

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université de Mohamed Boudiaf - M'sila-
Faculté des Sciences
Département de Chimie



Numéro de série :

Numéro d'inscription :

Thèse
Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Filière : Chimie

Spécialité: Matériaux Composites et Environnement

THEME

**Contribution à la Compréhension et à la Modélisation du Comportement
Mécanique Thermique et Acoustique de Matériaux Composites à Base de Déchets**

Présentée par :

MOUISSA Fadhila

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Établissement	Qualité
LATELLI Nadja	Professeur	Univ. Mohamed Boudiaf - M'sila-	Présidente
BENYAHIA Azzedine	Professeur	Univ. Mohamed Boudiaf - M'sila-	Directeur de thèse
REFFAS Abdelbaki	Professeur	Univ. Mohamed Boudiaf - M'sila-	Examineur
HATTAB Zhour	Professeur	Univ. Badji Mokhtar - Annaba-	Examinatrice
BERREDJEM Yamina	Professeur	Univ. Med Cherif Messaidia- Souk Ahras-	Examinatrice
DEGHFEL Nadir	MCB	Univ. Mohamed Boudiaf - M'sila-	Invité

Année Universitaire : 2021-2022

Dédicaces

À toutes les personnes estimées qui m'ont encouragé et soutenu dans mes études.

*À mes parents pour leur patience, confiance et l'amour que sont essentiels pour ma vie
comme ils l'ont à mon éducation.*

À toutes mes sœurs : Fattoum, Hanane, Fatiha, et Maroua

À mes frères : Ismail et Abdssamed qui ont été pour moi d'un grand soutien moral.

À toute ma famille.

Remerciements

Toutes les appréciations sont à Allah le miséricordieux et le compatissant de m'avoir assisté et armé de la patience et puissance afin de réaliser ce modeste travail.

Ma sincère gratitude et ma reconnaissance vont chez mon superviseur, **Professeur BENYAHIA Azzedine**, pour son aide, ses remarques, encouragements et sa disponibilité tout le temps. Honnêtement, sans leur soutien et confiance, la finalisation de ce projet aurait été difficile, pour ne pas dire impossible.

Je suis très reconnaissant **aux membres du jury**, à savoir Professeur **LATELLI Nadja**, Université de M'sila, Professeur **REFFAS Abdelbaki**, Université de M'sila, Professeur **HATTAB Zhour**, Université de Annaba, Professeur **BERREDJEM Yamina**, Université de Souk Ahras, et Docteur **DEGHFEL Nadir**, Université de M'sila qui ont accepté d'examiner et de faire parité de ce jury de thèse, encore que ses nombreuses obligations professionnelles.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'**université de Mohamed Boudiaf, M'sila**. Mes sincères remerciements s'adressent tout particulièrement aux : le doyen Prof. **OUALI Ameur**, le chef de département Prof. **DAKHOUCHE Achour**, et tous les responsables de ma formation pour avoir assuré les outils nécessaires à la réussite de mes études. De même, ma profonde gratitude et appréciation vont **au Prof. REFFAS Abdelbaki** qui n'a jamais manqué de m'aider et de m'encourager au cours de cette recherche.

Egalement, je remercie les ingénieurs de laboratoire de Ville, société, environnement et développement durable pour m'avoir fourni les outils fondamentaux pour faire avancer mes recherches.

*Je tiens à témoigner toute ma gratitude aux professeurs de l'université de Laghouat, plus précisément : le Professeur **TAOUTI Abdellah**, le Professeur **YOUCEFI Mohamed**, et le Professeur **FERHAT Mohamed** pour leur confiance et leur assistance inestimable et constant et pour m'avoir autorisé à utiliser sans limite les équipements du laboratoire de Génie de Procédé.*

*Un grand merci également aux les ingénieurs de laboratoire de Génie Civile à université de Laghouat pour avoir fourni les outils vitaux et m'a aidé à faire avancer la partie pratique. Un grand merci à mon cousin **BOUHALI Mohamed** pour leur soutien et contribution à la réalisation de cette thèse.*

Enfin, je remercie mes parents qui n'ont pas manqué de m'assister. Je suis également redevable à ma famille pour leur aide qui a beaucoup contribué à l'avancement de ce travail.

Résumé

Des études ont montré que la production de ciment contribue à l'émission de CO₂, qui est immensément responsable des problèmes environnementaux actuels. Nous tentons d'étudier la possibilité de réduire la consommation de ciment en utilisant comme alternative des matériaux composites issus de déchets naturels. Les matériaux composites peuvent être utilisés pour minimiser la consommation de ciment d'une part et pour réutiliser et recycler les déchets naturels pour éviter le gaspillage d'énergie et résoudre par la suite les problèmes liés à l'environnement. L'objectif de ce travail est d'étudier l'impact du traitement chimique de la sciure de bois sur les propriétés mécaniques et thermiques d'une matrice en argile renforcée de sciure de bois. Pour ce faire, un ensemble d'approches a été adopté. Nous nous sommes donc appuyés sur deux méthodes : l'expérimentale et la simulation à l'aide du logiciel MATLAB. Ce dernier a été utilisé pour identifier numériquement les caractéristiques de l'échantillon étudié. Pour améliorer le comportement du composite, nous avons traité chimiquement la sciure de bois en utilisant deux solutions, à savoir NaOH (5 % m/v) et KMnO₄ (0,01 % m/v). Les résultats indiquent que le traitement alcalin améliore la résistance de flexion et de compression en enregistrant les meilleurs résultats. Concernant le test thermique, l'ajout de la sciure de bois à la matrice d'argile conduit à une diminution de la conductivité thermique. De plus, la simulation acoustique révèle que le matériau poreux de l'échantillon étudié influence sur les caractéristiques acoustiques, faisant de notre échantillon un matériau insonorisant.

Mots clés: Sciure de bois, Argile, Matériaux composites, Propriétés thermiques/mécaniques, Traitement chimique, MATLAB.

Abstract

Studies have portrayed that cement production contributes to CO₂ emission, which is immensely responsible for the current environmental problems. We attempt to study the possibility of reducing cement consumption by using composite materials made from natural waste as an alternative. The composite materials can be used to minimize cement consumption on the one hand and to reuse and recycle natural waste to prevent energy wastage and subsequently solve the problems related to the environment. The objective of this work is to study the impact of the chemical treatment of sawdust on the mechanical and thermal properties of a matrix made of clay reinforced with sawdust. To this end, a set of approaches have been adopted. We, therefore, relied on two methods: the experimental and the simulation using the MATLAB software. The latter was used to identify the characteristics of the sample studied numerically. To better the comportment of the composite, we treated sawdust chemically using two solutions, namely NaOH (5 % w/v) and KMnO₄ (0,01 % w/v). The results indicate that the alkaline treatment improves the flexural and compressive strength registering the best results. Concerning the thermal test, the addition of sawdust to the clay-matrix leads to a decrease in thermal conductivity. Furthermore, the acoustic simulation reveals that the porous material of the sample studied influences its acoustic features, making our material a sound-absorbing one.

Keywords: Sawdust, Clay, Composite materials, Thermal/mechanical properties, Chemical treatment, MATLAB.

الملخص

أظهرت الدراسات أن إنتاج الإسمنت يساهم في انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون المسؤول بشكل كبير عن المشاكل البيئية. نحاول دراسة إمكانية تقليل استهلاك الإسمنت باستخدام مواد مركبة من النفايات الطبيعية كبديل. يمكن استخدام المواد المركبة لتقليل استهلاك الإسمنت من ناحية وإعادة استخدام وإعادة تدوير النفايات الطبيعية لتجنب إهدار الطاقة وبالتالي حل المشكلات البيئية. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المعالجة الكيميائية لنشارة الخشب على الخواص الميكانيكية والحرارية لمصفوفة طينية مقواة بنشارة الخشب. للقيام بذلك ، تم اعتماد مجموعة من الأساليب. لذلك اعتمدنا على طريقتين: التجريبية والمحاكاة باستخدام برنامج MATLAB. تم استخدام هذا الأخير لتحديد خصائص العينة المدروسة عددًا. لتحسين سلوك المركب، عالجتنا نشارة الخشب كيميائيًا باستخدام محولين، وهما NaOH (5% بالوزن) وKMnO₄ (0,01% بالوزن). تشير النتائج إلى أن المعالجة القلوية تحسن من قوة الانحناء والضغط مسجلة أفضل النتائج. فيما يتعلق بالاختبار الحراري، تؤدي إضافة نشارة الخشب إلى مصفوفة الطين إلى انخفاض في التوصيل الحراري. بالإضافة إلى ذلك ، تكشف المحاكاة الصوتية أن المادة المسامية للعينة المدروسة تؤثر على خصائصها الصوتية ، مما يجعل مادتنا مادة ممتصة للصوت.

الكلمات المفتاحية: نشارة الخشب، الطين، المواد المركبة، الخواص الحرارية / الميكانيكية، المعالجة الكيميائية ، الماتلاب .

Liste des figures

Figure.1 :	Classification des fibres naturelles.....	4
Figure 2 :	Structure et composition d'une paroi végétale.....	5
Figure 3 :	Composition des fibres végétales.....	6
Figure 4 :	Structure de bois.....	6
Figure.5 :	Structure de cellulose.....	7
Figure.6 :	Structure chimique des hémicelluloses.....	7
Figure.7:	Structure de lignine.....	8
Figure.8 :	Structure de pectine.....	9
Figure.9 :	Fibre de jute.....	12
Figure.10 :	Fibre de ramie.....	13
Figure.11 :	Fibre de chanvre.....	13
Figure.12 :	Fibre de sisal.....	14
Figure.13 :	Fibre d'alfa.....	14
Figure.14 :	Fibre de diss.....	15
Figure.15 :	Fibre de lin.....	15
Figure.16 :	Fibre de palmier dattier.....	16
Figure.17 :	Composition d'un matériau composite.....	17
Figure.18 :	Type de mats (A) mats à fibres courtes, (B) mats à fibres continues....	21
Figure.19 :	Chaine et trame d'un tissu.....	21
Figure.20 :	Tissage cylindrique et conique.....	22
Figure.21:	Types de renforts.....	22
Figure.22 :	Principe de l'émission acoustique.....	28
Figure.23 :	Dispositif d'essai de limite de liquidité (appareil de Casagrande).....	32
Figure.24 :	Détermination de la limite de liquidité.....	33
Figure.25 :	Détermination de la limite de plasticité.....	34
Figure.26 :	Sciure de bois traitée et non traitée.....	35
Figure.27 :	Étapes de préparation des composite.....	36
Figure.28 :	Les méthodes de préparation des matériaux composites.....	37
Figure.29 :	Essai de flexion à trois points.....	40
Figure.30 :	L'essai de compression.....	41
Figure.31 :	L'analyse des particules d'argile.....	46
Figure.32 :	Courbe de la limite de liquidité.....	46
Figure.33 :	Diffraction des rayons X de l'argile.....	47
Figure.34 :	Spectre infrarouge de l'argile.....	48
Figure.35 :	Diffractogrammes RX de SBB (sciure de bois brute), SBTA (sciure de bois traitée alcalin), SBTK (sciure de bois traitée avec du KMnO ₄).....	49
Figure.36 :	Spectres IRTF de la sciure de bois non traité et traité.....	50
Figure.37 :	Spectres IRTF des composites : SBB/Ar, SBTA/Ar, et SBTK/Ar.....	51

Figure.38 :	Micrographies MEB : (a) argile (Ar), (b) composite SBB/Ar, (c) composite SBTA/Ar, (d) composite SBTk/Ar.....	52
Figure.39 :	Effet de l'addition de la chaux sur la résistance de flexion et compression du matériau étudié.....	53
Figure.40 :	Effet d'addition de la sciure de bois traitée et non traitée sur la résistance à la flexion du composite étudié.....	55
Figure.41 :	Effet d'addition de la sciure de bois traitée et non traitée sur la résistance à la compression du composite étudié.....	56
Figure.42 :	Le développement intégré de Matlab environnement (IDE) avec la disposition par défaut.....	59
Figure.43 :	Prismatique vue arrière selon l'axe Y.....	60
Figure.44 :	Prismatique vue arrière selon l'axe X.....	61
Figure.45 :	Maillage avec éléments tétraédriques quadratiques.....	62
Figure.46 :	Déplacement selon l'axe X.....	63
Figure.47 :	Effet de changement de température sur la face d'une éprouvette.....	66
Figure.48 :	Tension en fonction de temps (A), module en fonction de fréquence (B).....	68

Liste des tableaux

Tableau.1 :	Composition chimique de quelques fibres.....	9
Tableau.2 :	Propriétés physiques des fibres naturelles.....	11
Tableau. 3 :	Composition chimique de la chaux.....	29
Tableau.4 :	Analyse chimique de l'eau.....	29
Tableau.5 :	Paramètres physico-chimiques de l'échantillon argileux.....	44
Tableau.6:	Compositions chimiques de l'argile.....	45
Tableau.7 :	Valeur de limite d'Atterberg.....	47
Tableau.8 :	Indice de cristallinité (CrI%) de la sciure de bois non traitée et traitee.....	49
Tableau .9 :	Résultats des tests mécaniques des mélanges préparés.....	54
Tableau .10 :	Propriétés thermiques des composites.....	57

Liste des abréviations

ADE	L'Algérienne des eaux
Ar	Argile
C	Colloïdalité
CMC	Composites à matrice céramique
CMM	Composites à matrice métallique
CMO	Composites à matrice organique
CrI (%)	Indice de cristallinité
DRX	diffraction de rayons X
H(%)	Taux d'humidité
HM	Haute module
HR	Haute résistance
HT	Haute ténacité
I _{am}	Intensité attribuée à la cellulose amorphe
I ₀₀₂	Intensité du pic le plus élevé de la cellulose I
I _G	Indice de gonflement
I _p	Indice de plasticité
IRTF	Infrarouge à Transformée de Fourier
MEB	Microscopie électronique à Balayage
PAF	Perte au feu
SBB	Sciure de bois brute
SBTA	Sciure de bois traitée alcaline
SBTK	Sciure de bois traitée KMnO ₄
SBB/Ar	Argile renforcée de sciure de bois brute
SBTA/Ar	Argile renforcée de sciure de bois traitée alcaline (NaOH)
SBTK/Ar	Argile renforcée de sciure de bois traitée KMnO ₄
THM	Très haute module
UD	Unidirectionnel
W _l	Limite de liquidité
W _p	Limité de plasticité

Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
المُلخَص.....	VI
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des abréviations.....	X
Tables des matières.....	XI
Introduction générale.....	01
Partie 1 : Partie théorique	
Chapitre I : Généralité sur les fibres végétales	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Classification des fibres naturelles.....	4
I.3. Définition de la fibre végétale.....	5
I.4. Structure des fibres végétales.....	5
I.5. Composition chimique des fibres végétales.....	7
I.5.1. La cellulose.....	7
I.5.2. Les hémicelluloses.....	7
I.5.3. La lignine.....	8
I.5.4. Les pectines.....	8
I.5.5. Cires.....	9
I.6. Classification des fibres végétales.....	10
I.7. Propriétés des fibres végétales.....	10
I.8. Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	11
I.9. Présentation des fibres végétales.....	11
I.9.1. Coton.....	11
I.9.2. Jute.....	12
I.9.3. Ramie.....	12
I.9.4. Chanvre.....	13
I.9.5. Sisal.....	13

I.9.6. Alfa.....	14
I.9.7.Diss.....	14
I.9.8. Lin.....	15
I.9.9. Palmier dattier.....	15
I.9.10. Bois.....	16
I.10. Utilisation des fibres végétales dans la construction.....	16

Chapitre II : Matériaux composites

II.1. Généralité sur les matériaux composites.....	17
II.2. Définition des matériaux composite.....	17
II.3. La matrice.....	18
II.3.1. Classification de la matrice.....	18
II.3.1.1. Les matrices synthétiques organiques.....	18
II.3.1.2. Les matrices métalliques.....	19
II.3.1.3. Les matrices minérales.....	19
II.4. Le renfort	19
II.4.1. Types des renforts.....	19
II.4.1.1. Fibres de verre.....	19
II.4.1.2. Fibres de carbone.....	19
II.4.1.3. Les fibres aramides.....	20
II.4.1.4. Les fibres céramiques.....	20
II.4.1.5. Fibre synthétiques thermostables.....	20
II.4.1.6. Les autres fibres.....	20
II.4.2. Formes de renforts.....	20
II.4.2.1. Forme linéique.....	21
II.4.2.2. Formes surfaciques.....	21
II.4.2.3. Forme multidirectionnelle.....	22
II.5. Charges et additifs.....	23
II.5.1. Charges.....	23
II.5.2. Additifs.....	23
II.6. Classification des matériaux composites.....	23
II.6.1. Classification selon la forme des constituants.....	23
II.6.2. Classification selon la nature de la matrice.....	24
II.7. Architecture du composite.....	24

II.8. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites.....	24
II.9. Applications des matériaux composites.....	25
II.10. Facteurs influençant les composites.....	25
II.10.1. Taux de renfort.....	25
II.10.2. La morphologie.....	25
II.10.3. L'orientation et la dispersion du renfort.....	26
II.11. Les Matériaux composites à base des fibres végétales.....	26
II.11.1. Matrice polymère renforcée par des fibres naturelles.....	26
II.11.2. Matrice minérale renforcée par des fibres naturelles.....	26
II.12. Emission acoustique.....	28

Partie 2: Partie expérimentales

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Matériaux utilisés.....	29
III.1.1. Chaux.....	29
III.1.2. L'analyse chimique de l'eau.....	29
III.1.3. Les procédures de préparation de l'argile.....	30
III.1.3.1. Caractérisation de l'argile utilisée.....	30
1) Détermination du pH.....	30
2) Taux d'humidité.....	30
3) Indice de gonflement.....	30
4) Colloïdalité.....	31
5) Perte au feu.....	31
6) Limite d'Atterberg.....	31
a) Détermination de la limite de liquidité.....	31
b) Détermination de la limite de plasticité.....	33
III.1.4. Sciure de bois.....	34
III.1.4.1. Traitement par NaOH.....	34
III.1.4.2. Traitement par KMnO ₄	34
III.2. Préparation des composites.....	35
III.3. Méthodes des caractérisations.....	38
III.3.1. Granulométrie par diffraction laser.....	38
III.3.2. Fluorescence X.....	38
III.3.3. La spectroscopie infrarouge.....	38

III.3.4. La diffraction de rayon X.....	39
III.3.5. Microscopie électronique à balayage.....	39
III.3.6. Propriétés mécaniques.....	39
III.3.6.1. Caractérisation mécanique en flexion.....	39
III.3.6.2. Teste de compression.....	40
III.3.7. Propriétés thermiques.....	41
III.3.7.1. Les méthodes de mesure.....	42
a- Méthode de hot disk.....	43

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction.....	44
IV.2. Paramètres physico-chimiques	44
IV.2.1. Composition chimique	44
IV.3. Paramètres géotechniques de l'argile.....	45
IV.3.1. Analyse granulométrique	45
IV.3.2. Limites d'Atterberg.....	46
IV.3.3. Diffraction des rayons X de l'argile.....	47
IV.3.4. Analyse spectroscopique infrarouge de l'argile.....	47
IV.4. Les caractérisation des sciures de bois.....	48
IV.4.1. Diffraction de RX.....	48
IV.4.2. Test IRTF.....	49
IV.5. Analyse par spectroscopie infrarouge des composites.....	50
IV.6. Analyse MEB.....	51
IV.7. Les Tests mécaniques.....	53
IV.7.1. Effet de l'addition de la chaux sur les propriétés mécaniques du matériau étudié.....	53
IV.7.2. Effet de la sciure de bois non-traitée sur les propriétés mécaniques.....	54
IV.7.3. Effet de la sciure de bois traitée sur les propriétés mécaniques.....	55
IV.8. Propriétés thermiques.....	56
IV.9. Conclusion.....	57

Chapitre V : Simulations

V.1. Introduction.....	59
V.2. Présentation de logiciel de calcul Matlab.....	59
V.3. Dessiner la structure.....	60

V.4. Effet de température.....	63
V.5. Etude acoustique.....	66
Conclusion générale	69
Références bibliographiques	71

Introduction générale

Dans le domaine de la construction, il existe toujours une demande croissante pour trouver un matériau approprié qui puisse remplacer efficacement le ciment et les agrégats fins, car le ciment est une production complexe qui consomme beaucoup d'énergie pour transformer le calcaire et l'argile en un matériau de concret. Cette production est faite dans une chaleur extrême et considérée comme l'une des émissions intensives, libérant du dioxyde de carbone en raison de la calcination du calcaire. En effet, 75 % du carbone émissions sont rejetés par la production de ciment. Ces gaz ont une contribution directe au problème climatique actuel du réchauffement climatique. Au niveau mondial, la production de milliards de tonnes de ciment est estimée comme l'un des facteurs responsables des émissions de CO₂ dans l'atmosphère [1].

Pour les raisons évoquées précédemment, nous essayerons d'étudier la possibilité de réduire la consommation de ciment en utilisant comme alternative des matériaux composites à base de déchets naturels. Il y a eu plusieurs tentatives de recyclage des déchets naturels. Le recyclage de ces matériaux peut être attribué à leurs propriétés. En effet, l'intérêt de recycler les déchets naturels est adopté pour éviter de les gaspiller et vérifier la possibilité de les réutiliser au lieu de consommer des matières brutes. Le but est de minimiser les émissions de gaz à effet de serre [1].

Il est à noter qu'en Algérie les déchets naturels tels que la paille de blé, d'orge, le diss et le déchet de palmier dattier sont considérés comme un problème et sont parfois brûlés au champ afin de s'en débarrasser. Ces déchets agricoles peuvent être bénéfiques s'ils sont utilisés comme renfort de ciment et polymère pour améliorer les caractéristiques des matériaux bio-composites. L'exploitation des déchets naturels peut être fructueuse car elle peut fournir des opportunités de travail et améliorer le mode de vie dans les zones rurale. Plus important encore, un tel processus peut aider à réduire le problème des déchets naturels [2].

Récemment, l'intérêt s'est porté sur le développement de matériaux composites à base de fibres naturelles. L'utilisation de fibres est une source durable et une sorte de renforcement pour les matériaux à base de polymère. L'intérêt pour de tels matériaux peut se référer à leur nature respectueuse de l'environnement, un problème critique dont souffre notre monde ces derniers temps. Les fibres peuvent remplacer les matériaux synthétiques car elles sont moins lourdes et peuvent économiser de l'énergie. En

conséquence, une grande attention a été accordée à la possibilité de fabriquer des composites renforcés de fibres naturelles [3].

L'amélioration des propriétés des matériaux, principalement thermiques, s'est faite via l'utilisation de fibres. Ce dernier peut être utilisé comme renfort grâce à ses caractéristiques isolantes tout comme il peut être employé pour étendre l'utilisation des éco-matériaux. Indépendamment de l'utilité des fibres dans la réduction des déchets naturels, pourtant l'exploitation de tels matériaux en Algérie dans le domaine de la construction reste relativement rare.

L'utilisation des fibres naturelles ait été une pratique courante et une demande mondiale pour réduire la consommation de matières d'une part, et pour réduire les problèmes liés à l'environnement. D'autre part, nous nous dirigeons toujours vers l'utilisation du ciment dans le domaine de la construction au détriment du recyclage des déchets naturels. À cet égard, certaines questions pourraient être posées:

- peut-on utiliser les matériaux composites comme substitution au ciment dans le domaine de la construction?
- comment traiter les fibres naturelles en gardant à l'esprit qu'on ne peut les utiliser directement avant d'étudier leurs propriétés mécaniques?
- les fibres naturelles ont-elles la capacité d'améliorer les performances mécaniques et thermiques du composite ?
- peut-on utiliser les composites renforcé avec des fibres naturelles comme isolant?

Ce que l'on peut faire supposer à ce niveau que l'hésitation à l'utilisation des fibres naturelles est encore faible en raison des propriétés mécaniques qui doivent encore être améliorées. De plus, l'utilisation de tels composites ne peut pas être utilisée en zone humide.

Le but de ce travail était d'exploiter les fibres végétales pour produire un matériau composite économiquement acceptable pour une utilisation comme briques pour les maisons rurales situées dans le désert. Pour les raisons évoquées antérieurement, nous devons étudier les propriétés du composite en considérant que l'utilisation des déchets naturels dépend en premier lieu de ses propriétés. L'intérêt de ce travail est d'étudier les impacts de traitements chimiques sur le comportement mécanique et thermique d'un matériau composite à base de l'argile renforcée par la sciure de bois.

Dans notre cas et pour utiliser la sciure de bois comme brique dans le domaine de construction, nous avons utilisé de la sciure de bois pour fabriquer des matériaux composites avec de l'argile et de la chaux. Comme mentionné précédemment et en référence aux études précédentes menées, il est essentiel de traiter notre renfort pour améliorer ses propriétés mécaniques. En effectuant cette démarche, nous avons traité notre renfort avec NaOH et KMnO₄.

