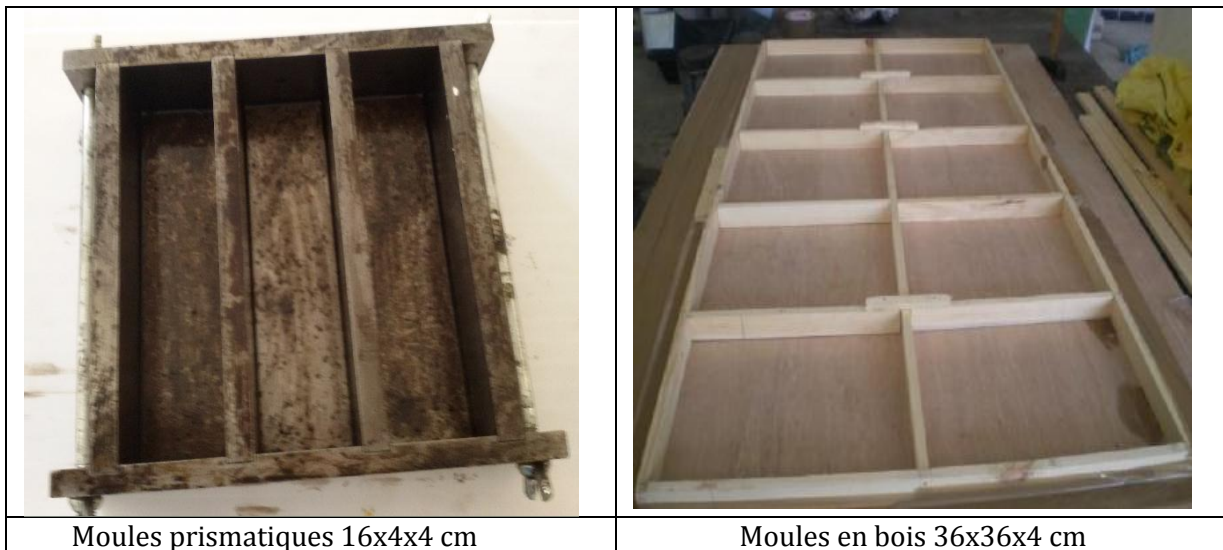


Figure III.12 : Formes de moules

III.3.2 Moulage au contact:

Le principe de moulage au contact est un procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur la pièce et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée.

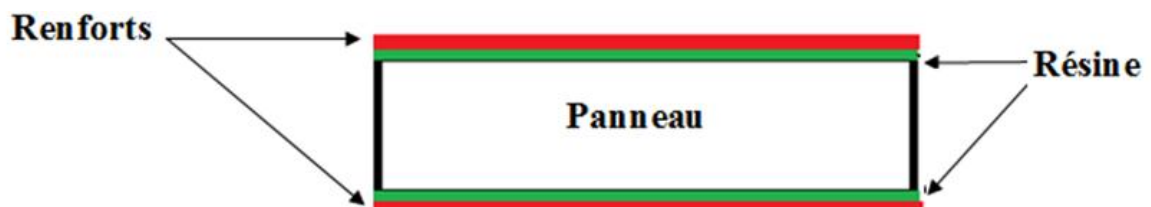


Figure III.13: Principe de mise en œuvre des renforts.

III.3.3 Mode opératoire :

a)- Préparation des éprouvettes d'essais :

Les éprouvettes que nous avons réalisés sont à base de plâtre renforcé avec du liège ou de la sciure de bois. Aussi nous avons réalisé des éprouvettes à base de liège ou de la sciure de bois, en utilisant comme liant de la résine.

- Pour préciser la quantité du plâtre employée dans notre éprouvette, nous avons besoin de sa masse volumique, généralement la masse volumique apparente du plâtre est comprise entre 800 kg/m^3 et 1300 kg/m^3 , expérimentalement nous l'avons déterminé de la manière suivante :

Nous avons utilisé un récipient cylindrique de volume connu (1553.66cm^3), une règle à araser et une balance (figure III.14).

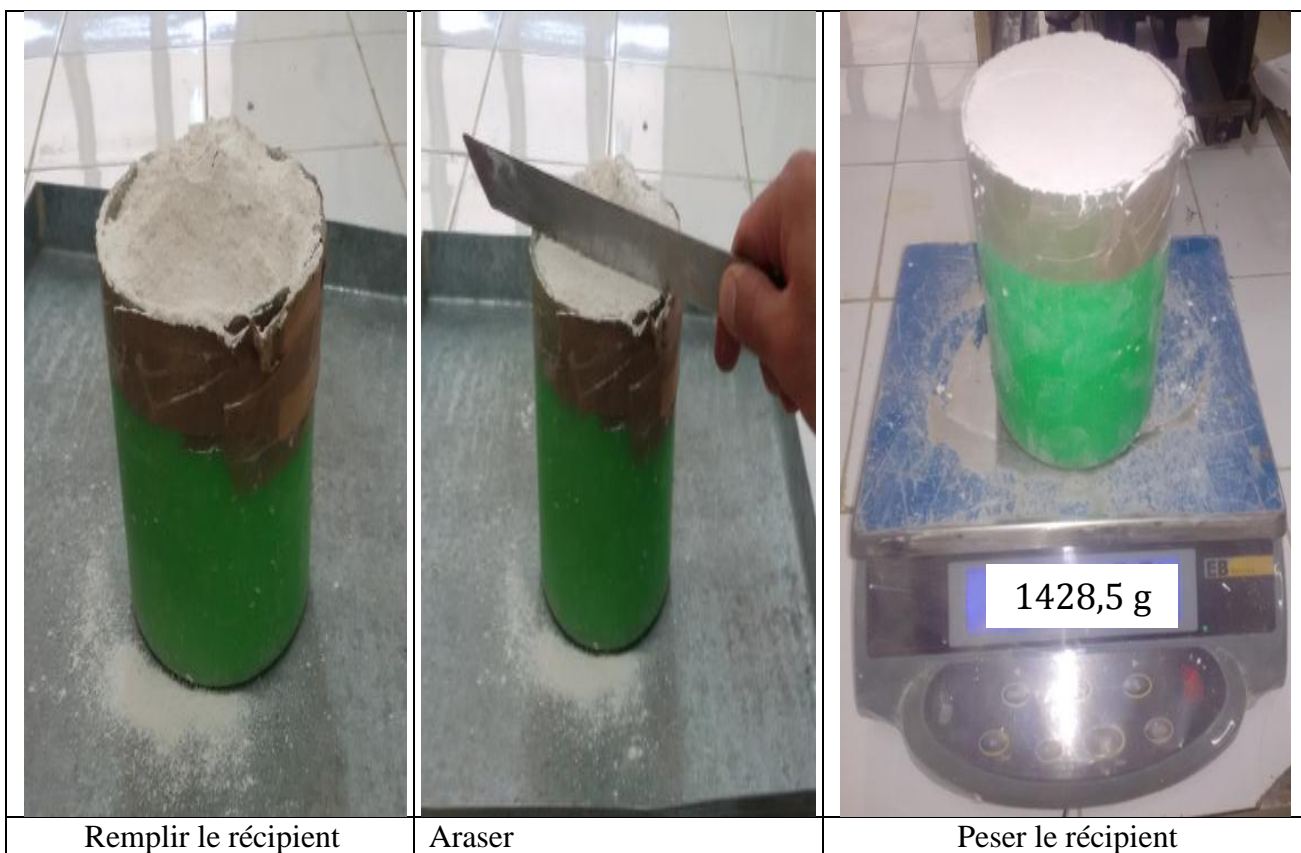


Figure III.14 : Détermination de la masse volumique apparente du plâtre.

Le calcul de la masse volumique du plâtre :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V_{récipient}}$$

Nous avons :

- La masse du plâtre : $M_p = 1,4285 \text{ Kg}$

- Le volume du récipient : $V_r = 1553,66 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

$$\rho_p = \frac{M_p}{V_r} = \frac{(1,4285\text{kg})}{(1553,66 \cdot 10^{-6}\text{m}^3)} = 920\text{kg/m}^3$$

Ainsi la masse volumique du plâtre: $\rho_P = 920 \text{ Kg/m}^3$.

- Pour préciser les quantités du liège et de la sciure de bois employées dans notre éprouvette nous avons aussi besoin de leurs masses volumiques. D'après les normes **NF P 18-554** et **NF P 18-555**, les masses volumiques des deux matériaux sont comme suit:

La masse volumique de la sciure de bois (bois)	La masse volumique du liège
$\rho_{sc}=500 \text{ kg/m}^3$	$\rho_L=240 \text{ kg/m}^3$

- Pour l'élaboration de ces éprouvettes on a respecté les étapes suivantes:
 - Préparer les moules et mettre de l'huile sur les parois des moules pour faciliter le démoulage.
 - Procéder au mélange des composants une fois la préparation des moules est terminée.
 - Ajouter 10% de quantité du mélange considéré comme perte de masse.
 - Ne préparer que les quantités de mélange pouvant être utilisée durant ce temps.
 - Remuer le mélange pendant 03 minutes avec un agitateur à faible vitesse de rotation, et racler plusieurs fois les parois du récipient afin d'assurer une dispersion totale.
 - Après l'obtention d'un mélange homogène, on verse le mélange dans le moule, en suite on étale à l'aide d'une raclette afin de chasser les bulles d'aire.
 - Préparer 3 éprouvettes pour chaque variante, en variant la gamme et les fractions des constituants.
 - Après 14 jours, on procède au démoulage.

Les principales étapes de réalisation sont illustrées ci-après



- **Remarque :**

Pour le choix de l'utilisation de la résine (40 % du volume de l'éprouvette) comme liant et lors du malaxage de la résine avec la sciure de bois, nous avons remarqué une formation de pelote, la sciure de bois n'est pas bien imbibée « agglomérée » et elle manquait de liaisons (figure III.12).

Suit à l'application d'une force de pression durant la réalisation de l'éprouvette, la correction de la masse du mélange de 10% n'était pas suffisante, donc il fallait augmenter la fraction de la résine, le coût devient ainsi très élevé. Pour cela nous avons opté pour le remplacement de la résine par du plâtre pour obtenir une bonne liaison et diminuer le prix de revient.



Figure III.15 : Eprouvettes (sciure de bois / résine).

- **composition des éprouvettes :**

Les différents constituants des éprouvettes et les fractions volumiques et massiques des composants sont données dans les tableaux III.11, a, b, c, d et e:

Tableaux III.11 : Composition des éprouvettes d'essais selon les différentes gammes et fractions.

a)

	Composants	Dimension	Volume(cm ³)	Densité (g/cm ³)	Quantités (g)
Plâtre témoin	100% plâtre	16x4x4 cm	256	0,92	260

b)

	Composant		Dimension	Volume(cm ³)	Densité (g/cm ³)	Quantités (g)
PSC 60%-40% G1, G2 et G3	Sciure de bois	G1	40%	16x4x4 cm	102,4	0,5
		G2				
		G3				
	Plâtre		60%	153,6	0,92	182

c)

	Composant		Dimension	Volume(cm ³)	Densité (g/cm ³)	Quantités (g)
PSC 50%-50% G1, G2 et G3	Sciure de bois	G1	50%	16x4x4 cm	128	0,5
		G2				
		G3				
	Plâtre		50%	128	0,92	156

d)

	Composant		Dimension	Volume(cm ³)	Densité (g/cm ³)	Quantités (g)
PL 40%-60% G1, G2 et G3	Liège	G1	60%	16x4x4 cm	102,4	0,24
		G2				
		G3				
	Plâtre		40%	153,6	0,92	124,8

e)







	Composant		Dimension	Volume(cm ³)	Densité (g/cm ³)	Quantités (g)
PL 50%-50% G1, G2 et G3	Liège	G1	50%	16x4x4 cm	128	0,24
		G2				
		G3				
	Plâtre		50%	128	0,92	156

- Les quantités l'eau versé lors du mixage du mélange, sont ajouté selon les besoins, pour obtenir un mélange maniable, et retardé la pris du plâtre permettant le remplissage du moule.

• **Présentation des éprouvettes après démoulage :**

Les figures III.13 a et b présentent les différentes éprouvettes après démoulage

a)

Gammes	40 % sciure / 60 % plâtre	50 % sciure / 50 % plâtre
Gamme 1		
Gamme 2		
Gamme 3		

b)







Gammes	50 % liège / 50 % Plâtre	60 % liège / 40 % plâtre
Gamme 1		
Gamme 2		
Gamme 3		



Figure III.16: Epreuve de référence en Plâtre uniquement

b)- Préparation des panneaux d'essais:

Pour l'élaboration des panneaux, nous avons suivi les mêmes étapes pour l'élaboration des éprouvettes prismatiques. A partir des essais de caractérisation menés sur les éprouvettes présentées précédemment, on considère les fractions et les gammes correspondantes qui ont donné les meilleurs résultats en termes de résistance.

Les principales étapes de réalisation sont illustrées ci-après:



Figure III.17 : Principales étapes de réalisation

- **Composition des panneaux:**

Les différents constituants des panneaux et les fractions volumiques et massiques des composants sont donnés dans le tableau suivant:

*Tableau III.12:*Composition des panneaux .

	Composants	Dimension	VOLUME(cm ³)	Densité (g/cm ³)	Quantités (g)
Sciure de bois (gamme 2)	40 %	36x36x3 cm	1555,2	0,5	850,5
Plâtre	60 %		2332,8	0,92	2765

- **Mise en place des renforts:**

La mise en place des renforts a été réalisée après 7 jours d'élaboration des panneaux, nous avons procédé de la manière suivante :

- Couper le tissu de polypropylène et le Polymère selon les dimensions du panneau.
- Verser les quantités calculées (résine + durcisseur) dans le récipient et mélanger.
- Remuer le mélange pendant 03 minutes avec un agitateur à faible vitesse de rotation.
- Vider le mélange homogène sur une face du renfort(tissu,Polymère).
- Étaler le mélange sur la face du renfort (tissu, polymère).
- Poser le renfort sur le panneau et appliquer une petite pression pour avoir un bon contact entre les deux éléments.

- **Variantes considérées**

- Variante 1 : 2 semelles en tissu sur les deux faces.
- Variante 2 : 2 semelles en polymère sur les deux faces
- Variante 3 : 1 semelle en tissu et l'autre en polymère.

Après 24 heures les renforts sont durcis et présentent une bonne adhérence.

Les principales étapes de réalisation sont illustrées par la figure III.16 ci-après:

		
<p>Résine + Durcisseur</p>	<p>Préparation du mélange</p>	<p>Etalement du mélange sur le renfort</p>
		
<p>Panneau renforcé avec du tissu sur les deux faces</p>	<p>panneau renforcé avec du Polymère sur les deux faces</p>	<p>Panneau renforcé avec du tissu sur une face et avec du Polymère sur l'autre face</p>

Figure III.18 : Principales étapes de réalisation des panneaux

III.4 Présentation des essais mécanique:

III.4.1 Machine d'essais:

Tout les essais mécaniques sont réalisés sur une machine de marque IBERTEST (figure III.17). Machine universelle qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion. La machine est équipée d'une cellule de force maximale de 200 KN. Elle est commandée par microordinateur muni d'un logiciel de commande et de traitement des résultats, ce qui permet une bonne acquisition de données, c'est-à-dire les diagrammes (force/déplacement et force/temps) avec une bonne précision. Les essais sont réalisés à température ambiante. La machine est pilotée à vitesse de traverse constante fixée à 10 mm/min soit 0,1 KN/S.



Figure III.19 : Machine d'essais IBERTEST

III.4.2 Essais de compression et de flexion :

Les tests de compression et de flexion 3 point sont effectués sur la machine IBERTEST, la machine est réglée à une vitesse de chargement de 0,1 KN/S.

Les essais sont réalisés suivant les normes : en compression NF T 54-604 [44], en flexion NF T 54-606 [45].

Pour l'essai de compression, les éprouvettes 16x4x4 sont posées verticalement et au milieu du dispositif de compression de la machine.

Pour l'essai de flexion 3 points, les éprouvettes 16x4x4 sont posées horizontalement sur un dispositif de flexion avec deux appuis. Notons que la distance entre le point d'application de la charge et les appuis est de 7cm.

Les informations issues de ces essais sont récupérées sur le microordinateur de pilotage de la machine. Un traitement numérique peut être réalisé par la machine en utilisant le logiciel incorporé de traitement statistique des résultats.

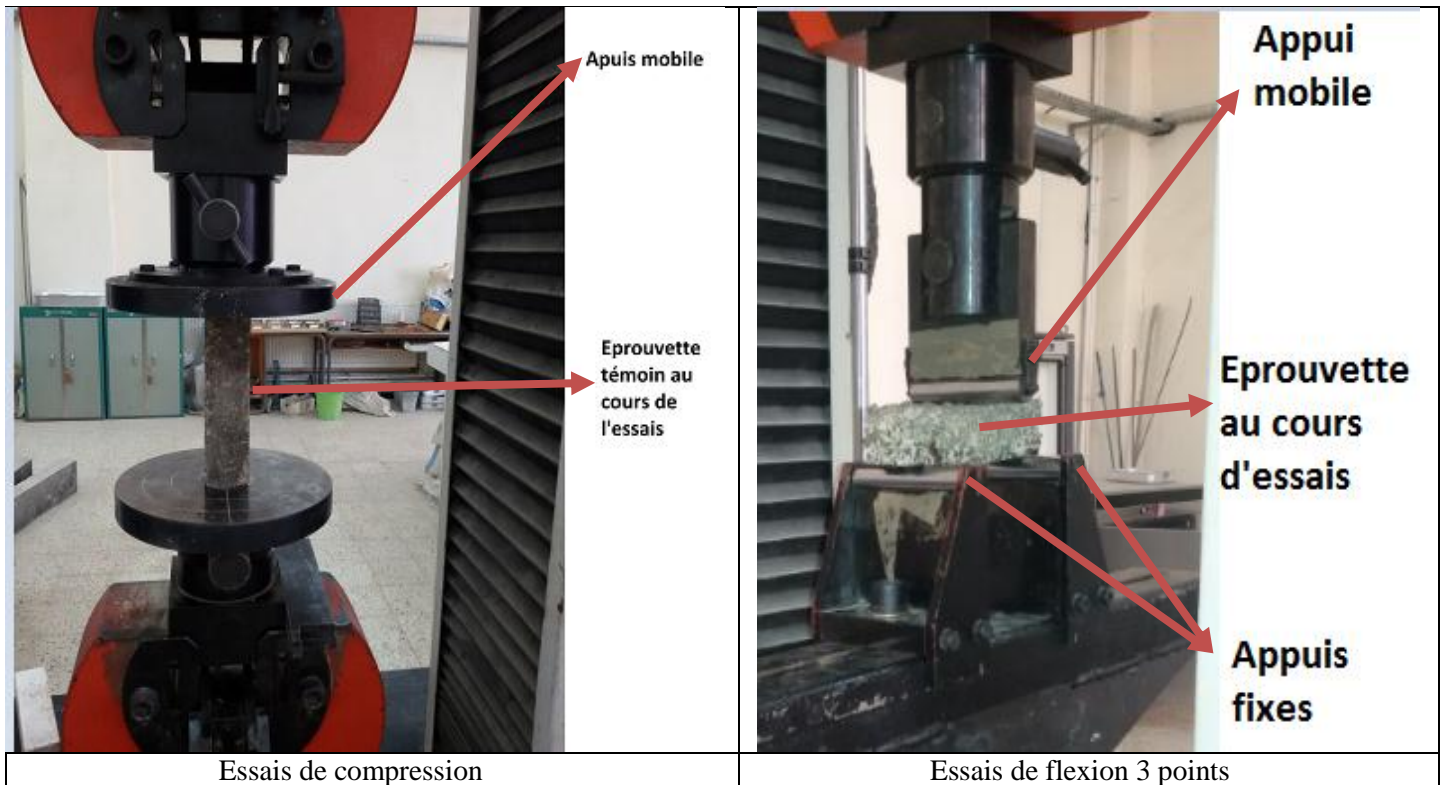


Figure III.20 : Mode d'essai

III.4.3 Essais de poinçonnement :

Les différents panneaux ont été testés sous poinçonnement. L'objectif de l'essai est d'identifier expérimentalement l'influence des différents renforcements (tissu/tissu, tissu/Polymère et polymère/polymère) sur le comportement de l'ensemble du système (panneau) renforcé vis-à-vis du poinçonnement.

La machine utilisée pour la réalisation de ce type d'essai est la même machine utilisée pour la flexion et la compression (IBERTEST), sauf les accessoires qui changent.

Le panneau est posé sur un dispositif de poinçonnement fabriqué sur mesure. Il repose sur ces quatre cotés. Les dimensions du dispositif fabriqué sont 35x35 cm.

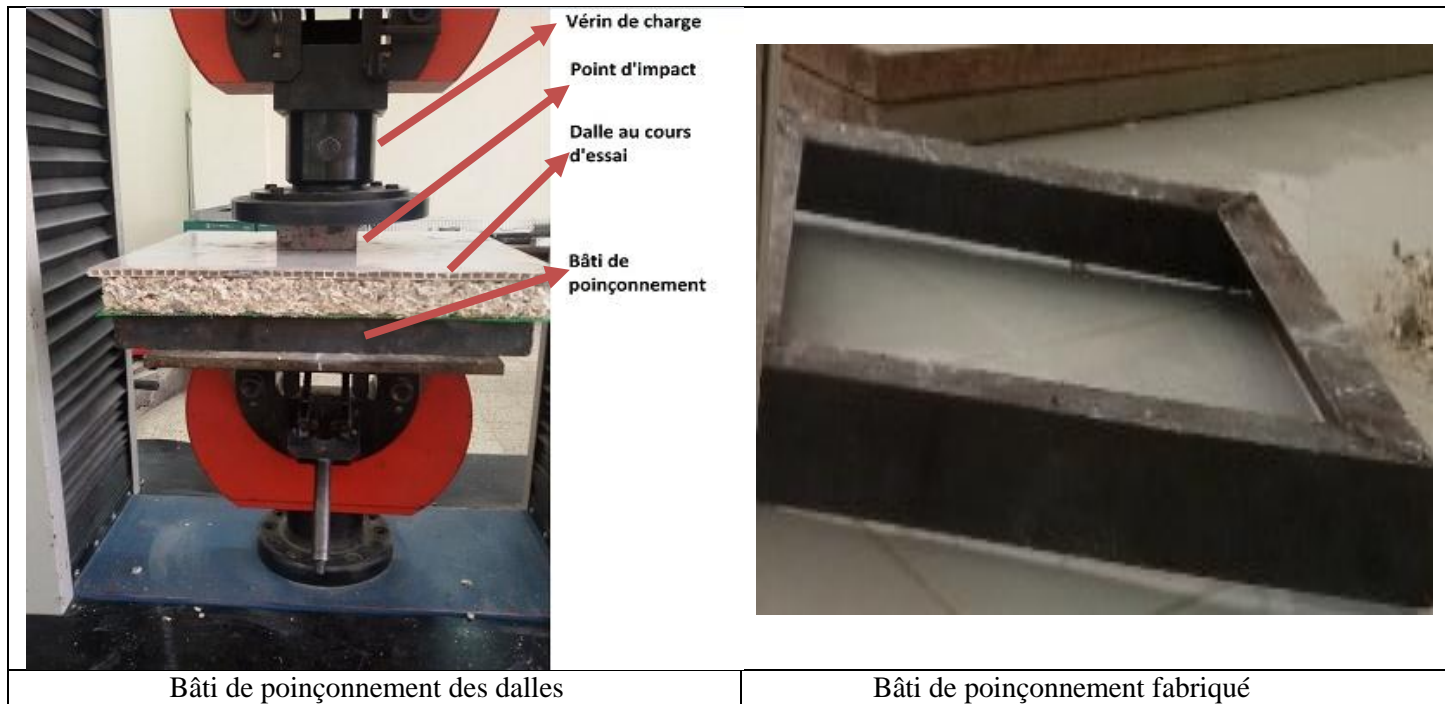


Figure III.21 : Mode d'essai de poinçonnement.

III.4.4. Essais de voilement :

L'objectif de cette partie est d'identifier expérimentalement l'influence des différents renforcements (tissu/tissu, tissu/PVC et PVC/PVC) sur le comportement de l'ensemble du système de dalle renforcée vis-à-vis du voilement.

Les essais sont réalisés suivant la norme : NF T 54-604 [44].

La machine utilisée pour la réalisation de ce type d'essais est la même utilisée pour la flexion et la compression (IBERTEST), sauf les accessoires qui changent.

Le panneau est posée verticalement sur un dispositif, après on place un comparateur de chaque côté de la dalle d'une manière à ce que l'aiguille du comparateur soit au milieu du panneau, pour mesuré les déplacements horizontale, comme le montre les figures ci-après.

