

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

UNIVERSITE MOULOU D 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

***Etude expérimentale d'un mortier
renforce par des fibres végétales***

Dirigé par :

Pr. AIT TAHAR KAMAL

Réalisé par :

M. MOUGARI Brahim



REMERCIEMENT

Tout d'abord je remercie avant tous, Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, et la volonté pour atteindre mon objectif.

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon promoteur le professeur **AIT TAHAR KAMAL**, pour sa disponibilité permanente, ses orientations, son savoir, sa modestie, et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens possibles pour travailler dans les meilleures conditions.*

*Je voudrais aussi remercier vivement **Mme KHELOUI**, **MONSIEUR SI SALEEM** pour leurs encouragements, leurs gentillesse, leurs aides durant la période de réalisation de ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer particulièrement mes vifs remerciements à **MONSIEUR MAMOU** responsable au laboratoire de département de génie civil, pour ses précieux conseils, son savoir, son aide, sa gentillesse et son soutien.*

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce travail. Et de l'enrichir par leurs propositions.



DEDICACES

*Je tiens à dédier ce travail aux personnes les plus chères à mon cœur, ma mère **HOURIA ELLAH YERHAMHA** qui a su être à mes cotés dans les moments difficiles sans laquelle je n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de bonheur qu'elle m'a procurée, à mon père **MAHFOD**, car c'est grâce à leurs soutiens que j'ai pu arriver à ce stade ; je souhaite que ce travail soit à la hauteur de tout ce qu'ils ont pu faire pour moi. Fasse Dieu que je puisse les honorés.*

*A ma grande sœur **FATIHA** qui ma encouragé et aider durant la réalisation de ce travail, à toutes mes sœurs : **GHANIYA, MESSAOUDA, ZHIRA** à mon petit frère **MOUHAMED, NOUREDINE, MNOUAR** et **DJAMEL**.*

*A mes nièces : **MARWA, SAFA, AMINA, MERYEM** et les petites **KAOJHER, et ELAA**.*

*A mes neveux : **MAHDI** et **ANES**.*

A ma famille.

*A mes amis : **MALIK, YASSINE, MASSI, SOFIENE, ABD ERAHIM, HAMID**
Et tous les autres.*

*A mes collègues : **LAMARA** et **YAMINA***

A tous ceux qui me sont chères.

BRAHIM.



SOMMAIRE

Introduction générale

CHAPITRE I : le béton de bois

I.1. Introduction	1
I.2. LES MORTIERS	1
I.2.1. Généralités.....	1
I.3. LES LIANTS	2
I.3.1. Le ciment	2
I.3.2. La chaux	2
I.4. Les sables.....	2
I.5. L'eau	2
I.6. Etude des qualités d'un mortier	2
I.6.1. Maniabilité	3
I.6.2. Perméabilité	3
I.6.3. Conditions d'hydratation	3
I.6.4. Déformabilité	3
I.6.5. Retrait :	3
I.6.6. Adhérence :	3
I.6.7. Durabilité :	4
I.7. MATERIAU BOIS	4
I.7.1. La sciure de bois :	4
I.7.2. Préparation physique de la sciure de bois de Pinussylvestris.....	4
I.7.3. Traitement de la sciure de bois pour l'adsorption :	5
I.7.4. Les copeaux de bois :.....	5
I.8. LES BETONS DE BOIS.....	5
I.8.1. Les bétons végétaux :	5
I.8.1.1. Les matériaux bio-sources	5
I.8.1.2. Enjeux et intérêts des matériaux bio-sources	5
I.8.1.3. Intérêts des matériaux bio-sources.....	6
I.8.2. Identification des bétons végétaux.....	7
I.8.2.1. Morphologie	7
I.8.2.2. Fibre ou granulats	7
I.9. COMPOSITES A MATRICE CIMENTAIRE	8
I.9.1. Béton de pulpe de betterave (Monreal [24]).....	8
I.9.2. Béton de miscanthus (Acikel [25]) :.....	9
I.9.3. Béton de diss.....	9
I.9.4. Béton de bois	9
I.10. COMPOSITES A BASE DE CHAUX.....	9
I.10.1. Béton de chanvre.....	9
I.10.2. Béton de moelle de tournesol (Magniont) [30] :.....	10
I.11. DIFFERENTES UTILISATIONS DES BETONS VEGETAUX	10
I.11.1. Propriétés des bétons végétaux.....	11
I.11.2. Formulation des bétons végétaux.....	11
I.11.3. Propriétés des particules végétales.....	11
I.11.4. Propriétés du liant	12

SOMMAIRE

I.11.5. Mise en œuvre des bétons végétaux	13
I.11.6. Propriétés mécaniques, thermiques et hydriques des bétons végétaux	13
I.11.7 Propriétés thermiques	15
I.11.8. Propriétés hydriques	16
I.11.9. Durabilité des bétons végétaux.....	17
I.11.10 Problèmes techniques et normatifs	18
I.11.11. Optimisation de la composition des bétons	18
I.11.12. Difficultés liées à la mise en œuvre.....	19
I.11.13. Caractérisation thermique et mécanique des bétons végétaux	19
I.11.14. Durabilité et comportement à l'eau	20
I.11.15. Élaboration des bétons de granulats de bois.....	20
I.11.16. Formulations théoriques.....	20
I.11.17. Comportement thermique	21
I.12. LE BETON A BASE DE SCIURE DE BOIS	22
I.12.1. Propriétés des bétons légers.....	23
I.13. Conclusion partielle	23

CHAPITRE II : les isolants thermiques

II.1. Etude Comparative des isolants thermiques.....	24
II.1.1. Critères de comparaison	24
II.1.2. Analyse comparative du choix d'isolant.....	24
II.2. LES FIBRES DE CHANVRE.....	25
II.2.1. La chènevotte.....	26
II.2.2. Fibre de chanvre utilisée comme renfort.....	27
II.3. LE LIEGE.....	28
II.3.1. Introduction	28
II.3.2. Chêne liège (Quercus suber L) en Algérie	28
II.3.2. Anatomie du liège.....	29
II.3.3. Isolation avec le liège	31
II.3.4. Autres applications	32
II.3.5. Tendances futures	32
II.4. LES COMPOSITES A BASE DE LIEGE.....	33
II.4.1. Nouveaux composites à base de liège.....	35
II.4.1.2. Composites sandwichs à base de liège	35
II.5. MORTIER POLYMERE LEGER AVEC GRANULATS DE LIEGE	36
II.5.1. Composites liège-ciment	36
II.6. LA SCIURE DE BOIS.....	36
II.6.1. Anatomie du bois	36
II.7. LES TISSUS	37
II.7.1. Catégories de tissu :	37
II.8 Les résine.....	39
II.8 .1 Les matrices	39
II.8 1.1 Les résines thermodurcissables.....	39
II.8 1.2 Les résines thermoplastiques.....	40
II.8 1.3 Les résines naturelles	40

SOMMAIRE

II.8 .2 Les résines végétales	41
CHAPITRE : III Caractérisation des Matériaux et Procédés expérimentaux	
III.1. INTRODUCTION.....	42
III.2. PRESENTATION ET CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES MATERIAUX UTILISES	42
..... III.2.1. La sciure de bois	
.....	42
III.2.1.1.PREPARATION DE LA SCIURE DE BOIS	43
III.3. LE LIEGE.....	43
III.3.1. Propriétés du liège	44
III.3.2. Caractéristiques physico-mécaniques	45
III.3.2. Le Liège expansé.....	45
III.3.2.1. Définition des gammes pour la sciure de bois et le liège expansé.....	46
III.4. Le mortier :	54
III.5. Résine époxyde	55
III.6. Le tissu	56
III.7. Le polymère (PVC)	57
III.8. La colle (vinylique)	58
III.9. Le MEDAPOXY REP	59
III.9.1. Domaines d’application	59
III.9.2. Propriétés	59
III.9.3. Conditions d’utilisation :	60
III.9.4. Précautions d’emploi.....	60
III.10. Préparation et élaboration des éprouvettes.....	60
III.11. Composition de l’éprouvette colle- sciure de bois.....	61
III.11.1. Procédure de réalisation des éprouvettes colle sciure de bois	61
III.12. Conclusion partielle	65
III.13. Préparation du mortier	65
III.13.1. Calcul des quantités de matériaux nécessaires pour les différentes éprouvettes.....	65
III.13.2. Mode opératoire pour la réalisation des éprouvettes, mortier sciure de bois et mortier liège	67
III.14. ESSAIS MECANIQUES	70
III.14.1. Machine d’essais.....	70
III.15. PREPARATION DES PANNEAUX EN MSC	72
III.15.1. Procédures et précautions à respecter	72
III.15.2. Renforcement des panneaux	73
III.15.3. Essais mécaniques	74
III.15.3.1. Essai de voilement	75
III.15.3. 2. Essai de poinçonnement.....	75
III.15.3. 3. Essai de propagation des ondes ultrasonores	76
III.16. Conclusion :	75
CHAPITRE IV : Présentation des résultats et discussion	
IV.1.Introduction.....	76

SOMMAIRE

IV.2.Essais de compression	76
IV.3.ESSAIS DE FLEXION	86
IV.4. Confrontation entre les éprouvettes étudiées et celle du mortier témoin en compression et flexion.....	96
IV.5.ESSAI DE CARACTERISATION DU PVC ET DE TISSU A LA TRACTION	98
IV.6.ESSAIS DE VOILEMENT	101
IV.7.ESSAIS DE POINÇONNEMENT	108
IV.8.ESSAIS ULTRASONORES	115
IV.9.Observations et analyses des résultats de l'essai de propagation ultrasonore.....	116

Liste des figures

Figure I.1	les copeaux de bois.	5
Figure I.2	Illustration des différentes porosités des bétons végétaux : cas du béton de chanvre (Nozahic [18])......	7
Figure I.3	Différence entre les fibres et les granulats d'origine végétale [19]......	8
Figure I.4	Principe de mise en œuvre d'un béton végétal par la technique de projection (Elfordy et al.) [38]......	13
Figure I.5	Courbe contraintes/déformations de l'essai de compression sur le béton de chanvre (Cérézo [28])......	14
Figure I.6	Endommagement de l'interface matrice/renfort observé par Boustingorry [39] dans un composite à matrice gypse et renfort bois.....	15
Figure I.7	Conductivité thermique du béton de chanvre en fonction de la fraction volumique des particules de chanvre (Pham et al.) [44].	15
Figure I.8	Anisotropie de la conductivité thermique du béton de chanvre compacté : la direction verticale représente la direction de compactage (Tronet et al.) [45]......	16
Figure I.9	Courbes d'adsorption-désorption des composites argile-ciment-bois (adaptées de Bouguerra et al.) [46].	17
Figure I.10	Effet de cycles saturation/séchage sur un essai en flexion réalisé sur un composite de ciment renforcé par de la pâte kraft de bois de conifères (Mohr et al.) [49]......	18
Figure I.11	Dispositif utilisé pour mesurer la conductivité thermique du béton de granulats de bois.....	22
Figure II.1	Micrographie d'une coupe transversale de tige de chanvre [60]......	26
Figure II.2	Comparaison entre les fibres de chanvre : (a) défibrées et (b) fibrées (CHAMOIN, 2013) [61]......	27
Figure II.3	Coupe longitudinale et transversale d'une chènevotte au microscope électronique.....	4
Figure II.4	Cartographie et description des peuplements porte-graines de chêne liège [69]......	6
Figure II.5	a)-Différentes sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle [44]....[70]	30
Figure II.6	Ondulation d'une cellule et ses dimensions [70].	30
Figure II.7	-Lenticelles. 1- planche section axiale, 2- planche section radiale [72].	32
Figure II.8	Différentes formes de panneaux isolants en liège [77]......	32
Figure II.9	Bouchons agglomérés, panneau d'affichage, des semelles de chaussures et des revêtements de sol [93].	34
Figure II.10	Isolation de la toiture, isolation des murs creux et des toitures et des combles isolés [93]......	10
Figure II.11	Bâton de liège aggloméré pour la production des bouchons [84]......	35

Liste des figures

Figure II.12 Schéma du procédé de fabrication utilisé pour obtenir les agglomérats de liège époxy.....	12
Figure II.13 Échantillons de sandwich à base de liège aggloméré élaboré par la méthode infusion [92].	12
Figure II.14..... Images MEB de l'interface granulaire : (a) entre le bitume et le caoutchouc (b), et entre le bitume et le liège.....	37
Figure II.15 Différentes échelles d'observation d'un bois de résineux : les tissus, la cellule et la paroi cellulaire (Harrington, 1998) [90].	38
Figure II.16 Tissus 2D (a) taffetas, (b) sergé de 2, (c) satin de 5 à décochement de 2 [91].....	38
Figure II.17 Tissus 3D : (a) « Layer to Layer Angle Interlock », (b) « Through the thickness Angle Interlock », (c) orthogonal [Adanur et Liao 1998] [91].	39
Figure II.18 Types de matrice.	39
Figure II.19 Exemple de résine de pin, Photo par Meanos (2004), Wikipedia.	40
Figure III.1. Sciure de bois.....	42
Figure III.2. fractionnement de la sciure de bois.....	43
Figure III.3. Le liège aggloméré.....	43
Figure III.4. liège expansé.....	46
Figure III.5. Tamiseuse	47
Figure III.6. Tamisage du liège et de la sciure de bois.....	47
Figure III.7. Les gammes obtenues pour chaque matériau.	49
Figure III.8. élaboration de la masse volumique apparente	50
Figure III.9. Elaboration de la masse volumique absolue de la sciure de bois	52
Figure III.10. les matériaux utilisés pour la Préparation du mortier.	54
Figure III.11. les composants de la Résine utilisée.	55
Figure III.12. Forme du tissu en fibres de polypropylène	56
Figure III.13. PVC (polychlorure de vinyle).....	57
Figure III.14. La colle vinylique	58
Figure III.15. La résine MEDAPOXY (élément A et B)	59
Figure III.16. Vue du moule (16x4x4 cm ³) et (36x36x36 cm ³) utilisé	60
Figure III.17. Elaboration des éprouvettes colle sciure de bois	62
Figure III.18. Eprouvette (sciure de bois / colle) pendant le démoulage.	62
Figure III.19. Augmentation de la quantité de la colle.....	63

Liste des figures

Figure III.20. problème d'adhérence entre les grains de la sciure de bois.....	63
Figure III.21. Epreuve témoin du mortier.....	64
Figure III.22. principales étapes d'élaboration des éprouvettes.....	66
Figure III.23. Epreuves (mortier/ sciure de bois).....	67
Figure III.24. Epreuves (liège / mortier).....	67
Figure III.25. Epreuve (40 % liège / 60 % mortier) (gamme(1)).....	68
Figure III.26. Machine d'essais IBERTEST.....	69
Figure III.27. Remplissage des moules avec le mélange [mortier et mortier-sciure de bois].....	70
Figure III.28. Différents panneaux composites élaborés.....	72
Figure III.29. disposition des accessoires pour l'essai de voilement.....	73
Figure III.30. disposition des accessoires pour l'essai de poinçonnement.....	74
Figure III.31. dispositif expérimental de l'essai ultrasonore.....	74
Figure IV.1. Courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / L 50% - G1 en compression.....	76
Figure IV.2. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60%/ L 40% G1 en compression.....	77
Figure IV.3. courbe force-déplacement de l'éprouvette MT en compression.....	77
Figure IV.4. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50%/ L 50 % G2 en compression.....	78
Figure IV.5. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / L 40% G2 en compression.....	78
Figure IV.6. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50%/ L 50 % G3 en compression.....	79
Figure IV.7. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / L 40% G3 en compression.....	79
Figure IV.8. Confrontation des courbes des éprouvettes ML et celle du MT en compression.....	80
Figure IV.9. Confrontation des histogrammes des éprouvettes ML et celui du MT en compression.....	81
Figure IV.10. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / SC 50% G1 en compression.....	81
Figure IV.11. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / SC 40% G1 en compression.....	82
Figure IV.12. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / SC 50% G2 en compression.....	82
Figure IV.13. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / SC 50% G3 en compression.....	83
Figure IV.14. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / SC 40% G2 en compression.....	84
Figure IV.15. Courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / SC 40% G3 en compression.....	84
Figure IV.16. Confrontation des courbes des éprouvettes MSC avec celle du MT en compression.....	85

Liste des figures

Figure IV.17. confrontation des histogrammes des éprouvettes MSC avec celui du MT en compression.....	86
Figure IV.18. Représentation schématique d'un essai de flexion trois points sur prisme 4×4×16 cm ³	86
Figure IV.19. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / L 50% G1 en flexion.....	87
Figure IV.20. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / L 40% G1 en flexion.....	87
Figure IV.21. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / L 50% G2 en flexion.....	88
Figure IV.22. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / L 40% G2 en flexion.....	88
Figure IV.23. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / L 50% G3 en flexion.....	89
Figure IV.24. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / L 40% G3 en flexion.....	89
Figure IV.25. courbe force-déplacement de l'éprouvette MT en flexion	90
Figure IV.26. confrontation des courbes des éprouvettes ML avec celle du MT en flexion	90
Figure IV.27. Confrontation des histogrammes des éprouvettes ML avec celui du MT en flexion	91
Figure IV.28. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 50% / SC 50% G1 en flexion.....	92
Figure IV.29. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 60% / SC 40% G1 en flexion.....	92
Figure IV.30. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 50% / SC 50% G2 en flexion.....	93
Figure IV.31. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 60% / SC 40% G2 en flexion.....	93
Figure IV.32. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 50% / SC 50% G3 en flexion.....	94
Figure IV.33. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 60% / SC 40% G3 en flexion.....	94
Figure IV.34. Confrontation des courbes des éprouvettes MSC avec celle du MT en flexion.....	95
Figure IV.35. Confrontation des histogrammes des éprouvettes MSC avec celle du MT en flexion.....	95
Figure IV.36. Confrontation des valeurs de forces de rupture des éprouvettes étudiées par rapport aux celles du MT	97
Figure IV.37. confrontation entre les résistances des éprouvettes étudiées et celles du mortier	97
Figure IV.38. essai de caractérisation du composite tissu-résine.....	99
Figure IV.39. Comportement du tissu en traction	99
Figure IV.40. essai de caractérisation du PVC.....	100
Figure IV.41. comportement du PVC en traction selon le sens transversal.....	100
Figure IV.42. Comportement du PVC en traction selon le sens longitudinal	101
Figure IV.43. processus de déformation du panneau renforcé par T-T à l'essai de voilement.....	102
Figure IV.44. courbe force-déplacement du panneau renforcé par T-T à l'essai de voilement.....	102
Figure IV.45. processus de déformation du panneau renforcé par P-T à l'essai de voilement.....	103

Liste des figures

Figure IV.46. courbe force-déplacement horizontal du panneau renforcé par P-T à l'essai de voilement.....	103
Figure IV.47. courbe force-déplacement vertical du panneau renforcé par P-T à l'essai de voilement	104
Figure IV.48. processus de déformation du panneau renforcé par P-P à l'essai de voilement	104
Figure IV.49. courbe force-déplacement horizontal du panneau renforcé par P-P à l'essai de voilement	105
Figure IV.50. courbe force-déplacement vertical du panneau renforcé par P-P à l'essai de voilement	105
Figure IV.51. processus de déformation du panneau mortier sciure de bois en voilement.....	106
Figure IV.52. courbe force-déplacement horizontal du panneau non renforcé à l'essai de voilement	106
Figure IV.53. Courbes force-déplacement vertical des différents panneaux composites à l'essai de voilement.....	107
Figure IV.54. Courbes force-déplacement vertical des différents panneaux composites à l'essai de voilement.....	107
Figure IV.55. Histogramme des valeurs des résistances des différents panneaux en voilement	108
Figure IV.56. histogrammes force-déplacement horizontal des différents panneaux composites à l'essai de voilement	108
Figure IV.57. processus de déformation du panneau MSC à l'essai de poinçonnement	109
Figure IV.58. courbe force-déplacement du panneau MSC à l'essai de poinçonnement	110
Figure IV.59. processus de déformation du panneau renforcé par T-P à l'essai de poinçonnement	110
Figure IV.60. courbe force-déplacement du de panneau renforcé par T-P à l'essai poinçonnement	111
Figure IV.61. processus de déformation du panneau renforcé par P-P à l'essai de poinçonnement	111
Figure IV.62. courbe force-déplacement du de panneau renforcé par P-P à l'essai poinçonnement	112
Figure IV.63. processus de déformation du panneau renforcé par T-P à l'essai de poinçonnement	112
Figure IV.64. courbe force-déplacement du de panneau renforcé par T-P à l'essai poinçonnement	113
Figure IV.65. processus de déformation du panneau renforcé par T-T à l'essai de poinçonnement	113

Liste des figures.....:

Figure IV.66. courbe force-déplacement du panneau renforcé par T-T à l'essai poinçonnement...114

Figure IV.67. Confrontation des courbes pour les différents panneaux.....115

Figure IV.68. histogrammes force-déplacement des différents panneaux composites à l'essai de poinçonnement115

Figure IV.69. Histogramme des valeurs de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les différents panneaux.....118

Liste des tableaux

Tableau I.1 Comparaison de la conductivité thermique et de l'énergie grise de quelques matériaux utilisés en construction (source : CSTB [15]).	6
Tableau I.2 Quelques propriétés mécaniques des bétons végétaux : résistances en compression	14
Tableau I.3 Evolutions des caractéristiques physiques et mécaniques en fonction du rapport Ciment/Copeaux.	18
Tableau I.4 Dosages calculés pour les quatre formulations étudiées avec une compacité des granulats de bois de $C_g = 38\%$ [14].	21
Tableau II.1 Propriétés des matériaux isolants	24
Tableau II.2 Propriétés d'isolation en liège aggloméré [94][95].	31
Tableau II.3 Caractéristiques des résines thermodurcissables.	39
Tableau II.4 Caractéristiques des résines thermoplastiques.	39
Tableau III.1. Composition minérale du liège.	44
Tableau III.2. Composition chimique du liège	45
Tableau III.3. Fiche technique de granulats de liège	45
Tableau III.4. les refus obtenus par tamisage du liège dans chaque tamis.	48
Tableau III.5. les refus obtenus par tamisage de la sciure de bois dans chaque tamis.	48
Tableau III.6. Granulométrie des différentes gammes pour 2 kg de chaque matériau.	50
Tableau III.7. La masse volumique apparente de la sciure de bois	51
Tableau III.8. La masse volumique apparente du liège expansé	51
Tableau III.9. Différentes masses volumiques absolues pour toutes les gammes et tous les échantillons de la sciure de bois	52
Tableau III.10. suivant résumé les différentes compacités pour toutes les gammes et tous les échantillons de la sciure de bois	53
Tableau III.11. Différentes compacités pour toutes les gammes et tous les échantillons du liège expansé	54
Tableau III.12. les caractéristiques de la résine époxy	56
Tableau III.13. Propriétés mécaniques du polypropylène.	57
Tableau III.14. Caractéristiques du tissu de polypropylène.	57
Tableau III.15. Caractéristiques de la résine MEDAPOXY REP	60
Tableau III.16. Quantités des matériaux utilisés	61
Tableau III.17. Divers pourcentages ainsi que les différentes masses utilisées pour l'élaboration des éprouvettes.	66
Tableau III.18. Diverses pesées des différents types d'éprouvette en mortier sciure de bois et mortier liège	69
Tableau III.19. Quantités des matériaux utilisés pour un panneau du MSC	72
Tableau III.20. les différentes pesées des panneaux réalisés	74
Tableau IV.1. Résultats obtenus pour les éprouvettes ML soumises à la compression	81
Tableau IV.2. Résultats des essais de compression pour les éprouvettes MSC et MT	86
Tableau IV.3. Résultats obtenus	91
Tableau IV.4. Résultats obtenus de l'essai de flexion	96
Tableau IV.5. Résultats des essais de flambement	109
Tableau IV.6. Résultats des essais de poinçonnement	116
Tableau IV.7. Résultats des vitesses de propagation ultrasonore	117

Sigles et abréviations

PVC : polychlorure de vinyle

$M_{\text{granulats secs}}$: masse des granulats secs (g)

M_{SC} : masse de la sciure de bois

$M_{\text{SC,u}}$: masse de la sciure de bois utilisée

$M_{\text{L,u}}$: masse du liège utilisée

$M_{\text{co,u}}$: masse de la colle utilisée

$M_{\text{s,u}}$: masse du sable utilisée

$M_{\text{c,u}}$: masse du ciment utilisée

$M_{\text{e,u}}$: masse de l'eau utilisée

$V_{\text{récipient}}$: volume du récipient (cm^3)

V_{abs} : volume absolu (cm^3)

$V_{\text{ép}}$: volume de l'éprouvette (cm^3)

ρ_{abs} : masse volumique absolue (g/cm^3)

ρ_{app} : masse volumique apparente (g/cm^3)

ρ_{L} : masse volumique du liège

ρ_{SC} : masse volumique de la sciure de bois

C : compacité (%)

P : porosité (%)

$E_{\text{m.sc}}$: éprouvette en mortier sciure de bois

$E_{\text{m.L}}$: éprouvette en mortier liège

ML : mortier liège

MSC : mortier sciure de bois

MT : mortier témoin

P-R-TT-VOIL : panneau renforcé par tissu de part et d'autre sollicité en voilement

P-R-TT-POIN : panneau renforcé par tissu de part et d'autre sollicité en poinçonnement

P-R-PT : panneau renforcé par le tissu et le PVC

P-R-PP : panneau renforcé par le PVC de part et d'autre

P-MS : panneau en mortier sciure de bois

RESUME

Ce travail est consacré à l'étude des propriétés mécaniques, thermique et acoustique du béton à base végétale, notamment la sciure de bois et le liège. Ce matériau est obtenu en mélangeant un liant à base de ciment, des particules végétales et de l'eau. Ces dernières possèdent une porosité intrinsèque importante, du fait de la présence de capillaires. Ceux-ci rendent les particules légères, compressibles et sensibles à l'eau. Le liant contient un mélange de ciment, sable, et de l'eau. Le mélange de ces constituants de nature et de caractéristiques très différentes conduit à un matériau dont les propriétés seront variables en fonction des concentrations volumiques de chaque constituant.

Du point de vue mécanique, le béton de la sciure de bois se caractérise par un comportement élasto-plastique. La résistance en compression varie entre **0.00016** et **0.00217** MPa. Le module d'élasticité est compris entre **0.00046** et **0.080**MPa. Ces valeurs sont modestes par rapport à celles des autres matériaux de construction. En revanche, ce matériau peut supporter des niveaux de déformations élevés ($0.032 < \varepsilon_{\sigma_{\max}} < 0.35$). En s'appuyant sur les observations et les résultats expérimentaux, une modélisation par homogénéisation des panneaux composites renforcés par tissu et/ou PVC. Celle-ci permet d'obtenir un modèle apte à l'utilisation dans la construction.

Ensuite, une étude de transfert des ultrasonores au sein de divers panneaux composites. On a quantifié expérimentalement un grand ralentissement des ondes ultrasonores dans les panneaux composites comparativement avec le mortier seul, à une température ambiante.

Enfin, une première caractérisation de réduction de la masse et le coût du béton. En seconde caractérisation de l'absorption acoustique du béton de bois est réalisée. Elle montre des niveaux d'absorption acoustique élevés sur toute la gamme de dosages étudiés.

Mots-clés: bois béton, isolation thermique, isolation acoustique, les composites de liège expansé.

ABSTRACT

This work is devoted to the study of mechanical properties, thermal and acoustic concrete vegetable based, including sawdust and cork. This material is obtained by mixing a binder with low cement, vegetable particles and water. These last have significant intrinsic porosity, due to the presence of capillaries. These make the lighter particles, elastic and water-sensitive. The binder contains a mixture of cement, sand, and water. The mixture of these natural constituents and very different characteristics results in a material with properties variable according to the volume concentrations of each constituent.

From the mechanical point of view, the concrete of the sawdust is characterized by an elastoplastic behavior. The compressive strength varies between 0.00016 and 0.00217 MPa. The modulus of elasticity is between 0.00046 and 0.080MPa. These values are modest compared to those of other building materials. However, this material can withstand high levels of deformation ($0.032 < \epsilon_{\sigma_{max}} < 0.35$). Based on observations and experimental results, modeling by homogenization composite panels reinforced with fabric and / or PVC. This provides a model suitable for use in construction.

Then an ultrasound transfer study in various composite panels. It has been experimentally quantified a large deceleration of the ultrasonic waves in the composites comparativement panels with single mortar, at room temperature.

Finally, a first mass reduction of characterization and the cost of the concrete. Second characterization of the acoustic absorption of wood concrete is carried out. It shows high levels of absorption acoustique over the entire range of investigated assays.

Keywords: concrete timber, thermal insulation, acoustic insulation, expanded cork composites.

Introduction générale

Introduction Générale

L'enjeu actuel dans le domaine des matériaux consiste à proposer des matériaux performants, biodégradables, recyclables et surtout avec un prix moins prohibitif.

L'objectif principal notamment en génie civil est de diminuer la consommation d'énergie dans les bâtiments, en utilisant des matériaux de construction avec des performances thermiques, tout en réduisant, le coût, l'énergie de leur fabrication, et leur impact négatif sur l'environnement. A cet effet, l'utilisation des fibres végétales est une solution alliant performance technique et environnementale.

Beaucoup de procédés de développement de nouveaux matériaux innovants sont proposés par des chercheurs pour répondre aux exigences environnementales de plus en plus sévères.

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés à réaliser et mener une analyse expérimentale d'un nouveau matériau composite constitué d'un mélange de mortier, renforcé de copeaux de sciure de bois et/ou de liège. Plusieurs fractions ont été considérées dans le but d'optimiser la formulation. Ce matériau sera par la suite considéré dans la réalisation de panneaux renforcés selon différentes configurations par deux semelles, une en polymère et l'autre en tissu. Le renforcement est appliqué 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. L'assemblage de l'ensemble des panneaux permet de réaliser des murs de séparation dont le rôle consiste à assurer la fonction d'isolation.

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

Le premier et le deuxième chapitre sont dédiés à la présentation d'une synthèse bibliographique très concise sur les différents matériaux utilisés dans ce travail, Les différentes définitions, les caractéristiques mécaniques et les propriétés physiques, leurs avantages, et l'intérêt de leurs utilisations ainsi que les différents domaines d'application sont alors rappelés pour chaque matériau. Le comportement du béton de bois et des composites est succinctement présenté et analysé. Une étude comparative des isolants thermiques est présentée.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation détaillée des étapes d'élaboration des différents spécimens réalisés, à savoir : les matériaux d'étude, la formulation, l'analyse granulométrique, la composition optimisée, le procédé de préparation des éprouvettes, les différentes variantes considérées, la réalisation des éprouvettes et enfin l'acquisition et le mode de chargement considérés dans ce travail.

Le quatrième chapitre, est totalement dédié à la présentation et discussion des résultats obtenus. Tous les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans des tableaux et illustrés par des courbes de comportement mettant en exergue l'apport en termes de résistance comparativement aux structures de références.

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

Chapitre I
Le Béton de Bois

I.1. Introduction

L'avancée technologique dans la plupart des domaines industriels propose des matériaux avec des propriétés exceptionnelles pour les différentes applications auxquels ils sont destinés, sauf que, la performance n'est pas suffisante vis-à-vis des exigences environnementales, esthétiques, et de durabilité.

Même si l'utilisation des fibres végétales dans la construction n'est pas nouvelle en soit, le juste compromis entre performance thermique, ambiance confortable et conception moderne à faible coût est un défi scientifique. En effet, plusieurs exemples de matériaux utilisant des fibres naturelles et différents liants sont présentés dans la littérature et montrent leurs avantages [1]-[2]-[3].

Ces matériaux agro-sources sont en plus disponibles à faible coût, renouvelable et recyclable puisqu'ils sont issus généralement d'une activité agricole locale. Cependant, ils présentent quelques inconvénients comme la dispersion des propriétés, la mauvaise adhérence fibre liant et leur comportement vis-à-vis des ambiances humides. Par conséquent, le comportement hydrique de ce type de matériaux peut modifier considérablement leur comportement thermique. Des efforts de caractérisation expérimentale [4]-[5] ou de simulation numérique [6]-[7] pour prendre en compte les transferts hydriques et leur influence sur le transfert de chaleur. Pour mieux montrer la performance énergétique des bâtiments utilisant les isolants à base de fibres végétales, des travaux à l'échelle des parois ont été réalisés [8]. En effet, les propriétés d'adsorption/désorption sont nécessaires pour montrer la relation des matériaux avec l'humidité relative de l'air ambiant dans le cadre des études de couplage hygrothermique [9] [10]

I.2. LES MORTIERS

I.2.1. Généralités

Le mortier est à la base de tous les travaux de maçonnerie que ce soit pour construire, pour enduire ou pour réparer. Le mortier est un mélange de sable, d'eau et de liant (ciment ou chaux) qui durcit comme de la pierre.

En fonction de leur composition on distingue 5 types de mortiers :

- **Mortier de ciment** : Fabriqué avec du ciment artificiel de type Portland, blanc ou gris. Il est très résistant.
- **Mortier de chaux** : Fabriqué avec de la chaux hydraulique. Moins résistant et moins étanche que le mortier de ciment, il est plus souple et laisse respirer les murs.
- **Mortier bâtard** : Fabriqué avec un mélange de ciment et de chaux. Il présente des caractéristiques intermédiaires entre le mortier de ciment et le mortier de chaux.
- **Mortier réfractaire** : A base de "fondu", pour les cheminées et barbecues.
- **Mortier rapide** : A base de ciment "prompt", pour les scellements.

➤ Constitution des mortiers

Les mortiers sont principalement constitués de liant, de sable et de l'eau

I.3. LES LIANTS

I.3.1. Le ciment

Les ciments sont constitués de petits grains individuels de différentes matières, mais ils doivent être statistiquement homogènes en composition. Un haut degré de régularité dans toutes les propriétés du ciment est obtenu par un procédé continu de production en masse et en particulier, par des procédés convenables de broyage et d'homogénéisation.

Dans la plupart des cas, on utilise du ciment Portland avec ou sans constituant secondaire (CPA-CEM I et CPJ-CEM II/A ou B).

I.3.2. La chaux

Il est obtenu par calcination, c'est-à-dire chauffage à haute température, de pierre calcaire. Selon la composition du matériau de base, on obtiendra de la

- La **chaux aérienne** est obtenue à partir de calcaire très pur.
- La **chaux hydraulique** est obtenue à partir de calcaire contenant des silicates, aluminates, des composés de magnésium.

I.4. Les sables

Le sable, est une roche sédimentaire meuble, constituée de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0,063 et 2mm.

Ils proviennent de deux sources :

- Naturelle : Mer, Oued, Sahara. Ce cas représente la quasi-totalité des constructions.
- Industrielle : issu du concassage des granulats de carrière, et plus rarement du recyclage des déchets de construction.

I.5. L'eau

Le dosage en eau dépend de l'utilisation du mortier : un enduit à projeter doit être beaucoup plus liquide qu'un mortier d'assemblage de parpaings. Un mortier trop sec manque d'homogénéité et il est difficile à utiliser (il ne "colle" pas). Un mortier trop humide sèche mal et il est difficile à appliquer en épaisseur (il coule).

I.6. Etude des qualités d'un mortier

Pour les mortiers traditionnels réalisés sur chantier, les performances requises sont réputées satisfaites moyennant le respect des dosages en liants donnés dans le DTR Maçonnerie ou dans le DTU 20.1 ; quant aux mortiers industriels, ils font l'objet des spécifications de fabrication précises.

Les principales caractéristiques visées sont les suivantes :

- Sur la poudre : masse volumique, granulométrie ;
- Sur la pâte : rétention d'eau, durée pratique d'utilisation, temps ouvert, temps d'ajustage, temps de prise ;
- La quantité d'eau à utiliser est fonction du dosage et de la finesse de la granulométrie du sable
- Sur le produit durci : résistance en compression, résistance en traction par flexion, module d'élasticité, variations dimensionnelles et pondérales.

Les caractéristiques essentielles du produit utilisé sont les suivantes :

I.6.1. Maniabilité

Suivant les emplois, les propriétés requises peuvent être différentes mais dans tous les cas, la maniabilité du mortier conditionne sa mise en œuvre.

La maniabilité est apportée par les éléments fins (liants et fillers) et par les adjuvants. Cela explique le surdosage fréquent des mortiers traditionnels composés uniquement de sable et de ciment.

I.6.2. Perméabilité

L'aptitude des mortiers à se laisser traverser par les liquides dans des conditions de pression et de viscosité du liquide données.

La perméabilité diminue en augmentant la compacité, elle n'est obtenue qu'avec un dosage en liant suffisant pour l'enrobage de tous les grains internes.

I.6.3. Conditions d'hydratation

Un autre problème, généralement rencontré lors de la mise en œuvre des mortiers, est celui de l'hydratation correcte du liant. Les liants hydrauliques ont besoin d'eau pour durcir normalement. Or les mortiers sont souvent appliqués en couche mince et risquent une déshydratation prématurée due à l'absorption des matériaux avec lesquels ils sont en contact ou à l'évaporation. Ce risque amène à utiliser des produits spécifiques (formulations contenant des rétenteurs d'eau) et à prendre des précautions particulières lors de leur emploi par temps chaud (humidification des supports et ré-humidification ultérieure).

I.6.4. Déformabilité

Aussi dans les travaux de liaison comme le revêtement, le mortier est utilisé en association avec d'autres matériaux et doit présenter une déformabilité suffisante pour absorber les variations dimensionnelles admissibles des supports.

Dans les maçonneries, c'est le mortier de montage qui, par son adaptation, permet une bonne répartition des contraintes dans les éléments.

I.6.5. Retrait :

Les contraintes qui résultent du retrait peuvent être absorbées par le développement de microfissures internes non préjudiciables au comportement ultérieur du mortier. Toutefois, dans les travaux de surface, elles peuvent également conduire à des fissurations d'autant plus préjudiciables que le mortier est destiné à assurer la protection de la maçonnerie vis-à-vis de la pluie. Il y a lieu de noter que ces contraintes dépendent non seulement du retrait mais également des caractéristiques mécaniques du mortier et en particulier de son module d'élasticité.

I.6.6. Adhérence :

L'adhérence du mortier aux matériaux associés est, dans un grand nombre de cas, un critère primordial de bon comportement.

I.6.7. Durabilité :

Dans tous les emplois extérieurs, la résistance aux intempéries conditionne la durabilité du mortier (capillarité, perméabilité à l'eau et à la vapeur, résistance au gel).

En outre, pour les travaux de surface, le mortier doit présenter une résistance aux chocs et à l'abrasion adaptée au niveau de sollicitation prévu (sol, mur, exposition, ...).

Les mortiers pour enduit se subdivisent-en :

- Mortier pour enduits ordinaires.
- Mortiers décoratifs.

Suivant le domaine d'utilisation, les mortiers de finissage sont divisés-en :

- Mortier pour les enduits extérieurs
- Mortier pour les enduits intérieurs

Les mortiers d'enduit doivent avoir une bonne adhérence à la base et une faible variation de volume pendant le durcissement afin d'éviter la formation des fissures dans l'enduit. La fluidité des mortiers d'enduits ordinaires et des mortiers décoratifs est différente pour chaque couche de l'enduit.

Pour les couches de finition on utilise les sables fins d'un diamètre inférieur à 1.2 mm pour obtenir une surface rugueuse.

I.7. MATERIAU BOIS

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. Ces matériaux ne peuvent être mis en décharge directement à cause de la pollution que cela engendrerait. C'est pourquoi, l'utilisation de copeaux de bois dans la fabrication de bétons légers contribue à valoriser certains sous-produits de l'industrie du bois [53].

I.7.1. La sciure de bois :

Le bois est présent dans le composite sous forme de fibres, de farine ou de sciure, en dimension suffisamment fine pour permettre une mise en forme par des procédés standard, tels que l'extrusion ou l'injection [11].

I.7.2. Préparation physique de la sciure de bois de *Pinussylvestris*

L'étude est effectuée sur des échantillons de sciure de bois de l'espèce pin sylvestre (*Pinussylvestris*) en provenance de Finlande et disponible chez un distributeur de bois de construction, au niveau de la zone industrielle dans la ville de Sidi Bel Abbes (ouest d'Algérie). Une analyse granulométrique préalable a été effectuée sur la sciure de bois, afin de séparer les particules fines caractérisées par un diamètre de 1 à 2mm. En effet, il apparaît qu'une diminution de la taille des particules augmente la surface spécifique et permet une meilleure capacité d'adsorption [12]

Toutefois, les caractéristiques de porosité du matériau, peuvent expliquer les différences obtenues dans l'adsorption.

La caractérisation physique préalable, a permis de déterminer les paramètres physiques suivants : Le pH (sciure en solution aqueuse), la densité apparente, l'humidité, % O, % C et S_{BET} . D'autre part, une quantification des différentes proportions des composés du bois *Pinussylvestrisa* été effectuée, selon des protocoles élaborés par les normes TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry).

I.7.3. Traitement de la sciure de bois pour l'adsorption :

La capacité de la sciure de bois à fixer des adsorbats peut être grandement améliorée en lui faisant subir un traitement chimique afin d'activer les sites fonctionnels d'adsorption. Pour ce faire, la sciure de bois brute (SBB ou non traitée) a été lavée, plusieurs fois, à l'eau chaude à 60 °C et séchée à l'étuve à 80°C pendant 24 heures, afin d'éliminer les particules hydrosolubles qui adhèrent à la surface [13].

I.7.4. 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. [58]



Figure I.1 : les copeaux de bois.

I.8. LES BETONS DE BOIS

I.8.1. Les bétons végétaux :

Le béton végétal est un matériau composite constitué principalement d'un liant minéral ou organique et de charges végétales. Selon la nature des charges, on distingue deux types de bétons végétaux :

Le premier est le béton de granulats végétaux, dans lequel les granulats sont remplacés, partiellement ou totalement, par des particules végétales de dimensions équivalentes ou inférieures à celles des granulats initiaux.

Le deuxième est un béton renforcé par des fibres d'origine végétale.

Les bétons végétaux sont utilisés principalement pour leurs propriétés d'isolation thermique ou phonique. Ces propriétés ont suscité l'intérêt de plusieurs organismes dont le MEDDE (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie). Cependant, l'emploi des bétons végétaux dans la construction restera marginal tant que certains problèmes limitant leur utilisation ne seront pas résolus. Il faudra notamment pouvoir répondre aux exigences croissantes des règlements thermiques dans la construction.

I.8.1.1. Les matériaux bio-sources

Les matériaux bio-sources sont de plus en plus étudiés et leur industrialisation se développe de manière remarquable.

I.8.1.2. Enjeux et intérêts des matériaux bio-sources

Le secteur de la construction est un des principaux contributeurs aux impacts sur l'environnement. Il est donc indispensable d'agir pour réduire ces impacts, en particulier ceux du secteur du bâtiment. Les règlements thermiques, d'exigence croissante, se sont ainsi imposés en définissant un ensemble de critères que les bâtiments doivent satisfaire. La notion d'écoconstruction

est donc apparue et le matériau de construction doit évoluer pour faire face à ses exigences. Le recours à des matériaux avec des constituants d'origine végétale, comme les matériaux dits bio-sources, est, par conséquent, une solution à explorer et à valider [14].

I.8.1.3. Intérêts des matériaux bio-sources

Comme son nom l'indique, un matériau bio-source est composé d'un ou plusieurs matériaux d'origine végétale. Un rapport du CSTB [15]. Pour le compte de l'Ademe indique que l'utilisation des matériaux et produits d'origine végétale permet de mieux répondre aux préoccupations environnementales, sanitaires et sociales.

L'utilisation des matériaux bio-sources dans la construction présente donc des enjeux environnementaux. De par leur origine végétale, les matériaux bio-sources présentent des avantages environnementaux non négligeables. En effet, ces matériaux contribuent à limiter l'épuisement des ressources finies en exploitant en alternative des ressources renouvelables issues le plus souvent des sous-produits d'autres filières (agriculture, industrie du bois, produits d'entretien des forêts,...). Ils permettent également de fixer le carbone limitant ainsi les émissions de CO₂. En outre, ces matériaux se basent le plus souvent sur une production locale, limitant d'autant l'impact environnemental lié au transport.

De plus, les matériaux bio-sources sont de bons isolants thermiques et incluent une faible énergie grise « *L'énergie grise d'un matériau est l'ensemble des dépenses énergétiques nécessaires pour son extraction, sa transformation, son conditionnement et son transport jusqu'au lieu du chantier (Conteville et den Hartigh [16]).* » (Voir tableau I.1). Leur utilisation comme matériaux de construction est par conséquent un moyen efficace pour diminuer les dépenses énergétiques du bâtiment durant sa durée de vie.

Tableau I.1 – Comparaison de la conductivité thermique et de l'énergie grise de quelques matériaux utilisés en construction (source : CSTB [15]).

Matériau	Densité	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Énergie grise (kWh.m ⁻³)
Laine de roche	20	0,05	123
Laine de verre	18	0,044	242
Laine de chanvre	20 à 40	0,041	48
Béton de chanvre	350 à 450	0,11 à 0,18	90
Brique de chanvre	300 à 330	0,07 à 0,075	200 MJ.m ⁻² (mur de 20 cm)

Le recours aux matériaux bio-sources satisfait en outre les préoccupations sanitaires. Les matériaux bio-sources sont constitués de matières premières n'émettant pas de substances cancérigènes ni de gaz polluants. Ils peuvent donc être utilisés comme alternative aux risques d'allergies liés à certains produits de la pétrochimie (solvants organiques par exemple) ou à certains matériaux minéraux (laine de verre, laine de roche par exemple). En plus, grâce à sa perméabilité à l'air et à sa faible conductivité thermique (voir tableau I.1), le matériau bio-source se caractérise par un bon comportement hygrothermique. Ainsi, il garantit une régularisation de l'humidité et le maintien d'un confort thermique à l'intérieur du bâtiment. Cette bonne capacité de gestion de l'humidité permet d'éviter le développement de moisissures et de champignons (Conteville et den Hartigh [16]).



Par ailleurs, les matériaux bio-sources sont utilisés pour des enjeux sociaux. Les matériaux bio-sources se basent le plus souvent sur des ressources locales. Par conséquent, leur utilisation contribue au développement de l'économie régionale. L'extraction et la transformation des matières végétales valorisent les métiers et les savoir-faire locaux, faisant de cette filière un créateur d'emplois locaux. De plus, la valorisation des sous-produits pour en faire des matériaux de construction crée de nouveaux marchés et débouchés pour les producteurs de ces sous-produits. Ces débouchés assurent aux agriculteurs, par exemple, des revenus supplémentaires leur permettant d'améliorer davantage leur production. De ce fait, les matériaux bio-sources favorisent le maintien du tissu agricole.

I.8.2. Identification des bétons végétaux

I.8.2.1. Morphologie

Les bétons végétaux sont dans le cas général des bétons caverneux. On appelle béton caverneux tout béton à base de granulats normaux ou légers dans lequel on a supprimé, en totalité ou en partie, le sable et une partie du liant qui aurait été nécessaire à l'enrobage de ce sable [17]. Le matériau obtenu présente ainsi un volume de vide (porosité) très important. Cette porosité est généralement classée en deux catégories :

La porosité intra-phase (phase = granulats ou liant) qui représente l'ensemble des vides dans le liant et les particules végétales, et la porosité macroscopique (appelée aussi porosité inter-granulaire) qui représente les vides entre les empilements, créés par l'arrangement imparfait des particules, lorsque la quantité de liant n'est pas suffisante pour combler complètement ces vides. La porosité intra-phase peut être microscopique ou mésoscopique. (La figure I.2) illustre ces porosités dans le cas des bétons de chanvre.

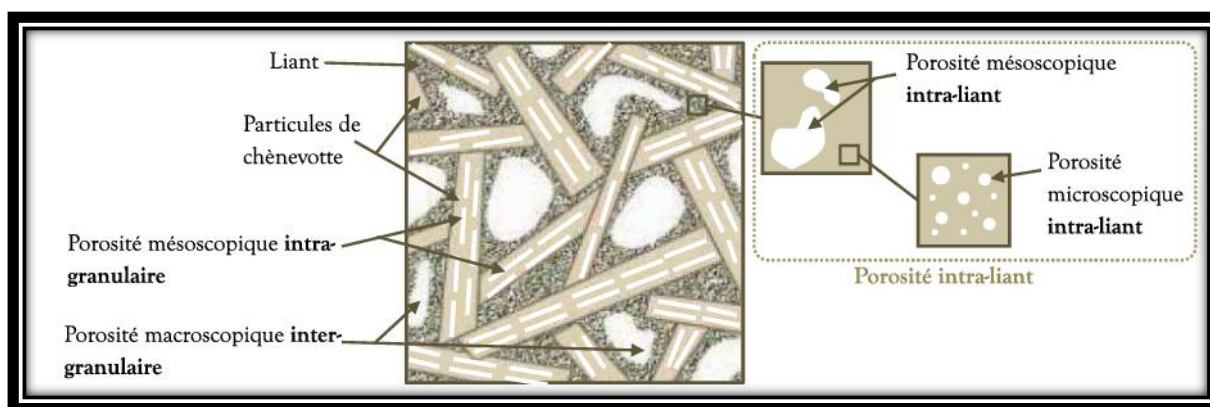


Figure I.2 - Illustration des différentes porosités des bétons végétaux : cas du béton de chanvre (Nozahic [18]).

I.8.2.2. Fibre ou granulat

Pour distinguer les fibres végétales des granulats végétaux, on peut en première approche se référer à leurs sources. Une étude effectuée par le FRD (Fibre Recherche Développement) pour l'Ademe (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) [19].

Propose la sémantique suivante : la fibre végétale est obtenue à la fin du processus de défibrage et/ou affinage, avec une longueur moyenne de l'ordre du dm (fibre décimétrique, filasse de lin), du cm (fibre centimétrique, étoupes de lin, fibres de chanvre) ou du mm (fibre millimétrique). La plupart des fibres végétales mesurent entre 10 et 150 mm pour un diamètre de 10 à 50 μm . Les

granulats, quant à eux, sont issus de la séparation post-décortication ou post-affinage, ils correspondent aux parties ligneuses de la tige (ou moelle) et leur granulométrie (millimétrique à centimétrique) dépend de la plante défibrée, du processus utilisé et de la demande des clients. (La **figure I.3**) résume cette sémantique.

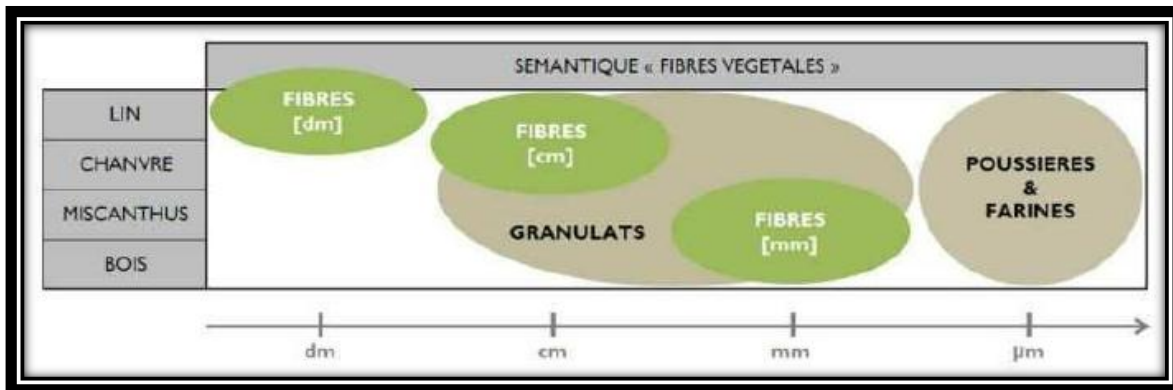


Figure I.3 – Différence entre les fibres et les granulates d'origine végétale [19].

Il est à noter que d'autres fibres végétales citées dans la littérature présentent des dimensions différentes de celles proposées par le FRD, comme les fibres de sisal (diamètre de 80 à 300 µm, Toledo Filho et al. [20]) ou les fibres de noix de coco (diamètre de 150 à 530 µm, Toledo Filho et al. [20]) par exemple. À noter aussi que les granulates végétaux peuvent aussi provenir des processus industriels autres que la séparation post-décortication (granulates de bois provenant des déchets de l'industrie de bois ou des produits d'entretien des forêts par exemple).

Les fibres végétales sont utilisées pour leur fonction de renfort. Noyée dans une matrice, la fibre reprend les charges qui lui sont transmises par la matrice. Pacheco-Torgal et Jalali [21], indiquent que l'utilisation des fibres végétales pour remplacer les armatures en acier ou les fibres synthétiques dans la construction permet d'améliorer son bilan environnemental.

L'incorporation des fibres végétales dans le béton permet ainsi d'améliorer la résistance en traction, la ductilité ou encore le comportement post fracture du béton élaboré (Amziane et Arnaud [22]). Plusieurs recherches ont été réalisées pour étudier les propriétés des bétons incorporant des fibres végétales comme renfort (ex. Al-Oraimi et Seibi [23]). Ces études montrent que les performances des bétons renforcés par des fibres végétales dépendent de la nature des fibres et de leurs dimensions.

Les granulates végétaux sont utilisés comme charges dans le béton. Leur rôle dans cette utilisation est de modifier les propriétés des bétons, en particulier les propriétés thermiques et/ou la densité. Les fibres végétales peuvent aussi être employées pour cette fonction, mais selon l'étude de FRD [19], uniquement les granulates végétaux sont utilisés dans le béton en France.

I.9. COMPOSITES A MATRICE CIMENTAIRE

Les composites à matrice cimentaire regroupent l'ensemble des composites constitués par des particules végétales liées par une matrice à base de ciment. Le liant peut être uniquement du ciment ou parfois associé à des additions fines. Parmi ces composites, nous pouvons citer les exemples suivants :

I.9.1. Béton de pulpe de betterave (Monreal [24])

La pulpe de betterave est un coproduit de l'industrie de l'extraction du sucre. Ce coproduit est généralement valorisé dans l'alimentation animale à faible bénéfice.

Avec l'objectif de trouver d'autres voies de valorisation, la possibilité d'élaborer un béton contenant des pulpes de betterave comme charges a été étudiée. Les résultats de cette étude ont révélé deux difficultés : l'instabilité dimensionnelle due au caractère hydrophile des pulpes de betterave et le retard de prise du liant utilisé. Pour résoudre ces problèmes, différents traitements des pulpes ont été testés. Le traitement par enrobage des pulpes avec du ciment ou de l'huile de lin permet d'élaborer un béton présentant de bonnes performances mécaniques, thermiques et hydriques.

I.9.2. Béton de miscanthus (Acikel [25]) : le miscanthus est utilisé comme source potentielle pour la production de bioéthanol. Cette production se base sur la saccharification enzymatique de la cellulose en sucres fermentescibles. Ce processus génère des coproduits qu'il convient de valoriser. L'incorporation de ces coproduits dans une matrice cimentaire permet d'élaborer un béton léger. Cette incorporation induit un retard de prise important et une baisse des propriétés mécaniques. L'utilisation d'un accélérateur de prise permet de diminuer le temps de début de prise et le béton ainsi élaboré présente une bonne adhérence ciment/granulats et de bonnes propriétés mécaniques.