La structure de cette thèse est composée de cinq chapitres. Le premier chapitre de cette thèse, est une synthèse bibliographique sur les fibres végétales. Il présente un contexte à cette étude en offrant une idée conquérant les fibres végétales. Également, en précisant leurs compositions, application, avantage et désavantage, et quelques exemples de fibre végétale.

Le chapitre suivant vise à offrir quelques aperçus concernant les matériaux composites et des définitions concernant la matrice et le renforcement.

Le troisième chapitre tourne autour les différents matériaux utilisés dans notre étude. Nous avons tenté de parler de la fabrication de notre matrice et des différents composants que nous avons utilisés (argile, chaux et sciure de bois) dans lesquels nous avons fabriqué la matrice à base d'argile et de chaux avec un renfort de sciure de bois traitée avec NaOH 5% (m/v) et KMnO₄ 0,01% (m/v). Enfin, les techniques de caractérisations morphologique, thermique et mécanique seront présentées.

Le quatrième chapitre permet de développer les résultats obtenus et la discussion.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation.

Enfin, nous présenterons une conclusion générale sur l'étude élaborée et cela d'après les résultats expérimentaux.

Partie 1: Partie théorique

Chapitre I

Généralité sur les fibres végétales

I.1. Introduction

Les fibres végétales ont attiré beaucoup d'attention ces derniers temps, comme une alternative intéressante aux fibres classiques (amiante, verre, carbone et aramide). Pour certaines raisons ; à savoir, leur disponibilité, leur recyclabilité, leur faible coût et leur nature respectueuse de l'environnement. Et minimise de plus, elles n'entraînent aucune toxicité ; car elles possèdent certaines caractéristiques mécaniques qui les qualifient pour être renouvelables.

I.2. Classification des fibres naturelles

Ce sont des matières brutes qui sont obtenues à partir de sources animales, végétales ou minérales. La classification de ces matériaux est illustrée dans la figure 1 [4].

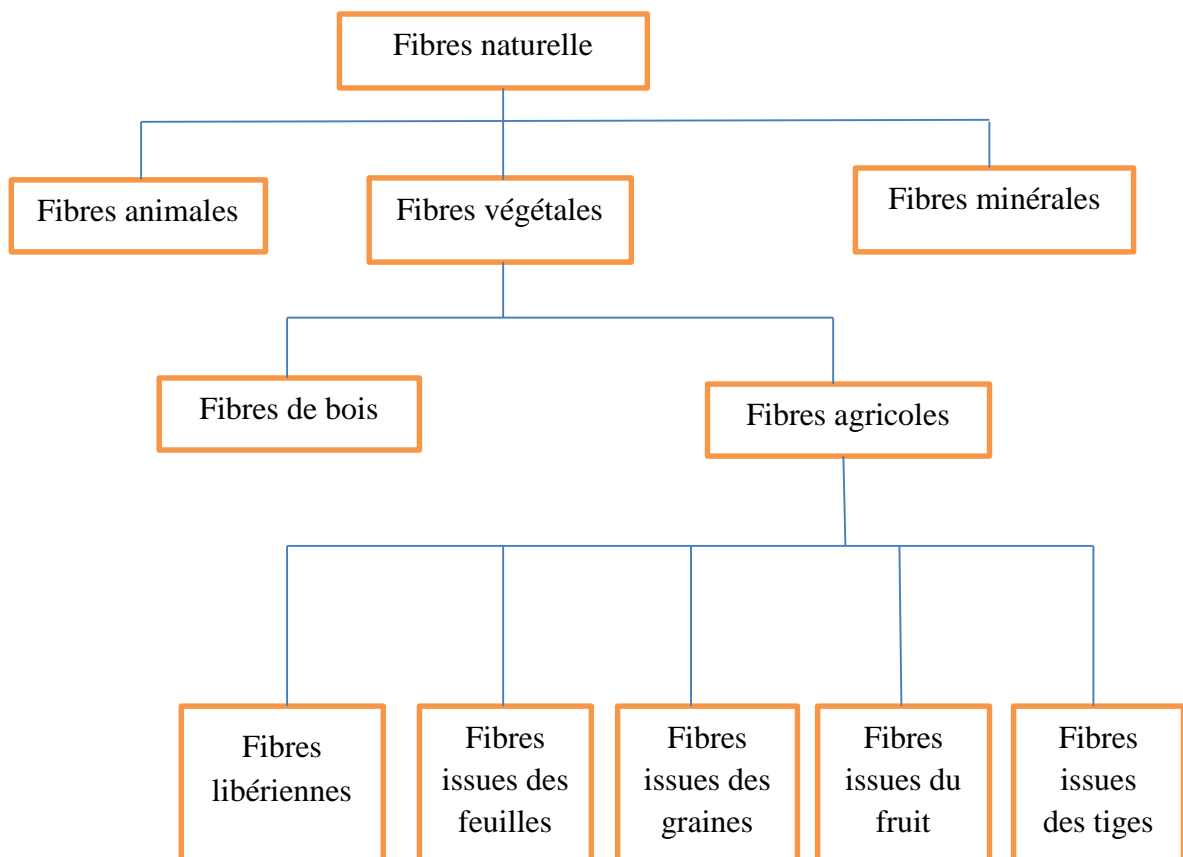


Figure. 1. Classification des fibres naturelles [4]

I.3. Définition de la fibre végétale

Les fibres végétales ont des structures fibrillaires (figure 2). Ils sont composés de cellulose, hémicellulose et de lignine [5].

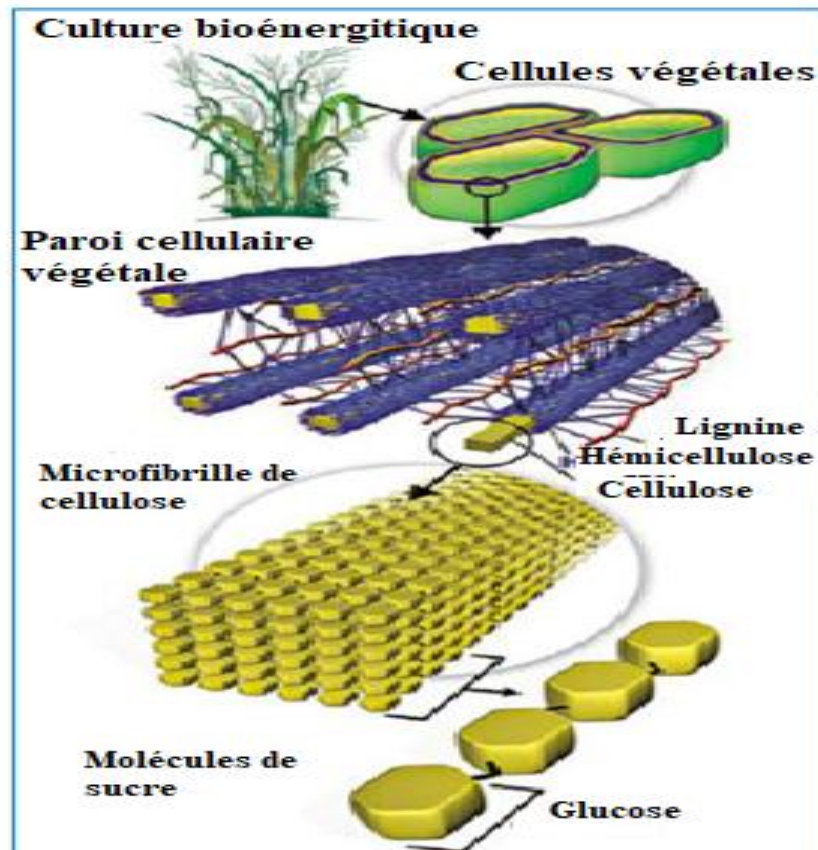


Figure. 2. Structure et composition d'une paroi végétale [5]

I.4. Structure des fibres végétales

La fibre végétale est un composite constitutif d'un renfort composé de différentes couches de cellulose particulièrement cristalline qui est recouvert d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine). Le renfort et la matrice sont liés par la lignine qui agit comme un liant hydrogéné [6]. La figure 3 présente la composition des fibres végétales.

Elles sont constituées de parois superposées parallèles à l'axe de la fibre. La structure est formée par un canal nommé lumen qui gère le transport de l'eau et de la nourriture. Le diamètre du lumen peut varier selon le type de fibre. La paroi est composée de différentes couches : la lamelle médiane, la paroi primaire et la paroi

secondaire qui est divisée en trois couches de microfibrilles (S1, S2, S3), la figure 4 présente la structure de bois.

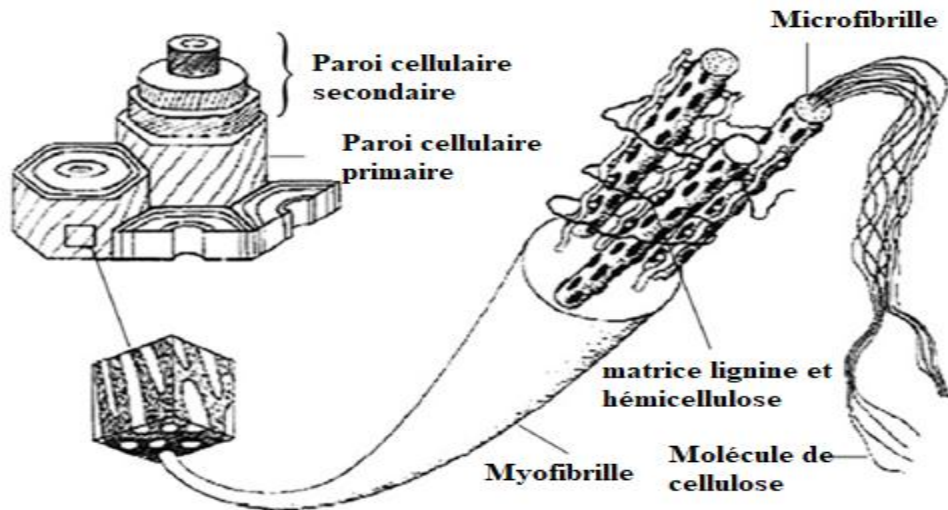


Figure. 3. Composition des fibres végétales [6]

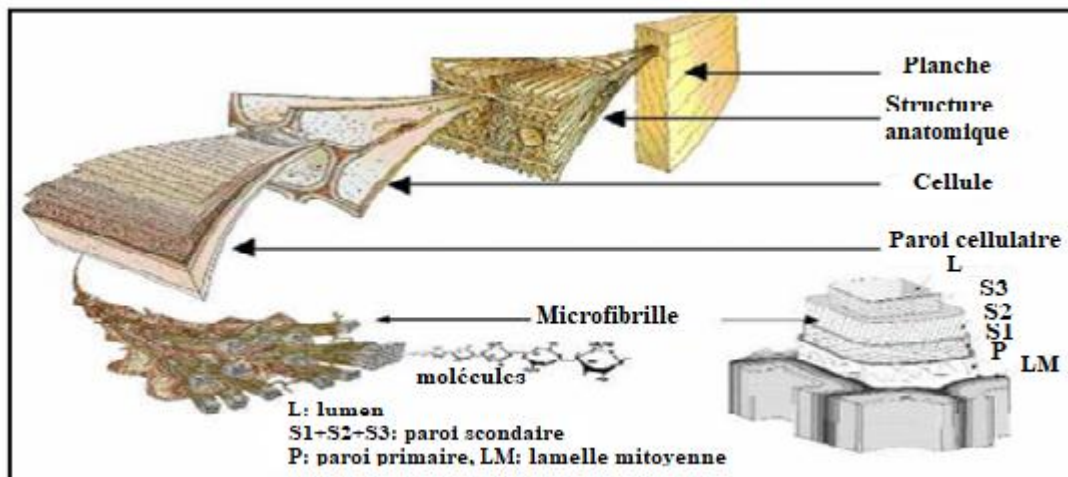


Figure. 4. Structure du bois [6]

Les microfibrilles sont orientées dans l'espace selon des angles définis. L'orientation des microfibrilles selon l'axe de la cellule a une grande influence car elle affecte les propriétés mécaniques, compte tenu du module de Young qui diminue lorsque les angles des microfibrilles augmentent. Pour cette raison, MAF est l'un des indicateurs de force et de rigidité ; par conséquent, déterminer la qualité du bois [7].

I.5. Composition chimique des fibres végétales

Quelle que soit l'espèce, le bois anhydre est constitué de carbone (environ 50 %), d'oxygène (42 %), d'hydrogène (6 %), d'azote (1 %) et d'autres atomes en quantité moindre (1 %).

I.5.1. La cellulose

La formulation brute exacte de la cellulose a été déterminée comme $(C_6H_{10}O_5)$. Ce polymère de glucose linéaire est composé d'unités D-anhydrocopyranos liées entre elles par des liaisons β 1- 4 [8]. La cellulose est un polymère linéaire hautement cristallin d'unités d'anhydroglucose qui assure la résistance et la stabilité structurelle du bois (figure 5).

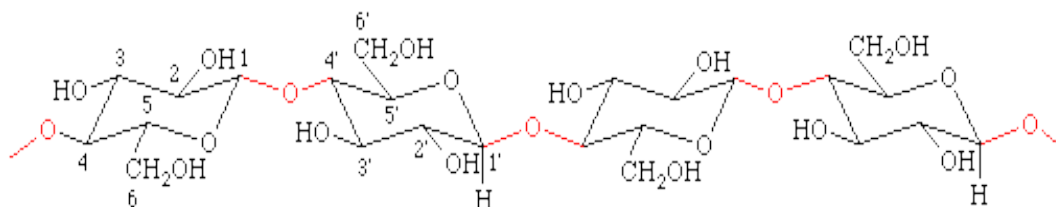


Figure. 5. Structure de cellulose

I.5.2. Les hémicelluloses

Ils sont des polymères de la famille des glucides qui sont composés de 5 et 6 cycles carbonés liés entre eux en chaînes ramifiées relativement courtes. Ils sont étroitement liés aux microfibrilles de cellulose et enrobent la cellulose dans une matrice (figure 6). Et peut contenir une teneur plus ou moins élevée en acides uroniques (acide gluconique, acide 4-O-méthyl-glucuronique). Ces derniers sont très hydrophiles [9].

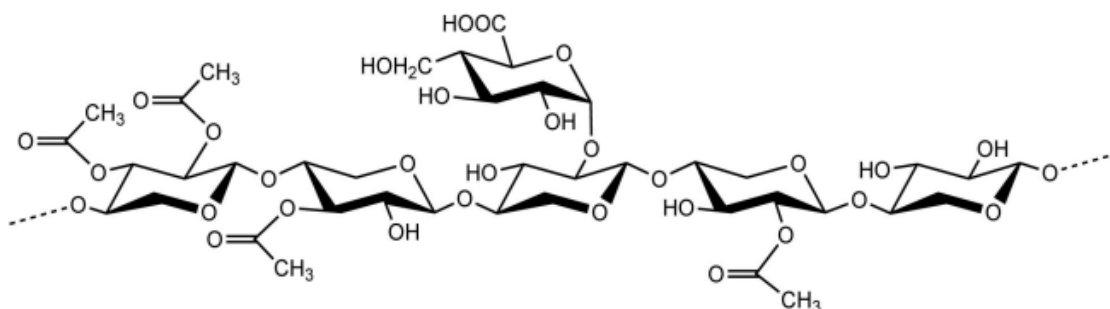


Figure. 6. Structure chimique des hémicelluloses

I.5.3. La lignine

La lignine, est un terme latin pour le bois, il est l'un de ses composants et responsable de la rigidité. Elle est un polymère tridimensionnel (3D) avec une structure amorphe et un poids moléculaire élevé (figure 7). Des trois principaux constituants dans les fibres, on s'attend à ce que la lignine soit celle qui a le moins d'affinité pour l'eau. Une autre propriété importante de la lignine est qu'elle est thermoplastique. (C'est-à-dire à des températures vers 90 °C, elle commence à ramollir et à des températures autour de 170 °C, il commence à couler) [9].

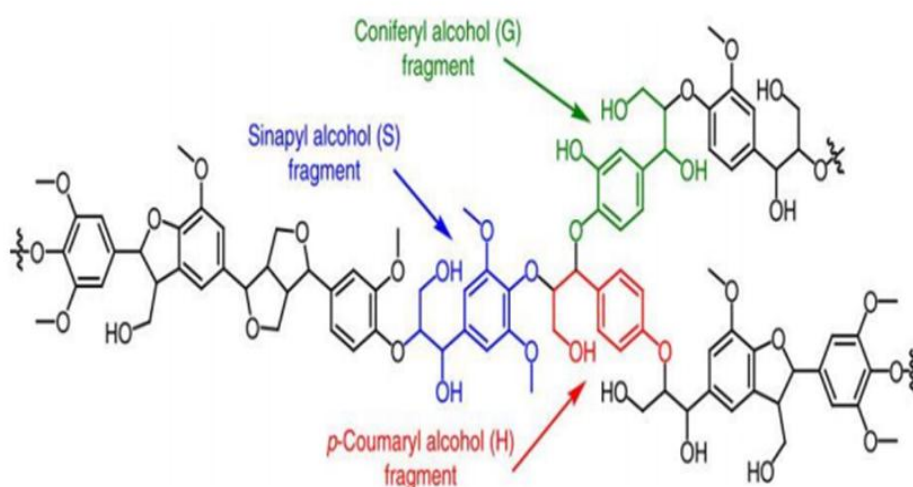


Figure. 7. Structure de lignine

I.5.4. Les pectines

La pectine, une substance organique, est un polysaccharide acide que l'on trouve essentiellement dans la plupart des plantes, en particulier les fruits. Elle est composée de monomères d'acide uronique à 1-4 liaisons (figure 8). La molécule rhamnus est prise en sandwich entre ces monomères avec 1-2 et 1-4 liaisons. Les macromolécules de pectine ressemblent à des zig-zig. Cette disposition lui confère donne la flexibilité [10].

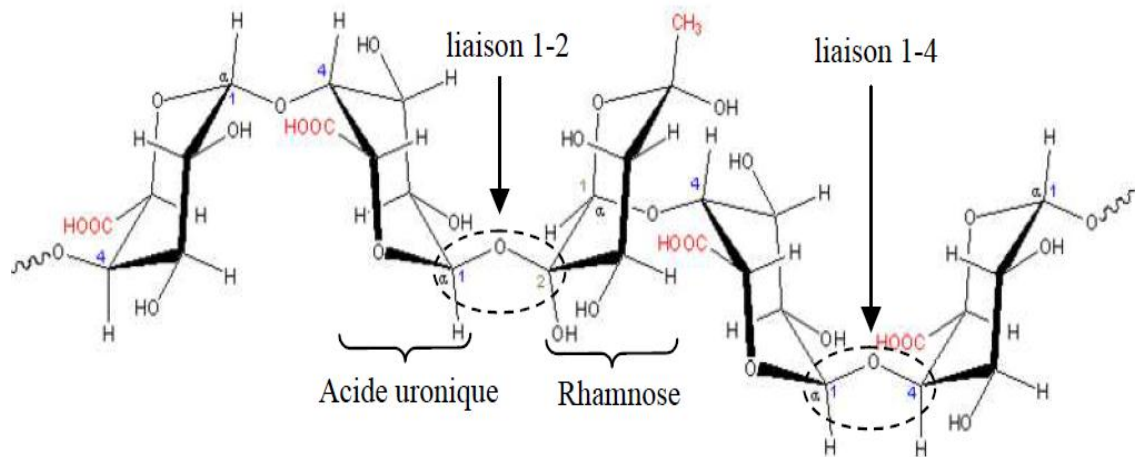


Figure. 8. Structure de pectine

I.5.5. Cires

Les cires sont composées de différents types d'alcools hydrosolubles et de différents acides tels que l'acide palmitique, l'acide oléique et l'acide stéarique [11].

Le tableau 1 présente la composition chimique de quelques fibres [12].

Tableau 1. Composition chimique de quelques fibres [12]

Type de fibre	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Cotton	82,7	5,7	-
Jute	64,4	12,0	11,8
Zoster	57	28	5
Ramie	68,6	13,1	0,6
Sisal	65,8	12,0	9,9
Chanvre	57-77	14-17	9-13
Kénaf (écroce)	44-60,8	20,3-23	10-19
Kénaf (bois)	37-49	18-24	15-21
Résineux	48,0	15,0	25,3
Alfa	45	24	24
Lin	71	19	2
Genét d'Espagne	44,5	16,3	18,5

I.6. Classification des fibres végétales

Les fibres peuvent être classées selon différents critères. Ces critères peuvent inclure la position dans la plante, la composition et la longueur. Elles sont classées en:

- L'organe de la plante d'où elles viennent en fibres de tige (kénaf, jute, lin, ramie), feuilles (sisal, abaca.), et graines. (coton, kapac, etc.) [13]
- la teneur en holocellulose (cellulose et hémicelluloses) et en lignine. On distingue les fibres ligneuses (dures et rigides des matières ligneuses comme le bois de charpente, les résidus de l'industrie du bois, etc.), et les fibres non ligneuses (douces, souples, des plantes non ligneuses, souvent des annuelles relativement moins riches en lignine comme le kénaf, chanvre, sisal, jute, lin, etc.).
- leur longueur dans laquelle ils sont classés en fibres longues ou en fibres courtes. Les fibres longues ou libériennes, dérivées des tiges et de l'écorce des plantes annuelles. D'un autre côté, les fibres longues, contenant des lignocellulosiques de feuilles, troncs d'arbres, écorces de fruits..., sont dures grâce à en présence de lignine [14]

I.7. Propriétés des fibres végétales

Les fibres végétales ont avantages tels que la biodégradabilité, la disponibilité, la faible densité. Aussi, ils sont renouvelables et ont un caractère éco-environnemental. Elles sont légères par rapport aux fibres synthétiques. Leur biodégradabilité peut contribuer à un écosystème sain tandis que leur son faible coût et ses performances élevées répondent à l'intérêt économique de l'industrie. Quand il est naturel, les plastiques renforcés de fibres sont soumis, à la fin de leur cycle de vie, à la combustion processus ou décharge. La quantité de CO₂ libérée des fibres est neutre par rapport à la quantité assimilée au cours de leur croissance [9].

Il y a plusieurs variables importantes qu'influence sur le comportement mécanique des fibres végétales tels que la résistance à la traction et le module de Young. Le tableau 2 présente les propriétés physiques des fibres naturelles.

Tableau 2. Propriétés physiques des fibres naturelles [15]

Fibre	Contrainte à la rupture (GPa)	Module d'élastique (GPa)	Déformation (%)	Densité (g.cm ⁻³)
La soie d'araignée	1,3-2	-30	28-30	1,3
Lin	0,5-0,9	50-70	1,5-4,0	1,45
Chanvre	0,35-0,8	30-60	1,6-4,0	1,48
Kénaf	0,4-0,7	25-50	1,7-2,1	1,3
Jute	0,3-0,7	20-50	1,2-3,0	1,3
Bambou	0,5-0,74	30-50	-2	1,4
Sisal	0,3-0,5	10-30	2-5	1,5
Fibre de coco	0,15-0,18	4-6	20-40	1,2

I.8. Avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres végétales ont certains avantages qui pourraient être énumérés ci-dessous :

- biodégradables
- renouvelables.
- faible impact environnemental.
- Légère.

D'autre part, les fibres végétales présentent des inconvénients que l'on pourrait citer comme suit :

- Hydrophile
- Instabilité dimensionnelle
- stockage difficile
- La variabilité car leurs caractéristiques peuvent changer au sein d'une même espèce en fonction du climat, de la densité et même de l'âge de la plante [16].

I.9. Présentation des fibres végétales

I.9.1. Coton

Le coton, les poils des graines des plantes du genre *Gossypium*, et la forme la plus pure de cellulose disponible dans la nature. Le coton a une structure multicouche qui se

compose d'une paroi principale, d'une paroi secondaire et d'une lumière. Au microscope, il ressemble à un ruban torsadé ou à un tube effondré et torsadé. La résistance du coton a été attribuée à sa structure hautement brillante et cristalline et sa résistance est augmentée de 25 % lorsqu'il est humide. Le coton est un bon conducteur de chaleur, et susceptible d'être endommagé par la moisissure, il devient jaune et s'affaiblit lorsqu'il est exposé à la lumière solaire prolongée. Mauvaise résistance à l'usure [17].

I.9.2. Jute

Le jute est une plante des zones tropicales (genre *Corchorus*) appartenant à la famille liliacées. La tige atteint une hauteur de 4 à 6m avec un diamètre d'environ 3 m (figure 9) [17].



Figure. 9. Fibre de jute [18]

I.9.3. Ramie

Ramie est l'une des plus anciennes cultures fibre au monde. Ramie fibre est également l'une des fibres textiles naturelles la plus solide et des plus longues au monde (figure 10). Ramie est une plante vivace appartenant au genre *Boehmeria* ; la famille des Urticacées ou Ortie de l'ordre des Urticales et de la classe Magnoliopsida. Il existe environ 100 espèces sous le genre *Boehmeria*. Cette fibre est d'une importance secondaire dans le commerce mondial malgré sa caractéristique [19].