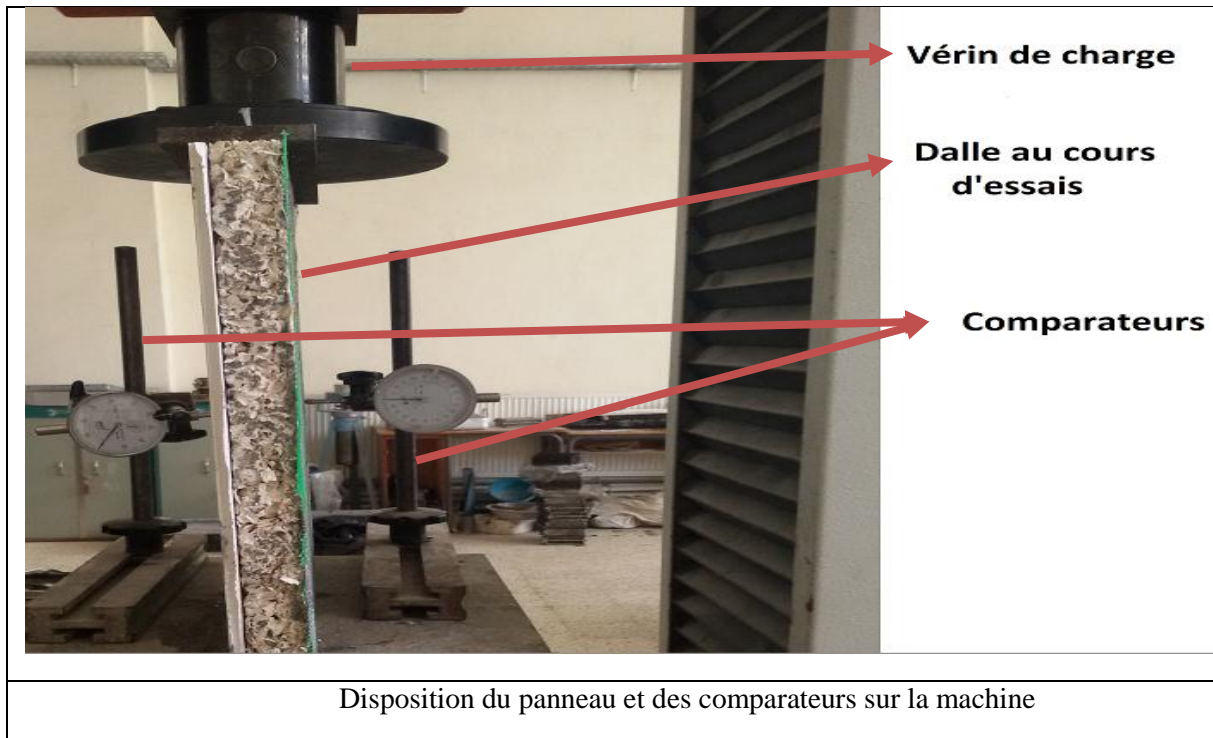


Figure III. 22 : disposition des accessoires pour l'essai de voilement

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans cette étude avec leurs caractéristiques, la formulation des différents mélanges. Plusieurs paramètres ont été variés : Les gammes des constituants, la nature du liant, les fractions ainsi que la nature des renforts et leurs combinaisons.

Tous les résultats obtenus seront présentés dans le chapitre suivant et seront discutés pour mettre en évidence l'intérêt de cette proposition de composition de panneau léger à base de plâtre renforcé de sciure de bois ou de liège pour l'isolation dans le bâtiment.

Chapitre IV
Présentation des résultats et
discussion

Introduction :

Dans ce quatrième chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats des différents essais réalisés. L'objectif principal est de mettre en exergue l'intérêt des panneaux renforcés pour la séparation intérieur en bâtiment ou pour l'isolation.

Dans un premier temps, et afin de déterminer la meilleure variante, en termes de résistances mécaniques, nous allons interpréter les résultats issus des essais de flexion et de compression. Par la suite, on procédera à la présentation et à la discussion des résultats les essais de poinçonnement et de voilement sur les panneaux confectionnés par une matrice composite selon la meilleure variante et renforcés par des plaques en polymère et des tissus polypropylène.

IV.1 Essais de compression sur les éprouvettes➤ **Présentation et interprétation des résultats de l'essai de compression**

Les résultats obtenus de ces essais nous ont permis de déterminer les valeurs moyennes des forces pour chaque série d'éprouvettes et de tracer les courbes force-déplacement.

Tableau IV.1: Résultats des essais de compression.

Types d'éprouvette	Masses des éprouvettes (g)	Force maximale (kN)	Résistance (MPa)	Mode de rupture
Plâtre témoin 1/2	326,5	2,085	1,30	Fragile
Plâtre témoin 2/2	324	1,96	1,22	Fragile
PSC 60%-40%-G1,1/2	119	0,41	0,25	Fragile
PSC 60%-40%-G1,2/2	124	0,50	0,31	Fragile
PSC 50%-50%-G1,1/2	112,5	0,62	0,38	Fragile
PSC 50%-50%-G1,2/2	98,5	0,58	0,36	Fragile
PSC 60%-40%-G2 ;1/2	170	2,01	1,25	Fragile
PSC 60%-40%-G2 ;2/2	162	1,96	1,22	Fragile
PSC 50%-50%-G2,1/2	145	0,89	0,55	Fragile
PSC 50%-50%-G2 ;2/2	139	0,96	0,6	Fragile
PSC 60%-40%-G3,1/2	123,5	0,42	0,26	Fragile
PSC 60%-40%-G3,2/2	119	0,39	0,24	Fragile
PSC 50%-50%-G3,1/2	194,5	0,44	0,27	Fragile
PSC 50%-50%-G3,2/2	198	0,49	0,30	Fragile
PL 40%-60%-G1,1/2	188,5	1,22	0,76	Fragile

PL 40%-60%-G1,2/2	179,5	1,37	0,85	Fragile
PL 50%-50%-G1,1/2	134	1,51	0,94	Fragile
PL 50%-50%-G1,2/2	132,5	1,46	0,91	Fragile
PL 40%-60%-G2,1/2	164	0,86	0,53	Fragile
PL 40%-60%-G2,2/2	164,5	0,72	0,45	Fragile
PL 50%-50%-G2,1/2	150	1,47	0,91	Fragile
PL 50%-50%-G2,2/2	148	1,40	0,87	Fragile
PL 40%-60%-G3,1/2	192	0,70	0,43	Fragile
PL 40%-60%-G3,2/2	188	0,65	0,40	Fragile
PL 50%-50%-G3,1/2	131	1,45	0,90	Fragile
PL 50%-50%-G3,2/2	130,5	1,33	0,83	Fragile

➤ **Courbes force-déplacement des différents types d'éprouvette**

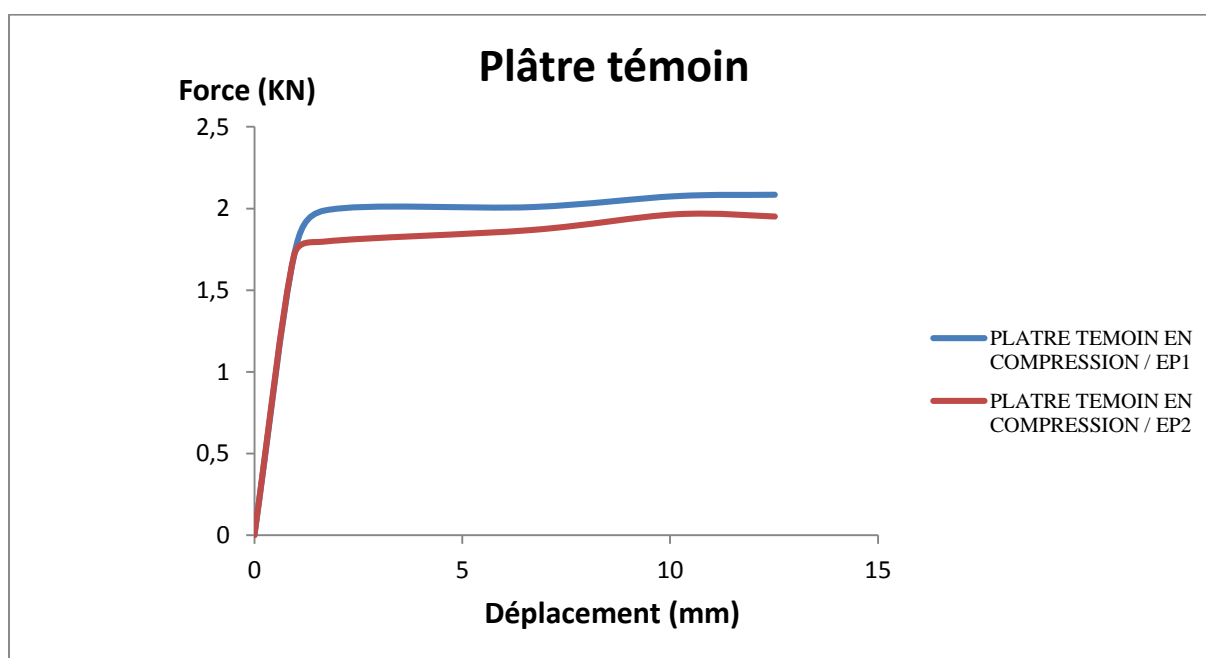


Figure IV.1 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes de références (témoins) du plâtre.

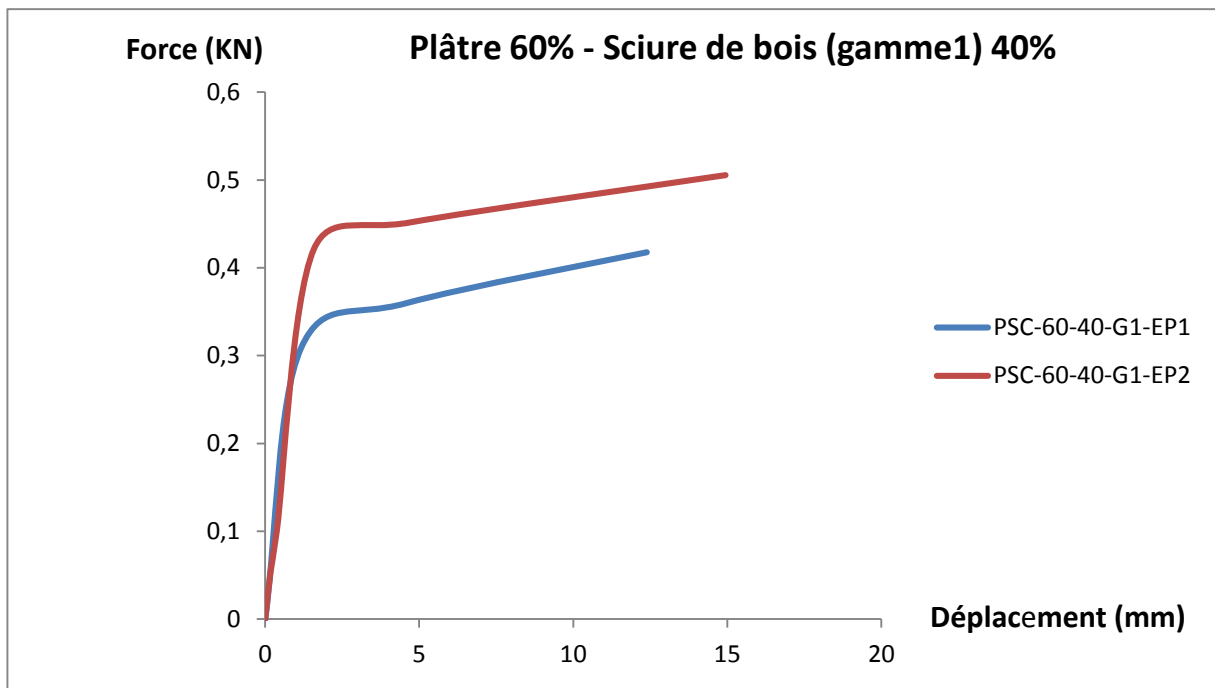


Figure IV.2 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme1) 40%.

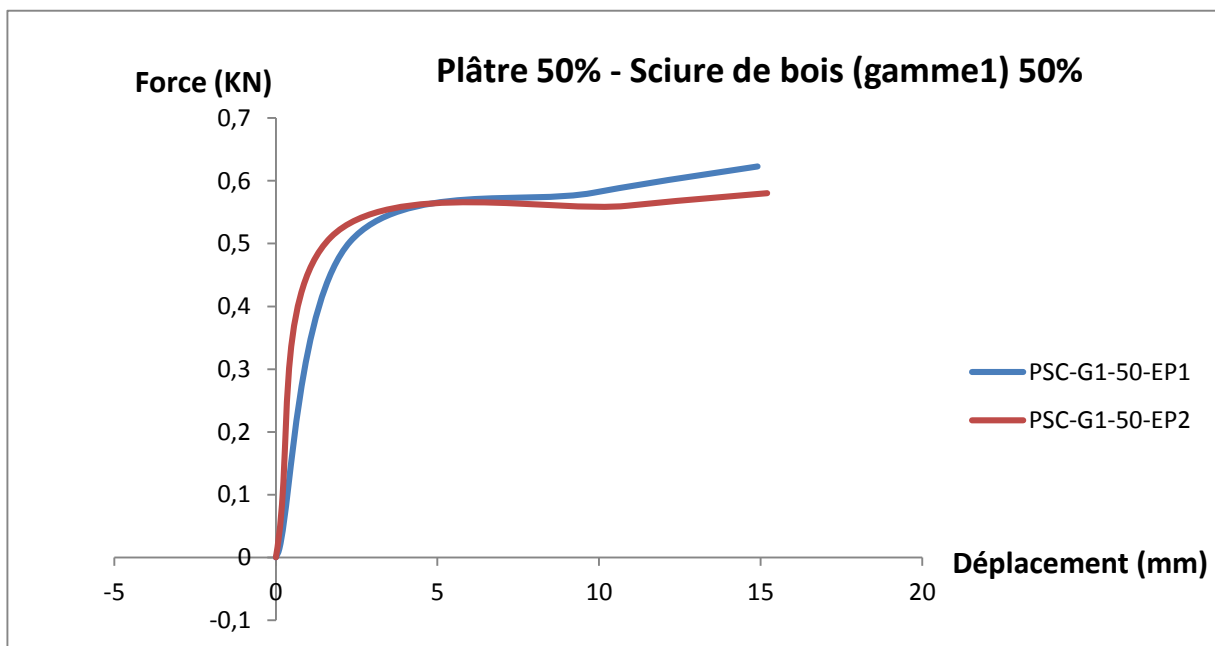


Figure IV.3 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme1) 50%.

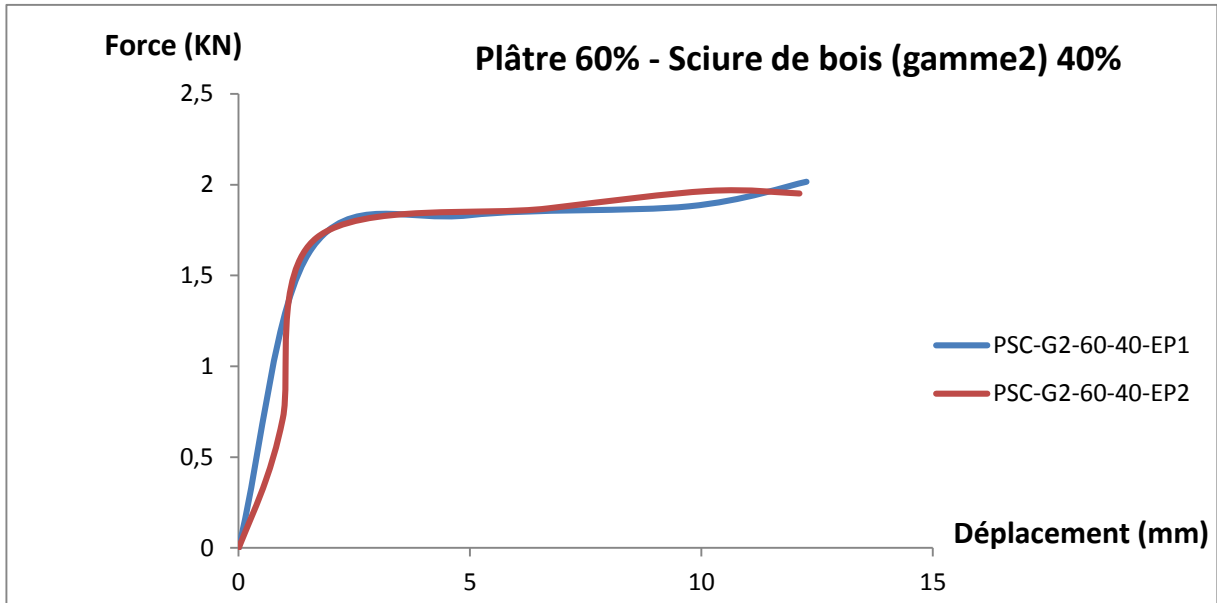


Figure IV.4 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme2) 40%.

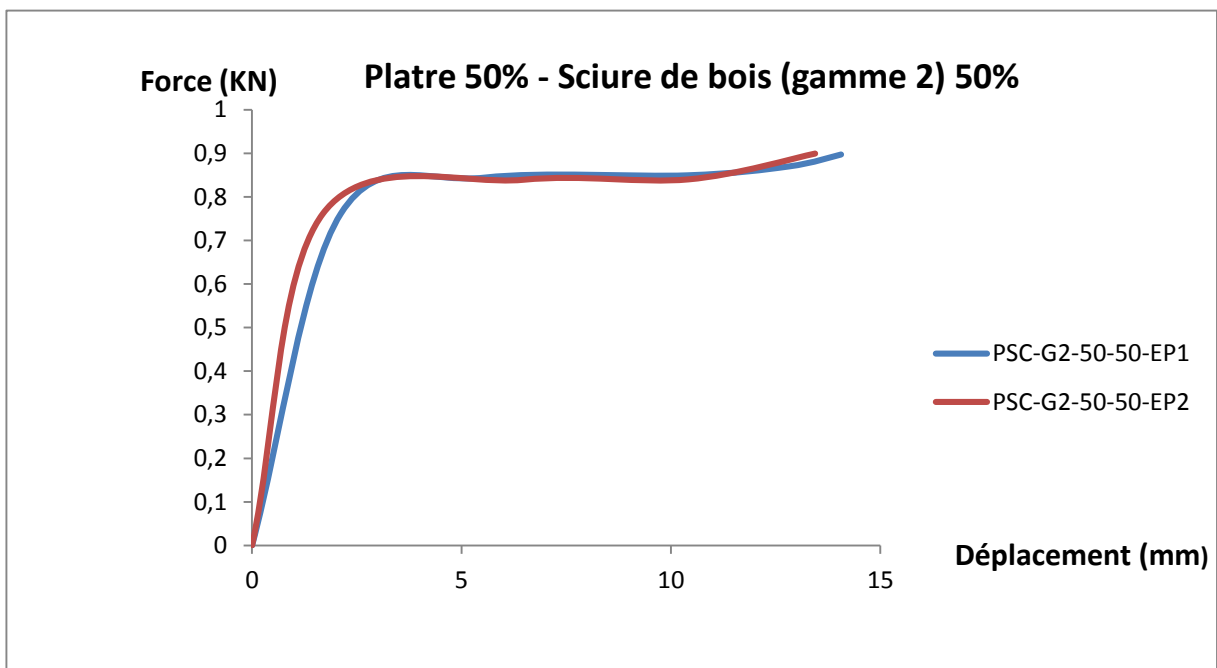


Figure IV.5 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme2) 50%.

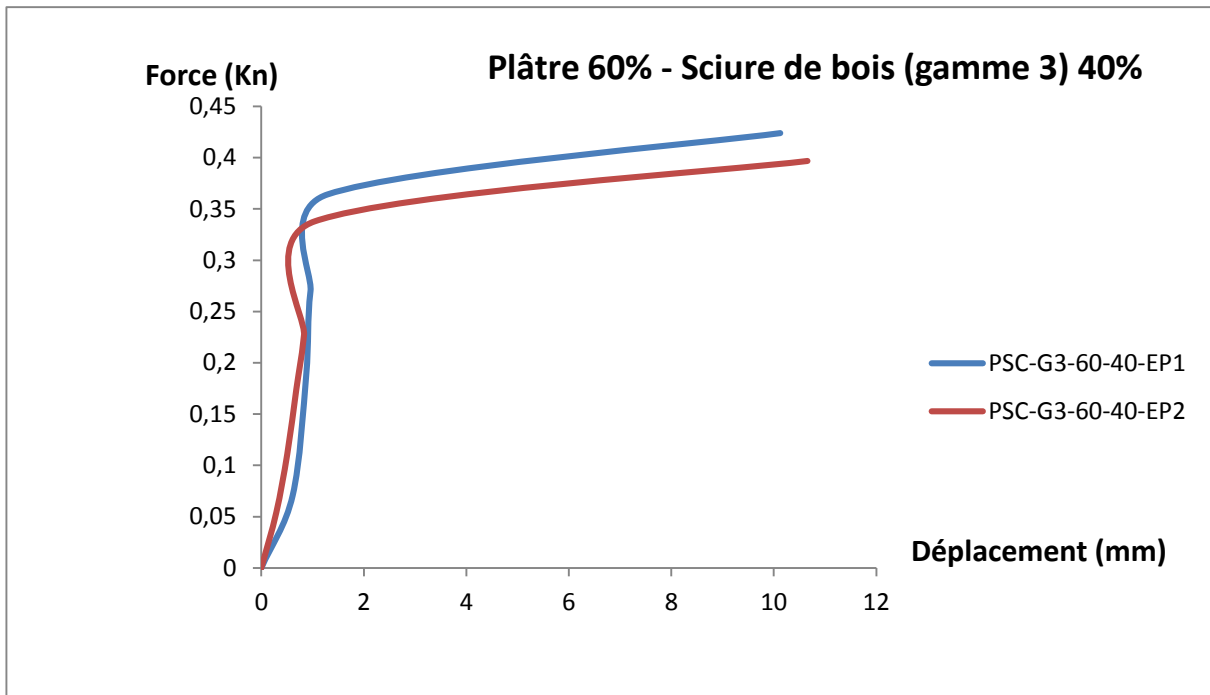


Figure IV.6 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme3) 40%.

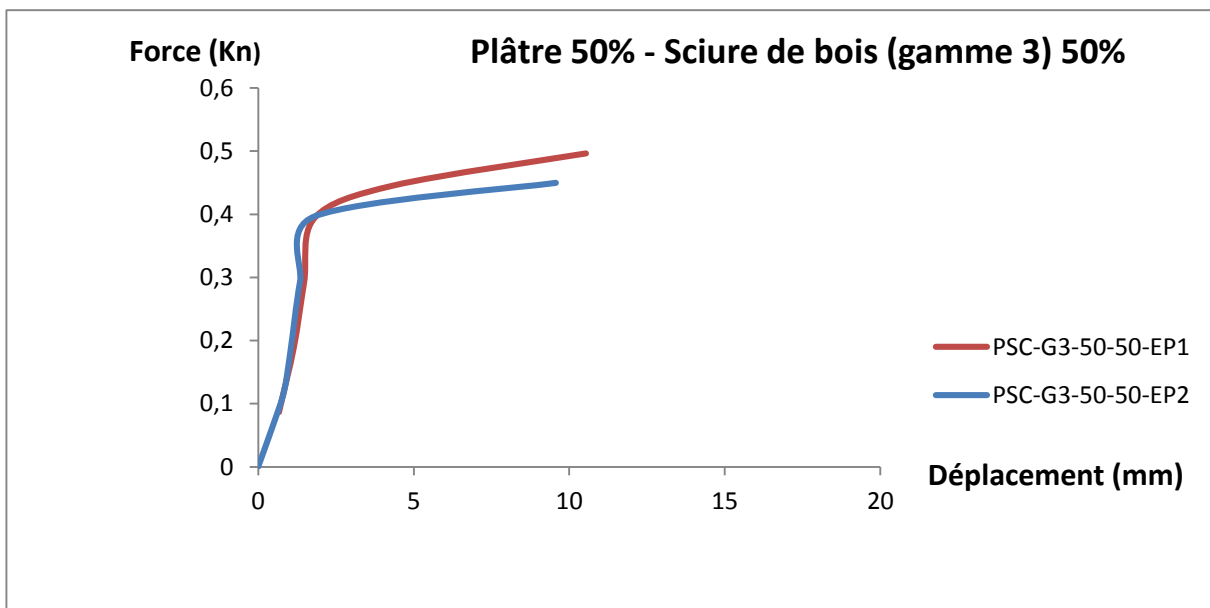


Figure IV.7 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme3) 50%.

