

THÈSE

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

Centre de Recherche : Centre de Recherche en Énergie
Structure de Recherche : Équipe de Thermodynamique et Énergétique
Discipline : Physique
Spécialité : « Mécanique et Énergie »

Présentée et Soutenue le : 26 / 07 / 2024

Par :

Nora BOUHADDOUR

Contribution à l'étude des propriétés thermo-physiques, mécaniques, chimiques et minéralogiques de la terre rouge stabilisée par le matériau bois

Devant le JURY :

Noureddine ZAHID	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Président/Rapporteur
Abdelmajid SAIDI	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Rapporteur/ Examineur
Brahim MESNAOUI	PH	École Nationale des Sciences Appliquées, Université Cadi Ayyed , Safi	Rapporteur/ Examineur
Abderahim DINANE	PES	Ecole Royale Navale, Marine Royale, FAR, Casablanca	Examineur
Abdelaziz MHIRECH	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Examineur
Hamid EZ-ZAHRAOUI	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Examineur
Salah EL ALAMI	Dr. ING	Ministère de l'intérieur de Rabat	Invité
Abderrahim SAMAOUALI	PES Expert	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Invité
Asmae ARBAOUI	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2023 - 2024

DÉDICACE

Je souhaite dédier ce travail à mes très chers parents, sans lesquels rien de tout cela ne serait possible. Leur soutien indéfectible et leur amour inconditionnel ont été les piliers de mon parcours. Les mots me manquent pour exprimer toute ma gratitude envers eux pour les sacrifices qu'ils ont consentis et les efforts qu'ils ont déployés en ma faveur.

À ma chère sœur et mon cher frère, je souhaite tout le bonheur et la réussite dans leurs vies respectives. Leur présence et leur soutien ont toujours été une source d'inspiration pour moi.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à toute ma famille, pour leur soutien constant et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

À tous mes amis, qui ont partagé avec moi des moments de joie et de bonheur, je vous suis reconnaissante pour votre amitié et votre soutien précieux.

Enfin, à toute personne qui m'a apportée son aide, que ce soit de près ou de loin, je tiens à vous exprimer ma plus profonde gratitude. Vos encouragements, conseils et soutiens ont été d'une importance capitale pour moi, et je vous en suis sincèrement reconnaissante.

REMERCIEMENT

Je souhaite remercier sincèrement le **Laboratoire de Thermodynamique et Énergie** pour son accueil et son soutien pendant la réalisation de ma thèse de doctorat. Les moyens mis à ma disposition et l'expertise de l'équipe ont été précieux pour mener à bien mes travaux. Je suis reconnaissante envers les chercheurs et le personnel technique pour leur aide et leurs conseils. Cette expérience au sein du laboratoire a été enrichissante tant sur le plan scientifique que personnel.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse Monsieur **Samaouali Abderrahim**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, et Madame **Arbaoui Asmaa**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour leur soutien inébranlable et leurs conseils avisés tout au long de mon parcours doctoral. Leur expertise combinée et leur dévouement sans faille ont été des piliers essentiels qui ont guidé et enrichi ma recherche. Grâce à leur mentorat attentif, j'ai pu non seulement surmonter les défis académiques, mais aussi développer une compréhension plus profonde et une passion renouvelée pour mon domaine d'étude.

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **Zahid Noureddine**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour avoir présidé avec distinction le jury de ma thèse. Son expertise et son leadership ont apporté une orientation précieuse à l'évaluation rigoureuse de mon travail de recherche. Son engagement envers l'excellence académique et sa capacité à guider les délibérations du jury ont été cruciales pour garantir l'intégrité et la qualité de l'évaluation.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur **Saidi Abdelmajid**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour avoir accepté de jouer un rôle d'examineur et rapporteur dans le jury de ma thèse. Son expertise reconnue et ses commentaires perspicaces ont grandement enrichi mon travail de recherche. Son évaluation approfondie et constructive a été cruciale pour affiner mes idées et renforcer la rigueur de mon argumentation.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers **Messnaoui Brahim**, Professeur Habilité à l'École Nationale des Sciences Appliquées, Université Cadi Ayyad, Safi, pour avoir accepté de jouer un rôle d'examineur et de rapporteur dans le jury de ma thèse. Son expertise éminente et ses remarques éclairées ont considérablement enrichi mon travail de recherche. Son évaluation méthodique et constructive a été essentielle pour affiner mes concepts et renforcer la rigueur de mon argumentation.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **Dinane Abderrahim**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à l'École Royale Navale, Marine Royale, Casablanca, pour avoir accepté de participer en tant qu'examineur/rapporteur dans le jury de ma thèse. Ses précieux commentaires ont enrichi mon travail de recherche d'une manière inestimable. Son évaluation rigoureuse et constructive a joué un rôle essentiel dans le développement de ma recherche et dans la formulation de conclusions pertinentes. Je suis reconnaissant pour sa contribution éclairée qui a largement contribué à la qualité et à la pertinence de ma thèse.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance à Monsieur **Mhirech Abdelaziz**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour avoir accepté de servir en tant qu'examineur dans le jury de ma thèse. Votre expertise académique et vos commentaires éclairés ont enrichi ma recherche et ont contribué de manière significative à son développement.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur **Ez-Zahraouy Hamid**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour avoir accepté de faire partie du jury de ma thèse en tant qu'examineur. Son évaluation approfondie et constructive a été extrêmement bénéfique pour affiner mes idées et renforcer la rigueur de mon analyse.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **El Alami Salah**, Docteur au Ministère de l'intérieur de Rabat, pour sa participation en tant qu'invité au jury de ma thèse. Son expertise et ses perspectives uniques ont enrichi les délibérations et ont apporté une valeur ajoutée significative à mon travail de recherche.

Je souhaite également exprimer ma sincère gratitude envers Monsieur le directeur du Laboratoire du Centre National de la Recherche Scientifique et Technique de Rabat (UATRS-CNRST), ainsi que le directeur du Centre de Recherche Forestière au Maroc à Rabat (CRF) et toute l'équipe, pour leur accueil chaleureux et leur contribution précieuse.

En conclusion, je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance envers tous mes enseignants et mes collègues au sein de l'équipe, avec qui j'ai eu le plaisir de collaborer et d'échanger des connaissances scientifiques. Je suis reconnaissante de pouvoir leur exprimer ici toute ma gratitude et mon appréciation.

RESUME

Dans cette étude, notre objectif principal est d'améliorer les propriétés de la terre rouge argileuse en l'associant à un matériau de renfort, le bois, afin d'améliorer et d'optimiser ses propriétés thermo-physiques. Pour ce faire, nous avons préparé deux séries d'échantillons en mélangeant de la terre rouge avec du bois en poudre variant de 0% à 20%. La caractérisation chimique, minéralogique et structurale de ces échantillons a été réalisée en combinant la microscopie électronique à balayage (MEB) avec l'analyse par spectrométrie d'énergie dispersive (EDX) et la diffraction des rayons X (DRX).

Nous avons ensuite réalisé une série d'expérimentations pour analyser les caractéristiques thermiques et thermo-physiques de nos échantillons, en tenant compte du pourcentage de stabilisant à base de poudre de bois, ainsi que de la densité et de la capacité volumique. Les résultats obtenus indiquent que la conductivité thermique et la capacité thermique volumique diminuent progressivement avec l'augmentation de la proportion de bois. Une tendance similaire a également été constatée pour la diffusivité et l'effusivité thermique.

De plus une autre étude a porté sur les propriétés thermo-physiques sur deux types de bois : L'Eucalyptus Camaldulensis de provenance de la région du Rabat-Maroc et l'Araucaria de provenance de la ville d'El Jadida. Les résultats de cette étude ont montré une augmentation de ces paramètres thermo-physiques lorsque la température varie de 20°C à 60°C.

Les résultats expérimentaux mis en évidence dans ce travail offrent des perspectives intéressantes pour l'utilisation de matériaux composites à base de terre rouge et de bois dans des applications nécessitant des performances thermiques améliorées dans le domaine des études d'efficacité énergétique des matériaux utilisés dans le BTP en génie civil.

Mots clés : Bois, Terre rouge, Eucalyptus Camaldulensis, Araucaria, Thermo physiques, Minéralogique, Chimique, BTP, Porosité, MEB, RDX, EDX, Conductivité thermique, Efficacité Énergétique, Effusivité, Diffusivité.

ABSTRACT

In this study, our main objective is to improve the properties of clayey red earth by associating it with a reinforcement material, wood, in order to improve and optimize its thermo physical properties. To achieve this, we prepared two series of samples by mixing red earth with wood powder varying from 0% to 20%. The chemical, mineralogical, and structural characterization of these samples was carried out by combining scanning electron microscopy (SEM) with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and X-ray diffraction (XRD).

We then conducted a series of experiments to analyze the thermal and thermo physical characteristics of our samples, taking into account the percentage of wood powder stabilizer, as well as density and volumetric capacity. The results obtained indicate that thermal conductivity and volumetric heat capacity gradually decrease with the increase in the proportion of wood. A similar trend was also observed for thermal diffusivity and effusivity.

Additionally, another study focused on the thermo physical properties of two types of wood: Eucalyptus Camaldulensis from the Rabat-Morocco region and Araucaria from the city of El Jadida. The results of this study showed an increase in these thermo physical parameters as the temperature varies from 20°C to 60°C.

The experimental results highlighted in this work offer interesting perspectives for the use of composite materials based on red earth and wood in applications requiring improved thermal performance in the field of energy efficiency studies of materials used in civil engineering construction.

Keywords: Wood, Red Earth, Eucalyptus Camaldulensis, Araucaria, Thermo physics, Mineralogical, Chemical, Construction, Porosity, SEM, XRD, EDX, Thermal Conductivity, Energy Efficiency, Effusivity, Diffusivity.

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Studie ist unser Hauptziel die Verbesserung der Eigenschaften von roter Tonerde durch die Verbindung mit einem Verstärkungsmaterial, Holz, um ihre thermophysikalischen Eigenschaften zu verbessern und zu optimieren. Zu diesem Zweck haben wir zwei Probenreihen vorbereitet, indem wir rote Erde mit Holzpulver in Anteilen von 0% bis 20% mischten. Die chemische, mineralogische und strukturelle Charakterisierung dieser Proben wurde durch die Kombination von Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) und Röntgenbeugung (XRD) durchgeführt.

Anschließend führten wir eine Reihe von Experimenten durch, um die thermischen und thermophysikalischen Eigenschaften unserer Proben zu analysieren, wobei wir den Prozentsatz des Holzpulver-Stabilisators sowie die Dichte und die volumetrische Kapazität berücksichtigten. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit und die volumetrische Wärmekapazität mit zunehmendem Holzanteil allmählich abnehmen. Ein ähnlicher Trend wurde auch für die thermische Diffusivität und Effusivität beobachtet.

Zusätzlich konzentrierte sich eine weitere Studie auf die thermophysikalischen Eigenschaften von zwei Holzarten: Eucalyptus Camaldulensis aus der Region Rabat-Marokko und Araucaria aus der Stadt El Jadida. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten einen Anstieg dieser thermophysikalischen Parameter bei einer Temperaturänderung von 20°C auf 60°C.