I.9.3. Béton de diss (Merzoud et Habita [26]) : Le diss est une plante fibreuse autrefois utilisée dans la construction (habitations anciennes de la région méditerranéenne). Cette espèce végétale, présente à l'état sauvage en quantité importante sur le pourtour méditerranéen, n'a pas de valorisation technologique considérable. Son utilisation dans un composite cimentaire a été étudiée. Sans aucun traitement, les particules de diss présentent des substances inhibitrices (sucres, pectines,...) qui retardent le phénomène d'hydratation et, par conséquent, diminuent la cohésion du matériau. Un traitement thermique par de l'eau bouillante permet de limiter cet effet retardateur. Grâce à ce traitement, les propriétés mécaniques de béton de diss ont été améliorées.

I.9.4. Béton de bois (Mougel [27], Ledhem [40], Bederina et al. [34]...) : différentes essences de bois ont été explorées pour élaborer des bétons de granulats de bois : le sapin, le hêtre, le pin maritime, l'épicéa, le bambou,... Certaines de ces essences sont plus compatibles avec le ciment que d'autres. Les granulats de bois proviennent généralement de scierie et des déchets de bois. Un traitement de la surface des granulats semble nécessaire pour améliorer leur stabilité dimensionnelle et leur compatibilité avec le ciment. Pour les granulats de bois, par exemple, commercialisés par Agresta (sous le nom d'Agreslith-C), un traitement physico-chimique et thermique est réalisé. Pour augmenter les propriétés mécaniques et limiter les variations dimensionnelles des bétons de granulats de bois, certains auteurs ont modifié la matrice en y ajoutant des additions fines. Ainsi, les composites contenant des argiles ou des agrégats siliceux par exemple ont été étudiés. Grâce à ces additions, les performances du composite ainsi fabriqué ont été améliorées.

Les exigences relatives aux bétons de bois préfabriqués sont fixées par les normes NF EN 15498 et NF EN 14474.

I.10. COMPOSITES A BASE DE CHAUX

La matrice utilisée dans ces composites est composée d'un mélange de chaux aérienne et de chaux hydraulique dans des proportions variables. Le liant le plus utilisé dans la littérature porte le nom de Tradical PF 70. Les deux principaux composites incorporant les particules végétales dans une matrice à base de chaux sont :



I.10.1. Béton de chanvre

(Cérézo [28], Collet et al. [47], Elfordy et al [38]) le chanvre est une plante annuelle cultivée pour sa tige fibreuse et ses graines. Les composants de la tige sont séparés par défibrage mécanique. Les fibres sont utilisées dans le textile et la corderie, et la chènevotte est principalement utilisée comme litière pour animaux. La recherche d'autres débouchés de la chènevotte a conduit à son utilisation comme granulats dans le béton. La particularité des granulats de chanvre est qu'ils peuvent être utilisés sans aucun traitement de leur surface. Cependant, les propriétés mécaniques des bétons de chanvre sont faibles par rapport à des bétons à matrice cimentaire. Le compactage des bétons lors de leur fabrication est une solution proposée pour surmonter cette limite. Les bétons de chanvre ont été largement étudiés ces dix dernières années. Les résultats des recherches sur ces bétons ont donné naissance aux règles professionnelles de construction en chanvre (Association construire en chanvre [29]).

I.10.2. Béton de moelle de tournesol (Magniont) [30] : le tournesol est une plante largement cultivée pour ses graines riches en huile alimentaire de bonne qualité. La tige de tournesol est valorisée dans le sol pour son apport humique et minéral. L'apport minéral de la moelle est toutefois faible (Vandenbossche Marechal [31]) et sa valorisation en tant que granulats dans le béton est étudiée. La matrice utilisée dans ces études est un mélange de chaux hydraulique et de métakaolin. Un adjuvant d'origine végétale est parfois employé. Les propriétés des bétons de moelle de tournesol étudiés semblent prometteuses.

I.11. DIFFERENTES UTILISATIONS DES BETONS VEGETAUX

Les bétons végétaux se caractérisent par de faibles propriétés mécaniques. Cette caractéristique limite principalement leur utilisation à des structures non porteuses, ayant pour objectif d'exploiter leur comportement thermo-acoustique ou leur légèreté. Il est toutefois nécessaire de s'assurer du caractère autoporteur des structures fabriquées par ces bétons, leur permettant de supporter leur poids propre. Les différentes utilisations sont les suivantes :

Dans les murs non porteurs et les cloisons, les bétons végétaux sont utilisés pour leur légèreté et leur performance thermique. Leur résistance mécanique est suffisante pour ce type de structure. La technique de fabrication la plus répandue est la préfabrication.

La légèreté du béton végétal permet de fabriquer des blocs, briques ou parpaings de dimensions plus importantes que celles de leurs équivalents en béton traditionnel, ce qui assure une mise en place rapide et améliore la productivité. De plus, le traitement de points particuliers d'un bâtiment (tels que les angles par exemple) est facilité par le fait que les blocs puissent être sciés.

Pour des dallages sur terre plein ou des planchers d'étage, les bétons végétaux sont utilisés pour leurs performances thermiques et phoniques. Ils permettent d'assurer des séparations entre étages très confortables et plus légères que les séparations traditionnelles.

On peut donc les utiliser pour les hourdis (qui jouent le rôle d'un coffrage perdu) ou en préfabrication des dallages. Le caractère clouable et vissable des éléments facilite leur mise en œuvre.

Le béton végétal est aussi utilisé pour le remplissage des parois d'une ossature en bois (technique dite de banchage). Dans cette application, il ne joue donc pas de rôle porteur et son avantage réside dans ses propriétés d'isolation thermique et phonique ainsi que dans sa légèreté. Le béton est versé généralement entre des banches en bois et compacté manuellement. On peut aussi utiliser des blocs présentant des réservations pour les ossatures.

Le béton végétal est également un matériau bien adapté pour une utilisation en réhabilitation du patrimoine. Les chapes et les dalles isolantes sur planchers existants permettent d'améliorer la résistance thermique conductive « *La résistance thermique conductive (en K/W) d'un élément exprime sa résistance au passage d'un flux de conduction thermique. Elle est inversement proportionnelle à la conductivité thermique.* » Et donc de favoriser les économies d'énergie. Ce type de matériaux est adapté à ce type d'application du fait de sa facilité de mise en œuvre par pompage ou simple coulage, de sa légèreté et de ses comportements acoustique et hygrothermique.

Du fait de ses bonnes capacités acoustiques, le béton végétal permet d'assurer la fonction principale des structures anti-bruits. Les éléments de ces structures peuvent être constitués d'une partie en béton végétal qui leur apporte le comportement acoustique, associée à des ossatures en béton traditionnel ou métalliques pour en assurer la résistance.

L'intérêt de ces structures vis-à-vis de murs anti-bruits plus traditionnels réside dans le gain de productivité lié à l'usinabilité et à la préfabrication.

I.11.1. Propriétés des bétons végétaux

Les bétons végétaux sont multiples et ont des utilisations diversifiées. La diversité des particules utilisées est à l'origine de la différence des propriétés de ces bétons. La méthode de formulation, le processus de fabrication et les techniques de caractérisation ne sont pas identiques d'une étude à l'autre.

I.11.2. Formulation des bétons végétaux

Pour remplir ses fonctions d'usage, un béton végétal nécessite d'être bien formulé. L'exercice de formulation consiste à choisir les proportions de chaque constituant du béton pour que ce dernier ait des propriétés finales spécifiques. Pour les bétons végétaux, cet exercice est très complexe notamment du fait d'une maîtrise partielle des propriétés des particules végétales. Il est à noter qu'il n'existe actuellement aucune méthode définissant les caractéristiques des particules à utiliser, leur processus d'élaboration, ou le liant qui leur est le plus adapté. Cette absence quasi-totale de préconisations concernant la caractérisation des constituants d'un béton végétal est due à un manque de normes définissant les paramètres à prendre en compte lors de la formulation. Ce manque de normes résulte d'un manque d'études détaillées sur ce sujet.

Plusieurs études ont toutefois été effectuées pour identifier et comprendre l'ensemble des paramètres influant sur les propriétés finales des bétons végétaux. Cependant, la grande variété de particules végétales employées, issues de plantes variées, ne favorise pas la mise en place de règles de formulation communes à tous les bétons végétaux. Il semble donc nécessaire de définir pour chaque type de particules un niveau d'exigence à atteindre pour permettre son utilisation pour un usage de béton spécifié [14].

I.11.3. Propriétés des particules végétales

Nous rappelons d'abord que le recours aux bétons végétaux se justifie par leur capacité à répondre aux préoccupations environnementales, sanitaires et sociales. Le choix d'un type de particules végétales doit respecter ces critères. Ainsi, les particules à utiliser dans le béton végétal doivent avoir les caractéristiques suivantes.

La particule végétale doit être chimiquement inerte vis-à-vis du liant. Elle ne doit donc pas contenir des substances pouvant mettre en cause l'hydratation et la prise du liant. On parle ainsi de la compatibilité entre le liant et la particule végétale lorsque la prise de ce liant n'est pas ou peu perturbée par la présence de cette particule (Jorge et al.) [32]. Mougel [27] a étudié l'association d'une matrice cimentaire avec différentes essences de bois. Ses résultats montrent que le ciment est plus compatible avec le sapin et l'épicéa en comparaison avec le chêne, le hêtre ou le pin. Cérézo

[28], a rapporté qu'en associant les granulats de chanvre avec une matrice cimentaire, seule une fine épaisseur se solidifie en surface de l'éprouvette fabriquée. Le ciment et le chanvre ne sont donc pas compatibles. L'effet inhibiteur que certaines particules végétales ont sur l'hydratation du liant est dû d'une part à leur teneur en extractibles (sucres libres, les tanins), et d'autre part au comportement de végétal en milieu alcalin (Jorge et al.) [32].

La particule végétale doit en outre se caractériser par une bonne adhérence avec le liant. La nature des liaisons à l'interface particule végétale/liant conditionne en effet les propriétés mécaniques du béton. Merzoud et Habita [26] indiquent que l'absence d'adhérence des fibres de diss à la pâte de ciment induit une chute des modules élastiques du composite étudié. Nguyen [33]. A rapporté que les propriétés mécaniques d'un béton de chanvre avec des granulats fibrés sont faibles par rapport à celles d'un béton de chanvre à granulats non fibrés. Une des raisons de cette différence est, selon l'auteur, la faible adhérence du liant aux granulats fibrés. L'adhérence entre la particule végétale et le liant peut toutefois être améliorée en traitant la surface des particules (Bederina et al) [34].

La particule végétale doit aussi avoir une résistance mécanique suffisante. La résistance mécanique du béton végétal est certes conditionnée par la qualité du liant, mais le comportement après la rupture de liant dépend des caractéristiques mécaniques de la particule. Après l'endommagement de la matrice du liant, les particules végétales reprennent presque l'ensemble des sollicitations, et le comportement du béton est, à partir de ce stade, celui des particules compactées (Nguyen) [33].

Une autre caractéristique importante de la particule végétale est son comportement hygrothermique. La conductivité thermique de la particule végétale et son comportement vis-à-vis de l'eau (liquide ou vapeur) sont deux paramètres importants dont dépend la qualité hygrothermique (diffusion de la chaleur et de l'humidité) du béton végétal. Or l'utilisation d'un béton végétal permet d'améliorer la performance hygrothermique du bâtiment (Tran Le) [35]. Le comportement de la particule végétale vis-à-vis de l'eau peut aussi influencer le comportement mécanique du béton végétal. En comparant le béton de granulats de chanvre et le béton de granulats de la moelle de tournesol, Magniont [30]. Constate que le béton de moelle de tournesol présente des propriétés mécaniques supérieures à celles du béton de chanvre. La différence, selon l'auteur, s'explique par la différence du coefficient d'absorption des granulats. Le faible coefficient d'absorption de la moelle de tournesol permet de formuler un béton avec moins d'eau et donc une pâte moins poreuse. Enfin il ne faut pas négliger la disponibilité des particules végétales près du lieu de leur utilisation. Minimiser la distance du transport permet en effet d'améliorer le bilan environnemental du béton végétal, mais aussi de réduire son coût de revient.

I.11.4. Propriétés du liant

Le choix d'un liant à mélanger avec les charges végétales est à la fois important et complexe en raison du caractère hydrophile de ces charges. Dans le cas du béton de chanvre, Bouloc et al. (Cité par Nguyen [33]) rapportent que le choix du liant doit répondre aux exigences suivantes :

- Le liant choisi doit permettre un malaxage aisé des différents constituants de telle sorte à avoir un mélange homogène avec un bon enrobage des particules par le liant.
- Il doit se caractériser par de bonnes propriétés à l'état frais. Le comportement du béton frais conditionne sa mise en œuvre correcte dans la structure. Ce béton doit en fait garder son homogénéité tout au long du processus de mise en œuvre.
- Enfin, ses caractéristiques mécaniques après prise doivent être suffisantes pour assurer au béton végétal d'avoir les performances requises.

Ces trois exigences peuvent être généralisées pour tout type de particules végétales. La question de compatibilité dont nous avons parlé dans les propriétés des particules végétales est aussi à prendre en compte.

I.11.5. Mise en œuvre des bétons végétaux

Les bétons végétaux peuvent être mis en œuvre manuellement dans un chantier. Pour construire un mur sur une ossature en bois par exemple, la technique de banchage peut être utilisée. Cette technique consiste à faire un coffrage avec des banches généralement en bois, et ensuite couler le béton par couches successives. La mise en place manuelle du béton végétal est toutefois lente et son application est conditionnée par une teneur en eau importante dans le béton. Cette quantité importante d'eau induit des temps de séchage lents pouvant atteindre plusieurs mois (Hustache et Arnaud [37]). À ces inconvénients s'ajoute la difficulté de contrôler l'homogénéité du béton tout au long du processus de mise en œuvre.

Dans un souci de gain de temps de séchage et de rapidité de fabrication, les bétons végétaux peuvent être mis en œuvre par la technique de projection sur la structure à construire (Elfordy et al.) [38]. Le principe de la technique est de projeter le béton sur une banche grâce à un équipement de projection (voir figure I.4).

Cette technique présente l'avantage de n'ajouter que l'eau nécessaire à l'hydratation de liant, accélérant ainsi la cinétique de prise et limitant considérablement le temps de séchage (Elfordy et al.) [38]. Nécessitant du matériel spécial, cette méthode de mise en œuvre est destinée à des professionnels.

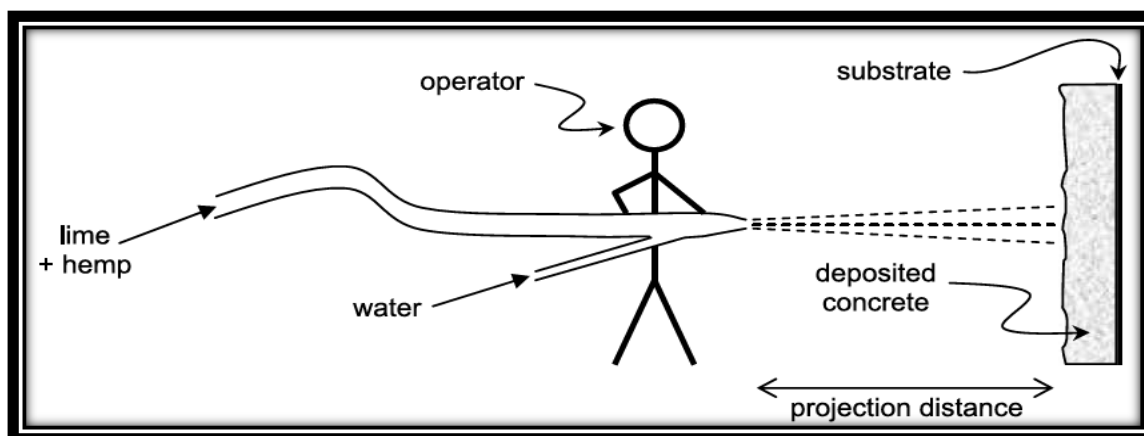


Figure I.4 – Principe de mise en œuvre d'un béton végétal par la technique de projection (Elfordy et al.) [38].

L'autre solution possible pour mettre en œuvre les bétons végétaux est la préfabrication. Il s'agit de se servir d'éléments préfabriqués en béton végétal. La préfabrication permet une mise en place rapide et un meilleur contrôle de la qualité des éléments fabriqués (homogénéité de la fabrication et donc des propriétés des éléments fabriqués). Elle permet aussi d'éviter les composés volatils sur chantier.

I.11.6. Propriétés mécaniques, thermiques et hydriques des bétons végétaux

Il est important de signaler les différentes propriétés des bétons végétaux étudiées dans la littérature. Ces propriétés sont classées en trois catégories : mécaniques (regroupant le comportement mécanique, les résistances et les modules), thermiques (transfert de chaleur) et hydriques (comportement vis-à-vis de l'eau).

L'étude du comportement mécanique des bétons végétaux est généralement effectuée à travers les propriétés suivantes : la résistance en compression, les propriétés élastiques et la résistance en flexion. Le comportement mécanique (courbes contraintes/déformations) des bétons végétaux en compression est peu décrit dans la littérature. Cérézo [28]. Distingue deux zones sur la courbe contraintes/déformations : zone pré-pic de contrainte et zone post-pic (voir figure I.5). La zone pré-pic commence par une partie élastique linéaire puis la courbe présente une inflexion traduisant une fissuration progressive du liant. Dans cette zone pré-pic le liant reprend la majorité du chargement. Après le pic, le liant est détérioré et les particules de chanvre reprennent le chargement. L'auteur indique que pour le béton peu dosé en liant, le pic est difficile à distinguer au jeune âge.

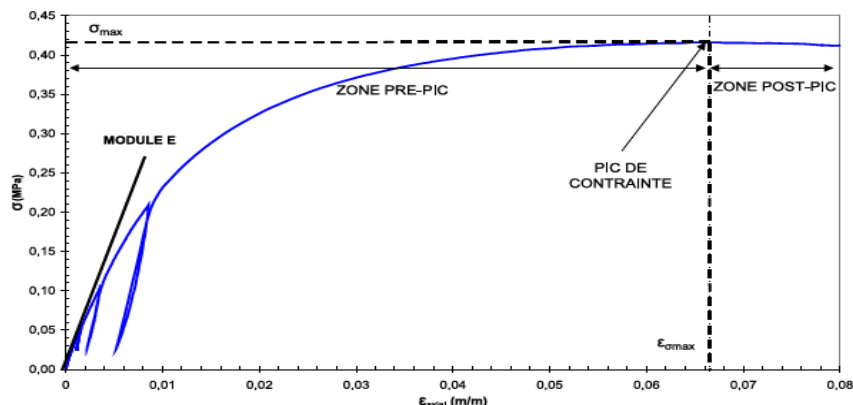


Figure I.5 – Courbe contraintes/déformations de l'essai de compression sur le béton de chanvre (Cérézo [28]).

Nguyen [33] a étudié le comportement du béton de chanvre compacté. Selon lui, le comportement est au début de l'essai homogène élastique, puis la matrice de liant s'endommage. Les contraintes sont ensuite réparties dans les particules de chanvre qui se compactent jusqu'à rupture éventuelle de l'éprouvette.

Il est rapporté par plusieurs auteurs que l'augmentation du dosage en liant conduit à des propriétés mécaniques élevées. Ce résultat s'explique par le fait que le liant est majoritairement à l'origine des propriétés mécaniques des bétons végétaux. Le compactage du béton végétal lors de sa fabrication est aussi un paramètre qui permet d'augmenter ses propriétés mécaniques, comme l'a montré Cérézo [28]. Et Nguyen [33]. Le compactage entraîne en effet une diminution de la porosité inter-granulaire du béton, améliorant ainsi ses performances mécaniques. Le (tableau I.3) illustre quelques propriétés mécaniques de certains bétons végétaux.

De ce tableau, nous pouvons déduire que la résistance en compression est la propriété la plus étudiée pour les bétons végétaux. Le module de Young et la résistance en flexion nécessitent encore d'être explorés. Par ailleurs, les propriétés mécaniques des bétons végétaux sont faibles par rapport à celles d'un béton traditionnel. Boustingorry [39]. A proposé une explication de cette modestie des propriétés mécaniques. L'auteur a observé que le retrait du bois pendant le séchage entraîne l'endommagement de l'interface, comme nous pouvons le voir sur la (figure I.6).

Tableau I.2 Quelques propriétés mécaniques des bétons végétaux : résistances en compression R_c et en flexion R_f et module de Young E .

Matériau	Densité (kg.m ⁻³)	R_c (MPa)	R_f (MPa)	E (MPa)	Référence
Béton de betterave	800	1,4-2,1	0,1-0,2	-	[16]
Ciment-argile-bois	850-1120	8,5-12,7	1,5-5	-	[40]
Ciment-argile-bois	620-1280	3-9,5	-	-	[48]
Ciment-argile-sapin	1000-1200	4-8	-	-	[27]
Béton de chanvre	250-660	0,25-1,15	-	4-160	[28]
Béton de bois	890-1400	8-32	-	2000-8500	[41]
Anas de lin agroliné	263-570	3,6-5,8	0,12-3,9	-	[42]

I.11.7 Propriétés thermiques

La propriété thermique des bétons végétaux la plus étudiée dans la littérature est la conductivité thermique. Cette propriété traduit la capacité du matériau à transférer de la chaleur. La conductivité thermique s'exprime par le flux de chaleur traversant en une seconde 1 m² de surface et un mètre d'épaisseur du matériau pour un degré d'écart entre les surfaces d'entrée et de sortie.

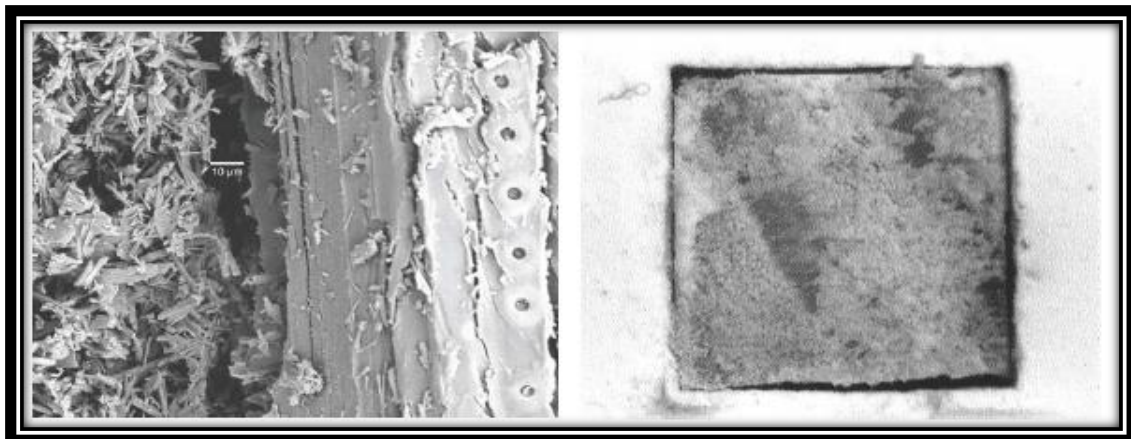


Figure I.6 – Endommagement de l'interface matrice/renfort observé par Boustingorry [39] dans un composite à matrice gypse et renfort bois.

Les études s'accordent à dire que la conductivité d'un béton végétal diminue lorsque la quantité des particules végétales augmente et donc lorsque la densité du béton diminue (Cérézo, Elfordy, par exemple)... [28][38]. Certains auteurs (Magniont, Pham et al.) [36] [44] rapportent que cette évolution est quasi-linéaire, comme illustré sur la (figure I.7). Ce comportement est dû au fait que la conductivité des particules végétales est inférieure à celle du liant. En outre, la conductivité thermique des bétons végétaux augmente en même temps que l'humidité relative du milieu ambiant, et donc de la teneur en eau du béton (Cérézo, Evrard)... ([28] [43]). Le caractère poreux (condensation de l'eau dans les pores) des particules végétales est à l'origine de ce résultat.

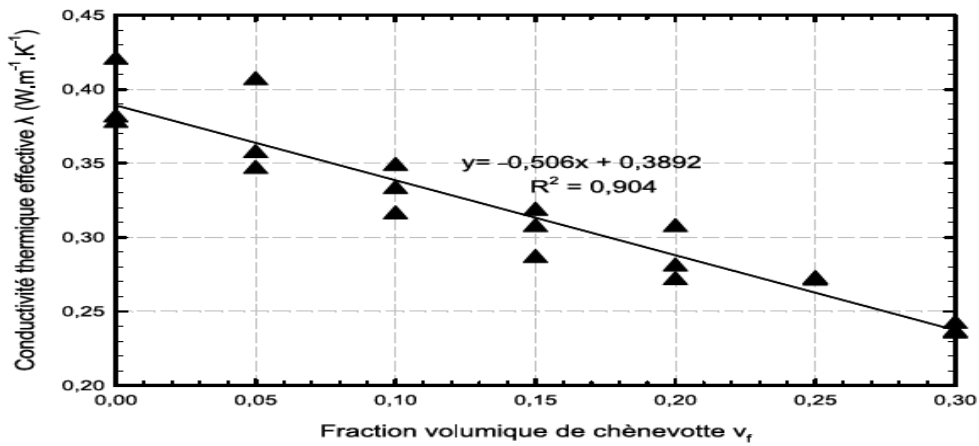


Figure I.7 – Conductivité thermique du béton de chanvre en fonction de la fraction volumique des particules de chanvre (Pham et al.) [44].

Par ailleurs, le compactage des bétons végétaux modifie le comportement thermique de ceux-ci. (Tronet et al.) [45] ont rapporté que le compactage du béton de chanvre n’induit pas d’augmentation significative de sa conductivité thermique. La conductivité thermique des particules (constituant le moins isolant) est augmentée par le compactage, mais selon les auteurs, cette augmentation est compensée par la diminution de la quantité du liant (constituant le plus isolant). En revanche, sous l’effet du compactage, une anisotropie de la conductivité du béton a été observée (Tronet et al.) [45]. La conductivité est environ deux fois plus faible dans la direction de compactage (direction verticale) que dans la direction perpendiculaire au compactage (direction horizontale), comme nous pouvons le voir sur la (figure I.8). Cette anisotropie est associée à l’orientation préférentielle des particules végétales dans la direction horizontale. Ainsi, l’utilisation des bétons végétaux compactés doit être réalisée dans la direction de compactage pour optimiser leur potentiel d’isolation.

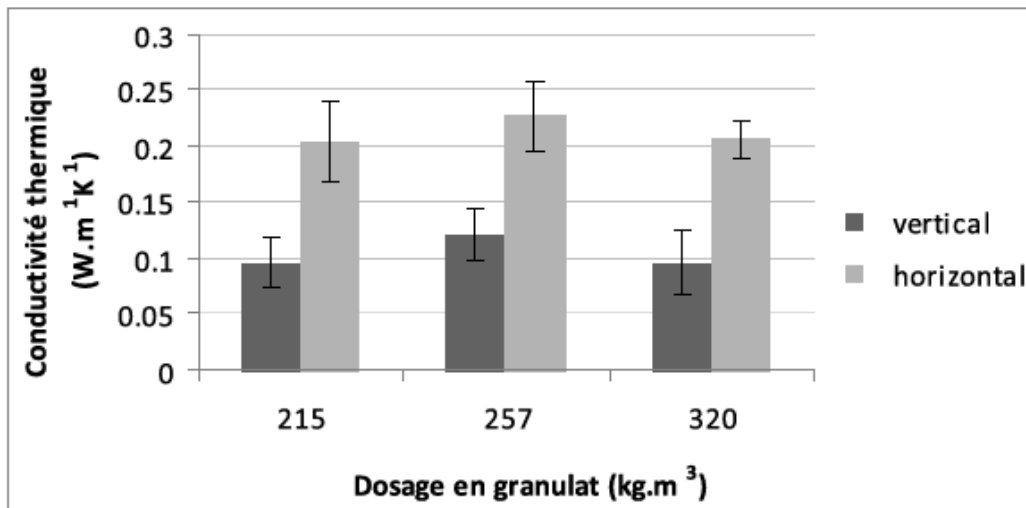


Figure I.8 – Anisotropie de la conductivité thermique du béton de chanvre compacté : la direction verticale représente la direction de compactage (Tronet et al.) [45].

En plus de la conductivité thermique, certains auteurs ont étudié la capacité thermique, la diffusivité thermique et l’effusivité thermique. La capacité thermique caractérise l’aptitude du matériau à stocker et restituer l’énergie sous forme de chaleur. Bouguerra [46] a rapporté que la capacité thermique du composite ciment-argile-bois augmente lorsque la teneur massique en bois augmente. Sa valeur dépasse $1400 J.kg^{-1}.K^{-1}$ pour le composite sec ayant 50 % de teneur massique

en bois. (Evrard [9]) a indiqué que la capacité thermique du béton de chanvre, tout comme sa conductivité thermique, augmente avec l'humidité relative.

La diffusivité thermique représente la vitesse de diffusion d'un flux de chaleur au sein du matériau. Plus elle est petite, plus le matériau s'échauffe ou se refroidit rapidement. Elle est proportionnelle à la conductivité thermique et inversement proportionnelle à la capacité thermique. L'effusivité thermique exprime l'aptitude du matériau à stocker ou à restituer de la chaleur. Elle croît avec la conductivité et la capacité thermique. (Bouguerra [46]) a montré que la diffusivité et l'effusivité du composite ciment-argile-bois diminuent avec sa teneur en bois. Pour le béton de chanvre, (Elfordy et al [38]) ont signalé que sa diffusivité et son effusivité thermique sont constantes lorsque l'humidité relative est au-dessous de 90 %.

I.11.8. Propriétés hydriques

Les bétons végétaux se caractérisent dans le cas général par une porosité élevée qui favorise l'isolation thermique. Cependant, ces bétons sont sensibles à l'eau en raison de cette porosité. Le caractère poreux des bétons végétaux explique leur capacité à échanger de l'humidité avec le milieu environnant. Le paramètre utilisé pour caractériser cette humidité dans les bétons végétaux est la teneur en eau. Elle est définie par la quantité d'eau contenue dans le béton rapportée à la masse de celui-ci à l'état sec. Une augmentation (respectivement diminution) de l'humidité relative de l'air environnant un béton végétal conduit à une augmentation (respectivement diminution) de la teneur en eau de celui-ci. On parle alors d'adsorption (respectivement désorption). Ces deux phénomènes sont caractérisés par la courbe d'adsorption-désorption. La (figure I.9) montre deux exemples de courbes d'adsorption-désorption du béton de bois obtenues par (Bouguerra et al) [46].

Ces courbes présentent une hystérésis signifiant que la relation qui lie la teneur en eau à l'humidité relative dépend du sens de l'évolution de cette dernière. La reprise d'eau par le béton de bois est faible lorsque l'humidité relative varie entre 0 et 75 %, et plus importante au delà. L'hystérésis de la courbe a été également observée sur les bétons de chanvre (Collet et al, Cérézo) [47] [28].

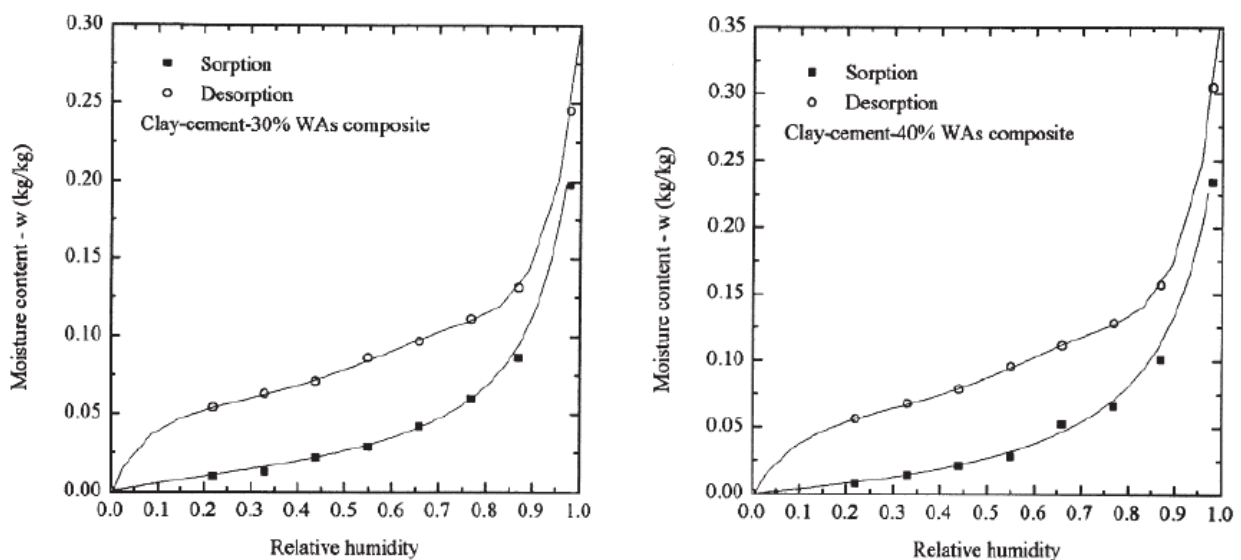


Figure I.9 – Courbes d'adsorption-désorption des composites argile-ciment-bois (adaptées de Bouguerra et al.) [46].

La sensibilité des bétons végétaux à l'humidité se traduit par des variations dimensionnelles accompagnant les variations de l'humidité relative. Ces variations dimensionnelles peuvent atteindre 10 mm.m^{-1} pour les bétons de granulats de bois (Pimienta et al.) [48].

I.11.9. Durabilité des bétons végétaux

La durabilité d'un béton végétal peut se définir, selon (Pacheco-Torgal et Jalali) [21], par sa capacité à résister à la fois aux dommages internes (compatibilité entre ciment et granulats ou fibre, changement de volume,...) et externes (variation de température et d'humidité, attaque de sulfate ou de chlorure,...). En d'autres termes, la durabilité d'un béton végétal indique sa capacité à conserver ses propriétés fonctionnelles au cours du temps, sous les conditions normales d'utilisation. La durabilité est un défi pour un béton végétal constitué de matériaux généralement non compatibles. Étant donné l'absence d'études sur la durabilité des bétons de granulats végétaux, nous ne présentons ici que des études sur la durabilité des bétons à fibres végétales. (Mohr et al) [49] ont étudié un composite de ciment renforcé par de la pâte kraft de bois de conifères soumis à 0, 1, 2, 5, 10, 15 ou 25 cycles de saturation en eau et séchage. Chaque cycle consistait en 23 heures et 30 min de saturation et 23 heures et 30 min de séchage, séparées par 30 min à l'air. Toutes les éprouvettes fabriquées ont été testées en flexion à 78 jours. Les résultats montrent une perte de résistance de 50,8-72,4 % et une chute de ténacité post-pic de 97,5-98,8 % après 25 cycles de séchage/humidification.

La majorité des pertes apparaissent durant les 5 premiers cycles, comme le montre la (figure I.10). Un mécanisme de dégradation progressive en trois étapes a été proposé :

- 1) perte d'adhérence entre les fibres et le ciment en raison du retrait de la fibre pendant le séchage ;
- 2) formation d'hydrates dans les vides créés ;
- 3) fragilisation des fibres par la minéralisation des parois de leurs cellules.

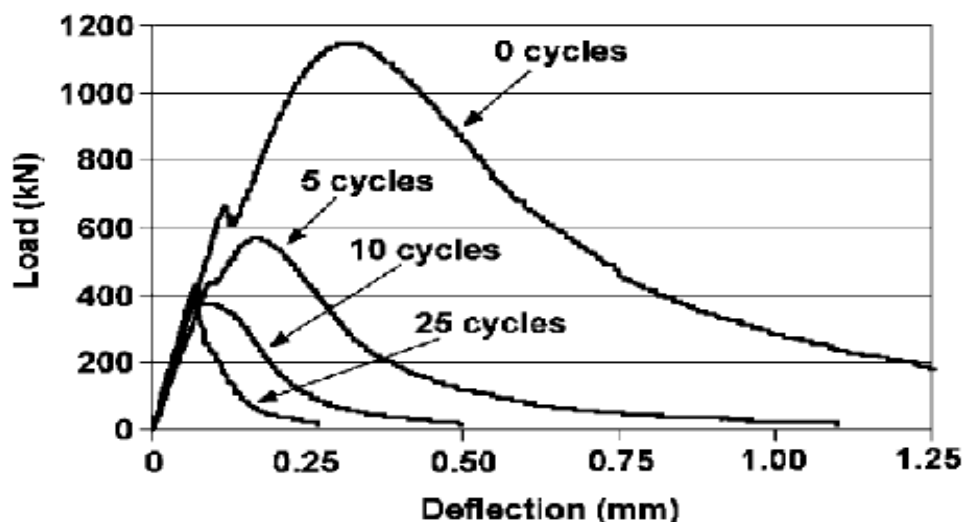


Figure I.10 – Effet de cycles saturation/séchage sur un essai en flexion réalisé sur un composite de ciment renforcé par de la pâte kraft de bois de conifères (Mohr et al.) [49].

Vu que les bétons végétaux sont pas assez expérimentés, et sont en cours d'amélioration, nous rencontrons des obscurités lors de leur production et sa mise en œuvre.

I.11.10 Problèmes techniques et normatifs

La première difficulté de l'utilisation des bétons végétaux, matériaux nouveaux en général, est liée au manque de normes et de règles de mise en œuvre de ces matériaux. Ces normes et règles permettent de garantir les propriétés minimales requises. Pour qu'un matériau de construction soit reconnu par l'ensemble des partenaires de chantier, le détail des performances de ce matériau, les règles de conception et celles de mise en œuvre dans une structure doivent être bien définies (Forêt

Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA) [50]. L'absence de l'un de ces trois éléments constitue une difficulté pour son utilisation.

I.11.11. Optimisation de la composition des bétons

Les méthodes classiques de composition des bétons ne sont pas applicables pour les bétons à granules légers.

Nous avons donc étudié les relations qui existent entre composition en granulats et la masse volumique d'une part et les résistances mécaniques d'autre part. Nous avons fait varier le rapport massique ciment / copeaux secs entre 2 et 9. Les caractéristiques physiques et mécaniques à 28 jours sont reportées dans le (tableau I.3).

Tableau I.3 Evolutions des caractéristiques physiques et mécaniques en fonction du rapport Ciment/Copeaux

Rapport pondéral (C/B)	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance en compression (Mpa)	Résistance en flexion (Mpa)
2	780	6,7	3,6
2,5	795	11,5	3,5
3,0	850	12,0	4,3
3,6	1016	14,6	7,4
5,5	1380	16,4	7,9
7,5	1690	27,0	8,9
9	1780	31,6	9,7

Il est logique que la résistance en compression augmente avec la teneur en ciment. Il en est de même pour la masse volumique, qui varie de 780 à 1800 kg/m³ (limite supérieure admise pour les bétons légers). En revanche, lorsque l'on augmente la quantité relative de ciment (tout en restant inférieur à 4%), la résistance en flexion atteint rapidement une valeur relativement élevée pour un rapport C/B limite de 3,6, puis varie peu.

A partir de ces résultats expérimentaux reliant les caractéristiques mécaniques aux masses volumiques, nous avons fixé le rapport Ciment / Bois à 3, compromis que nous avons choisi pour rester dans le domaine des bétons légers mais avec des résistances correctes [51]

I.11.12. Difficultés liées à la mise en œuvre

Plusieurs études ont montré la nécessité d'utiliser les particules végétales saturées en eau ou d'ajouter, en plus de l'eau nécessaire à l'hydratation du liant, une partie d'eau supplémentaire permettant le pré-mouillage des particules, en particulier lorsque la mise en place est effectuée manuellement. Cette eau de saturation ou de pré-mouillage des particules est majoritairement destinée à être évaporée.

Les temps de séchage des bétons végétaux sont donc plus longs par rapport au béton traditionnel. La technique de projection permet de réduire ce temps de séchage, comme nous l'avons déjà évoqué, mais elle n'est accessible que par les utilisateurs professionnels. En outre, la mise en place de ces nouveaux bétons étant différente de celle utilisée pour le béton traditionnel, elle nécessite donc une main d'œuvre qualifiée et formée aux particularités de ces bétons. Or, la qualité de mise en œuvre conditionne les performances fonctionnelles des bétons végétaux. Le manque actuel de main d'œuvre qualifiée empêche une utilisation plus généralisée de ces matériaux. Le béton de chanvre est le seul béton végétal à faire l'objet de règles professionnelles de mise en œuvre. Des efforts pour généraliser ces règles sont donc nécessaires [14].

I.11.13. Caractérisation thermique et mécanique des bétons végétaux

Les comportements thermique et mécanique des bétons végétaux ont fait l'objet de plusieurs études, Cependant, la caractérisation complète de ces comportements est encore indisponible pour la majorité des bétons végétaux. Du point de vue thermique, il est nécessaire d'explorer comment la conductivité thermique évolue en fonction de la température et de l'humidité relative du milieu extérieur. La connaissance de cette évolution permet en effet d'optimiser l'utilisation de ces bétons. L'évaluation de la capacité thermique, de l'effusivité et de la diffusivité des bétons végétaux est aussi un besoin de caractérisation thermique.

Du point de vue mécanique, la description du comportement des bétons végétaux en compression (relation entre les contraintes et les déformations) n'est effectuée actuellement que par peu d'études. En outre, les propriétés en flexion (résistance et module d'élasticité), la résistance aux charges ponctuelles ainsi que la résistance en traction sont jusqu'à ce jour très peu maîtrisées. Il est à noter que la plupart des essais sont réalisés dans la direction de mise en œuvre (Nozahic) [18]. L'étude de l'effet de la direction de chargement sur les propriétés mesurées n'est pas moins intéressante.

Le manque en terme de caractérisation thermique et mécanique des bétons végétaux se traduit aussi en terme de modélisation. Les modèles de prédiction des propriétés fonctionnelles des bétons végétaux sont très peu nombreux, en particulier pour le comportement mécanique. Une des raisons de cette absence de travaux de modélisation peut être la complexité de ces matériaux et la non maîtrise des paramètres influant sur leur comportement. Des efforts restent donc à faire pour surmonter cet obstacle [14]

I.11.14. Durabilité et comportement à l'eau

Les études concernant la durabilité (dans le sens de pérennité dans le temps) des bétons végétaux incorporant des particules végétales comme charge sont quasi-absentes, comme nous l'avons déjà signalé auparavant. Des recherches visant à apporter des connaissances scientifiques sur ce sujet doivent donc être encouragées et financées. Parmi les sujets nécessitant des réponses, nous pouvons citer l'évaluation de la résistance des bétons végétaux face aux risques fongiques et aux insectes dans les conditions réelles de l'emploi, la résistance aux cycles gel/dégel ou encore la tenue du béton face aux variations de l'humidité.

Le comportement des bétons végétaux vis-à-vis de l'eau est un sujet important qui nécessite d'être approfondi. Ainsi, la stabilité dimensionnelle du béton dans des conditions de température et d'humidité spécifiées doit être clarifiée. Cette stabilité dimensionnelle est en fait à prendre en compte car elle conditionne la durabilité d'un assemblage bois/béton végétal par exemple. La différence des variations dimensionnelles de ces deux matériaux induites par une variation d'humidité peut être source des dégradations de la structure. Par ailleurs, il convient d'étudier les modes d'absorption d'eau (par immersion et/ou par diffusion) et d'établir les courbes de sorption/désorption des bétons végétaux [14].

I.11.15. Élaboration des bétons de granulats de bois

Nous présentons la méthodologie choisie pour formuler et fabriquer des échantillons de béton de granulats de bois. Quelques propriétés de ce béton, déterminées après la fabrication des échantillons, y sont aussi présentées [14].

I.11.16. Formulations théoriques

Aucune méthode de formulation n'a été préconisée pour les bétons végétaux. Nous proposons donc ici une méthode simple de formulation.

Le principe de cette méthode est d'utiliser les granulats de bois à leur compacité maximale. En d'autres termes, la quantité de granulats dans le béton étudié est considérée égale au maximum de granulats que l'on peut introduire sans avoir besoin de machine de compactage. Ce principe intègre l'hypothèse selon laquelle le liant ne modifie pas la compacité des granulats, hypothèse valable uniquement dans le cas de faibles quantités de liant. Nous nous limitons donc, dans ce travail, à l'étude des bétons avec des dosages en liant permettant d'avoir un matériau poreux ; c'est à dire lorsque la quantité de liant n'est pas suffisante pour remplir la porosité inter-granulaire. Le volume d'un échantillon de béton est donc défini par le volume apparent de son squelette granulaire.

Nous considérons un volume V_b de béton de granulats de bois. Ce volume est composé d'un volume V_g de granulats, d'un volume V_{pdc} de pâte de ciment, et d'un volume V_p des pores inter-granulaires. Le volume absolu V_g des granulats est le produit du volume total apparent V_b et de la compacité C_g des granulats :

$$V_g = V_b C_g. \quad (I.1)$$

La masse B des granulats est donc :

$$B = \rho^{abs} V_b C_g. \quad (I.2)$$

Le volume V_{pdc} de la pâte de ciment est égal à la somme du volume V_c de ciment en poudre et de celui V_e de l'eau de gâchage :

$$V_{pdc} = V_c + V_e = (C/\rho_c) + (E/\rho_e) \quad (I.3)$$

Avec :

- C la masse de ciment, donnée par le produit de la masse des granulats et du rapport

Ciment/Bois (C/B) :

$$C = B \times C/B. \quad (I.4)$$

- ρ^c et ρ^e les masses volumiques du ciment et de l'eau, respectivement.

- E la masse d'eau, donnée par le produit de la masse de ciment et du rapport

Eau/Ciment (E/C) :

$$E = C \times E/C. \quad (I.5)$$

Le volume V_p occupé par les pores entre les granulats (porosité inter-granulaire) est égal au volume des vides entre les particules du squelette granulaire diminué du volume V_{pdc} de la pâte de ciment :

$$V_p = V_b(1 - C_g) - V_{pdc}. \quad (I.6)$$

Comme nous l'avons signalé bien avant, la compacité des granulats de bois est difficile à mesurer avec précision. Nous avons donc considéré une compacité théorique de $C_g = 38\%$. Le rapport E/C est fixé à 0,5 pour toutes les formulations étudiées. Afin d'étudier l'effet de la microstructure sur les performances du béton de granulats de bois, nous avons choisi quatre rapports Ciment/Bois :

$(C/B) = 1, 25 / 1,75 / 2,25$ et $2,75$. Les masses volumiques absolues du ciment et de l'eau sont prises égales à $3,1$ et 1 g.cm^{-3} , respectivement. Le **tableau I.4** résume les dosages calculés pour chaque constituant. Les fractions volumiques peuvent être calculées à partir de ces dosages. Elles seront évaluées après une calibration de la compacité à partir des densités réelles des bétons fabriqués.

Tableau I.4 – Dosages calculés pour les quatre formulations étudiées avec une compacité des granulats de bois de $C_g = 38 \%$... [14].

	Rapport Ciment/Bois (C/B)	1,25	1,75	2,25	2,75
Dosage (kg.m^{-3})	Granulats de bois	249	249	249	249
	Ciment	312	436	561	686
	Eau	156	218	280	343

I.11.17. Comportement thermique

Dans ce travail, en ce qui concerne le comportement thermique, nous nous sommes essentiellement limités à l'étude de la conductivité thermique. La méthode que nous avons utilisée est la technique du fil chaud. Cette technique fait partie des techniques de mesure de la conductivité thermique en régime transitoire. Les mesures ont été effectuées à l'aide de l'appareil **FP2C** de la société **NeoTIM**. Cet appareil est constitué d'une sonde et d'un boîtier d'acquisition, comme décrit dans la (**figure I.11**). La mesure consiste à placer la sonde entre deux demi-échantillons identiques pour ainsi imposer un flux de chaleur entre elles.

Suite à ce flux de chaleur, la température dans les éprouvettes augmente. Cette augmentation de température est mesurée à l'aide d'un thermocouple lié au fil chaud. Un logiciel permet de visualiser l'évolution de la température, et par un traitement mathématique intégré dans ce logiciel, la valeur de la conductivité thermique est déterminée. Selon la société **NeoTIM**, la précision des mesures est de 5 %. [14].

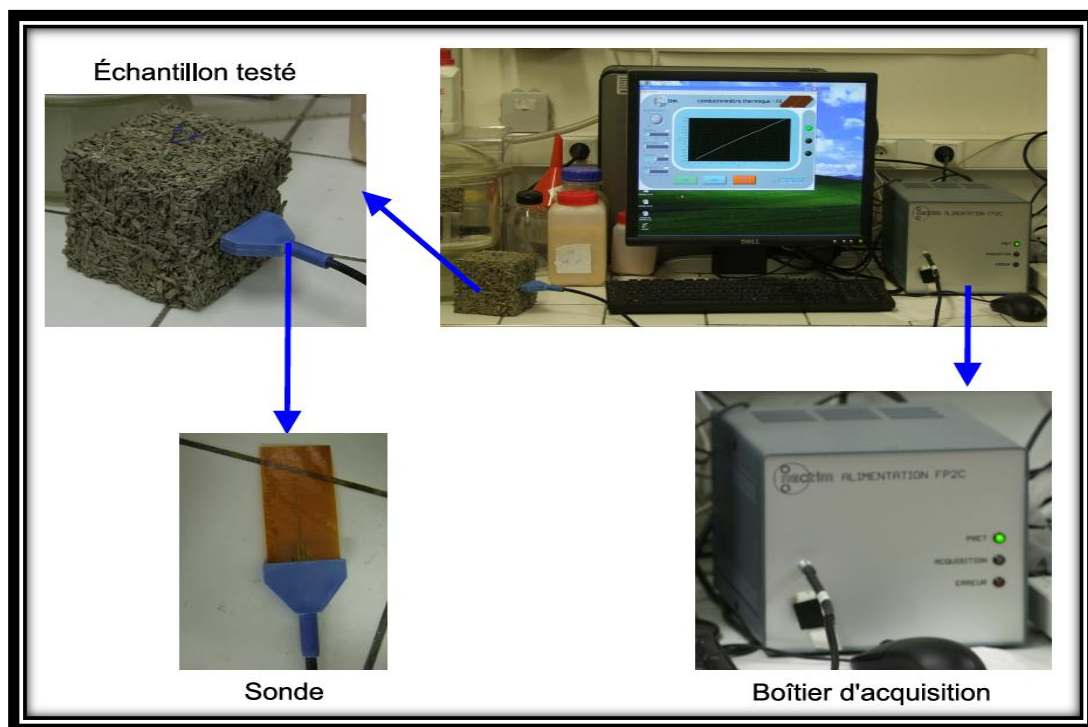


Figure I.11 – Dispositif utilisé pour mesurer la conductivité thermique du béton de granulats de bois.

I.12. LE BETON A BASE DE SCIURE DE BOIS

La sciure de bois issue des produits de récupération constitue un élément d'importance croissante dans l'exécution des projets de construction car le bois est une source renouvelable et inépuisable. Le béton bois est un matériau composite, généralement composé d'une matrice cimentaire et des charges végétales de formes granulaires, et qui peut être adjuvanté [Benmalek, Bouguerra, Ledhem, Dheilly et Queneudec ; 1999] [52]. Ces différents chercheurs ont étudié les caractéristiques physiques mécaniques et thermiques des bétons légers à base de sciures de bois. Dans le même contexte, d'autres auteurs ont travaillé sur l'influence du pourcentage de la sciure du bois sur les performances du béton composite à base de bois [Al Rim, Ledhem, Douzane, Dheilly et Queneudec ; 1999] [53].

La sciure de bois contient des matières qui nuisent à la prise du béton ; différents traitements sont alors appliqués pour éliminer les risques d'agressions biologiques du bois dus aux champignons lignivores et aux insectes xylophages et neutraliser les effets négatifs de la cellulose sur la prise du ciment, car la proportion de la cellulose dans les divers bois feuillus et résineux est de 40 à 45% [Bederina, Laidoudi, Goullieux, Khenfer, Bali et Queneudec ; 2009] [54]. Avant de pouvoir servir à la fabrication du béton léger à base de sciure de bois, cette dernière doit être pré-trempée pour éliminer toute matière soluble comme les sèves végétales.

Cependant, les bétons légers à base de granulats de bois, présentent des inconvénients tels que le risque de ségrégation, la sensibilité à l'eau, la faible résistance au feu et la mauvaise durabilité.

Plusieurs solutions ont été proposées, comme l'utilisation d'une matrice argileuse [Houssais, Benmalek, Ledhem et Queneudec 2000] [55], ou bien envelopper la sciure de bois par un matériau qui ne brûle pas « le polypropylène » [AIT TAHAR et BOUAZIZ ; Août 2010 ; Annales du BTP] [56].

I.12.1. Propriétés des bétons légers

Une des propriétés intéressante des bétons de granulats légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton. Le béton parfaitement sec est plus isolant que le béton humide. Ces bétons légers constituent aussi de bons isolants phoniques.

La corrélation entre la masse et le coefficient de conductivité thermique se traduit par des performances en matière d'isolation thermique, d'autant plus sensible que la densité diminue [Nguyen, Beaucour, Ortola, Noumowé ; 2011] [57]

I.13. Conclusion partielle

Cette recherche bibliographique nous a permis de mettre en évidence l'intérêt des études sur les matériaux innovants et surtout les matériaux ayant un impact sur l'environnement. L'utilisation du liège ou la sciure de bois dans le mélange mortier pour réaliser des panneaux dont l'assemblage permet de réaliser un mur de séparation dédié à l'isolation s'avère une piste très intéressante à explorer et à développer.

Chapitre II
Les isolants thermiques
Cas des matériaux utilisés

II.1. Etude Comparative des isolants thermiques

II.1.1. Critères de comparaison

Le choix de l'isolant thermique doit prendre en considération la minimisation des pertes de chaleur. Néanmoins, d'autres critères interviennent dans le choix de l'isolant. Ces critères sont aussi bien liés à la technologie qu'à la mise en œuvre. Les caractéristiques physiques des isolants sont les premiers critères de choix. La conductivité thermique est la caractéristique principale de l'isolant. L'étanchéité à l'air et le comportement à l'eau sont également essentiels dans ce choix selon le domaine d'application [59].

D'autres critères permettent de distinguer les isolants, tel que, le comportement au feu et à la chaleur. La densité de fumée produite permet également de juger la performance au feu de l'isolant. Les propriétés mécaniques des isolants permettent également de les distinguer suivant l'utilisation. Concernant la mise en œuvre des isolants, leur présentation en panneau rigide, en rouleau ou en vrac détermine la forme de support admissible. Le critère de durabilité d'un isolant permet de s'assurer de la pérennité de l'ouvrage.

Avec le développement de nouvelles réglementations, le comportement de l'isolant vis-à-vis l'environnement est devenu un des principaux critères de choix des isolants.

Dans le cas où le client souhaite recourir à des matériaux respectueux de l'environnement, des solutions performantes doivent lui être proposées. En effet, la variation du coût de l'isolant est proportionnelle à ses performances et l'épaisseur du panneau.

II.1.2. Analyse comparative du choix d'isolant

D'après le **tableau II. 1**, en matière de conductivité thermique, les isolants d'origine synthétiques sont les plus performants. Cependant, leur production de fumée lors d'incendie est importante. Leur utilisation est possible dans les milieux humides et soumis à des efforts mécaniques. En générale, leur durabilité est satisfaisante, mais du point de vue environnement ce sont les matériaux les moins appropriés.