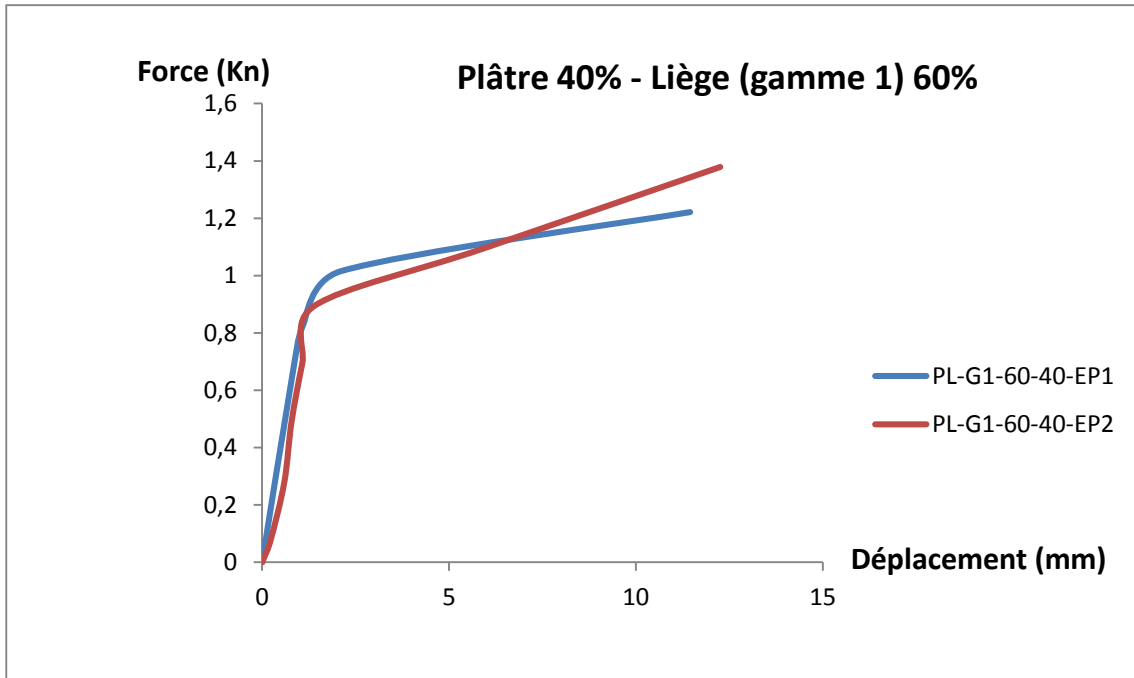


Figure IV.8 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 40% - Liège (gamme1) 60%.

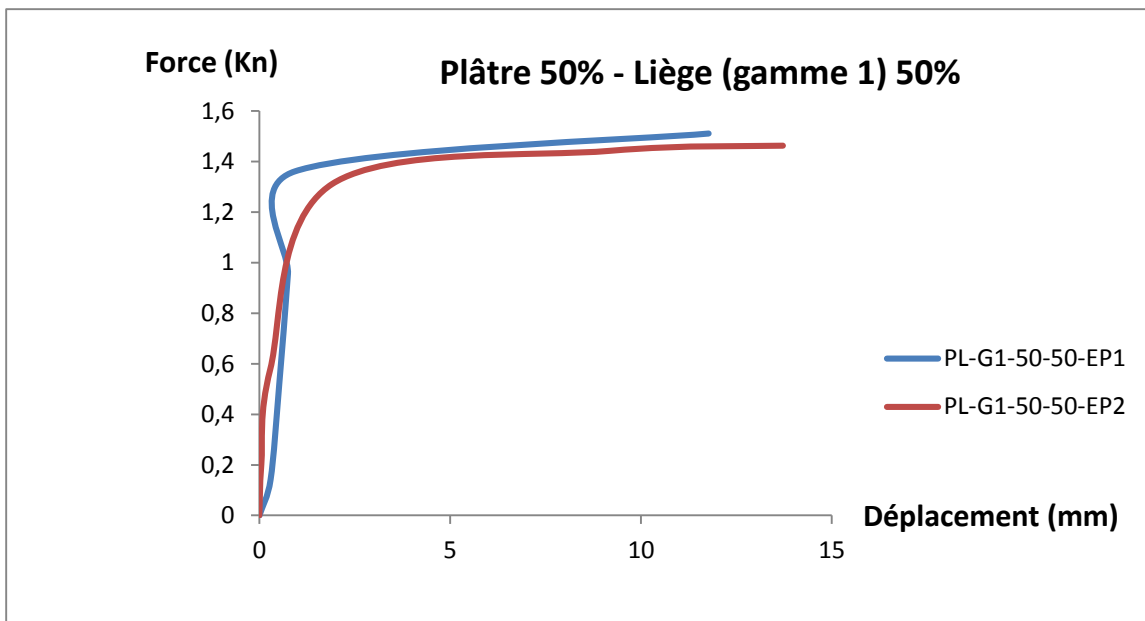


Figure IV.9 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 50% - Liège (gamme1) 50%.

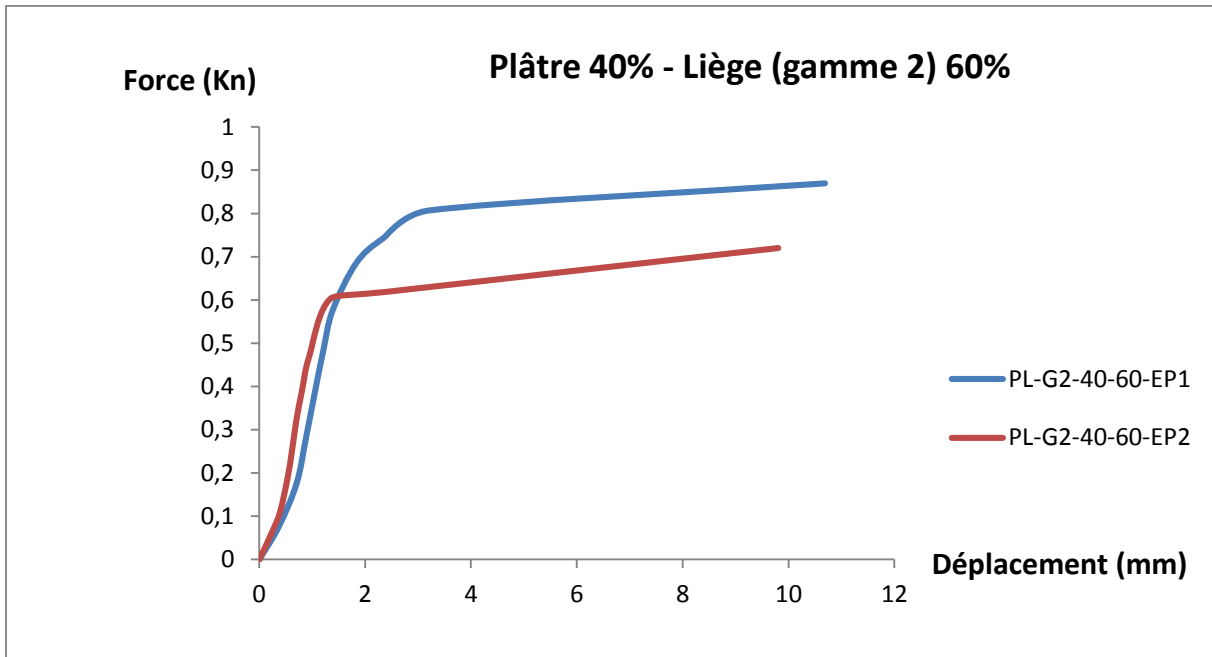


Figure IV.10 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 40% - Liège (gamme2) 60%.

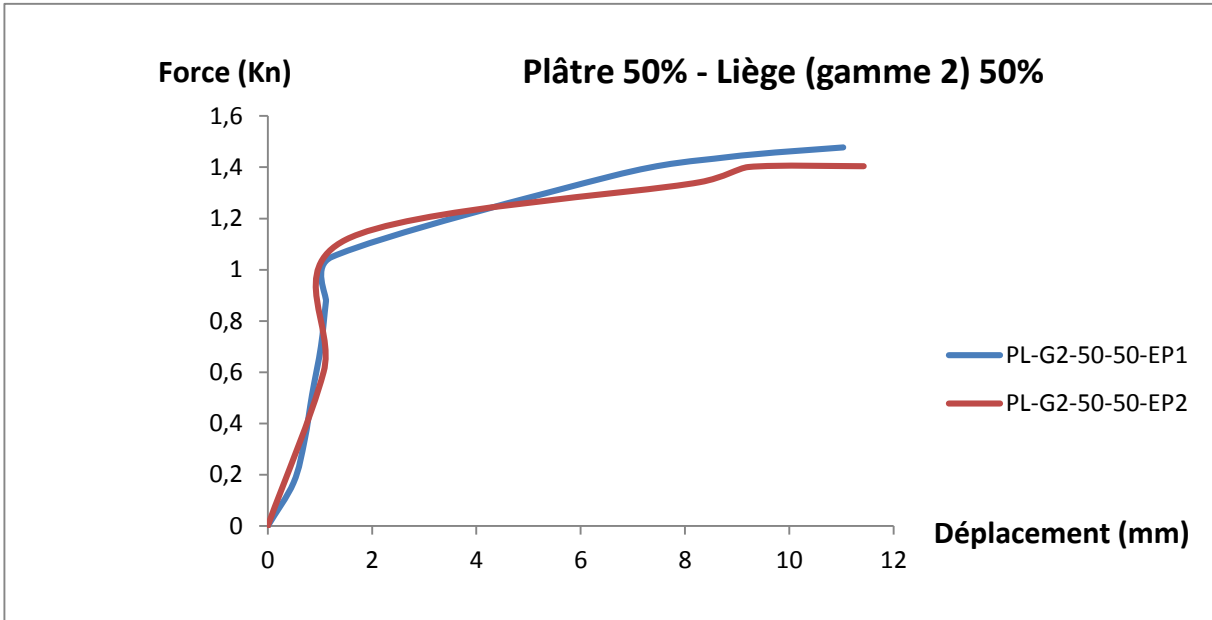


Figure IV.11 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 50% - Liège (gamme2) 50%.

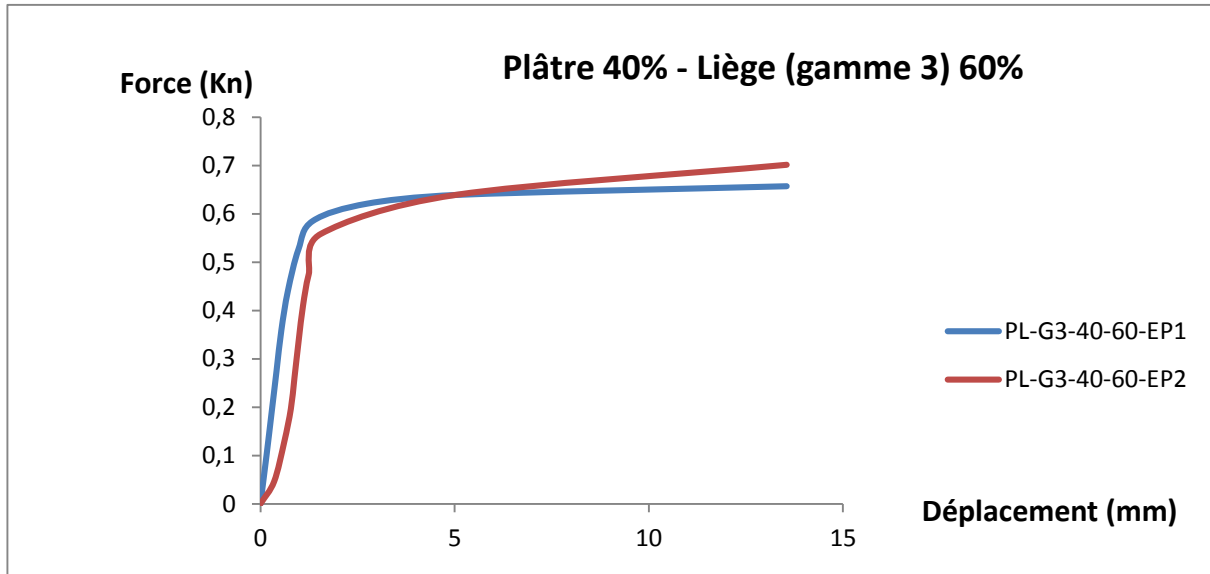


Figure IV.12 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes plâtre 40% - Liège (gamme3) 60%.

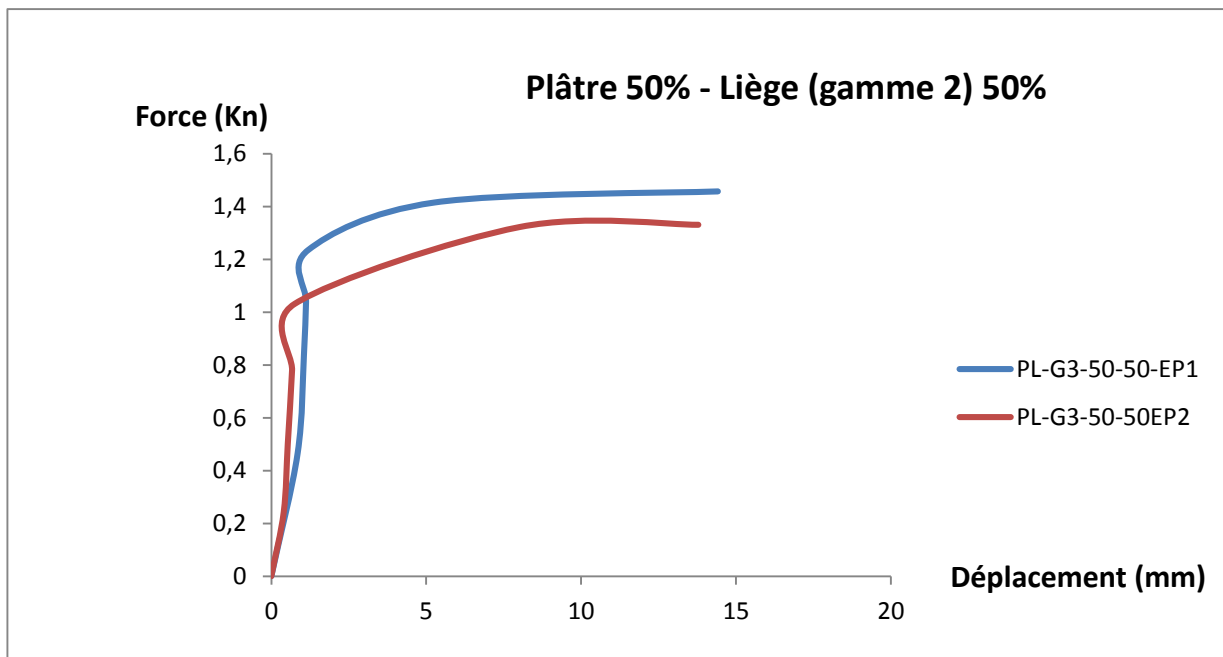


Figure IV.13 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes Variante : plâtre 50% - Liège (gamme3) 50%.

- L'analyse des différentes courbes montrées précédemment nous permet de conclure que toutes les éprouvettes, selon les différentes configurations (différentes variantes) présentent le même comportement et un mode de rupture identique de type fragile. La différence entre les valeurs limites de rupture est directement liée à la fraction du renfort utilisé.

- A titre indicatif, Les variantes **PSC 60%-40%-G2 ;1/2**, et **PSC 60%-40%-G2 ;2/2** présentent une résistance de **1,25 MPa** et **1,22 MPa** alors qu'elle est de **1,30** pour la variante de référence '**Plâtre témoin 1/2**' et de **1,22 MPa** pour '**Plâtre témoin 2/2**', respectivement. Par contre la masse passe de **326,5 g** à **170g** et de **324 g** à **162g**. on remarque donc que la résistance mécanique reste plus au moins constante alors que la masse diminue d'une manière importante de l'ordre de **50 – 53 %**.
- Pour les variantes renforcées par du liège, on remarque que les variantes **PL 50%-50%-G1,1/2**, **PL 50%-50%-G1,2/2**, **PL 50%-50%-G2,1/2** et **PL 50%-50%-G3,1/2** présentent une résistance presque identique égale à environ **0,90 MPa** . on peut donc conclure que la gamme utilisée n'a pas d'effet sur la résistance et sur la masse qui reste presque constante entre **134g- 150g**.

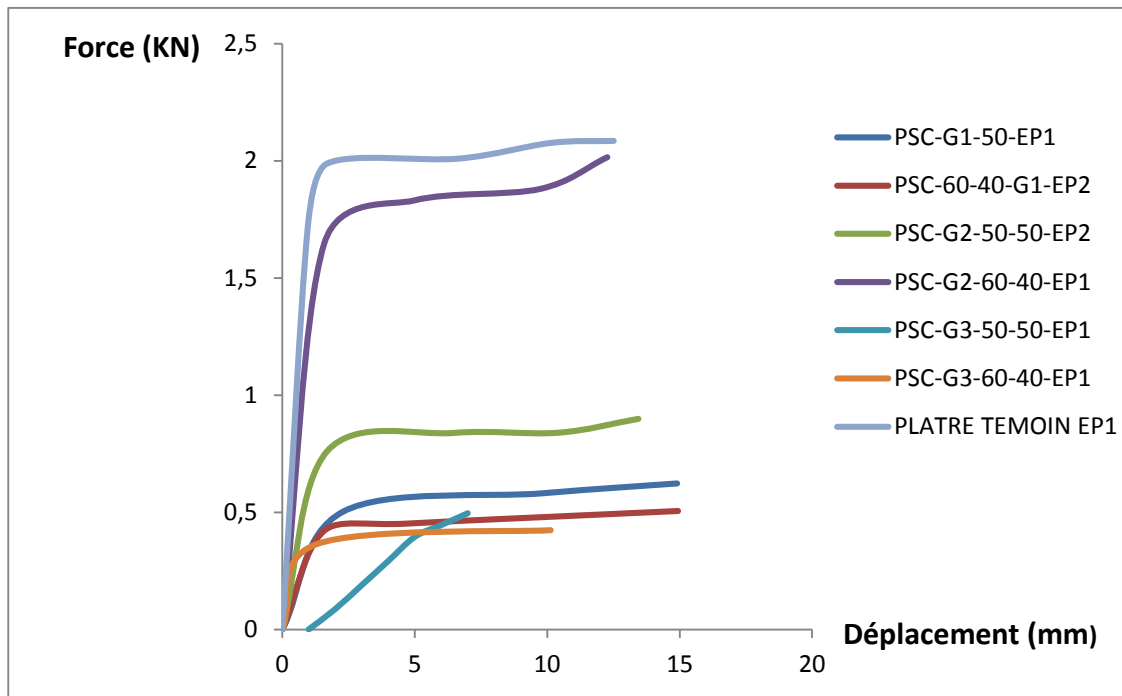


Figure IV.14 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes (Plâtre - Sciure de bois).

La comparaison des courbes Force-Déplacement (Plâtre-sciure de bois) montre que la meilleure variante est la variante plâtre 60% - Sciure de bois (gamme2) 40%, avec une force maximale de 2,01 KN.

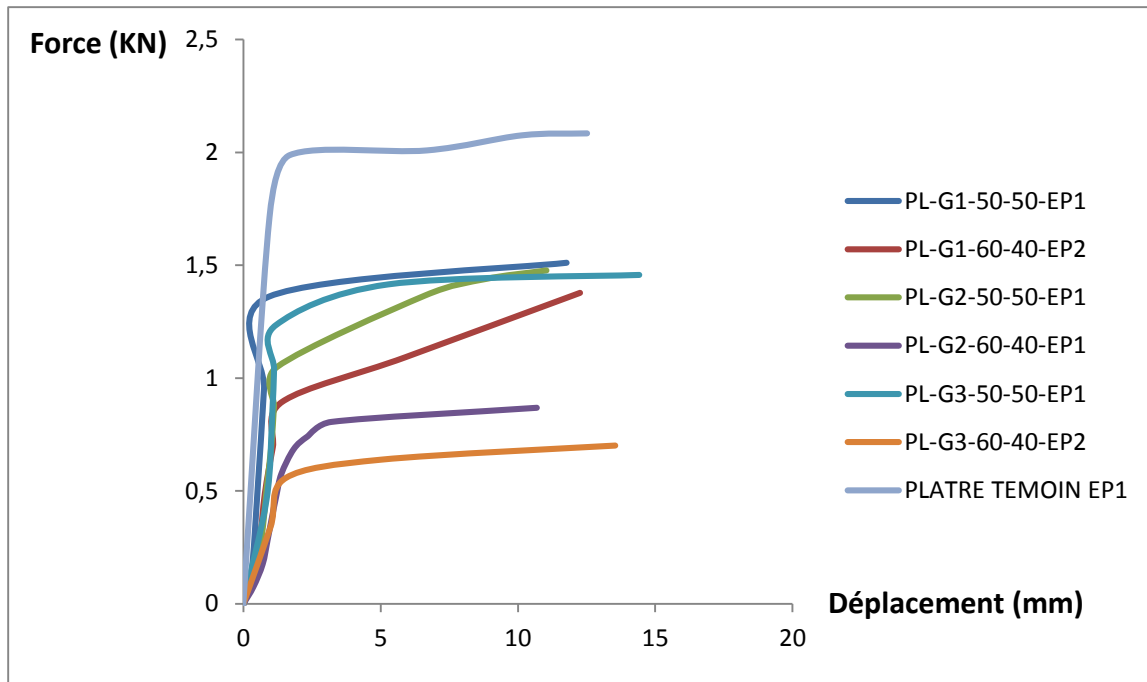


Figure IV.15 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes (Plâtre - liège).

La confrontation des courbes Force-Déplacement (Plâtre-Liège) montre que la meilleure variante est la variante plâtre 50% - Liège (gamme1) 50%, avec une force maximale de 1,51 KN.

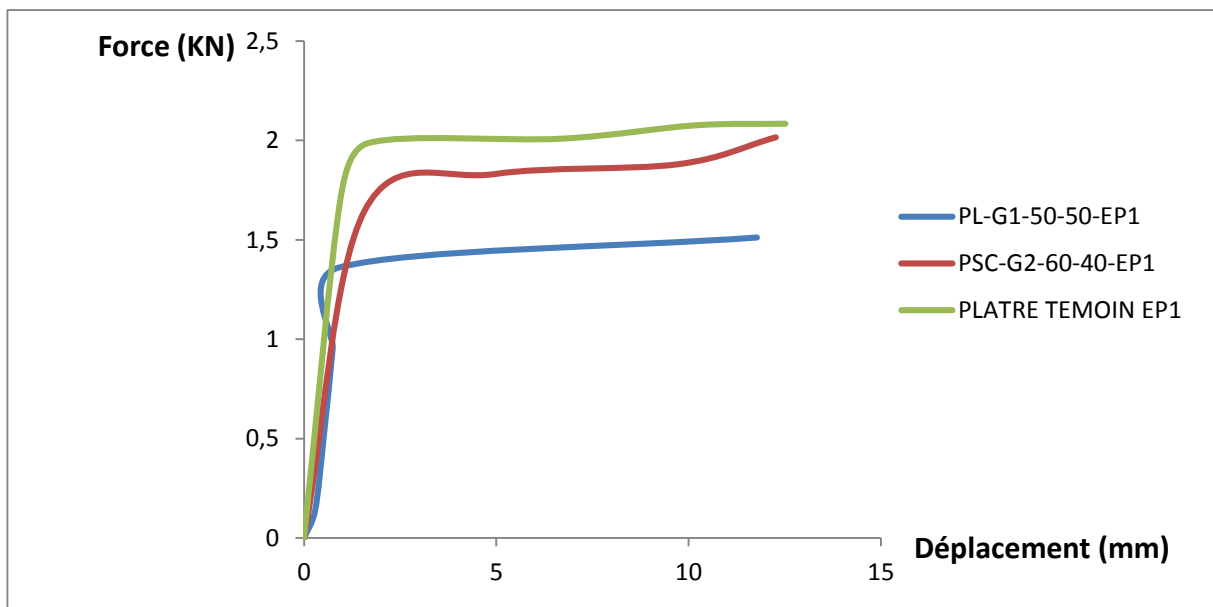


Figure IV.16 : Confrontation des courbes Force-déplacement des meilleures variantes (plâtre-sciure de bois) et (plâtre-liège).

➤ **Histogrammes :**

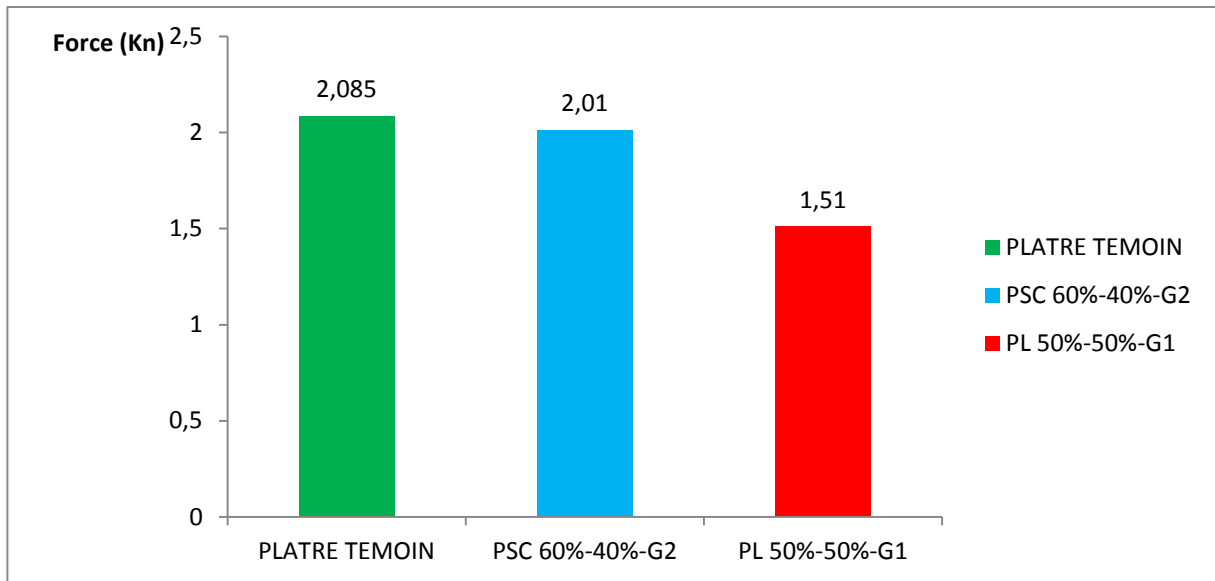


Figure IV.17: Histogramme des forces (Kn).