Die in dieser Arbeit hervorgehobenen experimentellen Ergebnisse bieten interessante Perspektiven für die Verwendung von Verbundwerkstoffen auf Basis von roter Erde und Holz in Anwendungen, die verbesserte thermische Leistungen im Bereich der Energieeffizienzstudien von Materialien erfordern, die im Bauingenieurwesen verwendet werden.

Schlüsselwörter: Holz, Rote Erde, Eucalyptus Camaldulensis, Araucaria, Thermophysik, Mineralogisch, Chemisch, Bau, Porosität, REM, XRD, EDX, Wärmeleitfähigkeit, Energieeffizienz, Effusivität, Diffusivität.

LISTE DES PUBLICATIONS

SCIENTIFIQUES

Bouhaddour Nora*, Moufakkir Abdelkrim, Samaouali Abderrahim, Sghouri El Idrissi Hanane, Oumaima Nasry, Belarouf Sara, Ed din Fertahi Saïf, Experimental determination of thermal conductivity, volumetric heat capacity, diffusivity and thermal effusivity of red earth composite stabilized by wood powder, JP Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 29, Pages 125 - 136, October (2022), doi.org/10.17654/0973576322047

Bouhaddour Nora*, Moufakkir Abdelkrim, El Alami Salah, Samaouali Abderrahim, El Mellouki Sanae, Arbaoui Asmae, Achouaq Aazim Jalila, Dinane Abderrahim, Charia Mohamed, Study of the physico-mechanical properties of thermally modified eucalyptus Camaldulensis wood: the case of the Moroccan forest, JP Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 25, Pages 109 - 125, February (2022), doi.org/10.17654/0973576322007

Nora Bouhaddour*, Abdelkrim Moufakkir, Sara Belarouf, Abderrahim Samaouali, Hanane Sghouri El Idrissi, Abdellah Elbouzidi, Salah El Alami, Study of Thermo-Physical Characteristics and Drying of Araucaria Wood from the City of El Jadida, Morocco, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal Vol. 6, No. 2, 274-278 (2021), doi.org/10.25046/aj060231.

Ajani, M. *, Belarouf, S., Boussaïq, C., Samaouali, A., Balizi, F., Boulla, D., **Bouhaddour, N.**, Arbaoui, A., & Fertahi, S., Impact of waste glass and pet plastic on thermal properties of concrete, JP Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 37, Issue 5, Pages 601 - 615 October (2024). doi.org/10.17654/0973576324039

Charkaoui Abdallah*, Moufakkir Abdelkrim, Belarouf Sara, **Bouhaddour Nora**, Kanibou Fatima, Boussaïq Chaimae, El Alami Salah, Arbaoui Asmae, Samaouali Abderrahim, study of the thermo-physical properties of wood from the forest of the Comoros islands: case of eucalyptus Robusta, JP Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 37, Pages 55 - 661 February (2024), doi.org/10.17654/0973576324004

Nasry Oumaima*, Samaouali Abderrahim, Sghouri El Idrissi, Hanane, **Bouhaddour Nora**, Alaoui Adil Hafidi, Experimental Study of the Thermophysical Properties of the Red Earth Composite Stabilized with Cement Containing Waste Glass Powder, Crystals, Vol. 12, Issue 3 March (2022) Article number 396, doi.org/10.3390/cryst12030396

Sghouri El Idrissi Hanane*, El Rhaffari Younes, Nasry Oumaima, **Bouhaddour Nora**, Samaouali Abderrahim, Thermo-physical characterization of oil shale from the timahdit region in Morocco, JP Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 24, Issue 1, Pages 97 - 111, October (2021), doi.org/10.17654/HM02401009

LISTE DES SYMBOLES UTILISES

➤ Symboles latins :

T	:	La température (°C),
T_{surf}	:	La température absolue de la surface émettrice (°C),
T_{env}	:	La température du milieu environnant de la surface (°C),
V	:	Volume apparent (m^3),
V_S	:	Volume de solide (m^3),
V_l	:	Volume de liquide (m^3),
V_g	:	Volume gazeux (m^3),
V_P	:	Volumes des pores (m^3),
V_v	:	Volume total des vides (m^3),
V_t	:	Volume total (m^3),
V_s	:	Volume de la phase solide (m^3),
V_{eau}	:	Volume d'eau occupant les pores (m^3),
m_l	:	Masse de liquide (kg),
m	:	Masse totale (kg),
m_g	:	Masse de gaz (kg).
m_s	:	Masse de solide (kg),
n_e	:	Porosité effective,
n_t	:	Rapport entre le volume total des vides V_v et le volume total V_t .
W	:	Teneur en eau massique,
W_w	:	Poids de l'eau dans le matériau,
W_s	:	Poids du matériau à l'état sec,
S	:	La surface au travers de laquelle le transfert se fait en (m^2),
H	:	Coefficient de transfert de chaleur en ($Wm^{-2}K^{-1}$),

C_p	:	La capacité thermique massique du matériau (J/kg. K),
$U(t)$	:	L'énergie interne du système à l'instant (t),
R	:	La résistance thermique d'un matériau,
D	:	Diffusivité thermique du matériau (m^2/s),
E	:	Effusivité thermique (J/K. $m^2.s^{0,5}$),
C	:	La capacité thermique volumique (J / K. m^3),
t	:	Temps (s),
C_p	:	Capacité calorifique à pression constants ($J K^{-1}$),
e	:	Epaisseur (m),
Q	:	Source de chaleur,
x, y	:	Les coordonnées cartésiennes,
α	:	Niveau de conversion,
P	:	Le nœud principal,
E	:	S'amplifians successivement l'Est,
O	:	S'amplifians successivement l'Ouest,
N	:	S'amplifians successivement le Nord,
S	:	S'amplifians successivement le Sud,
δW	:	Le travail thermodynamique,
δQ	:	L'énergie thermique échangée entre un système et son environnement.

➤ **Symboles grecs :**

φ	:	Flux de chaleur (W),
λ	:	La conductivité thermique (W/m.K),
ρ	:	Masse volumique (kg. m^{-3}),
ρ_0	:	La masse volumique du matériau à l'état sec (kg. m^{-3}),
ρ_l	:	La masse volumique de l'eau liquide (998,3 kgm^{-3} à 20 ° C),

➤ **Indices / exposant :**

i	:	L'indice de discrétisation suivant l'axe de « x »,
f	:	Fluide,
s	:	Solide,
eq	:	Equivalent,
l	:	Liquide,
ch	:	La charge,
m	:	La matrice,
j	:	L'indice de discrétisation suivant l'axe de « z » ,

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Indice de plasticité des sols	18
Tableau 2 : Les caractéristiques mécaniques et électriques de l'unité de contrôle de l'appareil CT-Mètre	64
Tableau 3 : Caractéristiques des échantillons destinés à la détermination des propriétés thermiques	75
Tableau 4 : Valeurs des propriétés physico-mécaniques du bois d'Eucalyptus Camaldulensis	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 5 : Valeurs de conductivité thermique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis en fonction de la température	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 6 : Valeurs de la chaleur spécifique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis en fonction de la température	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 7 : Valeurs de la diffusivité thermique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis en fonction de la température	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 8 : Valeurs d'effusivité thermique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis en fonction de la température	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 9 : Valeurs expérimentales de la conductivité thermique en fonction de la température d'un échantillon d'araucaria à trois faces	82

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les sols forestiers ; supports physiques ou écosystèmes vivants	7
Figure 2 : Cycle de vie de la terre crue : extraction, construction, utilisation, démolition et recyclage. Source : Arnaud Misse.....	7
Figure 3 : Le diagramme circulaire établi par le CRA terre définit les typologies constructives de tous les modes de mise en œuvre de la terre crue répertoriés dans le monde entier.	8
Figure 4 : la terre rouge	10
Figure 5 : Structures en plaquettes de particules argileuses (vue sous MEB) (a) Illite, (b) kaolinite, (c) chlorite	12
Figure 6 : Structure des minéraux argileux	12
Figure 7 : Classification des fibres	24
Figure 8 : Les fibres naturelles (Baley, 2013) [39]	26
Figure 9 : Illustrations de quelques fibres animales, de gauche à droite: cocon de soie, fibres d'Angora et fibres d'Alpaga	26
Figure 10 : Les structures géométriques des composites: (a) fibres longues, (b) fibre courtes, (c) particules.....	27
Figure 11 : Aspect de l'espace poreux (Dana, 1999)	32
Figure 12 : Description d'un milieu poreux avec les trois phases représentées.....	35
Figure 13 : Typologie des porosités (BRGM).....	37
Figure 14 : Types de porosité des matériaux.....	37
Figure 15 : Illustration du concept de la connectivité, d'après [12]. a-C=1 ; b-C=1 ; c-C=2 ; d-C=3.....	39
Figure 16 : Le flux.....	49
Figure 17 : Plaques chaudes	53
Figure 18 : Mesure de la conductivité de chaleur par Barreau gardée	54
Figure 19 : Dispositif expérimental du fil chaud.....	55
Figure 20 : Méthode du fil chaud : exemple de thermo gramme	56

Figure 21 : Dispositif expérimental de la méthode du Hot Disk.....	57
Figure 22 : Schéma du dispositif expérimental	57
Figure 23 : Thermo gramme en face arrière en fonction du temps	58
Figure 24 : Vue plane du dispositif expérimental dans la méthode du plan chaud.....	59
Figure 25 : CT-Mètre (Appareil de mesure des paramètres thermo physiques) structure thermodynamique- énergétique FSR.....	63
Figure 26 : Boîte à gants hermétique régulée en température de 15°C à 80°C.....	67
Figure 27 : Un tamiseur à vibration.....	68
Figure 28 : Différents échantillons en poudre très fin.....	68
Figure 29 : La diffraction des rayons X (DRX) CNRST-UATRS (Rabat-Maroc)	70
Figure 30 : Appareil microscope électronique à balayage CNRT-UATRS (Rabat-Maroc)	71
Figure 31 : Schéma de principe de l'essai mécanique.....	73
Figure 32 : Test visant à déterminer la conductivité thermique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis	76
Figure 33 : Boite à gant thermo régulée en fonction de la température	76
Figure 34 : Le retrait volumétrique en tenant compte de la densité du bois d'Eucalyptus Camaldulensis	Erreur ! Signet non défini.
Figure 35 : Influence de la résistance à la compression du bois d'Eucalyptus Camaldulensis sur le module d'élasticité longitudinal	Erreur ! Signet non défini.
Figure 36 : Degré de dureté du bois d'Eucalyptus Camaldulensis en fonction de sa densité	Erreur ! Signet non défini.
Figure 37 : Conductivité thermique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis en fonction de la température.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 38 (a,b,c) : La fluctuation de la conductivité thermique en fonction de la température et directions.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 39 : Chaleur spécifique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis en fonction de la température.....	Erreur ! Signet non défini.