Les laines minérales possèdent des valeurs de conductivité thermique intéressante mais leur comportement à l'eau est faible. Leur comportement au feu et à la chaleur sont excellents.

Leur mise en œuvre est aisée et la présentation en rouleaux permet un usage sur de grandes surfaces aux formes variables. Cependant, leur caractère irritant pour la peau nécessite de prendre toutes les précautions.

Le verre cellulaire est un matériau performant mais son utilisation reste limitée à des cas spécifiques. Il est difficilement recyclable. Comparer au niveau thermique avec les deux grandes catégories d'isolants ci-dessus, les matériaux d'origine végétale sont les moins performants. Mais, leurs comportements au feu et à la chaleur sont satisfaisants. Leur principal avantage réside dans le fait que ce sont des matériaux recyclables.

Du point de vue de l'environnement, ce sont les matériaux les plus adéquats et leur utilisation ainsi que leurs caractéristiques sont en cours de développement.

Tableau II.1 Propriétés des matériaux isolants

		k ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Comportement à l'eau	Comportement à la chaleur	Propriétés mécaniques	Environnement
Isolants synthétiques	Polystyrène expansé EPS	0.032-0.046	Faible absorption	$T_{p_{max}} = 70^{\circ}C$	Bonne résistance à la compression	Non recyclable, dégagement de gaz toxique en cas d'incendie
	Polystyrène Extrudé XPS	0.028-0.041	Très faible absorption	$T_{p_{max}} = 75^{\circ}C$	Très bonne résistance à la compression	
	Polyuréthane PUR	0.022-0.038	Très faible absorption	Faible Résistance	Faible résistance au choc	
	Mousse phénolique PF	0.032	Sensible à l'humidité	Faible Résistance	Bonne résistance à la compression	
Isolants minérales	Laine de roche	0.034-0.045	Bonne Résistance	Bonne Résistance	Fortement compressible, Faible résistance au délaminage	Origine naturelle, difficilement recyclable
	Laine de verre	0.031-0.041	Non capillaire non hygroscopique	Bonne Résistance	compressible	
	Verre cellulaire	0.040-0.051	Etanche à l'eau	Bonne Résistance	Matériaux fragile	
Isolants végétales	Panneau de fibre de bois	0.044-0.052	sensible à l'eau	Bonne Résistance	Résiste la compression et le choc	Ressources renouvelables
	Laine de cellulose	0.040-0.045	sensible à l'eau, hygroscopique	Bonne Résistance	compressible	
	Liège expansé	0.040-0.047	sensible à l'eau	Bonne Résistance	Bonne résistance	
	chanvre	0.039	sensible à l'eau	Bonne Résistance	Bonne résistance	

Ces caractéristiques leur permettent de conquérir les matériaux synthétiques dans plusieurs domaines.

A partir de cette analyse comparative, et vu nos critères de choix qui sont : les performances thermiques, le comportement au feu et à la chaleur, la résistance mécanique et issue d'origine naturelle, les isolants d'origine végétales sont les plus favorisés pour être appliqué dans les panneaux solaires.

II.2. LES FIBRES 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...).

Depuis les années 2000, le chanvre connaît un regain d'intérêt en France du fait, notamment, du développement des agro-matériaux. 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.

La **Figure II.1** 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 [60].

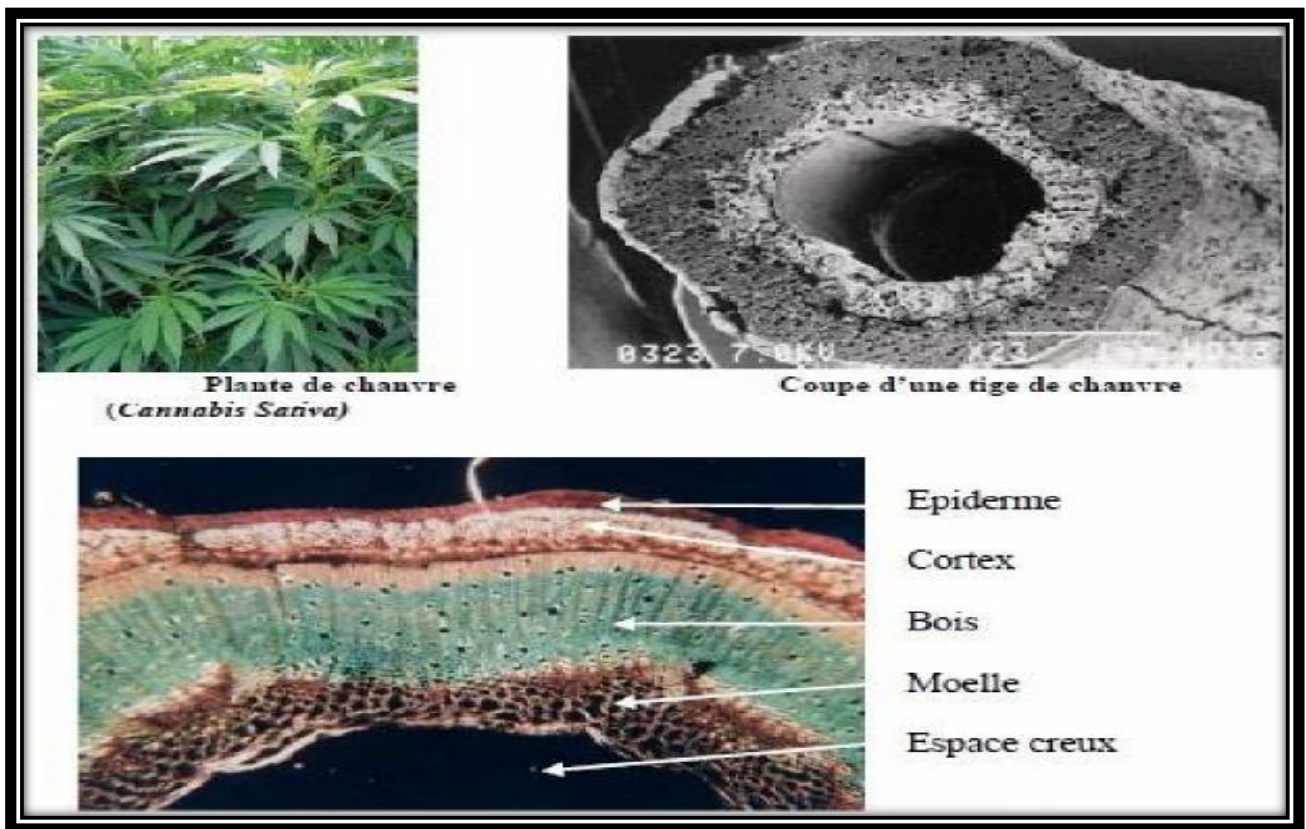


Figure II.1 Micrographie d'une coupe transversale de tige de chanvre [60].

II.2.1. La chènevotte

La transformation du chanvre peut se faire sans défibrage pour donner la chènevotte fibrée (**Figure II.2b**) ou par le processus de défibrage mécanique qui permet d'obtenir la chènevotte et la fibre de chanvre séparées (**Figure II. 2a**). A l'issue de cette étape, les particules de chènevottes sont dépoussiérées, calibrées et ensuite valorisées dans la formulation des bétons ou autres domaines.

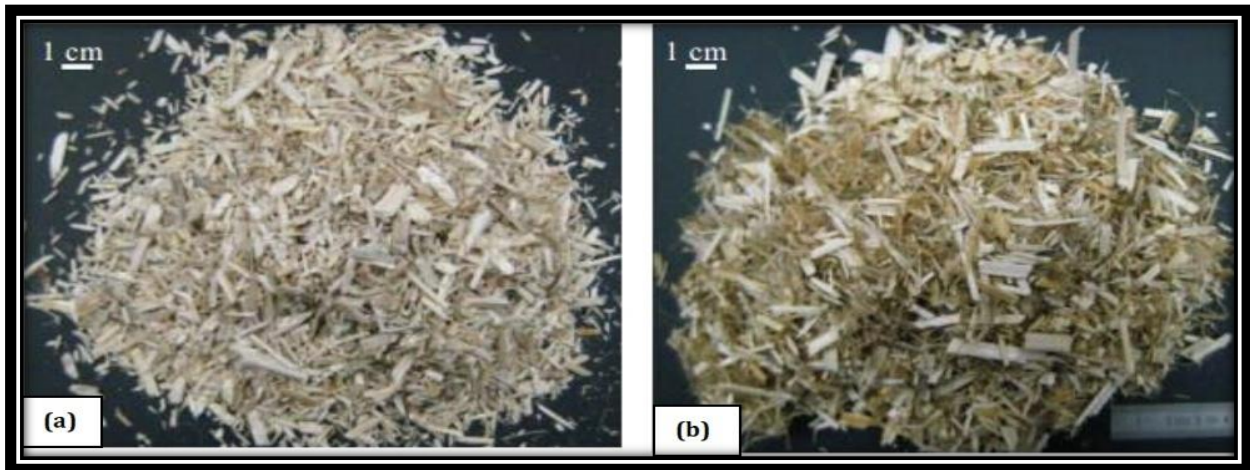


Figure II.2 : Comparaison entre les fibres de chanvre : (a) défibrées et (b) fibrées (CHAMOIN, 2013) [61].

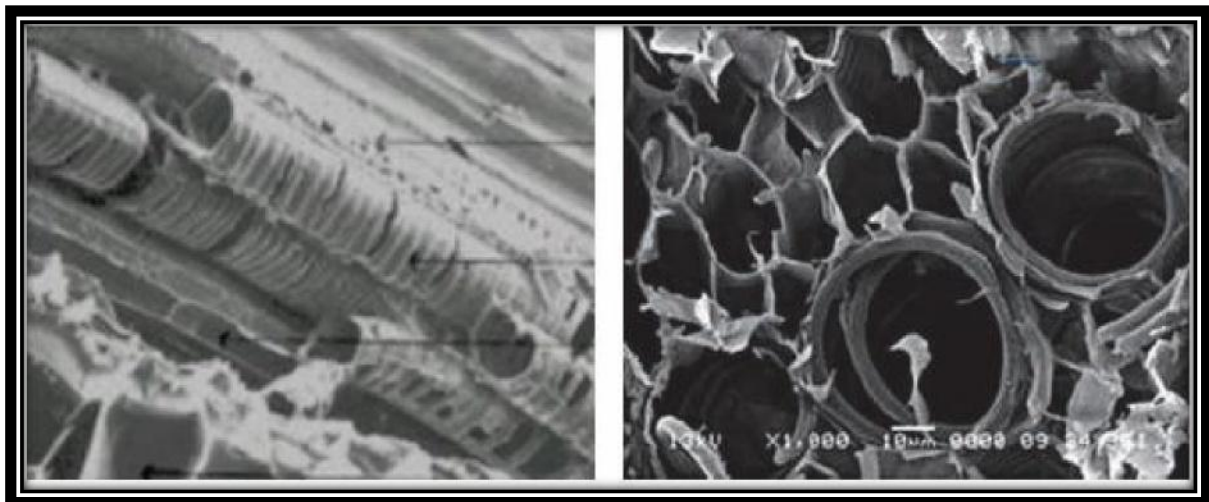


Figure II.3 : Coupe longitudinale et transversale d'une chènevotte au microscope électronique à balayage (CHAMOIN, 2013) [61].

La chènevotte présente une structure poreuse tubulaire avec un diamètre variant de 10 à 15 μm . Elle est constituée de vaisseaux parallèles, comme le montre la **Figure II.3**, dans lesquels circule la sève de la plante. À la maturité de la plante, la sève se retire des vaisseaux et laisse place à l'air [61].

L'architecture de la chènevotte à l'échelle microscopique est très complexe. Les parois de canaux se décomposent en paroi primaire et paroi secondaire :

II.2.2. Fibre de chanvre utilisée comme renfort

Les matrices des matériaux composites sont le plus souvent constituées de polymère. Ces polymères sont divisés en trois principales catégories : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères. Les thermoplastiques comprennent entre autres le polyéthylène, le polypropylène et le polystyrène. Pour les thermodurcissables, de bons exemples sont le polyester et l'époxy. Finalement, dans la catégorie des élastomères, le caoutchouc est le plus connu. Plusieurs auteurs se sont intéressés au sujet des composites à base de fibres de chanvre [62].

II.3. LE LIEGE

II.3.1. Introduction

Le liège est un matériau qui a été utilisé par homme durant les 5000 dernières années. C'est un matériau stratégique utilisé pour de multiples applications. Beaucoup de matériaux de liège actuels sont en composites, en particulier des matériaux de liège pour revêtements des sols et murs et plusieurs autres bâtiments et les applications industrielles. Les développements récents dans la recherche du liège sont passés de la relation liège vin classique de qualité et les questions environnementales, l'exploitation des résidus de l'industrie du liège et de nouveaux matériaux à base de liège. Au cours des dernières années un certain nombre de matériaux composites à base de liège nouveau ont été élaborés [63].

Le liège est l'écorce du chêne (*Quercus suber* L.), qui est périodiquement récolté de l'arbre, généralement tous les 9-12 ans, en fonction de la région de culture. *Quercus suber* L, est le nom botanique d'une croissance lente, le chêne à feuilles persistantes, qui ne s'épanouit que dans des régions spécifiques de la Méditerranée occidentale (Portugal, Espagne, sud de la France, une partie de l'Italie, l'Afrique du Nord) et la Chine [64] [65].

Cet arbre exige beaucoup de lumière solaire et une combinaison très inhabituelle de faibles précipitations et l'humidité assez élevées.

L'Europe dispose d'environ 60% de la superficie totale de production (forêts de liège) et produit plus de 80% de liège au monde [66].

La qualité et l'épaisseur de l'écorce varient selon les conditions d'un arbre de croissance spécifique [65] [67].

Le liège est des plus souples matériaux naturels connus. C'est un matériau léger, élastique, flexible et imperméable aux gaz et liquides, impérissable, bon isolateur électrique et thermique, isolateur phonique et diélectrique [68]

La faible conductivité thermique du liège combinée à une raisonnable compression, font de ce matériau un excellent isolateur thermique lorsque des charges compressives sont présentes. Sa propriété de frottement (anti-glissement) le rend également bon pour des revêtements de sol ou dans les poignées. Aujourd'hui, les produits en liège sont utilisés pour isolation thermique des réfrigérateurs et des fusées, pour l'isolation acoustique des sous-marins et les studios d'enregistrement, tels des joints dans les instruments en bois et les chambres de combustion, et en tant qu'absorbant d'énergie dans les planchers, les chaussures et l'emballage, et naturellement comme taquets [68].

II.3.2. Chêne liège (*Quercus suber* L) en Algérie

Ben Amirouche S et al [69] ont caractérisé géographiquement et donné quelques descriptions des peuplements porte-graines de chêne liège (*Quercus suber* L.) dans les wilayas de Jijel, Mila et Bejaia (Nord-est algérien). Ils ont constaté que 22 peuplements occupant une superficie totale de 1025 hectares ont été retenus. Au centre de chaque peuplement un point GPS, a été pris, puis utilisé pour établir les cartes de localisation par wilaya. Dans un deuxième temps, les peuplements en question sont en cours pour description détaillée permettant leur délimitation plus précise possible, leur caractérisation éco-dendrométrique et le renseignement de fiche signalétique pour chaque peuplement. En parallèle, les données recueillies sont transcrites au fur et à mesure dans la base de données géographique préalablement élaborée [69].

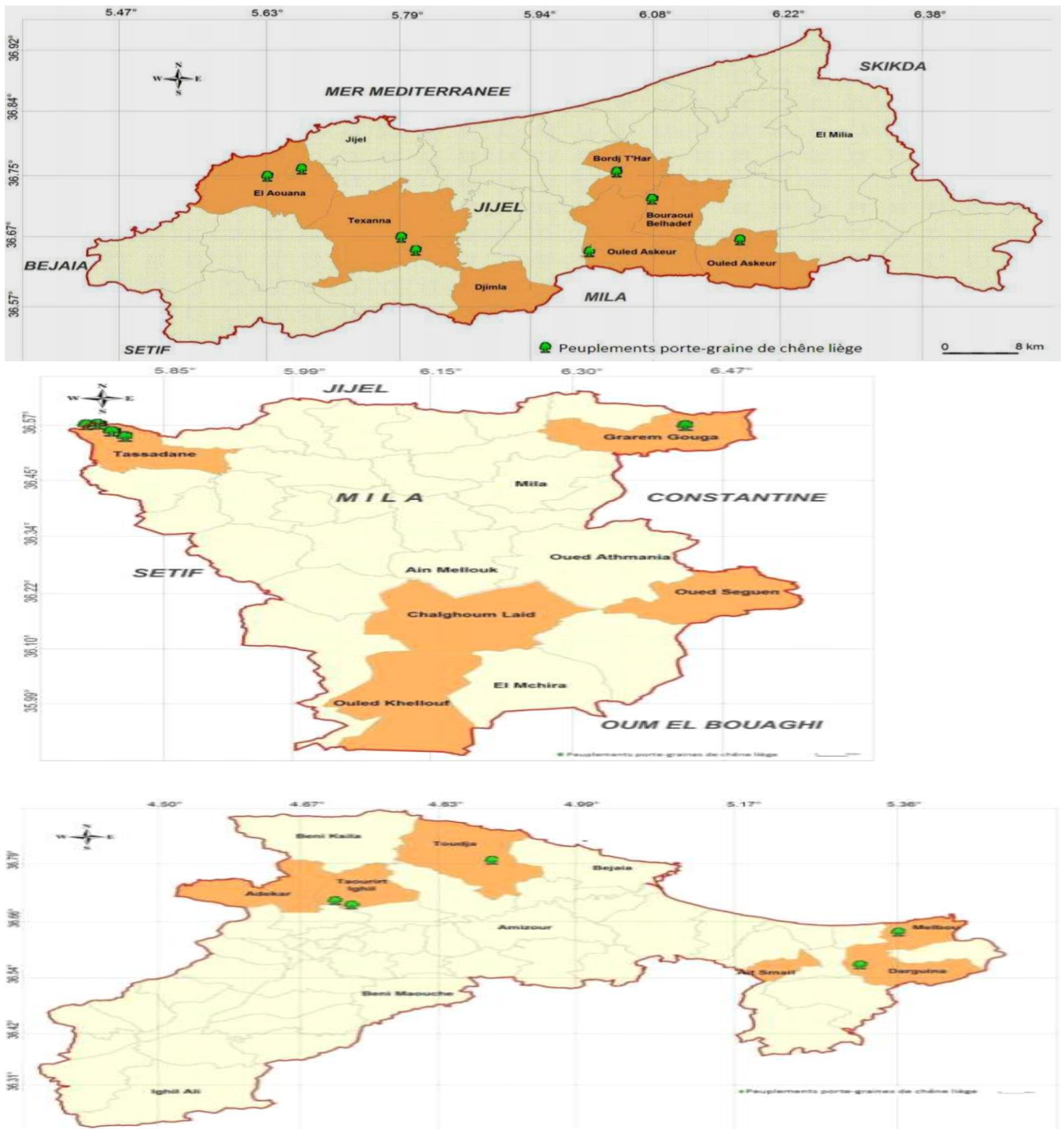


Figure II.4 Cartographie et description des peuplements porte-graines de chêne liège [69].

II.3.2. Anatomie du liège

Les cellules du liège ont été étudiées au microscope optique, la première fois par Hooke en 1664, puis par microscopie électronique à balayage par Gibson et al. en 1981 [70]. Ces auteurs ont très bien décrit la forme et l'arrangement des cellules du liège selon les trois sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle (*Figure II.5*).

Dans la section radiale, les cellules sont disposées en «nid d'abeilles» et ont une forme principalement hexagonale. Certaines peuvent avoir cinq, sept ou huit côtés. Cette disposition des cellules permet de considérer que le liège est un matériau isotrope dans le sens radial,

impliquant que les directions axiale et tangentielle sont presque équivalentes [70].

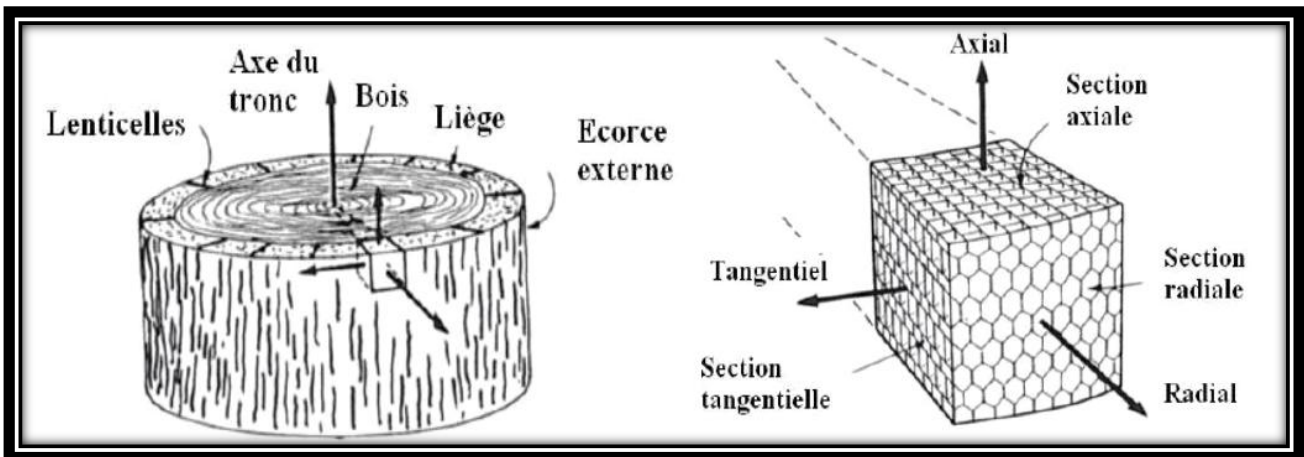


Figure II.5 a)-Différentes sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle [44]...[70]

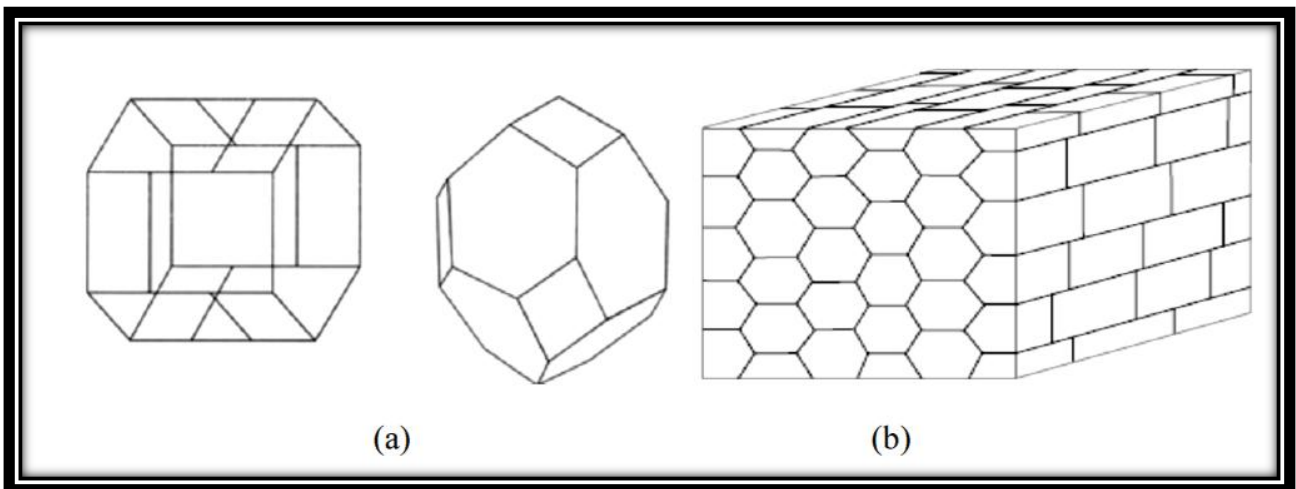
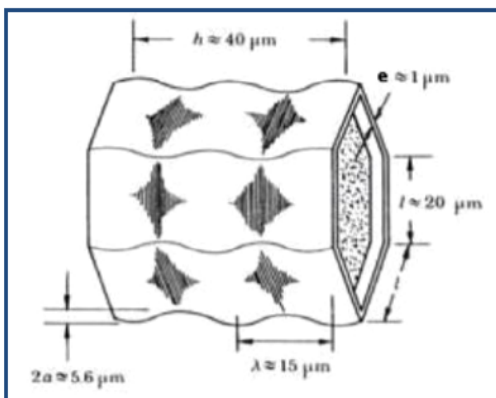


Figure II.5 b)- Modèle de la cellule de liège et de l'organisation des tissus : (a) cellule individuelle (à gauche) et Kelvin polyèdre (à droite) et (b) l'organisation des tissus [71].

Gibson et al, ont également déterminé les dimensions d'une cellule et ont observé que chaque cellule possède deux ou trois ondulations complètes (Figure II.6).



- Epaisseur de la paroi (μm) : $1 \pm 0,5$
- Hauteur de la cellule h (μm) : 43 ± 4
- Longueur d'un côté de la face hexagonale l (μm) : 21 ± 4
- Volume de la cellule (μm^3) $(3\sqrt{3}/2) \cdot l^2 \cdot h$: 5×10^4
- Nombre de cellules N/mm^3 : 2×10^4
- Longueur de l'ondulation λ (μm) : $15 \pm 2,3$
- Amplitude de l'ondulation a (μm) : $2,8 \pm 1$

Figure II.6 Ondulation d'une cellule et ses dimensions [70].

Ces dimensions peuvent varier légèrement selon les périodes de croissance du liège. C'est également dans cette direction radiale que s'effectue la croissance des lenticelles. Les lenticelles sont des portions du périderme parcourues par de nombreux espaces intercellulaires ou encore décrits comme

des canaux cylindriques ou coniques macroscopiques présents à la surface des tiges, des racines et de certains fruits et légumes.

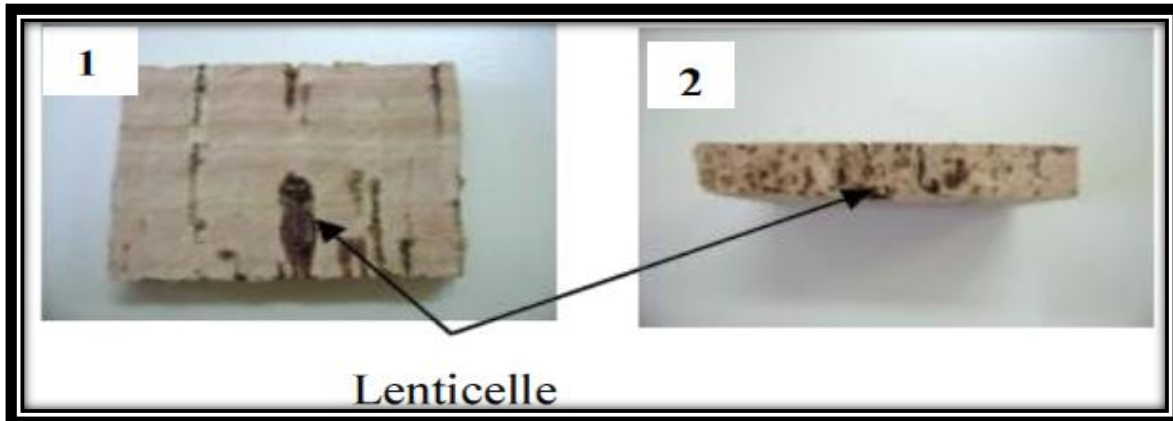


Figure II.7 -Lenticelles. 1- planche section axiale, 2- planche section radiale [72].

II.3.3. Isolation avec le liège

Pour les applications d'isolation, des agglomérats de granulés de liège (noir), sont employés. Ils sont fabriqués dans un autoclave fermé à une température élevée (environ 300°C) et de pression (environ 40 KPa), sans l'utilisation de colle [73]. Ce processus industriel induit la dégradation thermochimique de la paroi cellulaire du liège [74], avant l'expansion de ces granulés, comme discuté ailleurs [75]. Les sous-produits de dégradation agissent comme des adhésifs naturels entre les granules à former le liège [74]. Ces agglomérats expansés de noir sont produites à partir des bouchons de qualité résiduelle et plus faible, impropres à d'autres applications ou à partir de déchets de liège et les résidus provenant d'autres procédés industriels [68]. Isolation du liège aggloméré à trois applications principales : isolation thermique [94], absorption acoustique et amortissement des vibrations. Ainsi, les agglomérés de liège sont utilisé pour diverses applications de construction ; les murs intérieurs ou extérieurs, des bâtiments et des plafonds, pour fournir une isolation thermique et acoustique et l'isolation de sous-revêtement pour minimiser la transmission des bruits de répercussion [95] [76].



Figure II.8 Différentes formes de panneaux isolants en liège [77].

Tableau II.2 Propriétés d'isolation en liège aggloméré [94][95].

Propriété	Intervalle de valeurs
Densité [Kg m^{-3}]	100-130
Température de fonctionnement [K]	97-383
Conductivité thermique (20°C) [$\text{KJ m}^{-1} \text{S}^{-1} \text{K}^{-1}$]	4.1×10^5
Chaleur spécifique (20°C) [$\text{KJ Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	1.7-2.1
Coefficient de dilatation thermique [W/C°]	40×10^{-6}
Perméabilité à la vapeur [$\text{Kg Pa}^{-1} \text{S}^{-1} \text{m}^{-1}$]	4.2×10^{12} à 12×10^{12}
Résistance à la traction [MPa]	0.05
Résistance à la compression à 10 % [M Pa]	0.25
Flexion traction* [KN m^{-2}]	1.6×10^4

* Force pour matériau de flexion avec une surface transversale.

II.3.4. Autres applications

Au cours de la production de bouchon, une grande quantité de liège n'est pas utilisée car elle ne convient pas ou est éliminée au cours de la production. Ce matériau est granulé et utilisé dans une variété d'applications, principalement pour la production de composites de liège/caoutchouc à usage général aggloméré et agglomérats de paroi, et revêtements de sol [78].

Pour la fabrication d'agglomérés, des granulés de liège sont mélangés avec un liant polymère et comprimés à chaud, sous pression. Les variables les plus importantes dans ce processus sont la taille et la fraction de granulés de liège dans le mélange (aussi élevé que 90% en poids) ; le type de liant polymère (des polyuréthanes, des résines phénol-formaldéhyde, etc.) et de la densité de tassement. Les blocs obtenus sont stratifiés, en forme de dimensions finales et terminés. Des articles tels que des semelles de chaussures, [79] tableaux d'affichage, des cadeaux et des panneaux sont produits de cette manière. Les agglomérats de panneaux de sol décoratifs sont réalisés d'une manière similaire, mais plus rigide et plus solide. Ceci est habituellement accompli en changeant la pression de remplissage ou à l'aide d'un liant différent. Dans certains cas, une couche polymère de protection est utilisée pour augmenter la résistance à l'usure. Ces agglomérats peuvent être utilisés seuls ou en produits multicouches (ensemble avec les panneaux de fibres de bois à haute densité, polymère et des couches adhésives). Les propriétés les plus importantes du liège pour cette application sont sa haute résistance et d'absorption d'énergie, près de coefficient de Poisson zéro (pour plus de confort lors de la marche) et coefficient de friction élevé. Composites liège / caoutchouc sont produites par addition de granulés de liège pour une formulation de caoutchouc ; le mélange est ensuite aggravé, vulcanisée et façonné. Presque tous les types de caoutchoucs peuvent être mélangés avec du liège [80]. En plus ces composites sont imperméables aux liquides, le faible ratio de Poisson de liège signifie que ces joints ne souffrent pas d'extension latérale excessive [81].

II.3.5. Tendances futures

Le liège possède des propriétés spécifiques (physiques, chimiques et mécaniques) qui lui confèrent un grand potentiel pour de nouvelles applications. Par exemple, le liège a été choisi pour une

application aérospatiale en raison de ses propriétés thermiques, la vitesse de combustion lente et l'absorption des chocs capacités [82].

Sur les *figures II.9 et II. 10* sont les applications mentionnées ci-dessus, respectivement.



Figure II.9 Bouchons agglomérés, panneau d'affichage, des semelles de chaussures et des revêtements de sol [93].

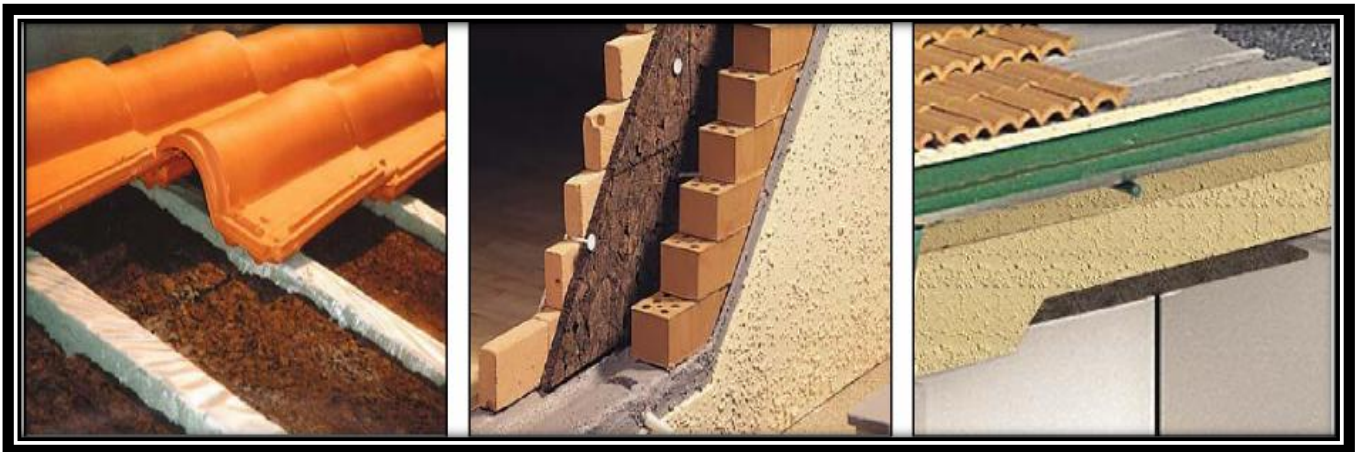


Figure II.10 Isolation de la toiture, isolation des murs creux et des toitures et des combles isolés [93].

II.4. LES COMPOSITES A BASE DE LIEGE

Les agglomérats de liège sont divisés en deux catégories : liège composite (liège aggloméré) et liège expansé (liège isolation). La deuxième catégorie est constituée seulement de liège naturel sans agents de liaison externes ou toute autre matière ajoutée et, donc, il ne peut être considéré comme un vrai matériau composite.

Le liège composite est formé par la liaison de granulats de liège avec différents liants (polyuréthane, la mélamine, le caoutchouc, etc.), transféré des produits tels que des bouchons agglomérés de liège, revêtements de sol, joints, etc. Les caractéristiques physiques et chimiques des liants déterminent la force de s'agglomérer et, donc, ses applications [83].

L'industrie de déchets du bouchon, le liège de faible qualité (de déchets) et enfin liège mâle sont tous utilisés pour produire des granulés de liège. Ceux-ci sont séparés et classifiés selon la densité et la taille des grains. Ces granulés de liège peuvent être utilisés comme produits finaux dans plusieurs applications ou utilisés comme matière première pour la production de liège de composition [68].

En conséquence, liège composite est fait de granules qui ont été assemblés à l'aide de synthèse différente ou des agents de liaison naturels (habituellement d'uréthane, à base de mélamine et les résines phénoliques).

La production de caoutchouc de liège est similaire à la production d'autres produits caoutchouc [68].

Les matériaux en caoutchouc de lièges plus courants utilisent des granulés de liège de 60-70 kg/m³, dans 15 à 260% en poids par rapport au caoutchouc. Les matériaux en caoutchouc de liège sont principalement utilisés dans les joints (moteurs à combustion, etc.), l'isolation des vibrations et les revêtements lourds.

La plupart des autres produits en liège sont fabriqués par des procédés similaires à la chaussée et revêtement mural en produits liège [84] comme, par exemple, de charge et de joints de dilatation. Dans les bâtiments et autres ouvrages de construction civile, les produits en liège peuvent être utilisés pour l'isolation thermique, l'isolation des vibrations, la correction acoustique, le revêtement des sols, le revêtement mural, faux-plafonds, et les joints de dilatation. Certains de ces produits en liège peuvent être composés avec d'autres matériaux de construction : par exemple, la composition de liège et de MDF ou HDF (panneau de fibres à haute densité) et de placage de bois. Certaines applications spécifiques de liège dans l'environnement industriel sont : dalles et feuilles de liège, isolation des tuyaux, moule de revêtement de batterie, isolation frigorifique, machines feuilles anti vibrations, isolation etc., caoutchouc de stockage de liège résistant à l'usure, antidérapant et insonorisant, résistant à la graisse de l'huile et des sels qui le rend approprié à des fins industrielles et plancher du véhicule. Dans les applications de chaussures, les matériaux de liège sont idéaux pour les exigences techniques de l'industrie de la chaussure et peuvent être utilisés dans la première de propreté / semelles, talons, unique et charges fondent, milieu semelles, revêtements, semelles moulées (applications).

Outre les applications automobiles et industrielles, les industries aéronautiques et militaires sont aussi de grands consommateurs de produits dérivés de liège. Le liège aggloméré, ignifuge, est utilisé dans les navires de guerre, et le revêtement interne des sous-marins [68]. Certains matériaux multicouches ont également été développés, par exemple, pour les sous-couches de systèmes de revêtements de sol d'après [85]. Les mesures des isothermes chargent et de décharge à partir du liège aggloméré sont disponibles d'après [86].



Figure II.11 Bâton de liège aggloméré pour la production des bouchons [84].

II.4.1. Nouveaux composites à base de liège

De nouveaux matériaux composites de liège, développés dans les dernières années et qui ne sont pas encore sur le marché sont examinées [84].

II.4.1.2. Composites sandwichs à base de liège

Le liège aggloméré est un noyau idéal pour les matériaux composites pour des structures sandwichs légères, pour différentes utilisations telles que dans les applications aérospatiales, automobiles et dans la construction en raison de leur très haute performance mécanique et de leur faible poids [87].

Les études de Castro et Silva [87] ont été basées sur les sandwichs constitués de carbone/époxy comme peau et de trois types de matériaux de bases différentes : Nomex, Rohacell 71 WF rigides, mousse et liège aggloméré. Dans un premier temps, trois types d'agglomérés de liège commercial (avec différentes tailles de granules) ont été testés confirmant le faible rendement mécanique par rapport à des matériaux d'âme, classiques. Pour améliorer le comportement mécanique du liège en tant que matériau de cœur, trois nouveaux types d'agglomérés de liège ont été fabriqués avec du liège granulé classique, avec une résine époxy.

Les essais de flexion statiques et charges dynamiques ont été réalisés afin de caractériser les résistances mécaniques des différents types d'agglomérés de liège qui ont été obtenus en considérant distinctes les variables de production. Les résultats des essais expérimentaux ont montré que la performance des agglomérés de liège dépend essentiellement de la taille du granulat de liège, de sa densité et de la procédure de collage, utilisé pour la cohésion des granules et ces paramètres peuvent être ajustés.

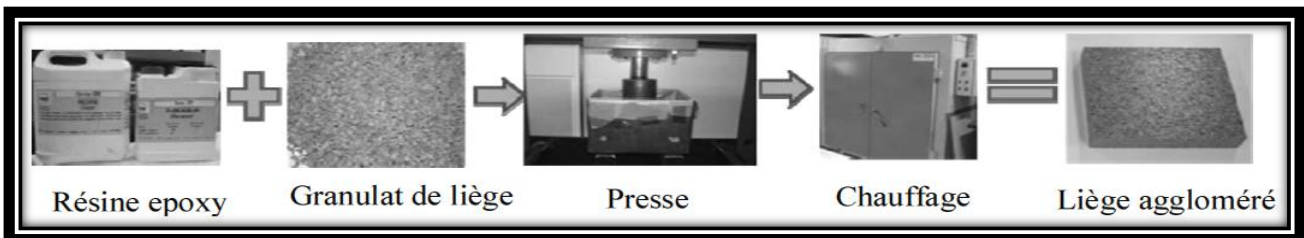


Figure II.12 Schéma du procédé de fabrication utilisé pour obtenir les agglomérats de liège époxy.



Figure II.13 Échantillons de sandwich à base de liège aggloméré élaboré par la méthode infusion [92].

II.5. MORTIER POLYMERE LEGER AVEC GRANULATS DE LIEGE

Dans les travaux de [88] deux types de formulations de mortier, avec différents rapports de poids, résine / sable (c. liant / agrégat fin). Dans chaque série, le liège varie de 0% à 45% du volume total cumulé ; ont été considérés. Les essais de flexion et de compression ont été effectués. À la fois, l'influence de la fraction volumique de liège et le rapport pondéral résine / sable ont été considérés par rapport à la tenue mécanique des mortiers de polymère modifié de liège. Une diminution linéaire a été observée dans les propriétés en fonction de la teneur en volume de liège. La faible densité de liège modifie les mortiers et conduit à une perte lisse des propriétés spécifiques. Les résultats conduisent à des bétons légers de polymères modifiés, avec une ductilité améliorée de compression.

II.5.1. Composites liège-ciment

Des essais en laboratoire ont été effectués [89] sur deux mélanges bitumineux contenant du caoutchouc ou du liège granulé et ont été comparés à celle d'un mélange classique. Les mélanges ont été conçus pour intégrer une partie des déchets d'autres industries, en réduisant leur élimination dans les décharges, en modifiant les propriétés mécaniques des mélanges, ils pourraient contribuer à réduire le bruit d'interaction pneu-route et, donc favoriser la durabilité des revêtements. Des résultats mécaniques plus durables en comparaison avec d'autres mélanges étudiés ont été trouvés et, d'autre part, une meilleure adhérence entre les particules de liège et le bitume en raison de la structure alvéolaire des particules de liège, a été observé sur les images MEB.

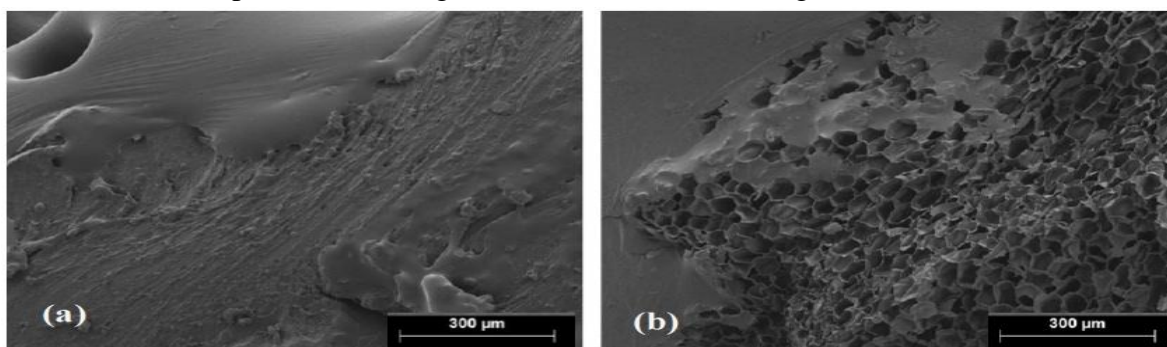


Figure II.14 Images MEB de l'interface granulaire : (a) entre le bitume et le caoutchouc (b), et entre le bitume et le liège.

II.6. LA SCIURE DE BOIS

II.6.1. Anatomie du bois

Le bois est un ensemble de tissus cellulaires, hétérogènes et organisés qui constituent la masse principale du tronc des arbres (*Harrington, 1998* [90]). Ces tissus naissent suite au fonctionnement de l'assise génératrice libéro-ligneuse, appelée également cambium, située sous l'écorce. Les essences de bois sont généralement classées en deux grands groupes, désignés sous le nom de résineux et de feuillus. Les feuillus sont des végétaux plus évolués que les résineux. Ils sont caractérisés par un bois plus complexe, des cellules plus spécialisées, des plans ligneux plus variés et leur identification est généralement plus facile. Les rôles de conduction de la sève et de soutien mécanique sont principalement assurés par les vaisseaux et les fibres ligneuses. Quant aux résineux, végétaux plutôt primitifs, ils présentent des cellules de bois peu spécialisées et un plan ligneux simple. Les trachéides longitudinales constituent environ 90% du volume du bois des résineux. La **figure II.15** illustre la structure anatomique d'un bois de résineux.

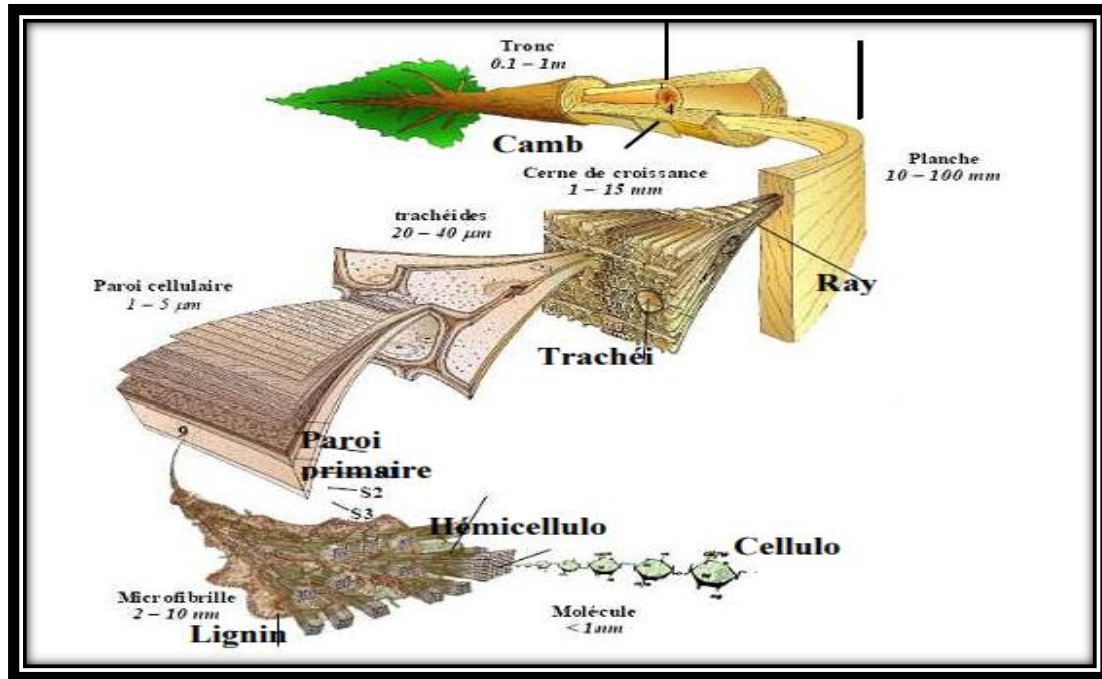


Figure II.15 Différentes échelles d'observation d'un bois de résineux : les tissus, la cellule et la paroi cellulaire (Harrington, 1998) [90].

II.7. LES TISSUS

II.7.1. Catégories de tissu :

La particularité des tissus est d'être composés, dans le cas 2D, d'un réseau de torons de chaîne et d'un réseau de torons de trame orientés à 90° l'un par rapport à l'autre, s'entrelaçant de façon périodique. Dans le cas des tissus 3D, un troisième réseau de torons vient renforcer la préforme sèche dans la direction de l'épaisseur (torons de renfort). Différents paramètres permettent de définir l'armure du tissu, dont le nombre dépend de sa complexité. Toutefois, certains restent incontournables quelque soit le tissu :

- la *plan de tissage* : il donne à l'armure sa définition (taffetas, sergé, interlock, etc.) en définissant le parcours dans le tissu de chacun des torons les uns par rapport aux autres. Le *chemin moyen d'un toron* est défini à partir du plan de tissage par la ligne centrale du toron, aussi appelé « ligne moyenne ».
- les *distances entre torons* : Les distances entre torons définissent la densité de torons dans le plan. Ainsi, dans le cas d'un tissu 2D, la distance entre trames et la distance entre chaînes permet de rendre compte de l'*équilibre* du tissu : si leur rapport est différent de 1, le tissu est dit « non équilibré ».
- le *nombre de fibres dans les torons* : associé aux propriétés de la fibre (diamètre et masse volumique), il définit le *volume de fibres* présent dans le tissu, indispensable pour déterminer le *taux de fibres* dans le composite.

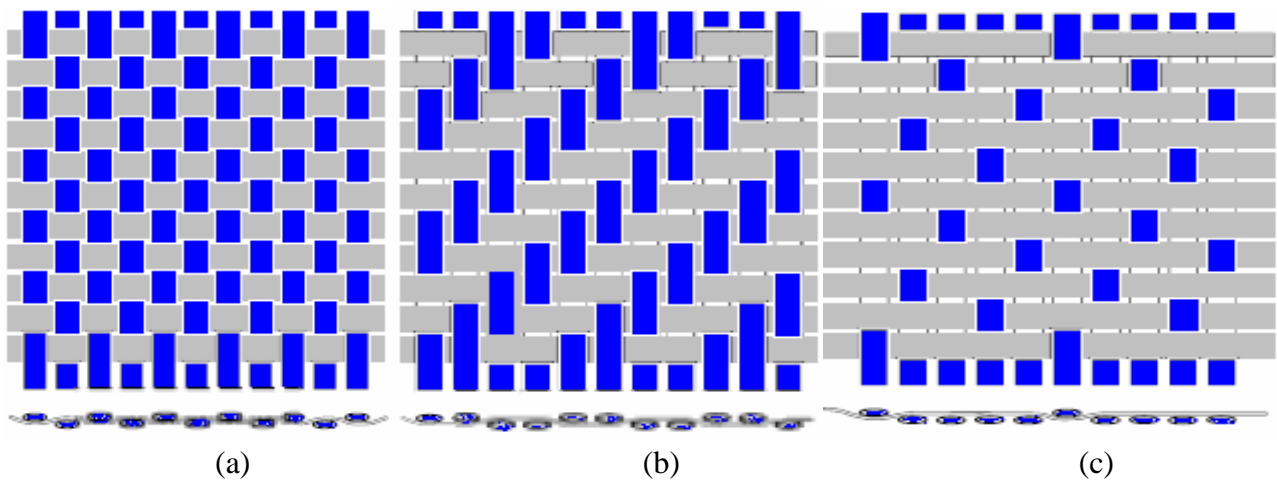


Figure II.16 : Tissus 2D (a) taffetas, (b) sergé de 2, (c) satin de 5 à décochement de 2 [91]

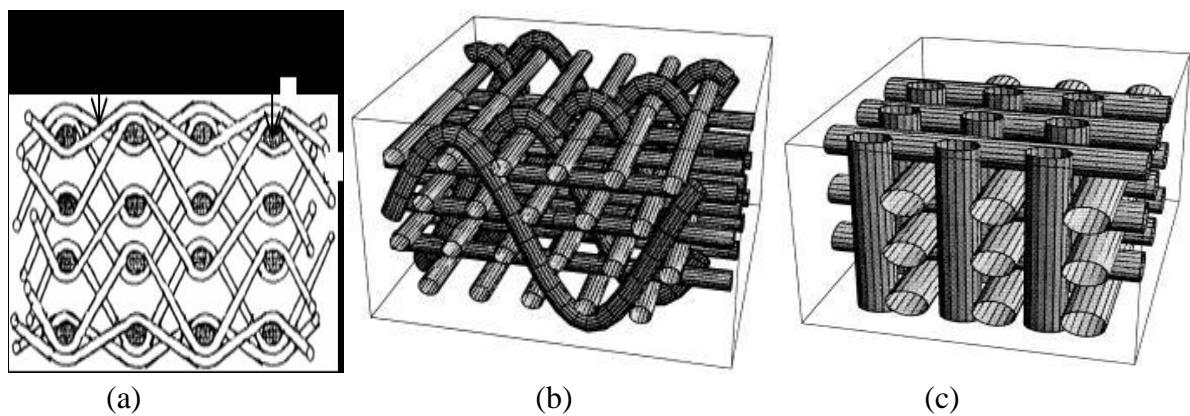


Figure II.17 : Tissus 3D : (a) « Layer to Layer Angle Interlock », (b) « Through the thickness Angle Interlock », (c) orthogonal [Adanur et Liao 1998] [91].

En jouant sur les paramètres de définition du tissu, un nombre illimité de configurations est possible. Toutefois, différentes catégories de tissus se dégagent. Pour les renforts tissés bidimensionnels, les différentes préformes sont les taffetas, les sergés et les satins, (*Figure II.17*). Pour les tissés tridimensionnels, les différentes catégories de préforme sont réunies sous le terme générique de tissus multicouches : « Layer to Layer Angle Interlock » (*Figure II.17.a*), « Through the thickness Angle Interlock » (*Figure II.17.b*) et « Orthogonal » (*Figure II.17.c*), chacune caractérisées par les chemins des torons de chaîne et de renforts à travers l'épaisseur du tissu [91].

II.8 Les résine

II.8.1 Les 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 2200 °C peuvent être atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la **figure I.1** [95]

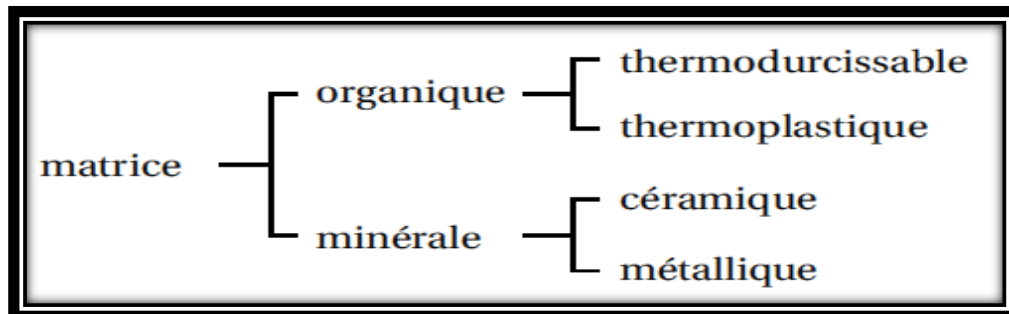


Figure II.18 : Types de matrice.

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. Actuellement on utilise surtout des résines thermodurcissables (**TD**) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (**TP**) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices. La structure des **TP** se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme, et les refroidir pour les fixer. La structure des **TD** a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pont (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

Il existe des différences entre matrices **TP** et **TD** :

II.8.1.1 Les résines thermodurcissables

Telles que les Polyesters insaturés c'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution, les Vinylesters sont produites à partir d'acides acryliques, elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible, les Phénoliques qui sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre, on distingue aussi les Epoxydes résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances **HP** et enfin les Polyuréthanes et les polyurées dans la fabrication de pièces composites, on les utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule.

Tableau II.3 : Caractéristiques des résines thermodurcissables.