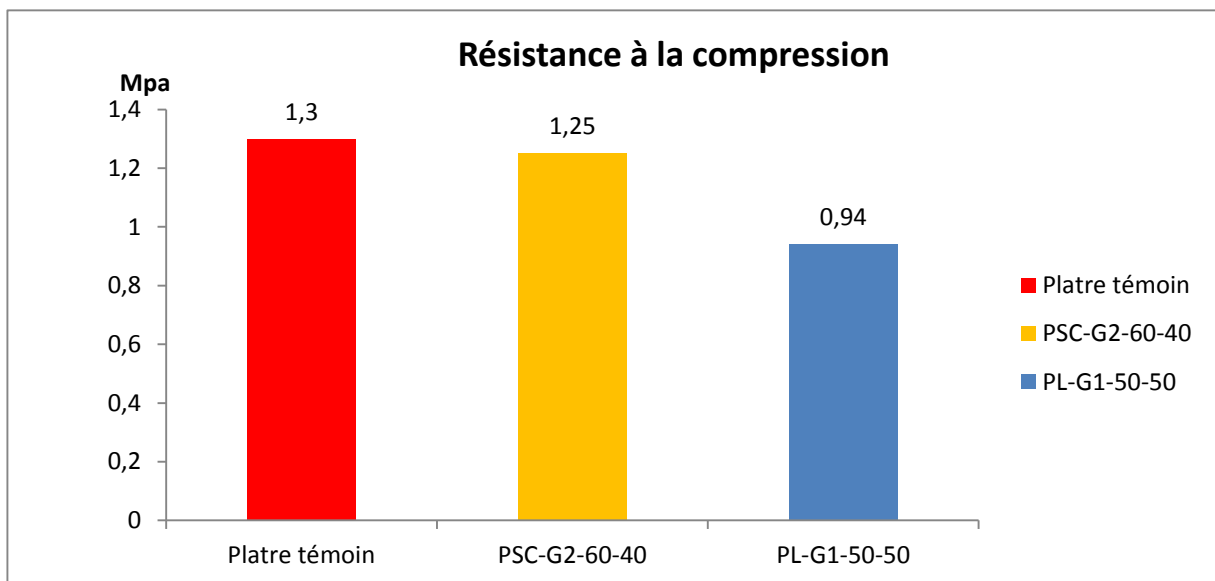


Figure IV.17' : Histogramme des résistances à la compression (Mpa).

D'après l'analyse des histogrammes et des courbes d'évolution de la résistance, on constate ce qui suit :

- La composition de l'éprouvette influence sur sa résistance.
- La meilleure résistance des éprouvettes en compression est donnée par la variante " **P lâtre – sciure de bois**" avec un taux de 60% de plâtre et 40% de la sciure de bois (gamme 2) 60%.

IV.2 Essais de flexion

➤ Présentation et interprétation des résultats des essais de flexion

Les résultats obtenus de ces essais nous ont permis de déterminer les forces de rupture pour chaque série d'éprouvettes est de tracer les courbes force-déplacement.

Tableau IV.2 : Résultats des essais de flexion.

Types d'éprouvettes	Masses des éprouvettes (g)	Force maximale (kN)	Résistance (MPa)	Mode de rupture
Plâtre témoin,1/2	325,5	0,20	0,109	Fragile
Plâtre témoin, 2/2	324,5	0,18	0,098	Fragile
PSC 60%-40%-G1,1/2	118	0,091	0,049	Fragile
PSC 60%-40%-G1,2/2	121	0,065	0,035	Fragile
PSC 50%-50%-G1,1/2	112	0,034	0,018	Fragile
PSC 50%-50%-G1,2/2	100	0,027	0,014	Fragile
PSC 60%-40%-G2,1/2	168	0,21	0,115	Fragile
PSC 60%-40%-G2,2/2	164	0,19	0,103	Fragile
PSC 50%-50%-G2,1/2	140,5	0,026	0,014	Fragile
PSC 50%-50%-G2,2/2	139,5	0,021	0,011	Fragile
PSC 60%-40%-G3,1/2	123	0,066	0,036	Fragile
PSC 60%-40%-G3,2/2	120,5	0,068	0,037	Fragile
PSC 50%-50%-G3,1/2	195	0,087	0,047	Fragile
PSC 50%-50%-G3,2/2	198	0,041	0,022	Fragile
PL 40%-60%-G1,1/2	186	0,065	0,035	Fragile
PL 40%-60%-G1,2/2	181	0,061	0,033	Fragile
PL 50%-50%-G1,1/2	134,5	0,19	0,103	Fragile
PL 50%-50%-G1,2/2	131	0,15	0,082	Fragile
PL 40%-60%-G2,1/2	163	0,13	0,071	Fragile
PL 40%-60%-G2,2/2	164,5	0,14	0,076	Fragile
PL 50%-50%-G2,1/2	152,5	0,15	0,082	Fragile
PL 50%-50%-G2,2/2	149,5	0,14	0,076	Fragile
PL 40%-60%-G3,1/2	189	0,12	0,065	Fragile
PL 40%-60%-G3,2/2	188,5	0,018	0,010	Fragile
PL 50%-50%-G3,1/2	135	0,17	0,092	Fragile
PL 50%-50%-G3,2/2	133	0,16	0,087	Fragile

➤ Courbes force-déplacement des différentes éprouvettes

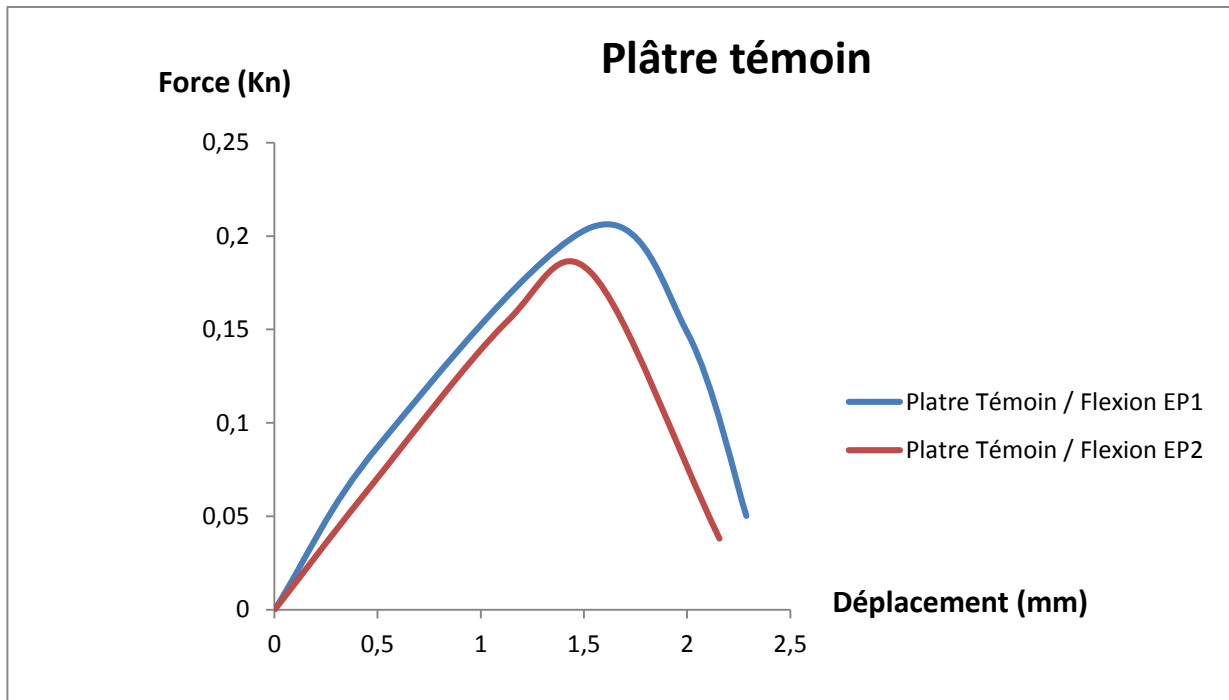


Figure IV.18 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante de référence : témoin en plâtre.

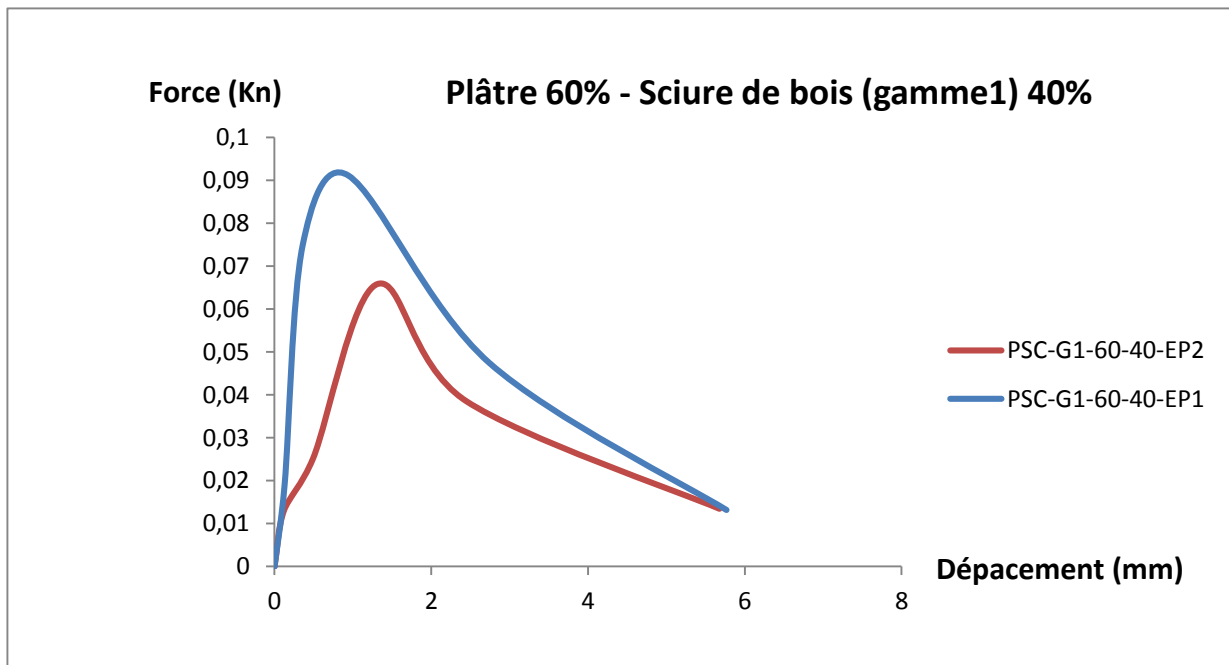


Figure IV.19 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme1) 40%.

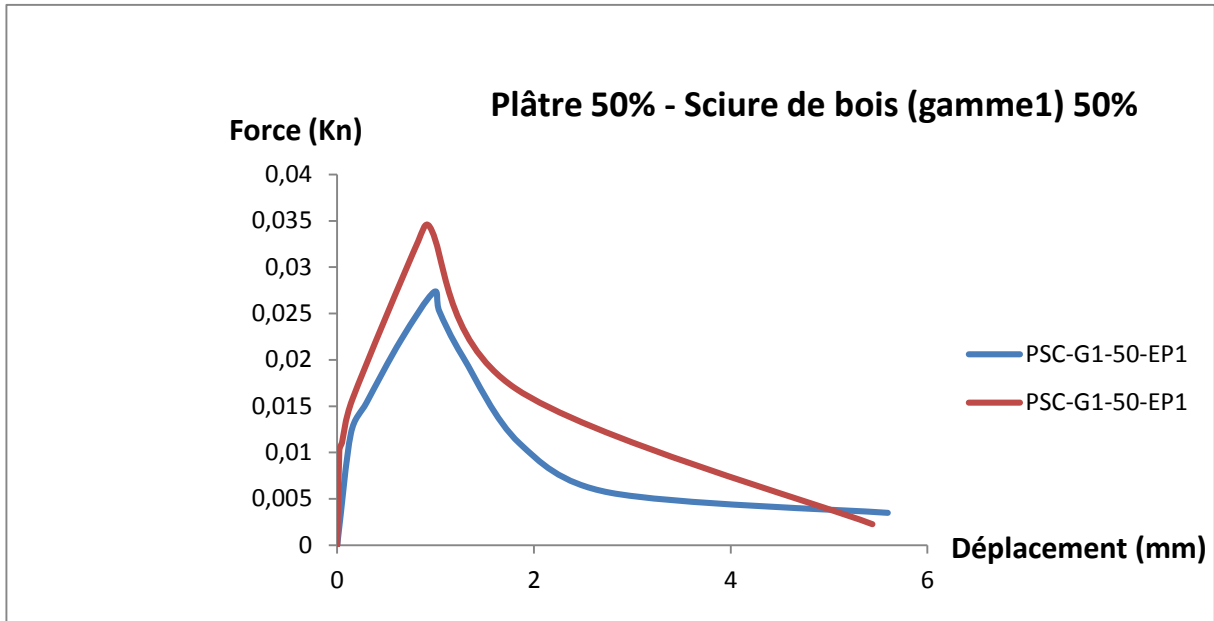


Figure IV.20 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme1) 50%.

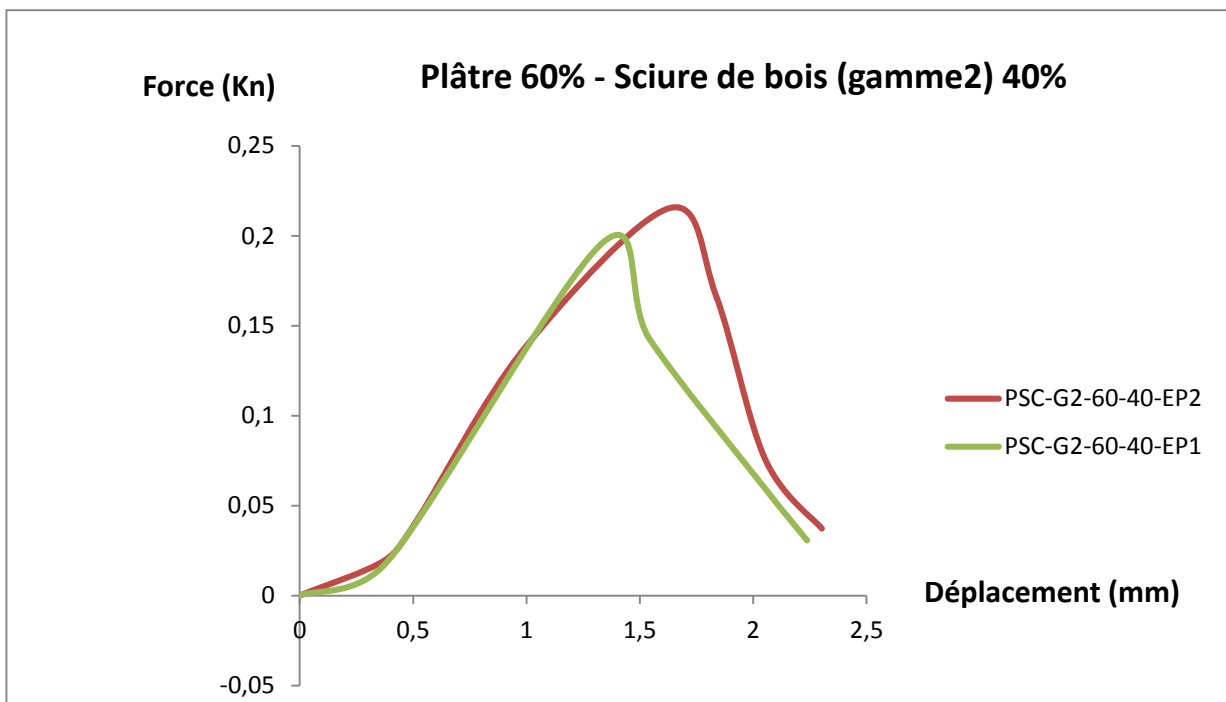


Figure IV.21 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme2) 40%.

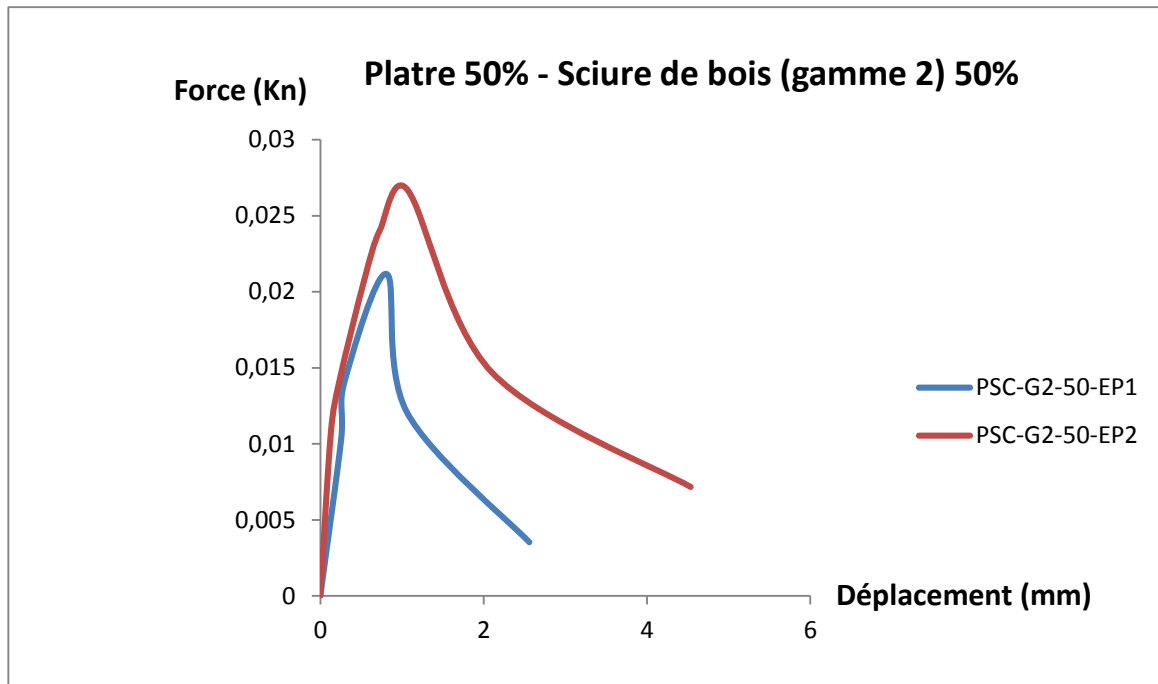


Figure IV.22 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme2) 50%.

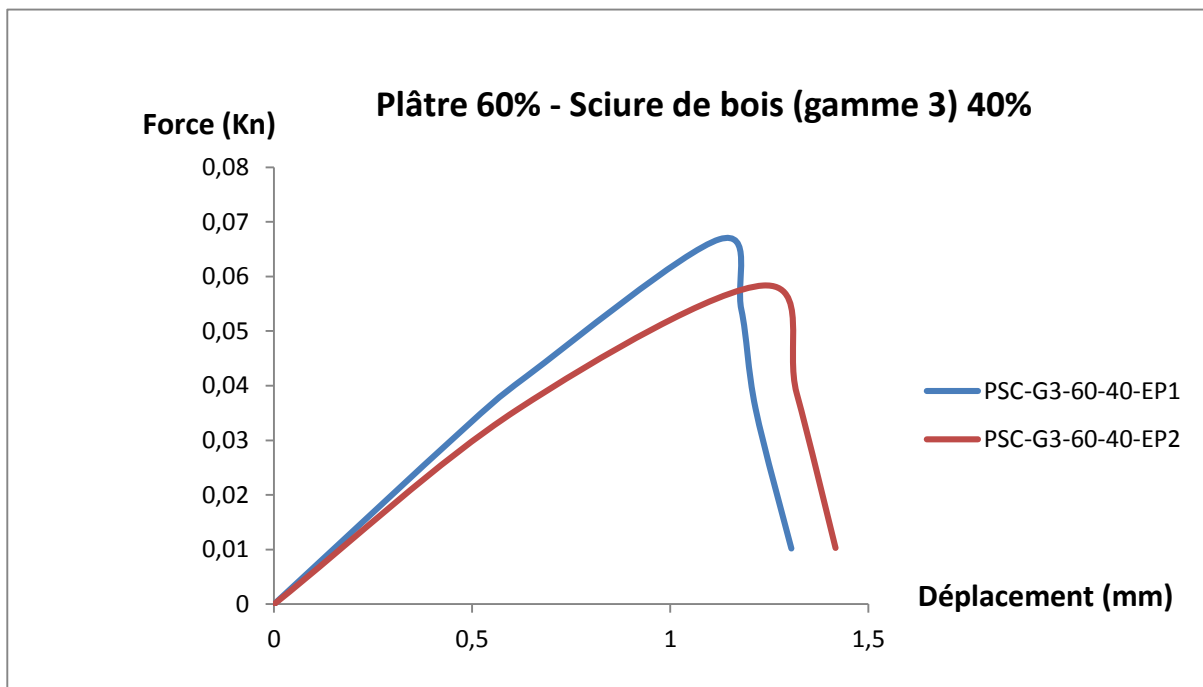


Figure IV.23 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 60% - Sciure de bois (gamme3) 40%.

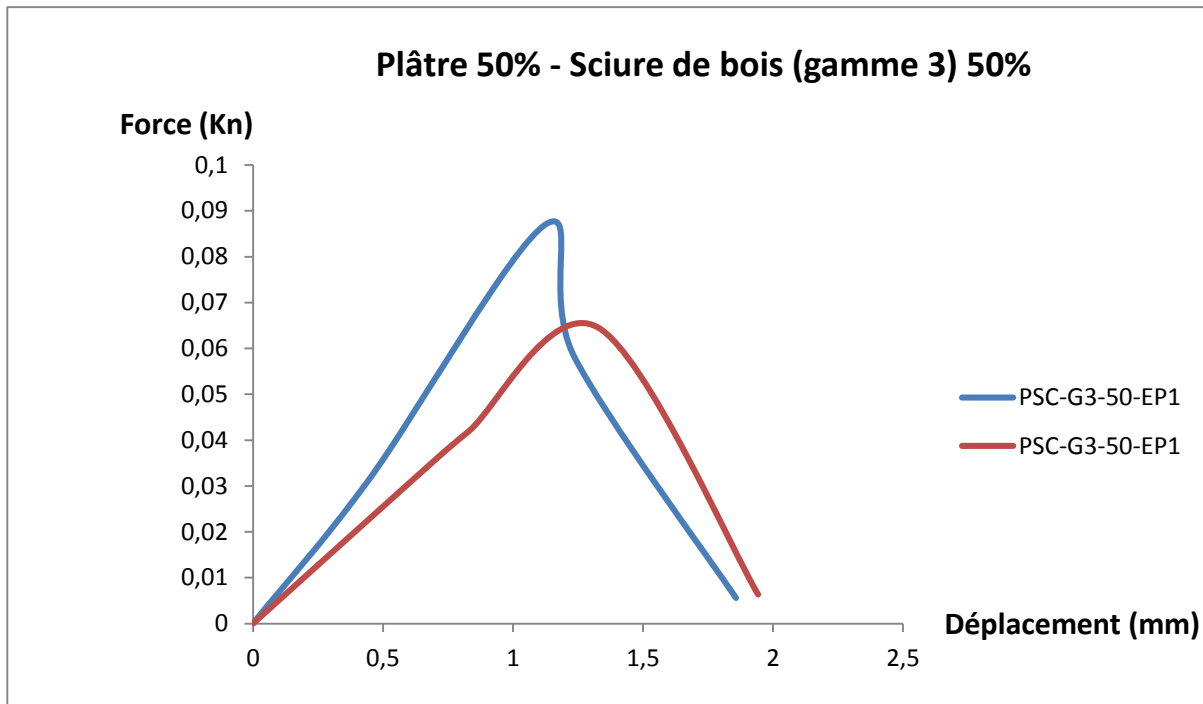


Figure IV.24 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 50% - Sciure de bois (gamme3) 50%.