Figure 40 : Diffusion thermique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis en fonction de la température.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 41 : Effusivité thermique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis en fonction de la température.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 42 : a) Arbre Araucaria, b) Échantillons d'Araucaria	77
Figure 43 : Lancement d'échantillons d'Araucaria dans l'appareil CT-Mètre	79
Figure 44 : Conductivité thermique en fonction de température pour l'échantillon d'araucaria à trois voies	83
Figure 45 : Effet expérimental de la température sur l'état thermique spécifique d'un échantillon d'Araucaria à trois faces.....	84
Figure 46 : Diffusivité thermique en fonction de la température	85
Figure 47 : Effusivité thermique en fonction de la température dans le cas d'un échantillon d'Araucaria à trois faces	86
Figure 48 : Profil d'humidité du bois d'Araucaria	87
Figure 49 : Courbe cinétique d'évaporation de l'échantillon d'araucaria à 75% d'humidité relative, tube à essai de 5 cm de hauteur et 6,25 cm ² de surface.....	88
Figure 50 : La courbe granulométrique	90
Figure 51 : Ech0 (100% La terre rouge)	92
Figure 52 : Diffractogrammes obtenus pour les quatre échantillons de terre rouge avec différents pourcentages de bois en poudre :a) échantillon Ech5 (5% de poudre bois), b) Ech15 (15% de poudre bois), c)Ech20 (20% de poudre bois),.....	94
Figure 53 : Superposition des diagrammes de DRX des quatre échantillons étudiés Ordonnée : angle de diffraction, abscisse : intensité du pic.	95
Figure 54 : Micrographies MEB Ech0	96
Figure 55 : Spectres EDX de l'échantillon Ech0 de référence (La terre rouge)	97
Figure 56 : Six micrographies observées au MEB de l'échantillon Ech5.....	98
Figure 57 : Spectres EDX de l'échantillon (Ech5) de la terre rouge dopée avec 5% de poudre en bois	99

Figure 58 : Les spectres élémentaire chimique par EDX au MEB Ech15	100
Figure 59 : Spectres EDX de l'échantillon (Ech15) de la terre rouge dopée avec 15% de poudre en bois	101
Figure 60 : Spectres EDX de l'échantillon (Ech20) de la terre rouge dopée avec 20% de bois en poudre	102
Figure 61 : Les spectres élémentaires chimiques par EDX au MEB (Ech20)	102
Figure 62 : L'effet de la masse volumique et le volume compacté sur la conductivité	107
Figure 63 : CT-mètre.....	109
Figure 64 : Diagramme de l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur de poudre de bois à la température de 20	110
Figure 65 : Diagramme de l'évolution de la capacité thermique en fonction de la teneur de poudre de bois	111
Figure 66 : Diagramme de l'évolution de la capacité thermique en fonction de la teneur de poudre de bois	112
Figure 67 : Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en poudre de bois.	113
Figure 68 : Graphique montrant l'impact de la concentration en sciure de bois sur l'effusivité thermique à température fixe ($T=20\text{ C}$).....	114
Figure 69 : Influence de la conductivité thermique sur la densité à température ambiante ...	115

TABLE DES MATIERES

DÉDICACE.....	I
REMERCIEMENT	II
RESUME.....	IV
ABSTRACT	V
ZUSAMMENFASSUNG	VI
LISTE DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES.....	VII
LISTE DES SYMBOLES UTILISES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES.....	XII
TABLE DES MATIERES	XVI
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
Introduction.....	6
I.1 LA TERRE MATERIAU GRANULAIRE	6
I.2 TECHNIQUE DE CONSTRUCTION EN TERRE	8
I.3 COMPOSITION DU MATERIAU TERRE	10
I.4 LES ARGILES.....	12
I.5 CONFORT DES HABITANTS ET LES CONSTRUCTIONS EN TERRE.....	14
I.6 LA STABILISATION DE LA TERRE	15
I.6.1 Sables et graviers.....	17
I.6.2 La plasticité	17
I.6.3 La compressibilité	18
I.6.4 La cohésion	19
I.6.5 Stabilisation de la terre	19
I.6.6 Stabilisation au ciment	20
I.6.7 Renforcement à la chaux	21
I.6.8 Stabilisation mixte chaux-ciment	21
I.6.9 Stabilisation par fibres.....	22
I.6.10 Les fibres	22

I.6.11 Classification des types de fibres	23
I.6.12 Les fibres synthétiques	24
I.6.13 Les fibres artificielles	25
I.6.14 Les fibres naturelles	25
I.6.15 Les fibres animales	26
I.6.16 Fibres végétales	26
I.6.17 Fibres minérales	27
I.6.18 Classification des fibres selon la dimension.....	27
I.6.19 Séquelle des fibres sur les propriétés mécaniques	27
I.6.20 Effet des fibres sur les propriétés thermiques.....	28
Conclusion	29
 CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES MILIEUX POREUX ET LES PROPRIETES DE TRANSFERT DE CHALEUR.....	 30
Introduction.....	31
II.1. GENERALITES SUR LES MILIEUX POREUX	31
II.1.1 Description des milieux poreux	31
II.1.1.1 Définition et morphologie des pores	31
II.1.2 Etude granulométrique du milieu poreux.....	33
II.1.3 Paramètres hydrodynamiques d'un milieu poreux	33
II.1.3.1 Conductivité hydraulique $K(\theta)$	33
II.1.3.2 Diffusivité D	34
II.1.3.3 Les différentes phases du milieu	35
II.1.4 Grandeurs caractéristiques d'un milieu poreux.....	36
II.1.4.1 Porosité.....	36
a. Définition.....	36
b. Différents types de porosités	36
II.1.4.2 La distribution de taille des pores.....	38
II.1.4.3 Striction	38
II.1.4.4 Connectivité	38
II.1.4.5 Teneur en eau	39
II.1.4.6 Le degré de saturation	39
II.2. LES MATERIAUX COMPOSITES	39
II.2.1 Principes fondamentaux des matériaux composites :.....	40
II.3. TRANSFERTS DE CHALEUR.....	40
II.3.1 Modes de transfert de chaleur	41
II.3.1.1 Conduction thermique	41
II.3.1.2 Rayonnement thermique	42

II.3.1.3 Convection thermique	42
II.4. LES PROPRIETES THERMO PHYSIQUES	43
II.4.1 Conductivité thermique	43
II.4.2 La résistance thermique	43
II.4.3 Capacité thermique	44
II.4.4 Diffusivité thermique	44
II.4.5 Effusivité thermique.....	44
II.5. TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES MILIEUX POREUX.....	44
II.5.1 Modèles de la conductivité thermique en milieu poreux	44
II.5.1.1 Modèles de Hatta et Taya.....	46
II.5.1.2 Modèle de premier ordre pour la conductivité thermique	47
II.5.1.3 Modèle de Lewis et Nielson.....	47
II.5.1.4 Modèle de Krisher	48
II.5.1.5 Modèle de Hamilton.....	49
II.5.1.6 Modèle de Maxwell.....	49
II.5.1.7 Modèle d'Agari	50
II.5.1.8 Modèle de Bruggeman	50
II.5.1.9 Modèle de Hamilton-Crosser	51
II.5.2 Les approches pour évaluer la conductivité thermique	51
II.5.2.1 Les approches en état stable stationnaire.....	51
a. La méthode « Plaque chaude gardée »	52
b. La méthode du « Barreau gardée »	53
II.5.2.2 Les approches en état instable	54
a. La méthode du « Hot Disc »	56
b. La méthode « Flash »	57
c. La méthode « ruban chaud ».....	58
Conclusion	59
 CHAPITRE III : METHODES ET TECHNIQUES DE CARACTERISATION	
EXPERIMENTALES	61
Introduction.....	62
III.1 METHODES ET TECHNIQUES DE CARACTERISATIONS.....	62
III.1.1 La Conductivité thermique	62
III.1.1.1 Dispositif expérimental : CT-METRE.....	62
III.1.1.2 Principes De Mesure	63
III.1.2 La Capacité thermique volumique.....	64
III.1.3 Effusivité et Diffusivité thermique	65
III.1.4 Cellule de mesure à différentes températures : boîte à gants	66

III.1.5 Granulométrie	67
III.1.6 Diffractométrie de rayons X (DRX)	69
III.1.7 Microscopie électronique à balayage (MEB) et microanalyse par dispersion d'énergie des rayons X (EDX)	70
III.2 MATIERES ET METHODES	71
III.2.1 Etude des propriétés thermo-physique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis et du bois Araucaria d'El Jadida	71
III.2.1.1 Caractérisation des propriétés physico-mécaniques	71
III.2.1.2 Modification thermique du Bois d'Eucalyptus Camaldulensis	72
a. Méthode de préparation des échantillons	72
b. Propriétés physico-mécaniques	72
c. Propriétés thermiques	74
III.2.2 Analyse des propriétés thermo-physiques et du processus de séchage du bois d'Araucaria de la ville d'El Jadida.....	76
III.2.2.1 Préparation d'étude sur le CT-mètre pour la mesure de la conductivité thermique.....	77
III.2.3.2 Cinétique de séchage.....	79
Conclusion	80
CHAPITRE IV : ANALYSE RESULTATS EXPERIMENTAUX	81
Introduction.....	82
VI.1 DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES MATERIAUX	82
IV.1.1 Conductivité thermique	82
IV.1.2 Chaleur thermique spécifique au volume	83
IV.1.3 Diffusion thermique	84
IV.1.4 Effusivité thermique	85
IV.1.5 Taux d'humidité.....	86
IV.2 ETUDES EXPERIMENTALES SUR LE COMPOSITE TERRE ROUGE INCORPOREE PAR DES MICROFIBRES DE BOIS	89
IV.2.1 Matière première et préparation des échantillons	89
IV.2.2 Préparation des éprouvettes	89
IV.2.3 Mesure de la distribution granulaire	90
IV.3. CARACTERISATION CHIMIQUE, MINERALOGIQUE.....	91
IV.3.1 Analyse par diffraction des rayons X	91
IV.3.2 Microscopie électronique à balayage (MEB) et microanalyse chimique par (EDX).....	96
IV.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	96
IV.4.1 Échantillon de Référence.....	96
IV.4.2 Comparaison des différents échantillons (Ech0, Ech5, Ech15, Ech20).....	104

IV.5 CARACTERISATION DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES.....	105
IV.5.1 Impact du compactage sur la conductivité thermique	105
a. Préparation des Eprouvettes	105
b. Protocole de mesure de la conductivité thermique	106
IV.5.2 Terre rouge stabilisée par la poudre de bois	108
IV.6 RESULTATS ET DISCUSSION.....	109
IV.6.1 Influence de l'ajout de la poudre de bois sur les paramètres thermo-physiques.....	109
a. Protocole de mesure de la conductivité thermique	109
b. Protocole de la capacité thermique volumétrique C (kJ/m ³ .K)	111
c. Mesure de la diffusivité thermique D (m ² /s).....	112
d. Mesure de l'effusivité thermique E (J/ m ² .K.s ^{0,5}).....	114
IV.6.2 Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité.....	115
Conclusion	116
CONCLUSION GENERALE	117
BIBLIOGRAPHIE	120

INTRODUCTION GENERALE

La terre rouge, reconnue pour son abondance et sa faible consommation d'énergie, est l'un des matériaux de construction les plus couramment employés depuis l'Antiquité. Actuellement, Plus du tiers des habitants du monde vivent dans des habitations en terre [1]. Dans les pays en voie de croissance, 50 % de la population rurale et presque 20 % des urbains vivent dans des habitations construites en terre [1]. Environ un cinquième des monuments historiques et des sites classés au patrimoine mondial de l'UNESCO sont réalisés en terre. Cependant, l'exploitation excessive de cette ressource entraîne un épuisement des ressources naturelles, ce qui nécessite une révision des pratiques et méthodes de construction dans le secteur.