Matrices TD	Masse Volumique (kg.m ⁻³)	Module D'élasticité Longitudinal (MPa)	Module de Cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de Rupture (traction) (MPa)	Allongement À rupture %	Coefficient de dilatation Thermique °C ⁻¹
	Mv	E	G	K	C _r	A	α
Epoxyde	1 200	4 500	1 600	0,4	130	2	11*10 ⁻⁵
Phénolique	1 300	3 000	1 100	0,4	70	2,5	1*10 ⁻⁵
Polyester	1 200	4 000	1 400	0,4	80	2,5	8*10 ⁻⁵
Polycarbona	1 200	2 400		0,35	60		6*10 ⁻⁵
Vinylester	1 150	3 300			75	4	5*10 ⁻⁵
silicone	1 100	2 200		0,5	35		
Uréthane	1 100	700 à 7 000			30	100	
Polyimide	1 400	4 000 à 19	1 100	0.35	70	1	8*10-5

II.8 1.2 Les résines thermoplastiques

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement à l'aide de fibres courtes leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. On utilise les Polyamide pour leur bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures, les Polytéréphtalate éthylénique et butylénique vu leur bonne rigidité, bonne ténacité, les Polycarbonate, les Polysulfure de phénylène etc [96]

Tableau II.4 : Caractéristiques des résines thermoplastiques.

Matrices TP	Masse Volumique (kg.m ⁻³)	Module D'élasticité Longitudinal (MPa)	Module de Cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de Rupture (traction) (MPa)	Allongement À rupture %	Coefficient de dilatation Thermique °C ⁻¹
	Mv	E	G	K	C _r	A	α
PP	900	1 200		0.4	30	20 à 400	9*10 ⁻⁵
PPS	1 300	4 000			65	100	5*10 ⁻⁵
PA	1 100	2 000		0.35	70	200	8*10 ⁻⁵
PES	1 350	3 000			85	60	6*10 ⁻⁵
PEI	1 150	3 300			105	60	6*10 ⁻⁵
PEEK	1 300	4 000			90	50	5*10-5

II.8 1.3 Les résines naturelles

Ces résines naturelles sont presque exclusivement d'origine végétale ; la gomme laque d'origine animale, sécrétée par l'insecte Coccus lacca, fait exception. Les exsudats de plantes récoltés à partir de végétaux vivants (résines de récolte) font l'objet de nombreuses applications industrielles dans des domaines variés. L'industrie exploite également des résines fossiles (ou semi-fossiles) provenant de végétaux d'espèces disparues. Ces résines, dont les copals sont les représentants principaux, se sont transformées chimiquement lors du séjour prolongé dans le sol. Les résines de récolte sont des résines récentes (tendres) récoltées à partir de végétaux vivants. En fonction de leur composition, elles se subdivisent en : **Oléorésine** c'est une solution naturelle de résines dans une huile essentielle ; **Baume** qui elle est une résine caractérisée par une proportion importante d'acides benzoïques et cinnamiques et leurs esters on rencontre aussi la **gomme résine** composée essentiellement de polysaccharides et le latex à composition laiteuse de matières organiques en dispersion dans un milieu aqueux.

Ces résines naturelles ont un très vaste spectre d'applications. Si les huiles essentielles des oléorésines et des baumes, sont la base pour de nombreux parfums et arômes, les résines ont été et sont encore utilisées essentiellement par les industries des revêtements (vernis, laques, peintures, mastics, ciments, colles...), de l'impression (encres d'imprimerie...), de la papeterie (encollage du papier), des polymères (adhésifs, caoutchouc, matériaux divers). Les gommes et de nombreuses résines sont par ailleurs la source d'une gamme de produits très variés pour les industries de l'agroalimentaire, la parfumerie, la cosmétologie, la pharmacie et la médecine [98].

II.8 .2 Les résines végétales

Produits complexes, les résines résultent souvent de sécrétions ou exsudats végétaux. Certaines sont fossiles comme l'ambre ; ainsi l'ambre jaune récolté sur les rivages de la Baltique aurait été produit à l'époque tertiaire par des conifères. D'autres sont physiologiques et produites en permanence par l'arbre pour assurer l'étanchéité de l'organe producteur ou pour protéger l'arbre d'insectes ravageurs, comme le cas de la résine de pin (Voir figure I.2). Un troisième type de résines serait produit en réponse à un stress climatique ou mécanique [98].



Figure II.19 : Exemple de résine de pin, Photo par Meanos (2004), Wikipedia.

Chapitre III
Caractérisation des Matériaux et Procédés
Expérimentaux

III.1. INTRODUCTION

Cette partie est dédiée à l'élaboration et la caractérisation des panneaux à âme en liège ou sciure de bois mélangée avec un mortier, renforcé de PVC et (ou)un tissu. Le matériau a été préparé au laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU. Le composite élaboré est un panneau qui peut être utilisé dans le bâtiment pour l'isolation thermique et acoustique. L'âme est un mélange de mortier et de liège ou de la sciure de bois, alors que les semelles sont en PVC et (ou) en tissu. Les renforts et les tissus sont collés par une résine époxy. Nous nous intéressons à l'étude de leur comportement mécanique. La première étape porte sur la caractérisation des différents matériaux utilisés ; par la suite, nous entamons les élaborations et les investigations expérimentales des panneaux composites. Cette partie de l'étude concerne la caractérisation mécanique en statique (flexion 3 points, compression, voilement, poinçonnement, et l'essai ultrasonique). Les résultats obtenus montrent que notre matériau peut être utilisé dans les différentes constructions comme cloison ou murs de séparation vu le bon comportement, la facilité de mise en oeuvre, la légèreté et leur faible coût.

Le liège et la sciure de bois sont des matériaux locaux disponibles en grande quantité en Algérie, que nous pouvons procurer facilement, de plus, le prix de ces matériaux est très captivant et presque gratuit. C'est des matériaux naturels de structure cellulaire possédant des propriétés très intéressantes : faible densité, grande compressibilité dimensionnelle, bonne isolation thermique, acoustique et vibratoire, stabilité chimique et longévité, d'après les travaux de [H. Pereira]. L'objectif est notamment de réduire la masse des structures et dans un souci de protéger l'environnement et la santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique.

III.2. PRESENTATION ET CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES MATERIAUX UTILISES**III.2.1. La sciure de bois**

La sciure de bois est constituée des fines particules désignent l'ensemble des résidus produits par le sciage de bois. La sciure de bois 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.



Figure III.1. Sciure de bois.

III.2.1.1. PREPARATION DE LA SCIURE DE BOIS

La **figure III.2** montre la méthode de préparation de la sciure de bois pour le tamisage, il fallait la fractionner à la main afin d'obtenir plusieurs taille ainsi de déterminer les différentes gammes à utilisé.



Figure III.2. fractionnement de la sciure de bois.

III.3. LE LIEGE

Le liège provient exclusivement de la partie extérieure de l'écorce du chêne-liège qui croit dans le nord de l'Afrique et au sud de l'Europe

Le liège est un matériau naturel présentant une hétérogénéité qui rend difficile toute normalisation. Le liège est un matériau renouvelable, recyclable, et réutilisable, sans additifs, aggloméré par sa propre résine 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. Le liège aggloméré

De plus, de nombreuses références bibliographiques montrent que la composition organique du liège joue un rôle important sur les qualités de celui-ci. En effet, **la subérine** est le constituant principal du liège et la grande compressibilité et élasticité du liège sont dues à sa présence en quantité importante dans le liège (PEREIRA 1988/2). **Les céroïdes** repoussent l'eau et contribuent à l'imperméabilité du liège (RIBAS-MARQUES 1952). Quant à la **lignine**

(substance qui imprègne les parois des cellules du bois et confère à celui-ci sa dureté), elle joue un rôle considérable dans la structure rigide des parois cellulaires (PEREIRA 1988/2).

Pereira (1988/1) trouve également que la composition organique du liège (subérine, lignine, polysaccharides) varie beaucoup à l'intérieur d'un même arbre. Une variation avec la localisation géographique est aussi trouvée pour les polysaccharides mais pas pour la subérine et lignine (PEREIRA 1988/1).

III.3.1. Propriétés du liège

Le liège possède 30 millions de cellules/cm³ et a 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).
- Antistatique et isolant électrique.

Des analyses minérales du liège sont réalisées, *le Tableau III.1*. Présente l'ordre de grandeur des teneurs en éléments minéraux du liège

Tableau III.1. 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

Tableau III.2. Composition chimique du liège

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

III.3.2. Caractéristiques physico-mécaniques

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

Tableau III.3. Fiche technique de granulat de liège

Caractéristiques	Tolérance
Densités	0.24 g/cm ³
Granulométries	4 / 8mm
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	$R = 0,5 / 0,75 / 1 / 1,25 \text{ m}^2\text{K/W}$
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.3.2. Le Liège expansé

Le liège utilisé est récupéré des forêts de la région de YAKOUREN de TIZI-OUZOU. Le liège est récupéré à l'état brut, ensuite broyé avec un broyeur spécial, le matériau est obtenu sous forme de granulats de diamètres allant jusqu'à 25mm.



Figure III.4. liège expansé

III.3.2.1. Définition des gammes pour la sciure de bois et le liège expansé

Après le broyage du liège et le fractionnement de la sciure de bois, nous procédons au tamisage du contenu, afin de séparer les grains de différentes tailles, ce que nous donnent des gammes typiques

- **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 retenue sur le tamis.
- **Tamisa (passant) :** la quantité du matériau qui passe à travers le tamis.

Nous avons apporté des quantités suffisantes de la sciure de bois et du liège, puis nous procédions au tamisage du contenu, afin de séparer les grains de différents diamètres et définir les différentes gammes à utiliser pour le confectionnement des éprouvettes.

La figure ci-dessous montre l'appareil utilisé (tamiseuse) (diamètre des mailles en [mm]).



Figure III.5. Tamiseuse

- Tamisage du liège et la sciure de bois :

Les différentes mailles de tamis utilisés :

Ø 12.5	Ø 10	Ø 8	Ø 6.3	Ø 5	Ø 3.15	Ø 1.25	Ø 0.8	Ø 0.315	Ø 0.125
--------	------	-----	-------	-----	--------	--------	-------	---------	---------

En prenant 2kg de chaque matériau (liège expansé et sciure de bois), comme le montre la figure III.6, on effectue les étapes suivantes :

- verser les 2kg du matériau dans le tamis.
- allumer la tamiseuse durant deux minutes.
- verser et mélanger les refus entre eux selon les gammes.



Figure III.6. Tamisage du liège et de la sciure de bois.

- **Définition des gammes et pesées des différents tamis pour le liège et la sciure de bois :**

Les pesées des refus de chaque tamis du liège ainsi que la sciure de bois sont obtenues à l'aide d'une balance électronique, les résultats sont résumés dans les **tableaux ci-dessous**.

Tableau III.4. les refus obtenus par tamisage du liège dans chaque tamis.







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

Tableau III.5. les refus obtenus par tamisage de la sciure de bois dans chaque tamis.

				
Tamisa : Ø 12 Refus : 2,5 g	Tamisa : Ø 10 Refus : 24,5 g	Tamisa : Ø 8 Refus : 438 g	Tamisa : Ø 6,3 Refus : 313 g	Tamisa : Ø 5 Refus : 623,5 g
				
Tamisa : Ø 3,15 Refus : 90 g	Tamisa : Ø 1,25 Refus : 346,5 g	Tamisa : Ø 0,8 Refus : 76,5 g	Tamisa : Ø 0,315 Refus : 63,5 g	Tamisa : 0,125 Refus : 15 g

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

- Pour la gamme (1) :

Les tamis considérés : 8 / 10 / 12,5.

- Pour la gamme (2) :

Les tamis considérés : 3,15 / 5 / 6,3.

- Pour la gamme (3) :

Les tamis considérés : 0,125 / 0,315 / 0,8 / 1,25.

Nous avons rassemblé les refus des tamis en déterminant des gammes *figure III.7*, ainsi leurs pesées. Les résultats ont donné dans le **Tableau III.6** :

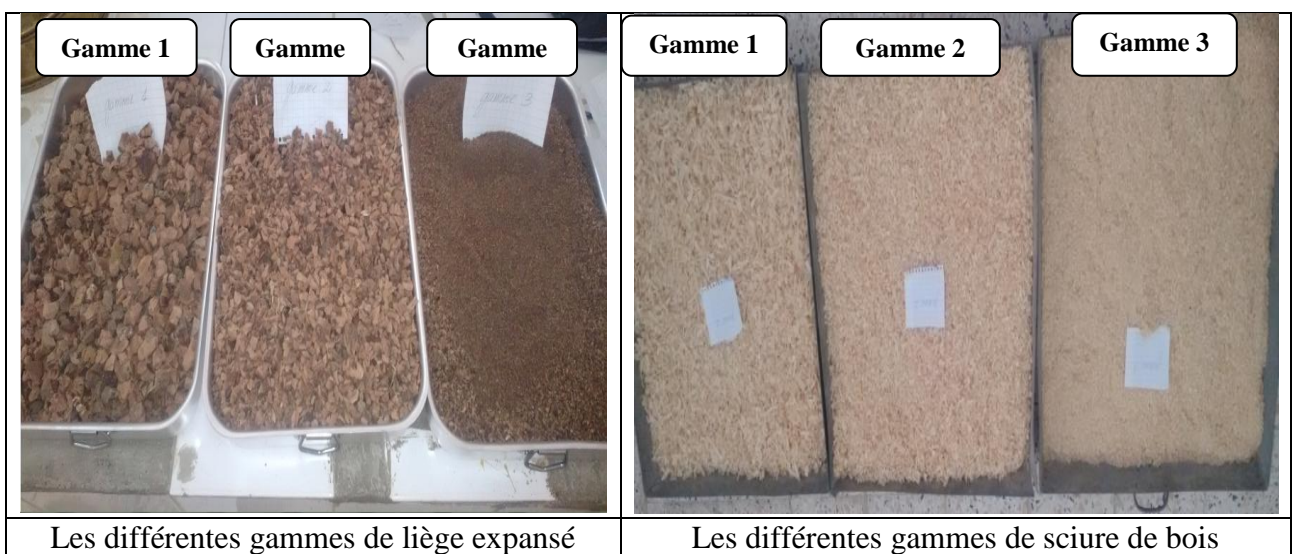


Figure III.7. Les gammes obtenues pour chaque matériau.

Tableau III.6. Granulométrie des différentes 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
Pesé du liège (g)	457,5	688	846
Pesé de la sciure de bois (g)	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.

- Détermination de la masse volumique apparente et absolue de la sciure de bois et du liège

Pour déterminer la masse volumique apparente nous avons utilisé un récipient cylindrique de dimensions connues (diamètre=11.3cm, hauteur=15.5cm, ainsi que le volume=1553.66cm³) ; le poids de récipient=304g, une règle à araser et une balance.

Méthodologie

- verser la sciure de bois sèche dans le récipient par couches successives et utilisant les mains.
- araser à l'aide de la règle.
- peser le contenu du récipient ($M_{\text{granulats secs}}$).

En fin on aura la masse volumique apparente :

$$\gamma_{app} = \frac{M_{\text{granulats secs}}}{V_{\text{récipient}}}$$

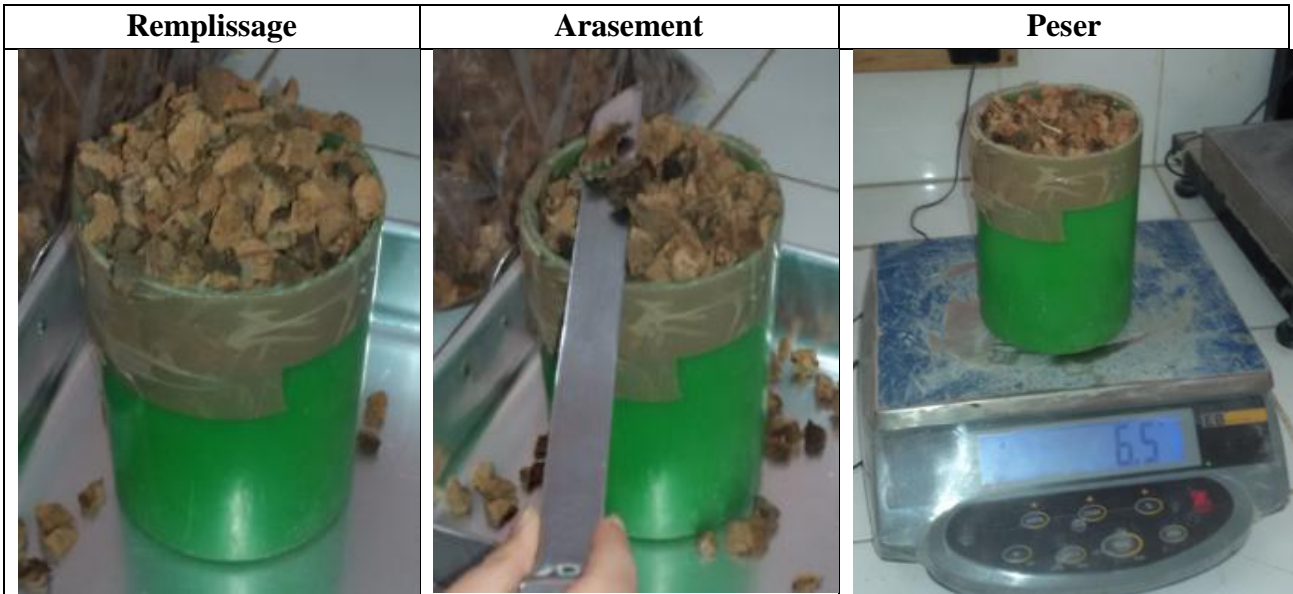


Figure III.8. élaboration de la mase volumique apparente

Remarque : Trois échantillons pour chaque gamme (sciure de bois ou liège expansé) sont utilisés.

Les **tableaux** suivants résument les différentes masses volumiques apparentes pour toutes les gammes et tous les échantillons de la sciure de bois et le liège expansé.

Tableau III.7. La masse volumique apparente de la sciure de bois

	Gamme 1 (g/cm³)	Gamme 2(g/cm³)	Gamme 3(g/cm³)
Échantillon 1	0,03476	0,05342	0,1052
Échantillon 2	0,04505	0,05471	0.1010
Échantillon 3	0,04345	0,05438	0.1013
Moyenne (la masse volumique apparente de la sciure de bois)	0,04108	0,05417	0.1025

Tableau III.8. La masse volumique apparente du liège expansé

	Gamme 1 (g/cm³)	Gamme 2(g/cm³)	Gamme 3(g/cm³)
Échantillon 1	0.1014	0.1058	0.1290
Échantillon 2	0.1013	0.1036	0.1322
Échantillon 3	0.103	0.1042	0.1298
Moyenne (la masse volumique apparente du liège expansé)	0.1019	0.1045	0.1303

Remarque

Nous avons remarqué que la masse volumique apparente des échantillons de la gamme(3) est plus grande que celle de la gamme(2) et celle de cette dernière est plus grande que celle de la gamme(1), la masse volumique apparente des échantillons de la sciure de bois et le liège expansé diminue du petit diamètre au grand diamètre.

La cause de cette diminution de masse volumique apparente est l'augmentation des vides intergranulaires dans les échantillons de la sciure de bois et le liège expansé à grand diamètre et grande taille.

- Détermination de la masse volumique absolue de la sciure de bois

La densité absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée par la masse du même volume d'eau à la même température, avec déduction faite de tous les vides aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

- Elaboration de la masse volumique absolue de la sciure de bois

Pour cette expérience, nous avons besoin d'une éprouvette graduée dans laquelle nous versons un certain volume d'eau que nous noterons $V_1=1200 \text{ cm}^3$; en suite nous pesons une masse de **50g** de

granulat que nous introduisons dans l'éprouvette en veillant à éliminer toutes les bulles d'air et delà nous lisons le nouveau volume indiqué sur l'éprouvette que nous appellerons $V_2=1250 \text{ cm}^3$.le volume absolu est donné par la formule suivante :

$$V_{\text{abs}}=V_2 - V_1$$

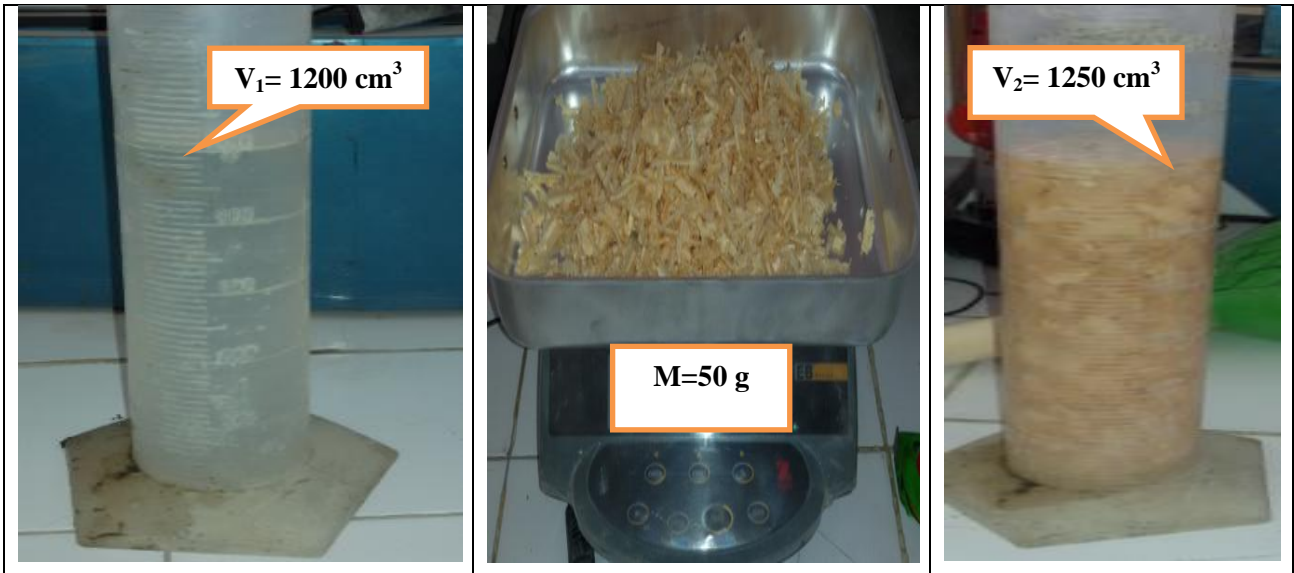


Figure III.9. Elaboration de la masse volumique absolue de la sciure de bois

- Calcul de la masse volumique absolue de la sciure de bois

$$V_{\text{abs}}=V_2 - V_1=1250 \text{ cm}^3-1200 \text{ cm}^3=50 \text{ cm}^3$$

La masse volumique absolue d'un granulat est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{\text{abs}}= M/ V_{\text{abs}}=50\text{g}/50 \text{ cm}^3=1 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{abs}} = M/ V_{\text{abs}}$$

Tableau III.9. Différentes masses volumiques absolues pour toutes les gammes et tous les échantillons de la sciure de bois

	Gamme 1	Gamme 2	Gamme 3
La masse (m)	50 g	50 g	50 g
$V_1(\text{eau})$	1200 cm^3	1200 cm^3	1250 cm^3
$V_2(\text{eau +sciure})$	1250 cm^3	1250 cm^3	1250 cm^3
La masse volumique absolue de la sciure de bois ρ_{abs}	1 g/ cm^3	1 g/ cm^3	1 g/ cm^3

Remarque

Le sciage du bois que nous avons utilisé, nous donne une sciure très fine.

- **Détermination de la masse volumique absolue du liège expansé**

Le liège expansé que nous avons utilisé, contient des pores ouverts et fermés, Pour déterminer sa masse volumique absolue, il faut le broyer très finement et mesurer sa masse volumique réelle de la poudre obtenue. C'est le rapport de la masse du matériau sur le volume réel auquel nous avons soustrait le volume des pores (ouverts et fermés)

- **Masse volumique absolue de la sciure de bois et du liège expansé selon la norme : NF P 18-554 et NF P 18-555**

Pour la réalisation des éprouvettes à base du liège expansé et de la sciure de bois, nous avons travaillé avec la masse volumique absolue selon la norme (NF P 18-554 et NF P 18-555)

La masse volumique absolue du bois	La masse volumique absolue du liège
$\rho_{abs}=500 \text{ kg/m}^3$	$\rho_{abs}=240 \text{ kg/m}^3$

- **La détermination de la porosité et la compacité de la sciure de bois et du liège expansé**

La porosité et la compacité sont liées par relation : $p+c=1$ (ou 100%)

Pour un matériau sec, on peut déterminer la compacité ou la porosité à partir des masses

volumiques :
$$c = \frac{V_s}{V} = \frac{V_s}{V} \times \frac{M_s}{M_s} = \frac{\frac{M_s}{V}}{\frac{M_s}{V_s}} = \frac{\rho}{\rho_{abs}}$$

- **La compacité**

La compacité C est le rapport du volume des pleins au volume total

$C=V_s/V$

$C=\rho/\rho_{abs}$

- **La porosité**

La porosité P est le rapport du volume vide au volume total

$P=V_v/V$

$P=1-C$

Tableau III.10. suivant résume les différentes compacités pour toutes les gammes et tous les échantillons de la sciure de bois

	Gamme 1	Gamme 2	Gamme 3
La masse volumique apparente ρ (kg/m³)	41,08	54,17	102,5
La masse volumique absolue ρ_{abs} (kg/m³)	500	500	500
La compacité C (%)	8.22	10.83	20.5
La porosité P (%)	91,78	89,17	79,5

Tableau III.11. Différentes compacités pour toutes les gammes et tous les échantillons du liège expansé

	Gamme 1	Gamme 2	Gamme 3
La masse volumique apparente ρ (kg/m ³)	104,2	104,5	130,3
La masse volumique absolue ρ_{abs} (kg/m ³)	240	240	240
La compacité C (%)	43.42	43.54	54.29
La porosité P (%)	56,58	56,46	45,71

III.4. Le mortier :

Le mortier se distingue du béton par l’absence de gravillons. Le mortier est un mélange de sable, ciment, eau et éventuellement d’adjuvants. De multiples compositions de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liants (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; le choix de leur nature et de leur dosage est en fonction de l’utilisation envisagée du mortier. Habituellement le mortier est utilisé comme un matériau de construction notamment pour tous les éléments en maçonnerie, les enduits, les chapes, les scellements et les calages etc. L’objectif de notre étude est d’utiliser le mortier comme liant et outil d’aide à la formulation et la caractérisation des multicouches à confectionner.

Le mortier que nous avons utilisé est un mélange de ciment, sable et de l'eau :

- **Ciment** : le ciment utilisé est un ciment portland importé de marque CIMAT de classe CEM/A-L 42.5R.
- **Sable** : le sable utilisé provient d'une sablière, stocké à laboratoire de l'université.
- **L'eau** : l'eau de gâchage utilisé est l'eau du robinet. (eau potable)

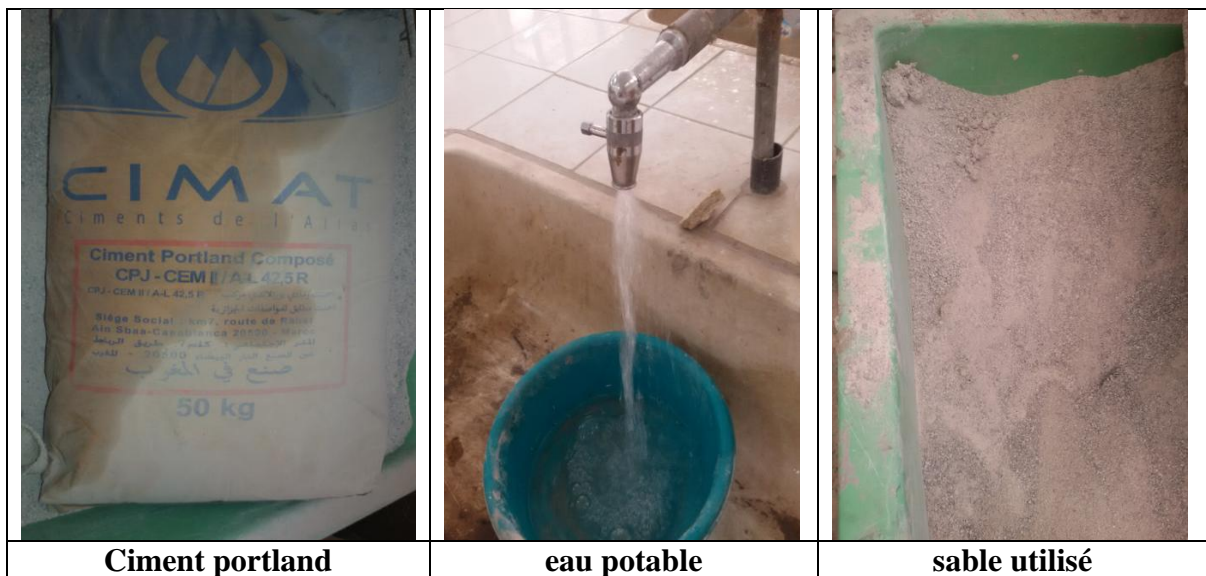


Figure III.10. les matériaux utilisés pour la Préparation du mortier.

III.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 polyamides. Les groupements fonctionnels de la résine 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 :

- **Elément A : résine STR.**
- **Elément B : résine durcisseur STR.**

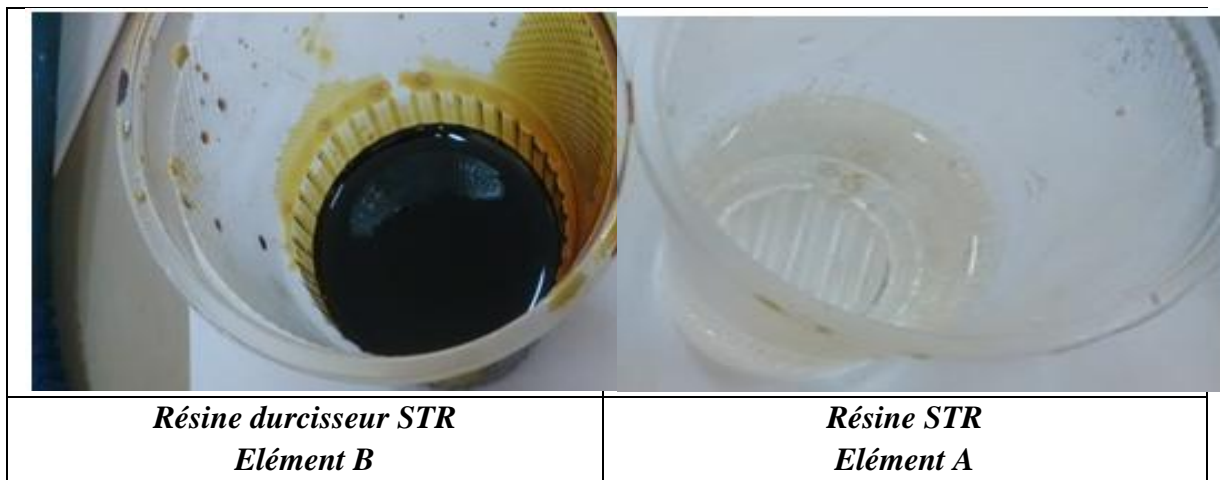


Figure III.11. les composants de la Résine utilisée.

- **Propriétés de résine époxy**
 - 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

- **Caractéristiques de résine époxy**

Le **tableau III.12** résume les caractéristiques de la résine fournies par le fabricant :

Tableau III.12. 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 (Ω .m)	10 ¹⁰ à 10 ¹³

III.6. Le tissu

Le tissu de polypropylène que nous avons utilisé est un tissu unidirectionnel constitué de fibres à maille ellipsoïde.

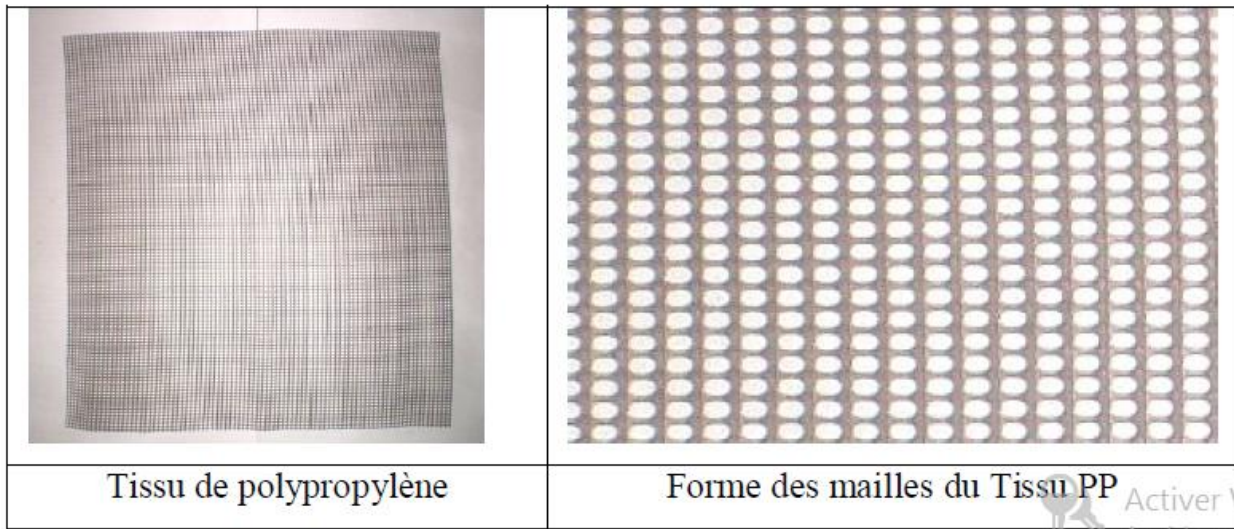


Figure III.12. Forme du tissu en fibres de polypropylène

- **Propriétés du tissu**
 - Léger.
 - Faible coût.
 - Résistant à la traction.
 - Résistant aux chocs.

- **Caractéristiques du tissu**

Les propriétés mécaniques du polypropylène à température ambiante :

Tableau III.13. 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 résume les caractéristiques géométriques et physiques du tissu de polypropylène :

Tableau III.14. Caractéristiques du tissu de polypropylène.

Masse surfacique (g/m ²)	140 g/m ²
Masse volumique (g/cm ³)	0.90
Dimension des mailles (mm)	2 mm x 1.5 mm
Nombre de maille /m ²	150000 mailles / m ²
Épaisseur du tissu (mm)	0.5 mm

III.7. Le polymère (PVC)

Le **polychlorure de vinyle**, connu sous le sigle **PVC** (sigle venant de l'appellation anglaise *polyvinylchloride*, composé à 57% de chlore et à 43% d'éthylène, le PVC est la seule matière plastique d'usage courante constituée par plus de 50% de matière première d'origine minérale existant à profusion dans la nature.

La résine PVC 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.

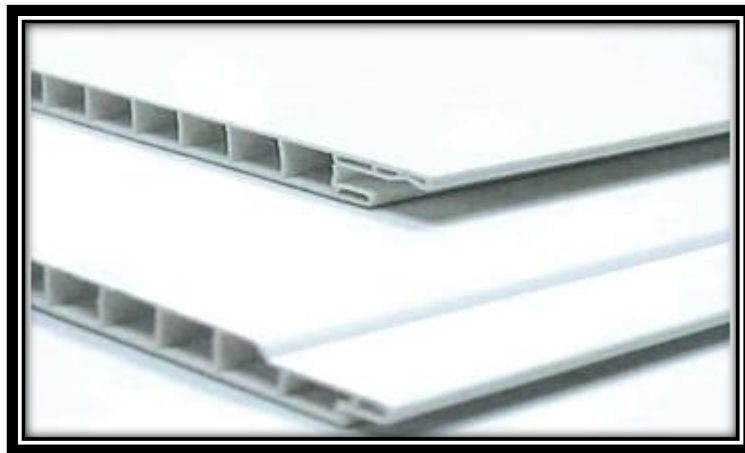


Figure III.13. PVC (polychlorure de vinyle)

- **Propriétés mécaniques et physiques du PVC**

- 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

- **Propriétés chimiques du PVC**
 - 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)

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

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

III.8. La colle (vinylique)

Les **colles vinyliques** sont des colles blanches destinées à coller le bois et tous ses dérivés ; elles peuvent servir aussi à réunir des matériaux tels que le papier, le carton, le tissu et le verre, et aussi à la fabrication de porcelaine froide. Pour des questions de séchage, une des deux surfaces doit être absorbante, par exemple bois sur verre mais pas verre sur verre. Par ailleurs ces colles ne conviennent qu'aux matériaux hydrophiles (donc pas aux plastiques) et sont incompatibles avec les métaux, surtout le fer avec lequel une réaction chimique a lieu. Elles sont constituées de polyacétate de vinyle (ou PVAc) en solution aqueuse.

Elles conviennent aux travaux de menuiserie intérieure et à la réparation d'objets non soumis à l'humidité



Figure III.14. La colle vinylique

III.9. Le MEDAPOXY REP

Le **MEDAPOXY REP** est un liant polymère réactif constitué de deux composants, une base en polymère réactif et un durcisseur qui polymérisent à température ambiante. C'est un mastic époxy de réparation structurale et de scellement à base de résine époxy sans solvant. Le **MEDAPOXY REP** est fourni sous forme de kit pré dosé en 2 composants :

Élément A : Résine

Élément B : Durcisseur



Figure III.15. La résine MEDAPOXY (élément A et B)

III.9.1. Domaines d'application

- Réparation des bétons et mortiers
- Ragréage et surfacage des sols dégradés, réparation d'angles de poutres
- Réparation des épaufrures, lèvres de joint
- Réparations sur supports métalliques
- Réparation navale
- Réparation de broyeurs
- Ancrages horizontaux et verticaux
- Réparation des fissures
- Collage de carreaux antiacide
- Collage de céramique, granite et marbre

III.9.2. Propriétés

- Résistances mécaniques très élevées
- Bonne adhérence sur tout support : béton, mortier, pierre, briques, métaux...
- Durcit sans retrait
- Bonne dureté
- Bonne tenue à l'abrasion, aux chocs et aux agents corrosifs

Tableau III.15. Caractéristiques de la résine *MEDAPOXY REP*

Rapport pondéral (A / B)	1/1
Densité (ISO758)	1,4 ± 0,05
DPU	50 mn à 20°C et 65% HR
Rc 28 (EN 12190)	>68 MPa
Adhérence sur béton (EN 1542,)	>3MPa
Durcissement complet	07 j à 20°C

III.9.3. Conditions d'utilisation :

Ne pas appliquer lorsque la température ambiante ou celle du support est inférieure à 10°C ou supérieure à 35°C.

III.9.4. Précautions d'emploi

Les résines époxydiques peuvent irriter la peau et les muqueuses. En conséquence, il est conseillé de mettre des gants en caoutchouc lors de l'utilisation. En cas de contact avec les yeux, laver à grande eau et consulter un médecin.

III.10. Préparation et élaboration des éprouvettes

Pour le besoin de notre étude nous devons sélectionner la meilleure gamme pour le liège et la sciure de bois, dont nous donne une bonne adaptation avec le liant colle, ainsi que de bonnes propriétés et caractéristiques.

Afin de découvrir la gamme adéquate, nous avons réalisé des corps d'épreuves prismatiques notamment des éprouvettes à base de la sciure de bois ou du liège, dont nous les avons effectué des essais mécaniques pour déterminer leurs caractéristiques spécifiques, en utilisant des moules de dimensions (16x4x4 cm³) et de volume $V_{ép} = 256 \text{ cm}^3$, qui est montré par la figure ci-dessous



Figure III.16. Vue du moule (16x4x4 cm³) et (36x36x36 cm³) utilisé

Après la détermination des gammes de la sciure de bois, nous avons obtenu une immense quantité de la gamme moyenne (gamme2) par rapport aux autres gammes (1 et 3), ce que nous favorise d'effectuer plusieurs essais d'optimisation.

III.11. Composition de l'éprouvette colle- sciure de bois

Nous avons pris une quantité de la sciure de bois gamme (2) présentant 60% de volume de notre éprouvette, et complétant les 40% du volume par la colle. La quantité est augmentée de 10% de chaque constituant pour tenir compte des pertes lors du malaxage et pour assurer le remplissage de nos moules, en suivant les étapes suivantes

- Étaler une quantité suffisante d'huile usée sur les parois de moules avant chaque remplissage. Pour faciliter le démoulage des éprouvettes.
- Réaliser plusieurs éprouvettes à partir de la même gâchée pour avoir un nombre suffisant d'éprouvettes.

- La masse de la sciure de bois pour une éprouvette

$$M = \rho * V$$

$$M_{SC} = 256 * 0.5 = 128 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{SC,u} = (110\% M_{SC}) * 60\% = (128 \text{ g} + 12.8 \text{ g}) * 60\% = 84,50 \text{ g}$$

- La masse de la colle pour une éprouvette

$$M_{co,u} = 112.75 \text{ g}$$

Tableau III.16. Quantités des matériaux utilisés

La sciure de bois	La colle
84.5 g	112.75 g

III.11.1. Procédure de réalisation des éprouvettes colle sciure de bois

Nous versons la quantité de la sciure de bois, et nous ajoutons la quantité de la colle successivement, en mélangeant très bien le contenu à la main à l'aide d'une petite truelle pour homogénéiser le mélange.

Lors de notre préparation du mélange, nous avons rencontré les difficultés suivantes :

- une grande absorption et brève de la sciure de bois de la colle
- une difficulté lors de malaxage du mélange
- formation des pelotes et quelques grains de la sciure sont non imbibés de colle
- Difficulté de remplissage des moules
- collage du mélange sur le matériel utilisé et difficulté du nettoyage.

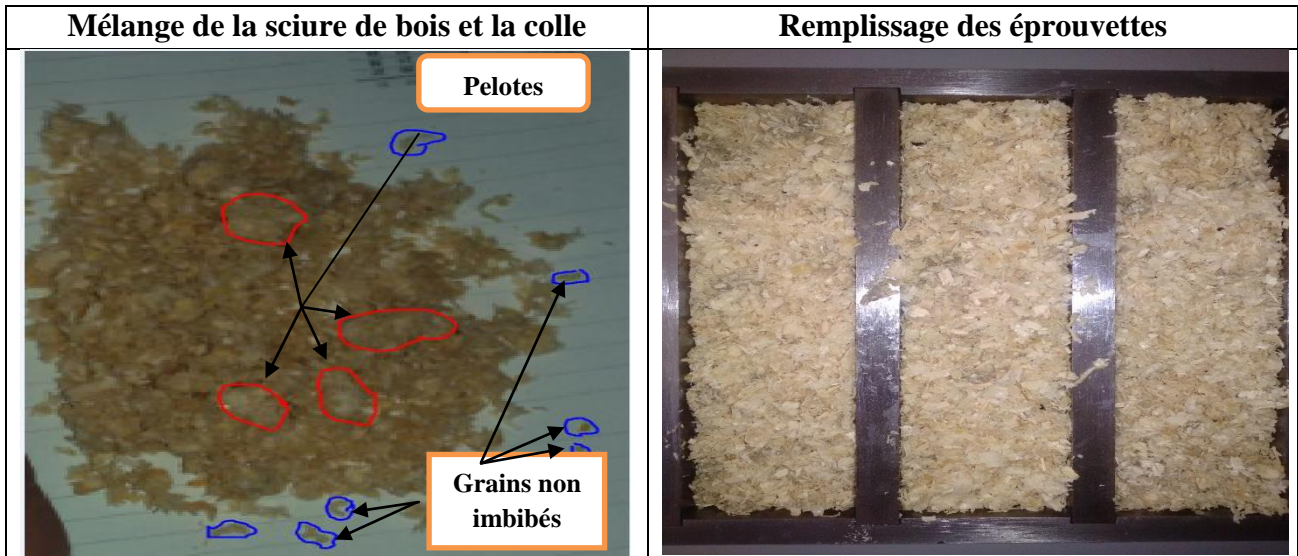


Figure III.17. Elaboration des éprouvettes colle sciure de bois

Nous avons conservé les éprouvettes au niveau de laboratoire du génie civil, de l'université de TIZI-OUZOU, à une température ambiante pendant une semaine.

Après la période de séchage de la résine, nous avons commencé le démoulage des éprouvettes en remarquant que ces dernières sont fragiles et s'effritaient, comme montre la *figure III.17*



Figure III.18. Epreuve (sciure de bois / colle) pendant le démoulage.

Pour améliorer l'adhésion entre les grains de la sciure de bois, nous avons ajouté aux autres éprouvettes non démoulées une quantité 40g de la colle.

En distribuant la colle uniformément avec une seringue, afin de mouiller les grains que ne sont pas imbibés par la colle pendant le malaxage, comme monter dans la *figure III.18*.



Figure III.19. Augmentation de la quantité de la colle

- Démoulage

Après la durée de conservation de ces éprouvettes, nous avons procédé au démoulage de ces dernières, en remarquant que la colle descend jusqu'au fond du moule, en ayant toujours le problème d'adhérence entre les grains de la sciure de bois, comme montrer dans la *figure III.19*.



Figure III.20. problème d'adhérence entre les grains de la sciure de bois

- **Commentaires et observations**

La porosité de la sciure de bois qui représente 90%, que nous conduit à utiliser une grande proportion de la colle.

La quantité de la colle employée est de 152.75g qui représente 60% de volume de l'éprouvette, de cela nous avons constaté que notre matériau ça va revenir très cher.

La fluidité et la viscosité de la colle lui permet de se propager entre les grains de la sciure de bois, sans assurer des bonnes liaisons entre les grains de la sciure de bois.

La désintégration des grains de nos éprouvettes, nous mène à constater la non adaptation de la résine et la sciure de bois.

III.12. Conclusion partielle

Cette investigation expérimentale, nous a poussée à revoir notre approche de confection du matériau composite pour la réalisation des panneau composites. Pour cela nous avons prévu une amélioration de notre matériau par une reformulation, en changeant la colle par un autre liant adéquat, et nous avons prévu le mortier.

III.13. Préparation du mortier

Pour réaliser correctement notre mortier à la main, nous avons préféré des petites gâchées plutôt que de grande quantité difficile à remuer, en suivant les étapes suivantes :

- Mélanger le sable et le ciment jusqu'à obtenir un mélange homogène.
- Ensuite, ajouter l'eau en mouillant au fur à mesure le mélange.
- Il ne faut pas trop mouiller le mortier, il perdrait en résistance.

III.13.1. Calcul des quantités de matériaux nécessaires pour les différentes éprouvettes

- **Eprouvette témoin :**

Pour identifier les caractéristiques mécaniques et physiques du mortier, nous devons réaliser des éprouvettes témoins.



Figure III.21. Eprouvette témoin du mortier.

- **Formulation du mortier utilisé :**

- Ciment : 400 kg/m³
- Sable : 1 400 kg/m³
- Eau : 202 kg

• **La quantité du mortier témoin :**

Pour tenir compte de la perte de matériaux lors du malaxage, nous avons calculé la masse de chaque matériau, en ajoutant 10% de chaque masse de constituants

➤ Ciment: $M_c = (400\text{kg/m}^3) \times (256.10^{-6}\text{m}^3) = 0.1024\text{kg} = 102.4\text{g}$

$10\%M_c = 10.24\text{g}$

La quantité du ciment employé dans une éprouvette : $M_{c,u} = 102.4\text{g} + 10.24\text{g} \approx \mathbf{113\text{g}}$

➤ Sable : $M_s = (1400\text{kg/m}^3) \times (256.10^{-6}\text{m}^3) = 0.3584\text{kg} = 358.4\text{g}$

$10\%M_s = 35.84\text{g}$

La quantité du sable employé dans une éprouvette : $M_{s,u} = 358.4\text{g} + 35.84\text{g} \approx \mathbf{395\text{g}}$

➤ Eau : $M_e = (202\text{kg}) \times (256.10^{-6}\text{m}^3) \approx 52\text{g}$

$10\%M_e = 5.2\text{g}$

La quantité de l'eau employée dans une éprouvette : $M_{e,u} = 52\text{g} + 5.2\text{g} \approx \mathbf{58\text{g}}$

• **La quantité de la sciure de bois utilisée pour une éprouvette :**

$M_{sr} = \rho_{sr} \times V_{ép}$

$M_{sr} = (500 \text{ kg/m}^3) \times (256.10^{-6}\text{m}^3) = \mathbf{128\text{g}}$

$10\%M_{sr} = 12.8\text{g}$

$M_{sr,u} = 12.8\text{g} + 128\text{g} \approx \mathbf{141\text{g}}$

• **La quantité du liège utilisé pour une éprouvette :**

$M_L = (240 \text{ kg/m}^3) \times (256.10^{-6}\text{m}^3) = 62\text{g}$

$10\% M_L = 6.2\text{g}$

$M_{L,u} = M_L + 10\% M_L = 62\text{g} + 6.2\text{g} = \mathbf{68\text{g}}$

Tableau III.17. Divers pourcentages ainsi que les différentes masses utilisées pour l'élaboration des éprouvettes.

Les matériaux	Les gammes	Le pourcentage	La masse (g)	Le pourcentage	La masse(g)
La sciure de bois	La gamme 1	40%	56	50%	70
	La gamme 2				
	La gamme 3				
Le liège	La gamme 1	40%	27	50%	34
	La gamme 2				
	La gamme 3				
Mortier	Le ciment	60%	68	50%	57
	Le sable		237		198
	L'eau		35		29

III.13.2. Mode opératoire pour la réalisation des éprouvettes, mortier sciure de bois et mortier liège

Après la préparation des moules et la détermination des quantités suffisantes de chaque constituant, nous avons suivi les étapes et prendre les précautions suivantes :

- Verser la quantité des matériaux secs (mortier et sciure de bois ou liège).
- Mélanger le contenu jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.
- Ajouter la quantité d'eau optimale, en mouillant au fur à mesure le mélange.
- Étaler une quantité suffisante d'huile usée sur les parois de moules avant chaque remplissage. Pour faciliter le démoulage des éprouvettes
- Verser le mélange dans le moule, en damant légèrement à l'aide d'une petite raclette pour que le mélange occupe tout le volume du moule.
- Respecter le mode de conservation (entreposage).

Lors du confectionnement des éprouvettes à base de la sciure de bois précisément la gamme 1 et 2, nous avons observé que le mélange mortier sciure de bois occupait un volume important, remplissant pratiquement deux éprouvettes au lieu d'une pour la gamme (1) et trois eu lieu de deux pour la gamme(2), ce qui lui offrait une dimension économique.



Figure III.22. principales étapes d'élaboration des éprouvettes

- **Conservation des éprouvettes**

Nous avons conservé les éprouvettes au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de TIZI-OUZOU, à une température ambiante pendant une période de 14 jours.

Eprouvettes avec mortier sciure de bois $E_{m sr}$:







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

Figure III.23. Eprouvettes (mortier/ sciure de bois).

- Observations**

Nous avons démoulé facilement les éprouvettes, on a remarqué que ces dernières possèdent une bonne stabilité dimensionnelle, ainsi qu'une excellente adhérence entre les particules de la sciure de bois et le mortier et une bonne adaptation entre ces deux matériaux.

Eprouvettes avec mortier liège $E_{m L}$:







Gammes	50 % liège / 50 % mortier	60 % liège / 40 % mortier
Gamme 1		
Gamme 2		
Gamme 3		

Figure III.24. Eprouvettes (liège / mortier)

- **Observation**

- Après le démoulage des éprouvettes (mortier liège), nous avons remarqué que quelques éprouvettes s'effritaient particulièrement la gamme(1), dans la suite du travail, nous n'avons pas pris en considération ces éprouvettes
- Nous avons raisonné de varié le taux des matériaux pour cette éprouvette gamme(1), en prenant **40 %** de liège et **60 %** du mortier au lieu de l'inverse (**60%** de liège et **40%** du mortier) (**figure.III.24**)



Figure III.25. Eprouvette (40 % liège / 60 % mortier) (gamme(1))

Tableau III.18. Diverses pesées des différents types d'éprouvette en mortier sciure de bois et mortier liège

Gammes	40 % sciure / 60 % mortier	50 % sciure / 50 % mortier
Poids des éprouvettes Gamme 1 (g)	180.5 184.5	122.5 132.5
Poids de éprouvettes Gamme 2 (g)	203.5 207	149 152
Poids des éprouvettes Gamme 3 (g)	315 304.5	149.5 160

Gammes	40 % liège / 60 % mortier	50 % liège / 50 % mortier
Poids des éprouvettes Gamme 1 (g)	258 277	199.5 203.5
Poids des éprouvettes Gamme 2 (g)	262.5 264.5	172 177.5
Poids des éprouvettes Gamme 3 (g)	322 305	274.5 281.5
Poids des éprouvettes Mortier témoin(g)	539 528	

Remarque

D'après les tableaux des pesées ci-dessus, nous avons remarqué que la masse des éprouvettes de la gamme(3) est plus grande que celle de la gamme(2) et celle de cette dernière est plus grande que celle de la gamme(1), et pour les deux types de corps d'épreuves (mortier sciure de bois ou mortier liège expansé), constatant que la masse de nos éprouvettes diminue du petit diamètre au grand diamètre.

III.14. ESSAIS MECANIQUES

Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs des caractéristiques mécaniques des matériaux, par exemple le module d'Young à la limite d'élasticité, la résistance à la compression, la résistance à la traction.

Notre objectif de ces essais est de sélectionner le type d'éprouvette qui présente les meilleures propriétés mécaniques pour être utilisée dans la confection des panneaux.

III.14.1. Machine d'essais

Les essais de compression et de flexion sur les corps d'épreuves sont réalisés en utilisant une machine de marque **IBERTEST**. C'est une 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 (**wintest**), ce qui permet une bonne acquisition de données, c'est-à-dire les diagrammes (force-déplacement et force-temps) les histogrammes, classement et stockage des données 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 0.1KN/s.



Figure III.26. Machine d'essais IBERTEST

III.15. PREPARATION DES PANNEAUX EN MSC

Après avoir sélectionné le mortier et la sciure de bois comme des matériaux qui conviennent pour la confection des panneaux, Nous avons utilisé un coffrage en bois démontable de dimensions (3x36x36cm³), ainsi que le volume est 3888cm³, fabriqué au laboratoire de génie civil de l'université de TIZI-OUZOU.

Tableau III.19. Quantités des matériaux utilisés pour un panneau du MSC

Les matériaux		Le pourcentage	La masse (g)
La sciure de bois G3		40%	855.36
Le mortier	Le ciment	60%	1026.43
	Le sable		3500
	L'eau		864

III.15.1. Procédures et précautions à respecter

Lors de la préparation du mélange, la conservation et le démoulage, Nous avons suivi les mêmes procédures et les mêmes précautions, que lorsque nous avons élaboré des éprouvettes prismatiques



(16x4x4cm³).

Figure III.27. Remplissage des moules avec le mélange [mortier et mortier-sciure de bois]

III.15.2. Renforcement des panneaux

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques de nos panneaux, nous avons renforcé les panneaux par le tissu, le PVC à l'aide de la résine. Trois types de panneaux sont réalisés :

1. Panneaux mortier sciure de bois renforcé par tissu de part et d'autre (panneau symétrique).
2. mortier sciure de bois renforcé par PVC de part et d'autre (panneau symétrique).
3. Panneaux mortier sciure de bois renforcé par le tissu appliqué sur une face et le PVC sur l'autre face (panneau dissymétrique).