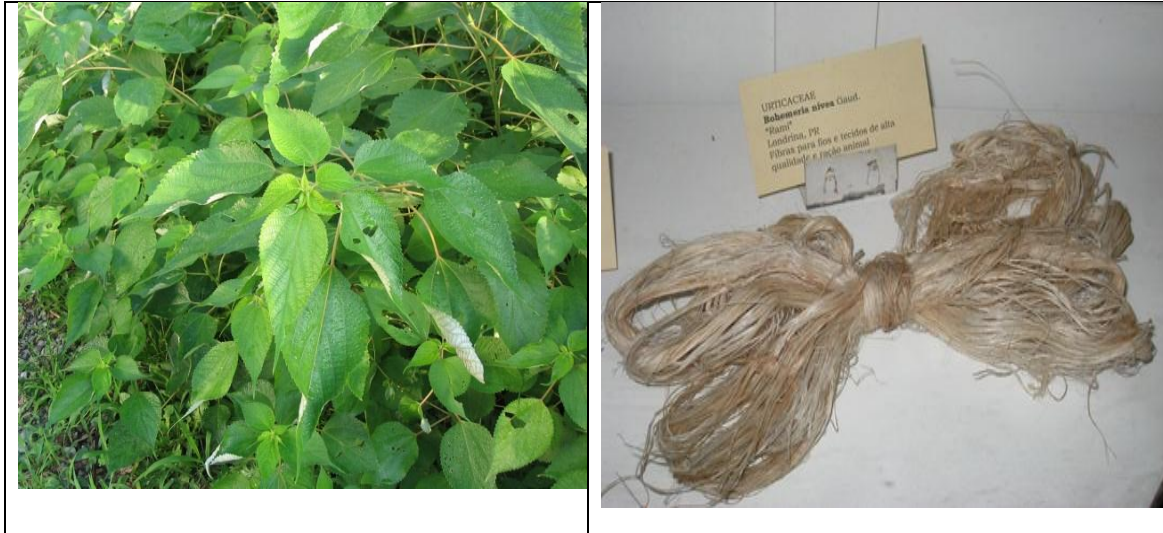


Figure. 10. Fibre de ramie [20]

I.9.4. Chanvre

Le chanvre (*Canabissativa*) est une plante annuelle d'une hauteur de 1 à 3 m, cultivée dans les pays à climat tempéré (figure 11) [10].



Figure. 11. Fibre de chanvre [21]

I.9.5. Sisal

Sisal (*Agave sisalana*) est une fibre dure qui est maintenant largement cultivé dans les pays tropicaux.

Pour des applications comme matériaux de construction, les composites de gypse et de ciment pourraient être renforcés avec des fibres de sisal. L'intérêt d'utiliser le sisal comme renfort peut être attribué à ses propriétés d'interface, mécaniques et environnementales ainsi que leurs applications (figure 12) [22].



Figure. 12. Fibre de sisal [23]

I.9.6. Alfa

Alfa (*stipa tenacissima* L) est une plante qui pousse initialement dans les zones semi-arides. Cette plante possède une structure morpho-physiologique qui lui permet de résister à l'environnement dur en particulier les environnements méditerranéens durs. En raison de sa nature résistante et solide (figure 13) [24].



Figure. 13. Fibre d'alfa [24]

I.9.7. Diss

Diss (*Ampélodesmos Mauritanicus*) est une espèce de la famille des Poacées. Cette plante est très abondante en Afrique du Nord et dans les zones déshydratées en

général. Il est largement remarqué qu'il est utilisé dans le building de maisons anciennes dans les zones rurales en raison de sa qualité mécanique et hydrique [25].



Figure. 14. Fibre de diss [25]

I.9.8. Lin

Le lin appartient à la famille des Lenacées. C'est une plante cultivée dans le nord. La literie est coupée ou déchirée (figure 15) [21].



Figure. 15. Fibre de lin [21]

I.9.9. Palmier dattier

C'est une fibre composée de dix parties à savoir: le palmier, le jeune palmier, le régime de dattes, les dattes, le gourmand, le stipe, les cicatrices annulaires, le rejet, le bulbe, les racines (figure 16) [26].



Figure. 16. Fibre de palmier dattier [13,26]

I.9.10. Bois

Le bois est un matériau très important économiquement. Il est présent dans le monde entier et peut être géré durablement comme une ressource renouvelable, contrairement au charbon, aux minéraux et au pétrole, qui s'épuisent progressivement [27].

I.10. Utilisation des fibres végétales dans la construction

Plusieurs recherches ont été menées pour remplacer les fibres d'amiante par des fibres végétales. Aujourd'hui, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans la fabrication de panneaux, de tuiles et de parkings et dans le renforcement du gypse [17].

Chapitre I

Matériaux composites

II.1. Généralité sur les matériaux composites

Les humains ont pensé à combiner différents composants afin de produire des matériaux avec de meilleures propriétés pendant de longues décennies. Par conséquent, il apparaît de nouveaux matériaux composites qui sont le produit du recyclage et de la réutilisation des matériaux naturels pour répondre aux besoins de l'ère actuelle [28].

II.2. Définition des matériaux composites

Le terme « composite » vient du mot latin *compositus*, issu de la racine du mot *compositant*, qui signifie « rassembler » [29]. Un composite est une combinaison de différents constituants qui sont fusionnés pour créer un nouveau matériau avec des propriétés différentes. Les composants sont principalement composés d'un renfort et d'une matrice [30]. Ce dernier lie le renfort et détermine la forme du composite [31].

Sa composition est montrée dans la figure 17.

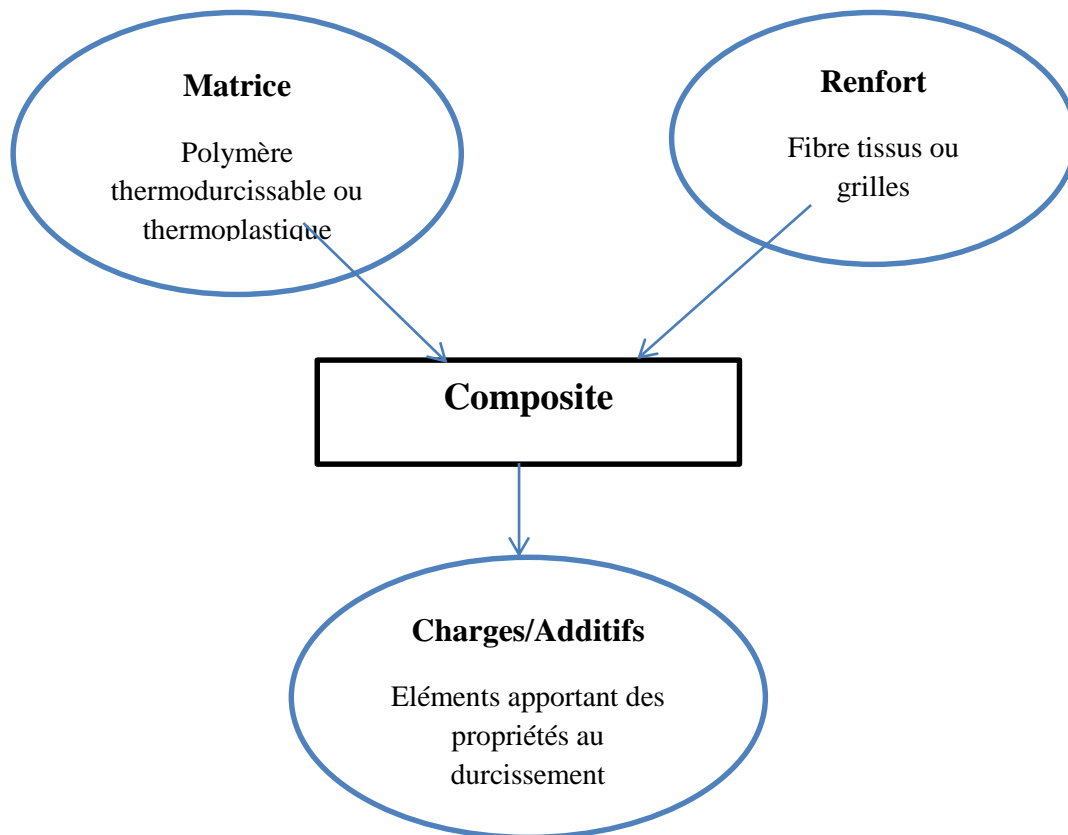


Figure. 17. Composition d'un matériau composite [32]

II.3. La matrice

La matrice a un rôle important dans le transfert des contraintes sur les fibres et leur maintien en place. Bien que la matrice possède de faibles caractéristiques mécaniques par rapport aux fibres. Néanmoins, la matrice impacte les propriétés du composite. Par conséquent, il devrait y avoir une compatibilité entre le renforcement et la matrice [33].

La matrice est généralement homogène et isotrope ; on distingue les matrices organiques, les matrices métalliques, les matrices minérales.

II.3.1. Classification de la matrice

II.3.1.1. Les matrices synthétiques organiques

Il y a deux principaux types de polymères utilisés dans les matériaux composites : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

a) Matrice thermoplastique

Ceux-ci sont couramment utilisés dans la production à cause de leur nature renouvelable et ils sont peu coûteux. Il en existe plusieurs types tels que le polychlorure de vinyle, le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide et le polycarbonate [28].

b) Matrice thermodurcissable

Les polymères thermodurcissables peuvent être liquide ou solides à température ambiante et ils se ramollissent lorsqu'ils sont chauffés puis durcis, tandis que les thermoplastiques se ramollissent s'écoulent lorsqu'ils sont chauffés, mais ils durcissent de nouveau après avoir subi le refroidissement [34].

Des exemples de polymères thermodurcissables utilisés comme matrices dans les composites comprennent les époxydes, les polyesters insaturés, les polyimides, les esters de cyanate, le polyuréthane, les résines phénoliques, les silicones et les esters vinyliques. Certains polymères spéciaux sont également disponibles, tels que les alkydes, les allyles, le furane et les mélamines [35].

II.3.1.2. Les matrices métalliques

Composites à matrice métallique sont fabriqués à partir de matériaux principalement aluminium, magnésium le titane, le nickel, etc. [36]. Ils ont été très utilisés en raison de leur nature solide.

II.3.1.3. Les matrices minérales

Ils sont employés pour résoudre le problème de la fragilité de céramique [36], qui possède un comportement mécanique non-fragile. Les composites à matrice céramique (CMC) présentent une faible densité, des caractéristiques mécaniques et des tenues à l'oxydation intéressante sur une large gamme de température [37].

II.4. Le renfort

Le renfort confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques: rigidité, résistance à la rupture, dureté, qui permet également d'améliorer les caractéristiques, le comportement thermique et mécanique [38].

II.4.1. Types des renforts

II.4.1.1. Fibres de verre

Ils sont préparées à partir d'un mélange à base de silice (SiO_2) abondante puisqu'elles sont le constituant principal du sable et peu chère, avec d'autres éléments tels que (Na_2O), (K_2O), (F), (CaO), (MgO) et (B_2O_3). Et d'autres éléments tels que l'alumine (Al_2O_3) est employée pour stabiliser la structure du verre et pour modifier ses propriétés physiques [38].

Ils peuvent inclure différents types de verre : type E, types D, types R.

II.4.1.2. Fibres de carbone

Elles peuvent être utilisées à base de matière organique nommée précurseur. Les caractéristiques mécaniques de ces fibres dépendent de la nature du précurseur. La production de ces fibres pourrait être réalisée de deux manières : l'une consiste à obtenir des fibres HM et THM et l'autre est des fibres HR et HT [33].

II.4.1.3. Les fibres aramides

Les plus connues sont les fibres à base de polyamides aromatiques connues sous la marque "Kevlar". Les fibres aramides ressemblent aux métaux dans leurs caractéristiques en raison de leur élasticité. Ce dernier est déterminé par la nature de la charge car ils deviennent élastiques lorsqu'ils sont exposés à une faible charge. Au contraire, la charge élevée peut les transformer en plastique [33].

II.4.1.4. Les fibres céramiques

Ceux-ci sont utilisées dans des applications très spécialisées qui fonctionnent dans des atmosphères à haute température et oxydantes. Les fibres les plus couramment produites sont la fibre de bore, la fibre de carbure de silicium, la fibre de bore-carbure de bore (B_4C) et la fibre de bore-carbure de silicium (BSiC) [33].

II.4.1.5. Fibre synthétiques thermostables

Il est utilisé dans les isolants électriques et thermiques, ainsi que dans la protection thermique, structure de bord d'attaque des navettes et missiles, cônes de rentrée de véhicules spatiaux [28].

II.4.1.6. Les autres fibres

Les autres fibres sont: [28]

- végétale
- minérale
- synthétiques
- métalliques

II.4.2. Formes de renforts

Les renforts se présentent à formes suivante :

- Format linéaire (fil, âme)
- Format tissu de surface (tissu mat simple, etc.)
- Format multidirectionnel (lame, tissu complexe, etc.) [28].

II.4.2.1. Forme linéique

Une fibre unique est communément appelée filament élémentaire ou filament monofilament. Le monofilament est ensuite lié à des noyaux ou des fils de diverses formes [28].

II.4.2.2. Formes surfaciques

a. Les mats

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus, ou de fils répartis aléatoirement dans un plan. Les fibres sont liées par un liant hautement ou faiblement soluble. L'absence de direction préférentielle peut conduire à des isotopes des propriétés mécaniques du mât [28]. Il existe deux types de mats (figure 18).

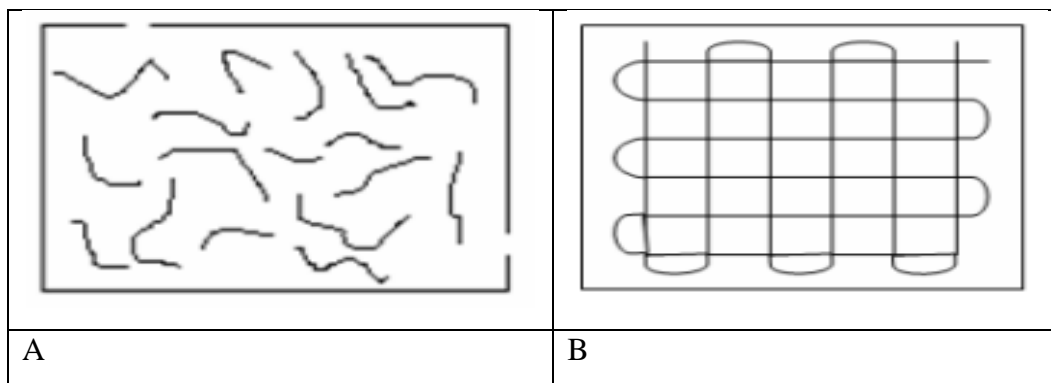


Figure. 18. Type de mats (A) mats à fibres courtes, (B) mats à fibres continues [39]

b. Les tissus et rubans

Ensembles de fils, stratifiés ou mèches réalisés sur un métier à tisser, constitue d'une chaîne et d'une trame (figure 19) [39].

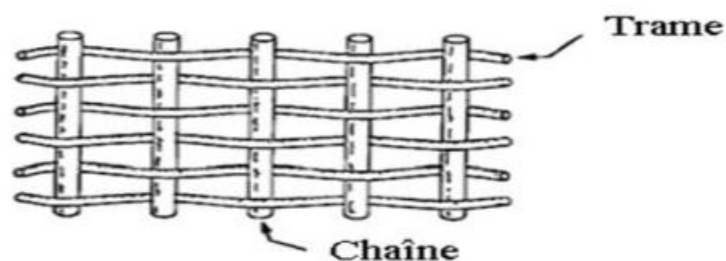


Figure.19. Chaîne et trame d'un tissu

L'ensemble longitudinal est appelé la chaîne, qui règle la trame (ou le remplissage) [28].

II.4.2.3. Forme multidirectionnelle

a. Tresses et préformes

Ce sont des tissages cylindriques ou coniques (figure 20). Les fils s'entrelacent en hélice, qui permettent d'ajuster la préforme à la forme de la structure à mouler. Nous pouvons former une structure de diamètre varie de long de l'axe [28].

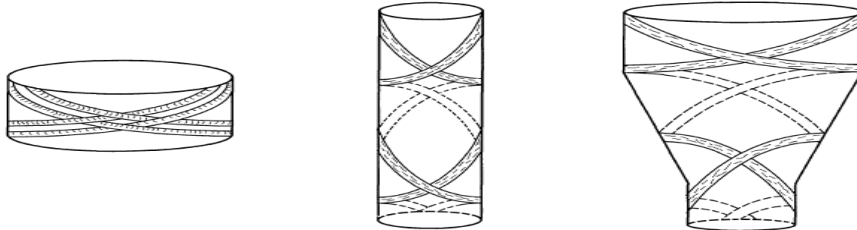


Figure. 20. Tissage cylindrique et conique [28]

La figure 21 représenté les différents types de renforts souvent rencontrés [40,41]

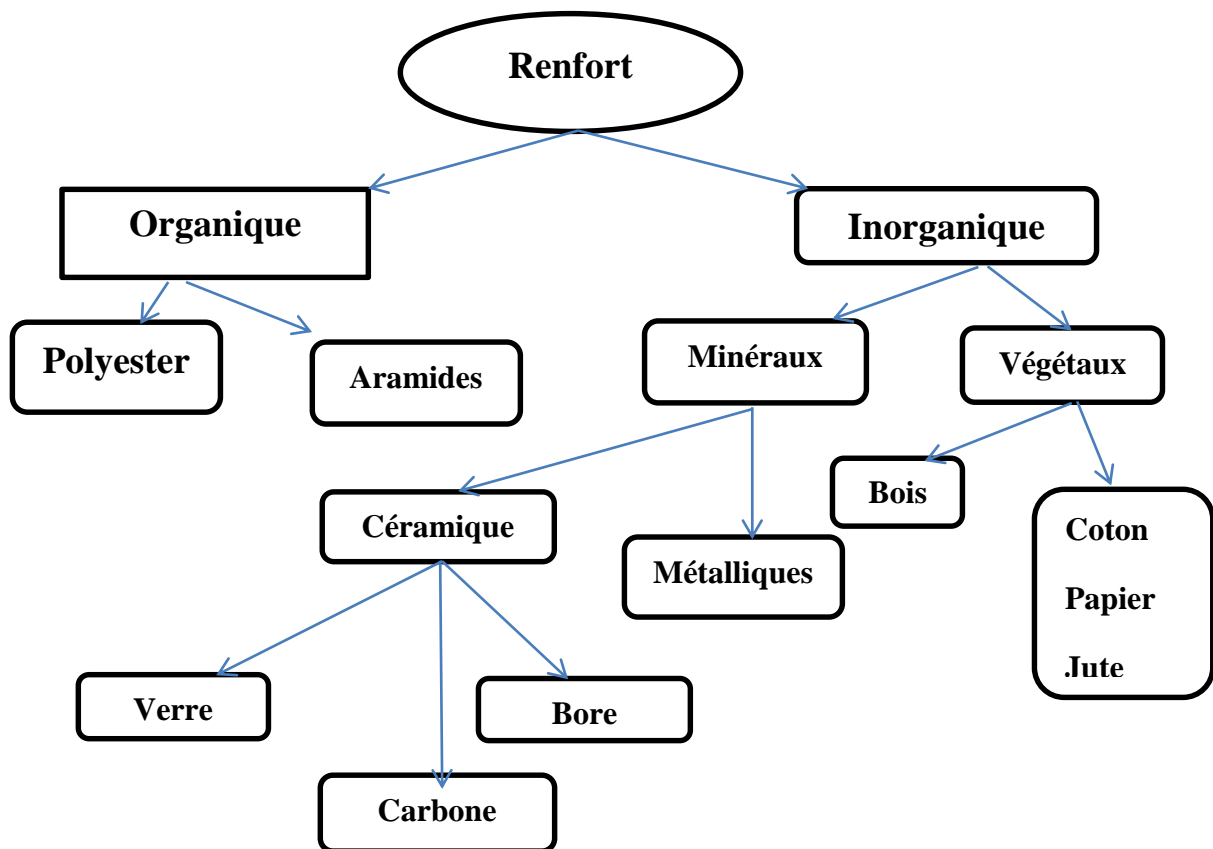


Figure. 21. Types de renforts [41]

II.5. Charges et additifs

Les charges et additifs sont des substances d'origine minérale, végétale, synthétique ou organique se présentant sous forme pulvérulente ou fibreuse, chimiquement pures et inertes vis-à-vis des résines [32].

II.5.1. Charges

La charge est une matière inerte, minérale ou végétale qui peut être ajoutée au polymère de base. Ils peuvent modifier considérablement les caractéristiques mécaniques, électriques ou thermiques. En plus de leur résistance à l'eau et à la température, ils ont une surface lisse, rigide et indéformable [32].

II.5.2. Additifs

Le produit peut être incorporé dans la matrice pour améliorer ses propriétés mécaniques [28].

Les additifs ne se trouvent pas en grande quantité et ils fonctionnent comme :

- Des lubrifiants et agents de démoulage
- Pigments et colorants
- Agents anti-retraits, anti-ultraviolets
- Catalyseur

II.6. Classification des matériaux composites

Ils sont généralement classés selon le type de matrice, comme le polymère, le métal ou la céramique, ou selon le type de renfort, comme les fibres, les particules [28].

II.6.1. Classification selon la forme des constituants

a) Composites à fibres

Dans ce cas, le renfort se forme de fibre qui peut être comme des fibres continues ou discontinues [28].

b) Composites à particules

Le renfort utilisé dans la préparation de ce matériau est granulaire pour améliorer la résistance mécanique, le comportement en température et la résistance à l'abrasion. Ils sont utilisés comme charge pour diminuer le coût du matériau sans en dégrader la caractéristique [28].

II.6.2. Classification selon la nature de la matrice

Les matériaux composites sont classés comme suit :

a) Composite à matrice organique :

- Fibres minérales : verre, carbone....
- Fibres organiques : kevlar, polyamides....
- Fibres métalliques : bore, aluminium...

b) Composites à matrice métallique :

- Fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC).
- Fibres métalliques : bore.
- Fibres métallo-minérales : fibre de bore revêtue de carbure de silicium (Bore-SiC).

c) Composites à matrice minérale :

- Fibres métalliques : bore.
- Particules métalliques : cermets (métal-céramique).
- Particules minérales : carbure, nitrure.

II.7. Architecture du composite

On peut diviser la structure des composites en trois types: [42]

- ✓ Les monocouches
- ✓ Les stratifiées
- ✓ Les sandwiches

II.8. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites

Récemment, l'utilisation des matériaux composites s'est accrue dans plusieurs domaines en raison de leurs avantages sont :

- ✓ légèreté
- ✓ Inertie
- ✓ déformation
- ✓ L'insensibilité à l'humidité, à la chaleur et à la corrosion

Cependant, les composites présentent certains inconvénients suivants :

- Ils sont incassables.

- ✓ Il est assez difficile de détecter les dommages structurels.
- ✓ Ils sont difficiles à réparer en raison de la rigidité lors de la fabrication et de l'assemblage [43].

II.9. Applications des matériaux composites

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreux secteurs :[32]

- Industrie aérospatiale
- Industrie des transports terrestres et maritime
- Industrie des articles de sport et de loisir
- La robotique et de la machinerie
- La santé
- génie civil

Les matériaux composites sont utilisés dans le génie civil pour fabriquer des éléments importants comme des poutres, des plafonds, les murs et les colonnes.

II.10. Facteurs influençant les composites

Il y a beaucoup de paramètres qui influencent les propriétés mécaniques des matériaux composites tels que : le rapport des fibres, la morphologie aussi que l'orientation et l'état de dispersion dans le substrat.

II.10.1. Taux de renfort

Le taux de renforcement affecte la rigidité du composite, étant donné que le taux augmente la rigidité. Pourtant, on estime qu'il est difficilement possible de trouver un composite fabriqué contenant plus de 50 à 60 % de fibres sans rencontrer de problèmes lors du moulage [41].

II.10.2. La morphologie

La structure et la taille de l'élément de renforcement affectent les propriétés mécaniques du composite et influencent également le processus de fabrication [44].

II.10.3. L'orientation et la dispersion du renfort

Les caractéristiques mécaniques de tout matériau dépendent de sa structure. Par conséquent, la distribution et l'orientation de renfort affectent la rigidité et la résistance à la traction du matériau fabriqué [44].

II.11. Les matériaux composites à base des fibres végétales

Les fibres de cellulose ont récemment gagné en popularité dans le domaine de la production par rapport aux fibres synthétiques en raison de leurs prix et de leur grande accessibilité. De plus, leur nature éco-environnementale en fait l'une des énergies durables vers lesquelles se dirige le monde actuel [45].