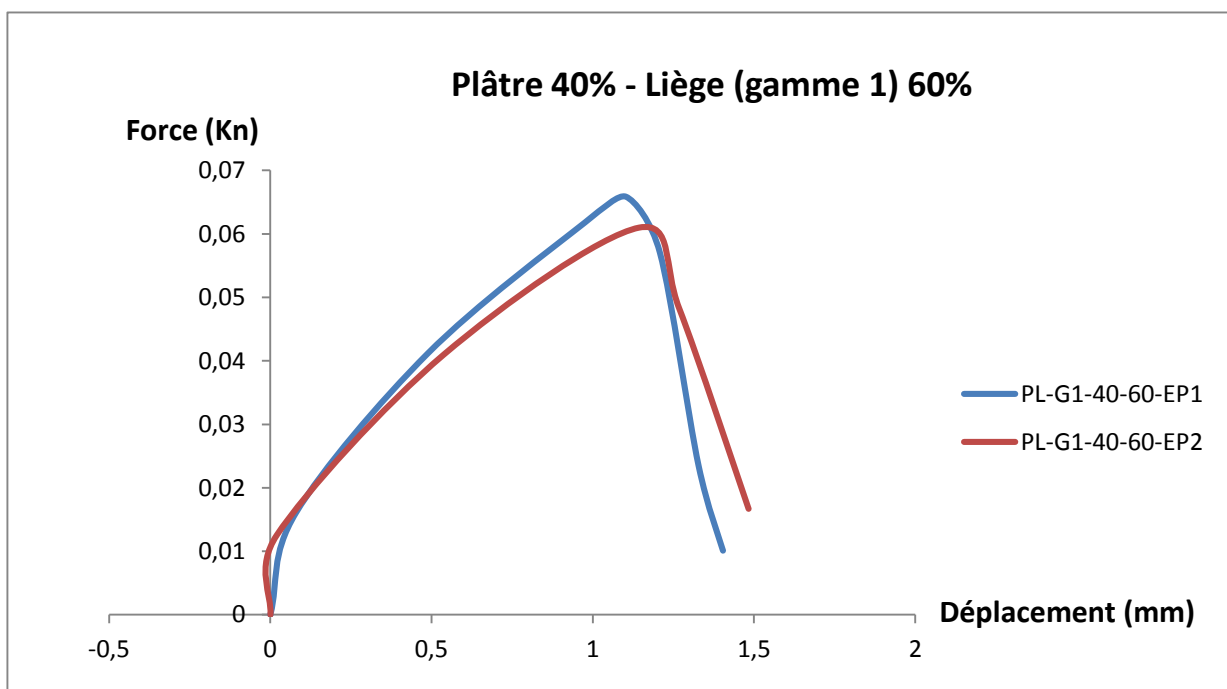


Figure IV.25 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 40% - Liège (gamme1) 60%.

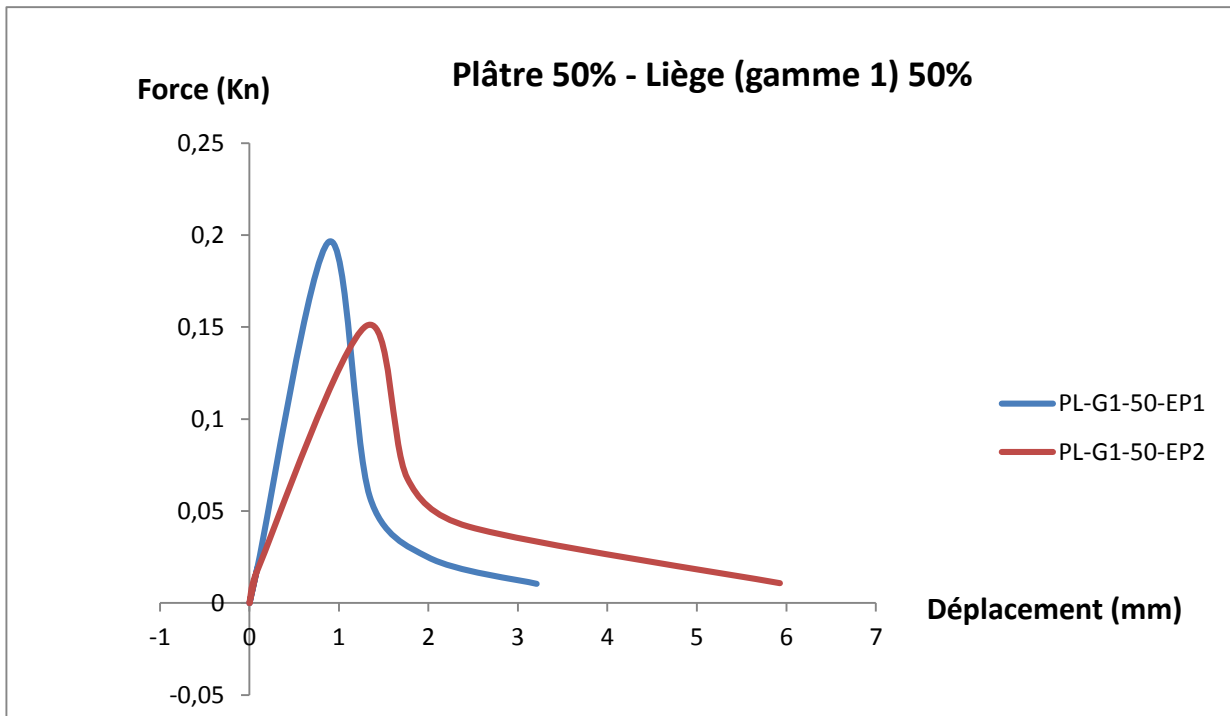


Figure IV.26 : Confrontation des courbes Force-déplacement des échantillons
Variante : plâtre 50% - Liège (gamme1) 50%.

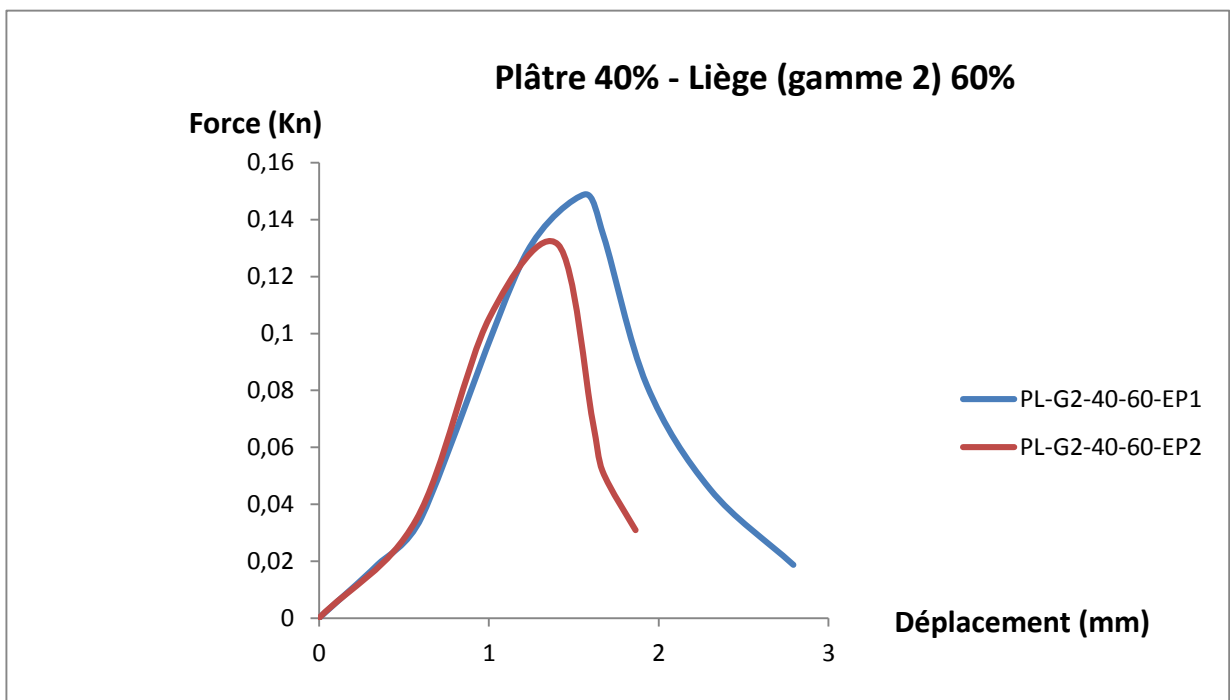


Figure IV.27 : Confrontation des courbes Force-déplacement des échantillons
Variante : plâtre 40% - Liège (gamme2) 60%.

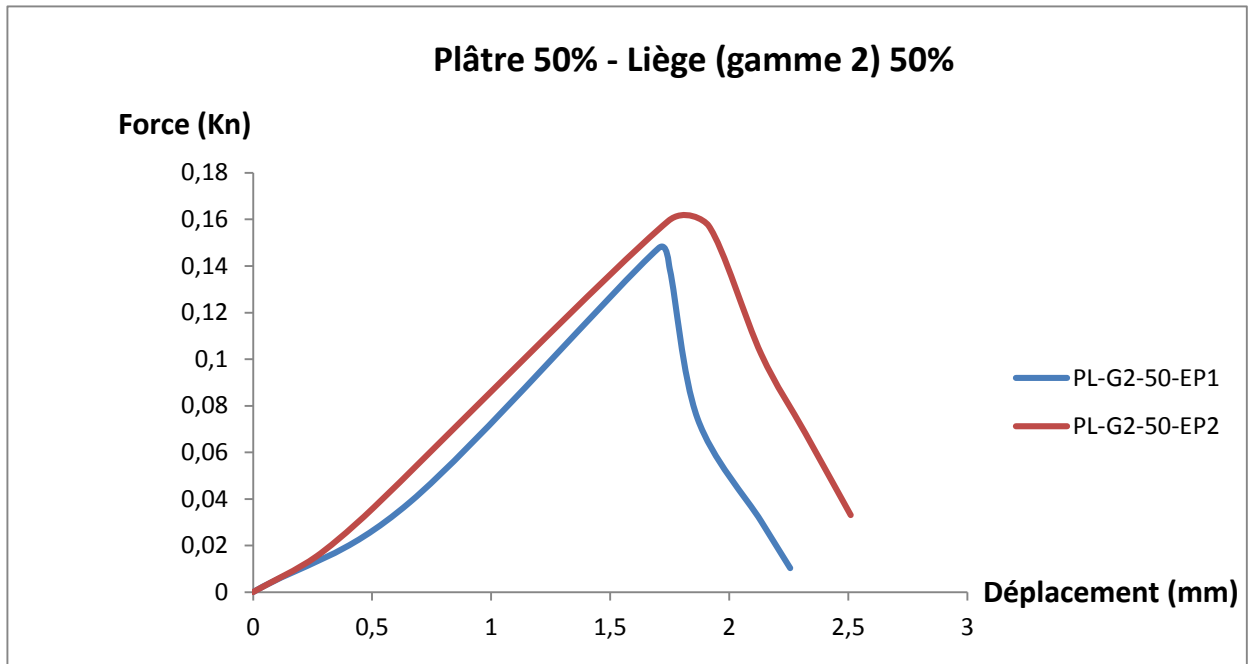


Figure IV.28 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 50% - Liège (gamme2) 50%.

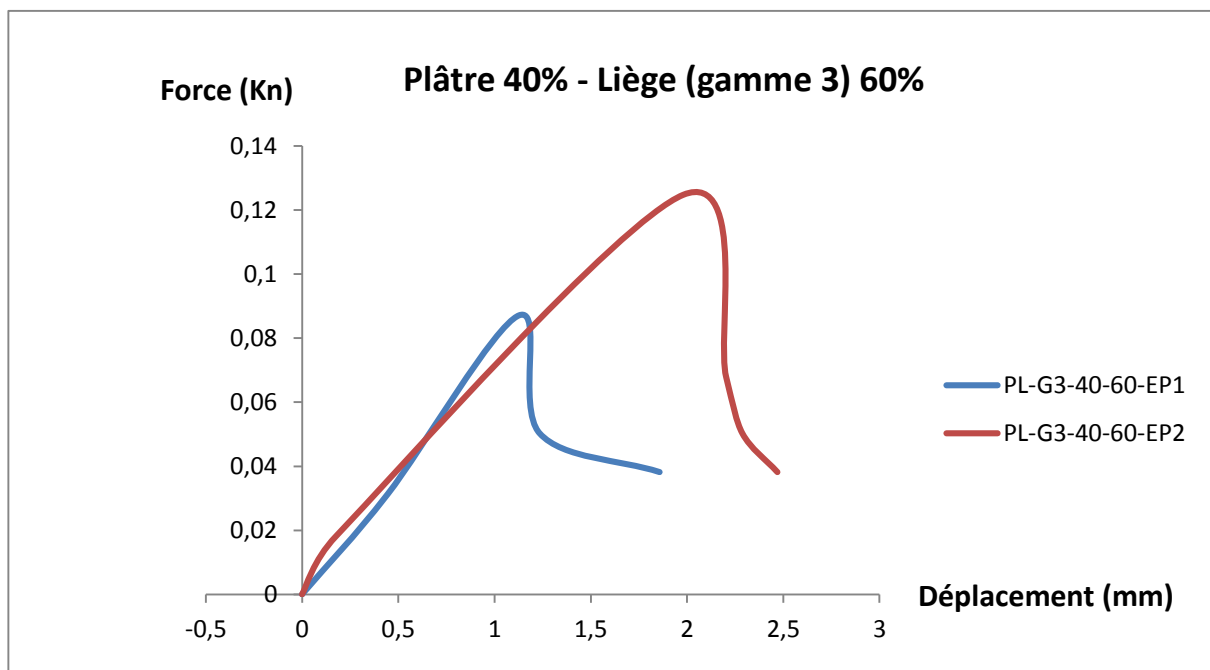


Figure IV.29 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 40% - Liège (gamme3) 60%.

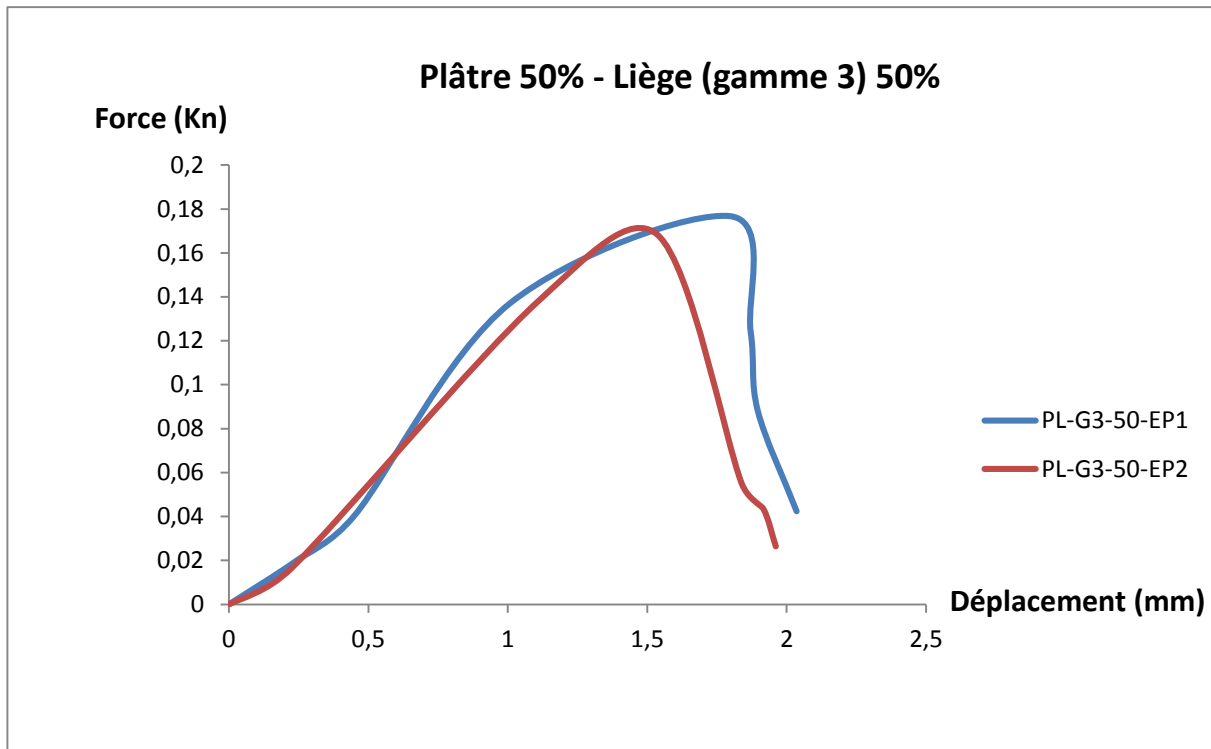


Figure IV.30 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes
Variante : plâtre 50% - Liège (gamme3) 50%.

- Toutes les courbes présentent un comportement quasi-linéaire qui se caractérise par une valeur maximale au pic, suivi d'une chute de chargement, d'où le comportement élastique de ces éprouvettes et qui ne comportent pas de domaine plastique.
- L'analyse des différentes courbes montrées précédemment nous permet de conclure que le mode de rupture des éprouvettes testées sous un effort de flexion est fragile pour toutes les variantes.
- Les variantes **PSC 60%-40%-G2 ;1/2**, et **PSC 60%-40%-G2 ;2/2** présentent une résistance de **0,115 MPa** et **0,103 MPa** alors qu'elle est de **0,109** pour la variante de référence 'Plâtre témoin 1/2' et de **0,098 MPa** pour 'Plâtre témoin 2/2', respectivement. Par contre la masse passe de **325,5 g** à **170g** et de **324,5 g** à **164g**. on remarque ici comme en compression que la résistance mécanique reste plus au moins constante alors que la masse diminue d'une manière importante de l'ordre de **50 – 53 %**
- Pour les variantes renforcées par du liège, on remarque que les variantes **PL 50%-50%-G1,1/2**, **PL 50%-50%-G1,2/2**, **PL 50%-50%-G2,1/2** et **PL 50%-50%-G3,1/2** présentent une résistance presque identique égale à environ **0,082 MPa** . on peut donc conclure ici comme en compression que la gamme utilisée n'a pas d'effet sur la résistance et sur la masse qui reste presque constante entre **131g- 134,5g**.

- En prenant la meilleure des deux variantes d'éprouvettes testées de chaque graphe, la confrontation des courbes sont illustrés dans les figures suivantes :

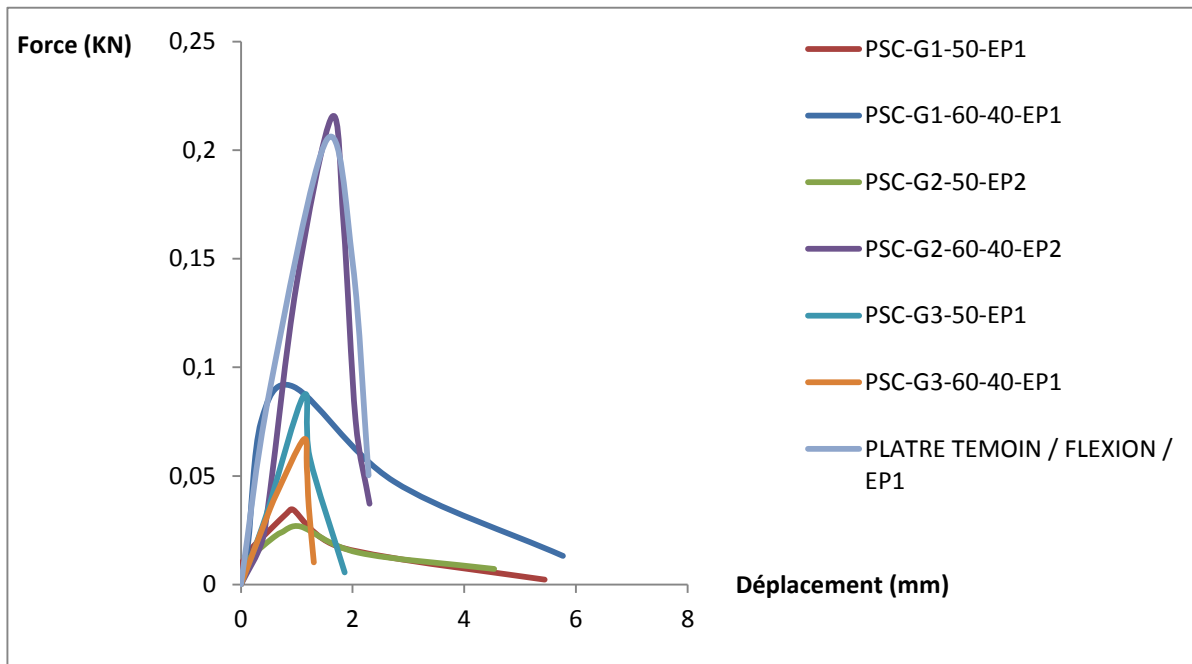


Figure IV.31 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes (Plâtre - Sciure de bois).

La confrontation des courbes Force-Déplacement (Plâtre-Sciure de bois) montre que la meilleure variante est la variante plâtre 60% - Sciure de bois (gamme2) 40%, avec une force maximale de 0,21 KN.

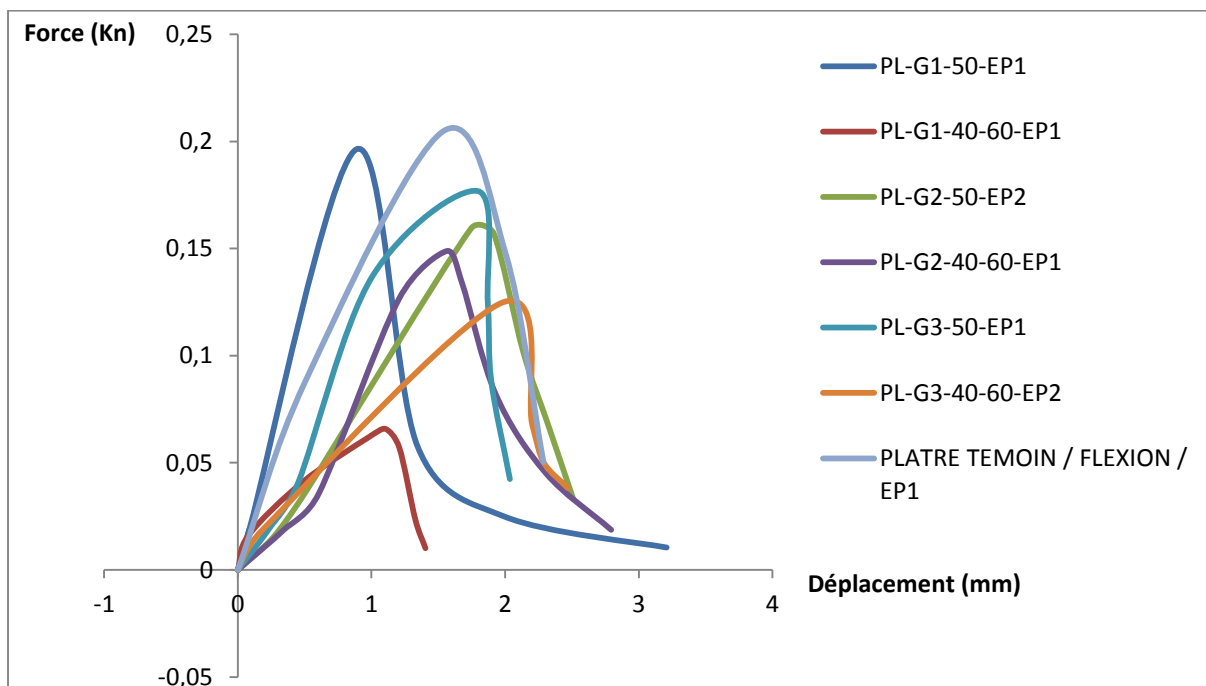


Figure IV.32 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes (Plâtre - liège).

La confrontation des courbes Force-Déplacement (Plâtre-Liège) montre que la meilleure variante est la variante plâtre 50% - Liège (gamme1) 50%, avec une force maximale de 0,19 KN.