Les Procédures et les précautions suivantes sont respectées :

- couper le PVC et le tissu sur mesure de la surface des panneaux ($36 \times 36 \text{cm}^3$)
- dépoussiérer les surfaces des panneaux pour éviter le décollement du liant polymère
- **Procéder à la préparation du mélange (résine, durcisseur) :**
 - Préparer que la quantité de mélange pouvant être utilisée durant ce temps.
 - Remuer les éléments **A et B** séparément pour les homogénéiser
 - Verser le contenu d'élément **B** (durcisseur) dans l'élément **A** (résine)
 - Mélanger pendant 3 minutes avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation.
 - appliquer une quantité suffisante de la résine **MEDAPOXY REP** et la répartir sur la surface à l'aide d'un grattoir.
 - Poser rapidement le type de renfort (tissu ou PVC) sur la résine appliquée sur les surfaces des panneaux.
 - Appuyer par un chargement uniformément réparti, afin d'assurer un bon contact entre les composants de composite (panneau, renfort, résine).

Toutes les éprouvettes sont conservées au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de TIZI-OUZOU pendant une période de 07 jours, c'est la période de durcissement complet de la résine selon sa fiche technique.



Panneau en MSC renforcé par tissu-PVC



Panneau en MSC renforcé par tissu-tissu

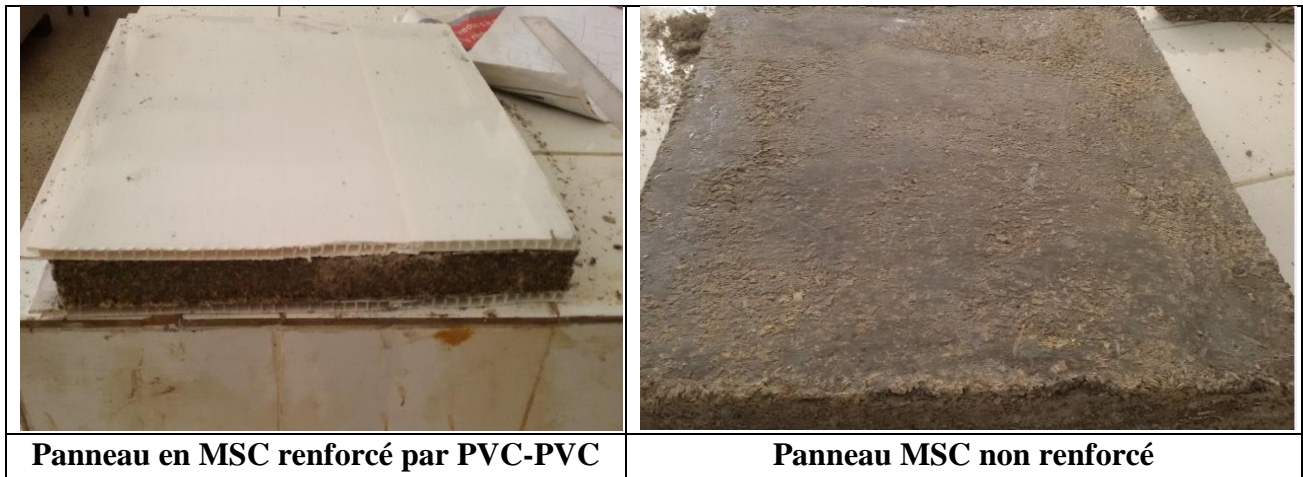


Figure III.28. Différents panneaux composites élaborés

Tableau III.20. les différentes pesées des panneaux réalisés

LES PANNEAUX	Les pesées (g)	La moyenne des pesées (g)
M-SC-PP	6019.5	6000.3
	5981.0	
M-SC-TT	5702.0	5689.0
	5676.0	
M-SC-TP	6008.0	6044.0
	6080.0	
M-SC (sans renforcement)	4834.0	4720.0
	4906.0	
M-TEMOIN	8387.0	8302.3
	8217.5	
MSC-TEMOIN	4503.0	4497.0
	4491.0	

III.15.3. Essais mécaniques

L'étude du comportement mécanique des matériaux a pour but de connaître leur réponse à une sollicitation donnée.

Toute conception d'une nouvelle structure nécessite une connaissance du comportement mécanique des matériaux utilisés, ainsi que leurs propriétés mécaniques telles que (le module de Young, la résistance maximale, le coefficient de poisson)

Pour ce faire, il existe plusieurs techniques de caractérisation selon le fonctionnement et le domaine d'utilisation de ce matériau.

Les essais que nous avons opté pour l'étude du comportement mécanique de nos panneaux, sont des essais destructifs et non destructifs, notamment le voilement et le poinçonnement

Les essais destructifs sont effectués avec la même machine **IBERTEST** décrite précédemment, sauf la disposition des accessoires qui change pour chaque type d'essai.

III.15.3.1. Essai de voilement

On appelle voilement, le phénomène observé lorsqu'une plaque ou un panneau, initialement plan, est soumis à des efforts agissant strictement dans son plan, susceptibles de la lui faire quitter cette configuration.

Ce phénomène a lieu lorsque la sollicitation atteint un seuil critique, influant alors sur la capacité portante du panneau.

La compression est la source de cette instabilité, résulte par l'action directe d'une distribution de contraintes normales

La **figure III.28** montre l'essai de voilement et la disposition d'un panneau dissymétrique selon la norme **NF T 54-604 [99]**.

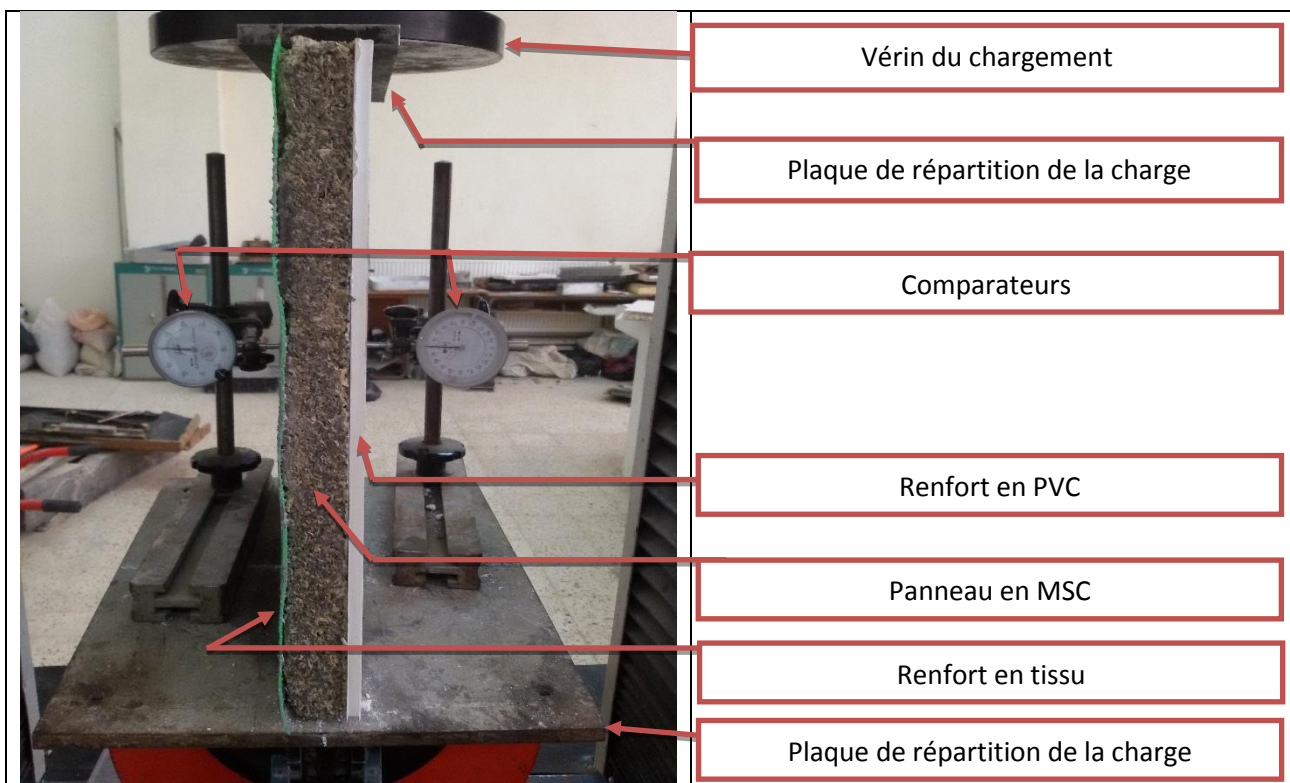


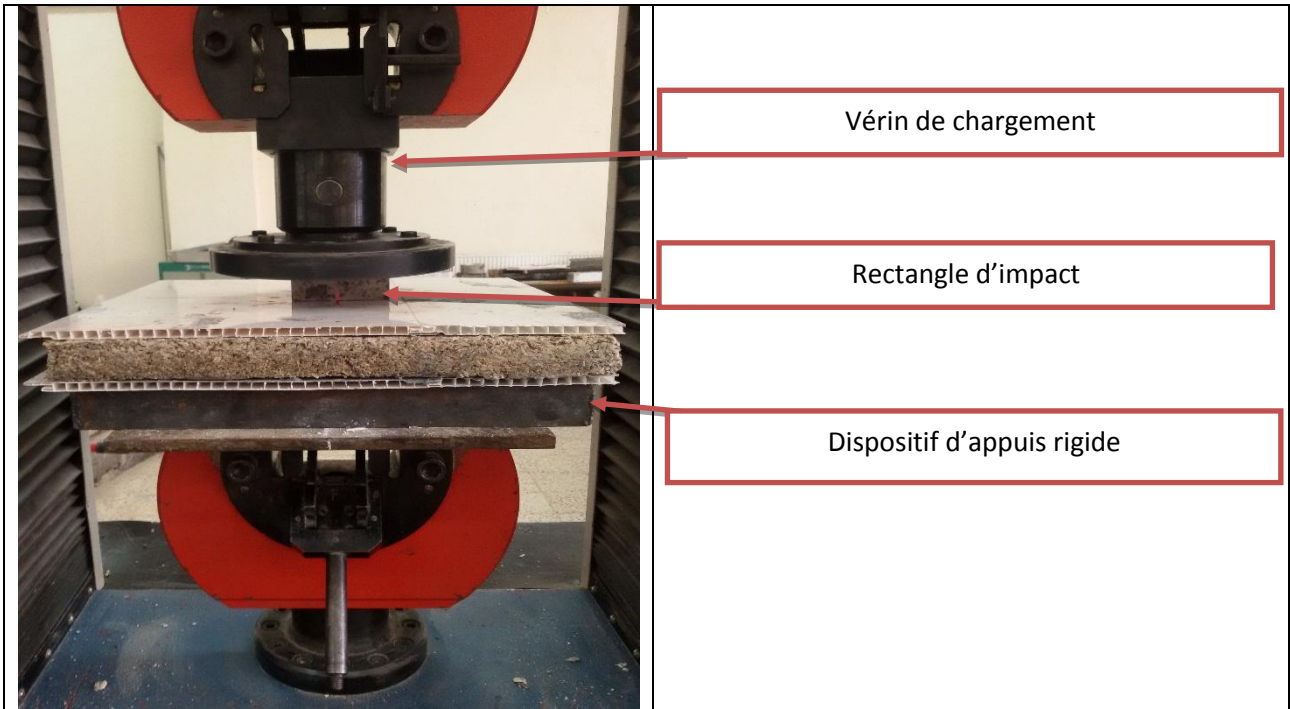
Figure III.29. disposition des accessoires pour l'essai de voilement

III.15.3. 2. Essai de poinçonnement

Le but principal de cet essai est l'étude de phénomène de poinçonnement centré des panneaux renforcés par le tissu ou le PVC, ou tissu-PVC.

Les panneaux de dimensions(36x36x3cm³) reposent sur leurs contours sur un dispositif d'appui rigide de dimensions 35x35 cm², pour éviter toute excentricité du chargement, Ce dernier est appliqué sur un rectangle d'impact de l'ordre de 36x36mm² soit un dixième de chaque côté de panneaux.

La figure III.30 montre l'essai de poinçonnement centré et la disposition du panneau.



III.15.3. 3. Essai de propagation des ondes ultrasonores

La méthode d'auscultation, non destructive et simple, a été utilisée avec succès pour plus de 60 ans pour l'évaluation de la qualité des matériaux.

Pour déterminer leurs caractéristiques d'isolation thermique et acoustique, nous avons utilisé l'appareil ultrason pour spécifier leur comportement acoustique.

La technique ultrasonore permet à la fois de faire un contrôle non destructif du matériau (CND), mais aussi de faire une évaluation non destructive (END)



Figure III.31. dispositif expérimental de l'essai ultrasonore

L'objectif de cet essai est de mesurer la vitesse de la propagation des ondes ultrasonores à travers le panneau. (*Ou le temps de transit d'ondes ultrasonores pulsées dans un échantillon de masse et d'épaisseur connues*) se propageant dans le milieu testé en transmission. Nous avons suivi les étapes suivantes :

- Un agent de couplage est nécessaire entre le capteur et le panneau à ausculter, afin de garantir le passage d'onde entre les deux, utilisant généralement un gel.
- Une paire de transducteurs reliés au boîtier principal (*Punditlink*), sont utilisés, l'un en émetteur et l'autre en récepteur, les deux transducteurs sont placés de part et d'autre du panneau.
- Equilibrage des transducteurs à l'aide d'un cylindre en plastique transparent (calibrage).
- Le boîtier est relié à l'ordinateur de qui permet un affichage en temps réel du signal reçu.
- Pour la précision des résultats nous avons testé les panneaux dans trois points, pour chaque point trois essais.

III.16. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté en détails tous les éléments de l'analyse expérimentale, en commençant par la caractérisation des différents constituants, la formulation des mélanges pour obtenir la formulation optimale, la confection des éprouvettes, le mode opératoire et les différents essais mécaniques considérés dans ce travail. Les différents résultats obtenus seront présentés et illustrés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Présentation des Résultats et Discussion

IV.1. Introduction

Aujourd'hui, la construction des structures composites est devenue très opportune quant aux conséquences particulières qu'elles entraînent à savoir la réduction du poids et les améliorations structurelles. Les matériaux composites présentent des propriétés mécaniques spécifiques à leur emploi. En raison de leur faible densité, masses volumiques faibles.

Dans ce chapitre, nous allons illustrer les résultats des essais réalisés sur les différentes éprouvettes selon les différentes configurations et sur les panneaux composites, pour chaque type d'essai (destructif et non destructif).

Afin d'optimiser la conception de ces panneaux, il est donc primordial de connaître les propriétés de ce matériau, telles que la résistance à une sollicitation donnée, le module de Young, les déformations, etc.

IV.2. Essais de compression

L'essai de compression est réalisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques selon la norme **NFT 54 604 :1986 [99]**, à savoir : la résistance à la compression, le module d'élasticité, ... Des spécimens de $(4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3)$ sont confectionnés à partir des éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. L'essai est conduit jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

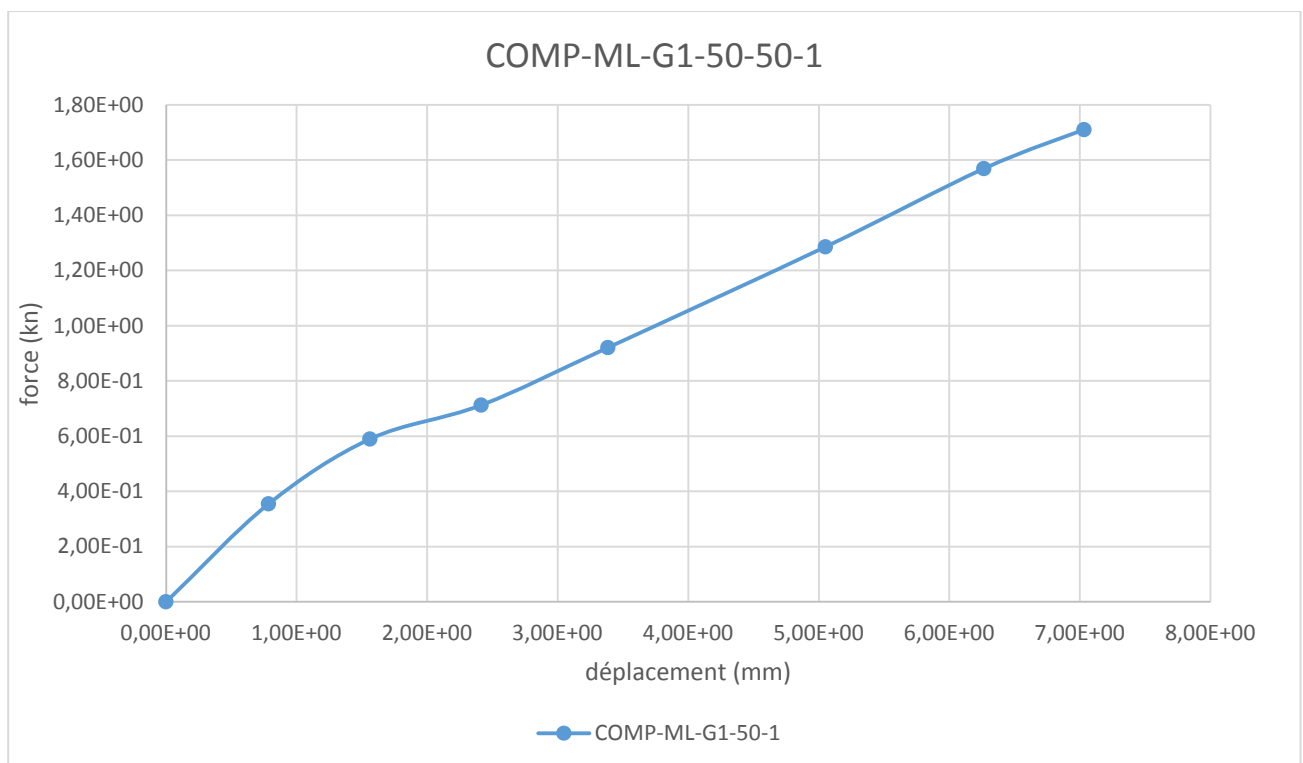


Figure IV.1. Courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / L 50% - G1 en compression

- L'allure de cette courbe présente un comportement quasi-linéaire, ainsi que ce dernier est un synonyme d'une évolution contenue de l'endommagement par macro-fissuration durant la phase de rupture de l'éprouvette (ML-50%-50%-G1), sous l'effet de sollicitation.

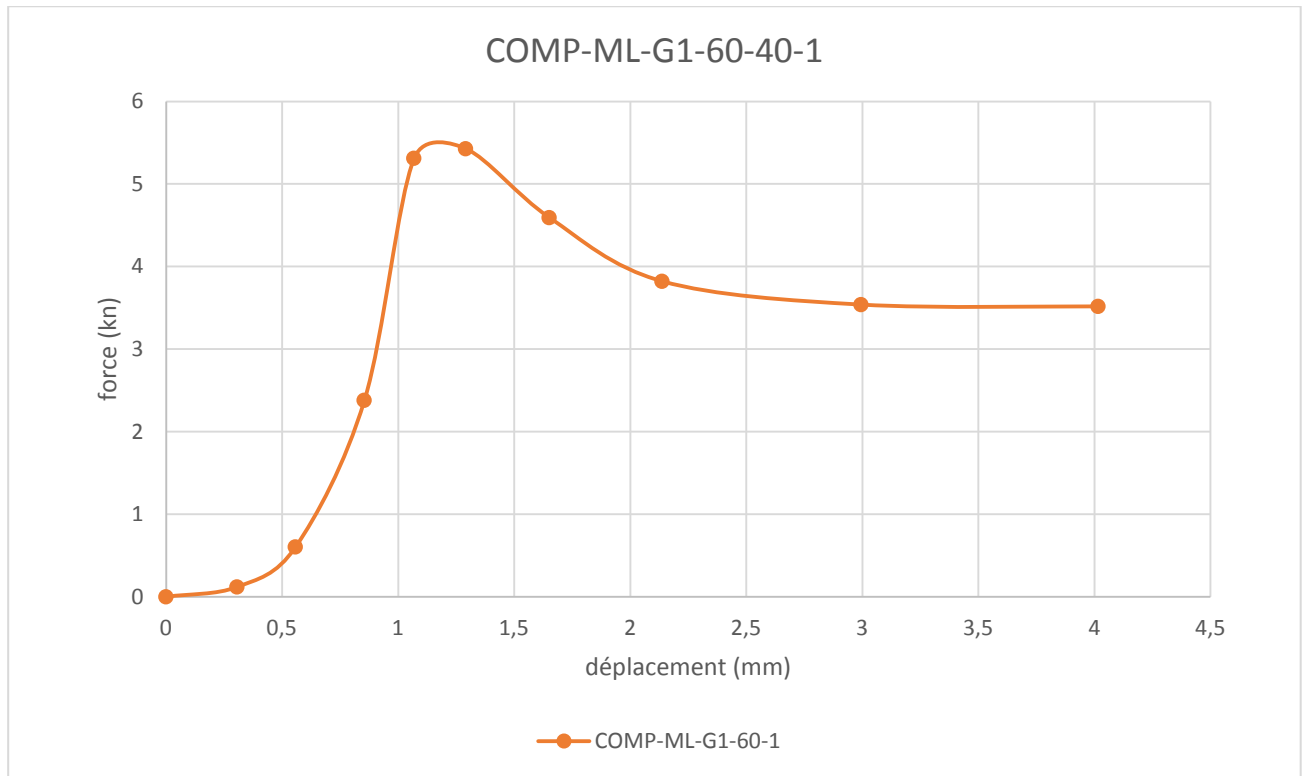


Figure IV.2. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60%/ L 40% G1 en compression

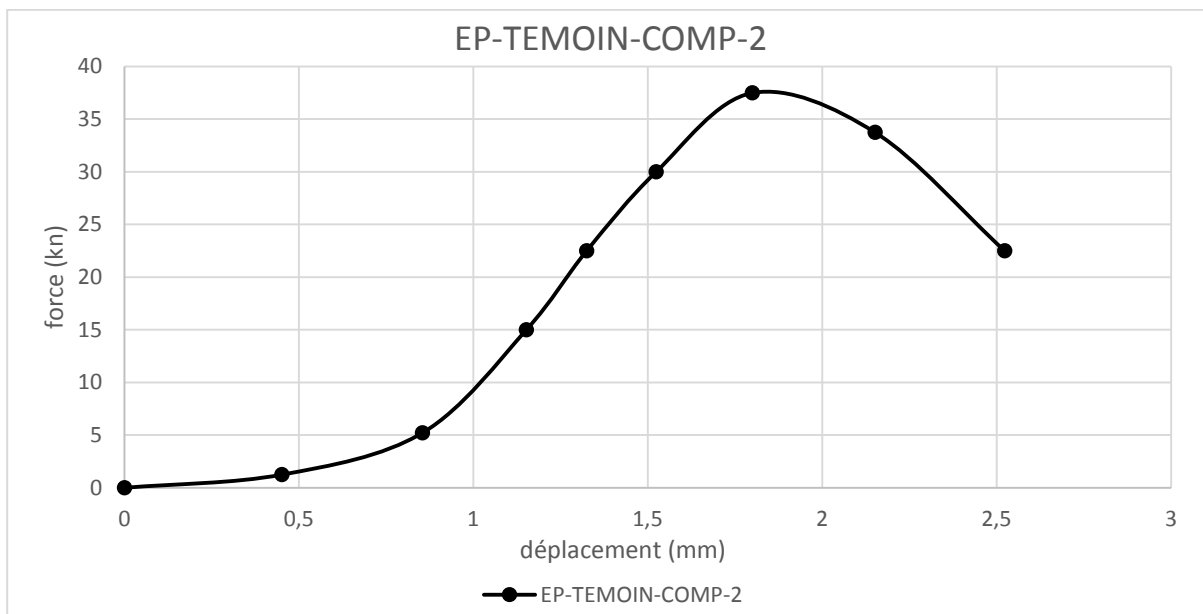


Figure IV.3. courbe force-déplacement de l'éprouvette MT en compression

- Les deux courbes précédentes présentent une première partie non linéaire, traduisant le comportement élastique des éprouvettes (ML-60%-40%-G1) et (MT), au-delà de cette zone non linéaire, nous observons une chute de la courbe suivie d'un comportement non linéaire, cette chute traduisant la perte de rigidité des éprouvettes

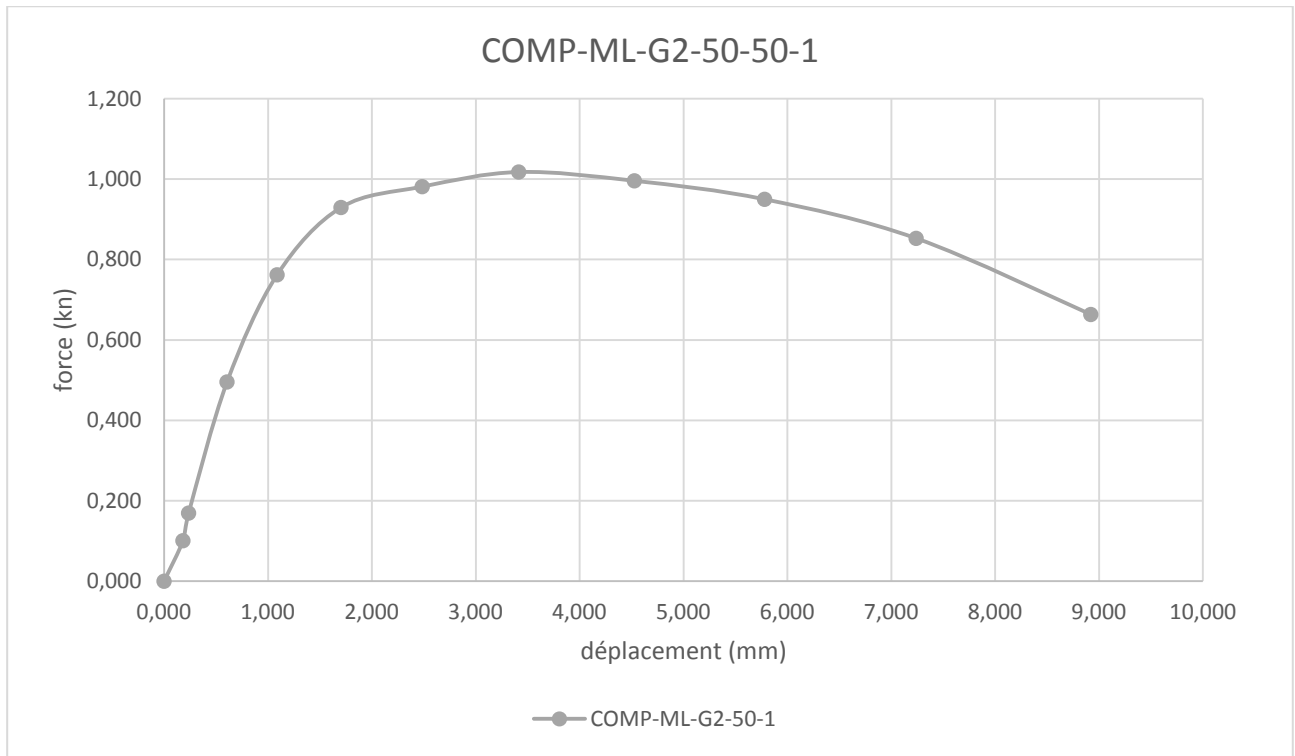


Figure IV.4. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50%/ L 50 % G2 en compression

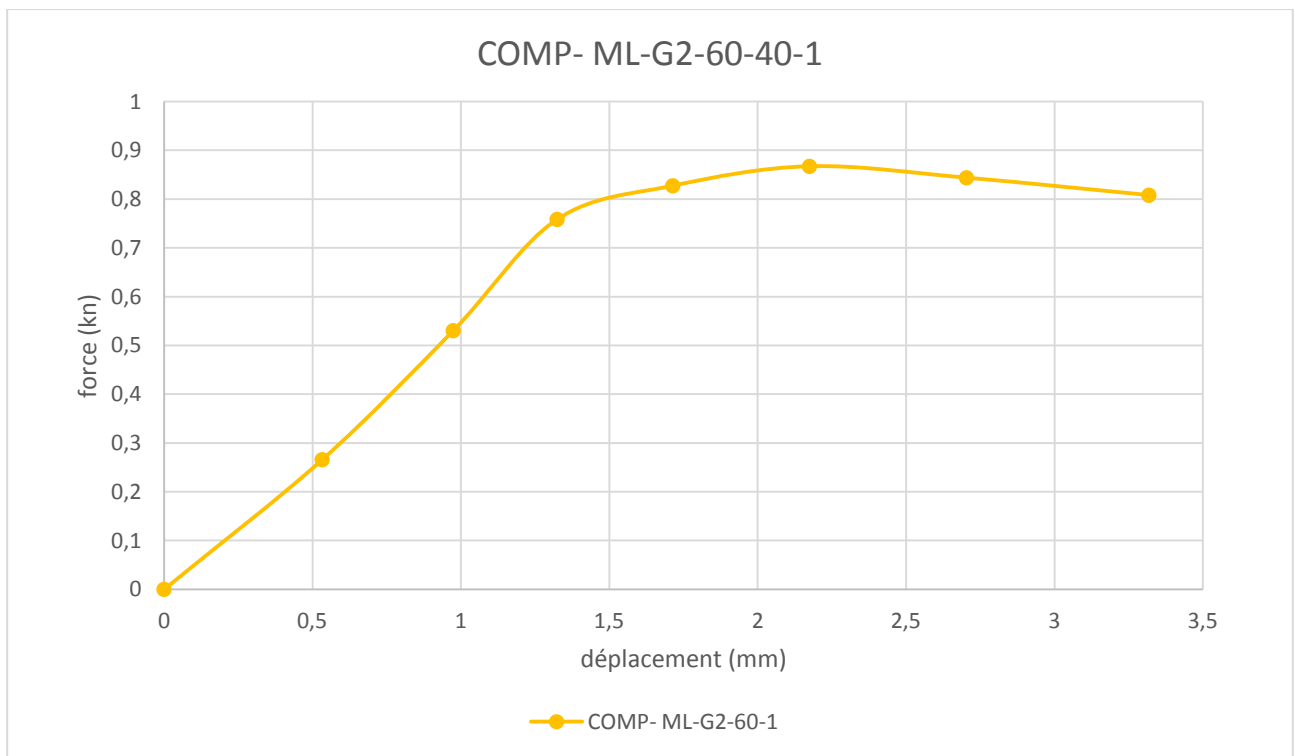


Figure IV.5. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / L 40% G2 en compression

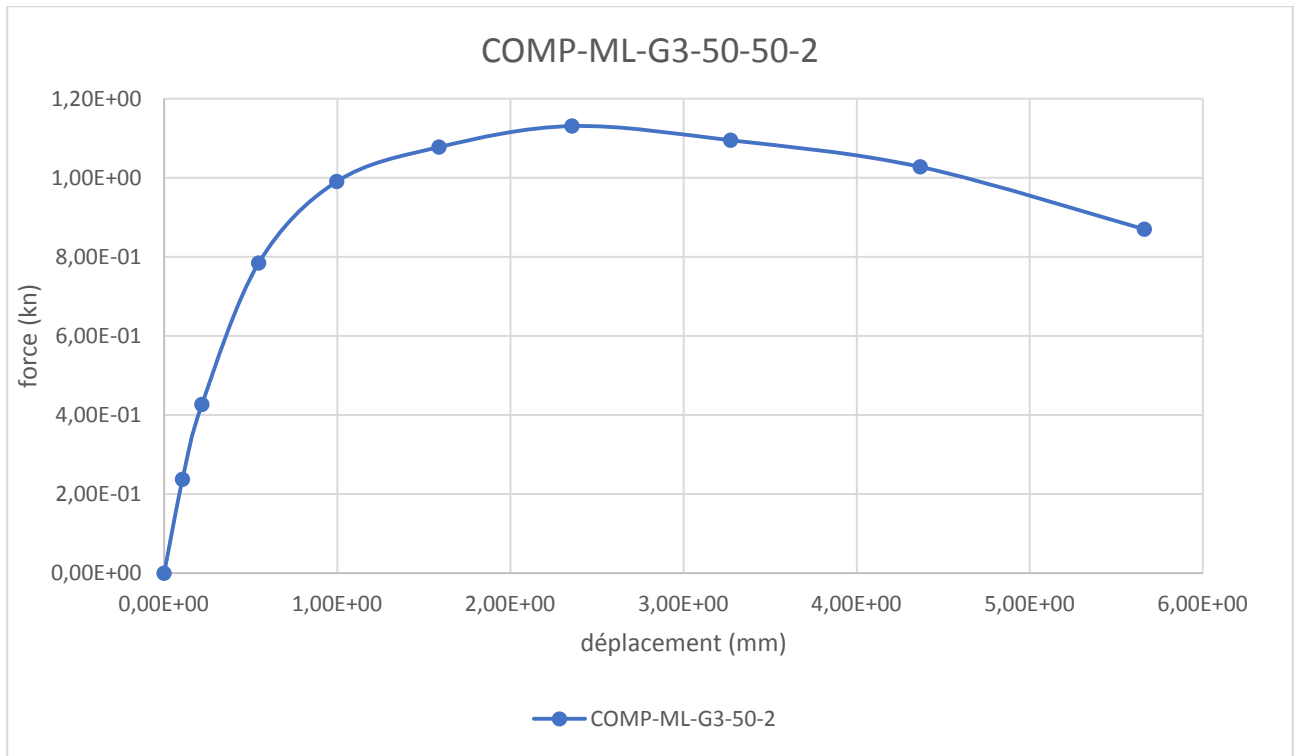


Figure IV.6. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50%/ L 50 % G3 en compression

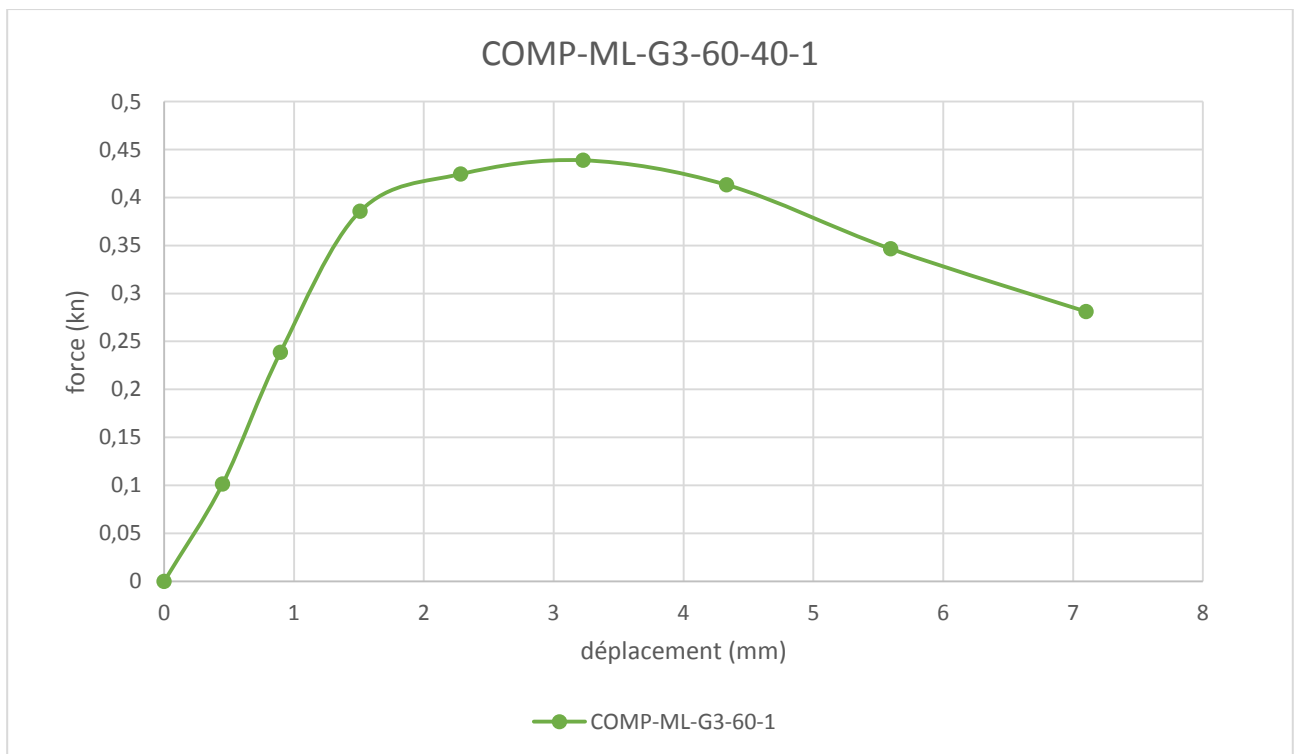


Figure IV.7. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / L 40% G3 en compression

- Les courbes d'éprouvettes mortier liège G2 et G3 et pour les deux proportions, présentent une première partie non linéaire, traduisant le comportement élastique, au-delà, une partie courbe traduisant le comportement plastique et la rupture de l'éprouvette.

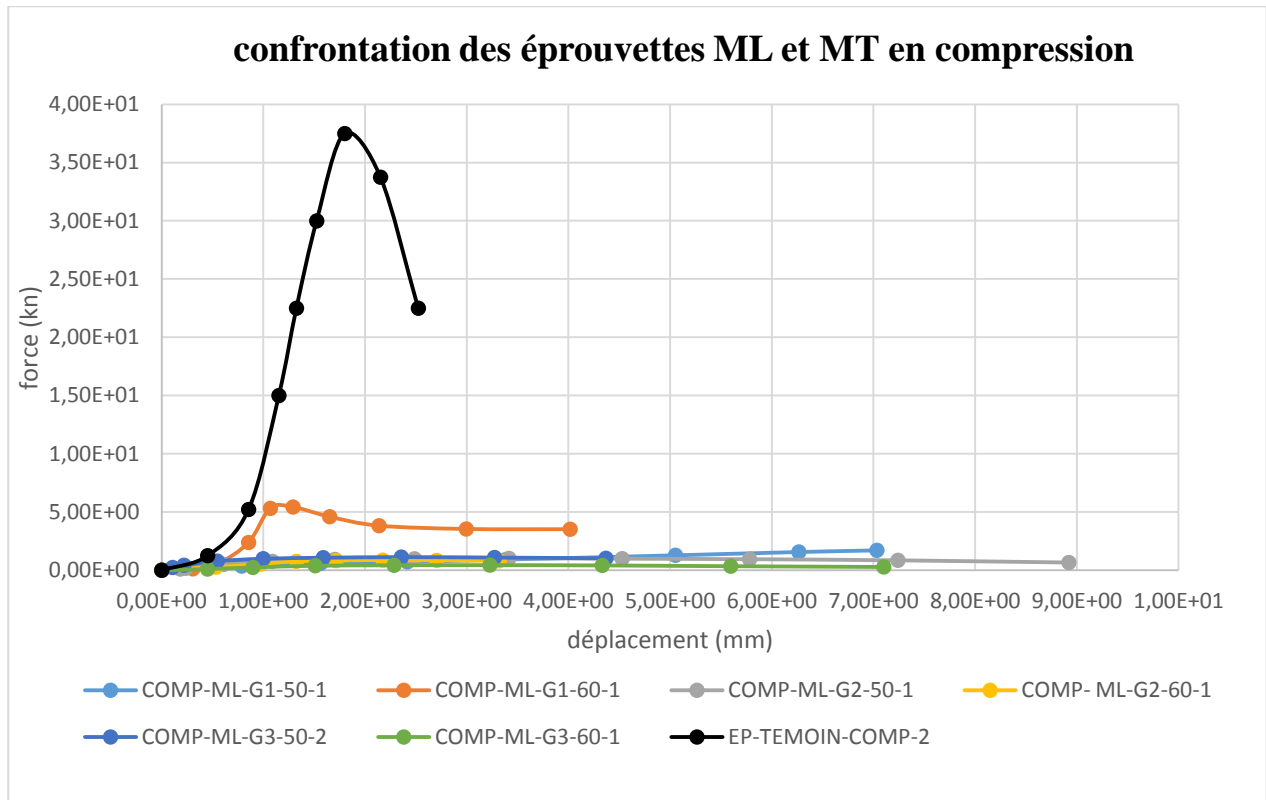


Figure IV.8. Confrontation des courbes des éprouvettes ML et celle du MT en compression

➤ Les résultats et les courbes d'éprouvettes mortier liège sous l'effet de compression montrés précédemment, présentent un comportement mécanique très complexe du à leur caractère hétérogène et la diversité de formulation. Cette hétérogénéité favorise le développement de divers modes de rupture et de propagation de fissures.

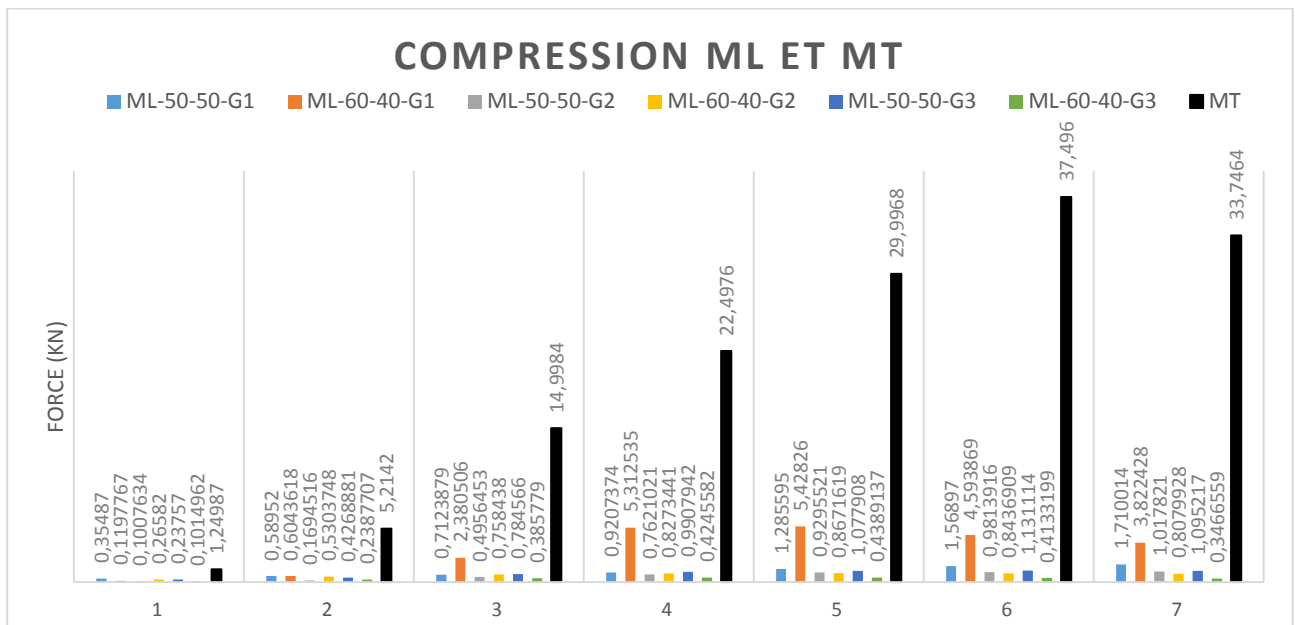


Figure IV.9. Confrontation des histogrammes des éprouvettes ML et celui du MT en compression

Tableau IV.1. Résultats obtenus pour les éprouvettes ML soumises à la compression

Type d'éprouvette	F _{max} (KN)	La résistance R _c (MPa)	Raccourcissement Δ _l (mm)	La déformation ε	Module de Young E (MPa)
ML-50-50-G1	1.71	0.0011	7.033	0.180	0.0061
ML-60-40-G1	5.43	0.0034	1.291	0.032	0.106
ML-50-50-G2	1.02	0.00064	3.410	0.085	0.0075
ML-60-40-G2	0.87	0.00054	2.17	0.054	0.01
ML-50-50-G3	1.13	0.00071	2.36	0.06	0.012
ML-60-40-G3	0.44	0.00028	3.23	0.081	0.0035
MT	37.5	0.02344	1.8	0.045	0.521

Commentaire

D'après les résultats mentionnés sur le **tableau IV.1** nous avons constaté, que l'éprouvette de 60% du mortier et de 40% du liège gamme(1) (ML-60%-40%-G1) qui présente les meilleures caractéristiques mécaniques en compression, par rapport aux autres éprouvettes de différentes gammes et proportions.

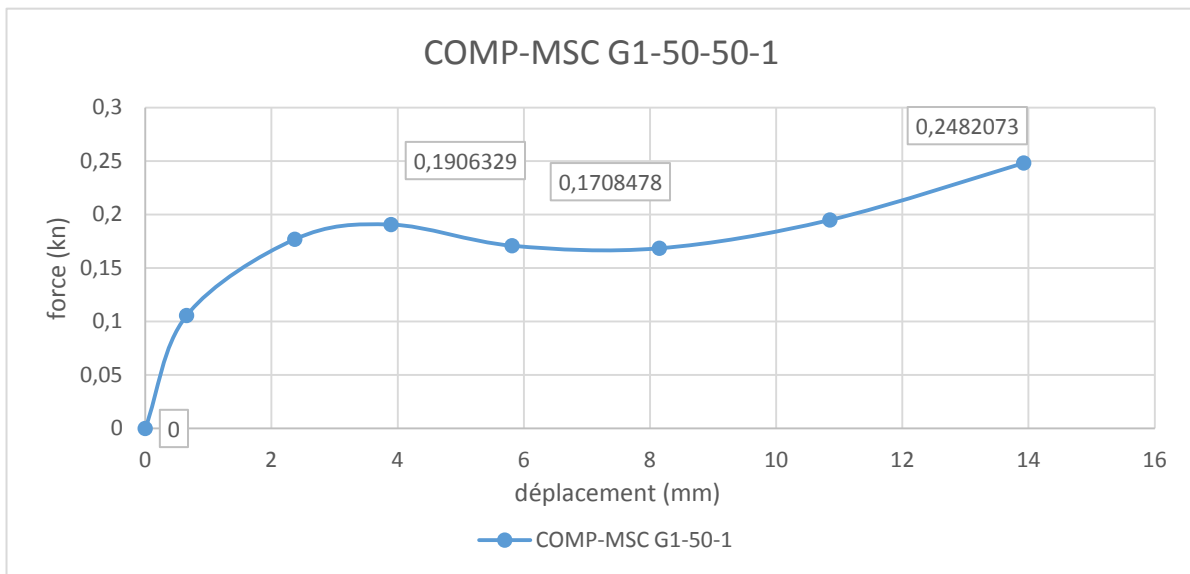


Figure IV.10. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / SC 50% G1 en compression

- Nous avons observé sur l'allure de cette courbe, une petite zone d'élasticité non linéaire suivie par une chute de la force à la fin de la zone d'élasticité de (0.2KN) à (0.17KN), avant le commencement du plateau de compression, suivie par une zone d'écrasement et de densification jusqu'à la rupture finale et l'arrêt de chargement à (0.25KN)

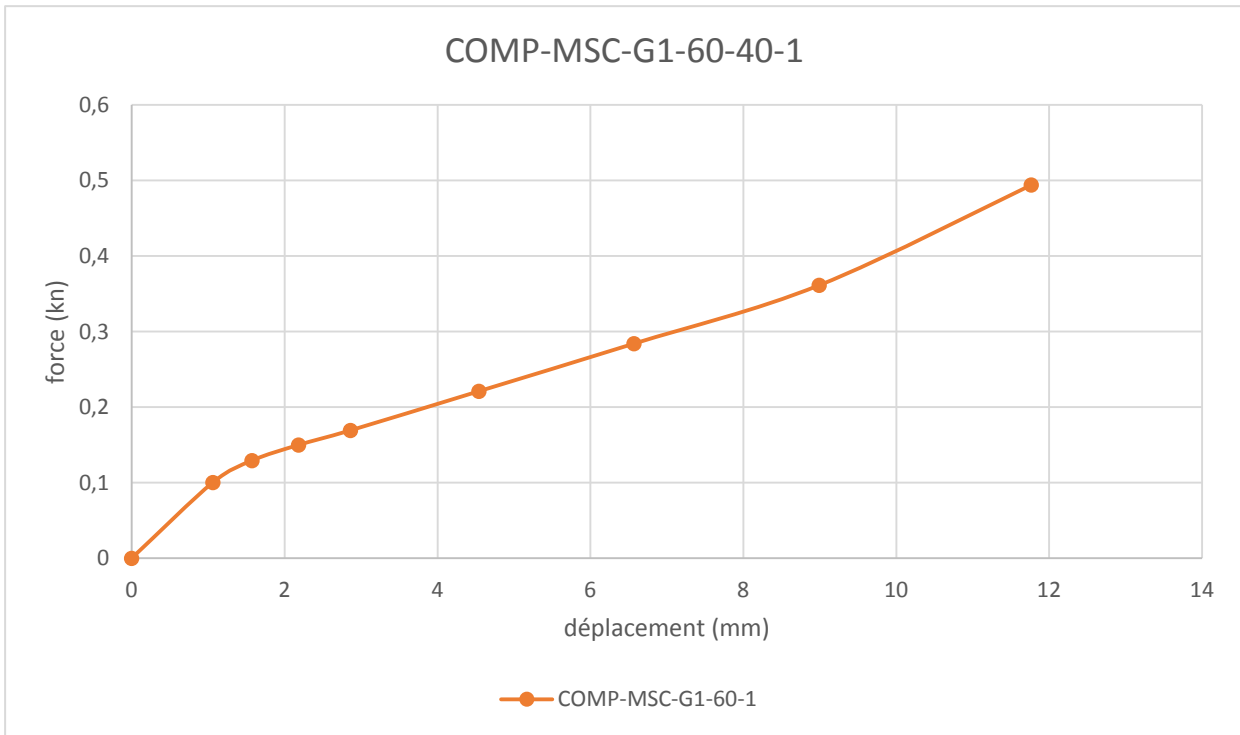


Figure IV.11. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / SC 40% G1 en compression

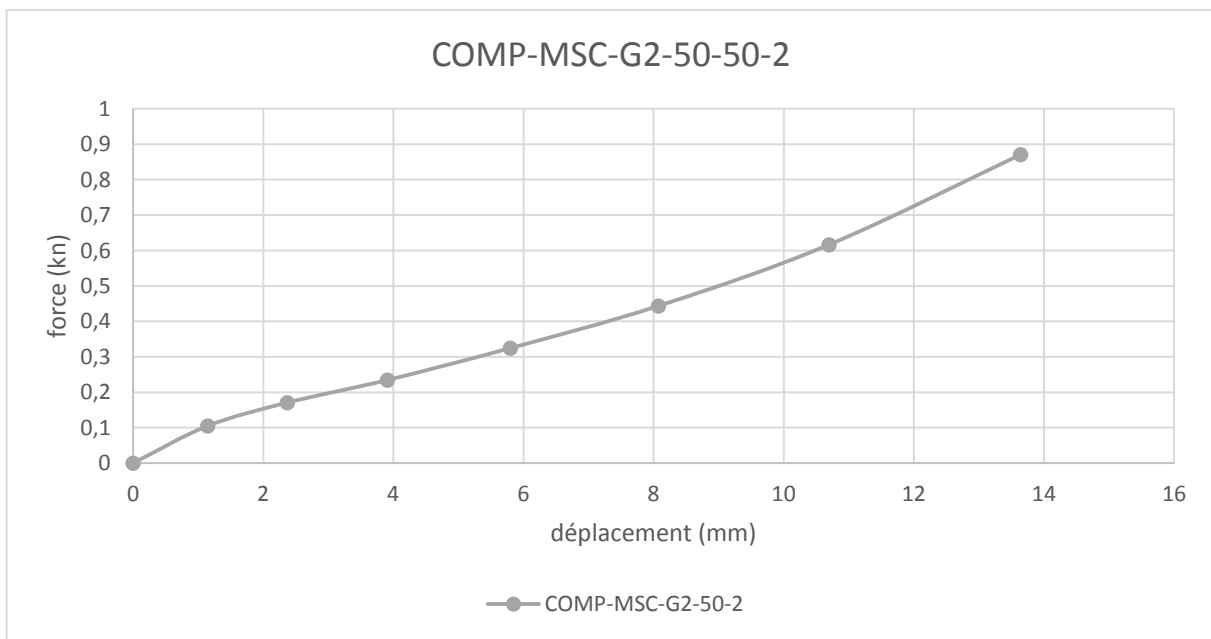


Figure IV.12. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / SC 50% G2 en compression

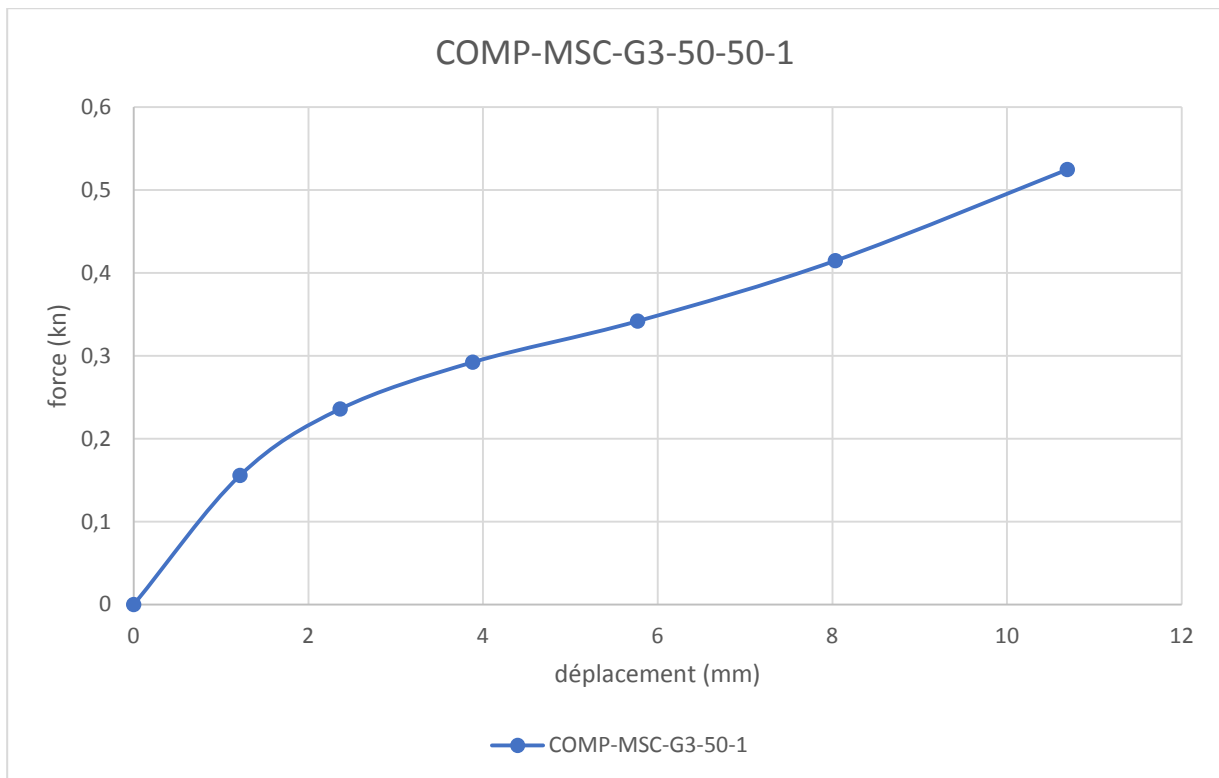


Figure IV.13. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / SC 50% G3 en compression

- Les allures de ces courbes (MSC-60%-40%-G1), (MSC-50%-50%-G2), (MSC-50%-50%-G3), présentent une petite zone élastique suivie par une évolution contenue de l'endommagement par macro-fissuration durant la phase de rupture de ces éprouvettes, sous l'effet de compression.