II.11.1. Matrice polymère renforcée par des fibres naturelles

Diverses fibres végétales ont été étudiées comme renfort des polymères telles que : le bois, le chanvre, le lin, le bambou, le coton...etc. Sur ce point, Ben Yahia et coll. [46] ont remarqué que le traitement à l'alcalin des fibres Alfa, utilisé comme renfort au composite de polyester, améliore les propriétés mécaniques contrairement aux fibres non traitées. De plus, Amroune et coll. [47] ont mené une étude pour examiner les effets de l'ajout de fibres naturelles à une matrice polymère. Ils sont arrivés au résultat que la résistance à la traction et à la flexion du composite étudié étaient améliorées grâce au traitement, qui améliore l'adhérence inter-faciale, faisant du composite une substitution aux matériaux existants.

II.11.2. Matrice minérale renforcée par des fibres naturelles

La disponibilité et le faible coût des fibres végétales en font l'une des substances fréquemment utilisées dans les matériaux composites [48]. Kerroum et coll. [49] ont exploré dans quelle mesure les briques d'adobe peuvent être utilisées comme matériaux durables. Les résultats soulignent l'importance du traitement chimique dans l'amélioration de l'adhérence du matériau considéré.

Le rôle des fibres dans une matrice minérale est de donner au matériau composite de bonne propriété mécanique tout en diminuant sa densité. Mais les propriétés obtenues sont dépendantes du type de fibre, de leur forme, de leur longueur, du choix de mélange et des conditions de séchage [50].

Certaines recherches ont été menées sur les matériaux composites renforcés avec des fibres naturelles. Ces derniers sont connus pour leur légèreté, leur biodégradabilité et leur respect de l'environnement. Dans le but d'examiner l'impact du traitement d'alcalin des fibres sur le comportement des composites, Koadri et coll. [51] ont conclu que la résistance à la flexion et à la compression s'est améliorée lorsque l'on considère les fibres de palmier non traitées. Les résultats montrent que l'augmentation est respectivement d'environ 57 % et 60 %, respectivement.

Fertikh et coll. [52] ont utilisé des fibres Diss pour renforcer différentes matrices, en particulier le ciment, la chaux et l'argile. Les résultats montrent que la combinaison argile-chaux renforcée de fibres Diss donne de meilleurs résultats que la matrice de ciment. Les fibres végétales changent complètement le comportement rhéologique du matériau et augmentent énormément sa résistance à la flexion et le devenir moins fragile en améliorant son seuil de fissuration. Bahloul et coll. [53] ont établi que la résistance à la compression pouvait être diminuée grâce à l'ajout de pourcentages élevés de fibres d'Alfa au mortier de ciment.

Il y a une relation entre les caractéristiques isolantes des composites et la conductivité thermique. Ce dernier est réduit avec l'augmentation du volume de vide du composite. Laaroussi et coll. [54] ont tenté de chercher les propriétés thermiques d'un échantillon d'argile. Suivant la même idée, Meukam et coll. [55] ont évalué la stabilité des briques de sol après avoir recherché leurs propriétés mécaniques et thermiques.

Elhamdouni et coll. [56] ont préparé une matrice d'argile renforcée avec des fibres d'Alfa de divers taux (0,5 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 %) pour examiner la portée de ces fibres dans l'amélioration des propriétés du composite. Ils ont souligné la nécessité d'Alfa pour améliorer les propriétés du mélange.

Une autre étude réalisée par Bederina et coll. [57] questionne l'efficacité des copeaux de bois sur les propriétés thermiques lorsqu'ils sont ajoutés au béton de sable. En conséquence, la densité du matériau a été réduite, conduisant à l'amélioration de la conductivité thermique. Le même point de vue a été partagé par Driss Taoukil et coll. [58] qui ont confirmé que l'incorporation de bois dans des mortiers de sable diminue la conductivité thermique, ce qui augmente la capacité d'isolation du matériau.

II.12. Émission acoustique

L'émission sonore conforme à la norme AFNOR NF A 09350 est un phénomène dans lequel des ondes élastiques transitoires sont engendrées du fait d'un infime déplacement interne d'un matériau [59].

C'est une technique produit à des niveaux microscopiques qui conduisent à des ondes générées à la surface d'un matériau. Les ondes générées peuvent être détectées en référence à la rupture des fibres, à la fissuration matricielle, au délaminage inter-facile, etc. (figure 22) [60].

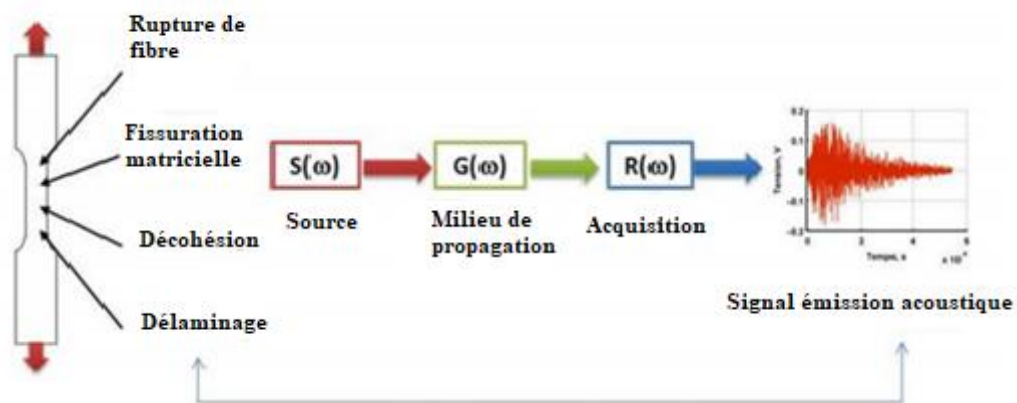


Figure. 22. Principe de l'émission acoustique [60]

L'étude des propriétés acoustiques des matériaux composites a été un sujet de recherche. Küçük et coll. [61] se sont intéressés à l'examen de l'absorption acoustique d'un composite à base de polyester renforcé de coton. Les résultats montrent que les propriétés physiques ont un impact sur l'absorption acoustique. De même, Gango et coll. [62] soulignent l'importance d'ajouter des fibres, notamment des copeaux de bois de Kambala aux briques d'argile, considérant que ces fibres réduisent la réception du bruit et la vitesse de transmission du son. Ceci permet de confirmer que le composite peut être utilisé en substitution en raison de ses qualités d'insonorisation en plus de ses avantages économiques.

Partie 2: Partie expérimentales

Chapitre III

Matériels et méthodes

III.1. Matériaux utilisés

III.1.1. Chaux

La chaux utilisée est produite par l'unité de Ghardaïa (Algérie). Sa composition chimique est présentée dans le tableau 3 [63]

Tableau 3. Composition chimique de la chaux

Composition	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	CO ₂	CaCO ₃
Masse (%)	>83,3	<0,5	<2	<1,5	<2,5	<2,5	<4,7- 0,5	<5	<10

III.1.2. L'analyse chimique de l'eau

Dans notre expérience, nous avons utilisé de l'eau du robinet. L'analyse de la qualité de l'eau a été réalisée à l'entreprise publique de la région de Laghouat (ADE). Les analyses que nous avons acquises sont exposées dans le tableau 4

Tableau 4. Analyse chimique de l'eau

Paramètres	Expérimental valeur	Standard valeur (Norme OMS) [64]
Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	1320	-
solides dissous totaux (SDT)	660	--
Salinité (%)	0,6	0,6
Température (°C)	22,1	-
Potentiel Hydrogène (pH)	8,30	6,5-9,5
Turbidité (NTU)	0,240	5
Ca ²⁺ (mg .L ⁻¹)	200,4	-
Mg ²⁺ (mg.L ⁻¹)	24,31	150
Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)	141,8	-
HCO ₃ ⁻	157,99	-
SO ₄ ⁻²	165,95	250
NO ₃ ⁻	4,64	50
PO ₄ ³⁻	0,25	0,5
NO ₂ ⁻	0,00	2
NH ₄ ⁺	0,12	<0,2
K ⁺	1,3	-
Fe ²⁺	0,05	0,3

III.1.3. Les procédures de préparation de l'argile

Dans cette étude, l'argile a été prélevée au niveau de la région de Bou-Saâda, un district situé à 69 km au sud-ouest de M'sila (centre-nord de l'Algérie). Pour préparer l'argile, les étapes suivantes ont été réalisées :

- broyage des roches de l'échantillon en petits morceaux à l'aide d'un mortier ;
- le matériau a été séché dans un four à 105°C pendant 24 h ;
- les morceaux d'argile ont été broyés dans un broyeur ;
- le matériau obtenu a été tamisé.

III.1.3.1. Caractérisation de l'argile utilisée

1) Détermination du pH

La mesure du pH, en général, est cruciale car elle détermine l'acidité ou basicité des solutions. Les procédures que nous avons entreprises pour traiter notre solution consistent à mettre 10 % d'argile dans de l'eau distillée. Pour confirmer l'entrée des ions dans la solution, nous avons laissé le mélange pendant 4 heures à la température ambiante. Ensuite, à l'aide d'un agitateur magnétique (WISESTIR fabriqué en Corée du Sud), la solution d'argile a été homogénéisée. Enfin, un coup d'œil sur le pH a été effectué directement sur un pH-mètre HANNA [65].

2) Taux d'humidité

Pour déterminer l'humidité, nous devons identifier la masse d'eau en séchant un matériau humide à 105 ± 5 °C pendant 24 heures jusqu'à ce qu'il devienne une masse constante. Après le processus de cuisson à la vapeur, la masse du matériau est appelée masse du solide (m_s). La teneur en eau est calculée par la formule 1 [66] :

$$H (\%) = (m_{\text{eau}} / m_s) \times 100 = (m_t - m_s / m_s) \times 100 \quad (1)$$

m_{eau} : masse d'eau (g)

m_s : masse de l'échantillon sec (g)

m_t : masse de l'échantillon humide (g)

3) Indice de gonflement

Le test d'indice de gonflement peut être appliqué en ajoutant de l'eau à l'argile. La rupture des couches suggère les caractéristiques de gonflement de l'argile. Cette procédure peut être exécutée en mettant 50 ml d'eau distillée dans une éprouvette graduée de 100 ml et en ajoutant 0,5 g d'argile. Ensuite, nous ajoutons une autre

quantité (0,5 g) d'argile après 45 minutes. Après 2 heures, le volume de gonflement est noté, puis l'indice est mesuré suivant la formule 2 [67] :

$$\text{Indice de gonflement (\%)} = (\text{volume de gonflement} \times 50) / (50 - \text{humidité}) \quad (2)$$

4) Colloïdalité

La nature colloïdale signifie que chaque particule d'argile est recouverte d'une double couche d'ions hydrosolubles de charge opposée. Pour mesurer la Colloïdalité de l'argile, on met une quantité d'argile avec 0,2 g de MgO pour permettre la défloculation. Après cinq minutes d'agitation, le mélange est placé dans une éprouvette graduée. Puis on mesure le volume V (ml) par surnageant après 24 heures. Le degré de colloïde est compté par la formule 3 [68] :

$$C (\%) = 100 - V \quad (3)$$

Où, C : le degré de colloïde, et V : volume de surnageant (ml)

5) Perte au feu

La perte au feu a été mesurée par la mise d'une quantité d'argile dans un creuset taré, soit son poids P₁. Le creuset est mis dans un four, avec augmentation progressive de la température jusqu'à 1000°C pendant 1h. Le creuset a ensuite été retiré et mis dans un dessiccateur pour refroidir et pesé, soit son poids P₂ [69]. La perte au feu est calculée par la formule 4:

$$\text{PAF} = (P_1 - P_2 / P_1) \times 100 \quad (4)$$

Avec : P₁ : masse avant calcination.

P₂ : masse après calcination.

6) Limite d'Atterberg (NF P 94-051)

La limite d'Atterberg est une méthode utilisée pour déterminer la valeur de l'eau, qui permet d'identifier le type de sol et de faire la distinction entre le limon et l'argile. La différence entre plasticité et liquidité est essentielle puisqu'elle figure l'indice de plasticité I_p [70].

a) Détermination de la limite de liquidité

Elle se réfère à la teneur en eau du matériau qui correspond à fermeture d'un cm des lèvres de la rainure après 25 chocs.



Figure. 23. Dispositif d'essai de limite de liquidité (appareil de Casagrande)

Les limites de liquidité sont déterminées sur le dispositif « Casagrande » (figure 23) qui est constitué d'une coupelle dans laquelle on met l'échantillon et d'une came mue par une manivelle qui soulève la coupelle et la laisse brusquement retomber sur un socle rigide.

Une quantité d'argile dans la coupelle (b), puis avec l'outil à rainure, on creuse au milieu de la coupelle un sillon dans la pâte (c). On soumet alors la coupelle à un certain nombre de chocs jusqu'à ce que le sillon se referme sur 1cm (d), l'étape de mesure la limite de liquidité montre dans la figure 24

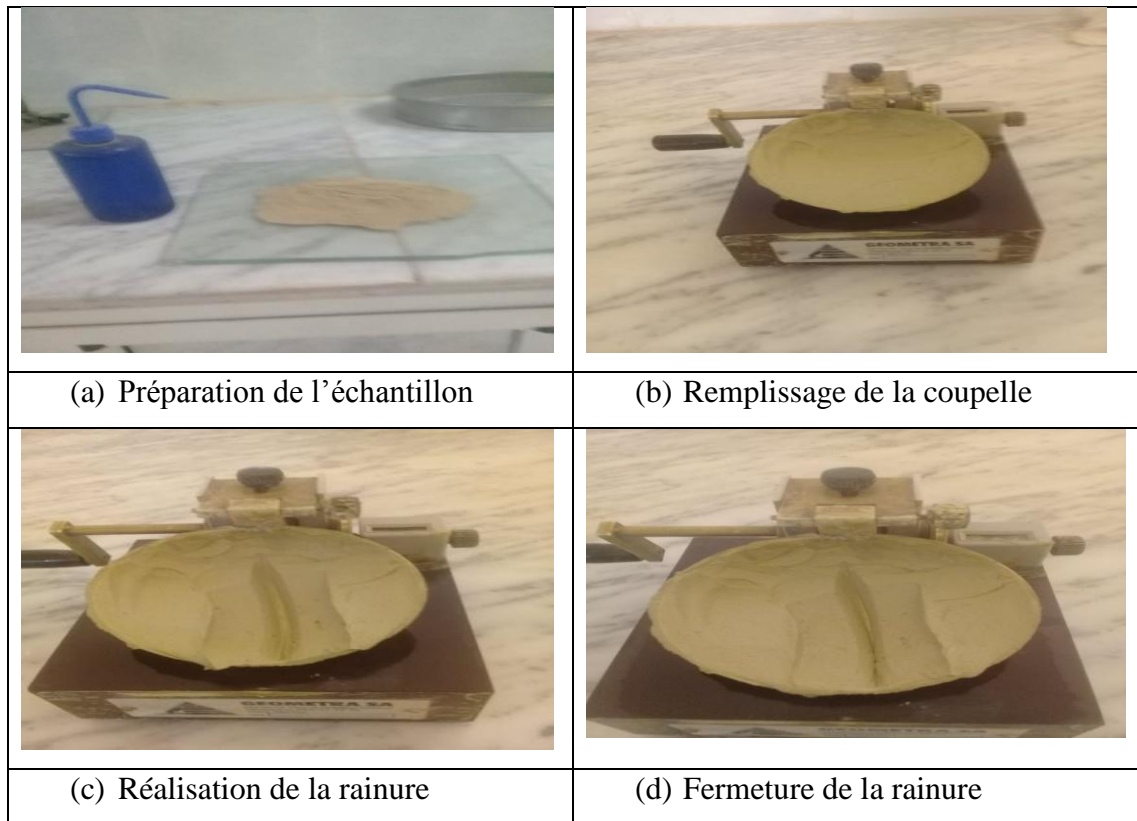


Figure. 24. Détermination de la limite de liquidité

b) Détermination de la limite de plasticité

Pour sécher l'argile, nous l'avons placée à l'étuve à une température de 105° C pendant une journée.

Ensuite, nous prélevons une partie de l'échantillon préparé pour former une boule. Ensuite, nous l'enroulons sur une plaque lisse pour obtenir un rouleau qui se coupe à un diamètre de 3 mm et une longueur d'environ 10-15 cm (figure 25). Si les rouleaux se cassent en même temps et que leur diamètre est de $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, la limite plastique est atteinte.

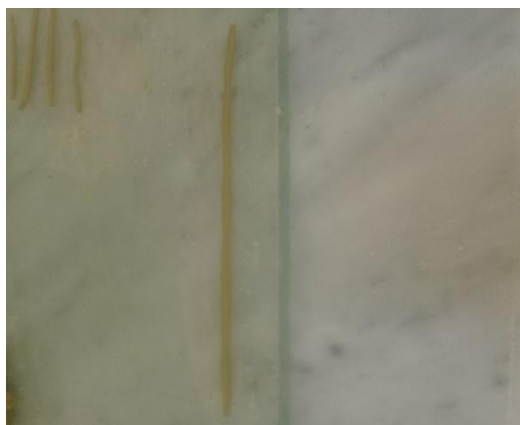


Figure. 25. Détermination de la limite de plasticité

III.1.4. Sciure de bois

Dans ce travail, nous avons utilisé la sciure qui est un résidu obtenu au cours des travaux de menuiserie, il est introduit dans des mélanges à l'état naturel (séché à l'air après ça, on a séché à l'étuvé pendant 24 h) ;

III.1.4.1. Traitement par NaOH

La sciure de bois a été utilisée comme renfort et a été obtenue dans un atelier de menuiserie. La sciure est passée par différentes étapes pour être traitée. Tout d'abord, elle a été séchée à l'air ambiant puis placée dans l'étuve pendant 24 h à une température de 80°C. Ensuite, la sciure a été traitée avec une solution de NaOH à concentration 5% pendant 24 h à température ambiante ; le rapport sciure/solution utilisé était de 1:15 (m/v). Les traces de NaOH ont été éliminées avec de l'acide sulfurique à 2 %, puis l'échantillon a été rincé à l'eau distillée. La dernière étape de cette opération est le séchage de la sciure de bois pendant 6 heures dans une étuve à 60°C [71]

III.1.4.2. Traitement par KMnO₄

La sciure de bois a été traitée pendant 3 min avec du KMnO₄ à 0,01 g.L⁻¹ qui a été dissous dans une solution d'acétone de densité 20°C (densité=0,791, pureté= 99,5%). Elle a ensuite été rincée à l'eau distillée pour enlever l'excès de permanganate de potassium [72]. Enfin, sciure de bois traité a été séchée à l'air ambiant. La figure 26 montre l'échantillon obtenu.

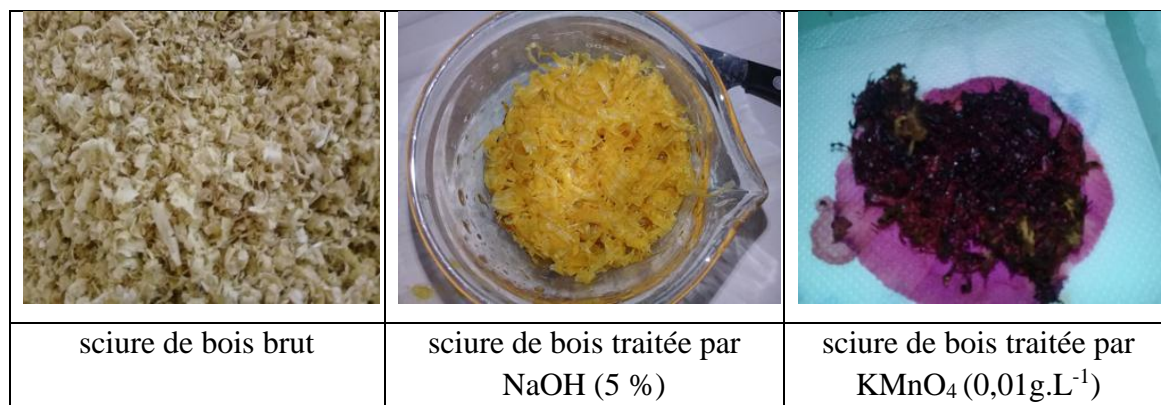


Figure. 26. Sciure de bois traitée et non traitée

III.2. Préparation des composites

Plusieurs étapes ont été réalisées pour préparer la composite souhaité. Tout d'abord, la sciure de bois à été placée avec différents pourcentages (0,5. 1. 1,5. 2 et 2,5 % en masse) dans un malaxeur (modèle "Controls" 65-L0012/E, fabriqué en France) avec une quantité d'argile et de chaux (12 % en masse). Le processus d'ajout de la chaux à la composition a été fait pour stabiliser le composite afin de minimiser la fragilité de l'argile. Avant d'hydrater le composite, les composants ont été soigneusement mélangés pour obtenir un mélange homogène. Enfin, l'eau du robinet a été ajoutée au mélange comme indiqué dans l'équation (5) :

$$\frac{E_a}{A} = 0.5 \quad (5)$$

Où E_a et A sont les quantités d'eau et d'argile en grammes, respectivement.

Le mélange est ensuite malaxé jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. Ce dernier a été coulé dans une forme prismatique (dimensions : 4 x 4x16 cm³). Ensuite, les moules ont été placés dans un dispositif de chocs à raison de 60 chocs par seconde. Cette opération a été réalisée afin de répartir le mélange de manière compatible dans les moules et d'expulsion les bulles d'air. Ensuite, la mixture a été démoulé et stocké dans une pièce humide (20°C, HR= 95%) pendant 28 jours. Ensuite, il a été séché dans une étuve ventilée à 60°C pour avoir une masse constante avant d'être testé. Il convient de souligner que le composite fabriqué est constitué de structures la sciure de bois mélangés aléatoirement à de l'argile (figure 27).



Figure. 27. Étapes de préparation des composites

La figure 28 montrant les méthodes de fabrication des matériaux composites.

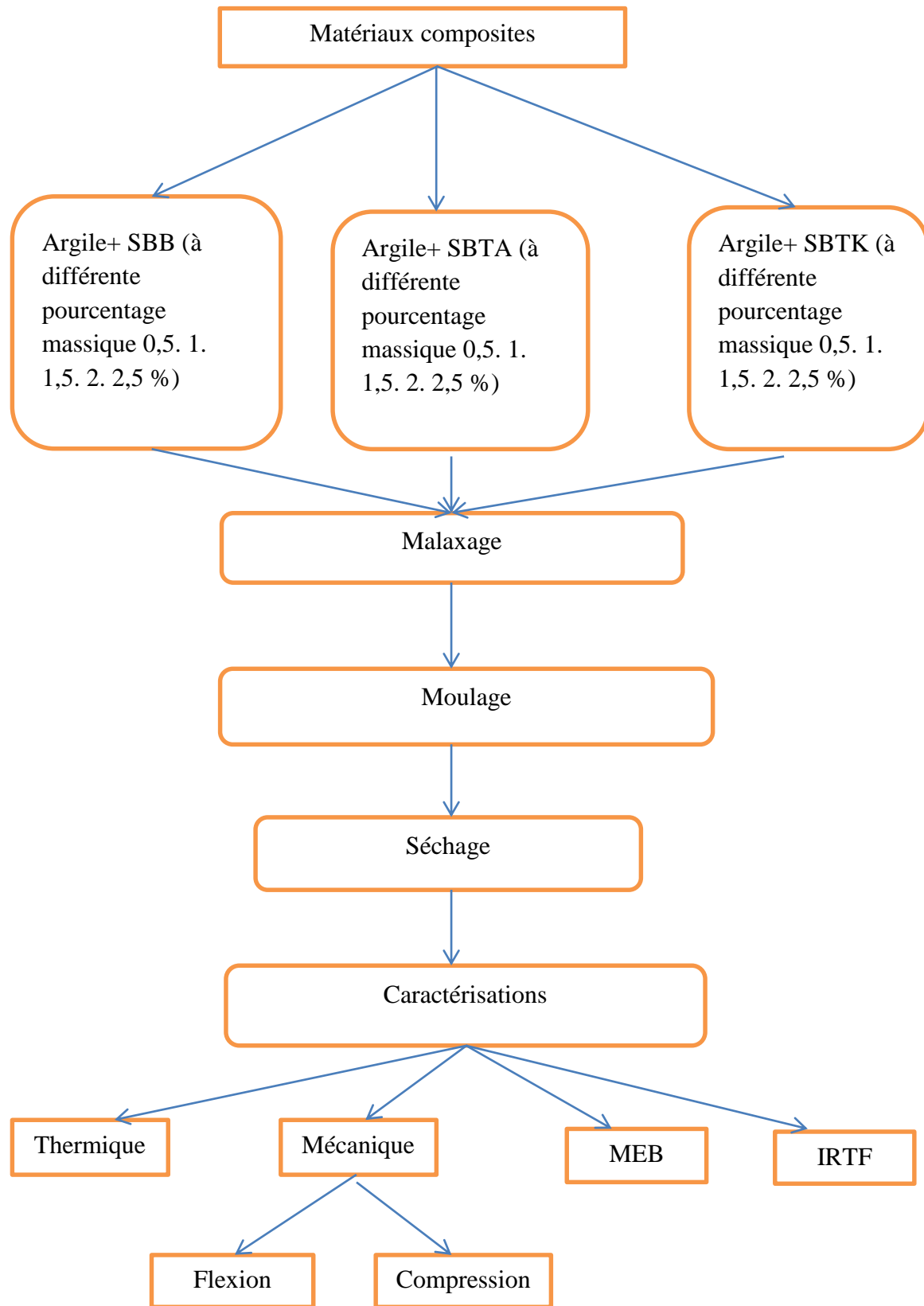


Figure. 28. Les méthodes de préparation des matériaux composites

III.3. Méthodes des caractérisations

III.3.1. Granulométrie par diffraction laser

Une méthode utilisée pour mesurer des objets d'une taille comprise entre 100 nm et 1000 μm . De plus, elle détermine la distribution granulométrique des matériaux granulaires en poudre. Le principe de mesure des diffractions laser s'exprime comme suit :

Pour appliquer ce processus, l'échantillon doit être placé dans un passeur d'échantillons. Pour s'assurer que l'échantillon circule à travers la lentille de la taille des particules, le passeur d'échantillons doit être fourni avec un agitateur et une pompe. Pendant la mesure, deux faisceaux laser mesurent l'intensité du rayonnement reçu par les deux bancs de capteurs et modélisent le signal mesuré par le capteur. Par l'adaptation des signaux théoriques au signal de mesure, on obtient la distribution granulométrique. Cela reflète la distribution en volume de la taille des particules grâce à l'utilisation d'appareil de type MASTERSIZER 2000 (2 mm à 0,2 μm) [73].