Afin de faire face aux enjeux environnementaux actuels, en particulier ceux concernant les changements climatiques et l'utilisation de matériaux de construction chimiques. (Comme le ciment et les adjuvants) qui ne respectent pas les normes environnementales, il est crucial de privilégier des matériaux naturels et durables, tels que la terre rouge. Ce matériau argileux est une ressource largement présente dans les sols et les formations sédimentaires superficielles [2]. Il représente une solution viable afin de bâtir des habitations durables, respectueux de l'environnement et économiquement accessibles. De plus, il constitue un choix durable dans le secteur du bâtiment pour répondre aux besoins croissants de la population mondiale [3][4]. En revanche, et pour mieux connaître le comportement thermo-physique de la terre rouge, Il est nécessaire de mener des études scientifiques en laboratoire sur ce matériau pour déterminer les conditions de production, les mesures de sécurité à prendre, l'entretien et la maintenance. En effet, la terre rouge présente de nombreux avantages. Il est donc essentiel de mener des essais expérimentaux sur ce matériau afin d'accroître sa durabilité.

Ces dernières décennies, un regain d'intérêt envers la terre rouge dans le but de restaurer et de réparer des monuments historiques et culturels du patrimoine, une action a été entreprise à l'égard de la terre rouge. C'est un matériau écologique et durable qui consomme peu d'énergie dans l'architecture bioécologique. [5]. De plus, ce matériau fabriqué à partir de terre argileuse offre un équilibre thermique et acoustique supérieur à d'autres matériaux de construction traditionnels. Cet équilibre est dû essentiellement à ses performances et capacité d'absorption/désorption d'humidité (caractère hygroscopique) et d'aptitude de stockage de la chaleur [6],[7].

L'objectif central de cette étude est d'accroître des matériaux de construction locaux à travers de la terre rouge. Cette prospection cherche à caractériser des propriétés thermophysiques, chimiques et minéralogiques de la terre rouge argileuse pour améliorer ses performances et prolonger sa durabilité. Ce travail contribuera à enrichir les bases de données scientifiques, fournissant ainsi un soutien lors de l'élaboration de projets de mise en œuvre industrielle ou semi-industrielle de ressources naturelles locales à base de terre argileuse. Au Maroc, comme ailleurs, la terre rouge est une matière première naturelle, abondante, employée comme matériau de construction dans plusieurs secteurs, notamment: celui de l'habitat, des édifices en carrelages ou en briques, les arts de la fabrication céramique, le cosmétique, la médecine et l'industrie pharmaceutique[2]. La substance argileuse contenue dans la terre joue un rôle principal et la rend parfaitement adaptée à la construction. Plusieurs facteurs et paramètres physico-chimiques influencent les propriétés thermiques et mécaniques de ce matériau, comme la masse volumique de la terre [8], sa composition chimique et minéralogique, le degré de compactage, la texture de surface, la nature et le type du stabilisant utilisé [9].

Concernant son caractère thermique, la terre ne se présente pas comme un matériau isolant, mais elle offre une bonne inertie [10], [11]. L'utilisation de dopants végétaux peut contribuer à réduire sa conductivité thermique tout en améliorant sa résistance mécanique. Différentes méthodes peuvent être mises en œuvre pour stabiliser les terres argileuses, notamment le compactage permet de réduire la porosité et la modification de la matrice avec des éléments chimiques comme la chaux et le ciment. Nous avons effectué des études sur l'effet de la réunion de particules sur les caractéristiques mécaniques et thermiques des composites issus de la terre. Selon les recherches de Laborel et Meukam [12], [13], l'ajout de sciure de bois dans les briques de terre améliore les caractéristiques thermiques du mélange tout en préservant les résistances mécaniques en compression. Selon l'étude menée par Al Rim et ses collègues [14], l'ajout de bois dans la terre stabilisée avec différents taux de ciment a révélé une diminution de la conductivité thermique de 0,24 à 0,08 W/ (m.K) lorsque le pourcentage de bois devient de 10 % à 50 %. Cette diminution est associée à une diminution du poids corporel. Récemment, Labat et ses collègues [15] ont créé des composites terre-paille qui ont une masse volumique comprise entre 241 kg/m³ et 531 kg/m³, ainsi qu'une conductivité thermique comprise entre 0,071 et 0,12 W/ (m.K), concluant que l'ajout de particules réduit la masse volumique, ce qui entraîne une diminution de la conductivité thermique. L'inclusion de ces particules confère une résistance isotrope et empêche les fissures de se propager lors de la traction après déformation initiale [16].

Le but principal de cette étude est d'élaborer des composites basées de terre rouge dopées avec des poudres de bois d'Eucalyptus Camaldulensis.

L'Eucalyptus Camaldulensis est une espèce végétale à croissance rapide, il produit une grande quantité de la matière ligneuse durant de courte période vis-à-vis d'autres espèces végétales. Mais, après son abattage, et à cause de sa nervosité, la libération des contraintes de croissance lors de son séchage laisse apparaître des défauts graves (fissures, déformations, ...). Le bois d'Eucalyptus Camaldulensis n'est pas encore valorisé, il est surtout utilisé dans la pâte à papier, les outils agricoles et comme bois de feu. La valorisation de ce type de bois comme étant un bois d'œuvre reste un défi scientifique majeur dans la science du bois. Dans ce sens, nous en avons réservé une importance particulière à travers la caractérisation thermo physique du bois.

En somme, notre contribution scientifique consiste d'une part à étudier les caractérisations thermo-physiques de la terre rouge, et d'autre part sa caractérisation chimique et minéralogique par les techniques de MEB, EDX et puis DRX. Cette étude apportera plus d'informations pour le choix du mode de préparation et l'utilisation durable et plus rationnelle de cette matière première (terre rouge) qui devient de plus en plus sollicitée dans différents secteurs et surtout dans la construction.

Après une synthèse bibliographique qui établit clairement les objectifs de cette étude, ce travail se divise, en plus d'une introduction générale, en trois parties et se termine par une conclusion générale.

-Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique détaillant les caractéristiques fondamentales de la terre comme matériau granulaire, ses techniques de construction, ainsi que les différentes méthodes de stabilisation employées pour améliorer ses propriétés mécaniques et thermiques, notamment à travers l'ajout de liants et de fibres naturelles.

-Le deuxième chapitre explore les milieux poreux et leurs propriétés de transfert de chaleur. Il présente les notions fondamentales de la porosité, de la conductivité thermique et des autres paramètres thermo-physiques, ainsi que les différents modèles théoriques permettant d'évaluer la conductivité thermique des matériaux poreux. Cette étude est essentielle pour comprendre le comportement thermique des matériaux de construction en terre et leur potentiel en tant qu'isolants thermiques.

-Le troisième chapitre est dédié aux méthodes et techniques de caractérisation expérimentales. Il expose les dispositifs et protocoles utilisés pour mesurer les propriétés thermo-physiques des échantillons de terre rouge stabilisés par des fibres de bois.

-Le quatrième chapitre a porté sur l'analyse des résultats expérimentaux de l'effet de l'incorporation des fibres de bois dans la terre rouge stabilisée. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer l'impact de cette incorporation sur la conductivité thermique, la diffusivité, l'effusivité et la capacité thermique volumique, ainsi que d'analyser leur évolution en fonction de la teneur en fibres et du taux de compactage.

Le présent manuscrit est conclu par une conclusion globale qui rassemble une synthèse des résultats obtenus et des perspectives.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

La terre se considère comme le matériau le plus naturel de construction, facilement accessible et recyclable, nécessitant souvent peu de transformations, ce qui en fait un choix éco énergétique. Les propriétés physico-chimiques de la terre, essentiellement un "béton naturel", présentent une valeur inestimable dans le domaine de la construction [17].

Depuis des millénaires, le matériau terre a été employé dans la construction de bâtiments, comme en témoigne l'existence d'habitats traditionnels dans de nombreuses régions du globe. La méthode la plus répandue à travers le monde est la construction en terre crue, que ce soit en adobe, en briques de terre comprimée, en pisé ou en torchis. Cette approche architecturale permet la création de structures simples ou impressionnantes, qui conviennent à une multitude d'environnements. Dépassée par les matériaux de construction industriels (béton, acier), La construction en terre connaît actuellement un regain d'attention, aussi bien dans les pays émergents que dans les nations industrialisées. Bien que ce matériau fasse l'objet de critiques concernant sa vulnérabilité à l'eau et sa pérennité, il présente de nombreux atouts pour l'édification d'habitations écologiques, agréables à vivre et abordables [1]. Cette renaissance s'explique par les qualités intrinsèques de la terre comme matériau de construction, répondant aux enjeux contemporains de développement durable et de confort thermique.

I.1 LA TERRE MATERIAU GRANULAIRE

Un sol est composé de différentes couches connues sous le nom de « Horizons ». Au pied de la végétation, en surface, se trouve la litière (L), constituée des débris de végétaux morts, de feuilles... Elle abrite les différents organismes vivants qui altèrent la matière organique. L'horizon humifère (H) est une couche brune formée par cette décomposition, riche en humus. Le complexe argilo-humique, qui est responsable de la fertilité et de la stabilité du sol, se combine avec des argiles. L'horizon minéral (M) est situé en dessous, composé d'un mélange de débris rocheux et d'humus. À mesure que l'on descend vers cet horizon, la taille des débris minéraux augmente. Le sous-sol débute à la base de cet horizon minéral, avec la roche mère (R).