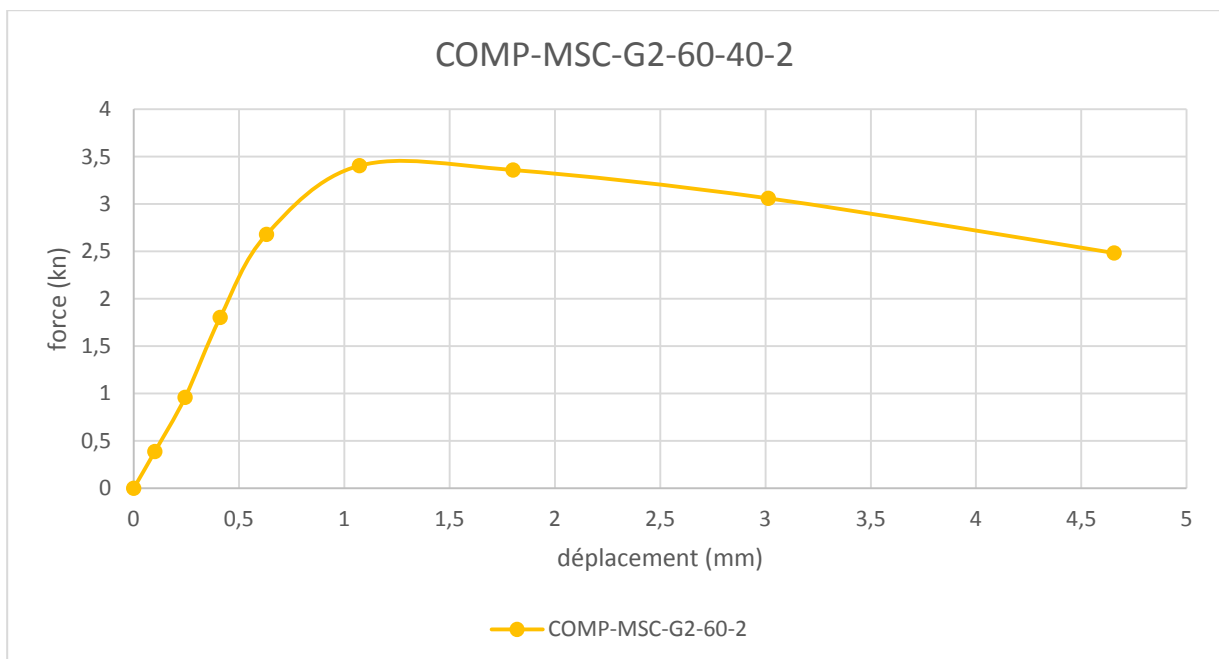


Figure IV.14. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / SC 40% G2 en compression

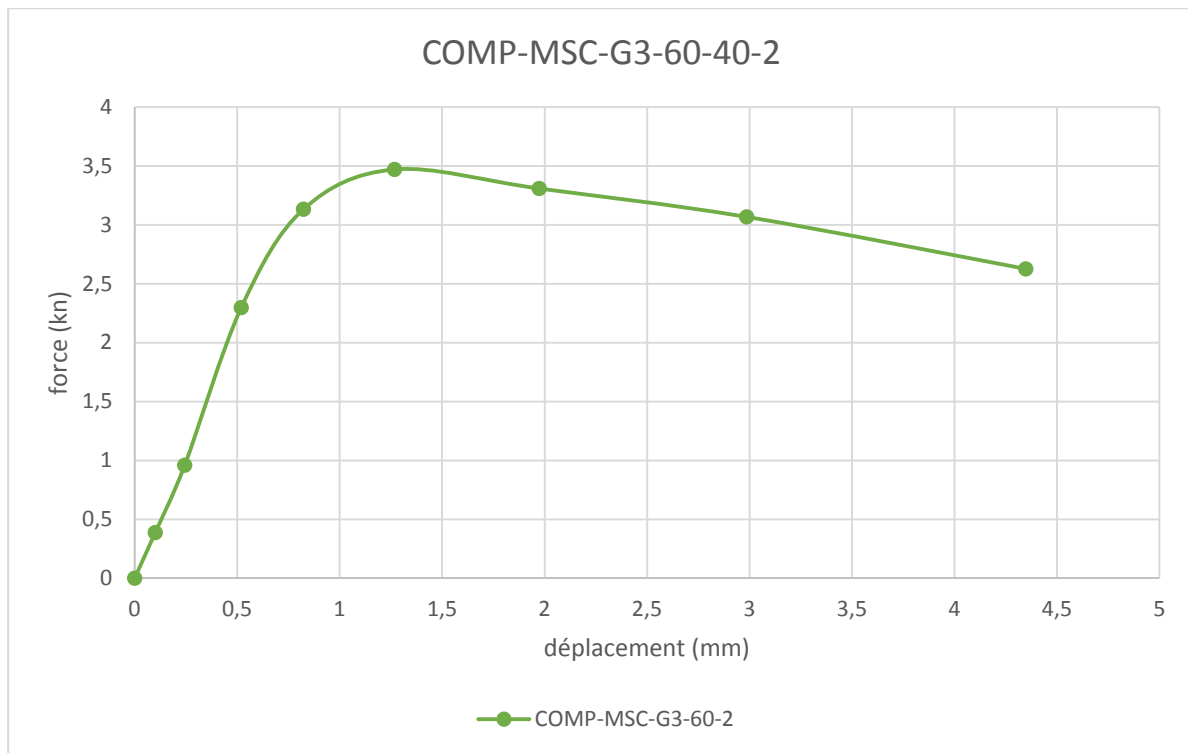


Figure IV.15. Courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / SC 40% G3 en compression

- Les allures de ces courbes (MSC-60%-40%-G2), (MSC-60%-40%-G3), présentent une première partie non linéaire, traduisant le comportement élastique, au-delà, une partie courbe traduisant le comportement plastique finissant par la rupture finale de l'éprouvette.

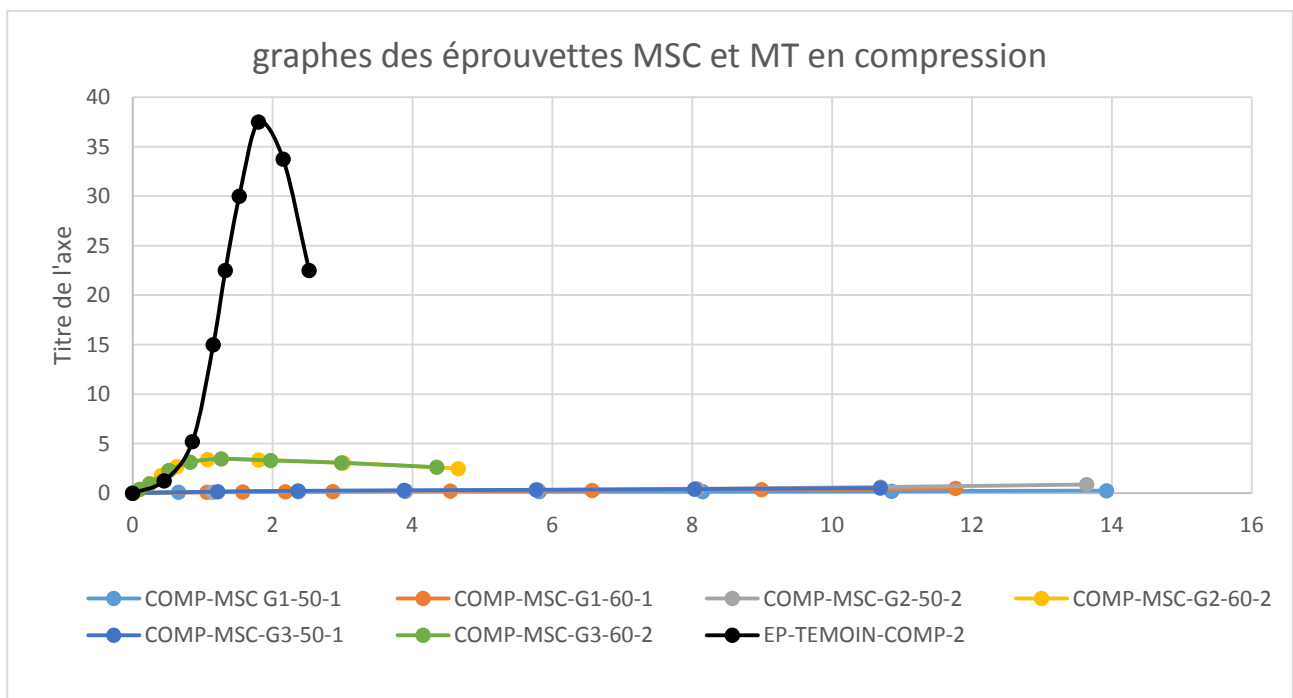


Figure IV.16. Confrontation des courbes des éprouvettes MSC avec celle du MT en compression

➤ Les résultats et les courbes d'éprouvettes mortier sciure de bois sous l'effet de compression montrés précédemment, globalement présentent presque le même comportement que nous avons obtenu pour les éprouvettes en mortier liège en compression, ainsi donc, un comportement mécanique très complexe du à leur caractère hétérogène et leur diverses formulations, Cette hétérogénéité favorise le développement de divers modes de rupture et de propagation de fissures, notamment un comportement fragile par rapport au mortier témoin

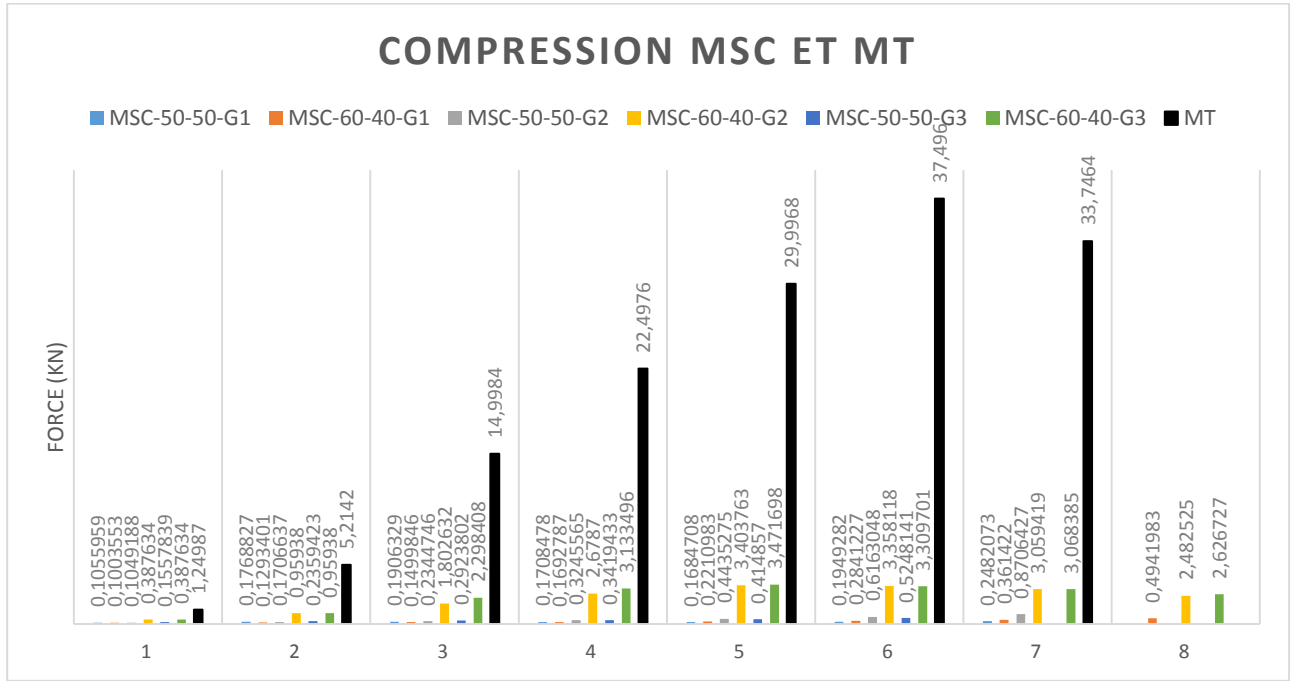


Figure IV.17. confrontation des histogrammes des éprouvettes MSC avec celui du MT en compression

Tableau IV.2. Résultats des essais de compression pour les éprouvettes MSC et MT

Type d'éprouvettes	F _{max} (KN)	La résistance R (MPa)	Raccourcissement Δl (mm)	La déformation ε	module de Young E(MPa)
MSC-50-50-G1	0.25	0.00016	13.93	0.35	0.00046
MSC-60-40-G1	0.50	0.00031	11.77	0.29	0.00107
MSC-50-50-G2	0.87	0.00054	13.64	0.34	0.00159
MSC-60-40-G2	3.40	0.00213	1.27	0.032	0.067
MSC-50-50-G3	0.52	0.00033	10.69	0.27	0.00122
MSC-60-40-G3	3.47	0.00217	1.27	0.032	0.080
MT	37.50	0.02344	1.8	0.045	0.521

Commentaire

D'après les résultats mentionnés sur le **tableau IV.2**, On constate que l'éprouvette composée de 60% du mortier et de 40% de la sciure de bois gamme(3) (MSC-60%-40%-G3) qui présente les meilleures caractéristiques mécaniques en compression, par rapport aux autres éprouvettes.

IV.3. ESSAIS DE FLEXION

Les essais réalisés sur les éprouvettes sont des essais de traction par flexion trois points selon la norme NF T 54-606 [100]. Ils consistent à étudier, en particulier, les résistances à la traction des corps d'épreuves. Les résultats des essais sont considérés comme significatifs de la résistance de l'éprouvette. La rupture d'éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la (figure IV.18).

On applique une force F linéiquement répartie au milieu de la surface supérieure jusqu'à la rupture,

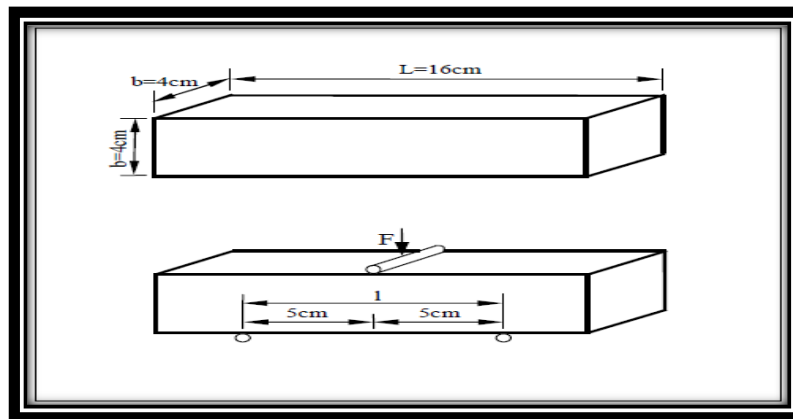


Figure IV.18. Représentation schématique d'un essai de flexion trois points sur prisme $4 \times 4 \times 16\text{ cm}^3$.

Après les essais de flexion trois points nous avons obtenu les courbes des éprouvettes suivantes :

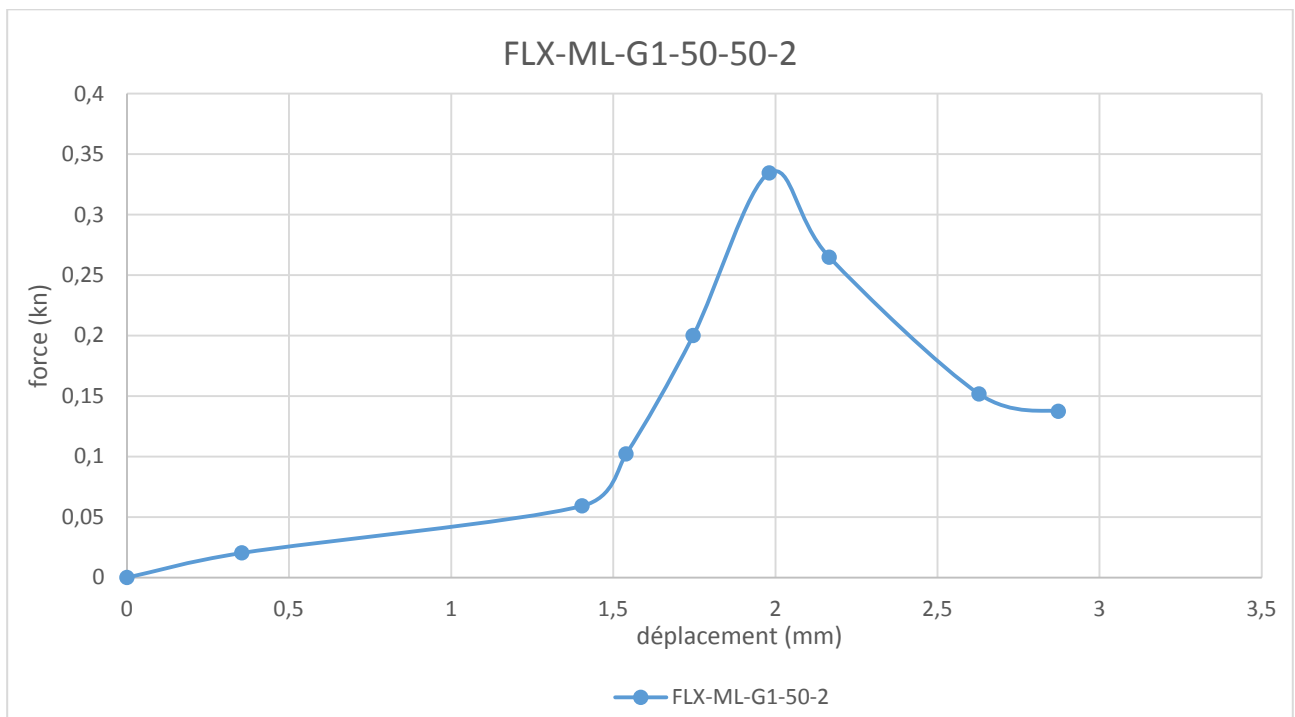


Figure IV.19. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / L 50% G1 en flexion

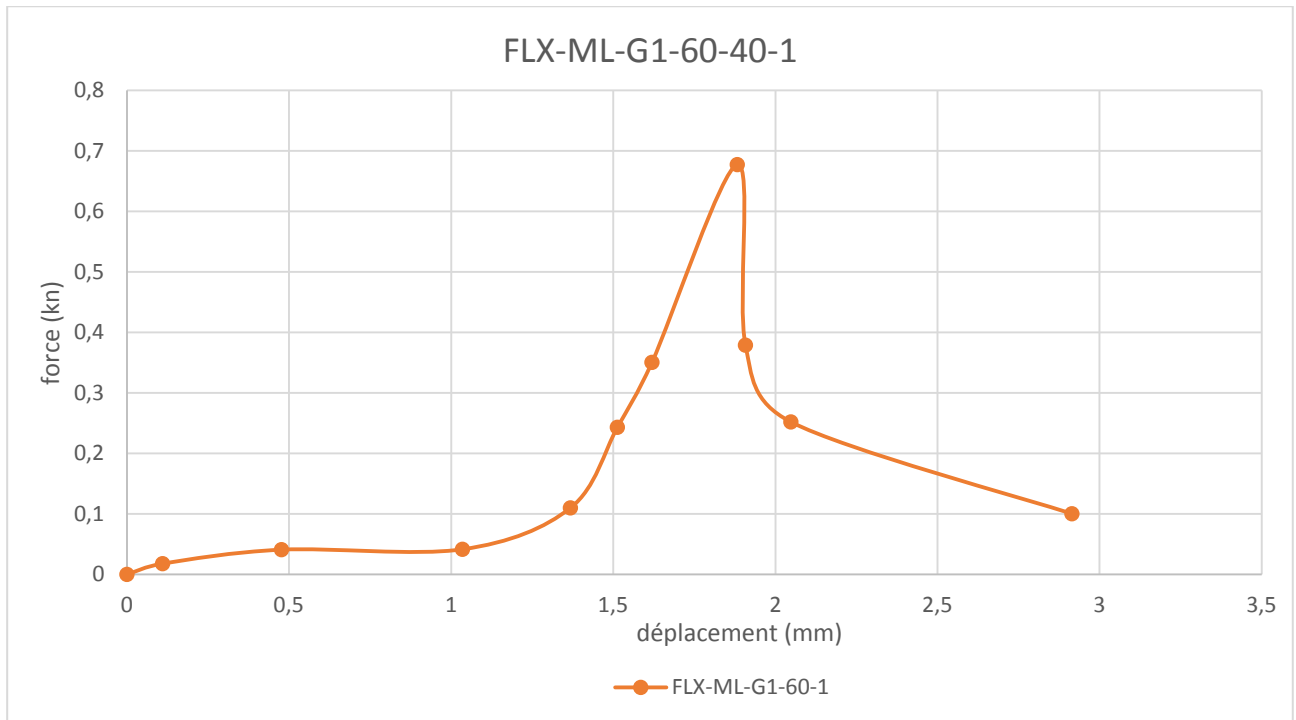


Figure IV.20. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / L 40% G1 en flexion

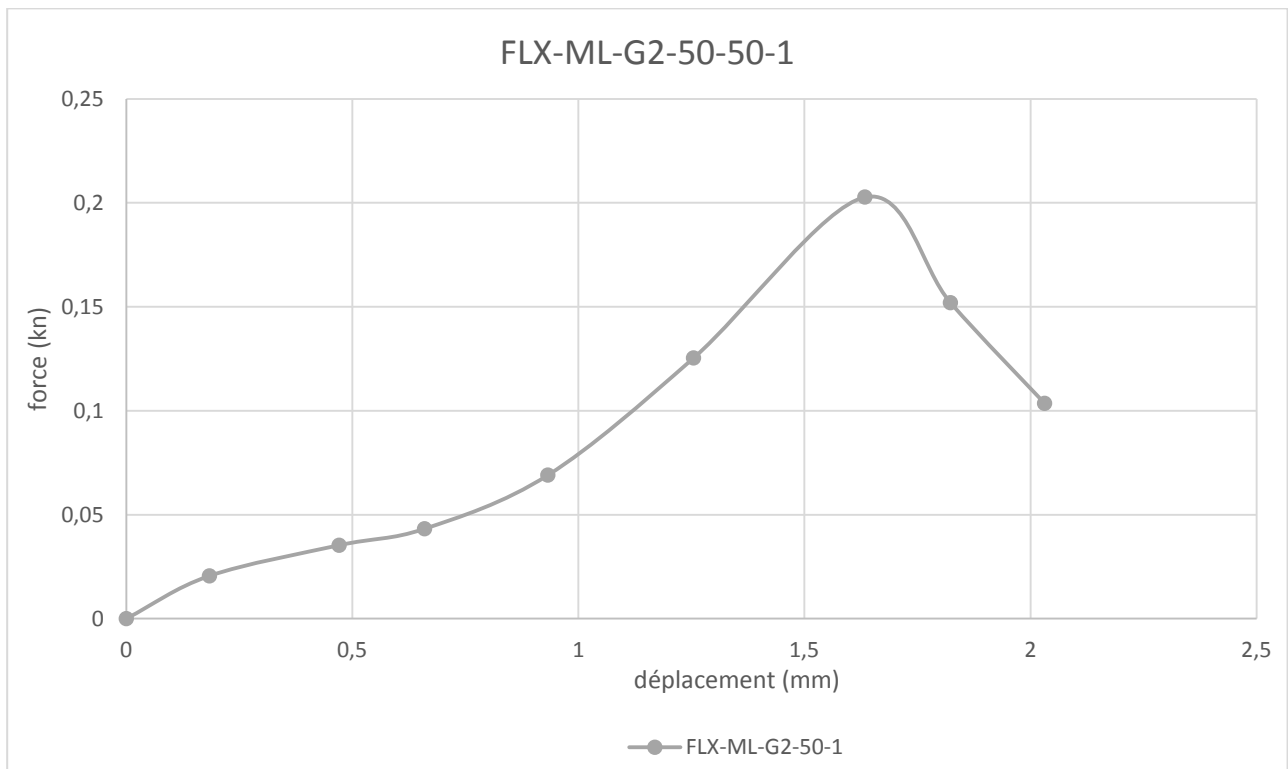


Figure IV.21. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / L 50% G2 en flexion

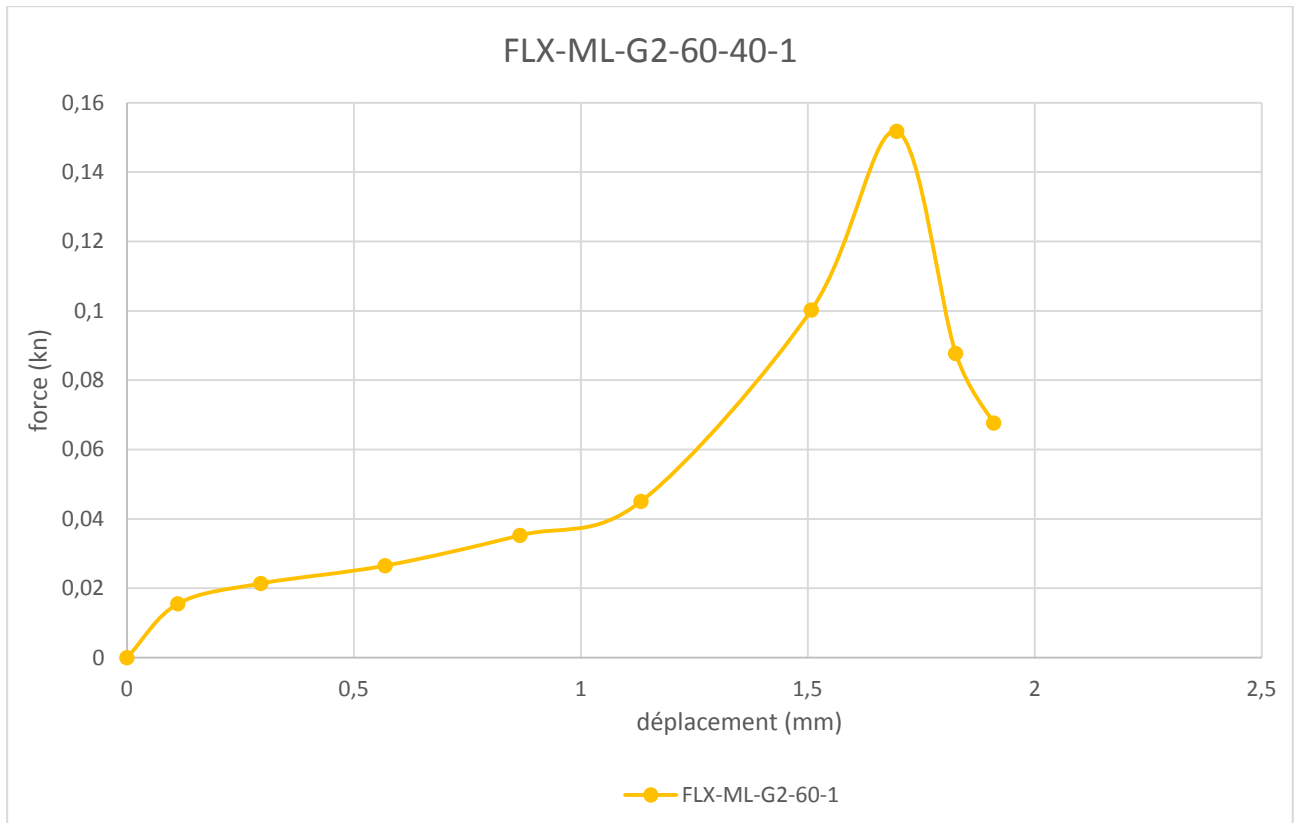


Figure IV.22. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / L 40% G2 en flexion

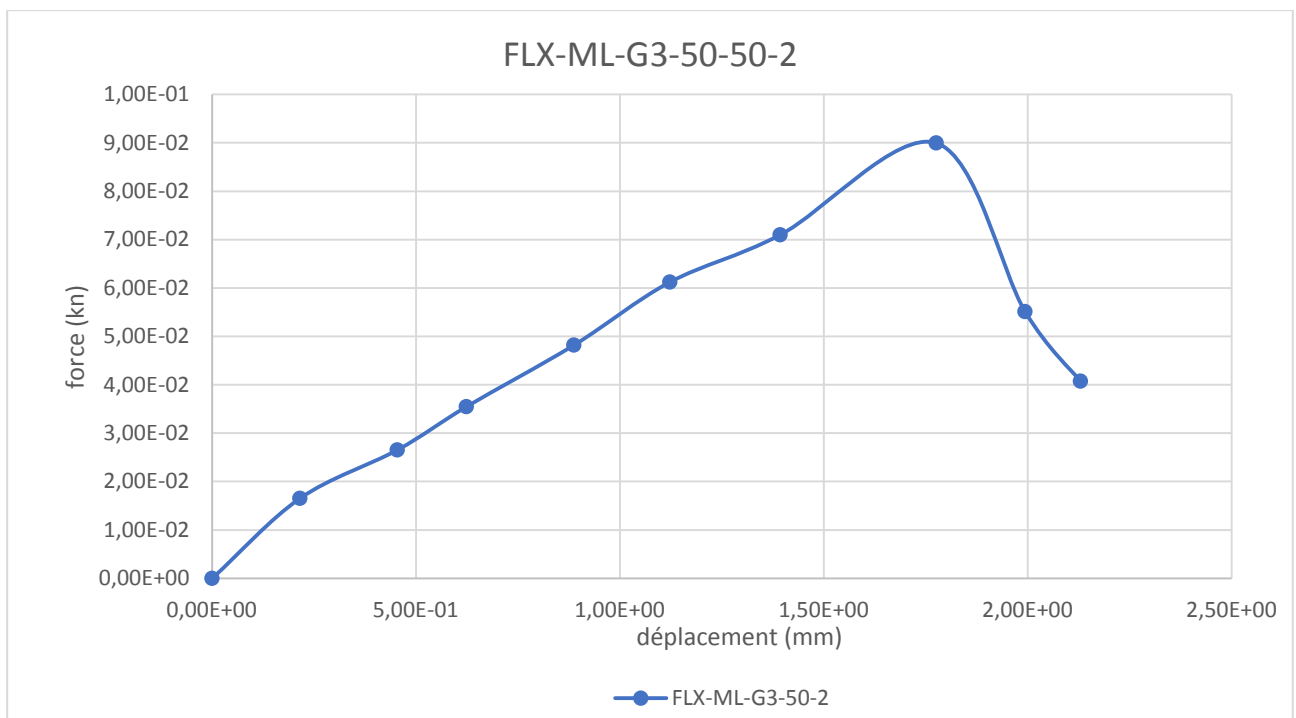


Figure IV.23. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 50% / L 50% G3 en flexion

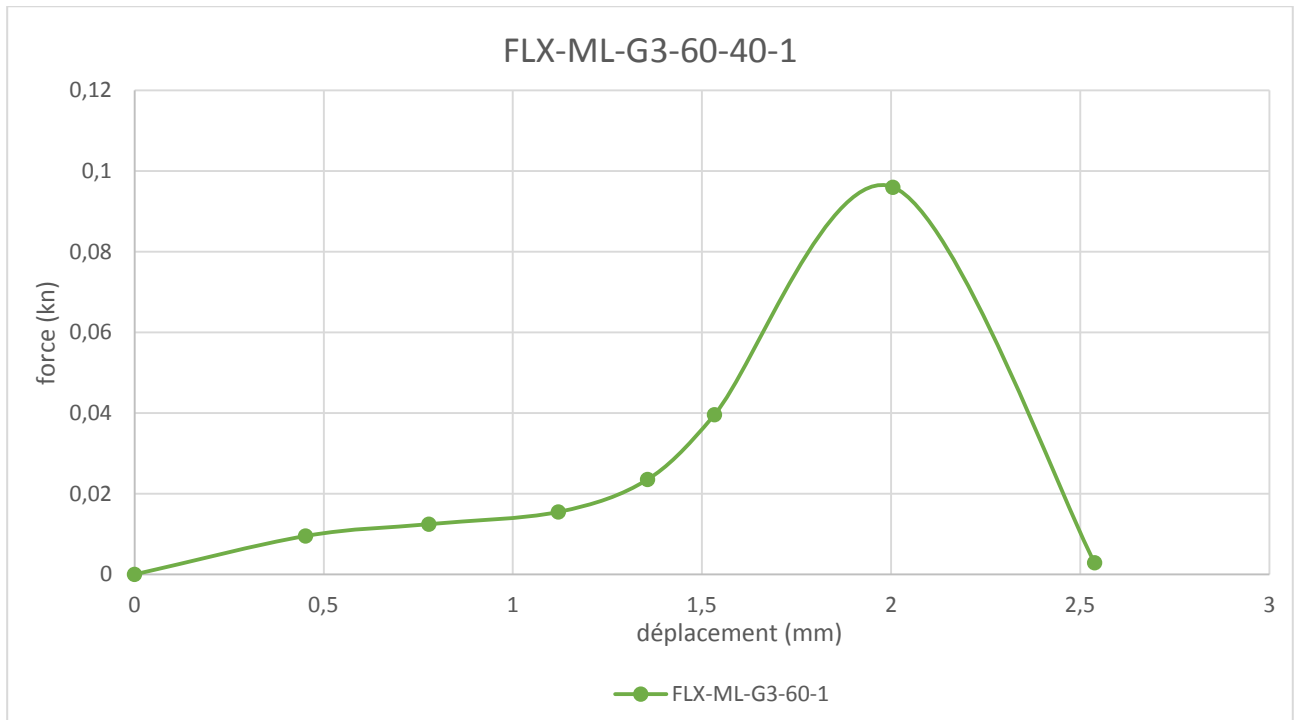


Figure IV.24. courbe force-déplacement de l'éprouvette M 60% / L 40% G3 en flexion

- Les courbes montrées précédemment, représentent le comportement à la flexion trois point, des éprouvettes prismatiques en mortier liège. Nous constatons globalement, que ces comportements présentent une phase élastique non linéaire jusqu'à la rupture totale des éprouvettes.

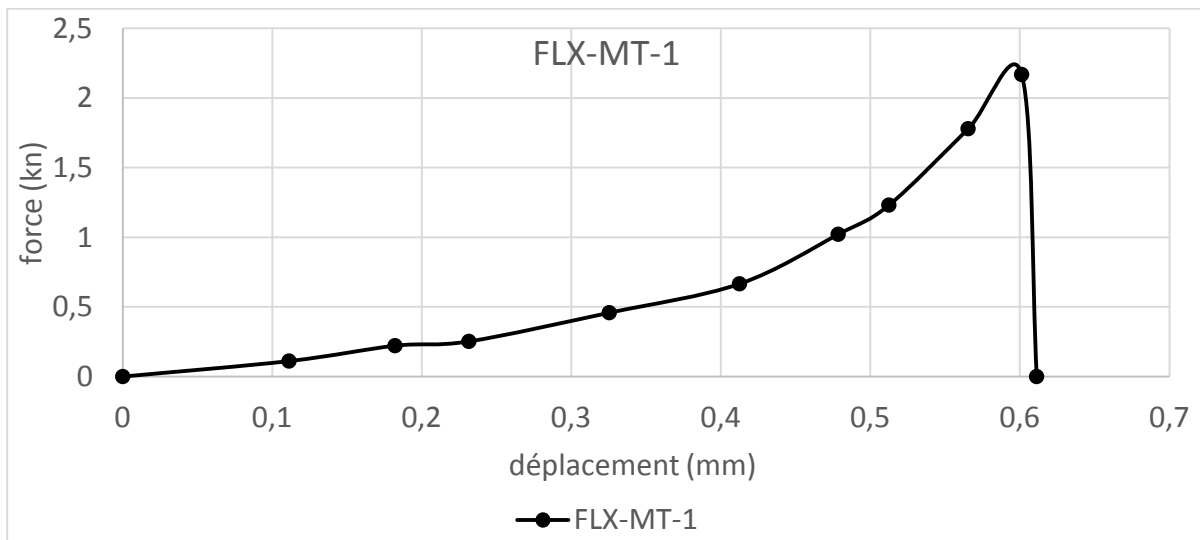


Figure IV.25. courbe force-déplacement de l'éprouvette MT en flexion

- La courbe précédente, représente le comportement à la flexion trois points d'une éprouvette prismatique d'un mortier témoin. Nous constatons, que ce comportement présente une phase élastique non linéaire jusqu'à une rupture brusque et totale de l'éprouvette, qui mène le chargement à zéro.

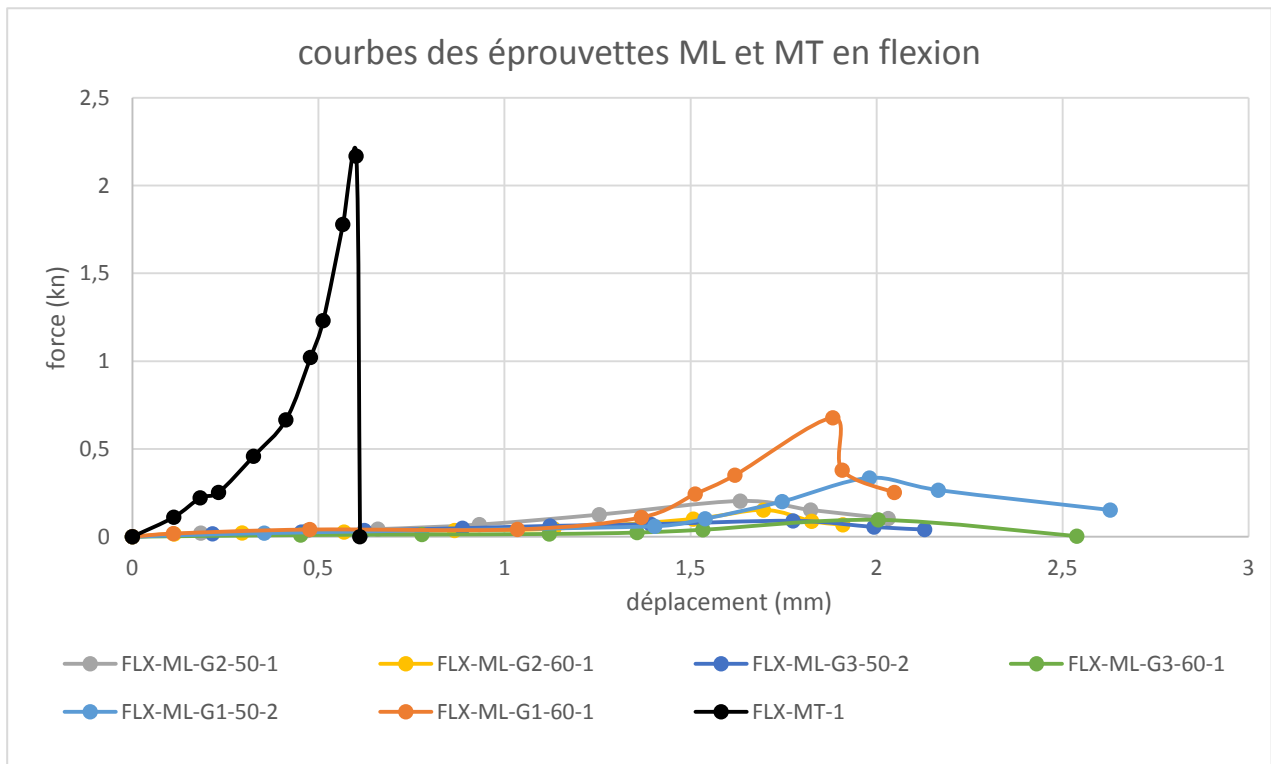


Figure IV.26. confrontation des courbes des éprouvettes ML avec celle du MT en flexion

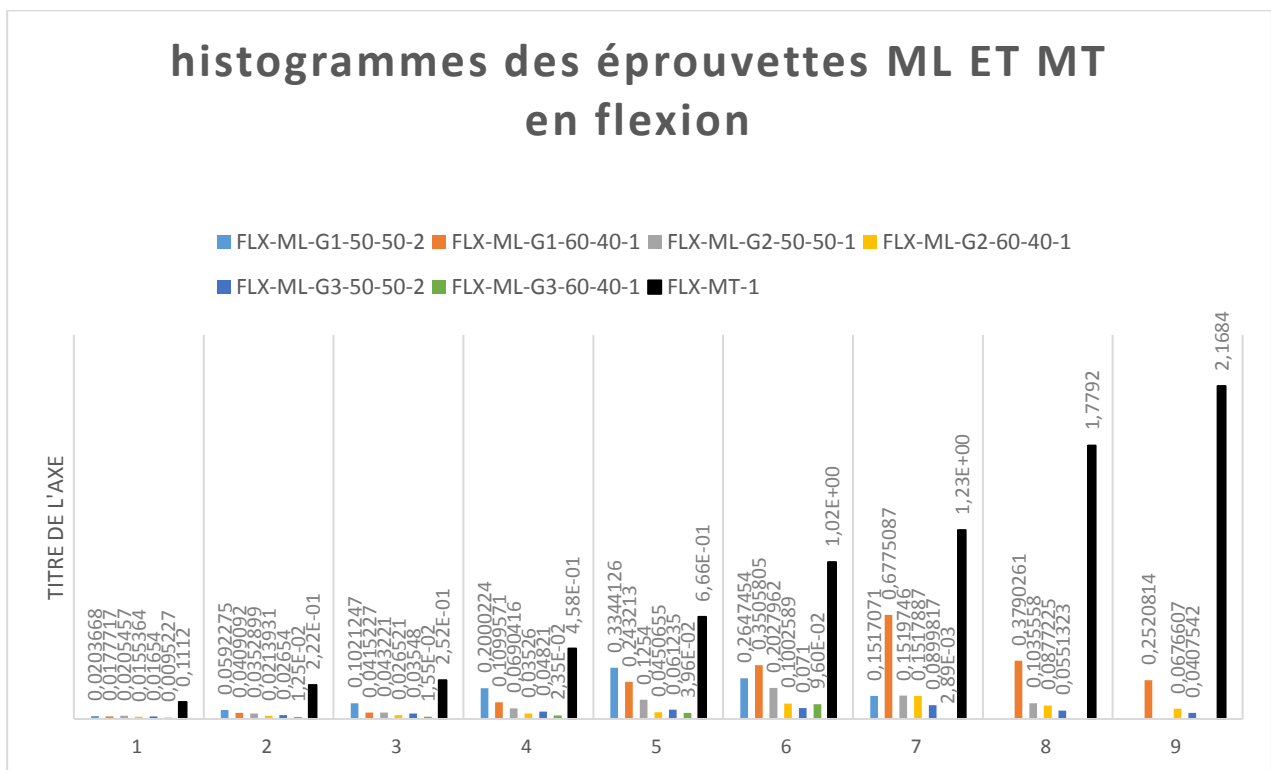


Figure IV.27. Confrontation des histogrammes des éprouvettes ML avec celui du MT en flexion

Tableau IV.3. Résultats obtenus

Type d'éprouvette	La force F_{max} (KN)	la flèche $\Delta_f(mm)$	Le module de Young E_f (MPa) 10^{-6}	La résistance R (MPa)
ML-50-50-G1	0.33	1.98	16.3	0.00077
ML-60-40-G1	0.68	1.88	35.3	0.00159
ML-50-50-G2	0.20	1.63	12.0	0.00047
ML-60-40-G2	0.15	1.70	8.60	0.00035
ML-50-50-G3	0.09	1.78	4.90	0.00021
ML-60-40-G3	0.10	2.01	4.90	0.00023
MT	2.17	0.61	347.4	0.00509

Commentaire

D'après les résultats mentionnés sur le **tableau IV.4**, on constate que l'éprouvette composée de 60% du mortier et de 40% du liège gamme(1) (ML-60%-40%-G1) qui présente les meilleures caractéristiques mécaniques en flexion, par rapport aux autres éprouvettes.

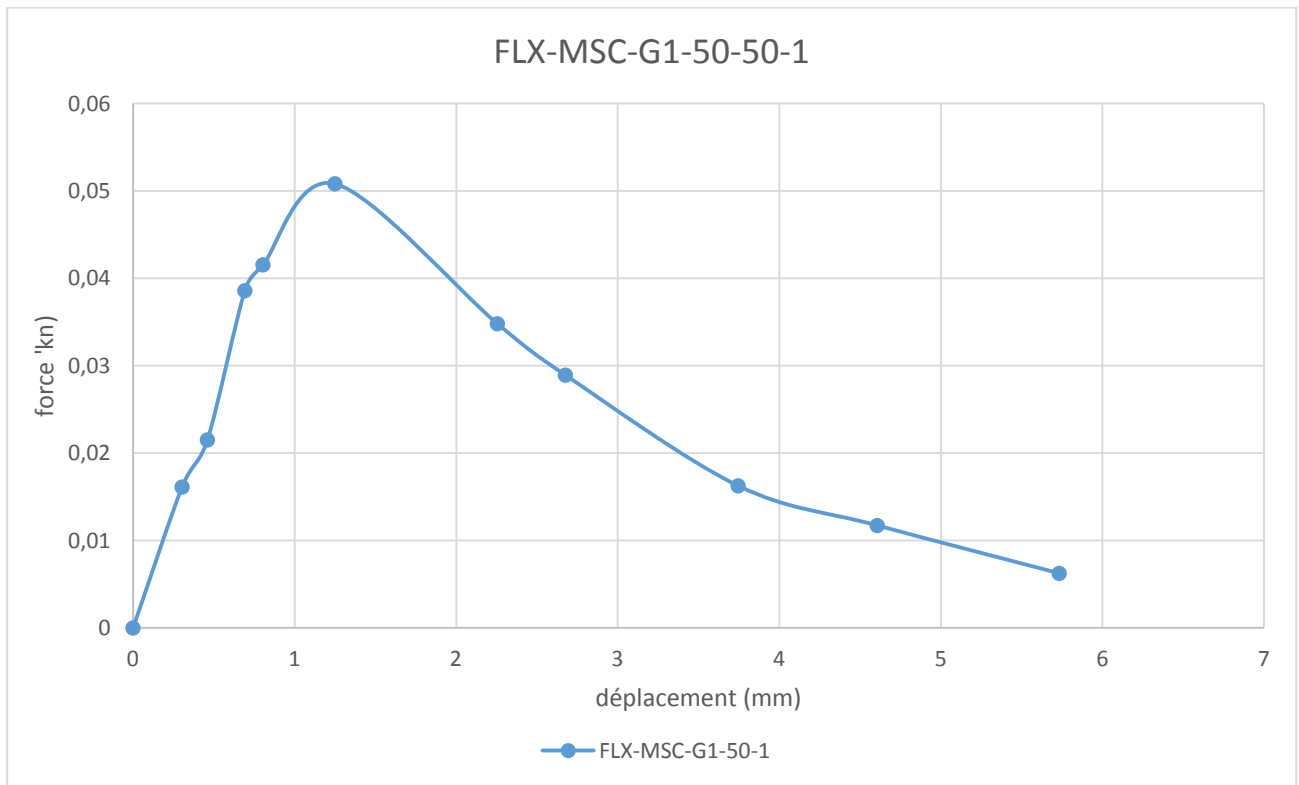


Figure IV.28. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 50% / SC 50% G1 en flexion

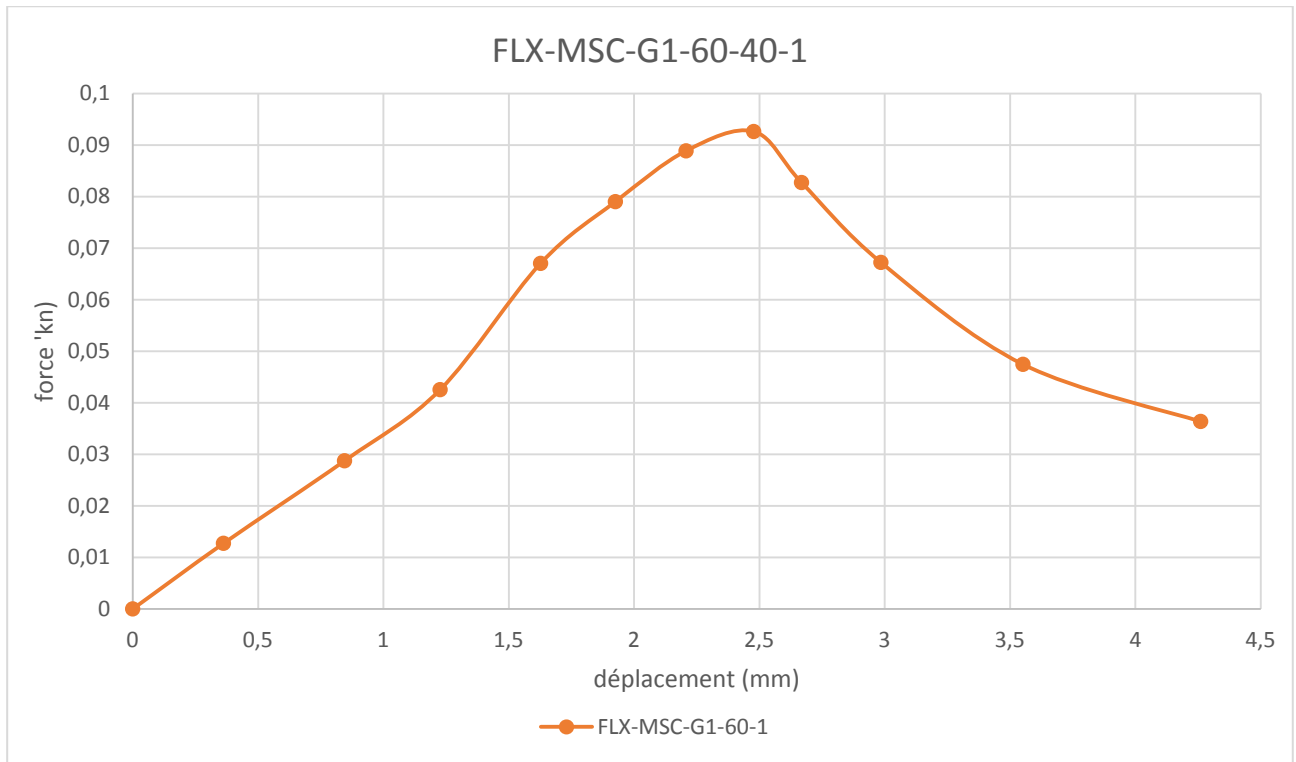


Figure IV.29. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 60% / SC 40% G1 en flexion

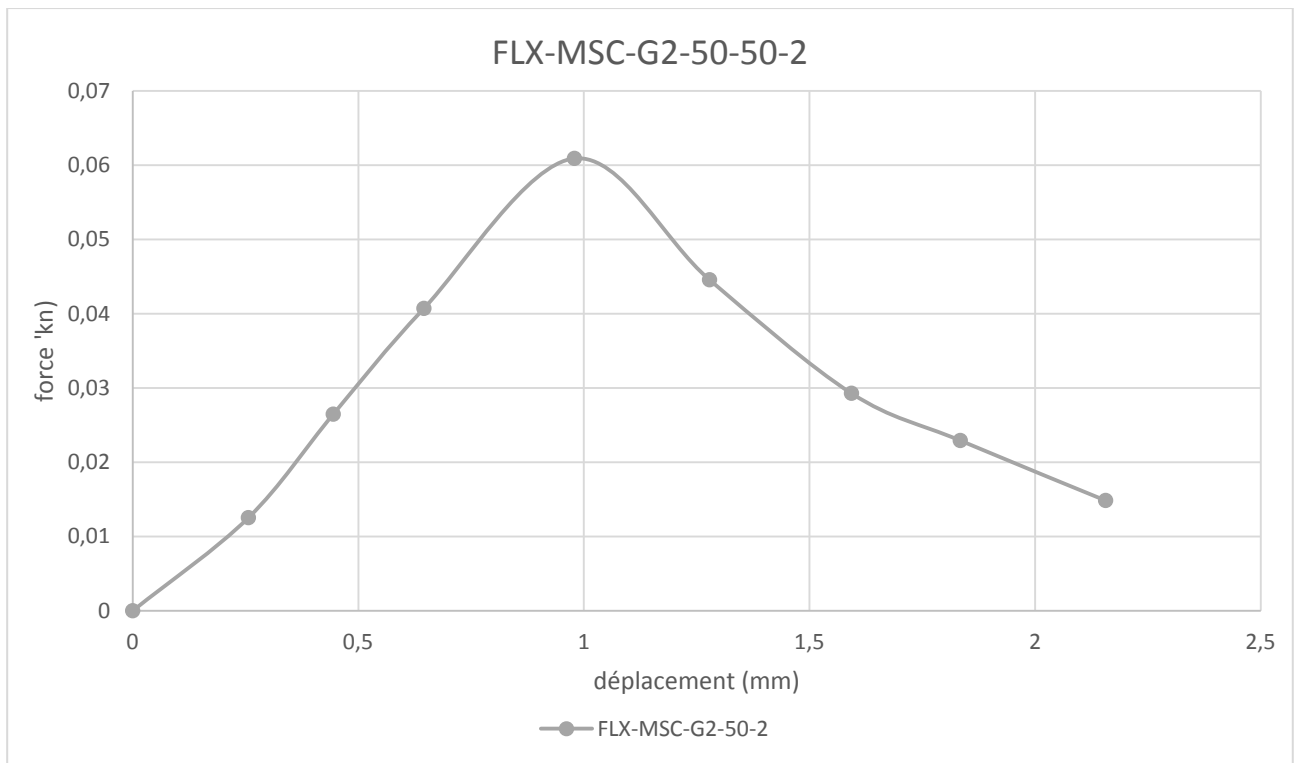


Figure IV.30. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 50% / SC 50% G2 en flexion

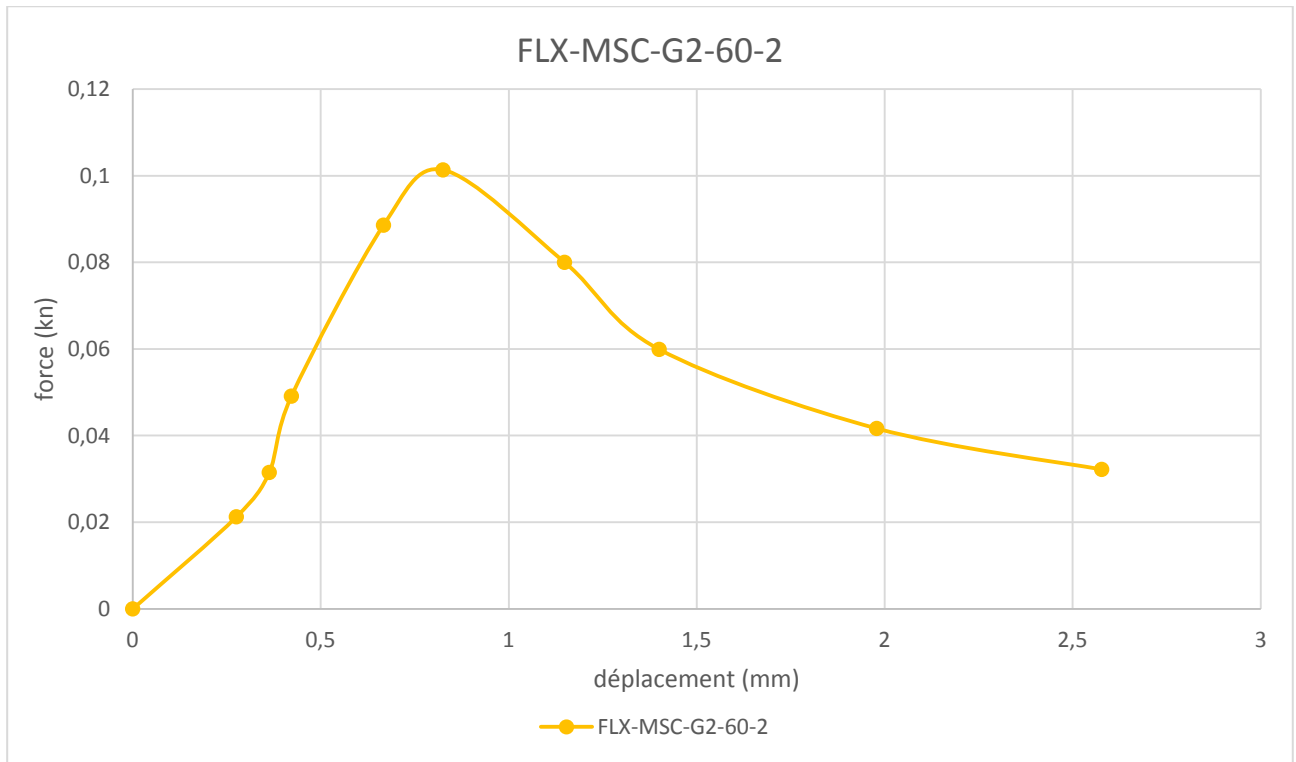


Figure IV.31. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 60% / SC 40% G2 en flexion