III.3.2. Fluorescence X

C'est une technique utilisée pour identifier la composition élémentaire des matériaux. Il peut être appliqué comme suit. Tout d'abord, nous devons placer l'échantillon sous des faisceaux de rayons X. Les atomes qui ont pulvérisé l'échantillon passent de l'état fondamental à l'état excité à l'action des rayons X. L'état excité doit atteindre la stabilité et en atteignant cette stabilité, il génère de l'énergie émettrice en photons X. Chaque atome avec sa configuration électronique émet des photons d'énergie, et sa longueur d'onde est λ . Le phénomène des rayons X fluorescents est une émission secondaire de l'atome qui constitue l'échantillon. Par conséquent, l'analyse des rayonnements X secondaires nous donne un aperçu des composants chimiques de l'échantillon et de ses concentrations massiques [74].

III.3.3. La spectroscopie infrarouge

L'analyse est effectuée avec spectromètre à transformée de Fourier. Les spectres IR ont été notés sur un spectromètre à transformée de Fourier du type JASCO FT/IR-4200 type A (fabriqué en France). Les spectres IRTF sont obtenus en mélangeant les échantillons (1 mg) avec du KBr (100 mg). La plage d'absorption (4000–400 cm^{-1}).

III.3.4. La diffraction de rayon X

Elle est initialement utilisée pour identifier la structure atomique et moléculaire d'une substance. De plus, ce test permet de reconnaître :

- les caractéristiques structurelles (Paramètres de maille, Déformation, Taille de grain, Composition de phase).
- l'arrangement cristallin.
- épaisseur et intensité [75].

On peut faire ce test avec l'appareil de diffractomètre à haut score X`Pert (mesure de diffraction des rayons X à l'aide de X`Pert Pro PW3209, PANalytical).

Également, Segal et al. [76] ont développé une méthode empirique pour calculer l'indice de cristallinité de la cellulose qui s'exprime avec (équation 6):

$$\text{CrI (\%)} = (I_{002} - I_{\text{am}}) / I_{002} \times 100 \quad (6)$$

Où, I_{002} représente l'intensité de cellulose I.

I_{am} indique l'intensité attribuée à la phase amorphe.

III.3.5. Microscopique électronique à balayage

D'appareil du type TESCAN VEGA3 SBU Easy Probe piloté complètement par ordinateur travaillant en mode topographie (électrons secondaires) et en mode composition (électrons rétrodiffusés). Il est aussi équipé d'un microanalyseur EDX du type Bruker pour l'analyse chimique.

III.3.6. Propriétés mécaniques

III.3.6.1. Caractérisation mécanique en flexion

Il s'agit d'essais de flexion à trois points et de compression, appliqués sur les échantillons préparés, en utilisant un appareil d'essais mécaniques de marque « CONTROLS » (fabrique en Italie de capacité maximale 100 KN en compression boucle fermé par PC).

Le test a été réalisé sur une éprouvette prismatique de dimensions 4x4x16 cm³ (figure 29) après 28 jours. Après le gâchage avec une vitesse de déplacement de

traversée de 0.1mm/min, les valeurs de la force et de déplacement de la traversée mobile sont enregistrées simultanément.

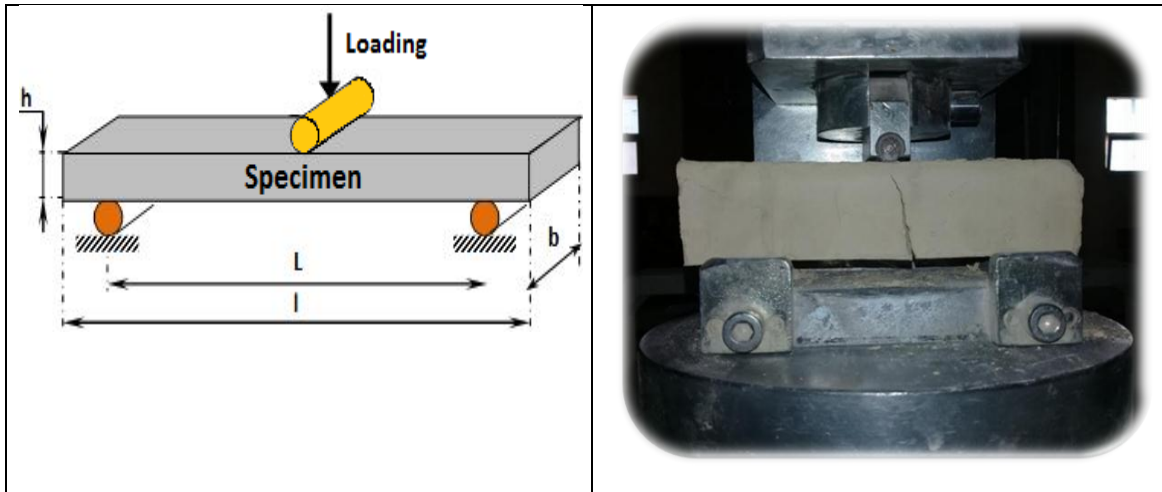


Figure. 29. Essai de flexion à trois points

La contrainte maximale (σ_{Max}) et le module de flexion (E_f) de matériau et calculée selon la norme EN ISO 14125 (ISO 14125 1998) par l'équation 7: [77]

$$\sigma = \frac{3.F.L}{2.b.h^2} \quad (7)$$

Avec : σ : Contrainte de flexion, MPa.

F : Charge appliquée, N

L : Distance entre les portées, mm

b : Largeur de l'éprouvette, mm

h : Epaisseur de l'éprouvette, mm

III.3.6.2. Test de Compression

Pour appliquer ce test, nous avons exposé l'échantillon à des charges croissantes à une vitesse de déplacement de 0,1 mm.min⁻¹ à l'aide de la machine de type "CONTROLS". La résistance à la compression est le quotient du rapport des charges de rupture sur les sections transversales de l'échantillon. La figure 30 présente l'essai de compression.

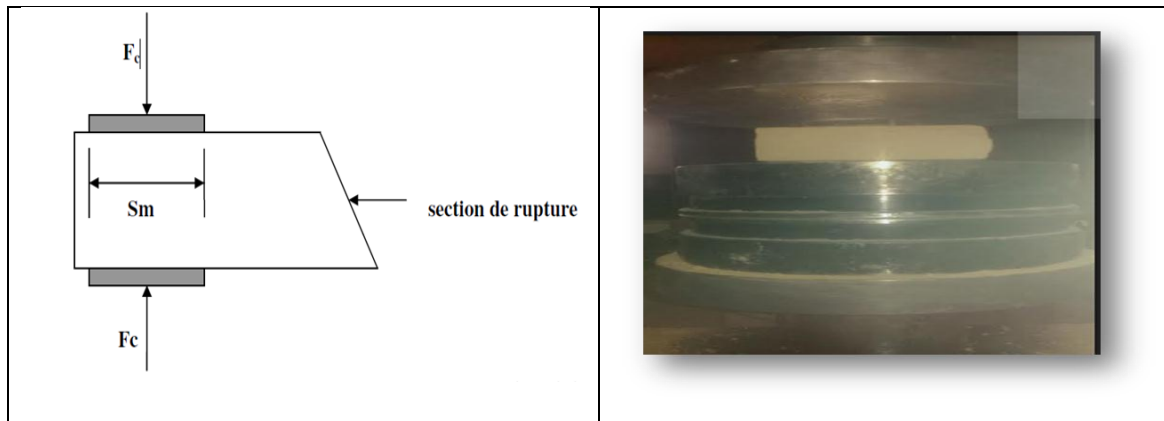


Figure. 30. L'essai de compression

III.3.7. Propriétés thermiques

Il est connu qu'il existe quatre paramètres thermiques qui caractérisent un matériau, à savoir : la conductivité thermique, la capacité calorifique, la diffusivité thermique et l'effusivité. De ces derniers, deux sont indépendants, donc la reconnaissance de deux d'entre eux suffit pour en déduire les autres.

a. La conductivité thermique

Le coefficient λ est une valeur qui caractérise le comportement thermique d'un matériau vis-à-vis du phénomène de conductivité pure. Pour les matériaux homogènes et isotropes, si $\vec{\varphi}$ est la densité de flux thermique et la température, alors la loi de Fourier donne :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad } T} \quad (8)$$

Avec :

$\vec{\varphi}$: Densité de flux thermique, W.m^{-1}

T : Température, K

λ : Conductivité thermique, $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

b. La capacité calorifique

Il répercute la capacité du matériau à économiser de l'énergie et à libérer de la chaleur. Elle se manifeste par la capacité volumétrique et est exprimée par le produit de $J.m^{-3}.K^{-1}$, ρc , en tenant compte de la densité ρ du matériau.

ρc : capacité calorifique, $J.m^{-3}.K^{-1}$

c. La diffusivité thermique

C'est une grandeur qui détermine le comportement thermique du matériau dans la zone de transition. Elle est liée à la conductivité thermique et à la capacité calorifique volumique telle qu'exprimée dans la relation 9:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (9)$$

Avec :

α : Diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$

ρ : Masse volumique, $Kg.m^3$

c : chaleur spécifique, $J.Kg^{-1}.K^{-1}$

d. L'effusivité thermique

Il désigne la vitesse à laquelle le matériau absorbe la chaleur. En d'autres termes, il décrit la capacité du matériau à échanger l'énergie thermique avec l'environnement adjacent. Cette propriété peut être numérisée à travers la relation entre la conductivité thermique et la capacité calorifique volumétrique, comme l'a révélé la relation 10 [78]

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (10)$$

Avec :

E : Effusivité thermique, $J.K^{-1}.m^{-2}.S^{-1/2}$

III.3.7.1. Les méthodes de mesure

Elles sont classées en deux types : les méthodes en régime stationnaire et en mode transitoire (méthode à fil chaud, ruban chaud et Hot Disk.). Dans le premier cas, la source est maintenue à une température constante T_0 , alors que dans le second cas, le "flux de chaleur" est créé à l'instant $t = 0$ de début de manipulation, sous forme d'une

impulsion très brève (type dirac), d'une fonction échelon de tension ou de courant continu, ou d'une tension sinusoïdale.

a- Méthode de hot disk

Nous nous sommes appuyés sur le Hot disk "TPS 2500" pour mesurer la conductivité thermique des matériaux suivant la norme ISO 220072.

Le dispositif « Hot disk » est menué par des capteurs, qui contiennent des résistances fonctionnent selon l'effet Joule. Le capteur est un contrôleur de température pour fournir des informations précises sur le matériau a étudié [79] :

La relation entre la température moyenne et la conductivité représentée par la relation 11 :

$$\Delta T(\tau) = \frac{P_0}{\pi^2 a \lambda} D(\tau) \quad (11)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{\kappa t}}{a} \quad (12)$$

$$\lambda = \kappa \cdot \rho \cdot c \quad (13)$$

Avec :

$\Delta T(\tau)$: la température moyenne

τ : Un paramètre sans dimension qui est appelé le rapport de temps caractéristique

λ : la conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

κ : la diffusivité thermique ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

$\rho \cdot c$: chaleur spécifique ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)

$D(\tau)$: est une fonction temporelle sans dimension

P_0 : est la puissance de sortie du capteur de Hot disk ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

a : est le rayon du disque

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Ce chapitre discute et interprète les résultats obtenus des composites élaborés à base d'argile avec 12 % de chaux renforcé par des sciures de bois (brute et traitées chimiquement). Dans cette partie, nous discutons l'influence de l'addition de sciure sur les propriétés mécanique et thermiques de ces composites.

IV.2. Paramètres physico-chimiques

Le tableau 5 montre les valeurs de divers paramètres pour les échantillons d'argile. On peut voir que la valeur du pH (pH = 8,74) révèle la basicité de l'échantillon d'argile [80], qui est due aux sels solubles à caractère basique comme carbonates et les bicarbonates alcalins, et qui entrent généralement dans la composition de l'argile. Nous observons que la valeur du taux d'humidité est faible, cela explique le caractère non hygroscopique. Une valeur colloïdale de 6 % explique la faible ionisation des particules entrant dans la composition argileuse [81]

Tableau 5. Paramètres physico-chimiques de l'échantillon argileux

Paramètres	pH	H %	C %	I _G %
Valeur	8,74	11,11	6	44,9

Avec : H : taux d'Humidité, C : Colloïdité, I_G : indice de gonflement

IV.2.1. Composition chimique

Le tableau 6 représente l'analyse chimique de l'argile. Les résultats révèlent que la silice et l'alumine sont les fondamentaux oxydes de l'échantillon étudié. Leurs pourcentages sont respectivement de 35,21 % et 13,62 %. Ainsi, on constate qu'il s'agit d'un aluminosilicate. En revanche, le taux de calcium est de 15,53 % c'est-à-dire que le matériau étudié est riche en calcite (CaCO₃). Il faut souligner que la fraction alumine/silice fournit des informations vis-à-vis de la perméabilité du matériau. Lorsque le rapport est massif, la perméabilité est importante [82]. Dans notre cas, le rapport Al₂O₃ / SiO₂ est petit = 0,38. De là, on peut conclure que cette faible valeur est similaire à la teneur en eau [83]. De plus, le rapport SiO₂ / Al₂O₃ = 2,58 (substitution maximum de Si⁴⁺ par Al³⁺) est inférieur à la valeur standard de la bentonite de 2,7. Les résultats indiquent l'existence de quartz en petite quantité dans le rapport argileux [84].

Ainsi, la composition globale des autres oxydes tels que (Fe₂O₃, MgO, K₂O et Na₂O) atteint un pourcentage de 13 %. En conséquence, on pourrait arriver à la conclusion que l'argile examinée n'est pas pure [85]. La perte au feu correspond à la perte de masse de poudre placée dans un four à 1000°C. Dans ce cas, vous trouverez une valeur élevée d'environ 22,20 %. Cette dernière peut être en relation avec la présence de minéraux carbonatés et silicatés [86]. La perte de masse des minéraux argileux à 1000 °C est associée à la perte d'eau adsorbée et à la déshydroxylation du phyllosilicate [87], ce qui confirme l'analyse de diffraction X qui ont montré la présence de calcite et de silice.

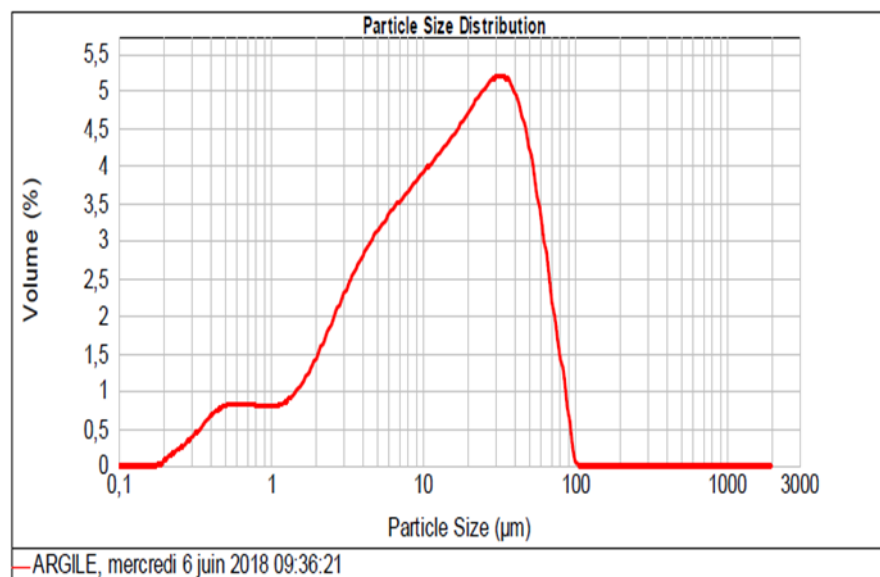
Tableau 6. Compositions chimiques de l'argile

Constituants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
(%)	35,21	13,62	5,64	15,53	3,41	0,35	3,85	0,10	22,20

IV.3. Paramètres géotechniques de l'argile

IV.3.1. Analyse granulométrique

La figure 31 désigne la répartition des échantillons d'argile en termes de diamètre en µm. Les résultats obtenus révèlent que l'argile disponible est composée de près de 19 % de limon et 78 % de sable. Suite à cette vue, il convient de souligner que l'argile utilisée dans cette expérience est sablo-limoneuse, qui montre que l'argile est constituée de particules très fines. Les argiles sont des roches poly-dispersées, c'est-à-dire que leurs particules varient en taille [86].



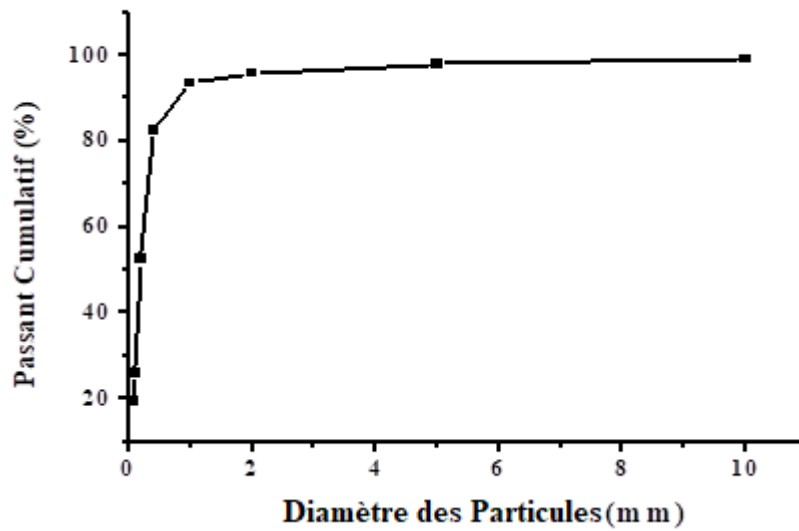


Figure. 31. L'analyse des particules d'argile

IV.3.2. Limites d'Atterberg

D'après la figure 32, la valeur de liquidité est de l'ordre de 47, la valeur de plasticité est de l'ordre de 21,5 et l'indice de plasticité est de 25,5. En vue de la classification d'Atterberg [88], on peut déduire que notre argile est moyennement plastique.

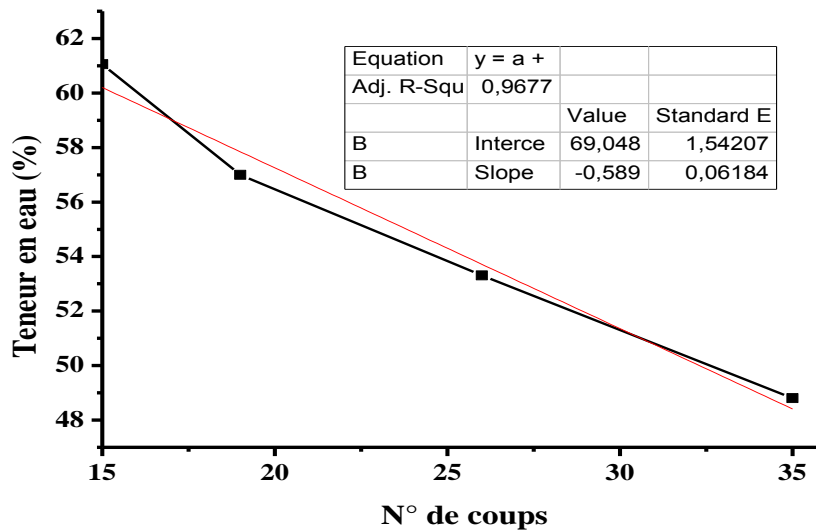


Figure. 32. Courbe de la limite de liquidité

Tableau 7. Valeur de limite d'Atterberg

W _l	W _p	I _p
47	21,5	25,5

IV.3.3. Diffraction des rayons X de l'argile

L'analyse spectrale de la DRX de l'argile (figure 33) indique que le matériau se compose des composants suivants : quartz (SiO₂), calcite (CaCO₃) et dolomite. Plus important encore, la présence de quartz atteint son maximum par rapport à celle de la calcite. On peut déduire que la composition minéralogique de la fraction argileuse de cette matière contient 35,21 % de quartz et 15,53 % de calcite comme croutes principales de notre échantillon.

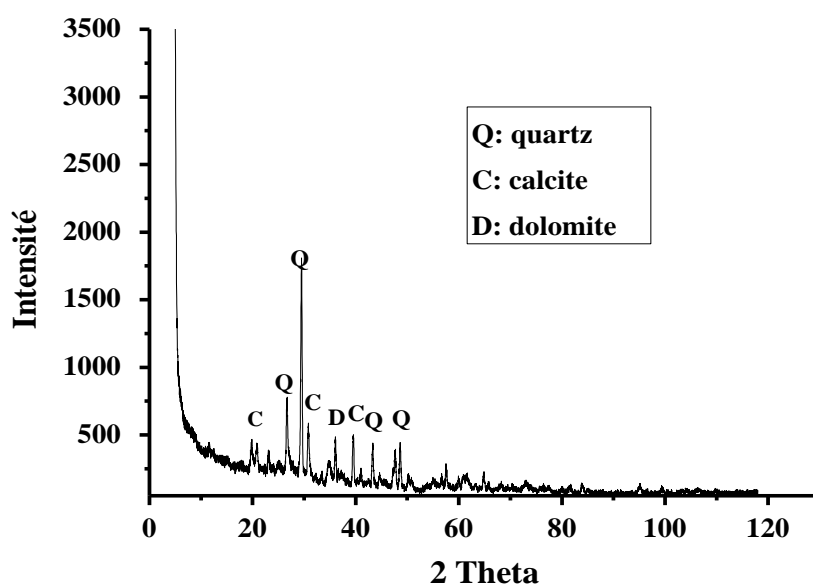


Figure. 33. Diffraction des rayons X de l'argile

IV.3.4. Analyse spectroscopique infrarouge de l'argile

La figure 34 montre le spectre IRTF de l'argile étudiée. La bande de 3614,0 cm⁻¹ s'étendant de 3200 à 3800 cm⁻¹ correspond à la vibration d'expansion et de contraction du groupe OH interne. La bande de 1801 cm⁻¹ correspond aux vibrations d'élongation du groupe carbonyle (C = O) [89]. La bande de 1440 cm⁻¹, d'autre part, peut être attribuée aux vibrations d'élongation de CH₃ [90]. La bande 1024 cm⁻¹ correspond aux

vibrations d'élongation des groupes siloxane-(Si-O)- [91]. La bande des 784 cm^{-1} peut être due aux vibrations de déformation du Si-O-Al [91]. Enfin, les deux bandes de 867 à 710 cm^{-1} correspondent à la vibration d'étirement de la liaison CO correspondante (CaCO_3) [92.93].

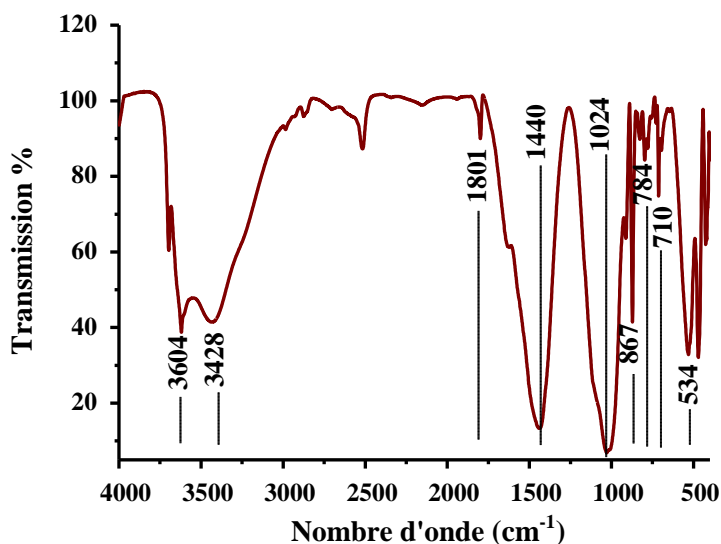


Figure. 34. Spectre infrarouge de l'argile

IV.4. Les caractérisation des sciures de bois

IV.4.1. Diffraction de RX

DRX, test appliqué pour examiner la structure cristalline des fibres, en supposant que le résultat du traitement alcalin améliorera le pourcentage de cristallinité de la cellulose dans la fibre [92].