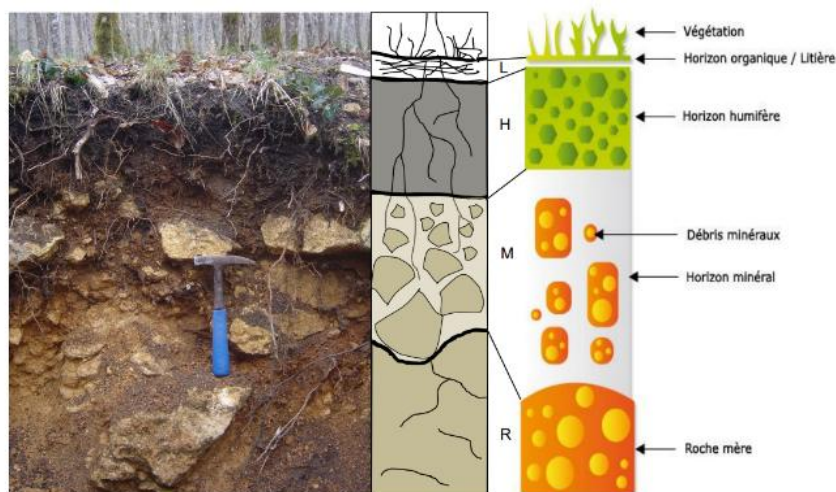


Figure 1 : Les sols forestiers ; supports physiques ou écosystèmes vivants

L'horizon A est la terre végétale de surface, plus sombre que les couches inférieures, un mélange de matières minérales et organiques qui ne convient pas à la construction à cause de sa grande quantité en matières organiques et de sa faible résistance. Par contre, **l'horizon B** correspond au sol employé dans la construction. La roche en décomposition est **l'horizon C**, entre la roche mère et la terre. La roche mère se trouve sous cet **horizon C**. Étant déjà un matériau désagrégué, la terre parvient à résister au temps tant qu'elle bénéficie d'une protection efficace contre l'eau, contrairement à d'autres matériaux de construction susceptibles de se rouiller. À la pourriture ou aux attaques chimiques. Ainsi, le matériau terre présente un avantage considérable : une fois qu'un bâtiment atteint la fin de sa vie utile, La terre est réutilisable pour la construction d'une nouvelle structure ou simplement retournée au sol d'origine [17].



Figure 2 : Cycle de vie de la terre crue : extraction, construction, utilisation, démolition et recyclage. Source : Arnaud Misse.

I.2 TECHNIQUE DE CONSTRUCTION EN TERRE

La tradition de l'édification en terre révèle une diversité remarquable de méthodes de construction, chacune reflétant l'identité propre des régions et des cultures.

Nous pouvons classer la terre crue en 2 catégories principales de construction :

- Les techniques porteuses.
- Les techniques de remplissage.

Le terme "techniques porteuses" désigne tous les processus de réalisation en terre crue qui sont utilisés pour ériger les murs porteurs.

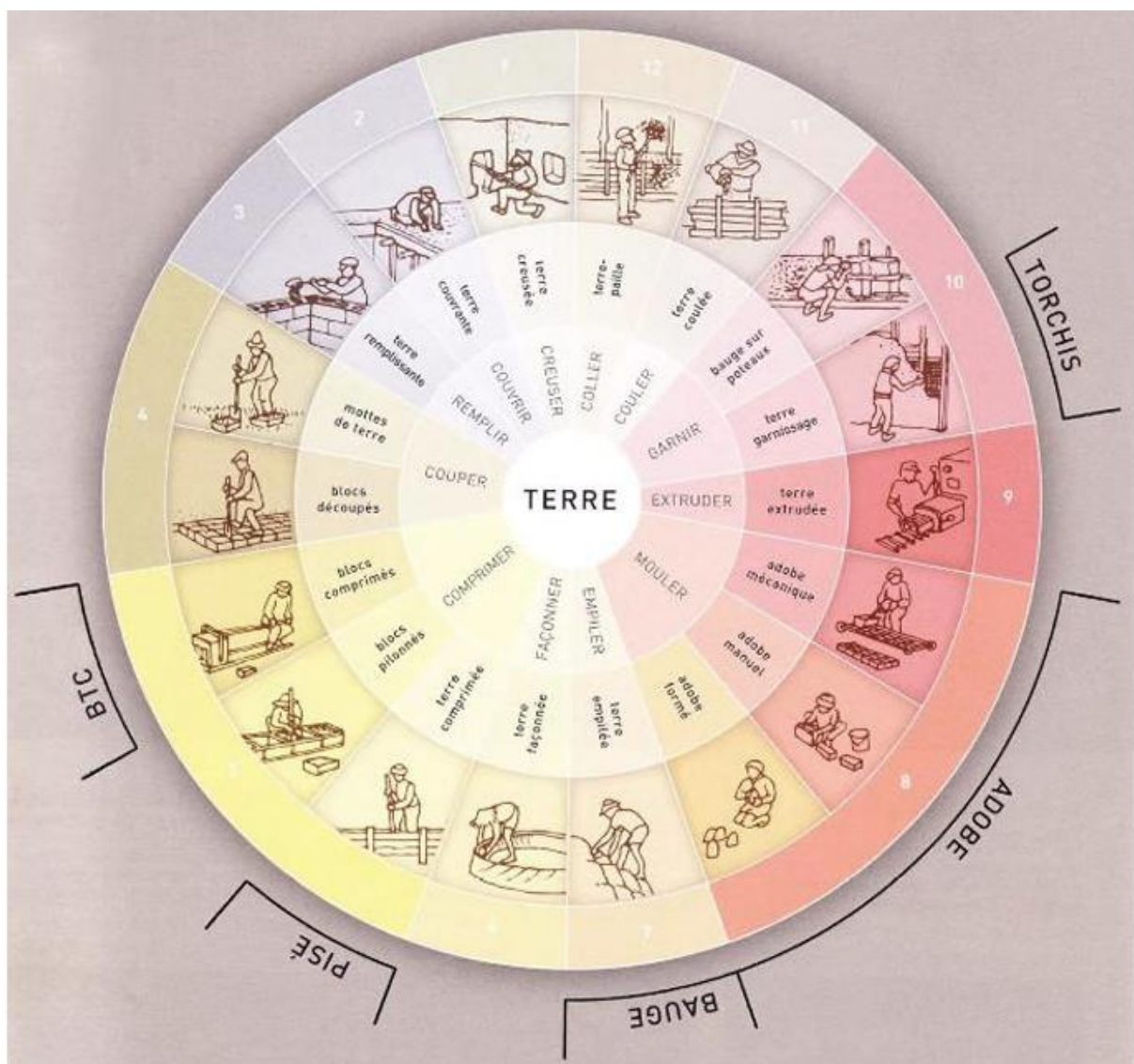


Figure 3 : Le diagramme circulaire établi par le CRA terre définit les typologies constructives de tous les modes de mise en œuvre de la terre crue répertoriés dans le monde entier.

Il y a quatre techniques d'exploitation de la terre crue pour ce genre de bâtiment :

L'adobe : sont des briques en terre crue moulées ou fabriquées à la main sous forme plastique, puis séchées à l'air libre. Pour les créer, nous utilisons une terre fine sans cailloux ni trop d'argile, et nous pouvons y ajouter du sable ou des fibres pour éviter les fissures. Les briques sont moulées, séchées au soleil, puis utilisées dans la construction avec un mortier de terre. Cette méthode est connue pour sa rapidité [17].

La bauge est une technique de construction ancienne utilisée pour édifier des murs élevés en terre, fréquemment porteurs et sans structure, fabriqués à partir de terre mélangée, d'eau et de fibres végétales mélangées dû à l'incorporation de fibres végétales (ou animales), le matériau reste solide et diminue son retrait pendant le processus de séchage [1],[18].

Le pisé La technique du pisé a été utilisée pendant des milliers d'années sans grands changements, jusqu'au XXe siècle. Après la Seconde Guerre mondiale, une véritable révolution a eu lieu, d'abord en Australie puis aux États-Unis, grâce à de nouveaux coffrages et outils pour compacter la terre. Cette évolution a permis de développer de nouveaux concepts architecturaux et systèmes de construction, modifiant ainsi l'aspect et la structure des bâtiments en pisé [19].

Le pisé comporte à comprimer dans un coffrage de la terre humide dans un coffrage, couche par couche, pour créer des murs massifs et droits. Il est parfois stabilisé en utilisant du ciment ou de la chaux, avec une proportion typique de 3% à 6% de ciment, non seulement pour renforcer la résistance mécanique, mais aussi pour réduire les impacts environnementaux [20].

Le BTC, pour Bloc de Terre Compressée : (BTC), qui ressemblent à des briques de pisé, sont fabriqués à l'aide de presses remplies de terre humide. Cette méthode, qui est relativement récente, combine les avantages de la construction en briques traditionnelles. Le moule utilisé dans la technique BTC limite la taille des plus gros grains de terre utilisables car la présence de cailloux ou de gros graviers entraverait une compression uniforme du bloc. Les terres utilisées pour la fabrication de BTC doivent contenir une proportion équilibrée de sable, de limon et d'argile, en règle générale, nous trouvons entre 10 et 25 % de limon et 8 à 30 % d'argile, entre 0 et 40 % de gravier et entre 25 et 80 % de sable. Le taux de chaux hydraulique ou de ciment utilisé pour les BTCS varie de 3 à 19 %, avec une moyenne de 6 à 8 %.

La technique de remplissage dont l'objectif n'est pas de construire de nouveaux murs, mais plutôt d'utiliser la terre crue pour remplir les murs existants ou pour doubler les cloisons. Cette approche permet d'isoler la structure de la maison avec de la terre crue, ce qui améliore considérablement l'inertie thermique du bâtiment. Cette technique se révèle particulièrement

bénéfique pour maintenir un intérieur frais, même pendant les périodes de fortes chaleurs. Elle repose sur un type d'ouvrage distinct :

Le torchis est un bâtiment en bois plein de fibres et d'un mélange de terre, de manière générale, de paille. La terre est mise en mélange avec de l'eau pour obtenir un matériau plastique, qui est ensuite appliqué sur le sol pour le recouvrir entièrement. Le torchis est enduit de terre une fois sec, parfois stabilisé avec de la chaux ou un mélange de chaux et de sable [18].

Le torchis consiste en une combinaison de terre argileuse, de fibres végétales et d'autres ingrédients. La terre employée se compose de roches fines, essentiellement argileuses et adhérentes, avec une faible concentration de sable [21].

L'incorporation de fibres végétales vise à prévenir les fissures dans le mélange lors du processus de séchage. Cela contribue pour garantir la stabilité de la structure et augmenter la résistance aux conditions météorologiques adverses [18].

I.3 COMPOSITION DU MATERIAU TERRE

Les bâtiments en terre sont une partie essentielle du patrimoine socioculturel marocain, qui a été transmis de génération en génération, et reflètent de manière authentique notre tradition architecturale et culturelle. En effet, le Maroc possède de nombreuses constructions en terre qui témoignent de l'histoire ancienne du pays. Avec la pierre et le bois, la terre a joué un rôle essentiel dans l'architecture traditionnelle marocaine.



Figure 4 : la terre rouge

La terre crue constitue l'élément de base de la technique de construction en bauge. Alors que pendant longtemps le choix du sol et de ses propriétés reposait sur l'expérience des constructeurs

de bauge, plusieurs auteurs ont désormais recours à des tests de reconnaissance géotechnique pour identifier les types de sols appropriés à cette technique [22].

L'un des premiers tests pour identifier les sols adaptés à la bauge est la granulométrie. Selon les rapports, un sol courant pour la bauge est composé d'environ 30 % de graviers (diamètre supérieur à 2 mm), 35 % de sable (diamètre entre 0,063 et 2 mm) et 35 % de limon (diamètre entre 0,002 et 0,063 mm), avec une marge de variation d'environ 10 % [23][24].