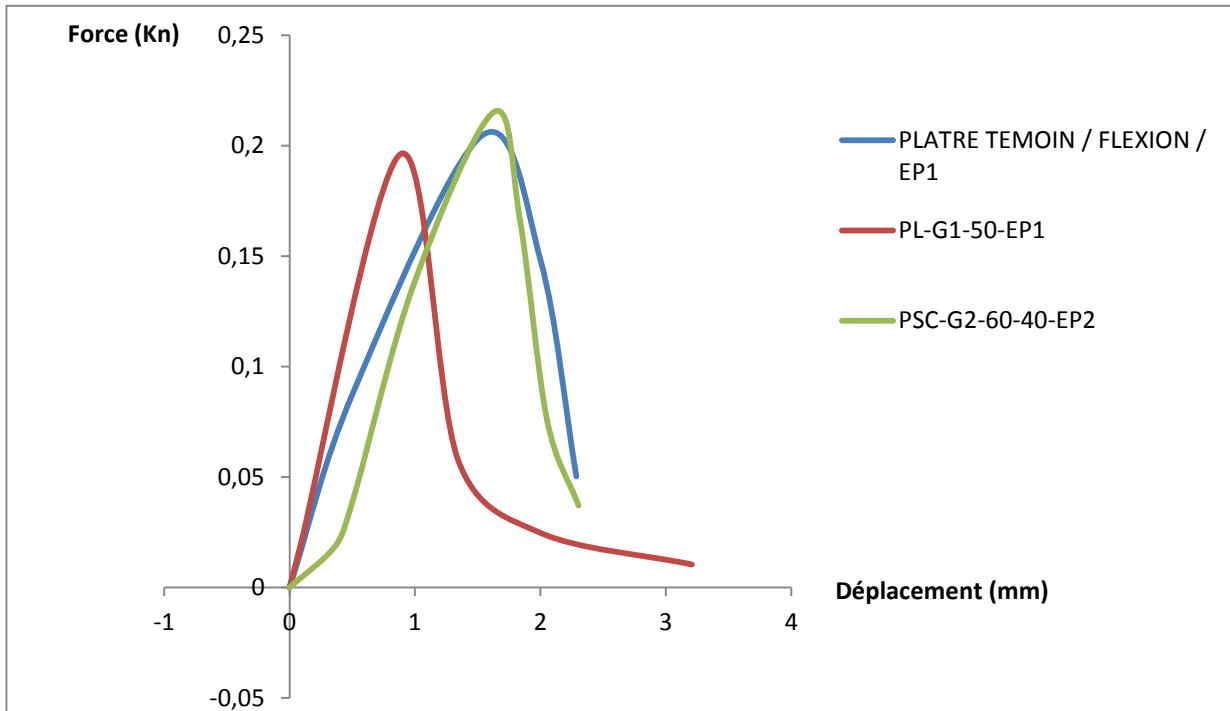


Figure IV.33 : Confrontation des courbes Force-déplacement des éprouvettes (plâtre-sciure de bois) et (plâtre-liège).

➤ Histogrammes

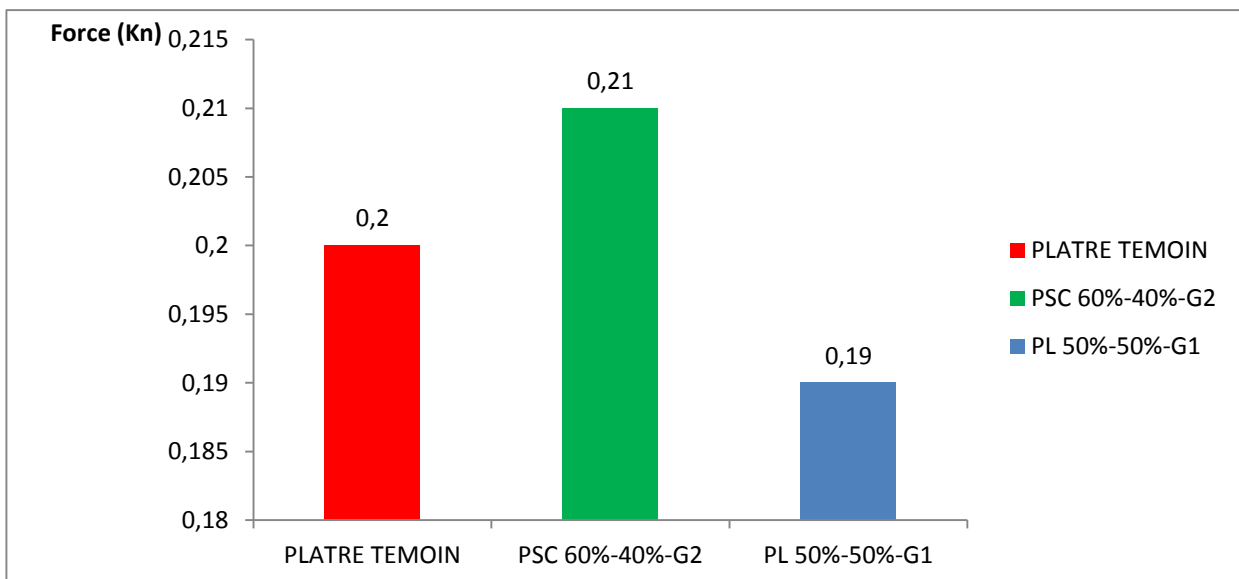


Figure IV.34: Histogramme des forces (KN).

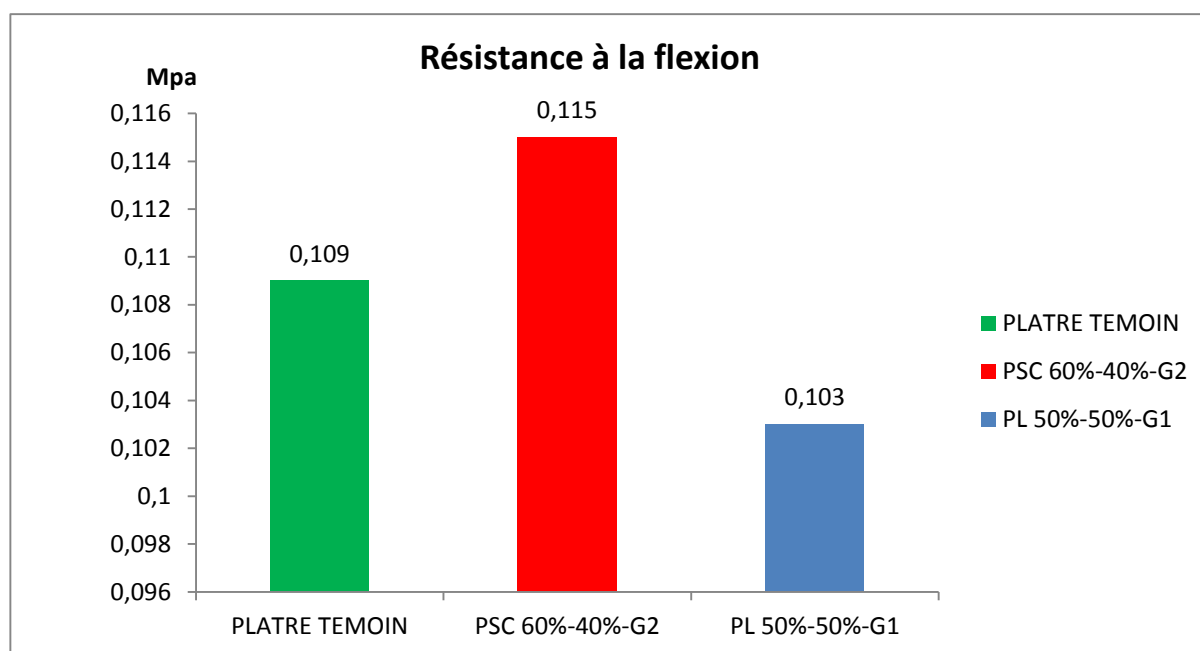
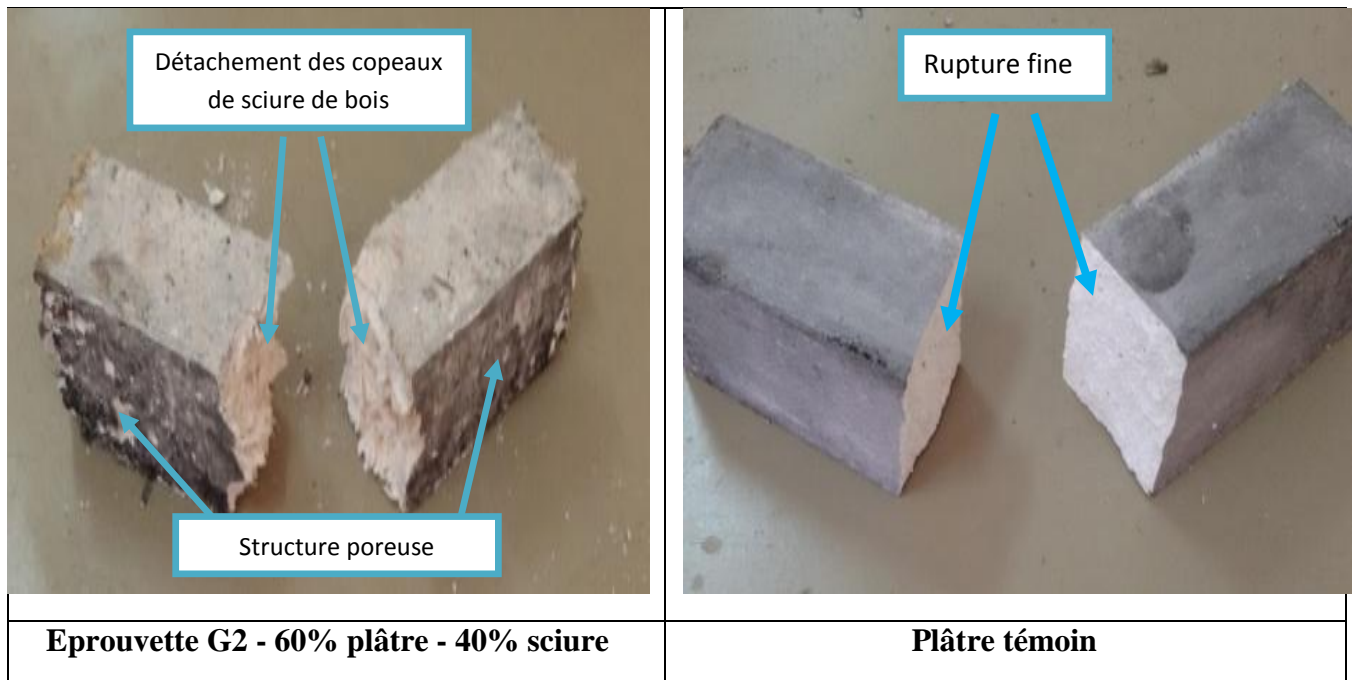


Figure IV.34' : Histogramme de résistance à la flexion (Mpa).

D'après les histogrammes et la courbe d'évolution de la résistance, on constate ce qui suit :

- L'influence des types de charge sur le comportement des éprouvettes est observée par la valeur de la résistance ultime au pic, en effet la variante "**Plâtre - sciure de bois**" avec **un taux de 60% de plâtre et 40% de la sciure de bois (gamme 2) 60%** a donné le meilleur résultat ; une résistance ultime de **0,115 MPa**. Les autres éprouvettes ont donné des résistances inférieures, ce qui nous permet de conclure que la fraction optimale pour avoir une bonne résistance est celle de 40% de sciure de bois.
- On remarque que les pentes des courbes 'force et déplacement' des éprouvettes sont presque identiques, malgré la présence de quelques disparités au niveau de la capacité portante des éprouvettes. Mais, cette variation de la capacité portante est notable parmi les éprouvettes testées, du fait de la variation des gammes et des pourcentages des matériaux composant le composite.
- On déduit de ces courbes que le volume de liège et de la sciure de bois avec leurs différentes variantes dans les éprouvettes influe sur la résistance et la déformabilité du composite en flexion.

➤ **Modes de rupture**



- Les mécanismes de rupture des éprouvettes sont similaires ; une fissure apparaît dans la zone tendue qui tend à se propager rapidement vers la zone comprimée, induisant la rupture de l'éprouvette en deux parties comme montré sur la Figure des modes de rupture.
- La rupture est survenue par un détachement des copeaux de sciure de bois.

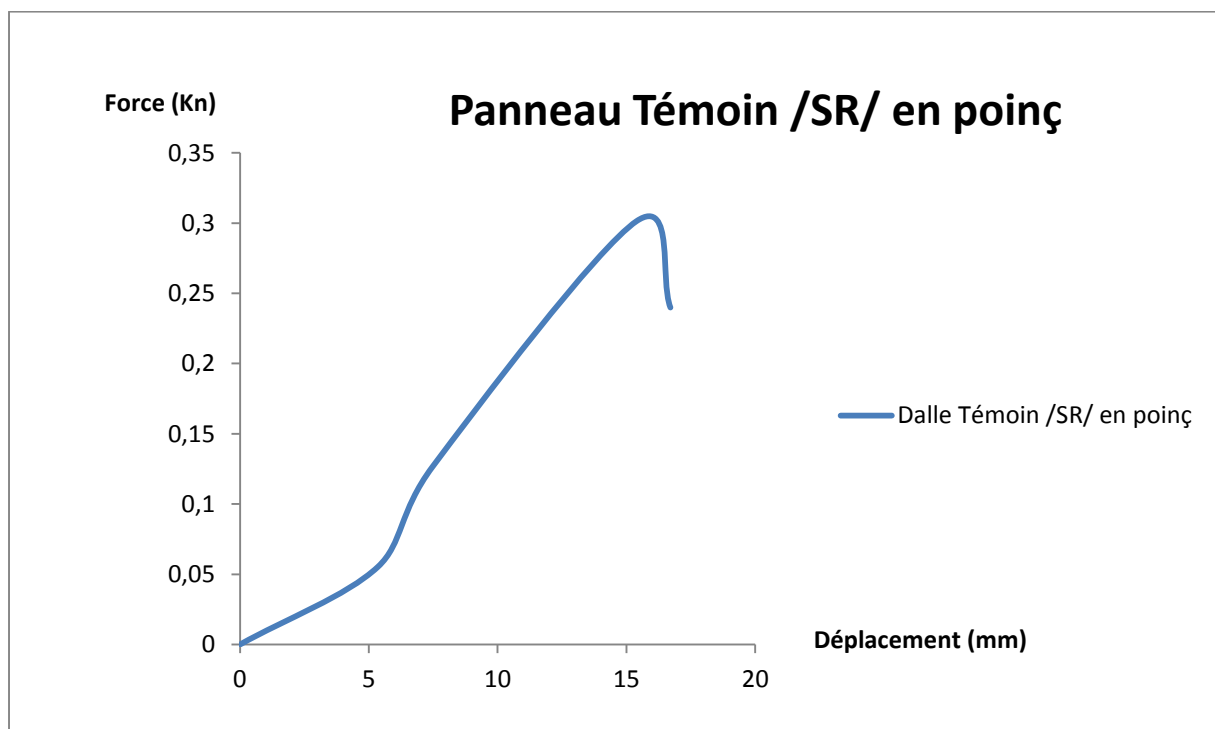
IV.3 Essais de poinçonnement sur les panneaux :

➤ **Présentation et interprétation des résultats des essais de poinçonnement**

Les résultats obtenus de ces essais nous ont permis de calculer les forces et de tracer les courbes force-déplacement.

Tableau IV.3: Résultats des essais de poinçonnement.

Types de panneaux	Masses des éprouvettes (g)	Force de rupture (kN)	Déplacement au pic (mm)
Panneau témoin	3101	0,3	15,39
Panneau + renforts TISSU/TISSU	3439	1,12	26,87
Panneau + renforts Polymère/Polymère	3737	2,02	25,31
Panneau + renforts Tissu/Polymère (coté Polymère)	3716	1,45	22,88
Panneau + renforts Tissu/Polymère (Coté tissu)	3722	1,07	30,37

**Figure IV.35 :** Courbe Force-Déplacement du Panneau témoin.

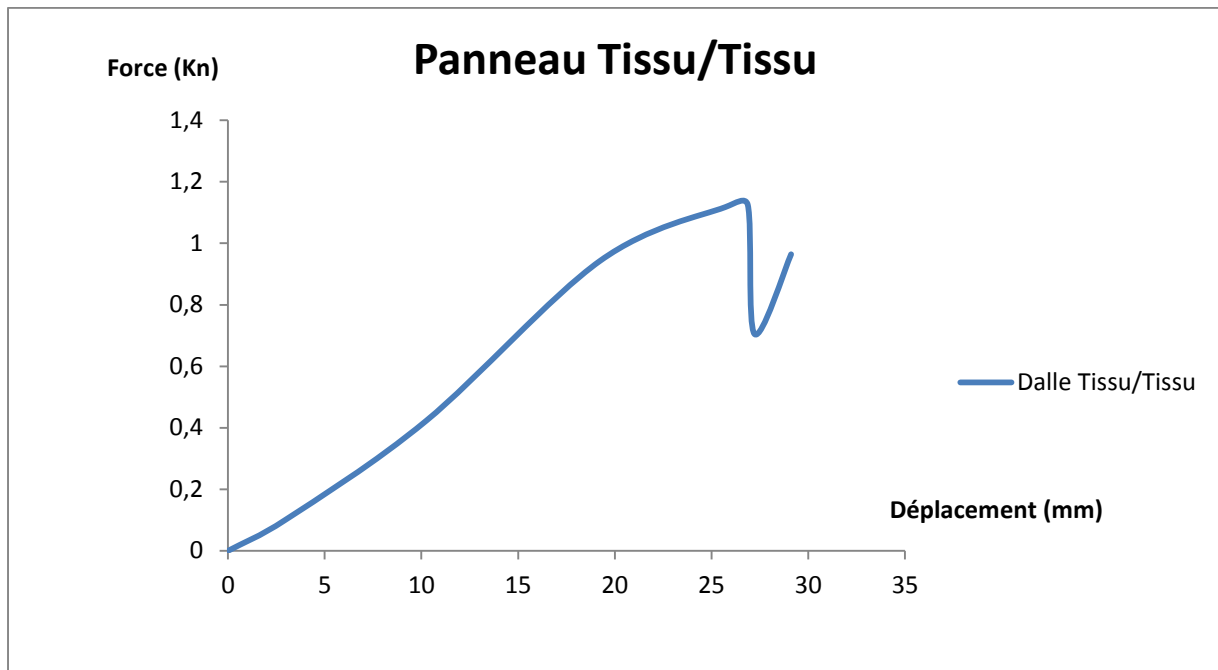


Figure IV.36 : Courbe Force-Déplacement du Panneau Tissu/Tissu.

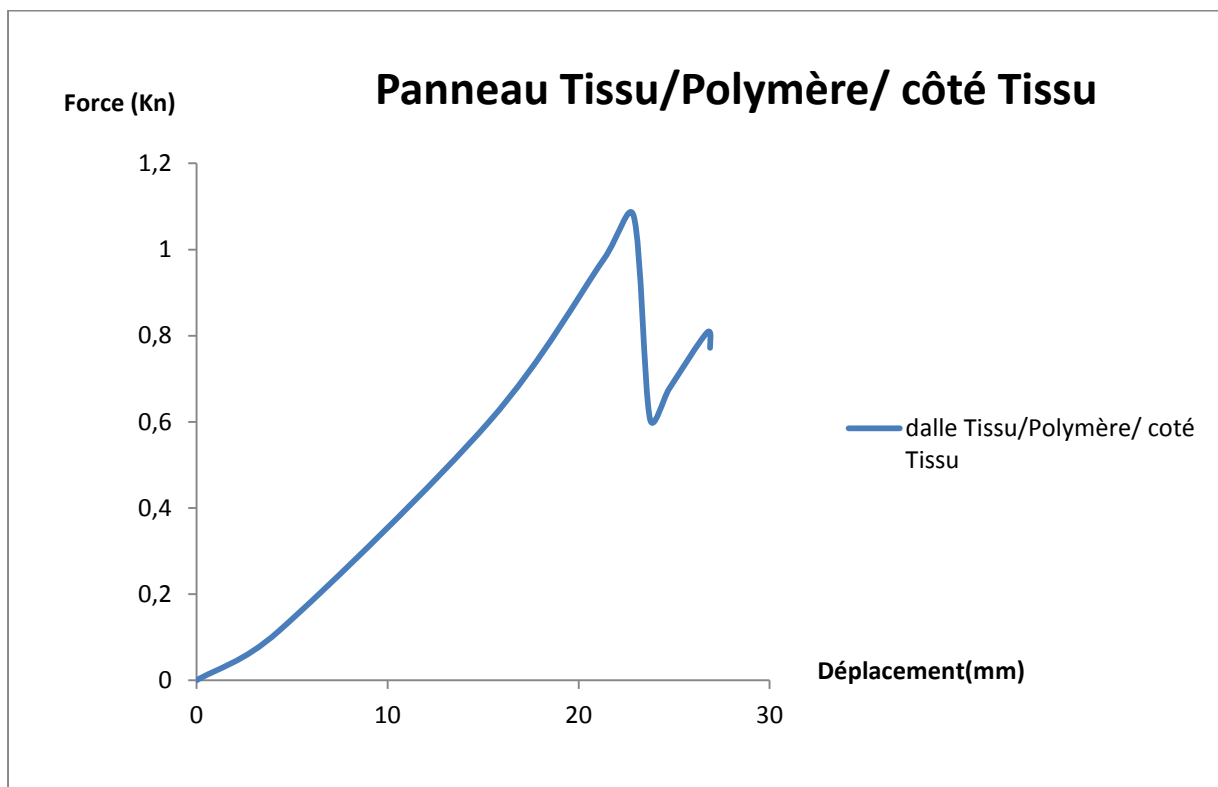


Figure IV.37 : Courbe Force-Déplacement du Panneau Tissu/Poly/coté Tissu

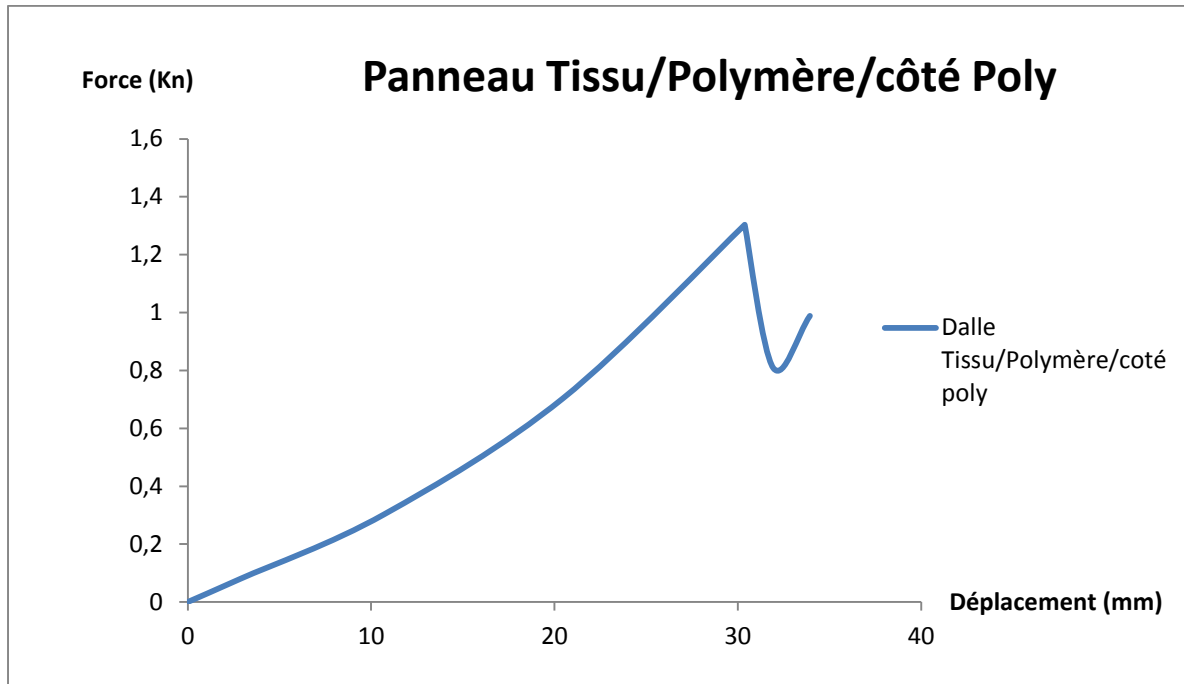


Figure IV.38 : Courbe Force-Déplacement du Panneau Tissu/Poly/coté poly

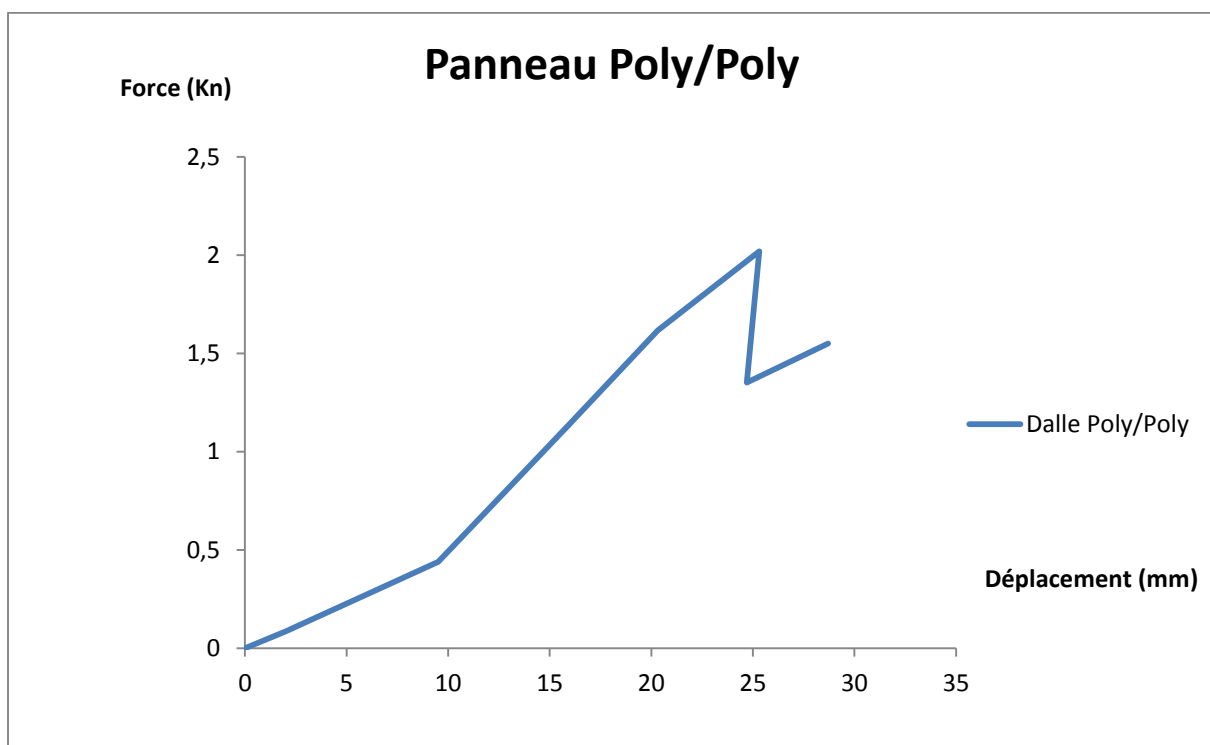


Figure IV.39 : Courbe Force-Déplacement du Panneau Poly/Poly

- L'allure des courbe 'force-déplacement' montrent un comportement quasi-linéaire suivi par une chute de chargement due à la rupture du renfort, puis une légère reprise du chargement par l'âme du multicouche.