La figure 35 montre les diffractogrammes aux rayons X des fibres traitées et brute. Comme on peut le voir, tous les échantillons présentent le pic caractéristique de la cellulose I, qui correspond aux plans cristallographiques 002 [94]. Les résultats indiquent que l'indice de cristallisation de sciure traitée avec NaOH et KMnO_4 a augmenté par rapport à la sciure non traitée. L'indice de cristallinité de la sciure non traitée a atteint la valeur de 17,89 %, tandis que pour la sciure traitée avec NaOH et KMnO_4 , les valeurs sont respectivement de 45,96 % et 39,19 % (Tableau 8). Cela peut être justifié par le fait que l'utilisation de NaOH et KMnO_4 peut réduire l'hémicellulose et la lignine amorphe avec des impuretés telles que la cire et les huiles et réarranger les

régions cristallines de sorte que la fibre a une nature plus cristalline [95-97]. Par conséquent, on peut noter que le degré de cellulose est plus élevé dans les échantillons traités en raison d'une diminution de l'hémicellulose pendant le processus de traitement [98]. Le traitement alcalin affecte également les propriétés cristallines en transformant la cellulose I en cellulose II [89]. En revanche, l'indice de cristallinité de la sciure traitée au KMnO_4 était diminué par rapport à celui de la sciure traitée au NaOH . Cela est possiblement dû à la croissance de la teneur en cellulose amorphe pendant le traitement au KMnO_4 [99].

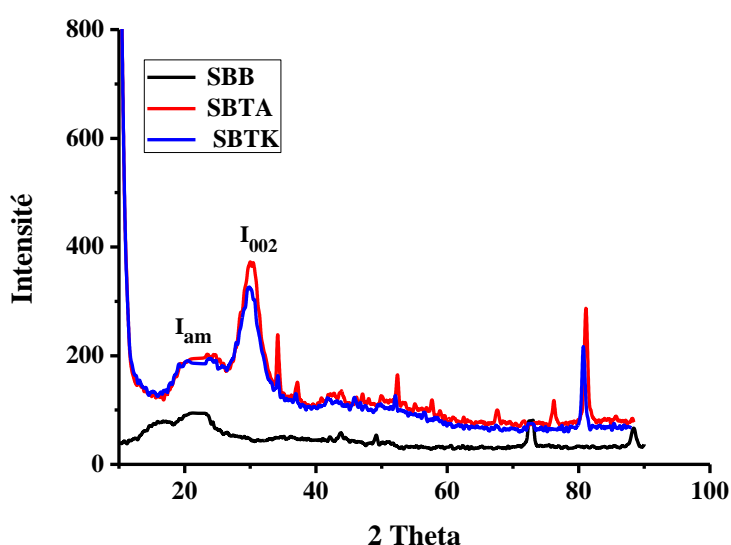


Figure. 35. Diffractogrammes RX de SBB (sciure de bois brute), SBTA (sciure de bois traitée alcalin), SBTK (sciure de bois traitée avec du KMnO_4)

Tableau 8. Indice de cristallinité (CrI%) de la sciure de bois non traitée et traitée

Matériau	SBB	SBTA	SBTK
I_{002}	95	372	324
I_{am}	78	201	197
CrI (%)	17,89	45,96	39,19

IV.4.2. Test IRTF

La figure 36 montre le spectre de la sciure de bois traité et brute. La bande environ de 3453 cm^{-1} est due à la vibration d'élongation O-H montrant une intensité accrue pendant le traitement. Cela indique une augmentation de la teneur en oxygène de la

sciure. La bande à 2920 cm^{-1} correspond à la vibration d'étirement des liaisons C-H des groupes -CH et -CH₂ des segments cellulose, lignine et hémicellulose [100]. La bande à 1640 cm^{-1} est créditée aux groupes carbonyles C=O (1744 cm^{-1}) qui représentent les hémicelluloses. Ceux-ci disparaissent cependant pendant le traitement de la sciure en raison de l'extraction importante de l'hémicellulose de la sciure pendant le traitement. La bande de 1640 cm^{-1} est attribuée à l'étirement et à la vibration de la liaison H-OH de l'eau [100]. Néanmoins, la bande de 1420 cm^{-1} est attribuée aux vibrations de déformation des liaisons C-H des cycles aromatiques. Mais la bande 1264 cm^{-1} est liée à la déformation des groupes acétyles (xylanes) de la lignine. Enfin, la bande 1030 cm^{-1} est affectée par une élévation des C-O de la cellulose [100-102].

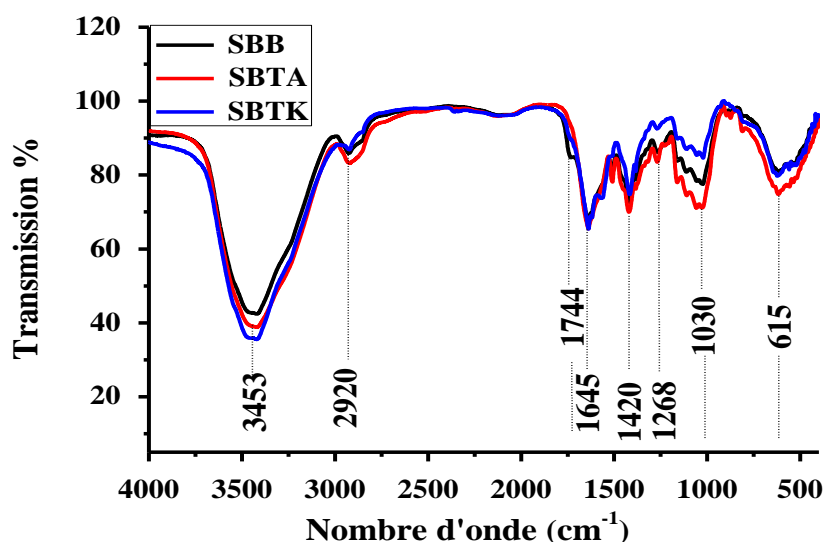


Figure. 36. Spectres IRTF de la sciure de bois non traité et traité

IV.5. Analyse par spectroscopie infrarouge des composites

La figure 37 illustre les spectres des composites renforcés avec la fibre utilisée. La bande d'environ $3705\text{-}3428\text{ cm}^{-1}$ est causée par la vibration d'élongation O-H qui ressemble à l'intensité augmentée pendant le traitement. Cependant, cela indique l'augmentation de l'oxygène dans la sciure. Cette augmentation peut être due au clivage des liaisons sensibles provoqué par le traitement [103]. La bande d'environ 2513 cm^{-1} personnifie la valence vibratoire (CH) de la cellulose qui augmente avec le traitement. De plus, il faut noter que les bandes de 1441 cm^{-1} convergent vers la vibration d'allongement CH₃. Enfin, la bande 1024 cm^{-1} représente les vibrations de valence des liaisons CO et COC de la cellulose [104].

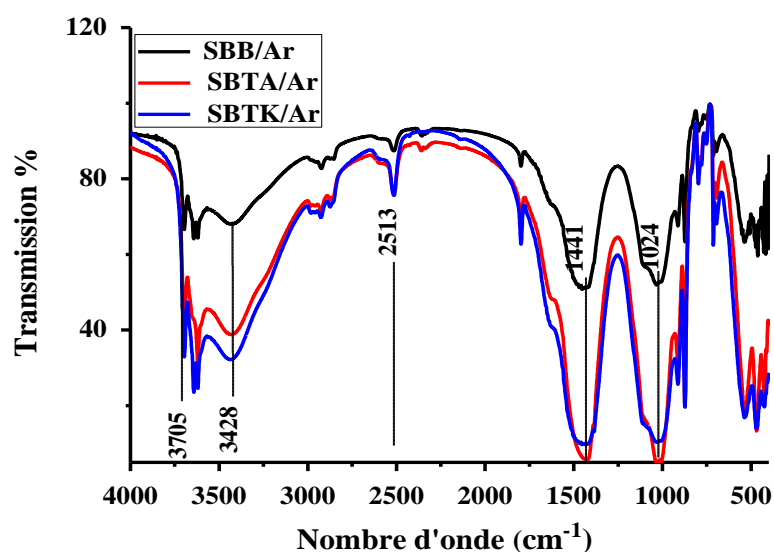


Figure. 37. Spectres IRTF des composites : SBB/Ar, SBTA/Ar, et SBTK/Ar

IV.6. Test MEB

La figure 38 montre les micrographies MEB. La figure 38(a), basée sur les résultats obtenus par XRD, indique la présence de carbonates et de quartz dans l'échantillon, de sorte que les carbonates (calcite) apparaissent comme des accumulations claires et le quartz comme de petits grains [105,106]. Sur la base de la figure 38(a), nous pouvons également noter l'émergence de cavités de différentes tailles, conduisant à la fragilité de la matrice argileuse. En revanche, nous pouvons obtenir une microstructure homogène avec de petites cavités et moins de fissures si l'argile est renforcée avec de la sciure non traitée, comme le présente la figure 38(b). De plus, comme le montre la figure 38(c), le composite de la sciure traité à l'alcali présente une diminution remarquable des cavités, où la majorité des pores sont soudés et le matériau devient plus compact. Le traitement alcalin de la sciure de bois dissout les couches de cire sur l'extérieur de bois, éliminant la plupart de la lignine et de la pectine, ce qui donne une surface plus rugueuse [107].

La même observation a été faite par d'autres chercheurs qui ont suggéré que cette rugosité peut être imputé à l'élimination de l'hémicellulose, de la lignine et des composants cellulose après le traitement, ce qui facilite la liaison mécanique entre la sciure de bois et la matrice argileuse [108-110]. En outre, la même observation a été faite sur la base de la figure 38(d) où une réduction substantielle des cavités est

fortement détectée. Ceci a toutefois contribué à l'adhésion entre la matrice d'argile et la sciure de bois traité au permanganate de potassium. Par conséquent, le traitement au permanganate a un effet positif sur l'amélioration des propriétés mécaniques du composite étudié, car il sculpte la surface des fibres et les rend plus rugueuses en raison de l'interaction du permanganate avec les composants de la lignine, et il peut également réduire la nature hydrophile de la sciure [111-113].

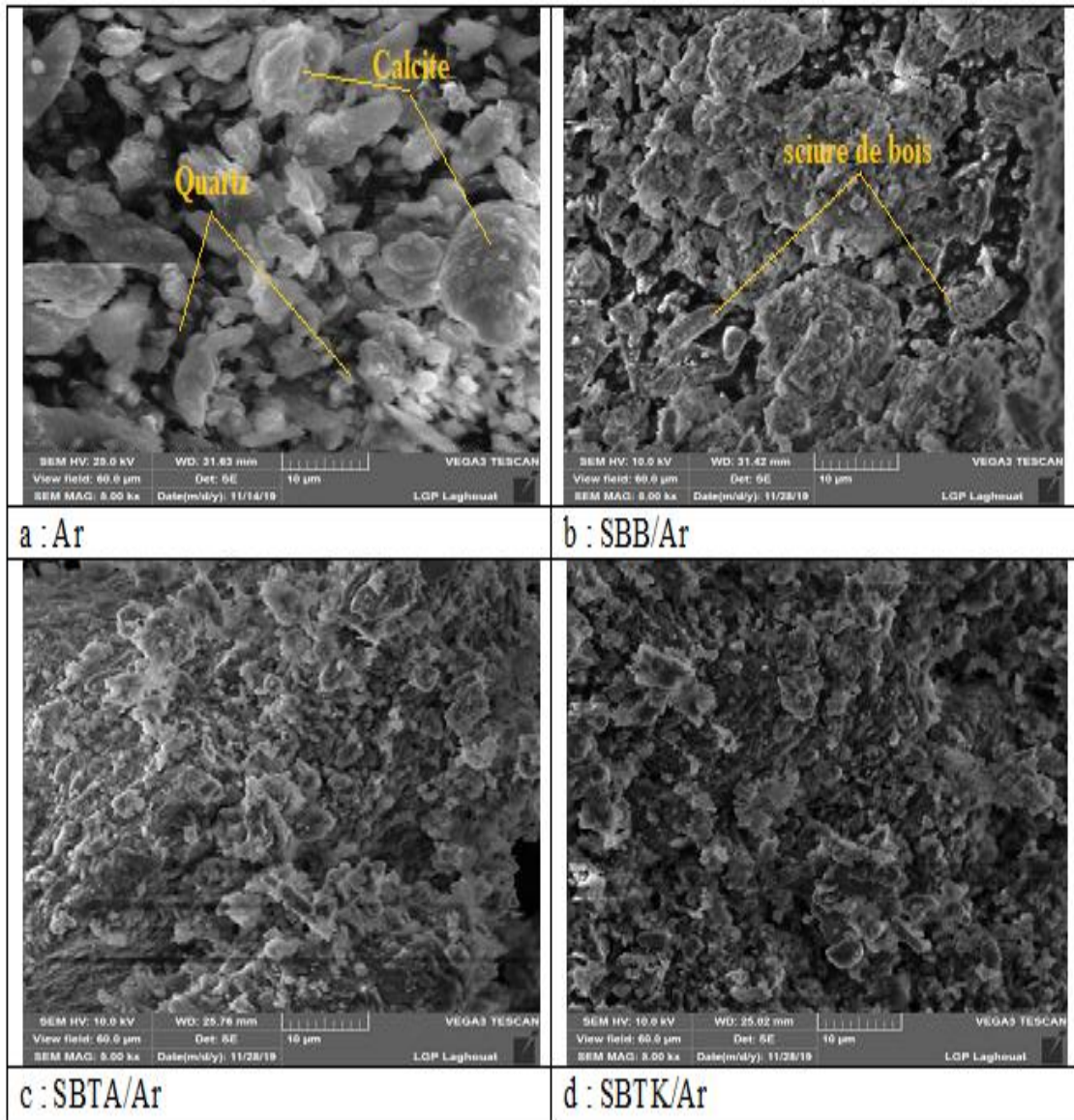


Figure. 38. Micrographies MEB : (a) argile (Ar), (b) composite SBB/Ar, (c) composite SBTA/Ar, (d) composite SBTk/Ar

IV.7. Les tests mécaniques

IV.7.1. Effet de l'addition de la chaux sur les propriétés mécaniques du matériau étudié

Pour améliorer la résistance mécanique de l'argile, on a ajouté la chaux avec différents pourcentages en poids (3.6.9.12.15 %) (figure 39). Nous constatons que l'ajout de chaux affecte positivement sur les propriétés mécaniques de l'argile.

Le meilleur résultat de la résistance mécanique de notre argile à pourcentage massique 12 % de chaux.

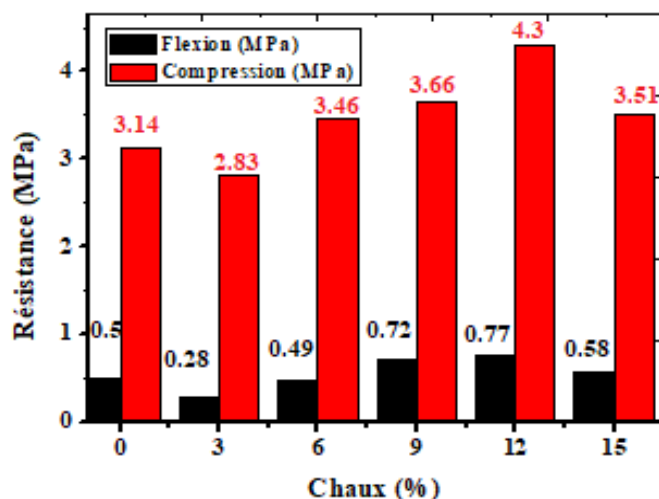


Figure. 39. Effet de l'addition de la chaux sur la résistance de flexion et compression du matériau étudié

La résistance à la compression augmente du fait de l'ajout de chaux dans la matrice car elle stabilise le sol argileux et contribue à réduire sa fragilité. Ce résultat concorde fortement avec d'autres recherches effectuées sur le même point [114,115].

La réaction de la chaux avec les particules de sol argileux a conduit à l'augmentation de la résistance du fait qu'elle aide à former d'un agent cimentant qui lie les particules de sol.

D'après les résultats, il a été montré que l'ajout de chaux à pourcentage (12 %) sur l'argile conduit à une augmentation de la résistance de flexion et compression. Ainsi,

une matrice a été réalisée par l'argile avec de la chaux (12 %) pour fabriquer des composites.

IV.7.2. Effet de la sciure de bois non-traitée sur les propriétés mécaniques

On suppose généralement que l'ajout de fibres aux matériaux affecte leurs propriétés et leur comportement. Dans cette expérience, la sciure de bois a été ajoutée à l'argile; le tableau 9 expose les valeurs moyennes des résultats de compression et de flexion. Il convient de noter que l'ensemble des échantillons était basé sur différents ratios avec un minimum de trois échantillons pour chaque proportion. Les résultats montrent que l'addition de la sciure de bois accroît la résistance à la compression de 4,3 à 4,70 MPa (environ 9 %) de composite. De même, l'ajout sciure de bois augmente la résistance à la flexion de 0,77 à 0,84 MPa de composite. L'augmentation de la résistance à la compression est liée à l'homogénéité de la microstructure due à la présence de moins de pores, comme le montrent le test MEB (figure 38 (b)). En outre, l'ajout de sciure de bois à 2,5 % indique une diminution significative de la résistance à la flexion et à la compression (0,80 MPa et 4,65 MPa) de composite lorsque le composite se fragilise. Par conséquent, le pourcentage optimal de la sciure de bois nécessaire pour produire une matrice d'argile à haute résistance avec une force significative est de 2 % de la sciure de bois.

Tableau 9. Résultats des tests mécaniques des mélanges préparés

Composition Argile+ Chaux 12 % (m)	Ratio de la sciure de bois % (m)	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
SBB/Ar	0	0,77	4,3
	0,5	0,78	4,59
	1	0,80	4,60
	1,5	0,82	4,63
	2	0,84	4,70
	2,5	0,80	4,65

IV.7.3. Effet de la sciure de bois traitée sur les propriétés mécaniques

La figure 40 montre la résistance mécanique des échantillons étudiés avec de la sciure de bois traitée/non traitée. Les résultats obtenus montrent une amélioration des caractéristiques mécaniques après le traitement. Les valeurs maximales de résistance à la flexion sont de 0,89 MPa et de 0,88 MPa pour le composite de la sciure de bois traité aux alcalis et le composite de la sciure traité au permanganate, respectivement. De plus, le composite la sciure traité présente la plus grande résistance à la compression (4,87 MPa) et (4,82 MPa) que le composite non traité (4,70 MPa). Par conséquent, la résistance mécanique pourrait être améliorée et modifiée lorsque le matériau est traité. Cependant, cela pourrait être justifié par l'amélioration de l'adhérence entre la sciure de bois et la matrice minérale [116]. Ce comportement est principalement lié aux effets du traitement chimique du matériau. Or, ce traitement éradique les matériaux amorphes sur la surface externe de la sciure de bois et dissout une partie de la lignine et de la pectine. Ainsi, il contribue à produire une surface rugueuse qui améliore l'adhésion inter-faciale de la matrice et des renforts [117,118].

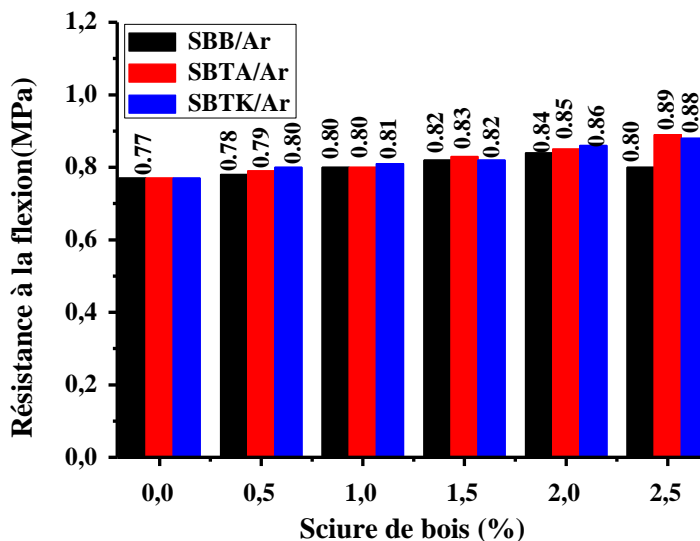


Figure. 40. Effet d'addition de la sciure de bois traitée et non traitée sur la résistance à la flexion du composite étudié

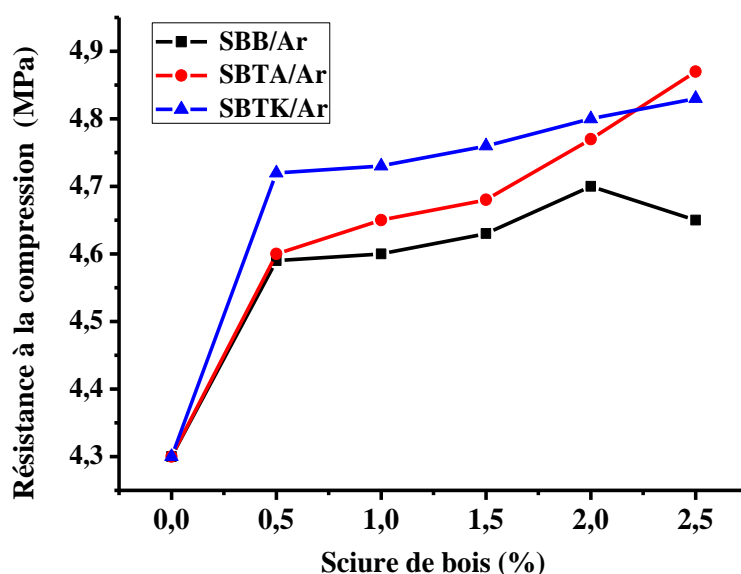


Figure. 41. Effet d'addition de la sciure de bois traitée et non traitée sur la résistance à la compression du composite étudié

IV.8. Propriétés thermiques

Le tableau 10 présente les propriétés thermiques des composites étudiés. Les résultats confirment que la conductivité thermique des composites renforcés avec de la sciure de bois non traitée ($0,37 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est inférieure à celle de l'argile brute ($0,44 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Par conséquent, la conductivité thermique des composites renforcés par la sciure de bois traitée augmente d'environ 11 % traitée par (NaOH) et 8 % traitée par (KMnO_4) par rapport au composite renforcée par la sciure de bois non traitée. Ceci est dû au traitement chimique qui améliore l'adhésion inter-faciale, car il conduit à une diminution des vides, facilitant ainsi le transfert de chaleur [119].

On constate que l'addition de la sciure de bois non traitée à la matrice argileuse a entraîné une réduction de la conductivité thermique du composite puisqu'elle génère de la porosité et des bulles d'air. Ce dernier point est important car il réduit la conductivité thermique [120,121], ce qui améliore l'isolation thermique du composite. La même observation a été confirmée par H. Chaib et coll. [122] les auteurs ont rapporté que l'ajout de palmier dattier à la matrice d'argile conduit à une diminution de la conductivité thermique.

Tableau 10. Propriétés Thermiques des Composites

Echantillons	Conductivité thermique $\lambda(\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$	Diffusivité thermique $E (\text{mm}^2.\text{s}^{-1})$	Chaleur spécifique $C (\text{MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1})$
Ar	0,447030686	0,397303054	1,125162973
SBB/Ar	0,376375010	0,420488608	0,895089672
SBTA/Ar	0,411874900	0,501924340	0,820591606
SBTk/Ar	0,405492428	0,431557463	0,939602399

IV.9. Conclusion

Ce travail est une tentative d'étudier l'effet la sciure de bois sur la performance mécanique et thermique d'un composite d'argile fusionné avec de la chaux 12 % (masse). L'objectif de cette étude était d'utiliser le bio-composite de la sciure de bois comme matériau de construction. En conséquence, une grande attention est accordée à l'exploitation des fibres pour répondre à la pénurie des sources naturelles.