La qualité de la terre utilisée pour construire en bauge est influencée par diverses caractéristiques physico-chimiques. Une terre argileuse peut présenter des fissurations, tandis qu'une terre sableuse peut manquer de cohésion. Une terre riche en matières organiques, en revanche, peut présenter des propriétés instables, une forte porosité et une durabilité médiocre en présence d'eau. La qualité de la terre est influencée par ses caractéristiques physico-chimiques, notamment :

- ❖ La couleur, qui peut varier considérablement.
- ❖ L'ameublissement, c'est-à-dire la facilité avec laquelle la terre peut être concassée.
- ❖ La stabilité structurale est une mesure qui évalue la capacité de la structure à résister aux ferments de détérioration.
- ❖ Adhérence est influencée par concentration d'humidité.
- ❖ Le poids apparent de cohérence de la terre (exprimé en kg/m³).
- ❖ Densité spécifique des éléments de la terre (exprimée en kg/m³).
- ❖ Quantité d'eau, représentée en pourcentage, qui détermine l'état de l'eau dans la terre.
- ❖ La porosité, qui correspond à la proportion d'espaces vides présents dans la terre. Le pouvoir absorbant, qui mesure la capacité des argiles à fixer des ions positifs ou négatifs à leur surface.
- ❖ La diffusion capillaire, qui concerne le déplacement de l'eau en terre.
- ❖ La chaleur spécifique représente la capacité thermique massique du sol, exprimant l'énergie nécessaire pour accroître sa température d'un degré Celsius par unité de masse.
- ❖ La surface particulière, qui évalue l'échange chimique d'ions (exprimé en cm²/gramme).
- ❖ L'échange total de capacité, qui représente la quantité de cations maximale que la terre peut retenir.

I.4 LES ARGILES

Les argiles présentent une structure cristalline en couches en raison de l'incorporation de groupes hydroxyles OH^- lors de leur formation. Les argiles, qui sont principalement composées de SiO_2 , sont des silicates invisibles à l'œil nu [25].

Les grains très fins, visibles au microscope, ont une grande diversité de formes, mais sont toujours plus fins que larges et longs. Ces grains sont appelés « feuilles » ou « plaquettes ». Les argiles sont classées dans la famille des phyllo silicates hydratés en raison de la structure en couches composée de feuillets superposés. Ces éléments constituent les éléments les plus précis de la planète. Les couches d'oxydes tétraédriques et octaédriques composent les feuilles d'argile [26].

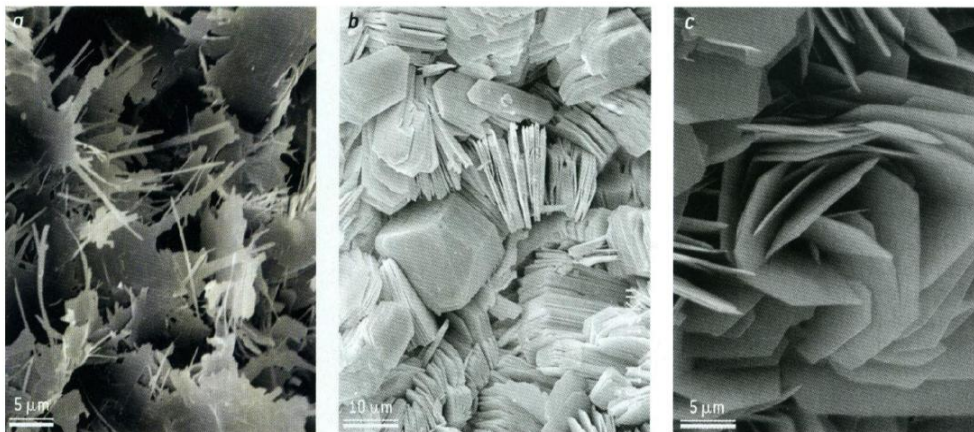


Figure 5 : Structures en plaquettes de particules argileuses (vue sous MEB)
(a) Illite, (b) kaolinite, (c) chlorite

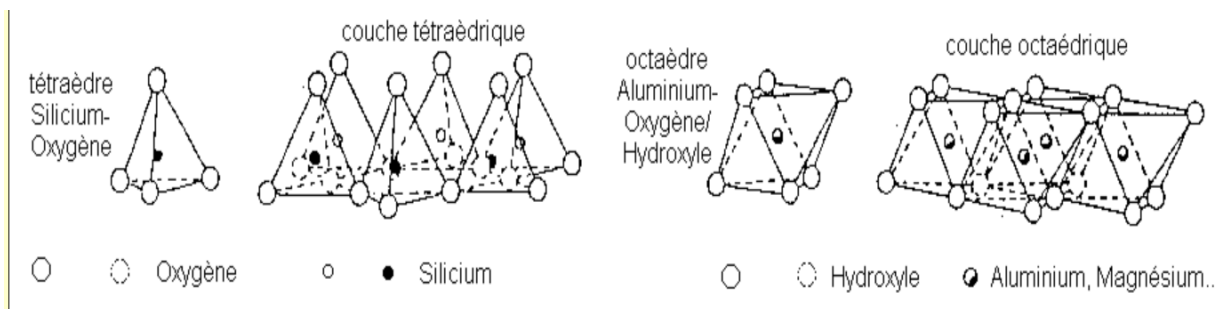


Figure 6 : Structure des minéraux argileux

Il convient de souligner que plusieurs types d'argile se caractérisent par leur charge ionique. Les feuilles peuvent contenir trois à quatre plans d'ions négatifs, comme l' O^{2-} ou l' OH^- . Les ions positifs, tels que les ions de silicium, Al, Mg, s'infiltrent entre eux, selon l'argile utilisée. Différents types d'argile, tels que l'illite, la kaolinite, la smectite et la chlorite, sont causés par cette variation de l'équilibre entre les ions positifs et négatifs [26].

a) La kaolinite ($1/1$, $d=7 \text{ \AA}$) :

- ❖ Le feuillet est neutre car il n'y a pas de substitution dans les couches [27].
- ❖ Elle se développe sur des sols bien drainés, principalement dans les régions tropicales et subtropicales.
- ❖ Souvent, les cristaux de kaolinite sont de taille importante, pouvant atteindre jusqu'à $15 \mu\text{m}$ [28].

b) Les illites ($2/1$, $d=10 \text{ \AA}$) :

- ❖ Formées d'un ensemble octaédrique (alumineux) et de deux ensembles tétraédriques (siliceux).
- ❖ Il est possible de remplacer le silicium par l'aluminium.
- ❖ L'adsorption de cations (K^+) dans l'espace entre les feuilles permet de compenser le déséquilibre des charges.
- ❖ Les illites sont présentes dans toutes les régions et leur structure ressemble à celle de la muscovite, mais elles contiennent davantage d'eau et moins de K^+ [27], [28].

c) Les smectites ($2/1$, $d=14 \text{ \AA}$) :

- ❖ Les substitutions d'atomes sont fréquentes.
- ❖ Il est courant de faire des substitutions d'atomes.
- ❖ L'écartement des feuillets est facilité par le désordre et la faible charge des feuillets, ce qui favorise l'adsorption de différentes molécules (eau, cations, molécules organiques) dans l'espace inter foliaire qui s'élargit ($d = 18 \text{ \AA}$).
- ❖ Les montmorillonites, aussi connues sous le nom de smectites, sont habituellement composées de calcaire, parfois de sodium.
- ❖ Ces formations se produisent dans des sols peu drainés et plutôt alcalins. Les feuillets de smectites peuvent être intercalés de façon régulière ou irrégulière avec d'autres feuillets argileux, souvent illitiques, créant ainsi des inters stratifiés [27], [28].

d) Les chlorites ($2/1$, $d=14 \text{ \AA}$) :

- ❖ Une couche de Mg et d'OH occupe l'espace entre les feuilles. Le fer peut être substitué localement à l'aluminium.
- ❖ Dans les roches magmatiques, les chlorites se présentent sous forme de cristaux plus volumineux et se forment également lors de la diagénèse des roches sédimentaires.
- ❖ Les éléments détritiques peuvent être trouvés dans les sols qui sont exposés à un climat peu agressif.

I.5 CONFORT DES HABITANTS ET LES CONSTRUCTIONS EN TERRE

L'atmosphère, l'humidité de l'air, la température des parois et la vitesse des flux d'air sont d'une grande importance pour le confort thermique des espaces habitables. Dans cette partie, nous examinons les propriétés et le confort thermique des régions chaudes et semi-arides, comme celui du nord de l'Afrique, qui est également partagé par le Proche-Orient, l'Australie et l'Ouest des États-Unis. Ces climats se distinguent par leurs variations thermiques diurnes conséquentes, résultant de l'absence quasi absolue de nuages qui permet au sol de recevoir une intense irradiation solaire durant le jour, puis de dissiper une part importante de cette chaleur vers le ciel pendant la nuit. De cette façon, le bien-être des résidents à l'intérieur des bâtiments est étroitement lié aux caractéristiques thermiques des matériaux des parois et des toits. Le choix de matériaux à faible conductivité thermique est conseillé afin d'assurer une régulation thermique optimale. En été, afin de réduire l'exposition aux rayons du soleil, il est important de préserver les bâtiments pendant les heures de jour et de libérer la chaleur stockée pendant la nuit. Nous mettons en évidence la capacité de la terre rouge argileuse à satisfaire ces exigences, même si sa conductivité thermique est faible, mesurée à environ $0,701 \text{ W/m.K}$ dans notre laboratoire de thermodynamique-énergétique. Cependant, cette caractéristique restreint le temps nécessaire pour dissiper la chaleur stockée. Une problématique cruciale que nous envisageons d'examiner dans le contexte de cette étude est l'accroissement de la capacité de conduction thermique du matériau le biais de dopants tels que le bois ou l'acier.

Dans le domaine de la thermodynamique, l'aptitude d'un matériau à conserver de la chaleur est déterminée par divers éléments notables. D'une part, sa faculté à transporter la chaleur et la variation de température, qui sont des facteurs essentiels pour évaluer la diffusivité. Par ailleurs, sa capacité à absorber ou à évacuer de la chaleur, mesurée par son coefficient d'effusivité [29], qui joue également un rôle critique. En général, l'effusivité d'un matériau est corrélée à sa conductivité thermique, sa densité et sa capacité thermique spécifique [29]. Ainsi, un matériau présente une meilleure aptitude à stocker la chaleur, et par conséquent à la décaler dans le temps, lorsque sa diffusivité thermique est faible et que son coefficient d'effusivité ainsi que son inertie sont élevés. Par ailleurs, plus les parois d'un espace ne sont dotées d'une inertie thermique prononcée, plus le phénomène de déphasage, c'est-à-dire le retard dans le transfert de chaleur, est prolongé.