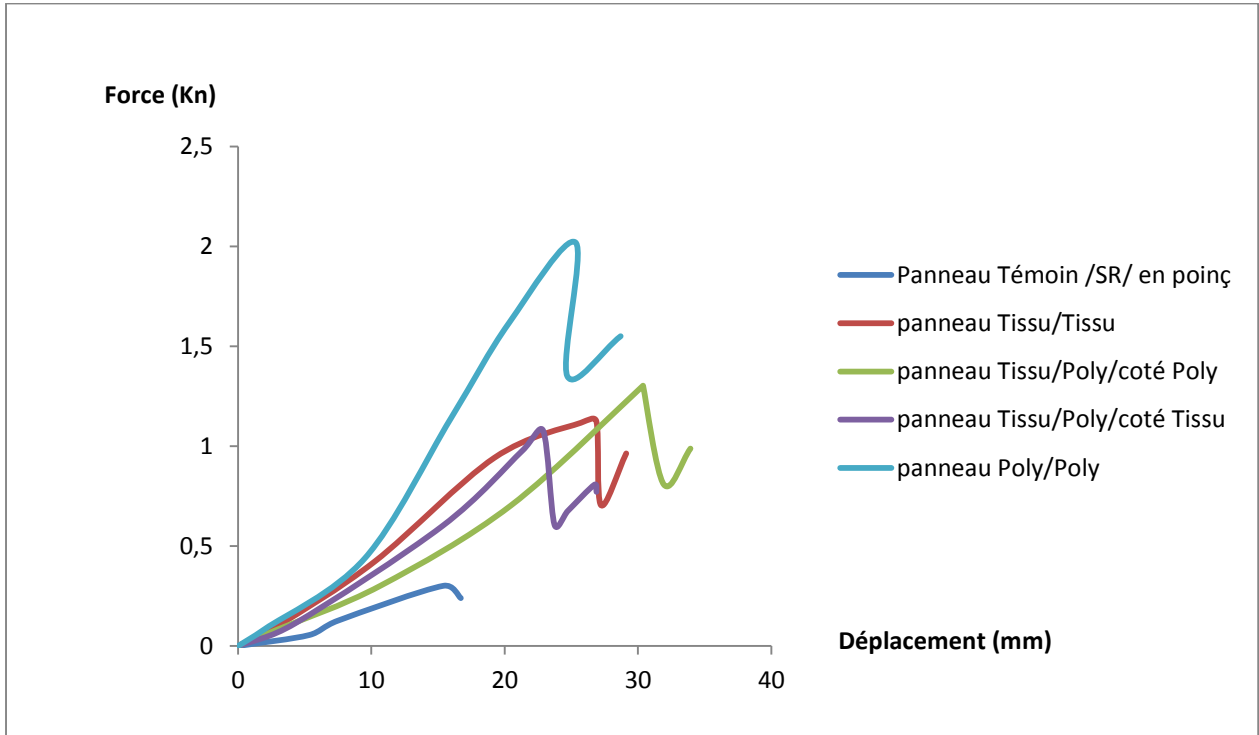


Figure IV.40 : Confrontation des courbes Force-Déplacement des panneaux.

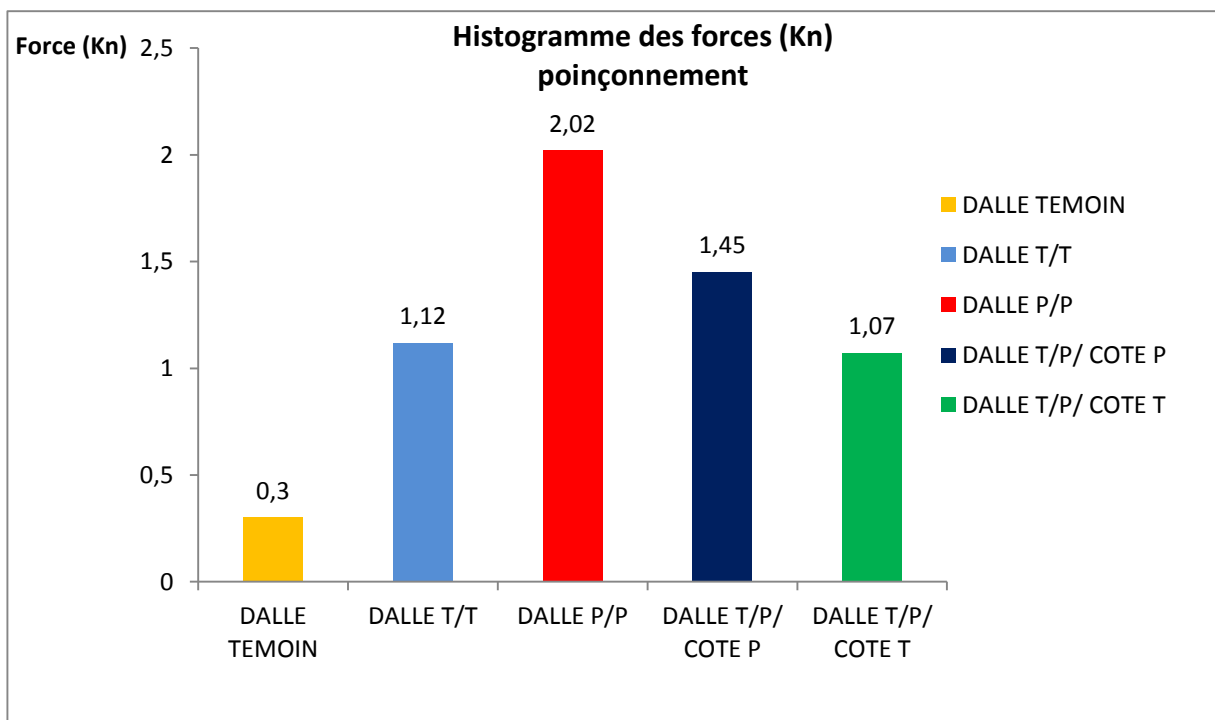


Figure IV.41 : Histogramme des forces.

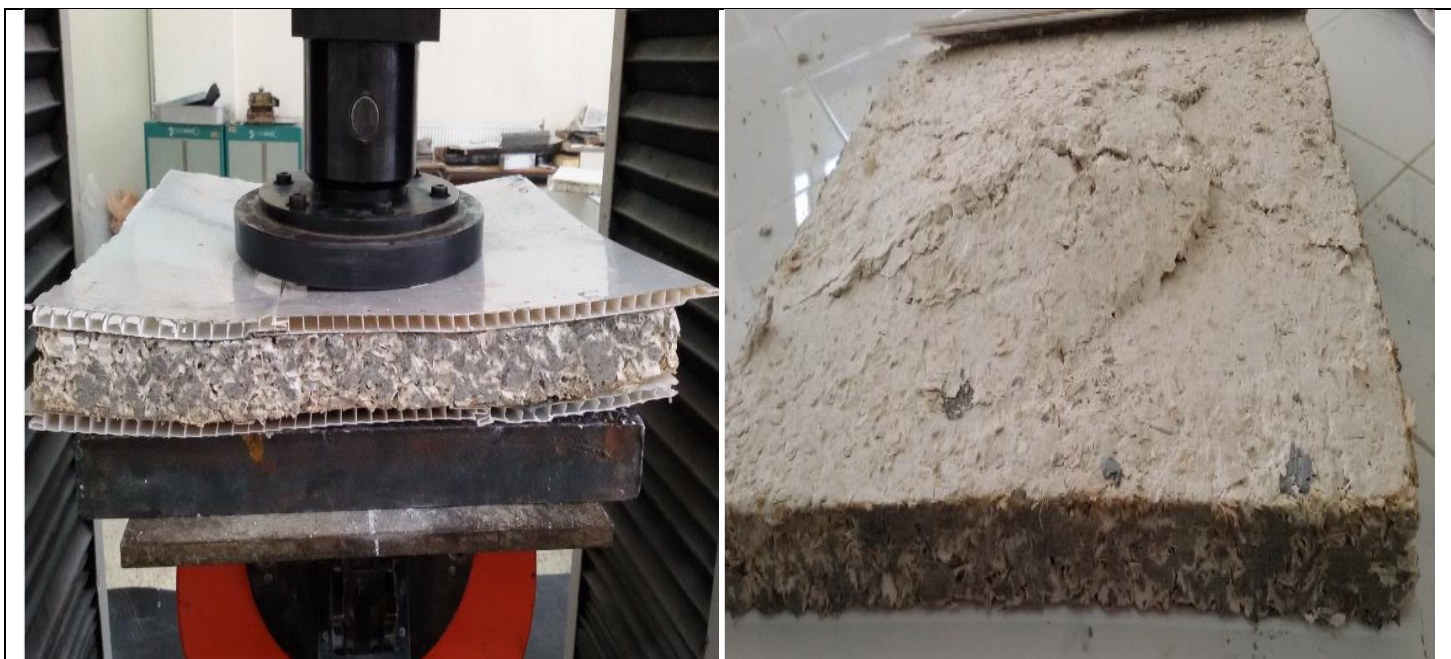
L'analyse des différents résultats nous permet de conclure ce qui suit :

- L'influence des types de renforts sur le comportement du panneau est observée par la valeur de la résistance ultime au pic, en effet la variante **P/P** a donné le meilleur résultat ; une résistance ultime de **2,02 MPa**, ceci peut être expliqué par le fait que le panneau est renforcée par une plaque en polymère sur ces deux face.
- On remarque que le renforcement du panneau avec des plaques en polymère (**PVC**) d'épaisseur **3 mm**, ou en tissu d'épaisseur de **1 mm** permet d'augmenter la capacité ultime du panneau de plus de **300%**, ce qui nous permet de conclure que les propriétés des renforts sont à l'origine de cette augmentation.
- Ce gain au niveau de la charge ultime est accompagné parfois par un accroissement en ductilité du comportement qui se traduit par une augmentation de la flèche au moment de la rupture, notamment pour les variantes « **Panneaux P/P et Panneaux T/P coté P** ».

➤ **Mécanisme de rupture**



Panneau témoin : Rupture du panneau par poinçonnement



Panneau + renforts Polymère/Polymère : Rupture du panneau par poinçonnement



Panneau + renforts Tissu/Polymère (coté Polymère) : Rupture du panneau par poinçonnement



Panneau + renforts Tissu/Polymère (Coté tissu): Rupture du panneau par poinçonnement



Panneau + renforts TISSU/TISSU : Rupture du panneau par poinçonnement

- En général, le mode de rupture des panneaux non renforcés se caractérise par un cisaillement de la matrice dans l'épaisseur du panneau.
- Le comportement réel des panneaux renforcés se caractérise, dans l'ensemble, par la résistance aux efforts de flexion et de poinçonnement.
- Le comportement flexionnel des panneaux comprend plusieurs phases : Au début du chargement, on a un comportement élastique linéaire, par la suite, la fissuration du panneau apparaît dans les zones les plus sollicitées, enfin, dans la phase de rupture, on observe une très légère augmentation de la charge appliquée qui conduit à un état d'équilibre instable provoquant la rupture totale du panneau.

- Pour tous les panneaux renforcés, on remarque un décollement du renfort à partir des coins et des bords. La rupture finale c'est produite par une rupture de la partie centrale des renforts.
- En général, la capacité ultime du panneau est limitée par le phénomène du poinçonnement. Le mode de rupture observé pour tous les panneaux est une rupture par poinçonnement.

IV.4 Essais de voilement sur les panneaux :

➤ Présentation et interprétation des résultats des essais de voilement

Tableau IV.4: Résultats des essais de voilement.

Types de Panneaux	Masse de l'éprouvette (g)	Force de rupture (kN)	Déplacement verticale au pic (mm)	Déplacement horizontale au pic (mm)	
				Comparateur 1	Comparateur 2
Panneau témoin	3066	0,79	4,77	0	0
Panneau + renforts TISSU/TISSU	3329	3,48	9,85	0	0
Panneau + renforts Polymère/Polymère	3635	9,28	9,28	12,4	0
Panneau + renforts Tissu/Polymère	3627	5,11	9,51	24,5 (coté POLY)	0 (coté TISSU)

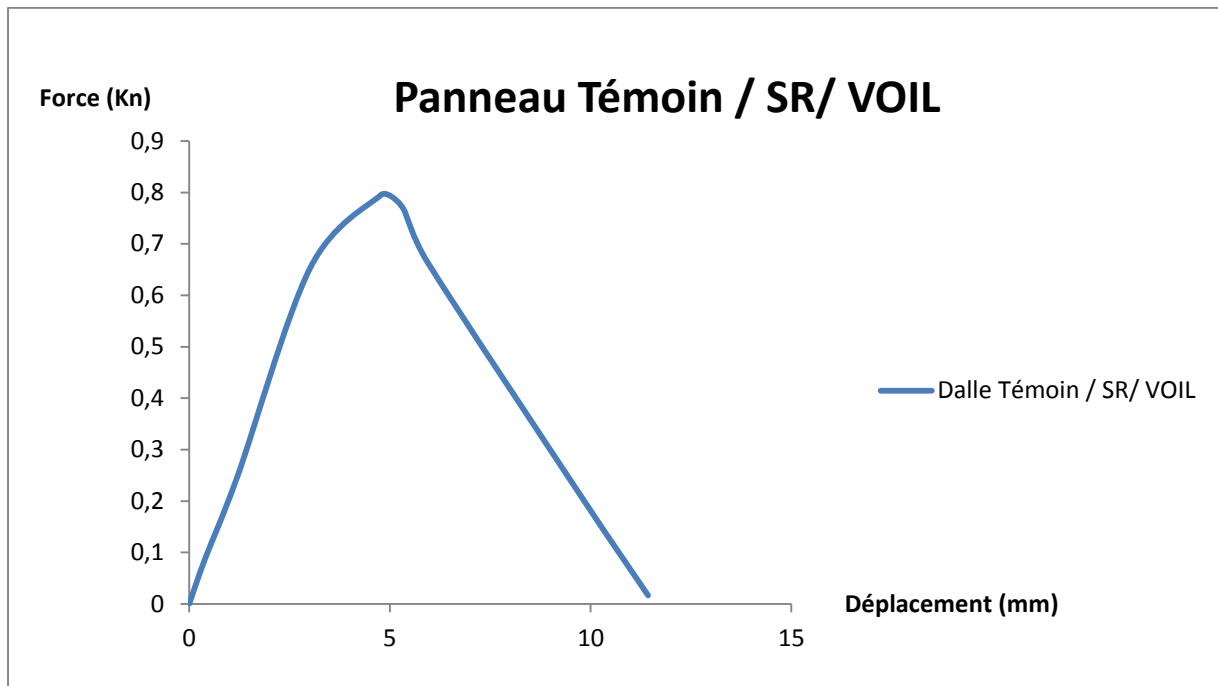


Figure IV.42 : Courbe Force-Déplacement vertical
Panneau témoin.

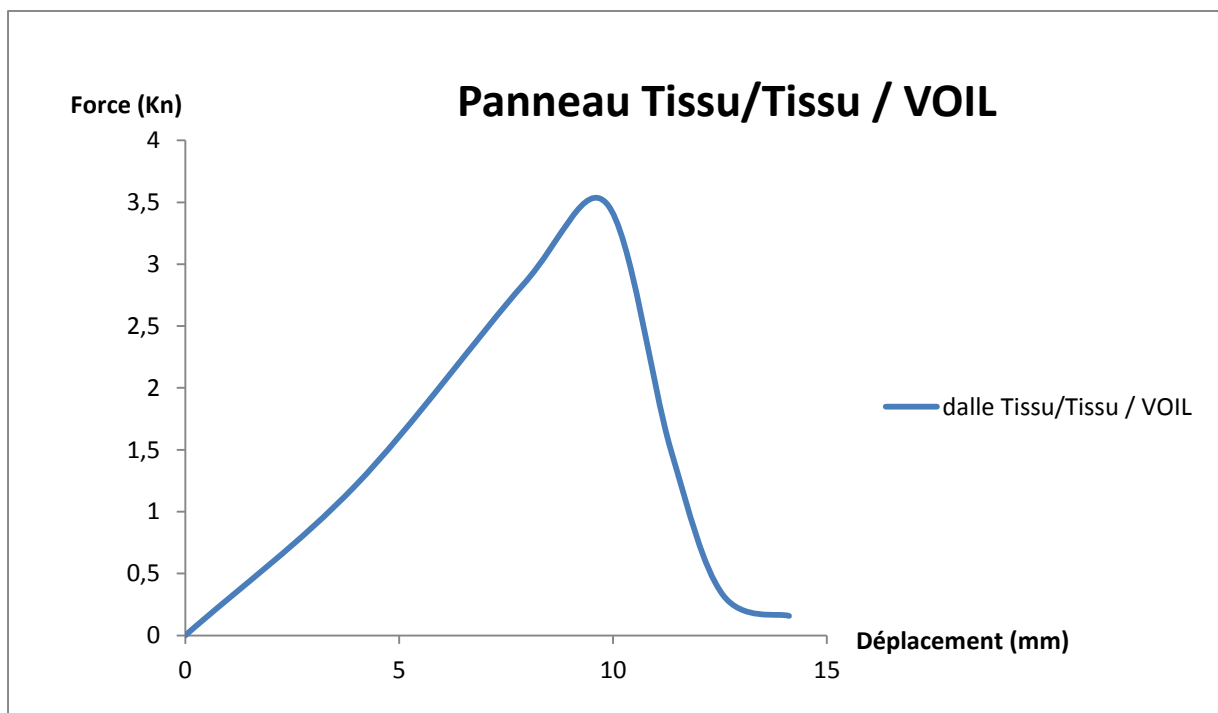


Figure IV.43 : Courbe Force-Déplacement vertical
Panneau Tissu/Tissu.

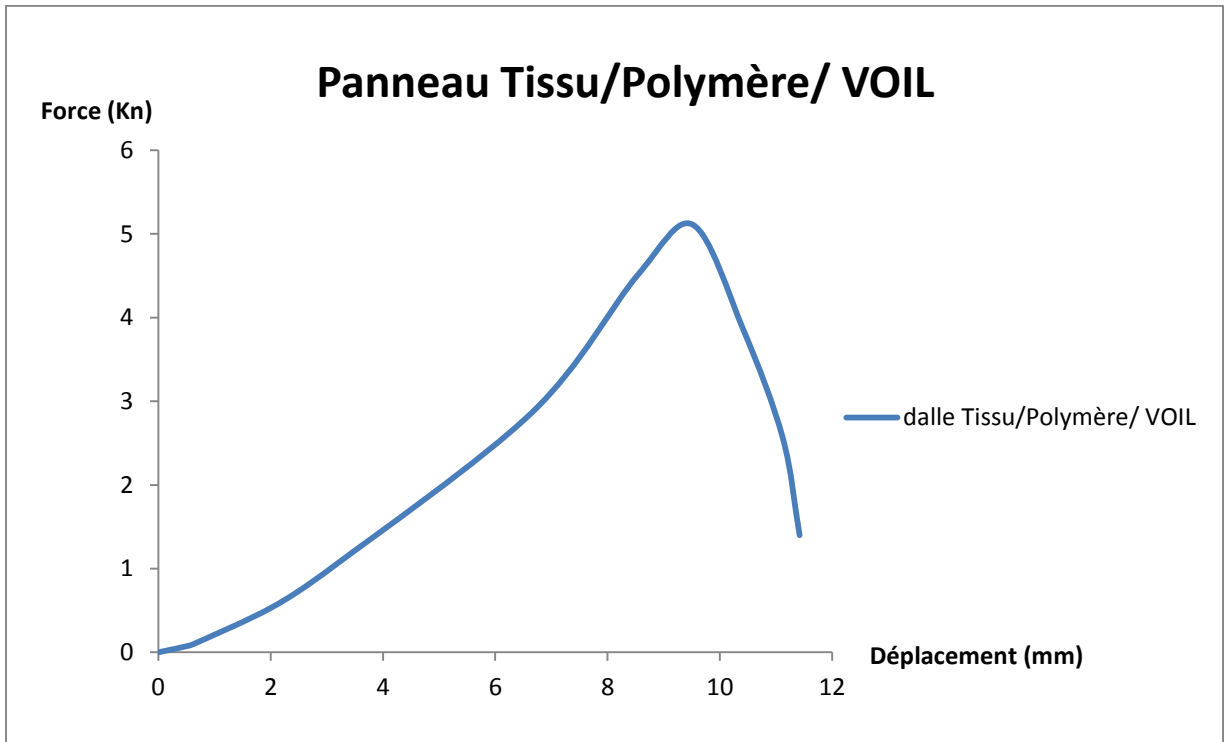


Figure IV.44 : Courbe Force-Déplacement vertical
Panneau Tissu/Polymère.

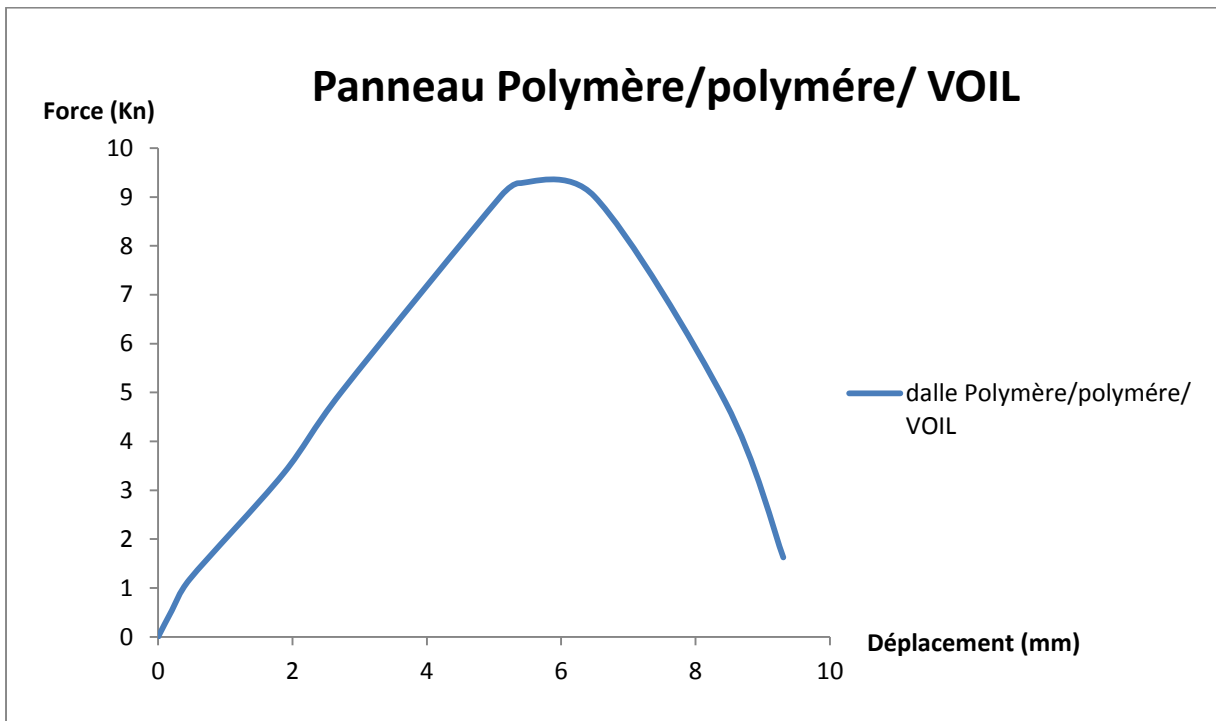


Figure IV.45 : Courbe Force-Déplacement vertical
Panneau Polymère/Polymère.