En accord avec ce que le travail a essayé de révéler, l'analyse chimique ainsi que les mesures IRTF du matériau étudié ont révélé une élimination fractionnée de l'hémicellulose qui pourrait être justifiée par l'efficacité du traitement chimique. D'autre part, l'indice de cristallinité de la sciure de bois a augmenté après le traitement chimique. Le traitement alcalin a marqué une certaine augmentation de l'indice de cristallinité avec 61 % en comparaison avec le KMnO_4 qui n'a enregistré que 54 % par rapport à la sciure de bois non traitée. De plus, les représentations MEB ont révélé certaines modifications en termes de morphologie du composite.

Par conséquent, l'incorporation la sciure de bois dans le composite argile/chaux améliore la résistance mécanique de ce dernier. En outre, le composite argile/chaux, dans une certaine mesure, devient plus résilient avec l'ajout la sciure de bois. Il convient également de noter que le traitement chimique de la sciure de bois avec NaOH et KMnO_4 permet d'augmenter la résistance mécanique de composite par rapport à composite renforcé par la sciure de bois non traitée. De plus, l'adhésion entre la matrice minérale et la sciure de bois devient plus forte. En d'autres termes, l'incorporation la sciure de bois dans la matrice réduit la conductivité thermique du matériau.

En conclusion, les résultats auxquels nous sommes parvenus montrent que la sciure de bois non traitée peut être utilisée comme un non-conducteur thermique.

Chapitre 2

Simulations

V.1. Introduction

Dans cette partie, on propose une modélisation des phénomènes thermique et acoustique par l'utilisation de logiciel de Matlab, ensuite de raison de la validation de nos résultats avec les résultats expérimentaux.

V.2. Présentation de logiciel de calcul Matlab

Matlab est l'abréviation "matrix laboratory". Initialement écrit par C. Moler en Fortran, matlab a été conçu pour fournir un accès facile aux logiciels matriciels développés dans les projets LINPACK et EISPACK. Matlab dispose de nombreux outils graphiques et d'analyse puissants et pratiques. C'est devenu une importante plateforme pour l'enseignement de l'ingénierie et des sciences, ainsi que pour la recherche. Ces derniers sont très premier langage de programmation précieux, et pour beaucoup sera le langage préféré pour la plupart, sinon la totalité du travail de calcul qu'ils effectuent.

Matlab est un milieu de calcul et de conception complet, ouvert et extensible (figure 42). Il existe des centaines (ou des milliers, selon les modules supplémentaires et les versions du noyau Matlab) de fonctionnalités mathématiques, scientifiques et techniques [123].

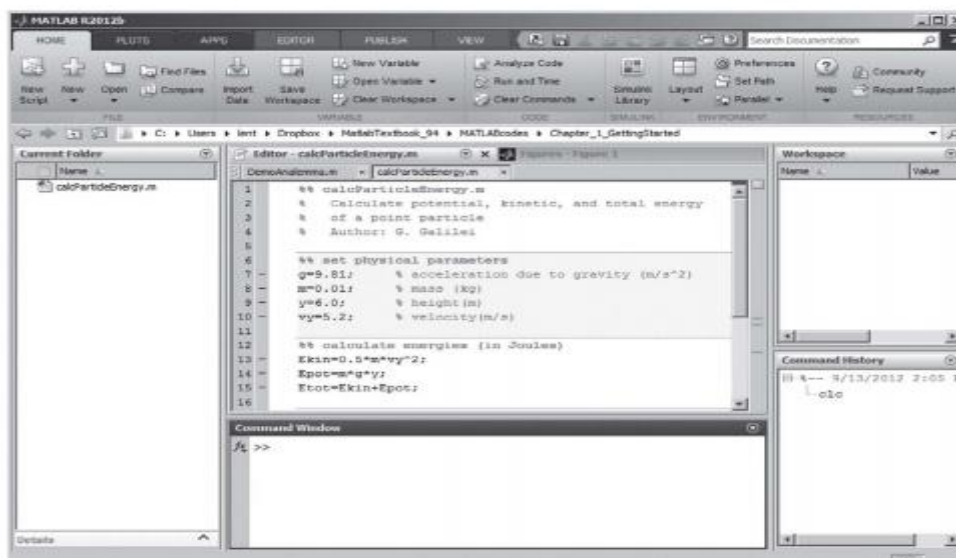


Figure. 42. Le développement intégré de Matlab environnement (IDE) avec la disposition par défaut [124]

Les simulations ont été effectuées sur le code de calcul Matlab de version 2020. Le modèle de composite prend en géométrie (4.4.16).

V.3. Dessiner la structure

L'algorithme pour dessiner la forme est comme suite :

```
Structuralmodel = createpde('structural','static-solid');
gm = multicuboid(16,4,4);
structuralmodel.Geometry = gm;
pdegplot(structuralmodel,'CellLabels','on')
view(30,30);
title('prismatic with Face Labels')
```

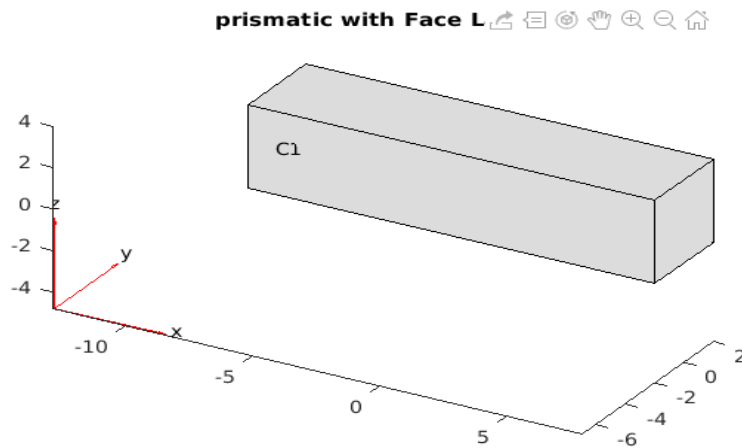


Figure. 43. Prismatique vue arrière selon l'axe Y

```
figure
pdegplot(structuralmodel,'CellLabels','on')
view(-134,-32)
title('prismatic with Face Labels, Rear View')
```

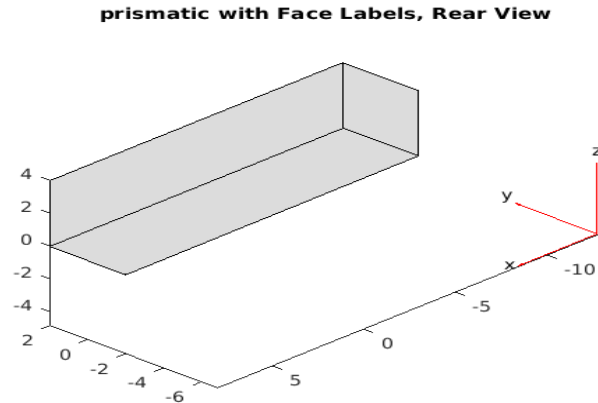


Figure. 44. Prismatique vue arrière selon l'axe X

Pour ce modèle, le maillage choisi permet de ne pas alourdir le calcul tout en gardant une bonne précision au niveau des résultats. Le maillage présenté dans la figure ci-dessous (figure 45).

```
structuralProperties(structuralmodel, 'Cell', 1, 'YoungsModulus', 13, ...
'PoissonsRatio', 0.28, ...
'CTE', 1.3e-5)
```

ans =

StructuralMaterialAssignment with properties:

RegionType: 'Cell'

RegionID: 1

YoungsModulus: 13

PoissonsRatio: 0.2800

MassDensity: []

CTE: 1.3000e-05

```
structuralBC(structuralmodel, 'Face', 4, 'Constraint', 'fixed');
structuralBoundaryLoad (structuralmodel, 'Face', 3, 'SurfaceTraction', [0;0;-1e4]);
generateMesh(structuralmodel);
figure
pdeplot3D(structuralmodel)
title('Mesh with Quadratic Tetrahedral Elements');
```

Mesh with Quadratic Tetrahedral Elements

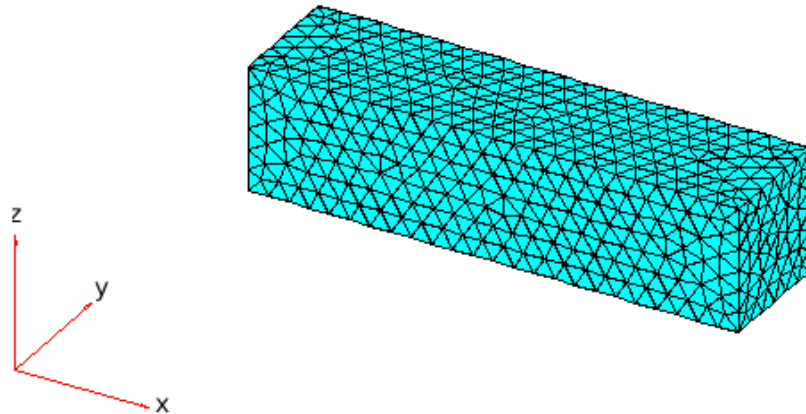


Figure. 45. Maillage avec éléments tétraédriques quadratiques

Pour calculer les différents modules, un déplacement est imposé sur une face de l'échantillon, la face opposée étant fixe.

```
result = solve(structuralmodel)
```

```
result =
StaticStructuralResults with properties:
```

```
    Displacement: [1x1 FEStruct]
      Strain: [1x1 FEStruct]
      Stress: [1x1 FEStruct]
VonMisesStress: [10776x1 double]
      Mesh: [1x1 FEMesh]
```

```
minUz = min(result.Displacement.uz);
fprintf('Maximal deflection in the z-direction is %g meters.', minUz)
Maximal deflection in the z-direction is -9.57626e-07 meters.
figure
pdeplot3D(structuralmodel, 'ColorMapData', result.Displacement.ux)
title('x-displacement')
colormap('jet')
```

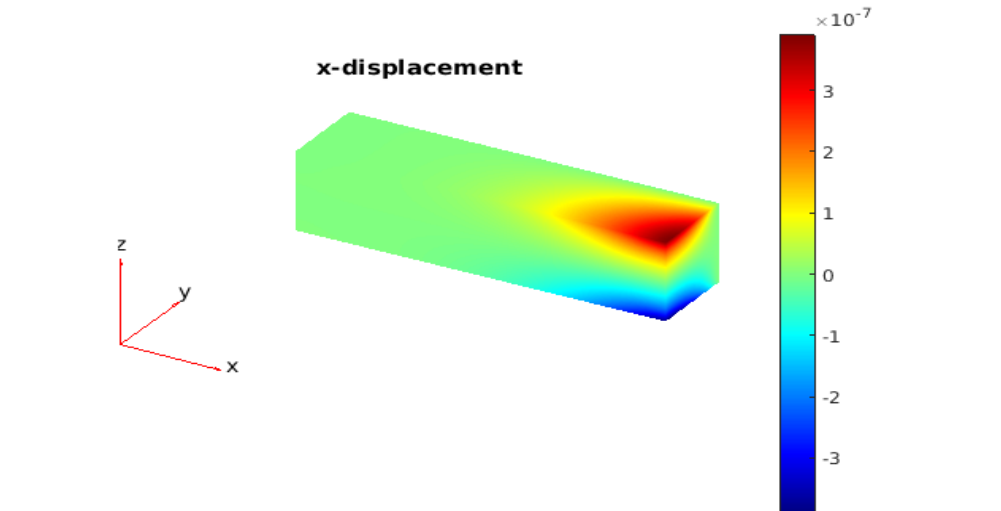


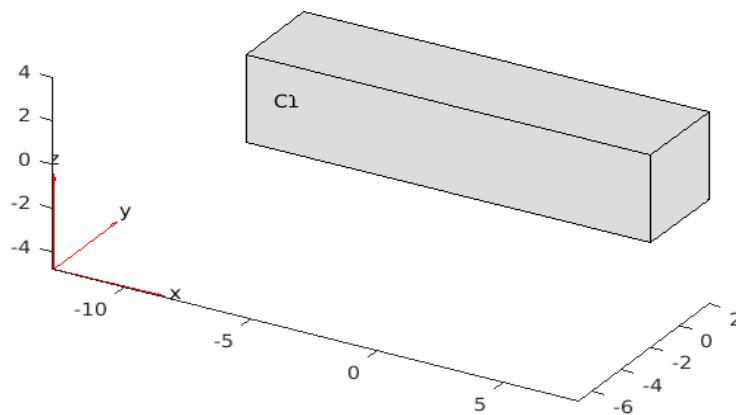
Figure. 46. Déplacement selon l'axe X

Le résultat de simulation de position d'application du déplacement, selon l'axe X sont présentés sur la figure 46. Apparaît clairement que ceux-ci ont une influence significative sur le point d'application le déplacement (axe X). On observe une évolution linéaire de ce déplacement en long d'éprouvette. On a conclu que le déplacement est très important dans la zone proche de l'application de la charge à l'éprouvette.

V.4. Effet de température

On choisit la structure pour modéliser :

```
structuralmodel = createpde('structural','static-solid');
gm = multicuboid(16,4,4);
structuralmodel.Geometry = gm;
pdegplot(structuralmodel,'CellLabels','on')
```



```
thermalmodel = createpde('thermal')
thermalmodel =
ThermalModel with properties:

AnalysisType: "steadystate"
           Geometry: []
MaterialProperties: []
HeatSources: []
StefanBoltzmannConstant: []
BoundaryConditions: []
InitialConditions: []
           Mesh: []
SolverOptions: [1x1 pde.PDESolverOptions]
```

```
thermalmodel.Geometry = gm
```

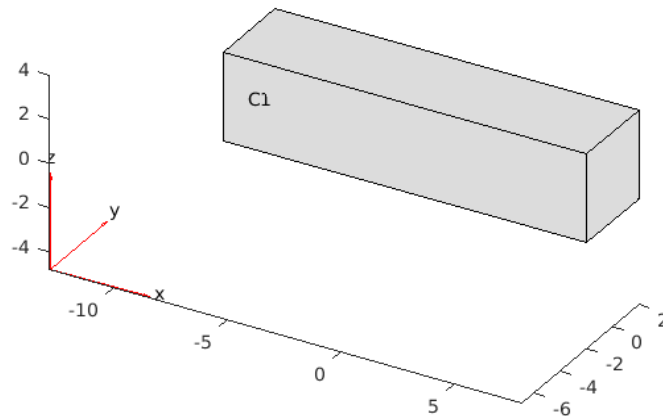
```
thermalmodel =
ThermalModel with properties:

AnalysisType: "steadystate"
           Geometry: [1x1 DiscreteGeometry]
MaterialProperties: []
HeatSources: []
StefanBoltzmannConstant: []
BoundaryConditions: []
InitialConditions: []
           Mesh: []
SolverOptions: [1x1 pde.PDESolverOptions]
```

Attribuez des propriétés de matériaux :

```
thermalProperties(thermalmodel,'ThermalConductivity',0.40)
ans =
ThermalMaterialAssignment with properties:

RegionType: 'cell'
RegionID: 1
ThermalConductivity: 0.4000
MassDensity: []
SpecificHeat: []
```



On applique une température constante de 100 °C sur le côté gauche du bloc d'éprouvette (face 1) et une température constante de 300 °C sur le côté droit du bloc d'éprouvette (face 3). Toutes les autres faces sont isolées par défaut.

```
thermalBC(thermalmodel, 'Face', 1, 'Temperature', 100);
thermalBC(thermalmodel, 'Face', 3, 'Temperature', 300);
```

```
thermalresults =
```

```
SteadyStateThermalResults with properties:
```

```
    Temperature: [10776×1 double]
    XGradients: [10776×1 double]
    YGradients: [10776×1 double]
    ZGradients: [10776×1 double]
    Mesh: [1×1 FEMesh]
```

Maillez la géométrie et résolvez le problème.

```
generateMesh(thermalmodel);
```

```
thermalresults = solve(thermalmodel)
```

```
thermalresults =
```

```
SteadyStateThermalResults with properties:
```

```
    Temperature: [10776×1 double]
    XGradients: [10776×1 double]
    YGradients: [10776×1 double]
    ZGradients: [10776×1 double]
    Mesh: [1×1 FEMesh]
```

Le solveur trouve les températures et les gradients de température aux emplacements nodaux. Pour accéder à ces valeurs, utilisez `thermalresults`. `Temperature`, `thermalresults.XGradients`, etc. Par exemple, tracez les températures aux emplacements nodaux :

```
pdeplot3D(thermalmodel,'ColorMapData',thermalresults.Temperature)
```

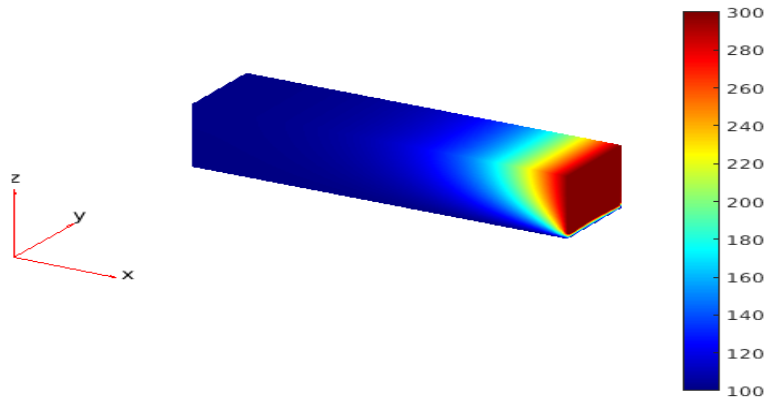
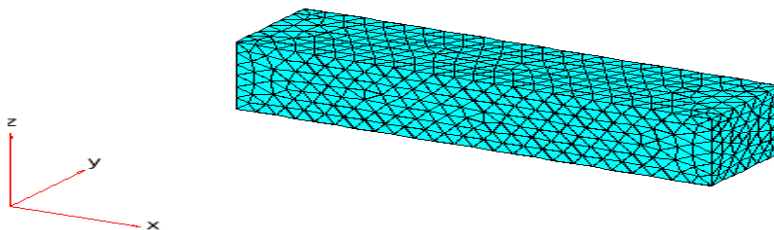


Figure. 47. Effet de changement de température sur la face d'une éprouvette

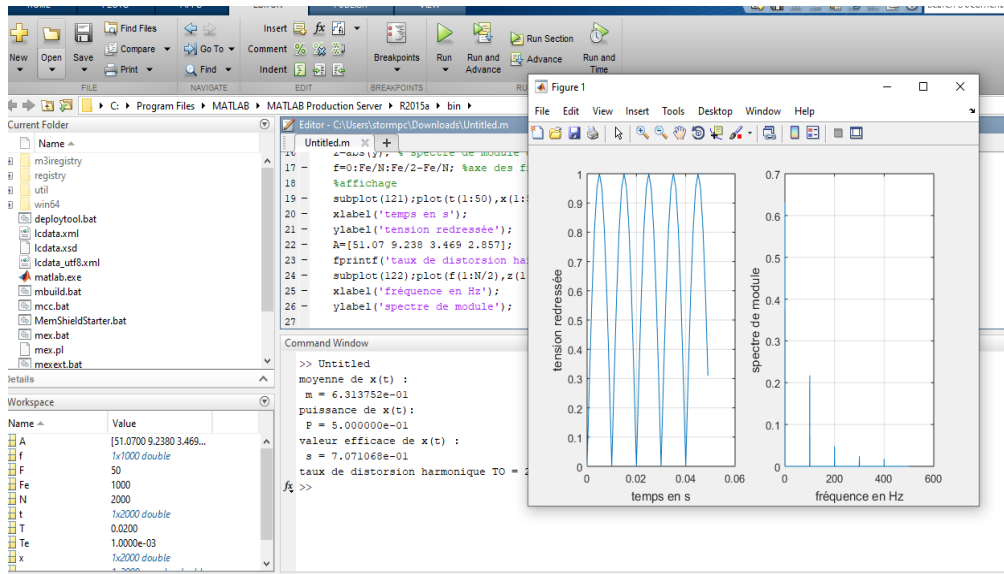
L'intérêt du modèle de simulation numérique développé est de déterminer l'influence du changement de température sur les propriétés thermiques.

V. 5. Etude acoustique

```
structuralmodel = createpde('structural','modal-solid')
gm = multicuboid(16,4,4)
structuralmodel.Geometry = gm
generateMesh(structuralmodel)
pdemesh(structuralmodel)
```



Algorithme:



```

%analyse harmonique d'une tension sinusoïdale redressée
N=2000; %nbre de points
F=50; %fréquence de la sinusoïde
T=1/F; %période
Fe=1000; % fr.ech.
Te=1/Fe; % per ech
t=0:Te:(N-1)*Te; % axe du temps, N points
x=abs(sin(2*pi*F*t)); % tension redressée
fprintf('moyenne de x(t) :\n m = %d\n',mean(x));
fprintf('puissance de x(t):\n P = %d\n',mean(x.^2));
fprintf('valeur efficace de x(t) :\n s = %d\n',sqrt(mean(x.^2)));
% spectre de Fourier de x
y=fft(x)/N; %TFD de x = |Cn|=An/2=sqrt(an^2+bn^2)
z=abs(y); % spectre de module de x
f=0:Fe/N:Fe/2-Fe/N; %axe des fréquences
%affichage
subplot(121);plot(t(1:50),x(1:50));grid on;
xlabel('temps en s');
ylabel('tension redressée');
A=[51.07 9.238 3.469 2.857];
fprintf('taux de distorsion harmonique TO = %d\n',sqrt(sum(A.^2)/(A(1)^2)-1));
subplot(122);plot(f(1:N/2),z(1:N/2));grid on;
xlabel('fréquence en Hz');
ylabel('spectre de module');

```

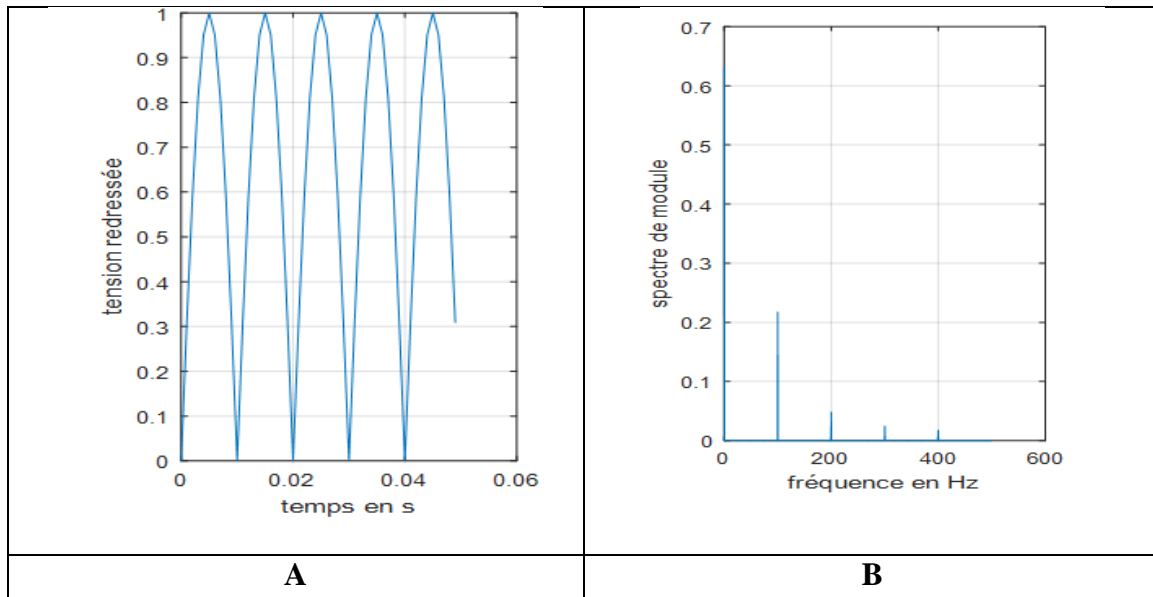


Figure. 48. Tension en fonction de temps (A), module en fonction de fréquence (B)

De manière générale, les composites renforcés de fibres naturelles comportent des pores internes. Ces derniers sont considérés comme insonorisant [125]. Les résultats obtenus concernant notre composite montrent que le matériau a de bonnes propriétés d'absorption acoustique dans la gamme des hautes fréquences. Les résultats ont révélé que le composite a une bonne absorption acoustique en raison de sa structure poreuse. D'autre part, on peut conclure que l'ajout de sciure de bois dans la matrice améliore les propriétés acoustiques, étant donné que le bois, en général, est considéré comme le matériau le plus approprié qui pourrait être utilisé pour produire des matériaux insonorisant avec des propriétés physiques et propriétés mécaniques [126].

Conclusion générale

Le travail dans cette thèse a été consacré au développement d'un matériau composite constitué pour évaluer les propriétés mécaniques et thermiques du composite argile-matrice renforcée par la sciure de bois. Un composite a été préparé à partir d'argile provenant de la région de Bou-Saâda (sud-est de l'Algérie) qui stabilise par (12 % en masse) de chaux et mélangé à de la sciure de bois à des teneurs massiques variant de 0,5 à 2,5 % avec un pas de 0,5 %.