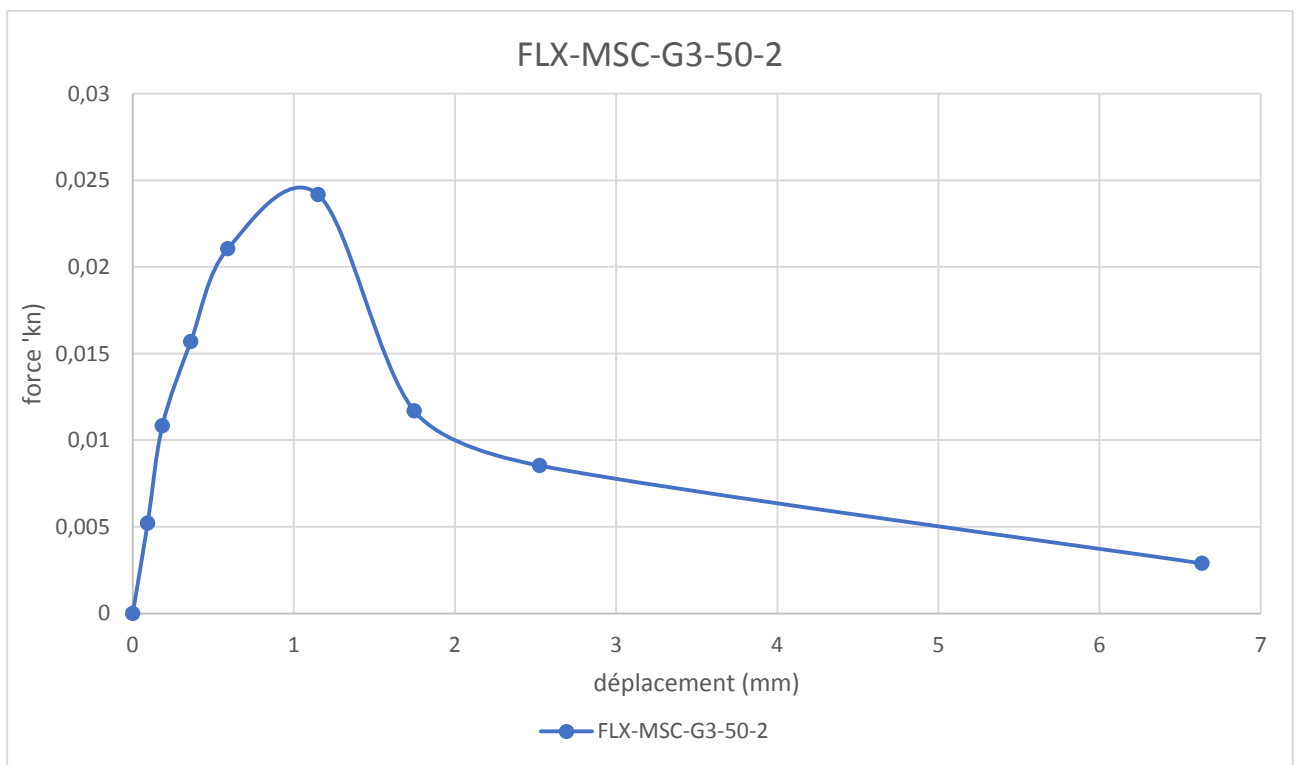


Figure IV.32. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 50% / SC 50% G3 en flexion

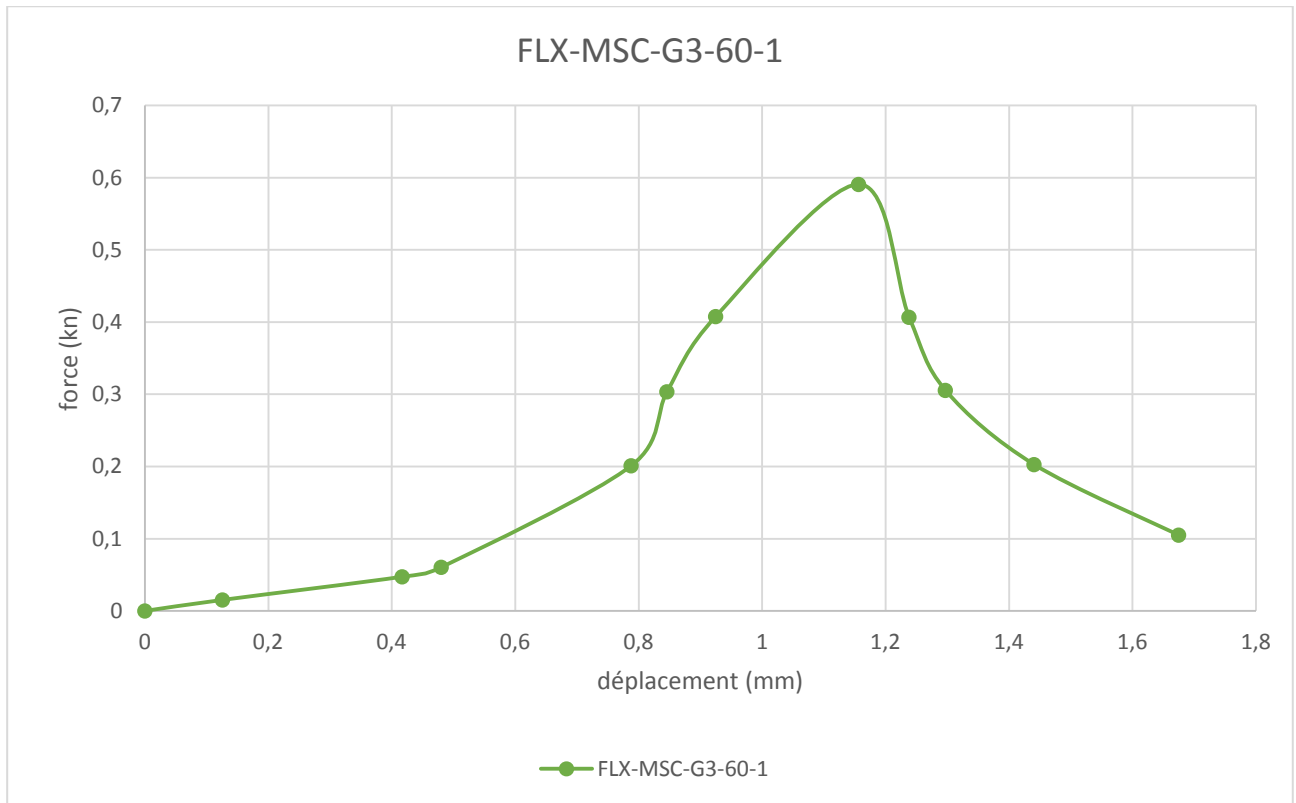


Figure IV.33. courbe force-déplacement de l'éprouvettes M 60% / SC 40% G3 en flexion

➤ Les courbes montrées précédemment, représentent le comportement à la flexion trois point, des éprouvettes prismatiques en mortier sciure de bois. Nous constatons globalement, que ces comportements présentent une phase élastique non linéaire jusqu'à apparition de la fissure. Dès que la fissuration apparait, il y a chute de chargement, Ce que traduisent, que la sciure de bois crieait une certaine ténacité qui s'oppose à la propagation rapide des fissures.

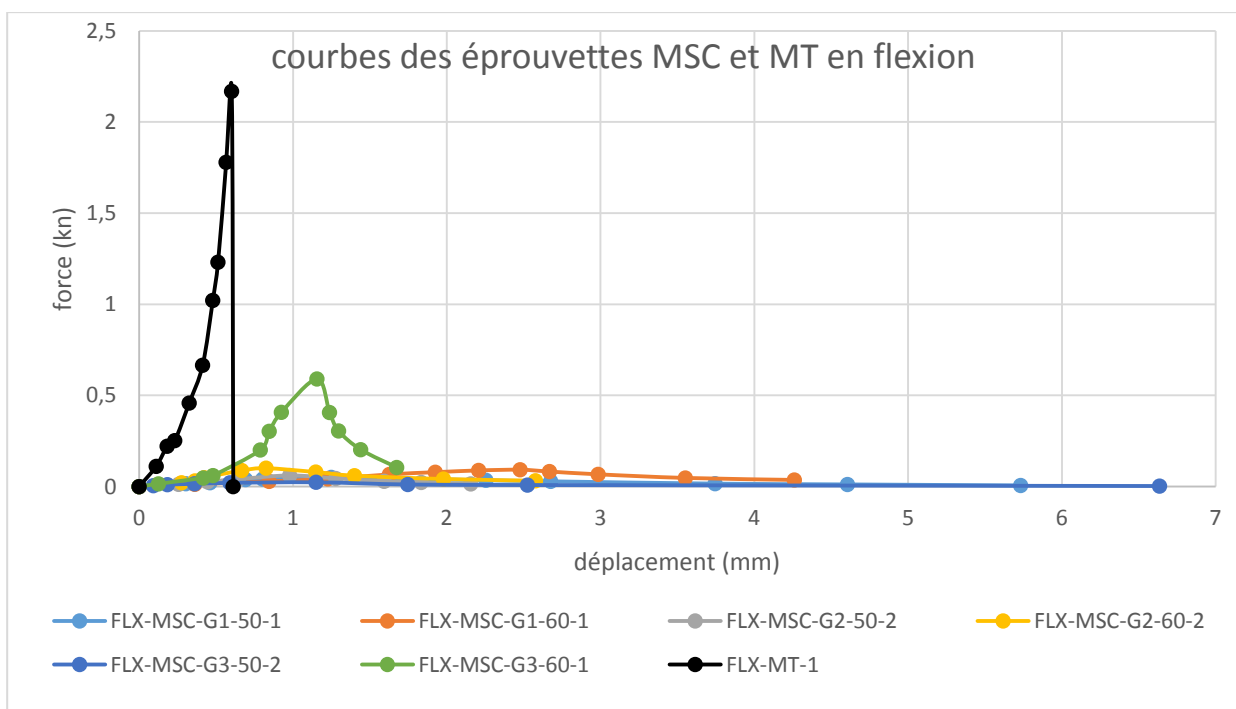


Figure IV.34. Confrontation des courbes des éprouvettes MSC avec celle du MT en flexion

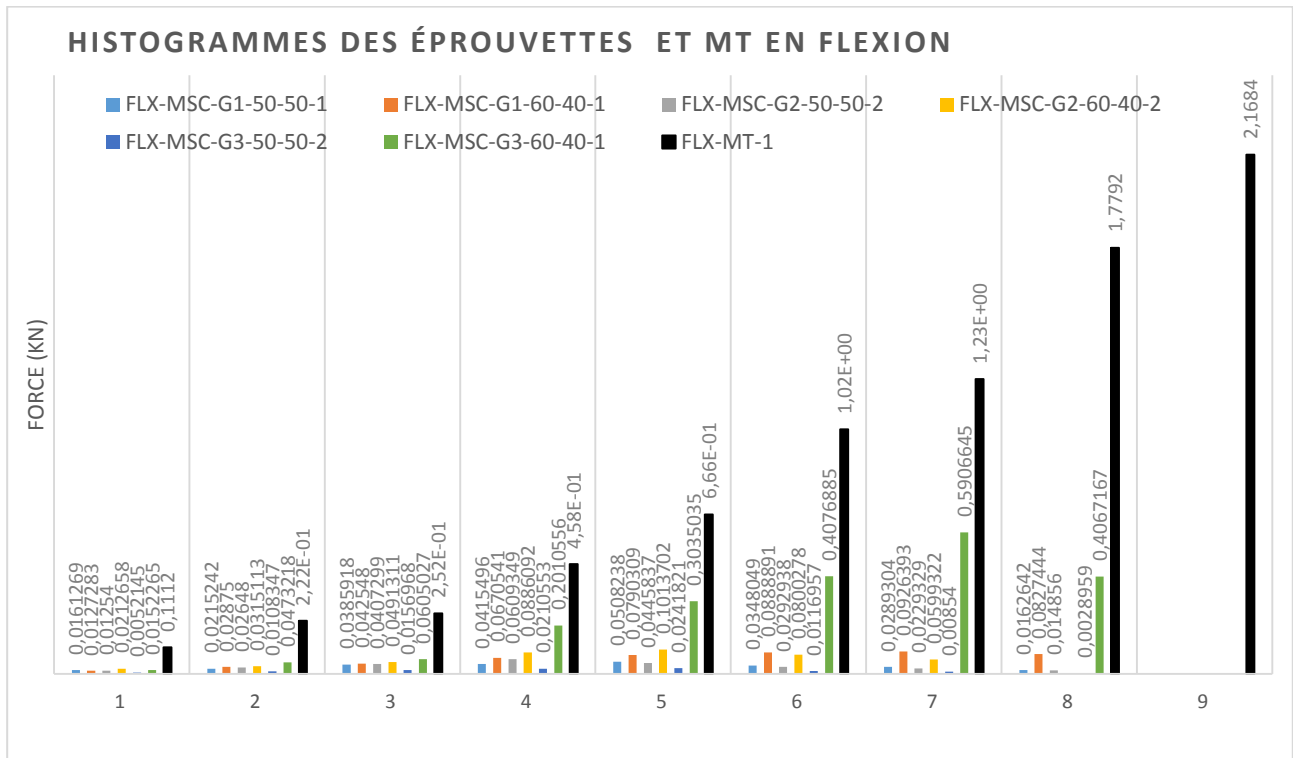


Figure IV.35. Confrontation des histogrammes des éprouvettes MSC avec celle du MT en flexion

Tableau IV.4. Résultats obtenus de l'essai de flexion

Type d'éprouvette	La force F_{max} (KN)	La flèche Δ_f (mm)	Le module de Young E_f (MPa) 10^{-6}	La résistance R (MPa)
MSC-50-50-G1	0.05	1.25	3.91	0.00012
MSC-60-40-G1	0.93	2.48	36.62	0.00218
MSC-50-50-G2	0.06	0.98	6.00	0.00014
MSC-60-40-G2	0.10	0.83	11.77	0.00023
MSC-50-50-G3	0.02	1.15	1.70	0.00005
MSC-60-40-G3	0.60	1.16	50.51	0.00141
MT	2.17	0.61	347.4	0.00509

Commentaire

D'après les résultats mentionnés sur le **tableau IV.5**, nous remarquons que l'éprouvette composée de 60% du mortier et de 40% de la sciure de bois gamme (1) (ML-60%-40%-G1) qui présente les meilleures caractéristiques mécanique en terme de flexion.

IV.4. Confrontation entre les éprouvettes étudiées et celle du mortier témoin en compression et flexion

La confrontation des valeurs de résistances obtenues sous un chargement de flexion et de compression de l'ensemble des éprouvettes par rapport au mortier témoin, est illustrée par les figures IV.36 et IV.37.

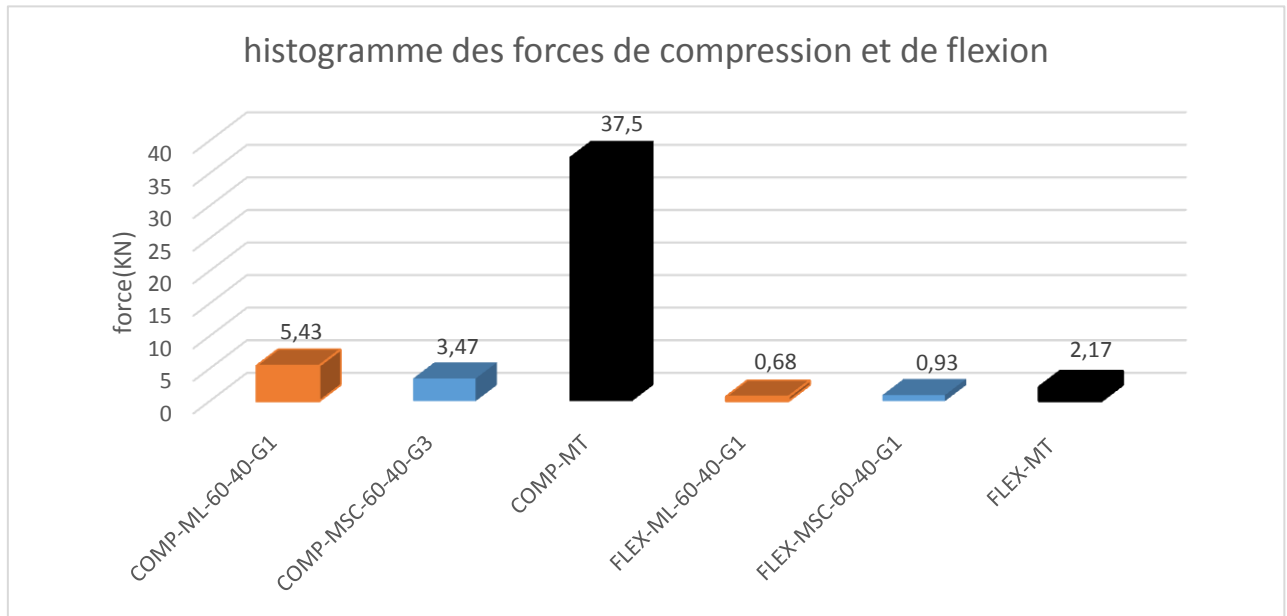


Figure IV.36. Confrontation des valeurs de forces de rupture des éprouvettes étudiées par rapport aux celles du MT

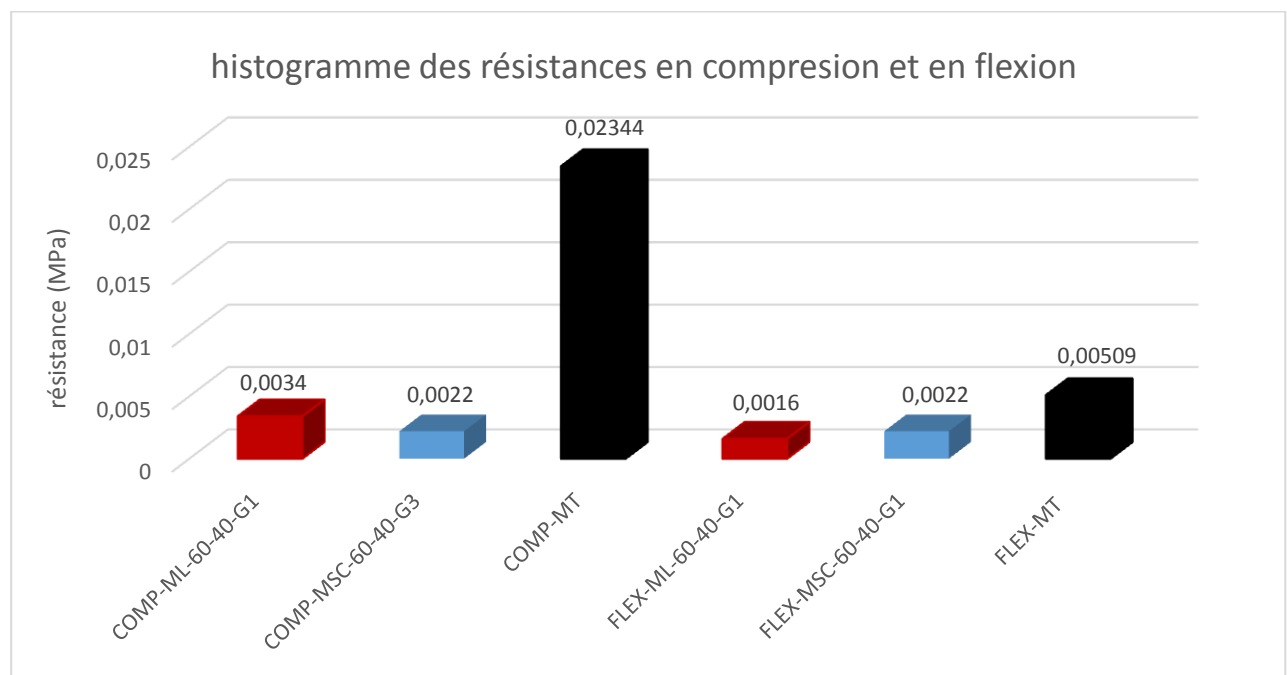


Figure IV.37. confrontation entre les résistances des éprouvettes étudiées et celles du mortier

D'après les résultats et les histogrammes précédents, on constate que les éprouvettes à base de liège ou sciure de bois, sont fragiles et moins résistantes comparativement au mortier témoin, soit à la compression ou la flexion.

La résistance à la compression de (ML-60%-40%-G1) et (MSC-60%-40%-G3) représente respectivement 14.5% et 9.4% de la résistance du mortier témoin.

Aussi la résistance à la flexion de (ML-60%-40%-G1) et (MSC-60%-40%-G1) représente respectivement 31.43% et 43.22% de la résistance du mortier témoin.

Vu que les deux matériaux utilisés, mortier liège ML ou mortier sciure de bois MSC, ont presque les mêmes caractéristiques mécaniques, nous avons choisi la formulation qui convient selon le coût et la disponibilité,

Ainsi, nous avons opté pour la sciure de bois et le mortier.

IV.5. ESSAI DE CARACTERISATION DU PVC ET DE TISSU A LA TRACTION



Dispositif de l'essai de traction

Rupture finale de l'éprouvette

Figure IV.38. essai de caractérisation du composite tissu-résine

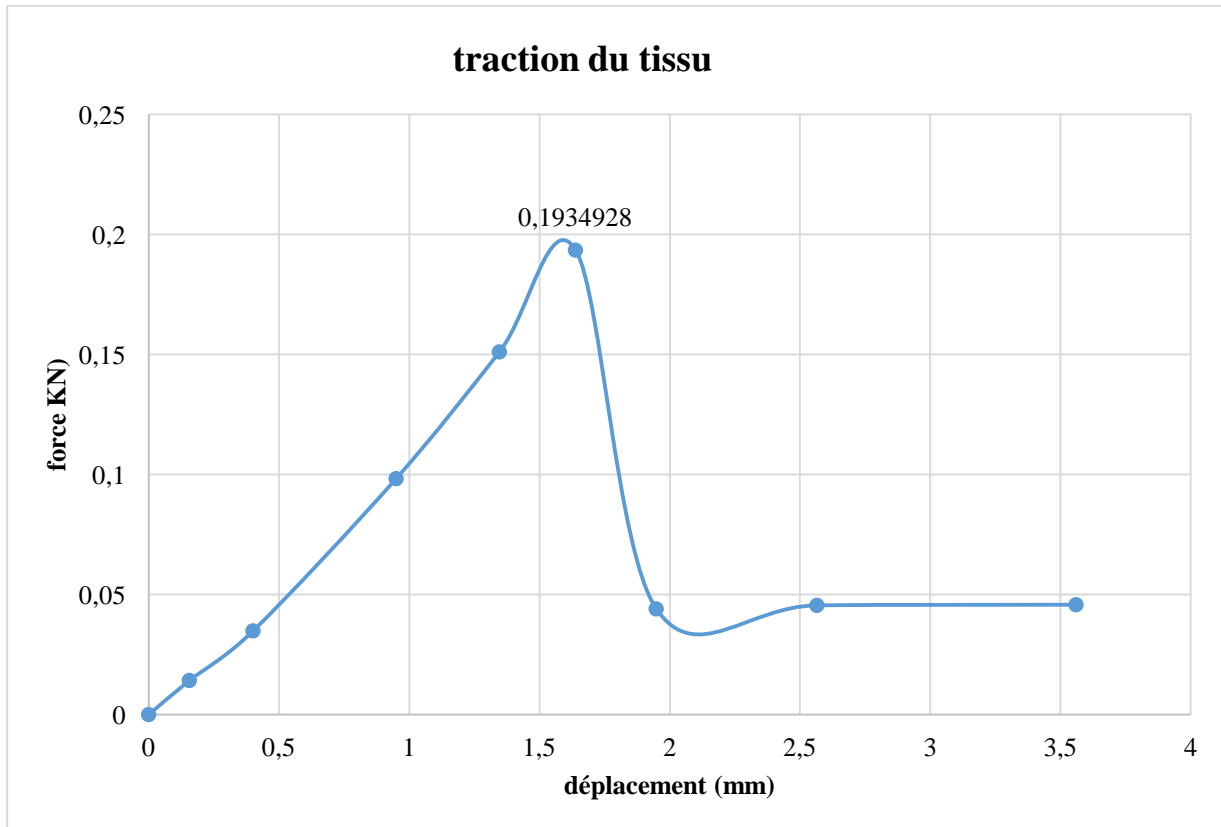


Figure IV.39. Comportement du tissu en traction

- Nous observons que le comportement du composite tissu-résine à la traction, est un comportement linéaire jusqu'à sa rupture finale à **0.2 KN**.



Figure IV.40. essai de caractérisation du PVC

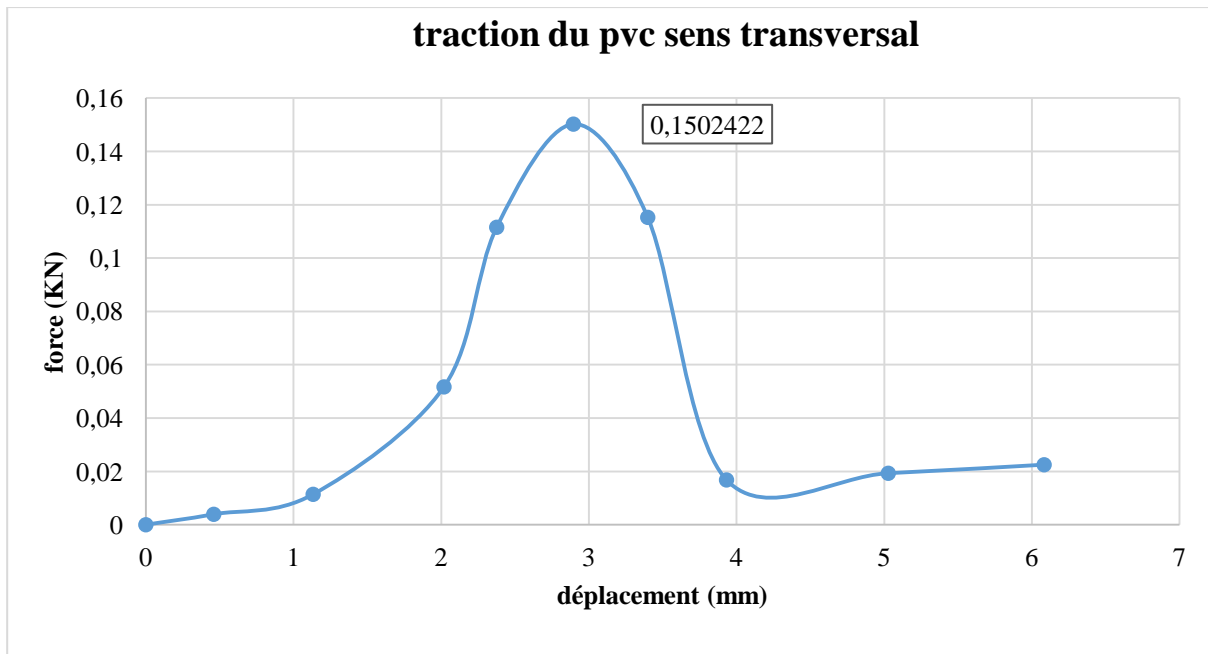


Figure IV.41. comportement du PVC en traction selon le sens transversal

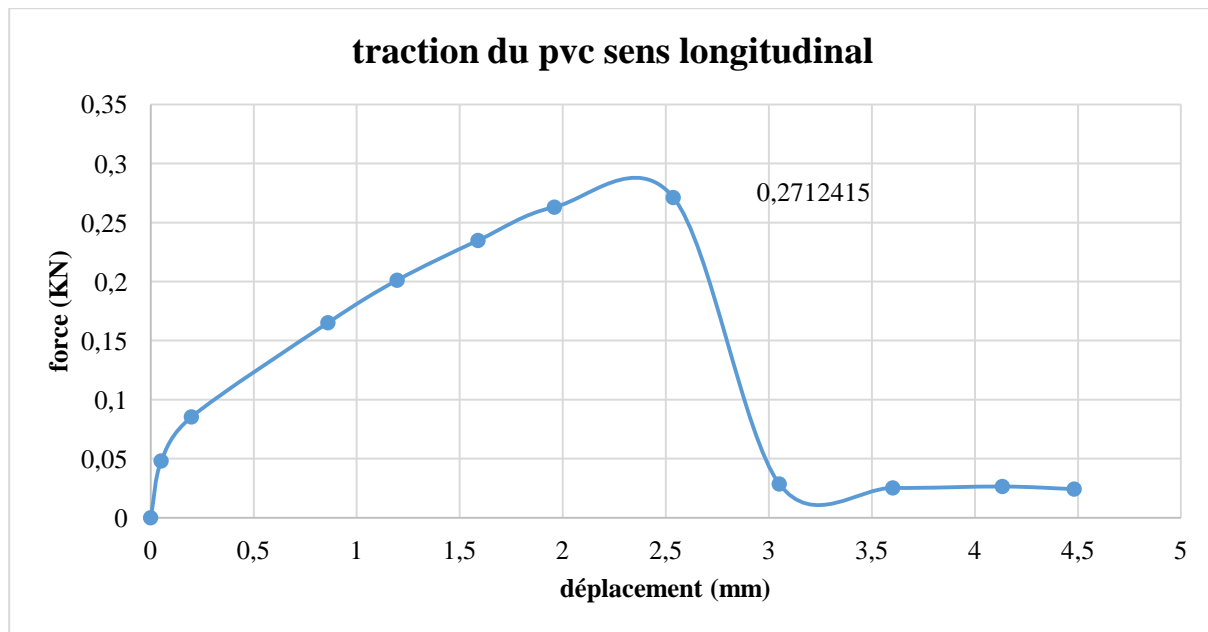


Figure IV.42. Comportement du PVC en traction selon le sens longitudinal

Commentaire

Les courbes de traction du PVC présentent un comportement non linéaire jusqu'à leur rupture finale. Comparativement entre le composite tissu-résine et le PVC, nous distinguons le PVC selon le sens transversal sous la sollicitation en traction

IV.6. ESSAIS DE VOILEMENT



Figure IV.43. processus de déformation du panneau renforcé par T-T à l'essai de voilement

Observations (P-R-TT VOIL)

- D'après les résultats de l'essai, nous avons observé un raccourcissement du panneau, et une fissuration au cœur de ce dernier, juste dans sa partie inférieure.
- Les comparateurs ils n'ont rien indiqué, dans ce cas, nous pouvons dire que la symétrie est réalisée, elle entraîne la symétrie des contraintes et empêche ainsi l'apparition des déformations d'ensemble du panneau composite, comme le voilement ou le gauchissement.

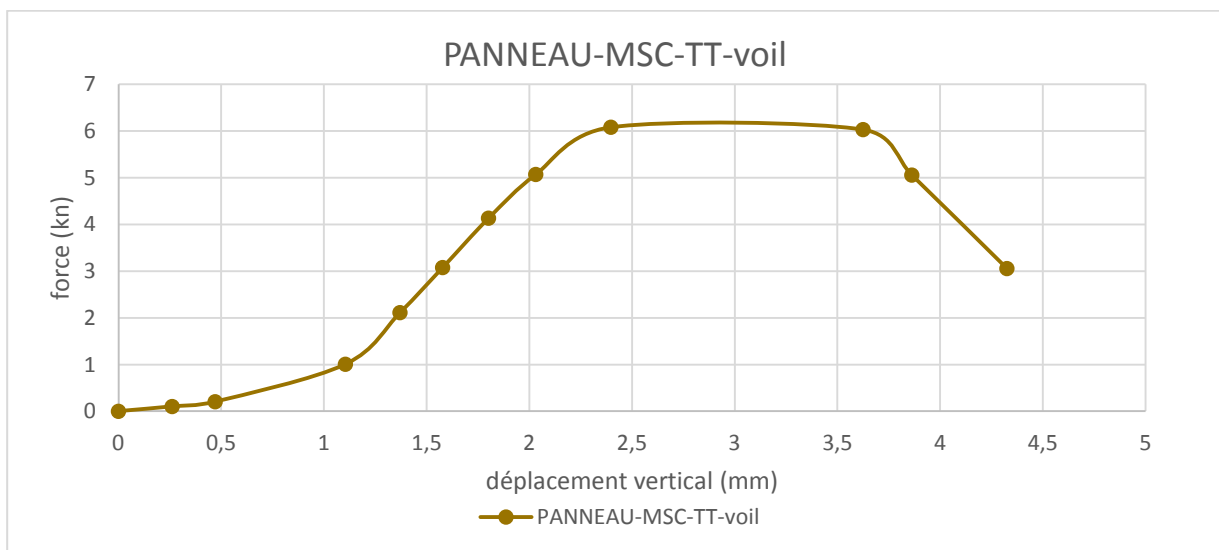


Figure IV.44. courbe force-déplacement du panneau renforcé par T-T à l'essai de voilement

Analyses des résultats (P-R-TT VOIL)

- ✚ L'allure de cette courbe, au départ elle présente un comportement élastique non linéaire, suivi par un plateau de compression, qui trace l'évolution de la propagation des fissures jusqu'à l'endommagement du panneau, et la chute du chargement.



Figure IV.45. processus de déformation du panneau renforcé par P-T à l'essai de voilement

Observations

- D'après les résultats de l'essai, nous avons observé une propagation de fissure locale et intermédiaire de l'âme, provoquant un voilement local du PVC au niveau de partie endommagée
- La dissymétrie du panneau composite lui entraîne une déviation de sa position initiale (verticale)

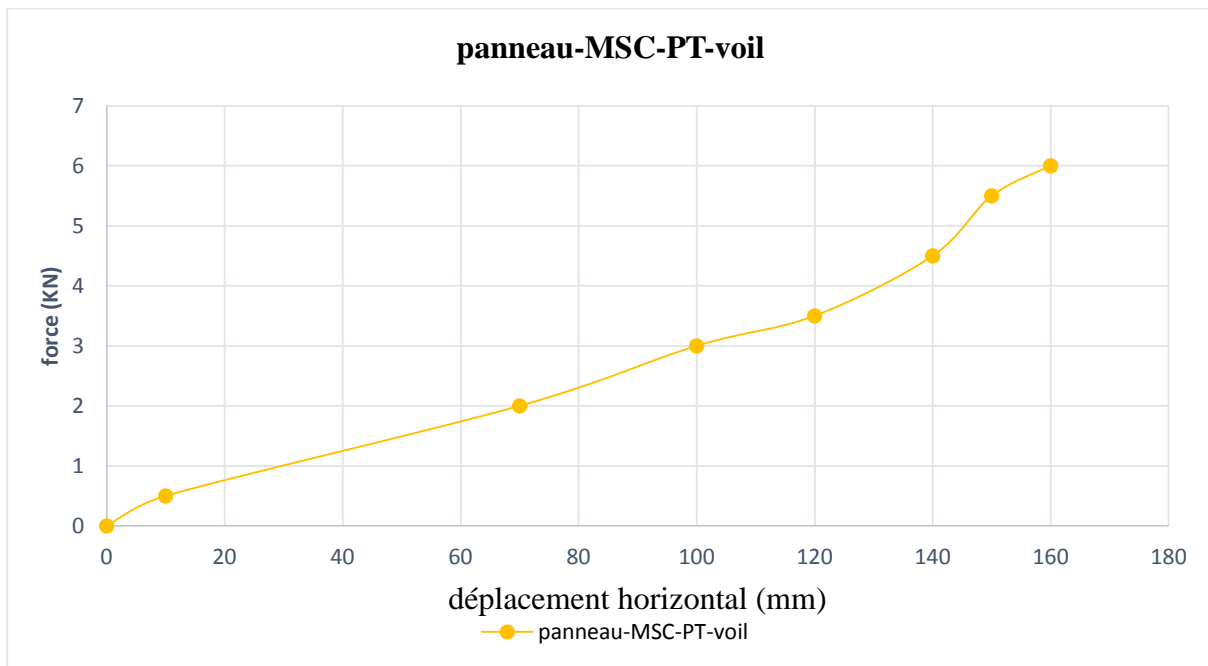


Figure IV.46. courbe force-déplacement horizontal du panneau renforcé par P-T à l'essai de voilement

Analyses des résultats (P-R-PT-VOIL)

- ✚ L'allure de la courbe de déformation horizontale, présente un comportement élastique quasi-linéaire que traduit la déviation du panneau jusqu'à l'arrêt du chargement

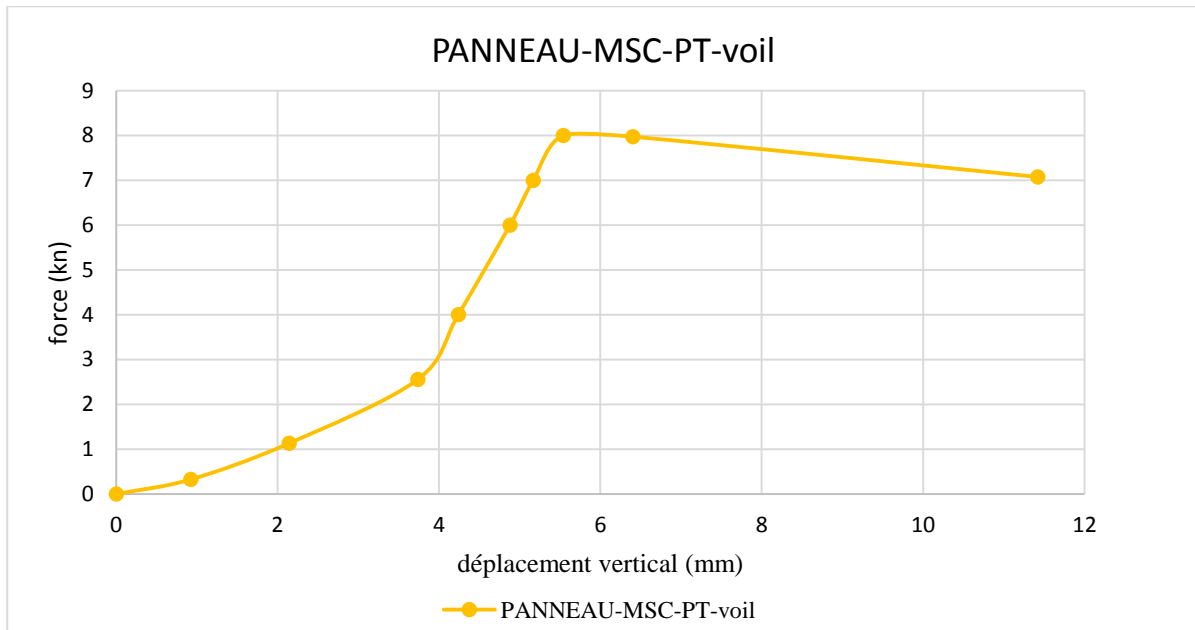


Figure IV.47. courbe force-déplacement vertical du panneau renforcé par P-T à l’essai de voilement

Analyses des résultats (P-R-PT-VOIL)

- ✚ L’allure de la courbe de déformation verticale, au départ elle présente un comportement élastique non linéaire, suivi par un plateau de compression traduit la propagation des fissures avec une chute légère de chargement au cours d’endommagement.



Figure IV.48. processus de déformation du panneau renforcé par P-Pà l’essai de voilement

Observations (P-R-PP-VOIL)

- Au début de l’essai nous avons observé un raccourcissement du panneau provoquant une fissuration à la partie inférieure de l’âme.
- Le chargement vertical du panneau composite provoque un décollement du renfort d’un côté, formant un voilement global du PVC décollé.
- La symétrie du panneau composite assure une quasi-verticalité après son endommagement

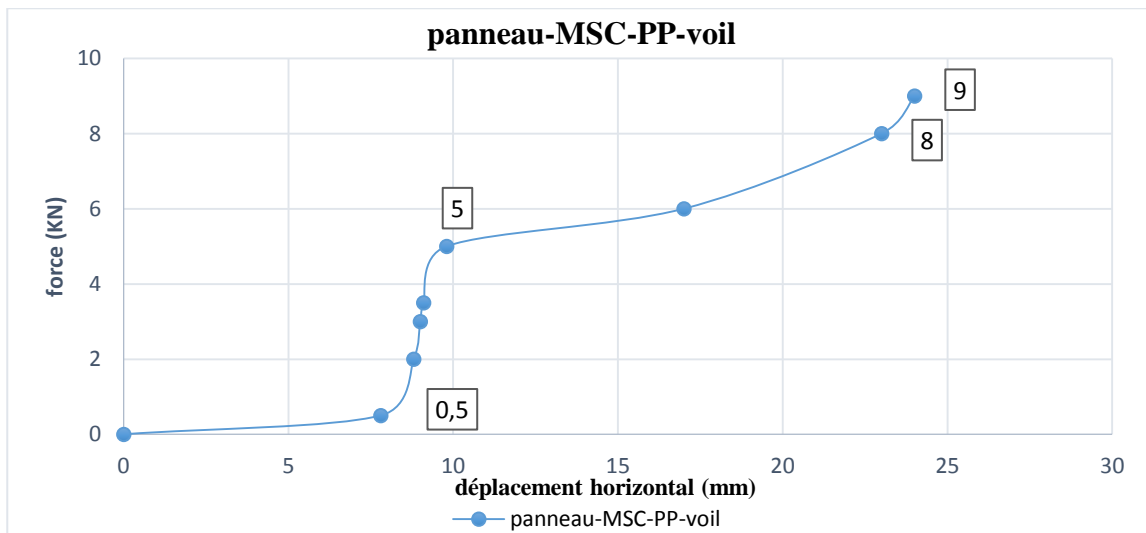


Figure IV.49. courbe force-déplacement horizontal du panneau renforcé par P-P à l'essai de voilement

Analyses des résultats (P-R-PP-VOIL)

- ✚ L'allure de la courbe de déformation horizontale, au départ elle présente une zone linéaire jusqu'à un chargement de **0.5KN**, suivi par une ténacité du chargement jusqu'à **5KN**, au delà de ça l'endommagement du panneau accompagnant une augmentation du chargement, ainsi que le voilement globale du **PVC** décollé.

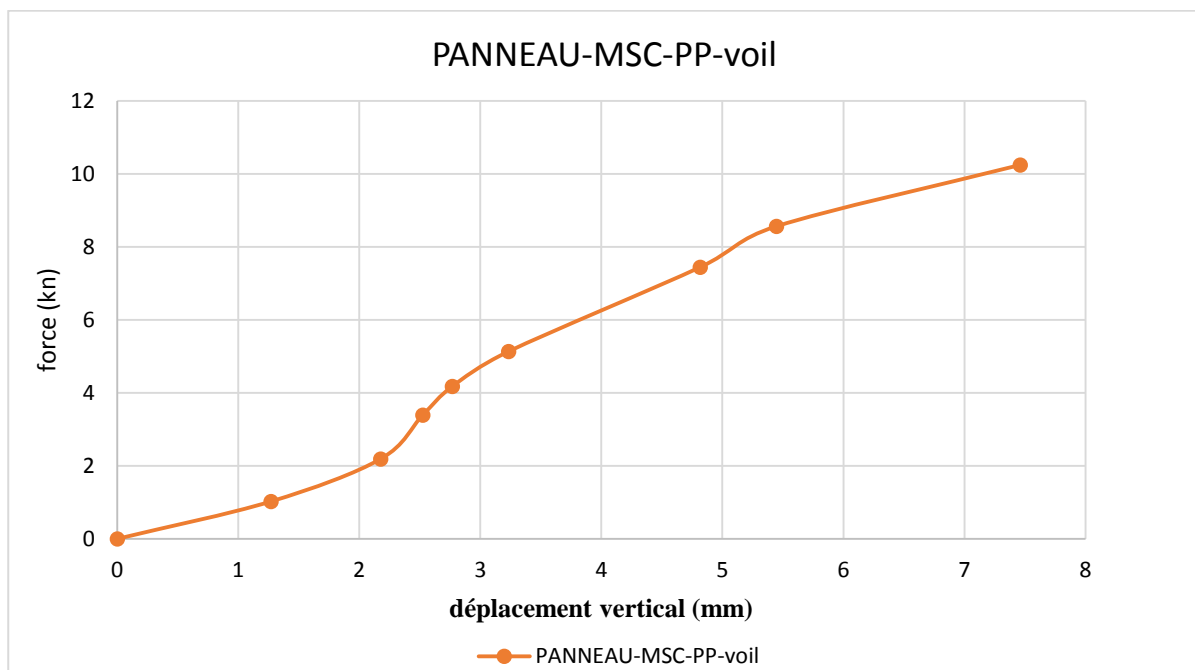


Figure IV.50. courbe force-déplacement vertical du panneau renforcé par P-P à l'essai de voilement

Analyses des résultats (P-R-PP-VOIL)

- ✚ L'allure de la courbe de déformation verticale, présente un comportement élastique quasi-linéaire traduit le voilement global du PVC décollé, jusqu'à l'arrêt du chargement.



Figure IV.51. processus de déformation du panneau mortier sciure de bois en voilement

Observations

- Nous avons remarqué au début de chargement un raccourcissement du panneau MSC, suivi par l'endommagement du panneau au niveau de sa partie supérieure par un cisaillement.

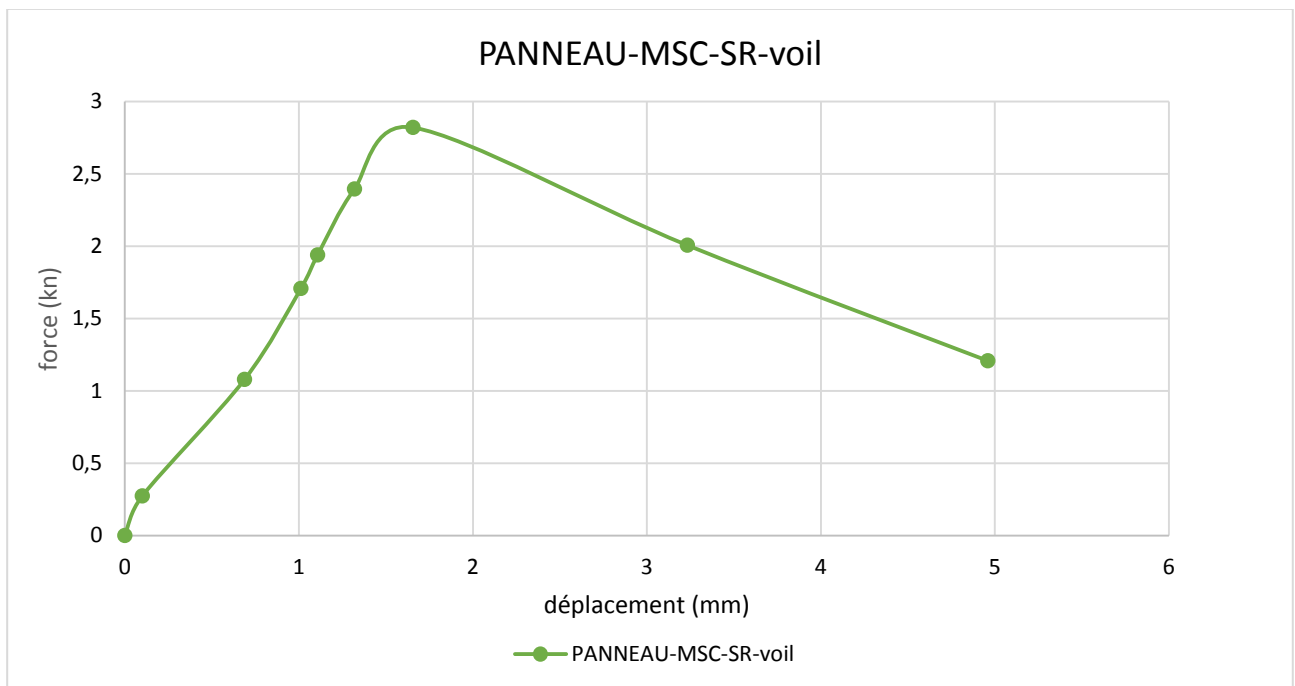


Figure IV.52. courbe force-déplacement horizontal du panneau non renforcé à l'essai de voilement

Analyses des résultats (P-MSC)

- ✚ L'allure de cette courbe, au départ présente une zone élastique quasi-linéaire, suivie par un endommagement accompagnant d'une diminution de chargement.

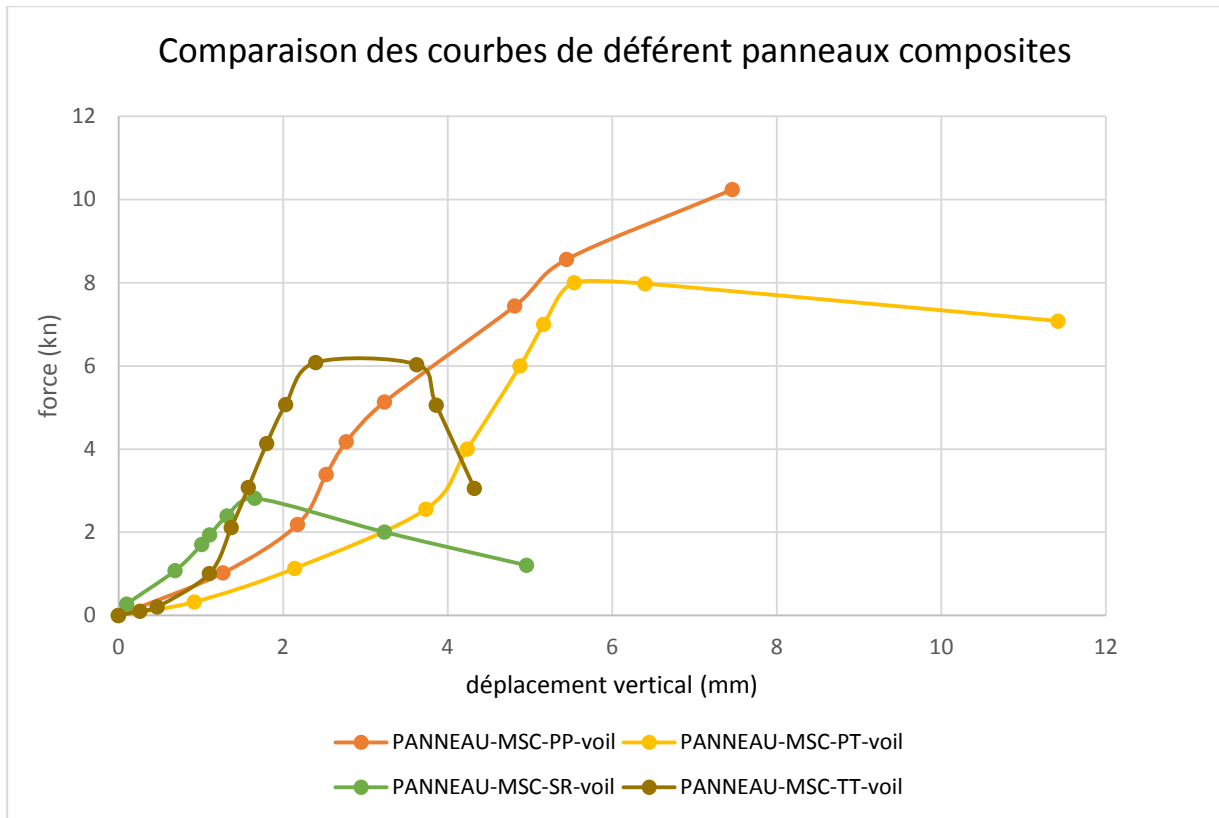


Figure IV.53. Courbes force-déplacement vertical des différents panneaux composites à l'essai de voilement

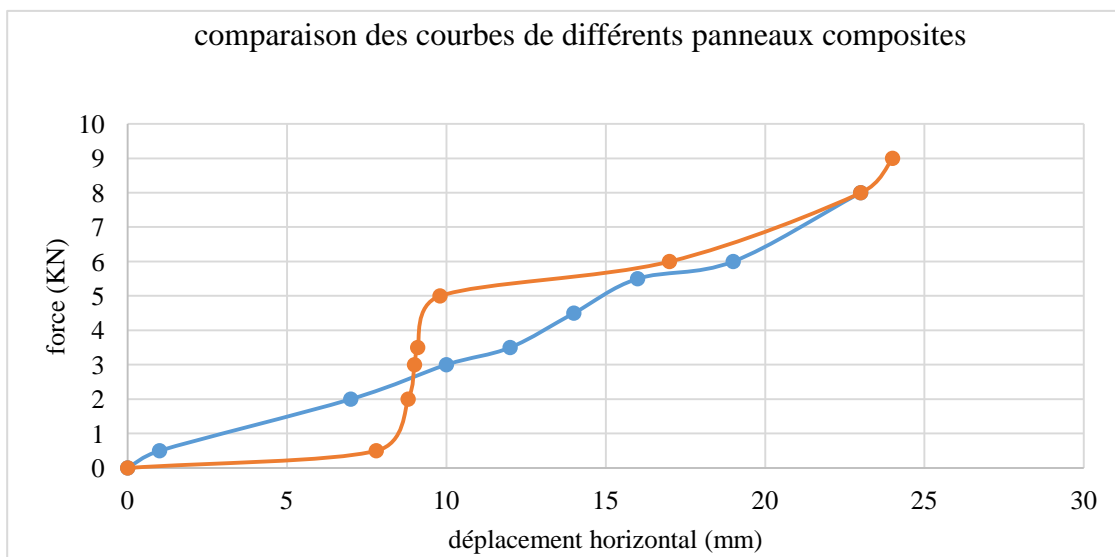


Figure IV.54. Courbes force-déplacement vertical des différents panneaux composites à l'essai de voilement

Commentaire :

- Les courbes de comparaison force-déplacement vertical et horizontal, nous ont permis de conclure que chaque panneau présente un comportement spécifique, ainsi qu'une charge limite relative au type de renforcement.