La terre présente une remarquable inertie thermique, illustrée par exemple par une paroi de 35 cm d'épaisseur affichant une valeur de $275 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{K}$ [30]. Cette caractéristique confère à la terre une capacité significative à retarder les variations de température, ce qui s'avère particulièrement bénéfique dans les régions aux climats chauds et semi-arides, tels que celui du Maroc, où les écarts de température entre le jour et la nuit sont prononcés. Les murs en terre conservent leur fraîcheur pendant la matinée et absorbent la chaleur diurne, qu'ils restituent ensuite dans l'habitation pendant la nuit, lorsque la température extérieure chute brusquement. Pour garantir un rafraîchissement efficace chaque nuit, il est crucial que les parois conduisent la chaleur, ce qui nécessite que le matériau présente une conductivité thermique significative.

Les murs en terre rouge peuvent retenir la chaleur solaire captée pendant la journée et la restituer pendant les nuits plus froides en hiver. Un des principaux avantages de la construction en terre réside dans sa capacité à ajuster la densité de manière flexible du matériau lors de sa réalisation. Cela est particulièrement vrai pour la méthode de la terre-paille, où la densité peut fluctuer entre 300 et 1300 kg/m^3 [31]. En modifiant la charge et l'épaisseur des parois, cette flexibilité permet de réguler de manière efficace le stockage, le déphasage, l'amortissement, et l'isolation thermique, répondant ainsi aux exigences du calcul thermique [1].

I.6 LA STABILISATION DE LA TERRE

Les constructions en terre sont souvent sujettes à une vulnérabilité accrue aux phénomènes d'érosion induits par les pluies, les vents ou les gelées. Ainsi, il devient impératif de les protéger en mettant en œuvre des techniques de stabilisation. Ce processus vise principalement à augmenter la résistance de la terre en termes de dureté, c'est-à-dire sa capacité à résister aux chocs et à l'abrasion, tout en réduisant son effritement et en renforçant son imperméabilité. Cependant, il est crucial de noter que même si la stabilisation contribue à ces améliorations, elle ne peut remplacer l'action du principal liant naturel, à savoir l'argile [32]. La stabilisation de la terre permet ainsi de lui conférer des propriétés physiques plus stables et permanentes, tout en prenant en compte des paramètres tels que la conception de l'édifice, les aspects économiques du projet, la durabilité souhaitée et la qualité intrinsèque du matériau utilisé. Une gamme diversifiée de produits stabilisants adaptés aux différents types de terre est disponible sur le marché, et leur sélection dépend des caractéristiques spécifiques de la terre employée dans le projet de construction [32]. Trois approches distinctes sont généralement utilisées pour stabiliser la terre. Tout d'abord, la stabilisation mécanique, qui agit sur la structure du matériau

en modifiant ses propriétés essentielles telles que la porosité, la perméabilité, la densité et la compressibilité [33]. Cette méthode permet notamment d'ajuster la porosité en réduisant le volume des espaces interstitiels, limitant ainsi les fluctuations de volume dues aux variations d'humidité, comme le gonflement et le retrait. De plus, en diminuant les espaces vides, la stabilisation améliore la résistance de la terre face au ravinement provoqué par la pluie et le vent. Enfin, elle renforce les connexions entre les particules, augmentant ainsi sa résistance et sa capacité de compression [32].

Ensuite, nous réalisons un mélange des grains de différentes tailles pour la stabilisation physique en modifiant la texture de la terre [32]. La stabilisation chimique, en fin de compte, implique la fusion de la terre avec d'autres substances chimiques / matériaux. Il convient de souligner que la stabilisation n'est pas forcément requise et peut être évitée, en particulier quand le matériau n'est pas en contact avec l'eau. De plus, elle représente un investissement financier important qui impacte le coût final du matériau. Ainsi, sa mise en œuvre doit prendre en considération divers facteurs tels que les propriétés intrinsèques de stabilisation de terre, le progrès envisagés, les contraintes économiques et temporelles du projet, ainsi que les techniques de construction spécifiques employées [33].

Il existe diverses méthodes pour stabiliser la terre :

- ✚ La manipulation mécanique implique le pétrissage et la compression de la terre afin d'éliminer les poches d'air, rendant ainsi le matériau plus homogène et compact.
- ✚ L'ajout de fibres, qu'elles soient d'origine animale, végétale ou synthétique, renforce la structure de la terre en lui fournissant une armature. Cette technique améliore la résistance aux forces de tension et de cisaillement en intégrant un maillage de fibres multidirectionnelles, ce qui a pour effet de minimiser la contraction du matériau.
- ✚ L'introduction d'un "liant" à la terre consiste à envelopper les grains et à empêcher leur déplacement. Les matériaux couramment utilisés à cette fin incluent des colles, résines et le ciment Portland.
- ✚ La mise en place d'une matrice qui interagit avec la partie argileuse permet de lier les plaquettes d'argile entre elles ou de catalyser cette liaison. Divers additifs chimiques stabilisants, notamment les polymères, les agents floculants et certains composés acides, ont la capacité de modifier les charges électriques (+ et -) des argiles ou d'altérer leur structure chimique. Par ailleurs, d'autres substances stabilisantes, telles que la chaux, interagissent avec les éléments argileux via une réaction pouzzolanique. Ce processus engendre, par précipitation, la formation d'un nouveau matériau caractérisé par son

insolubilité et son inertie. Il est à noter que la cinétique de cette transformation est conditionnée par les aspects quantitatifs et qualitatifs de l'argile présente.

- ✚ La rapidité de réaction influencée par la quantité et la qualité de l'argile. Les cavités et les microfissures sont comblées soit par un matériau hydrofuge, tel que le bitume, soit par une substance expansive comme la bentonite. Cette dernière, au contact de l'eau, se dilate et colmate ainsi les interstices.
- ✚ L'incorporation d'agents chimiques, notamment des acides, des composés aminés et des substances résineuses, peut être considérée comme une stratégie pour atténuer la réactivité des feuillets argileux face à l'humidité.

Ces diverses méthodes sont largement développées dans la littérature [32], [33].

I.6.1 Sables et graviers

Pour structurer la terre excessivement argileuse, une approche consiste à lui conférer un squelette en introduisant des matériaux granulaires tels que du sable ou du gravier. Dans ce processus, l'argile agit comme un liant, consolidant les particules granulaires pour former une structure solide. L'enrichissement du sol par l'ajout de particules de sable ou de fragments de gravier représente ainsi une méthode de stabilisation physique, visant à modifier la granulométrie du matériau afin d'améliorer sa compacité et sa cohésion [34]. Cette modification permet non seulement de réduire la proportion d'argile nécessaire, mais également de préserver les ressources en évitant une surutilisation de ce matériau précieux.

I.6.2 La plasticité

La consistance de l'argile du sol par rapport à sa teneur en humidité varie en fonction de sa composition minérale et chimique [35]. Cette consistance, que nous pouvons faiblement appeler plasticité, fait référence à la capacité du sol à se déformer sans rupture élastique marquée par l'apparition de craquelures ou un processus de désagrégation. [36].

La plasticité se réfère à la capacité des matériaux à subir une déformation réversible sans se rompre [37]. Dans le cas de la terre, son comportement est qualifié d'élasto-plastique, ce qui signifie qu'elle peut subir à la fois une déformation élastique, qui peut être récupérée, et une déformation plastique, qui est permanente. Cette plasticité est largement déterminée par la teneur en argile et la nature de ces argiles, notamment leur capacité à absorber l'eau. Les mesures utilisées pour évaluer la plasticité des sols sont les limites d'Atterberg [6]. Par exemple, la limite de liquidité (LL) représente la quantité d'eau à la frontière entre les états liquide et plastique, tandis que la limite plastique (PL) représente la quantité d'eau en pourcentage à la

limite de l'état plastique. Les limites semi-solides sont également couramment utilisées pour évaluer la plasticité des sols [38].

A la limite de liquidité (LL), le sol manifeste une certaine résistance au cisaillement ; à la limite plastique (PL), les sols cessent d'être plastiques et deviennent cassants. L'indice de plasticité (IP) représente l'écart entre (LL) et (LP). Cet indice IP définit l'amplitude du comportement plastique du sol. Plus le PI est élevé, plus le gonflement du sol (lorsque le sol est humidifié) et son retrait (lorsqu'il sèche) sont importants. Pour le présent travail, les limites du sol d'Atterberg ont été déterminées selon (DIN 18 122). L'IP obtenu de 10,6% indique, selon une étude [39], que l'échantillon de sol se situe dans la gamme ou la catégorie de type limoneux et argileux, tableau 1. Moevius [32] suggère un IP de 5 à 25 et un LL de 20 à 50 ; cela impliquerait selon cette norme que les sols utilisés dans ce projet sont de nature limoneuse [40].

Tableau 1 : Indice de plasticité des sols

Type de sol	LL, %	PL, %	PI= LL-PL
Sable	10-23	5-20	5
Limoneux	15-35	10-25	5-15
Argile	28-150	20-50	15-95
Bentonite	40	8	32

Le test du cigare est une méthode pratique pour évaluer la plasticité d'une terre sur le terrain. Ce processus consiste à réaliser un cylindre de terre d'une épaisseur de 3 cm, puis à le pousser avec douceur dans le vide. La présence d'une terre argileuse et plastique est indiquée par le fait que le cylindre ne se rompt pas sur une distance de plus de 20 cm. Cette évaluation sur le terrain permet d'obtenir une indication rapide et qualitative de la plasticité de la terre, ce qui peut être utile lors de la sélection des matériaux de construction ou lors de la planification des travaux sur le terrain.

I.6.3 La compressibilité

Quand nous exerçons une force sur un bloc de terre, il se comprime et sa porosité diminue. La compressibilité d'un matériau désigne son aptitude à atteindre une densité maximale sous l'effet d'une force de compactage donnée et pour une teneur en eau particulière. Lorsque la porosité

diminue la densité de la terre augmente. Néanmoins, il est crucial que le volume d'eau soit adéquat pour permettre aux particules de se lubrifier et qu'ils se réarrangent pour occuper le moins d'espace possible. Il est important de ne pas dépasser cette quantité d'eau, car elle pourrait rendre les pores du matériau incompressibles.

I.6.4 La cohésion

La cohésion dans les milieux granulaires trouve son origine dans divers mécanismes, qu'ils soient d'ordre physique ou chimique. Ces mécanismes de cohésion sont généralement des phénomènes locaux qui favorisent l'adhérence entre les grains, renforçant ainsi la structure mécanique globale du milieu granulaire.

La cohésion d'un sol représente son aptitude à maintenir ses particules agrégées liées ensemble sous l'effet d'une contrainte mécanique, comme une force d'attraction. Elle est étroitement associée aux propriétés liantes de sa matrice fine, composée de particules dont le diamètre n'excède pas 2 mm, qui agit comme un lien entre les éléments plus grossiers. Cette caractéristique est fortement influencée par l'abondance et le pouvoir adhésif des minéraux argileux présents dans le mélange. Selon [1], les mortiers grossiers sont classifiés comme suit : mortier sableux, maigre, moyen, gras et argileux.