Sciure de bois sont caractérisés chimiquement par plusieurs composants, on a trouvé qu'elles renferment une quantité très importante de cellulose qui assure à nos composites des meilleures performances mécaniques, et en revanche un taux de sucres assez important sont responsables de la faiblesse des résistances. Pour cela, on a effectué de traitement pour modifier la surface de fibres et augmenter les résistances mécaniques des composites obtenus, et pour améliorer l'adhésion entre fibre et matrice, on a traité la sciure de bois chimique par NaOH (5 %) et KMnO_4 ($0,01\text{g.L}^{-1}$).

Les résultats indiquent que l'ajout la sciure de bois dans la matrice argileuse permet de réduire les cavités et d'obtenir une structure plus homogène grâce à l'adhésion entre la matrice et la sciure de bois. Ceci contribue néanmoins aux propriétés physiques, mécaniques et thermiques de l'échantillon étudié.

Par ailleurs, les résultats montrent que le traitement chimique de la sciure de bois améliore les propriétés mécaniques (résistance à la flexion et à la compression) du composite pour plusieurs raisons, notamment : la non-propagation des fissures, la bonne adhésion de la sciure de bois dans la matrice et la présence de cellulose dans la sciure de bois en raison de sa bonne résistance à la flexion. De plus, le composite renforcé avec la sciure de bois non traitée illustre une diminution significative de la conductivité thermique. En outre, les résultats montrent via simulation par le logiciel de Matlab ont montré que le composite est d'une structure poreuse, ce qui en fait un isolant.

Brièvement, on peut conclure que l'étude acoustique par modélisation est difficilement applicable en raison de l'impossibilité de localiser l'endommagement survenues dans notre composite d'une part, et en raison de la nature de notre matériau d'autre part. Aussi, il est important de noter que nous devons discerner la source de l'émission acoustique. Il est à noter que le matériau utilisé dans notre étude a une structure poreuse qui absorbe le son.

En conséquence, on peut conclure que l'argile peut être utilisée comme alternative au ciment dans le domaine de la construction si elle est renforcée par des fibres naturelles. Ce dernier peut être utilisé comme renfort car il peut améliorer les propriétés thermiques et acoustiques. Ce que l'on peut déduire, à ce niveau, c'est que l'ajout de fibres naturelles, principalement de la sciure de bois, peut améliorer les propriétés du composite. Par conséquent, des recherches supplémentaires peuvent être menées pour améliorer la durabilité et la résistance de ces composites à l'avenir afin d'obtenir de meilleurs résultats concernant les propriétés thermiques, acoustiques et mécaniques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. Dehaut S « Contribution à la réduction des émissions de CO₂ : évolution des ciments et des besoins de l'industrie du béton » ; rapport Cerib, 2009, p.186
- [2]. Djeboun Y, Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales, Thèse de doctorat, Université de Mohamed Khider Biskra, 2018
- [3]. Toupe J L, Optimisation des propriétés mécaniques de composites à base de fibres naturelles : application à un composite de fibre de lin avec un mélange de polyéthylène/polypropylène d'origine post-consommation, Thèse de doctorat, Université Laval Québec – Canada, 2015
- [4]. Do Thi Vi Vi, Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011
- [5]. Ritter S K, Lignocellulose: A Complex Biomaterial, Chemical & Engineering News, 2008. 86. 10-17
- [6]. Michaud F, Rhéologie de panneaux composite bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage, Thèse de doctorat, Université Laval-Québec, 2003
- [7]. Dickison W C, Integrative Plant Anatomy, Academic Press, Burlington. VT, 2000, p. 26
- [8]. Willstatter, R, Zechmeister L, Zur Kenntnis der Hydrolyse von Cellulose. I. Ber, 1913, 46, 2401-2412
- [9]. Berlioz S, Etude de l'estérification de la cellulose par une synthèse sans solvant. Application aux matériaux nanocomposites, Université Joseph Fourier-Grenoble I Français, 2008
- [10]. David S, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment, Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2007

- [11]. Bledzki A K, Gassan J, Composites reinforced with cellulose based fibres; Prog. Polym. Sci, 1999, 24, 221-274
- [12]. Rokbi M, Osmani H, L'effet des traitements de surface des fibres sur les propriétés mécaniques de composites Polyester-fibres Alfa, 20ème Congrès Français de Mécanique Besançon, 2011
- [13]. Almi K, Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2018
- [14]. Nenonene A Y, Élaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bio-adhésifs à base de colle d'os de tannin ou de mucilage, Université de Toulouse-France, 2009
- [15]. Lalit R, Mayank P, Ankur K, Natural fibres and biopolymers characterization: a future potential composite material, Journal of mechanical engineering, 2018, 68, 33-50
- [16]. Dujardin N, Un matériau biosource de choix : les fibres naturelles. Caractérisations et applications, 25èmes Journées scientifiques de l'environnement-l'économie verte en question, Créteil-France, 2014
- [17]. Rouam K, Elaboration. Caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles, Mémoire de magister, Université Mohamed Bougara- Bumerdes, 2014
- [18]. <http://www.jute.com/green-jute/agriculture-raw-jute> (02-06-2021)
- [19]. Ryszard M. Kozłowski, Handbook of natural fibres, Wood head Publishing Limited, British Library Cataloguing in Publication Data, 2012
- [20]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ramie> (02-06-2021)
- [21]. <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2016/miscanthus-composite.htm> (02-06- 2021)
- [22]. Li Y, Mai YW, Ye L, Sisal fibre and its composites, A review of recent development, Composites Science and Technology, 2000, 60, 2037-2055

- [23]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Agave_sisalana (02-06-2021)
- [24]. Dallel M, Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima* L): caractérisation physico-chimique de la fibre au fil, Université de Haute Alsace-France, 2012
- [25]. Nouri M, Griballah I, Tahlaiti M, Grondin F, Beaugrand J, Plant extraction and physicochemical characterizations of untreated and pretreated diss fibers (*Ampelodesmosmauritanicus*). *Journal of Natural Fibers*. 2019, 1-11
- [26]. Adil S. Matériaux composites a matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres, Thèse de doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon-France, 2011
- [27]. Laurans F, Déjardin A, Pilate J, Physiologie de la formation des parois de fibres de bois, *Composites et matériaux avancés*, 2006, 16, 27-39
- [28]. Berthelot J M, *Composite materials mechanical behavior and structural analysis*, Springer-verlag Berlin Heidelberg. 1999
- [29]. Vijay Kumar Thakur, *Green composites from natural resources*. Imprint of Taylor and Frances group. London. 2014
- [30]. Berthelot J M, *Mécanique des Matériaux et structures composites*. Institut supérieur des matériaux et mécanique avances (ISMANS) le Mans, France, 5 Edition 2013
- [31]. Baley C, *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. *Technique de l'ingénieur*, traité génie des procédés, Vol. AM5, 2004, p. 130
- [32]. Marc Marzano, Pascal Celle, *Matériaux composite*, Edit avec le concours de l'éducation nationale, 2014
- [33]. Achour T, *Etude des techniques de préparation des structures composites endommagées*, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2011
- [34]. Clegg D W, Coller A A, *The structure and properties of polymeric materials*, Institue of materials, London, 1993

- [35]. Murphy J, Reinforced plastics handbook, Elsevier Advanced Technology, Oxford, 1994
- [36]. Dupen M, Aide-mémoire science des matériaux, 2 édition Dunod, Paris, 2008
- [37]. Brice T, Procédés alternatifs pour l'élaboration de matériaux composites à matrice céramique, Thèse de doctorant, Université de Bordeaux-France, 2014
- [38]. Claude Bathias, Matériaux composites, 2 édition, Dunod, Paris, 2009
- [39]. Tadjedit S, Optimisation par un algorithme génétique de l'endommagement de l'interface fibre/matrice d'un nano composite graphite-époxy, Thèse de magister, Université de Mohamed Boudiaf Oran, 2014
- [40]. Laurent G, Généralité sur les matériaux composites, École centrale Nantes, France, 2011
- [41]. Houideg A, Transfert de charge et frottement fibre/Matrice d'un matériau composite (T300/914), Université Mohamed Boudiaf Oran-Algérie, 2012
- [42]. Bensaid S, Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2006
- [43]. Haddadi M, Etude numérique avec comparaison expérimental des propriétés thermoplastique des matériaux composites à matrice polymère, Thèse de doctorat, Université Al Hadj Lakhdar Batna, 2011
- [44]. Amroune S, Bazazi A, Dufresne A, Scarpa F, Imad A, Investigation of the date palm fiber for green composites reinforcement: thermo-physical and mechanical proprieties of the fiber. 2021, 18(5), 717-734
- [45]. Laib N, Benyahia A, Redjem A, Deghfel N. effect of chemical treatment with oxidants on the mechanical properties of luffa sponge/ unsaturated polyester composites. Cellulose chemistry and technology. 2021, 55, 159-167
- [46]. Benyahia A, Merrouche A, Rahmoun Z E A, Rokbi M, Serge W, Kouadri Z. Study of the alkali treatment effect on the mechanical behavior of the composite unsaturated polyester-Alfa fibers. Mechanics & Industry, 2014, 15, 69-73

- [47]. Amroune S, Belaadi A, Dalmis R, Seki Y, Makhlouf A, Satha H, Quantitatively investigating the effects of fiber parameters on tensile and flexural response of flax/epoxy biocomposites, *Journal of natural fibers*, 2020, 1-16
- [48]. Magniont C, Contribution à la formation et à la caractérisation d'un Eco-matériau de construction à base d'agroressources, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2010
- [49]. Kerroum N, Nouibat B, Benyahia A, Redjem A. Study of the performance of adobe brick coated for sustainable construction in Algerian Sahara. *Matériaux & Techniques*. 2018, 106, 401
- [50]. Marianne LE Troedec, Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulosique, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2009
- [51]. Koadri Z, Benyahia A, Deghfel N, Belmokre K, Nouibat B, Redjem A, Etude de l'effet du temps de traitement alcalin de fibre palmier sur le comportement mécanique des matériaux à base d'argile rouge de la région de M'sila, *Matériaux & Technique*, 2019, 107, 404
- [52]. Fertihk S, Merzoud M, Bounadja M, Ghania A, Benazzouk A, Caractéristiques mécaniques des composites à base de fibres de diss dans différentes matrices, Journées de l'AUGC et IBPSA, France 2012
- [53]. Bahloul O, Bourzam A, Bahloul A, Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de ciment (cas d'alfa) SBEIDCO- 1st International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries ENSET Oran (Algérie)- October, 2009
- [54]. Laaroussi N, Cherki A, Garoum M, Khabbazi A, Feiz A. Thermal properties of a sample prepared using mixtures of clay bricks. Conference: Sustainable Building Technologies. *Energy Procedia*, 2013, 42, 337
- [55]. Meukam P, Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments, Thèses de doctorat, Université de Yaoundé I, 2004

- [56]. Elhamdouni Y, Khabbazi A, Benayad C, Dadi A and Ahmid O I, Effect of fiber alfa on thermophysical characteristics of a material based on clay, *Energy Procedia*, 2015, 74, 718
- [57]. Bedrina M, Marmoret L, Mezreb K, Khenfer M, Bali M, Quéneudec M, Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling, *Construction and building materials*, 2007, 21(3), 662-668
- [58]. Taoukil D, Sick F, Mimet A, Ezbakhe H, Ajzoul T, Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite, *Construction and building materials*, 2013, 48, 104-115
- [59]. Norme AFNOR (Association française de normalisation) NF A 09-350, vocabulaire utilisé en émission acoustique, Juillet 1984
- [60]. Le Gall T, Godin N, Monnier T, Fusco C, Modélisation de l'émission acoustique : aide à l'identification de paramètres pertinents pour décrire l'endommagement des matériaux composites, 22^{ème} Congrès Français de Mécanique, 2015
- [61]. Küçük M, Korkmaz Y, The effect of physical parameters on sound absorption properties of natural fiber mixed nonwoven composites, *Textile Research Journal*. 2012, 82(20), 2043-2053
- [62]. Gango G, Manounou AK, Malanda N, Gadet MD, Nsongo T, Effect of Wood waste on acoustic and magnetic properties of composite bricks and correlation between sound velocity and magnetic induction in these bricks. *Open journal of composite materials*, 2020, 10, 15-25
- [63]. Layeb A, Halboui A, Caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés-verre), Mémoire de fin d'étude, Université Ziane Achour, Algérie, 2017
- [64]. Directives de qualité pour l'eau de boisson, deuxième édition (volume2), Genève 2000, p. 222-327

- [65]. Amin N C, Andji Y Y J, Aké M, Yolou S F, Touré Abba A, Kra G, Minéralogie et physicochimie d'argiles de traitement de l'ulcère de buruli en côte d'ivoire. J. Sci. Pharm. biol. 2009, 10(1), 21-30
- [66]. Chossat J C, la mesure de la conductivité hydraulique dans les sols- choix des méthodes, Lavoisier, USA, 2005, p. 720
- [67]. Rollet P, Bouaziz R, l'analyse thermique- les changements de phase. ED. Gautier-Villard, Tome 1, Paris, 1972
- [68]. Gillot E Jack, Clay engineering geology. John Wiley et Sons, Inc, 1984
- [69]. Kanon K L, Soro J, Andji J Y Y, Oyetola S, Kra G, Comparative study of dehydroxylation/amorphization in two kaolins with different crytallinity, Journal de la société Ouest- Africaine de chimie, 2010,30, 29-39
- [70]. Casagrande L, Electro-osmosis in soils, Géotechnique, 1953,3(1), 159-177
- [71]. Rokbi M, Osmani H, L'effet des traitements de surface des fibres sur les propriétés mécanique de composites polyester-fibres Alfa, 20émé Congrès Français de Mécanique, Besançon, 2011
- [72]. Kalia S, Kaith B S, Kaur I, Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites - A review, Polymer Engineering and Science, 2009, 49, 1253-1272
- [73]. Thomas Grangeon. Etude multi-échelle de la granulométrie des particules fines générées par érosion hydrique : apports pour la modélisation. Thèses de doctorat. Université de Grenoble- France. 2013. p. 62.
- [74]. Valérie Thirion-Merle. Spectrométrie de fluorescence X. Collection Sciences Archéologiques. Université de Lyon- France. 2016
- [75]. Benredouane R, Influence des méthodes d'affinement cristallographique sur l'identification- optimisation- quantification- paramétrique des structures cristallines : application aux oxydes $A_3B_3O_7$ (A= R, Ba, Ca / B = Cu, Co, Zn), Thèses de doctorat, université des Frères Mentouri de Constantine, 2018

- [76]. Segal L, Creely J J, Martin A E, Conrad C M, An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer, *Text. Res. J*, 1959, 29, 786-794
- [77]. Paufert P, Développement d'un procédé d'élaboration associant lithographie électronique et auto-assemblage pour la fonctionnalisation des surfaces à l'échelle nanométrique, Thèses de doctorat, Université de Bourgogne-France, 2013, p. 58
- [78]. Masri T, Contribution au développement des matériaux de construction à base des sous-produits du palmier dattier Méthode de mesure de la conductivité thermique, Thèses de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2018, p. 91
- [79]. Vincent F, Caractérisation Thermique de Matériaux Isolants Légers Application à des Aérogels de Faible Poids Moléculaire, Thèses de doctorat, Université de Lorraine-France, 2011, p. 38
- [80]. Edahbi M, Khaddor M, Salmoun F, Caractérisation des sols du nord du maroc (Bassin loukkos), *J .Mater. Environ. Sci.* 2014, 5, 2133-2138
- [81]. Rollet P, Bouaziz R, L'analyse thermique- les changements de phase. ED. Gautier-Villard, Tome1, Paris, 1972
- [82]. Jarraya I, Fourmentin S, Benzina M, Adsorption de Cov par un matériau argileux tunisien organo-Modifié, *Journal de la Société Chimique de Tunisie*, 2010, 12, 139-149
- [83]. Monsif M, Rossignol S , Allali F , Zerouale A, IdrissiKandri N, Joussein E, Tamburini S, Biryani R, The implementation of geopolymers materials from Moroccan clay, within the framework of the valorization of the local natural resources, *Journal of materials and environmental sciences, Journal of Materials and Environmental Sciences*, 2017, 8(8), 2704-2731
- [84]. Sorgha B, Bressollier P, Guel B, L. Zerbo L, Ouedraogo R, Gomina M, Blanchart P, Étude des propriétés mécaniques des géomateriaux argileux associant la décoction de parkiabiglobosa (nééré), *C. R. Chimie xxx. 1*, 2016, 1-7
- [85]. Sadki H, Ziat K, Saidi M. Adsorption d'un colorant cationique d'un milieu aqueux sur argile locale activée. *J. Mater. Environ*, 2014, 5, 2060-2065

- [86]. Qlihaa A, Dhimni S, Melrhaka F, Hajjaji N, Srhiri A, Caractérisation physico-chimique d'une argile Marocaine, *J. Mater. Environ. Sci*, 2016, 7, 1741-1750
- [87]. Khay I, Univ. Limoges FST, Eco. Doc. Scien. Ing en Mat. Mec. Eng et Aéron, 2012,18
- [88]. Casagrande A., Classification and identification of soils, *Transactions, ASCE*, 1948, 113, 901- 930
- [89]. Liu W, Mohanty A K, Drzal L, et al, Effects of alkali treatment on the structure, morphology and thermal properties of native grass fibers as reinforcements for polymer matrix composites, *J Mater Sci*, 2004, 39, 1051-1054
- [90]. Ayse A, Mohini S, Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues- Wheat straw and soy hulls, *Bioresource Technology*,2008;99:1664-1671.
- [91]. Gourouza M, .Zanguina A, Natatou I, Boos A, Characterization of a mixed clay Niger, *Rev. CAMES Sci. Struct. Mat*, 2013, 1, 29-39
- [92]. Arfane A, Salhi A, El Krati M, Tahiri S, Monkade M, Lhadi E K, Bensitel M, Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption des colorants Red 195 et Bleu de méthylène en milieu aqueux sur cendres volantes et les mâchefers, *J. Mater. Environ. Sci*, 2014, 5, 1927-1937
- [93]. Deghfel N, Benyahia A, Guerfi K, Errachid A, étude comparative de l'adsorption d'un colorant de cuve sur différents absorbants base d'un matériau inorganique la bentonite et l'argile de la région de M'sila, *Matériaux & Techniques*, 2017, 105(4), 405
- [94]. Ass B A P, Belgacem M N, Frollini E, Mercerized linters cellulose: Characterization and acetylation in N,N-dimethylacetamide/lithium chloride, *Carbohydrate Polymers*, 2006, 63, 19-29
- [95]. Kommula V P, Obi Reddy K, Shukla M, Marwala T, International Conference on Advances in Marine, Industrial and Mechanical Engineering (ICAMIME'2014) Johannesburg (South Africa), 2014

- [96]. Obi Reddy K, Uma Maheswari C, Shukla M, Song J I, Varada Rajulu A, Tensile and structural characterization of alkali treated Borassus fruit fine fibers, *Composites Part B: Engineering*, 2013, 44, 433-438
- [97]. Wang B, Tabil L, Panigrahi S, Effects of chemical treatments on mechanical and physical properties of flax fiber-reinforced composites, *Sci. Eng Compos Mater*, 2008, 15, 43-58
- [98]. Ayse A, Mohini S, Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues- Wheat straw and soy hulls, *Bioresource Technology*, 2008, 99, 1664-1671
- [99]. Lahsini A, Bentama J, Addaou A, Rafiq M, Caractérisation physico-chimique et étude de frittage d'une argile destinée à l'élaboration de membranes de filtration tangentielle, *J. Chim. Phys*, 1998, 95, 1001-1019
- [100]. Harrechie R, élaboration et caractérisation des composites à matrice polymère et à renforts végétal et nanométrique lamellaire, Thèse de magister, Université Frahat Abbas, Setif1, 2015
- [101]. Amandine C, Olivier G, Frédéric J, Sylvain F, Utilisation de la spectrométrie infrarouge pour une quantification rapide du taux d'humidité dans des fibres végétales, *Revue des composites et des matériaux avancés*, 2014, 24, 81-96
- [102]. Benyoucef S, Harrache D J, Caractérisation de la microstructure de sciure de bois de pin sylvestre, *J. Mater. Environ*, 2015, 6, 765-772
- [103]. Tserki V, Zafeiopoulos N E, Simon F, Panayiotou C, A study of the effect of acetylation and propyonylation surface treatments on natural fibers, *Composites Part A*, 2005, 66, 1110-1118
- [104]. Elabed A, Réactivité thermique et cinétique de dégradation du bois d'arganier application à l'élaboration de charbon actif par activations chimique à l'acide phosphorique, Thèse de doctorat de l'université Mohammed V- Agdal, Rabat, Maroc, 2007.
- [105]. Arib A, Sarhiri A, Moussa R, Remmal T, Gomina M, Caractéristiques structurales et mécaniques de céramiques à base d'argiles : influence de la source de feldspath, *C. R. Chimie*, 2007;10:502-510.

- [106]. Chemani H, Nouvelle formulation d'éléments de construction, bioclimatiques par ajout d'eau rejetée d'abattoir, 23ème Congrès Français de Mécanique, 2017.
- [107]. Amroune S, Bezazi A, Belaadi A, Zhu C, Scarpa F, Rahatekar S, Imad A, Tensile mechanical properties and surface chemical sensitivity of technical fibers from date palm fruit branches (phoenix dactylifera L), *Composites: Part A*, 2015, 71, 95-106
- [108]. Benyahia A, Merrouche A, Effect of Chemical Surface Modifications on the Properties of Alfa Fiber-Polyester Composites, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2014, 53, 403-410
- [109]. Ramadevi P, Dhanalakshmi S, Srinivasa CV, Basavaraju B, Effect of alkali treatment on water absorption of single cellulosic abaca fiber. *Bio Resources*. 2012, 7, 3515
- [110]. Rout J, Misra M, Tripathy SS, Nayak SK, Mohanty AK, The influence of fibre treatment on the performance of coir–polyester composites. *Compos. Sci. Technol.* 2001, 61, 1303
- [111]. Benyahia A, Redjem A, Rahmouni Z, A. Merrouche A, study of the mechanical properties of a composite material: Alfa fibers/ unsaturated polyester, *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials*. 2016, 46, 25
- [112]. Dhanalakshmi S, Ramadevi P, Raghu Patel G R, Manikanta M, Kiran K, Jayaraj A, Jason M, Chethan G R, Basavaraju B, Effect of fiber loading and surface modification on tensile behavior of natural areca composites, *Ciencia-e- Tecnica Vitivinicola*, 2014, 29, 99-114
- [113]. Rahaman M M, Mallik A K, Khan M A, Influences of various surface treatments on the mechanical and degradable properties of photografted palm fibers, *J. Appl. Polym. Sci*, 2007, 105, 3077-3086
- [114]. Harichane K H, Ghrici M, Belhiche H, Abdelchani Y, Effet du sable de dunes et de la chaux sur les propriétés géotechniques des sols argileux, *Matériaux*, 2017, 57,4
- [115]. Khemissa M, Mahamedi A. Cement and lime mixture stabilization of en expansive over consolidated clay. *Applied Clay Science*. 2014, 95, 104-110
- [116]. Taallah B, Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres, Thèse de doctorat, Université de Mohamed Khider Biskra-Algérie, 2014

- [117]. Cao Y, Shibata S, Fukumoto I, Mechanical properties of biodegradable composites N reinforced with Bagasse fiber before and after alkali treatments, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37, 423-429
- [118]. Sedan D, Pagnoux C, Smith A, Chotard T, Mechanical properties of hemp fiber reinforced cement: Influence of the fiber/matrix interaction, *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, 28, 183-192
- [119]. Kulkarni A G, Rohatgi P K, Electrical resistivity and dielectric strength of plant fibers, *Journal of Material Science*, 1981, 16, 1719-1726
- [120]. Kelling G, Kapur S, Sakarya N, Akça E, Karaman C, Sakarya B, Basaltic tephra :potential new resource for ceramic industry, *Brit Ceram Trans*, 2000, 3, 129-136
- [121]. Lui K, Lu L, Wang F, Liang W, Theoretical and experimental study on multi-phase model of thermal conductivity for fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2017, 148, 465-475
- [122]. Chaib H, Kriker A, Mekhermeche A, Contribution to the study of the thermo mechanical properties of the adobe.(case of the south of Algeria Ouargla). *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2020, 3, 24-34
- [123]. Mertini Boubekour M B, Modélisation numérique et expérimentale du comportement des panneaux sandwichs a âme en nids d'abeilles, université Ferhat Abbas-Sétif, mémoire de magister, 2011
- [124]. Graig S L, *Learning to program with Matlab building gui tools*, Welly, United states of America, 2013
- [125]. Tang X, Yan X. Multi-layer fibrous structures for noise reduction, *The journal of the textile institute*. 2017, 1-11
- [126]. Hassan T, Jamshaid H, Mishra R, Qamar Khan M, Petru M, Novak J, Choteborsky R, Hromasova M. Acoustic mechanical and thermal properties of green composites reinforced with naturel fibers waste, *Polymers*. 2020, 12, 654