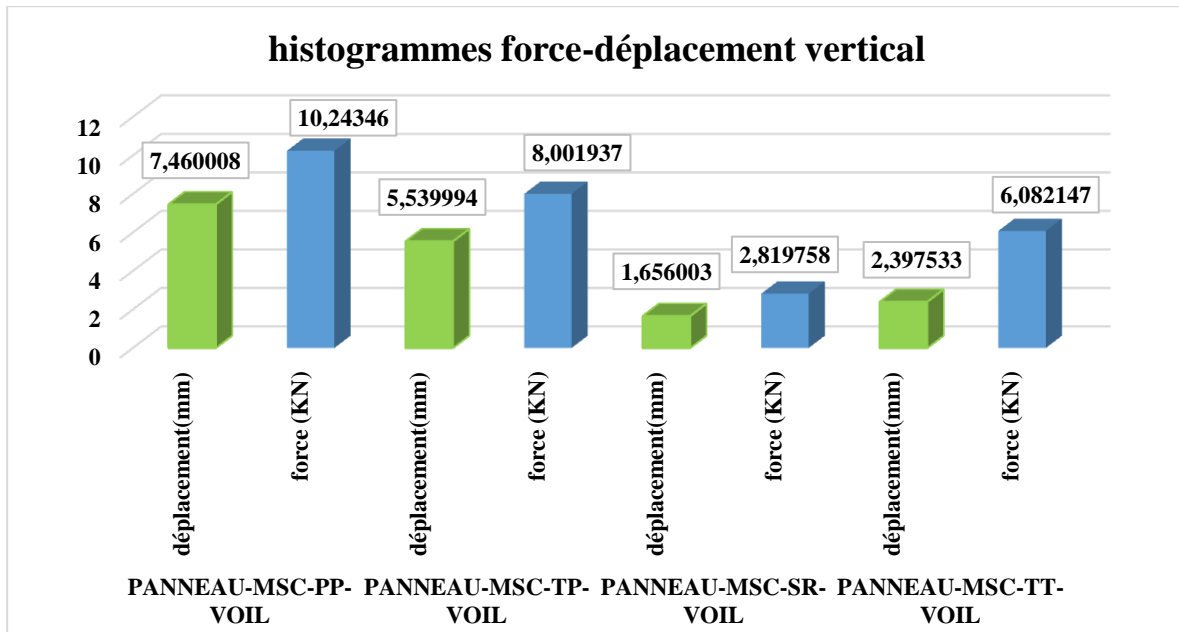


Figure IV.55. Histogramme des valeurs des résistances des différents panneaux en voilement

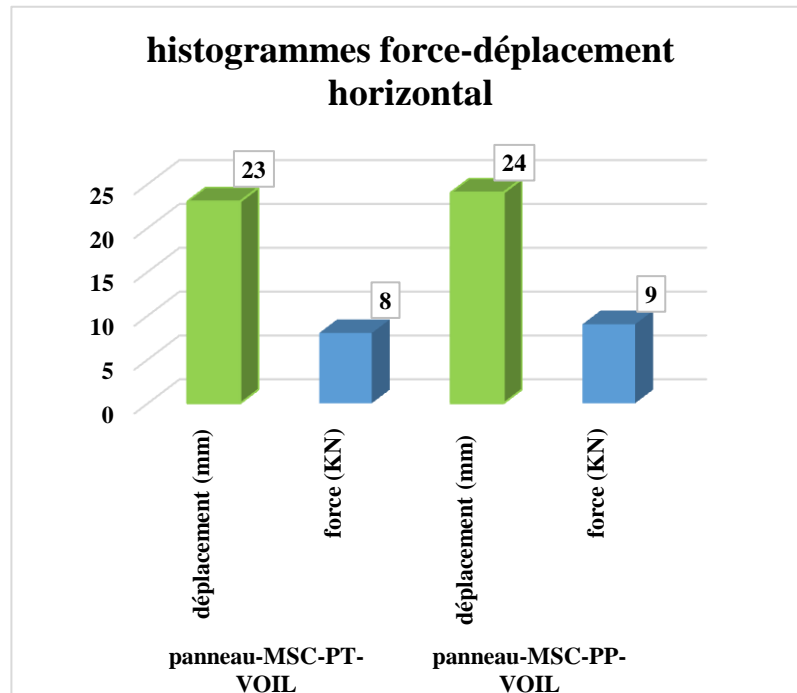


Figure IV.56. histogrammes force-déplacement horizontal des différents panneaux composites à l'essai de voilement

Tableau IV.5. Résultats des essais de flambement

Type de panneau	Déplacement vertical (mm)	Déplacement horizontal (mm)	Force maximale (KN)
Panneau MSC	1.66	/	2.82
Panneau MSC-T-T	2.40	/	6.08
Panneau MSC-T-P	5.54	165	8.00
Panneau MSC-P-P	7.46	160	10.24

Analyse des résultats

- D'après les résultats de l'essai de voilement, nous avons distingué le panneau mortier sciure de bois renforcé par le PVC de part et d'autre, car il présente des meilleurs résultats, tel que son chargement limite est (**10.24KN**).
- D'après les processus de déformation des panneaux composites, nous avons remarqué que nous n'avons pas du risque de voilement des panneaux composites. Mais nous avons observé le phénomène de décollement du renfort et le voilement du PCV après son décollement.

IV.7. ESSAIS DE POINÇONNEMENT

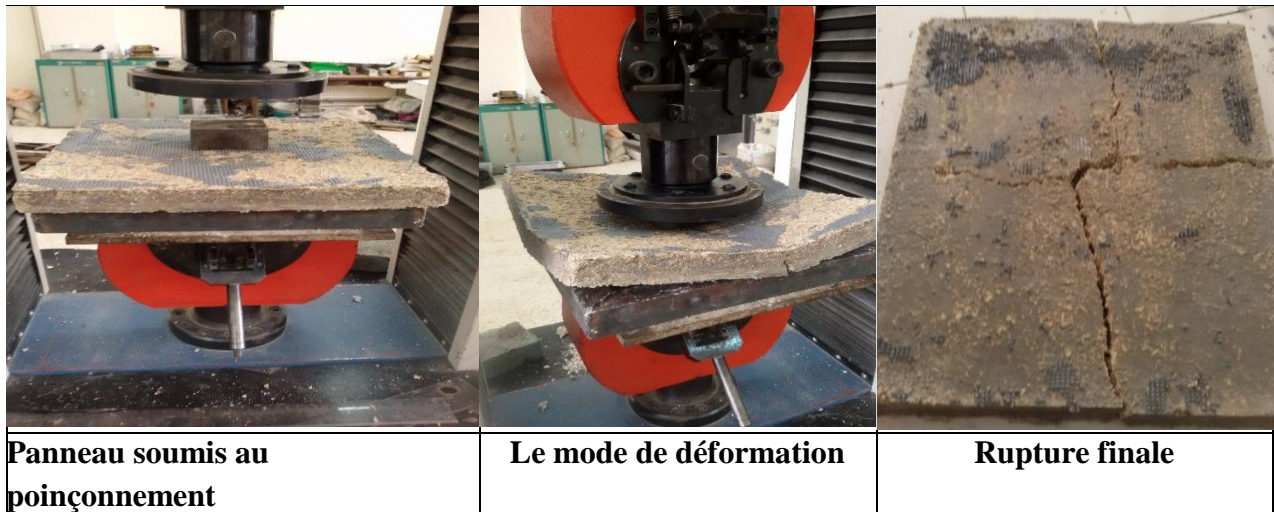


Figure IV.57. processus de déformation du panneau MSC à l'essai de poinçonnement

Observations résultats (P-MSc)

- Apparition des fissures transversales et absence des fissures secondaires.
- Le mode de rupture observé est par flexion, selon les deux directions principales des contraintes.

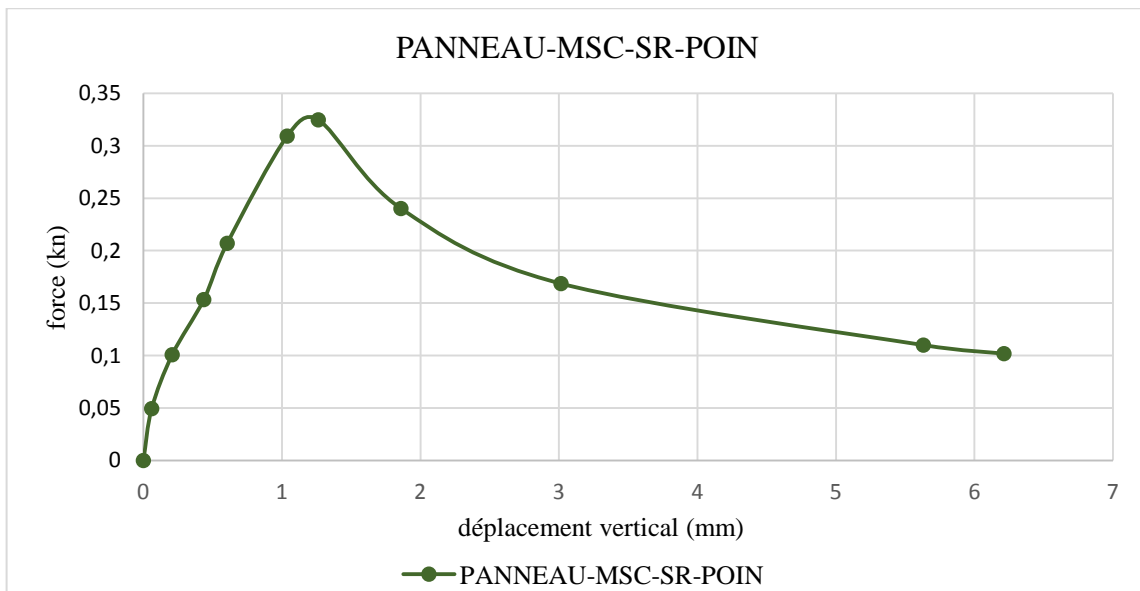


Figure IV.58. courbe force-déplacement du panneau MSC à l'essai de poinçonnement

Analyse des résultats (Panneau-MSC)

- ✚ L'allure de cette courbe, au départ présente un comportement élastique quasi-linéaire traduisant la ténacité jusqu'à le chargement limite du panneau (**0.32KN**), suivi par une diminution de chargement qui indique la l'endommagement du panneau.



Figure IV.59. processus de déformation du panneau renforcé par T-P à l'essai de poinçonnement

Observations et analyses des résultats (P-R-TP-POIN) (le tissu tendu)

- Au début de chargement, nous avons remarqué l'enfoncement du point d'impact dans le renfort supérieur PVC, à travers l'âme du panneau composite jusqu'à sa rupture finale, ceci a provoqué un poinçonnement local du panneau composite.
- Absence des fissures transversales et secondaires.
- La propagation des fissures dans l'épaisseur de l'âme, produisent un cisaillement local de cette dernière.
- Le renforcement par tissu qui est à la partie tendue du composite, transforme les ruptures flexionnelles à des ruptures par poinçonnement.

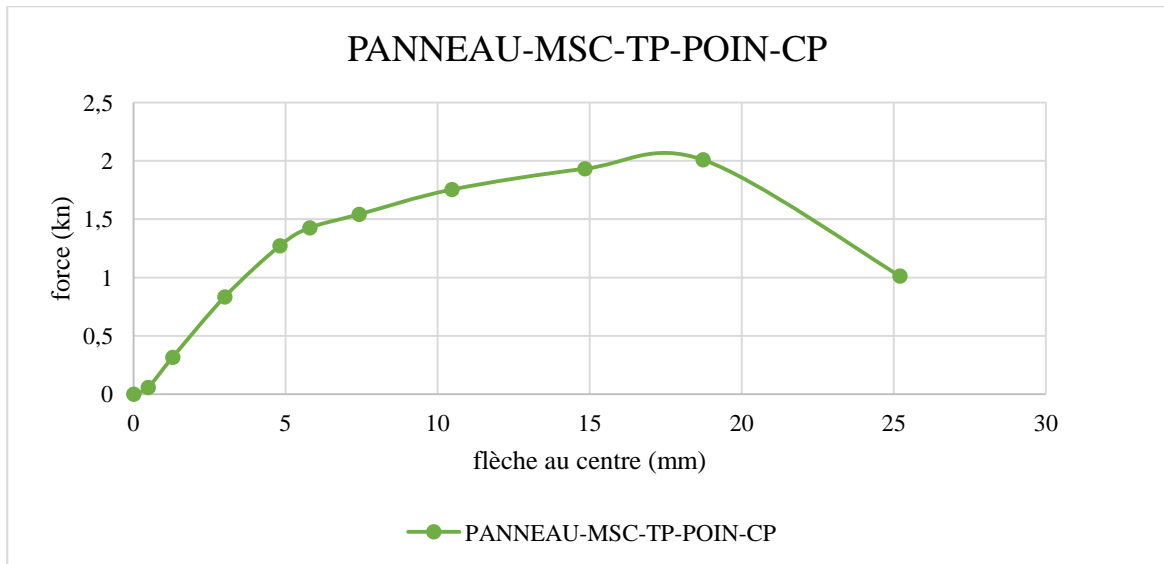


Figure IV.60. courbe force-déplacement du de panneau renforcé par T-P à l'essai poinçonnement

Analyses des résultats (P-R-TP-POIN) (le tissu tendu)

✚ Cette courbe présente au départ un comportement élastique quasi-linéaire jusqu'à l'enfoncement du point l'impact dans le renfort supérieur PVC. Puis un changement du comportement avec une ténacité du renfort, suivi par la rupture de l'âme et la déformation du renfort inférieur.



Figure IV.61. processus de déformation du panneau renforcé par P-P à l'essai de poinçonnement

Observations (P-R-PP-VOIL)

- Comme nous avons observé précédemment, l'application d'un effort centré sur la face supérieure (PVC), engendre l'enfoncement du point d'impact dans le renfort PVC, qui atteint l'âme du composite au moment de la rupture par poinçonnement global de l'âme du composite.
- Le renfort inférieur est soumis à une déformation globale

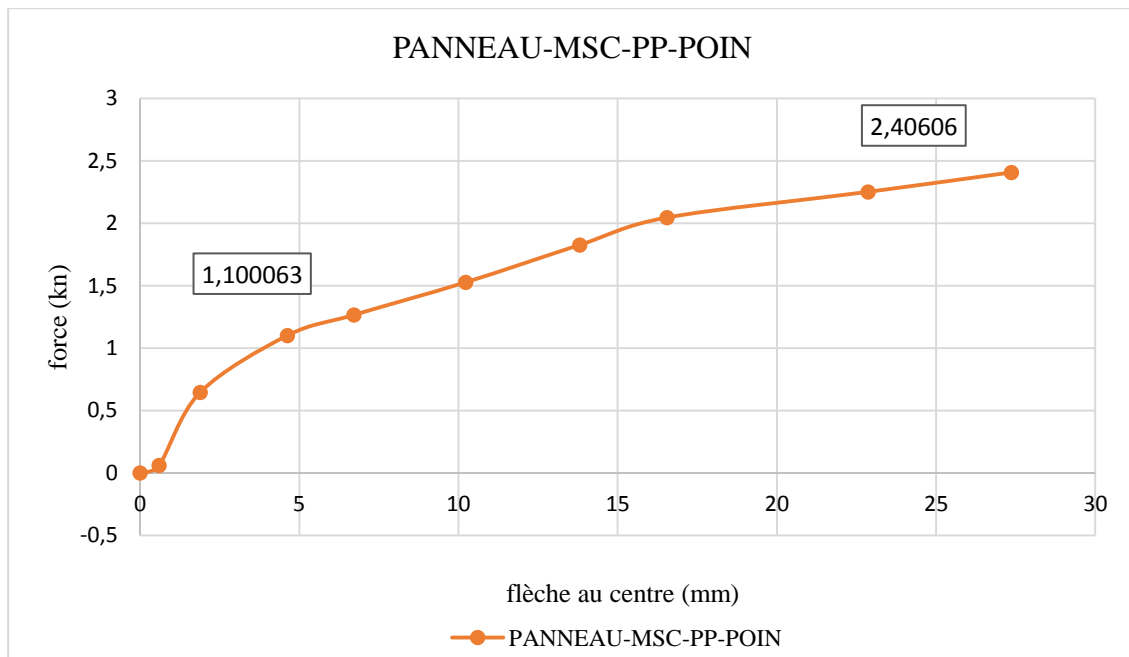


Figure IV.62. courbe force-déplacement du de panneau renforcé par P-P à l’essai poinçonnement

Analyses des résultats (P-R-PP-VOIL)

- ✚ L’allure de cette courbe présente initialement un comportement élastique non linéaire jusqu’à l’enfoncement du point d’impact dans le PVC, suivi par un plateau de compression qui traduit la résistance du renfort inférieur (PVC) jusqu’à l’arrêt du chargement.



Figure IV.63. processus de déformation du panneau renforcé par T-P à l’essai de poinçonnement

Observations (P-R-TP-POIN) (le PVC tendu)

- Apparition de deux fissures diagonales, et l’absence de fissures secondaires.
- Le type de renforcement et la disposition du panneau dans l’appareil, ainsi que le PVC dans la partie tendue et le tissu dans la face supérieure, engendrent un changement du phénomène de rupture. L’endommagement issu par cet essai est la rupture flexionnelle de l’âme
- Nous avons remarqué un enfoncement du point d’impact dans la peau supérieure, avec un flambement localisé de la peau tendue PVC

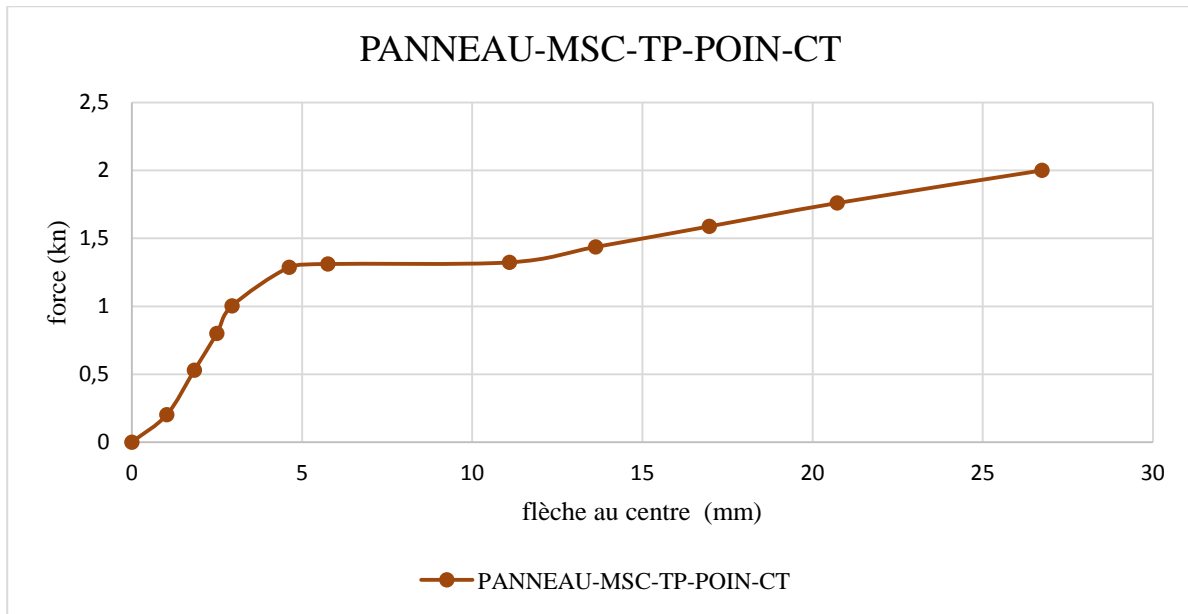


Figure IV.64. courbe force-déplacement du de panneau renforcé par T-P à l'essai poinçonnement

Analyses (P-R-TP-POIN) (le PVC tendu)

- La courbe force déplacement du (P-R-TP-POIN) (le PVC tendu), présente deux zone, la première elle se termine par l'enfoncement du point d'impact, et la seconde traduit la réaction du renfort inférieur



Figure IV.65. processus de déformation du panneau renforcé par T-T à l'essai de poinçonnement

Observations (P-R-TT-VOIL)

- Nous avons observé au début de chargement, un enfoncement du point d'impact dans le renfort supérieur, avec un décollement partiel entre l'âme et le renfort supérieur.
- Le mode de rupture observé est une rupture par poinçonnement local, avec une propagation des fissures engendrant le cisaillement de l'âme.

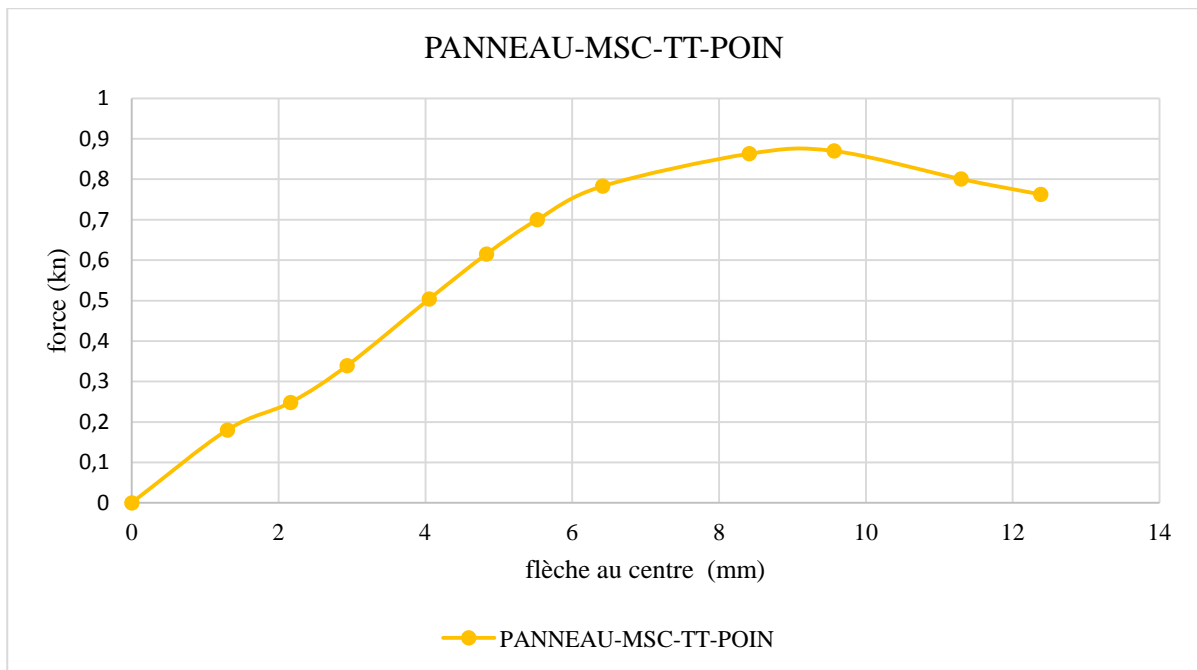


Figure IV.66. courbe force-déplacement du panneau renforcé par T-T à l'essai poinçonnement

Analyses des résultats (P-R-TT-POIN)

La courbe force-déplacement du (P-R-TT-POIN), présente un comportement quasi-linéaire, traduit la réaction du renfort inférieur et supérieur du panneau terminant par la l'endommagement de l'âme.

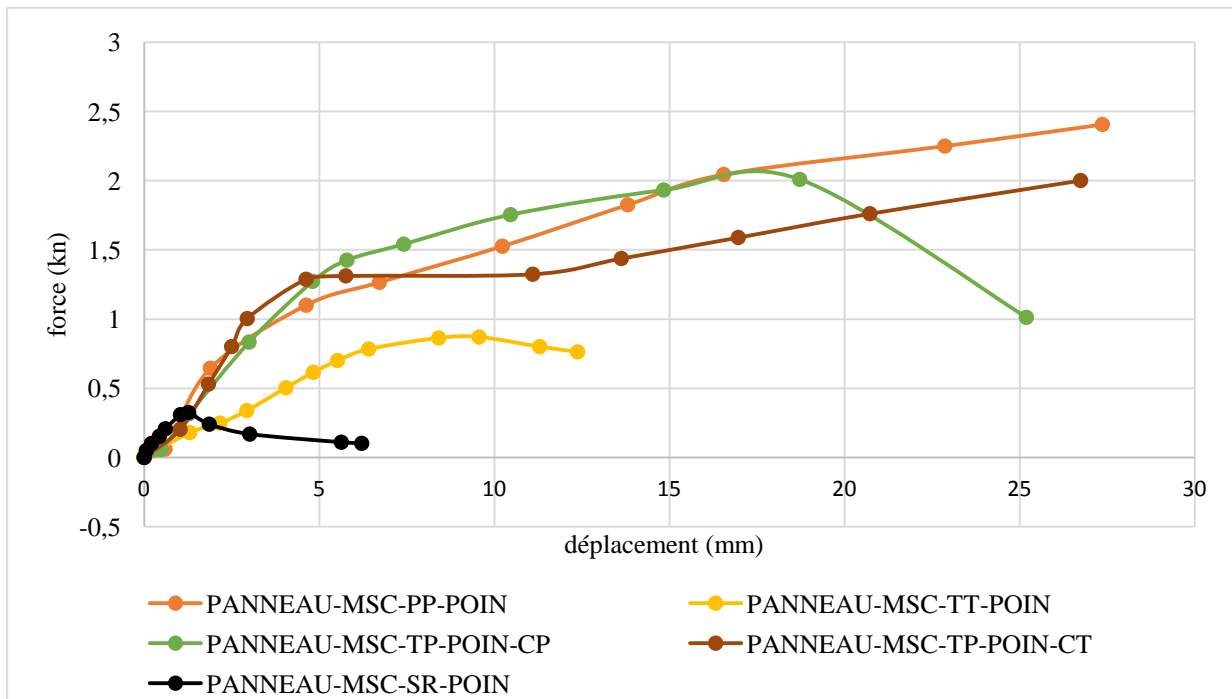


Figure IV.67. Confrontation des courbes pour les différents panneaux

Commentaire :

Les courbes de comparaison force-déplacement, nous ont permis de conclure que chaque panneau présente un comportement spécifique, ainsi qu'une charge limite relative au type de renforcement et la disposition du panneau pour l'essai

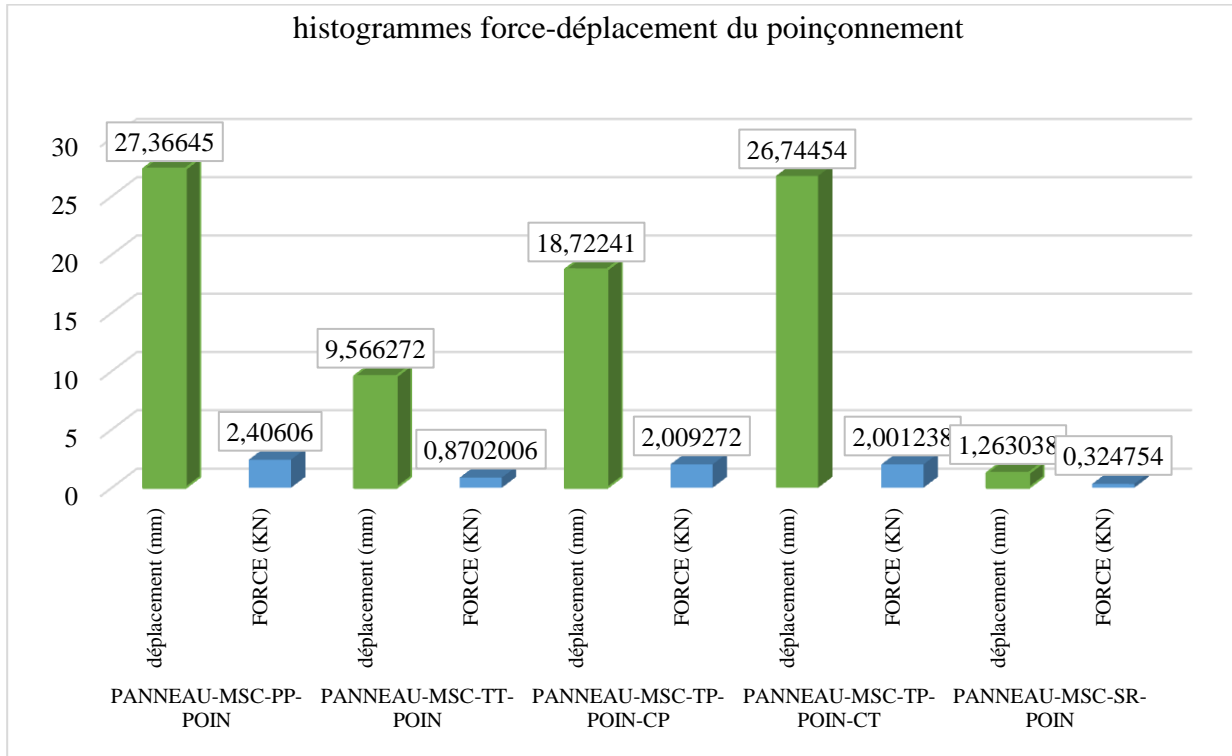


Figure IV.68. histogrammes force-déplacement des différents panneaux composites à l'essai de poinçonnement

Tableau IV.6. Résultats des essais de poinçonnement

Type de panneau	Déplacement (mm)	Force maximale (KN)
Panneau MSC	1.26	0.32
Panneau MSC-TT	9.56	0.87
Panneau MSC-TP-CP	18.72	2.00
Panneau MSC-TP-CT	26.74	2.00
Panneau MSC-PP	27.36	2.40

Analyse des résultats

- D'après les résultats de l'essai de poinçonnement, nous avons distingué le panneau mortier sciure de bois renforcé par le PVC de part et d'autre, car il présente des meilleurs résultats, tel qu'il résiste à une force limite (**2.40KN**).

IV.8. ESSAIS ULTRASONORES

La technique ultrasonore permet de faire un contrôle discret du matériau. Les ultrasons se propagent sous formes d'ondes, qui sont des oscillations régulières au sein d'un matériau, ces ondes qui se caractérisent par un déplacement réversible et local de la matière. Dans la partie recherche bibliographique et expérimentale nous avons mis en évidence que les techniques ultrasonores basées sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, sont un moyen intéressant pour déterminer les propriétés acoustiques des panneaux composites.

Tableau IV.7. Résultats des vitesses de propagation ultrasonore

Type de panneau	La vitesse moyenne dans chaque point (m/s)	La vitesse moyenne dans le panneau (m/s)
Panneau mortier témoin	4075	4176
	4223	
	4229	
P-R-PP	671	688
	734	
	660	
P-R-TP	936	806
	736	
	746	
P-R-TT	938	912
	873	
	926	
P-MSC	1021	1020
	1024	
	1016	

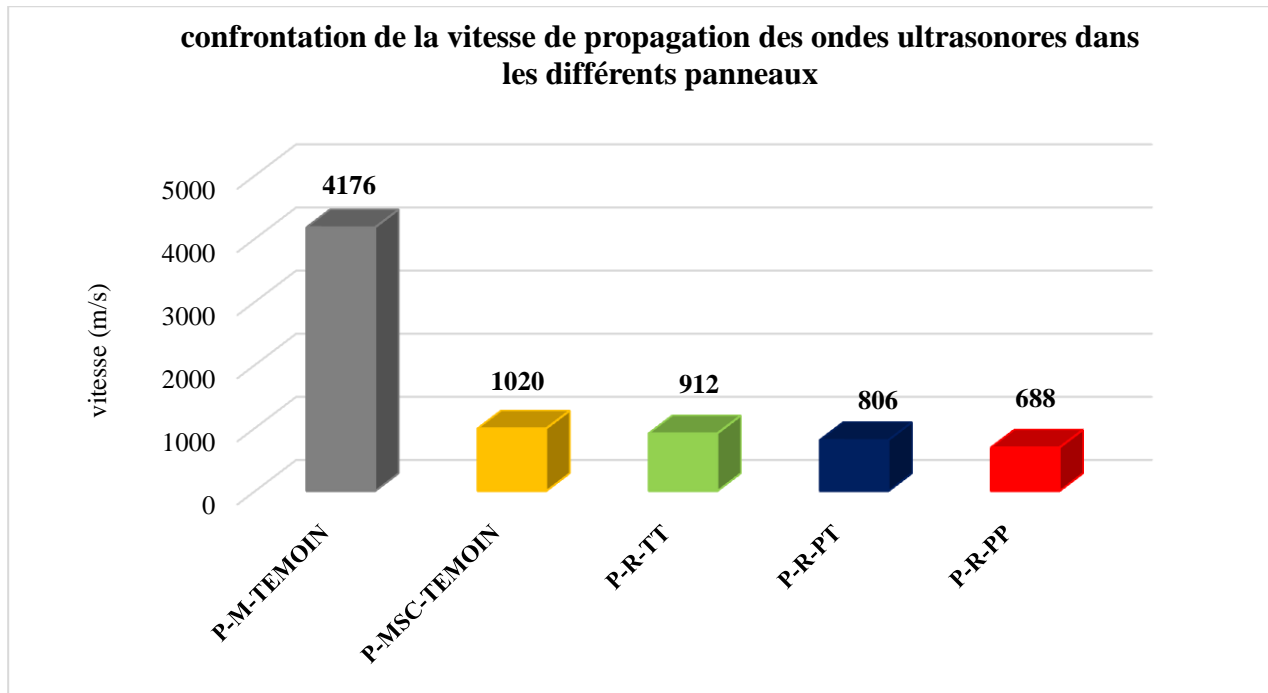


Figure IV.69. Histogramme des valeurs de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les différents panneaux

IV.9. Observations et analyses des résultats de l'essai de propagation ultrasonore

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

- Les vitesses moyennes de la propagation des ondes ultrasonores, sont presque identiques dans chaque point du panneau donné, notamment la vitesse de la propagation des ultrasons dans le panneau mortier-sciure de bois, nous trouvons une différence de **3 à 8(m/s)** entre les trois points considérées.
- Le rapprochement des valeurs de vitesses dans les points considérés dans un panneau donné, confirme la bonne homogénéité du mélange
- Nous avons constaté que la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le (P-R-PP), représente environ 16% par rapport à celle du mortier témoin. Inversement, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le panneau mortier témoin, représente plus de 600% par rapport à celle du (P-R-PP).
- La propriété acoustique d'un panneau est reliée principalement à la vitesse de propagation des ondes ultrasonores
- Comme nous avons mentionné dans le premier chapitre, et d'après les auteurs (Cérézo, Elfordy, [28] [38]), que les études s'accordent dire que la conductivité d'un béton végétal diminue lorsque la quantité des particules végétales augmente, et donc lorsque la densité du béton diminue.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La possibilité de développer des matériaux composites influe directement sur les codes et approches de calcul des structures habituellement utilisées pour les matériaux traditionnels. L'avancée technologique dans les domaines des matériaux innovants ayant des propriétés mécaniques fortes intéressantes pour les différentes applications en génie civil, doit permettre également d'assurer des performances suffisantes vis-à-vis des exigences environnementales, esthétiques, et de durabilité.

L'utilisation des matériaux naturels tels que les fibres végétales dans la construction n'est pas nouvelle en soit. Ces matériaux présentent des performances thermique, acoustique, qui permettent une conception moderne à faible coût. Ces matériaux sont disponibles, à faible coût, renouvelable et recyclable.

L'isolation à base de liège aggloméré, ou à base de dérivés de bois tel que la sciure, possède trois applications principales : isolation thermique, absorption acoustique et amortissement des vibrations. Les applications en construction sont diverses : Les murs intérieurs ou extérieurs, des bâtiments et des plafonds, pour fournir une isolation thermique et acoustique et l'isolation de sous-revêtement. Le matériau est granulé et est utilisé dans une variété d'applications, principalement pour la production de composites de liège/caoutchouc et agglomérats de paroi, et revêtements de sol

Une structure sandwich résulte de l'assemblage par collage de deux semelles ou peaux et d'un matériau d'âme, leurs propriétés mécaniques dépendent directement de la nature des peaux et de l'âme ainsi que de l'épaisseur de chacune des phases. Généralement, les semelles sont à base de matériaux ayant des caractéristiques mécaniques élevées, pour reprendre les sollicitations mécaniques de compression et de traction, cependant , dans notre cas, le choix des semelles en polymère et en tissu est dicté par l'application envisagé des panneaux. L'objectif est de réduire la consommation énergétique, à travers l'utilisation des matériaux naturels abondants et recyclable, pour une meilleure isolation thermique, acoustique et phonétique.

Afin d'optimiser la conception de ces panneaux, il est donc primordial de connaître les propriétés des constituants de ce matériau, à cet effet, l'étude expérimentale réalisée a permis d'optimiser la formulation appropriée qui permet d'obtenir un mélange aux caractéristiques mécaniques intéressantes présentant une masse plus légère.

Les différents résultats expérimentaux obtenus montrent une nette amélioration de la résistance à la rupture, comparativement aux éprouvettes similaires à base de mortier uniquement. Les meilleures éprouvettes élaborées à base de différentes gammes et proportions, ayant des caractéristiques mécanique en compression et en flexion, élevées sont définies. Ces formulations ont été par la suite considérées dans la réalisation des différents panneaux renforcés par des plaques en polymère et en tissu.

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

A titre indicatif, d'après les résultats, nous avons constaté, que l'éprouvette de 60% du mortier et de 40% du liège gamme(1) (ML-60-40-G1) et la variante composée de 60% du mortier et de 40% de la sciure de bois gamme(3) (MSC-60-40-G3) qui présentent les meilleures caractéristiques mécaniques en compression, par rapport aux autres éprouvettes de différentes gammes et proportions. En flexion, c'est l'éprouvette de 60% du mortier et de 40% du liège gamme(1) (ML-60-40-G1) et l'éprouvette de 60% du mortier et de 40% de la sciure de bois (ML-60-40-G1) qui présente les meilleures caractéristiques mécaniques. La résistance à la compression du (ML-60-40-G1) et (MSC-60-40-G3) représente respectivement 14.5% et 9.4% de la résistance du mortier de référence (témoin) et la résistance à la flexion de (ML-60-40-G1) et (MSC-60-40-G1) représente respectivement 31.43% et 43.22% de la résistance du mortier de référence (témoin).

Le comportement des panneaux composites selon les différents cas de renforcement ainsi que leurs modes de rupture est largement présenté et discuté.

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

- ✓ Conduire des essais thermiques, acoustique, etc ;
- ✓ Utiliser d'autres matériaux dans les semelles des panneaux
- ✓ Réaliser une étude expérimentale sur un mur composé d'un assemblage de panneaux
- ✓ Réaliser une étude théorique et numérique.

Références Bibliographiques

References Bibliographiques

- [1] Bilba K., Arsene M. A., « Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites », *Composites : Part A*, vol. 39, 2008, p. 1488-1495.
- [2] Silva de Andrade F., Mobasher B., Soranakom C., Toledo Filho R. D., « Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites », *Cement & Concrete composites*, vol.33, 2011, p. 814-823.
- [3] Hejazi S. M., Sheikhzadeh M., Abtahi S. M., Zadhoush A. « A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers », *Construction and building materials*, vol. 30, 2012, p. 100-116.
- [4] Barreira E., De Freitas V. P., « Experimental study of the hygrothermal behaviour of external thermal insulation composite system (ETICS) », *Building and environment*, vol. 63, 2013, p. 31-39.
- [5] Collet F., Pretot S., « Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall », *Building and environment*, vol. 82, 2014, p. 459-466.
- [6] Barclay M., Holcroft N., Shea A.D. « Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemplime buildings », *Building and environment*, vol. 80, 2014, p. 204-212.
- [7] Ryu S. H., Moon H. J., Kim J. T., « Evaluation of the influence of hygric properties of wallpapers on mould growth rates using hygrothermal simulation », *Energy and Buildings*, vol. xx, 2014, p. xx-xx.
- [8] Guizzardi M., Derome D., Vonbank R., Carmeliet J. « Hygrothermal behaviour of a massive wall with interior insulation during wetting », *Building and environment*, vol. 89, 2015, p. 59-71.
- [9] Evrard A., Flory-Celini C., Claeys-Bruno M., De Herde A. « Influence of liquid absorption coefficient on hygrothermal behaviour of an existing brick wall with lime-Hemp plaster », *Building and environment*, vol. 79, 2014, p. 90-100.
- [10] Lelievre D., Colinart T., Glouannec P., « Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses », *Energy and Buildings*, vol. 84, 2014, p. 617-627.
- [11] Okamoto, T., Recent developments in wood/plastic composites extrusion of wood-based materials, *Mokuzai Gakkaishi*, 49, 401-407 (2003).
- [12] Crini G., Badot P. M., Guibal E., *Presse Univ. Franche-Comté*. (2009) 303.
- [13] Anirudhan T. S., Divya L., Suchithra P. S., *J. Environ. Manage.* 90 (2009) 549-560.

- [14] Abdessamad Akkaoui. Bétons de granulats de bois : étude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles. Matériaux. Université Paris-Est, 2014. Français. <NNT : 2014PEST1169>. <tel-01162671>
- [15] E. Jayr. Nouvelles matières premières d'origine animale ou végétale pour la construction. Technical report, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 2010.
- [16] C. Contevelle, L. and den Hartigh. Les éco-matériaux en France - État des lieux et enjeux dans la rénovation thermique des logements. Technical report, Les Amis de la Terre France (ATF), 2009.
- [17] Techniques de l'ingénieur, editor. Techniques du bâtiment : Connaître les matériaux de la construction, volume base documentaire : 43804210. Editions T.I., 2014.
- [18] V. Nozahic. Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal : application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2012.
- [19] Les industries de carrières et matériaux de construction en 2010. Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction, 2010.
- [20] R. Toledo Filho, K. Ghavami, M. Sanjuan, and G. England. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, 27(5) :537–546, May 2005. ISSN 09589465.
- [21] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres : A review. *Construction and Building Materials*, 25(2) :575–581, February 2011. ISSN 09500618.
- [22] S. Amziane and L. Arnaud. Les bétons de granulats d'origine végétale : Application au béton de chanvre. Lavoisier, 2013.
- [23] S. K. Al-Oraimi and A. C. Seibi. Mechanical characterisation and impact behavior of concrete reinforced with natural fibres. *Composite Structures*, 32(1-4) :165–171, January 1995. ISSN 02638223.
- [24] P. Monreal. Étude de faisabilité de bétons lignocellulosiques à base de pulpes de betteraves : traitements physico chimiques des granulats et évaluation de l'influence sur les performances mécaniques, hydriques et thermiques. PhD thesis, Université de Picardie Jules Verne, 2007.
- [25] H. Acikel. The use of miscanthus (*Giganteus*) as a plant fiber in concrete production. *Scientific Research and Essays*, 6(13) :2660–2667, 2011.

- [26] M. Merzoud and M. F. Habita. Elaboration de composite cimentaire à base de diss "Ampelodesma Mauritanica". *Afrique SCIENCE*, 04(2) :231 – 245, 2008.
- [27] E. Mougel. Mise au point d'un composite ciment-bois dont les variations dimensionnelles vis-à-vis des variations d'humidité sont contrôlées. PhDthesis, Université de Nancy I, 1992.
- [28] V. Cérézo. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. PhDthesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [29] Association construire en chanvre. Construire en chanvre : règles professionnelles d'exécution. Paris : SEBTP, 2008.
- [30] C. Magniont. Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base d'agroressources. PhDthesis, Université de Toulouse, 2010.
- [31] V. Vandebossche Marechal. Fractionnement des tiges et capitules de tournesol. Hydrodistillation d'une huile essentielle odorante, extraction et modification chimique de pectines et mise en forme d'agromatériaux biodégradables. PhD thesis, 1998.
- [32] F. C. Jorge, C. Pereira, and J. M. F. Ferreira. Wood-cement composites : a review. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62(5) :370–377, July 2004. ISSN 0018-3768.
- [33] T. T. Nguyen. Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. PhDthesis, Université de Bretagne-Sud, 2010.
- [34] M. Bederina, B. Laidoudi, A. Goullieux, M. Khenfer, A. Bali, and M. Quéneudec. Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials*, 23(3) :1311–1315, March 2009. ISSN 09500618.
- [35] A. D. Tran Le. Étude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment. PhDthesis, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2010.
- [36] C. Magniont. Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base. PhDthesis, Université de Toulouse, 2010. 194
- [37] Y. Hustache and L. Arnaud. Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre. *Construire en Chanvre*, 2008.
- [38] S. Elfordy, F. Lucas, and F. Tancret. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hemcrete") manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, 22 :2116–2123, 2008.

- [39]P. Boustingorry. *Élaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté - Amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqués en gypse*. PhDthesis, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne and Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [40]A. Ledhem. *Contribution à l'étude d'un béton de bois : Mise en point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite Argile-Ciment-Bois*. PhDthesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1997.
- [41] A. M. Cheumani Yona. *Étude de la microstructure des composites bois/ciment par relaxométrie RMN du proton*. PhDthesis, Université Bordeaux 1 and Université de Yaoundé I, 2009.
- [42]N. El Hajj, R. M. Dheilily, Z. Aboura, M. L. Benmalek, and M. Quéneudec. *composites 100 % végétaux : Effet de la granulométrie des étoupes de lin et de l'ajoutdes bios liants*. In 16èmes Journées Nationales sur les Composites, Toulouse 10, 11 et 12 Juin, 2009.
- [43] A.Evrard. *Transient hygrothermalbehaviour of lime-hemp materials*. PhDthesis, Université Catholique de Louvain, 2008.
- [44]P. Pimienta, J. Chandellier, M. Rubaud, F. Dutruel, and H. Nicole. *Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois*. Cahiers du CSTB, 2703, Janvier-Février 1994.
- [45] P. Tronet, V. Picandet, T. Lecompte, and Ch. Baley. *Béton de chanvre : Effet du dosage en granulat sur les propriétés thermique et mécanique*. Comptes-rendus des 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), 2011
- [46]A. Bouguerra, H. Sallée, F. De Barquin, R. M. Dheilily, and M. Quéneudec. *Isothermal moisture properties of wood-cementitious composites*. *Cement and Concrete Composites*, 29 :339–347, 1999.
- [47]F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot, and Ch. Lanos. *Comparison of the hygric behavior of three hemp concretes*. *Energy and Buildings*, 62 :294–303, July 2013. ISSN 03787788.
- [48] P. Pimienta, J. Chandellier, M. Rubaud, F. Dutruel, and H. Nicole. *Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois*. Cahiers du CSTB,2703, Janvier-Février 1994.
- [49]B. J. Mohr, H. Nanko, and K.E. Kurtis. *Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling*. *Cement and Concrete Composites*, 27(4) :435–448, April 2005. ISSN 09589465.
- [50]J. Lamoulié. *Identification des freins normatifs et règlementaires à la prescription des matériaux biosourcés dans la construction*. Technical report, Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA), 2012.

- [51] S. TAMBA, L. M VOUMBO, A. WEREME, S. GAYE, G. SISSOKO «Journal des Sciences » durabilite des betons legers a base de copeaux de bois
- [52] Benmalek .Ml, Bouguerra .A, Ledhem .A, Dheilly .Rm Et Queneudec .M ; Caractéristiques de bétons légers à base de résidus d'exploitation de carrières et de bois » Article : canadian journal of civil engineering, pp374 -377 ; 1999.
- [53] Al Rim .K, Ledhem .A, Douzane .O, Dheilly .Rm Et Queneudec .M ; Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites ; Cement and Concrete Composites ; volume 21, Issue 4, Pages 269–276 , August 1999.
- [54] Bederina .M, Laidoudi .B, Goullieux .A, Khenfer .Mm, Bali .A Et Queneudec .M ; Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes ; Construction and Building Materials ; Volume 23, Issue 3, Pages 1311–1315 , March 2009.
- [55] Houssais .L, Benmalek .Ml, Ledhem .A Et Queneudec .M ; Matériaux à faible impact environnemental « Le comportement à hautes températures du béton de bois à matrice argileuse » revue materials&composites ; 2000.
- [56] Bouaziz .S, Ait Tahar. K ; Béton léger à base de granulats composites artificiels ; Annales du BTP ; N°4 :pages 16 22 ; Août 2010.
- [57] Nguyen .L-H, Beaucour .A-L, Ortola .S, Noumowé .A; Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale ; Université de Cergy- Pontoise ;XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil ; Mai 2011.
- [58] [DJOU 07] DJOUDI A., KHENFER M/M., BALI A., DEBICHI G., "L'utilisation des biomatériaux dans la construction, une alternative pour la protection de l'environnement". Séminaire national de génie civil, Annaba 20 et 21 Novembre, 2007.
- [59] A.M. Papadopoulos, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments," Energy and Buildings, vol. 37, pp. 77–86, 2005.
- [60] VIGNON, M., GRARCIA-JALDON, C. & DUPEYRE, D., 1995. Steam explosion of woody hemp "chênevotte". international journal of biology macromolecular, Volume 17, pp. 395-404.
- [61] CHAMOIN, 2013. Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de béton de chanvre par maîtrise de la formulation, Thèse de doctorat de l' INSA de Rennes.
- [62] Leute, M., Wilhelm, M., Wruss, W. (2002). SiC-Si ceramic composite reinforced with carbonized fibres made of biogenic substances, Fract. Adv. Ceram., 223, 261-264.

- [63]Gil L., «Cork Composites : A Review ». *Journal of Materials*, 2, 776-789, (2009) doi : 10.3390/ma2030776, ISSN 1996-1944.
- [64]Gil L., « Cortiça: produção, tecnologiaeaplicação », Lisbon, INETI, (1998).
- [65]Costa A., Pereira H., Oliveira A. « Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production ». *For. Ecol. Manage.* 175: 239–246, (2003).
- [66]Barberis A., Dettori S., Filigheddu M.R., « Management problems in Mediterranean cork oak forests », post-fire recovery. *J Arid Environ* 54:565–569, (2003).
- [67]Pereira H., «Boletim do Instituto dos ProdutosFlorestais – Cortiça», 545, 99–112, (1984).
- [68]Gil L., Moiteiro C., « Cork », In *Ullmann’s Encyclopedia of Chemical Technology*, 6thed.; Wiley- VCH: Verlag, Germany, (2003).
- [69]Benamirouche S., Chouial M., « Cartographie et description des peuplements portegraines de chêne liège (*Quercus suber* L.) dans les wilayas de Jijel, Mila et Bejaia(Nord-est algérien) », Station régionale de recherche forestière de Jijel Oued kissir El Aouana- Jijel – Algérie Tél/fax (213) 34 51 32 76.
- [70]Gibson L.J., Easterling K. E., Ashby M. F., «The structure and mechanics of cork». *Proceeding of the Royal Society of London A*, 377: 99-117, (1981).
- [71]Gibson L. J., Ashby M. F. «Cellular solids: structure and properties», 2ndedn, 453–467, Cambridge, Cambridge University Press, (1997).
- [72]Lequin S., « Etude de l'adsorption et de la diffusion, en phase gazeuse, de petites molécules actives du vin dans le liège ». Thèse de Doctorat d'Université de Bourgogne, (2010).
- [73]Pereira H., Ferreira E. «Scanning electronmicroscopy observations of insulationcorkagglomerates», *Materials Science Engineering*, A111, 217–225, (1989).
- [74]Pereira H., «The thermochemical degradation of cork», *Wood Science and Technology* 26: 259-269, (1992). <http://dx.doi.org/10.1007/BF00200161>.
- [75]Rosa M.E., Pereira H, Fortes M.A. «Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork». *Wood and Fiber Science*; 22(2):149–64; (1990).
- [76]Tadeu A., Santos P., «Assessing the effect of a barrier between two rooms subjected to low frequency sound using the boundary element method», *Applied Acoustics*, 64, 287– 310, (2003).
- [77]Gil L., « New cork based materials for building applications ». In *World Renewable Energy Congress V*, Florence, USA, September 20-25, pp. 1297-1299, (1998).

- [78]Molinas M., Verdaguer D. «Lignotuber ontogeny in the cork-oak». II. Germination and young seedling. *American Journal of Botany*, 80: 182-191, (1993).
- [79]Christian B., ‘Shoe sole’, EP1314370, European Patent Office, Munich, (2003).
- [80]Takayuki M., Nobuhiro T., Akio K., Minoru S., «Water pressure resisting sound insulator», JP9198050, Japan Patent Office, Tokyo, (1997).
- [81]Fortes M.A., Nogueira M.T., «The Poisson effect in cork», *Materials Science and Engineering A* 122: 227-232, (1989). <http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093>.
- [82]Duchemin P.E., Touche R.A.L.L., «Cork-based improved thermal insulating material and process for obtaining it», FR2626519, Institut National de laProprieteIndustrielle, Paris, (1989).
- [83]Gil L., Silva P., «Cork Composites». In *ECCM9-Composites: From Fundamentals to Exploitation*, Brighton, UK, June 4-7, (2000).
- [84]Gil L., «Cork Composites : A Review ». *Journal of Materials*, 2, 776-789, (2009) doi : 10.3390/ma2030776, ISSN 1996-1944.
- [85]Lyons L.F., «Floorin system underlayment». US Patent No. 2004 062937, published April 01, (2004).
- [86]Lança M.C., Neagu E.R., Silva P., Gil L., Marat-Mendes J., «Study of electrical properties of natural cork and two derivative products», *Materials Science Forum*, 514-516, 940-944, (2006).
- [87]Osvaldo C., José M., Silva T.D., Arlindo S, Luís G. «Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures », *Materials and Design* 31, 425–432, (2010).
- [88]Nóvoa P.J.R.O., Ribeiroa M.C.S., Ferreira A.J.M., Marques A.T., « Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granules». *Composites Science and Technolgy.*, 64, 2197-2205, (2004).
- [89]Simão M.S., Pereira Joel R.M., Oliveira, E.F., Freitas P.M., « Mechanical performance of asphalt mixtures produced with cork or rubber granulates as aggregate partial substitutes». *Construction and Building Materials* 41 : 209–215, (2013).
- [90]Harrington J.J. *MicroFibril Angle in Wood*. Ed B.G Butterfield, IAWA/IUFRO, New Zealand, 1998.
- [91]Adanur S. et Liao T. 3D modeling of textile composite preforms *Composites Part B: Engineering*, Volume 29, pp.787-793 (1998)

[92] Mir A., « Etude mécanique, thermomécanique et hygrothermique d'un matériau composite sandwich à âme en liège et peaux en jute/époxy ». Thèse de doctorat, Université M'hamedBougara – Boumerdes, (2010).

[93] Amorim., « Comportement à la compression et à la traction de liège, Etude numérique, Nature et Technologie - La solution idéale», Université d'Aveiro en 2010 Luís Filipe Ribeiro All Good, (2009).

[94] Pereira H., Ferreira E. «Scanning electron microscopy observations of insulation cork agglomerates», Materials Science Engineering, A111, 217–225, (1989).

[95] Pinto R., Melo B., «Cork: properties, capabilities and applications» Boletim da Junta Nacional de Cortiça, 602: 322-328, (1988).

[96]HAL « archives ouvertes » « Généralité sur les matériaux composites. Ecole d'ingénieur. 2008. « cel-00470296v1 »

[97] GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES « centre d'animation régional en matériaux avances » « C.AR.M.A » actualisation octobre 2006. Page 03 au 13.

[98]Bernard DELMOUD « technique de l'ingénieur » « résines naturelles » référence : K340 « date de publication 10 mai 2002 »

[99] Structures Sandwiches A Base De Plastiques - Essai De Compression Longitudinale Sans Ou Avec Flambage

[100] Plastics based sandwich structures. Bend test. Afnor 87461; October 1987.