- Les courbes 'Force-Déplacement vertical' montrent un comportement quasi-linéaire avec une valeur maximale au pic, suivi par une perte de charge.

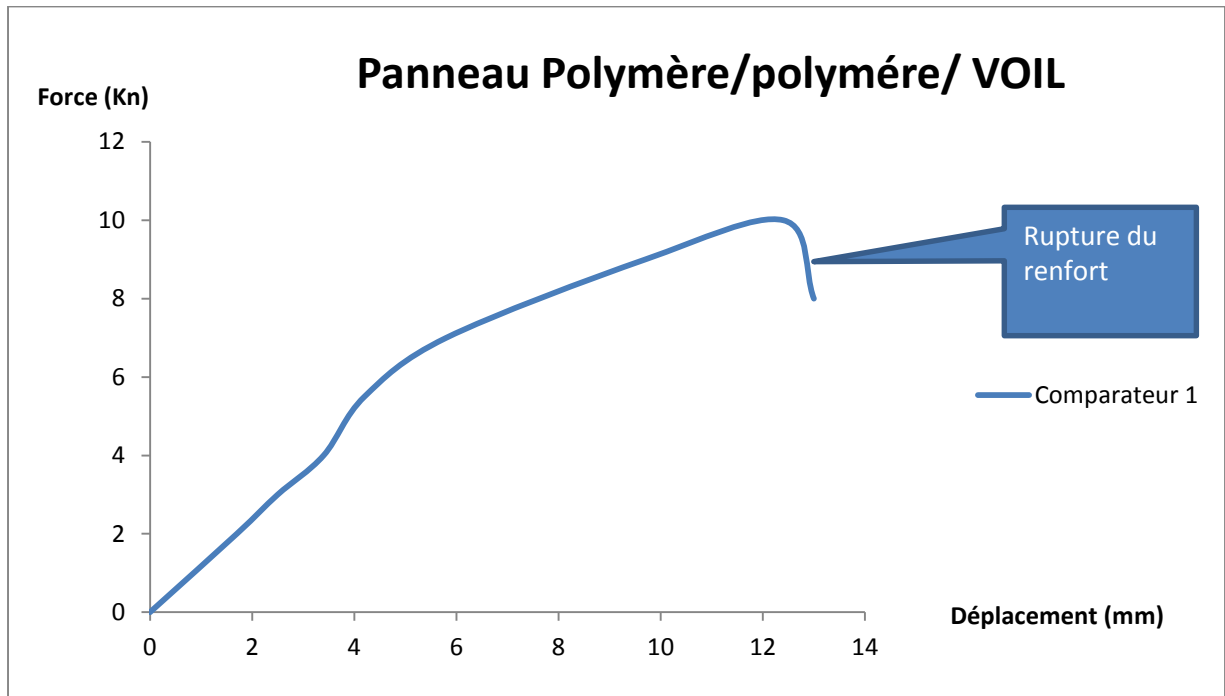


Figure IV.46 : Courbe Force-Déplacement horizontal
Panneau Polymère/Polymère.

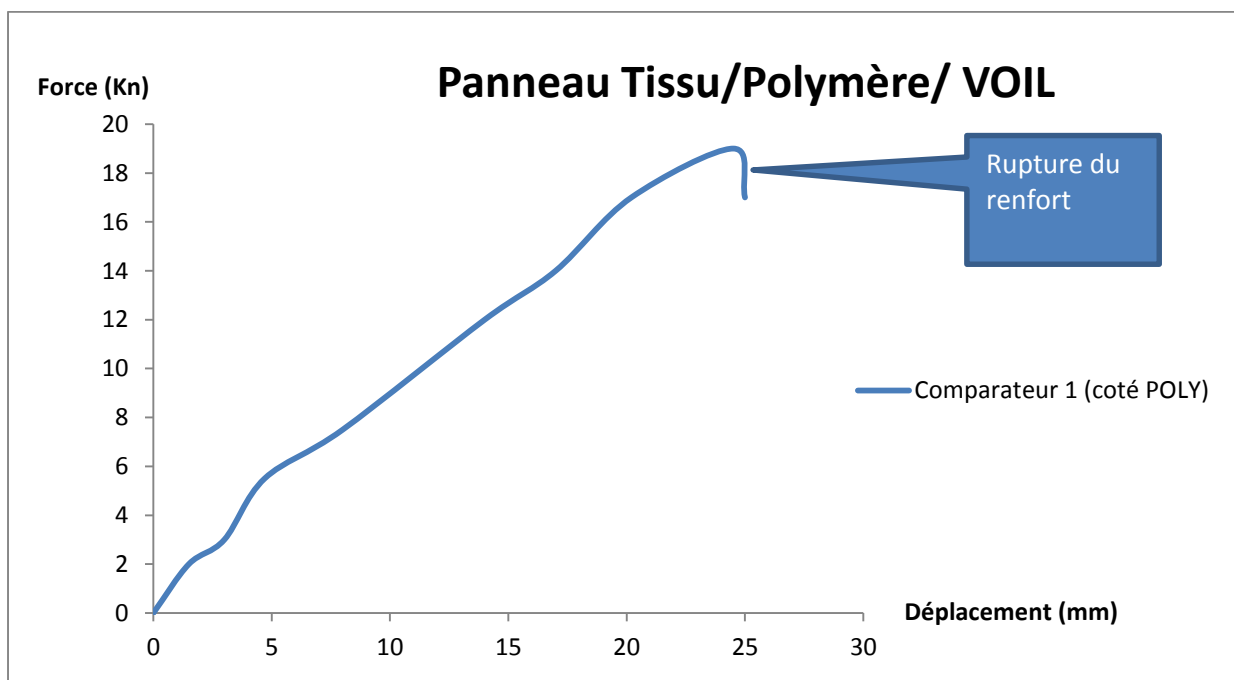


Figure IV.47 : Courbe Force-Déplacement horizontal
Panneau Tissu/Polymère.

- Les courbe 'Force-Déplacement horizontale' des panneaux **P/P** et **T/P** montrent un comportement linéaire qui se caractérise par une valeur maximale au pic, suivi par une brusque perte de charge due à la rupture du renfort. Pour le panneau **Témoin** (de référence) et le panneau **T/T**, nous n'avons pas enregistré de déplacement axial.

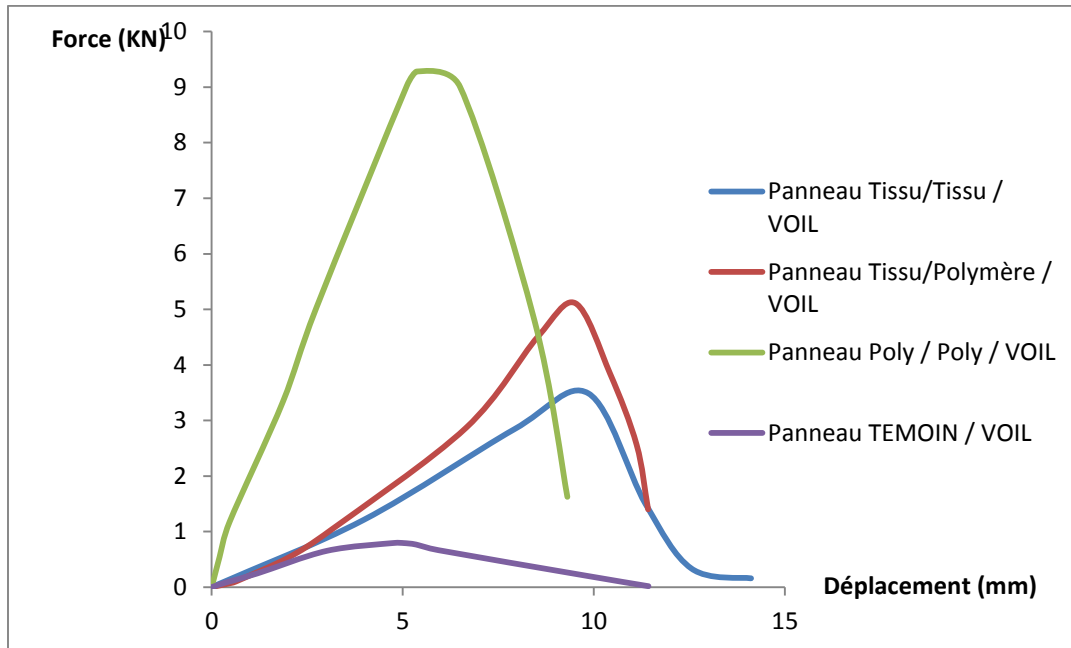


Figure IV.48 : Confrontation des courbes Force-Déplacement vertical des panneaux

➤ **Histogramme :**

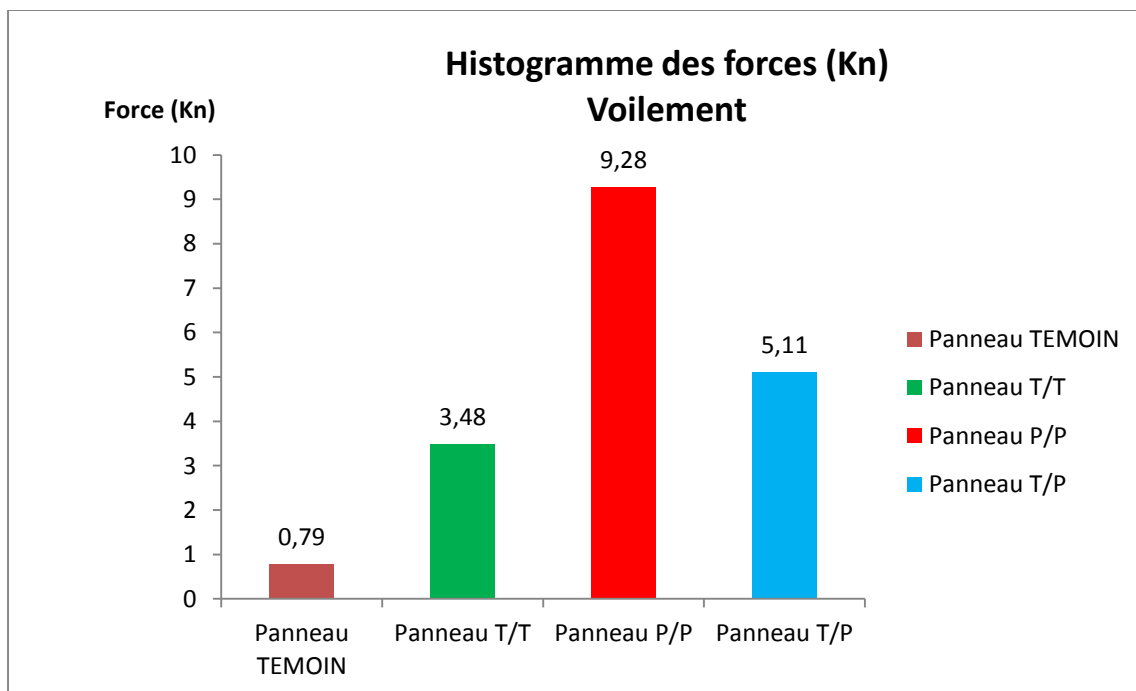


Figure IV.49 : Histogramme des forces verticales.

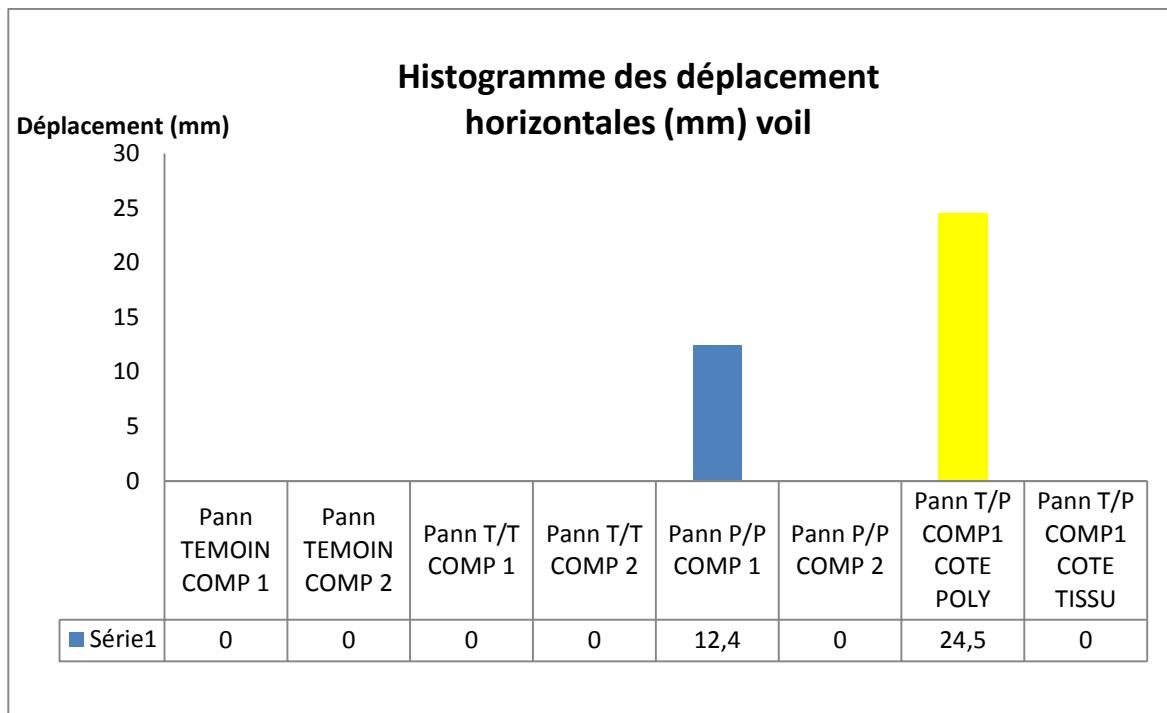


Figure IV.50 : Histogramme des déplacements horizontaux.

D'après les histogrammes et la courbe d'évolution de la résistance, on constate ce qui suit :

- Comme en poinçonnement, on remarque que le renforcement du panneau avec des plaques en polymère (**PVC**) d'épaisseur **3 mm**, ou en tissu d'épaisseur de 1 mm permet d'augmenter la capacité ultime du panneau de plus de **300%**, ce qui nous permet de conclure que les propriétés des renforts sont à l'origine de cette augmentation.
- Ces panneaux multicouches présentent des résistances mécaniques de voilement très améliorées, leur comportement est caractérisé par une partie élastique linière, jusqu'à l'atteinte du pic qui définit la force maximale qui caractérise la résistance ultime des panneaux en flambement. Une chute considérable de la charge ultime est observée au-delà du pic.
- D'après les deux histogrammes précédents, nous pouvons mettre en évidence l'influence des renforts sur la capacité portantes des panneaux en voilement, notamment les capacités portantes de voilement des panneaux **P/P** et **T/P** sont respectivement de l'ordre de **9,28 KN** et **5,11 KN** avec un déplacement axiale correspondant de **12,4 mm** et **24,5 mm** respectivement. Le panneau **Témoïn** (de référence) et le panneau **T/T** présentent

une charge ultime de **0,79 KN** et **3,48 KN** respectivement, mais sans enregistrer de déplacement axial.

➤ **Modes de rupture :**



Panneau témoin sans renforcement



Panneau + renfort TISSU/TISSU



Panneau + renfort TISSU/POLYMERE



Panneau + renfort POLY/POLY

- Le comportement réel des panneaux renforcés dépend de la rigidité en flexion et en cisaillement.
- Le panneau non renforcé (de référence), n'a pas manifesté un comportement de voilement, l'endommagement du panneau c'est produit par écrasement du panneau

jusqu'à rupture, ce qui peut être expliqué par le détachement des copeaux de bois du composite non homogène ainsi sa faible rigidité en cisaillement.

- Pour le panneau **T/T** renforcé par du tissu polypropylène, nous avons observé au cours d'essais une instabilité local (voilement local), près de la source de chargement (vérin de charge), qui se caractérise par un détachement du tissu, ce qui peut être expliqué par la faible rigidité en flexion du polypropylène.
- Les panneaux **P/P** et **P/T**, ont manifesté une instabilité globale (voilement de peaux), qui se caractérise par un décollement total du renfort, ce qui nous permet de conclure que ce type de renfort, a induit une augmentation considérable en énergie de dissipation à la rupture des panneaux considérés.

IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, un modèle de panneau multicouche chargé en voilement et en poinçonnement est proposé et validé par les résultats des essais. Les panneaux multicouches présentent des caractéristiques mécaniques très améliorées, en plus de la légèreté et la facilité de réalisation des panneaux.

Les résultats obtenus nous renseignent sur le rôle capital des matériaux de semelles : le tissu en polypropylène et la plaque en polymère dans la reprise des sollicitations et son influence sur les modes de rupture, mettant en évidence la performance mécanique des matériaux composites.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les enjeux de durabilité et économiques sont à l'origine de la prise de conscience de la nécessité d'utilisation des matériaux innovants dans le domaine du génie civil, donc, au développement des techniques et procédés de confection et réalisation de nouveaux matériaux dans la construction, surtout vis-à-vis des isolations exigées.

Actuellement, la réduction de la consommation énergétique, à travers l'utilisation des matériaux naturels abondants et recyclable, pour une meilleure isolation thermique, acoustique et phonétique représente un domaine important de recherche. L'étude entreprise dans le cadre de cette initiation à la recherche constitue une contribution à l'étude expérimentale du comportement mécanique d'une matrice de plâtre renforcée de renforts naturels tel que la sciure de bois et du liège. L'application pratique projetée consiste à réaliser des panneaux à base de ce matériau innovant renforcé par des plaques en polymère pour assurer en plus des résistances souhaitées, une meilleure finition du parement externe de la plaque, ce qui permet de concevoir des murs pour l'isolation. Ce procédé est envisagé dans les constructions où l'exigence d'une isolation est importante et nécessaire.

Le matériau développé appartient aux nouveaux matériaux innovants qui répondent aux critères des exigences environnementales.

Les différents résultats obtenus montrent une nette amélioration de la résistance à la rupture, un poids très léger comparativement aux structures similaires en mortier ou en béton et surtout une rapidité de confection et de réalisation des panneaux.

Les essais au laboratoire effectués sur les différentes éprouvettes ont permis de mieux comprendre la contribution à la résistance des renforts utilisés

Les résultats obtenus dans cette étude sont très intéressants, toutefois certains aspects inhérents à l'isolation, surtout l'analyse thermique, n'ont pas pu être traités dans ce travail.

Afin de tirer des conclusions encore plus précises, il serait intéressant en **perspectives**, dans les recherches futures de :

- ✓ Conduire des essais thermiques sur des panneaux à l'échelle réelle ;
- ✓ Utiliser des charges renforçantes ;
- ✓ Tenir compte de l'effet de frottement entre les panneaux ;
- ✓ Etudier le comportement du mur constitué par l'assemblage des panneaux ;
- ✓ Modéliser les différents scénarios de défaillance susceptibles de se produire.

Références Bibliographiques

- [1] **Céline Martias.** Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie. Université de Toulon et du Var, 2011. Français.
- [2] **Naik T.R., Kraus R.N.,** "Use of industrial products in cement-based materials", Proceedings of the international congress "Creating with concrete", Dundee, UK, Book "Exploiting wastes in concrete", P. 23-35, (1999).
- [3] **Fehrs J.E.,** "Ash from the combustion of treated wood: characterisation and management options", National Bioash Utilisation Conference, Portland, (1996).
- [4] **Mimoune F.Z., Mimoune M., Laquerbe M.,** "The use of fly ash in the compound wood-cement", Proceedings of the international congress "Creating with concrete", Dundee, UK, Book "Exploiting wastes in concrete", P. 227-232, (1999).
- [5] **Bouguerra A., Sallee H., Barquin F., Dheilly R.M., Queneudec M.,** "Isothermal moisture properties of wood-cementitious composites", Cement and concrete research, Vol. 29, N° 3, P. 339-347, (1999).
- [6] **N.B. Singh and B. Middendorf,** "Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization," Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, vol. 53, 2007.
- [7] **D. Daligand,** "Plâtre," Techniques de l'ingénieur, vol. C910, pp. 1-16
- [8] **A. Lewry and J. Williamson,** "The setting of gypsum plaster," Journal of materials science, vol. 29, 1994, pp. 6085-6090.
- [9] **J. Bensted and S. Prakash,** "Infrared Spectra of Calcium Sulphate Hemihydrate," nature physical science, vol. 232, 1971, pp. 174-175.
- [10] **Sylvain MEILLE (Ingénieur INSA),** Etude Du Comportement Mécanique Du Plâtre Pris En Relation Avec Sa Microstructure. L'institut National Des Sciences Appliquées De Lyon ; 4 mai 2001.
- [11] **CASPAR J.P., DANY C., AMATHIEU L., REYNAUD P., FANTOZZI G.,** Influence de la microstructure du plâtre pris sur ses propriétés mécaniques. XXIème Congrès Eurogypsum, Versailles, France, 4-6 juin 1996. 20 p.
- [12] **SOROKA I., SEREDA P.,** Interrelation of hardness, modulus of elasticity and porosity in various gypsum systems. Journal of the American Ceramic Society, 1968, vol 51, n°6, p.337-340.

[14] **COQUARD P.**, Résistance mécanique des plâtres secs et humides. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, 1992. 100 p.

[15] **AMATHIEU L.**, Influence d'adjuvants organiques sur la texture cristalline du plâtre pris. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille, 1986. 185 p.

[22] **GAROFALO F.**, Déformation et rupture en fluage. Dunot : Paris, 1970. 256 p.

[25] Technologie du bois – 07/04/2011

[26] **S. Benyoucef, Dj. Harrache** Caractérisation de la microstructure de sciure de bois de pin sylvestre "*Pinus sylvestris*" Université Djilali Liabes, Sidi Bel Abbes. Algérie., 24 October 2014.

[27] TAPPI T-204 om-88. Vol. 1. TAPPI Test Methods. Atlanta. GA: Tappi Press. (1992).

[28] **TAPPI T 222 om-06.** Acid-insoluble Lignin in Wood and Pulp. (2006) .

[29] TAPPI T 211 cm-86. Ash in wood and pulp (2003).

[30] **Benithe Sandrine UMURIGIRWA-VASSEUR** : "Elaboration et caractérisation d'un agromatériau Chanvre-Amidon pour le bâtiment."

[31] **Florent ILCZYSZYN** : " Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composite renforcées par des fibres de chanvre". Université de Technologie de Troyes. 19 juillet 2013

[32] **Liège -matière- première (liège, culture, nature, future) Cork Information Bureau 2010**

[33] **R. CANTAT et R. PIAZZETTA (I.M.L)** : guide -levée du liège- (Institut Méditerranéen de liège).

[Andr 46] **ANDREWS H.** The effect of water contents on the strength of calcium sulfate plaster products. *J^{al} of the society of Chemical Industry*, 1946, vol 5, p.125-28.

[Bade 98] **BADENS E.**, Etude de l'adsorption de l'eau sur les cristaux de gypse et de son influence sur les propriétés mécaniques de plâtre pris pur et additivé. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille, 1998. p110.

[34] **L. Berreur, B. De Maillard, S. Nösperger**, "L'industrie française des matériaux

[35] **Laurent Gornet.** Généralités sur les matériaux composites. Ecole d'ingénieur. 2008.

[36] **D. Trichet**, "Contribution à la modélisation, à la conception et au développement du chauffage par induction des matériaux composites", Thèse de doctorat, école doctorale sciences pour l'ingénieur de Nantes, Jan 2000.

[37] **B. N. Cox, G. Flanagan**, "Handbook of Analytical Methods for Textile Composites", NASA Contractor Report 4750, March 1997

[38] **Sudharsan M.**, “Structural Design and Analysis of a Lightweight Composite Sandwich space Radiator Panel”, Phd thesis, Bharathiar University, Coimbatore, India. 2003.

[39] **Berthelot J. M.**, “Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures”, 4 émeédition, 1996.

[40] **Sandwich concept**, “DIAB sandwich handbook”, Available from, [http://:www.diabgroup.com](http://www.diabgroup.com)

[41] **Magnus B.**, “Fatigue crack initiation and propagation in sandwich structures“. PhD thesis Department of Aeronautics Division of Lightweight Structures Stockholm Sweden.1998.

[42] **Engin M. R.**, “Characteristics of Innovative 3-D FRP Sandwich Panels”. Ph.D thesis, North Carolina State University, Raleigh, 2005.

[43] **Naik T.R., Kraus R.N.**, "Use of industrial products in cement-based materials", Proceedings of theinternational congress "Creating with concrete", Dundee, UK, Book"Exploiting wastes in concrete",P. 23-35, (1999).

[44] **NF T 54-604.** Structure Sandwiches a base de plastiques - Essai de compression sans ou avec flambage.

[45] **NF T 54-606.** Plastics based sandwich structures. Bending test. Afnor 87461; October 1987