I.6.5 Stabilisation de la terre

Les méthodes de stabilisation visent à neutraliser ou à restreindre les effets néfastes de l'argile présente dans le sol, afin de réduire sa sensibilité naturelle à l'eau, ce qui peut entraîner une perte de résistance et de cohésion [41]. Selon les spécifications standards du Kenya pour les blocs de terre (1990), la stabilisation vise à renforcer la durabilité et la résistance naturelle du sol en y ajoutant d'autres matériaux [42].

Rigassi (1995) [32] déclare que l'objectif de la stabilisation du sol est d'instaurer des propriétés irréversibles face aux contraintes physiques. Houben (1994) [33] souligne que la stabilisation des sols Nécessite l'altération des caractéristiques de l'ensemble sol-eau-air afin d'acquérir des propriétés pérennes adaptées à une application spécifique. Norton (1997) [35] précise que le but de la consolidation est de perfectionner de manière permanente un sol, que ce soit en augmentant sa résistance, en réduisant les variations de cohésion et de volume causées par les changements du niveau d'humidité, en limitant l'effet érosif de l'eau en surface, ou en combinant ces éléments.

Dans cette thèse, nous examinons deux méthodes de stabilisation distinctes :

- ✚ La stabilisation à l'aide de liants minéraux consiste à intégrer des substances inorganiques dans le matériau afin d'améliorer ses caractéristiques.

- ✚ La stabilisation à l'aide de liants organiques consiste à ajouter des substances qui peuvent réagir chimiquement ou physiquement avec le sol afin d'améliorer ses propriétés.

La stabilisation par des liants minéraux est largement documentée dans la littérature. Selon la bibliographie, plus de 90% des études portent sur cette méthode, dont environ 50% utilisent du ciment, tandis que le restant se partage entre la chaux et additifs minéraux ou des combinaisons de liants minéraux [43]. À notre connaissance, il existe peu de recherches sur la stabilisation de la terre avec des minéraux métalliques tels que la poudre de bois, qui constitue l'objet de notre étude de recherche.

I.6.6 Stabilisation au ciment

Le ciment est communément considéré comme l'agent de liaison minéral le plus performant pour consolider les blocs de terre compressée (BTC) [33]. Son action consiste à établir une adhésion immobile qui restreint tout déplacement, renforçant ainsi la résistance à l'humidité en établissant des connexions entre les éléments de sable et de graviers. Les terres sableuses donnent les meilleurs résultats lorsqu'elles sont stabilisées au ciment [32], et une proportion de cinq à six pour cent de ciment semble suffisante pour obtenir des résultats satisfaisants [32]. L'incorporation de ciment comme agent stabilisateur réduit la contraction et l'expansion du matériau tout en requérant une quantité d'eau minimale. Néanmoins, cette technique a pour effet secondaire de diminuer la capacité de conduction thermique du sol. À mesure que la proportion de ciment s'accroît, les caractéristiques thermiques du mélange tendent à se rapprocher de celles du ciment à l'état pur. Bien que cette méthode présente des atouts indéniables, elle comporte deux inconvénients majeurs : les coûts élevés liés à la fabrication du ciment et la nécessité de disposer de carrières de calcaire pour sa production.

L'existence d'oxydes de fer, caractéristique des sols latéritiques, stimule la réaction pouzzolanique, augmentant ainsi l'efficacité du ciment comme agent stabilisateur. De plus, les terres sableuses présentant un faible indice de plasticité (inférieur à 20 %) constituent un terrain propice à la stabilisation par le ciment. Cependant, plusieurs facteurs peuvent compromettre l'efficacité de cette technique de stabilisation [32], [33] :

- ✚ La présence de matière organique,

- ✚ Eau riche en sel,

- ✚ La présence de sulfates
- ✚ Une proportion élevée d'argile (supérieure à 20 %)

Ces éléments réduisent considérablement l'efficacité du ciment en tant qu'agent stabilisateur, rendant son utilisation moins pertinente dans ces conditions.

I.6.7 Renforcement à la chaux

La chaux est un élément stabilisateur qui établit des connexions chimiques durables entre les particules argileuses. Dans le domaine des travaux routiers, nous utilisons principalement deux formes : la chaux vive (CaO) et éteinte (Ca(OH)_2). Ces composés interagissent efficacement avec les sols argileux, nécessitant toutefois une quantité d'eau significative, variant selon la proportion de chaux utilisée.

Il convient souligner que la chaux a une affinité particulière avec les argiles, mais son interaction avec les sables est moins prononcée. Cette caractéristique la rend généralement peu adaptée à la stabilisation du (BTC), qui requiert des terres sableuses et une faible teneur en eau [41].

Néanmoins, l'utilisation de chaux aérienne présente plusieurs avantages :

- ✚ Diminution du retrait et du gonflement du matériau,
- ✚ Amélioration de la résistance à la compression,
- ✚ Réduction de la sensibilité à l'eau,
- ✚ Baisse de la masse volumique sèche et de la plasticité [32], [41],

Bien que la production de chaux nécessite, comme le ciment, l'exploitation de gisements calcaires, son processus de fabrication consomme moins d'énergie, ce qui représente un avantage non négligeable d'un point de vue environnemental.

Un dosage optimal de chaux doit être déterminé pour différents type de terre. En général, afin d'avoir une stabilisation efficace des sols, la proportion de chaux recommandée se situe entre 6 et 12 % [44]. Les sols riches en argile, avec une teneur pouvant atteindre 70 %, sont particulièrement réceptifs à ce traitement. Toutefois, la présence dans le sol de sulfates ou matière organique peut compromettre l'efficacité de la stabilisation à la chaux [32], [33].

I.6.8 Stabilisation mixte chaux-ciment

La stabilisation mixte chaux-ciment combine les avantages des deux liants minéraux, offrant ainsi une solution complète pour renforcer les propriétés des blocs de terre comprimée (BTC). En combinant le ciment et la chaux, cette méthode vise à optimiser la réaction chimique entre

les deux liants et les particules de terre, renforçant ainsi la résistance et la durabilité du matériau final.

L'incorporation de chaux favorise l'établissement de liens chimiques pérennes entre les composants argileux, ce qui a pour effet de borner les phénomènes de contraction et de dilatation du matériau. Parallèlement, ce processus contribue à accroître la capacité du matériau à contrarier aux forces de compression. De son côté, le ciment crée une liaison inerte qui améliore la résistance à l'eau et la cohésion globale du matériau.

En associant ces deux liants, la stabilisation mixte chaux-ciment permet de bénéficier des effets synergiques des deux matériaux, offrant ainsi une meilleure performance globale du matériau stabilisé. Cette méthode peut être particulièrement efficace dans les cas où une stabilisation plus robuste est nécessaire, tout en conservant les avantages individuels de chaque liant.

I.6.9 Stabilisation par fibres

L'utilisation de fibres comme méthode de renforcement est une technique largement adoptée dans la construction en terre à l'échelle mondiale. Cette approche est particulièrement prisée pour la confection de blocs moulés manuellement, spécialement lorsqu'il s'agit de terres à forte teneur en argile, sujettes à une contraction importante. Les briques d'adobe renforcées à la paille illustrent parfaitement cette pratique traditionnelle. Cependant, l'application des fibres ne se limite pas à cette technique et s'étend à diverses méthodes de construction en terre, telles que le torchis, la bauge, la terre-paille, le pisé ainsi que les blocs comprimés [1].

Dans le domaine des fibres synthétiques, leur utilisation est principalement axée sur l'amélioration des propriétés mécaniques des sols. Elles sont employées pour accroître la résistance à la compression et au cisaillement [45] [46]. La partie suivante de ce chapitre abordera un examen détaillé des principales fibres usées dans l'élaboration de matériaux composites. Nous nous pencherons également sur leur application spécifique dans la fabrication de briques de terre fibrée et dans le renforcement des sols.

I.6.10 Les fibres

Pour renforcer la structure de la terre, nous y intégrons divers types de fibres. Celles-ci peuvent être d'origine animale (comme les poils ou crins d'animaux domestiques), végétale (incluant pailles, enveloppes de céréales, chanvre, fibres de palmier), ou synthétique (telles que l'acier, ou la cellophane). Cette armature fibreuse confère à la terre des propriétés mécaniques améliorées. La paille se distingue comme le matériau de prédilection pour la stabilisation de la terre, grâce à ses caractéristiques uniques. Sa polyvalence lui permet de s'adapter à diverses

consistances du sol, qu'il soit plastique, visqueux, ou même comprimé. Cette versatilité offre deux avantages majeurs : elle minimise le risque de craquelures pendant la phase de séchage et renforce la résistance du matériau à la traction.

Il est intéressant de noter que l'action de la paille se manifeste principalement à l'échelle macroscopique, en renforçant la structure globale du matériau. Cependant, au niveau microscopique, elle ne possède pas d'interaction directe avec les particules d'argile [47]. Cette particularité souligne le rôle mécanique plutôt que chimique de la paille dans le processus de stabilisation.

L'addition de fibres aux matériaux de construction en terre apporte plusieurs avantages. Ces fibres limitent l'apparition de fissures en distribuant les contraintes causées par le retrait de l'argile. Elles accélèrent le processus de séchage en créant des canaux d'évacuation de l'humidité, tout en augmentant paradoxalement la capacité d'absorption d'eau [48]. Encore, elles allègent le matériau, améliorent son isolation thermique et renforcent sa résistance à la traction [33]. Ces propriétés font des fibres un additif précieux pour optimiser les performances des matériaux en terre.

L'efficacité de la stabilisation par fibres soumet des propriétés du sol et des interactions fibres-terre. La résistance à la fissuration, au cisaillement, à la compression et à l'absorption d'énergie sismique est généralement améliorée [33], [49]. Toutefois, un excès de fibres peut réduire les points de contact fibres-terre, affaiblissant le matériau. La distribution uniforme des fibres dans toutes les directions est essentielle pour une stabilité optimale.

I.6.11 Classification des types de fibres

Les fibres peuvent être classées en trois principales catégories : naturelles, régénérées et synthétiques. Les fibres naturelles sont issues de sources végétales, animales ou minérales, comme le coton, la laine ou le lin. Les fibres régénérées sont produites à partir de matériaux naturels, mais subissent un processus chimique pour les transformer en fibres, comme la viscose. Les fibres synthétiques, quant à elles, sont entièrement fabriquées par l'homme à partir de substances chimiques, telles que le polyester ou le nylon [50].

De plus, nous pouvons faire une distinction entre les fibres organiques et les fibres minérales. Les fibres organiques proviennent de sources naturelles vivantes, tandis que les fibres minérales sont d'origine minérale, qu'elles soient naturelles, comme l'amiante, ou synthétiques, comme les fibres céramiques.

Les fibres minérales sont utilisées principalement pour leurs propriétés mécaniques, comme renfort dans les matériaux composites, pour leurs propriétés réfractaires (isolation thermique), dans la fabrication de fibres optiques et de filaments incandescents, ainsi que pour la filtration des gaz et des liquides, entre autres applications.

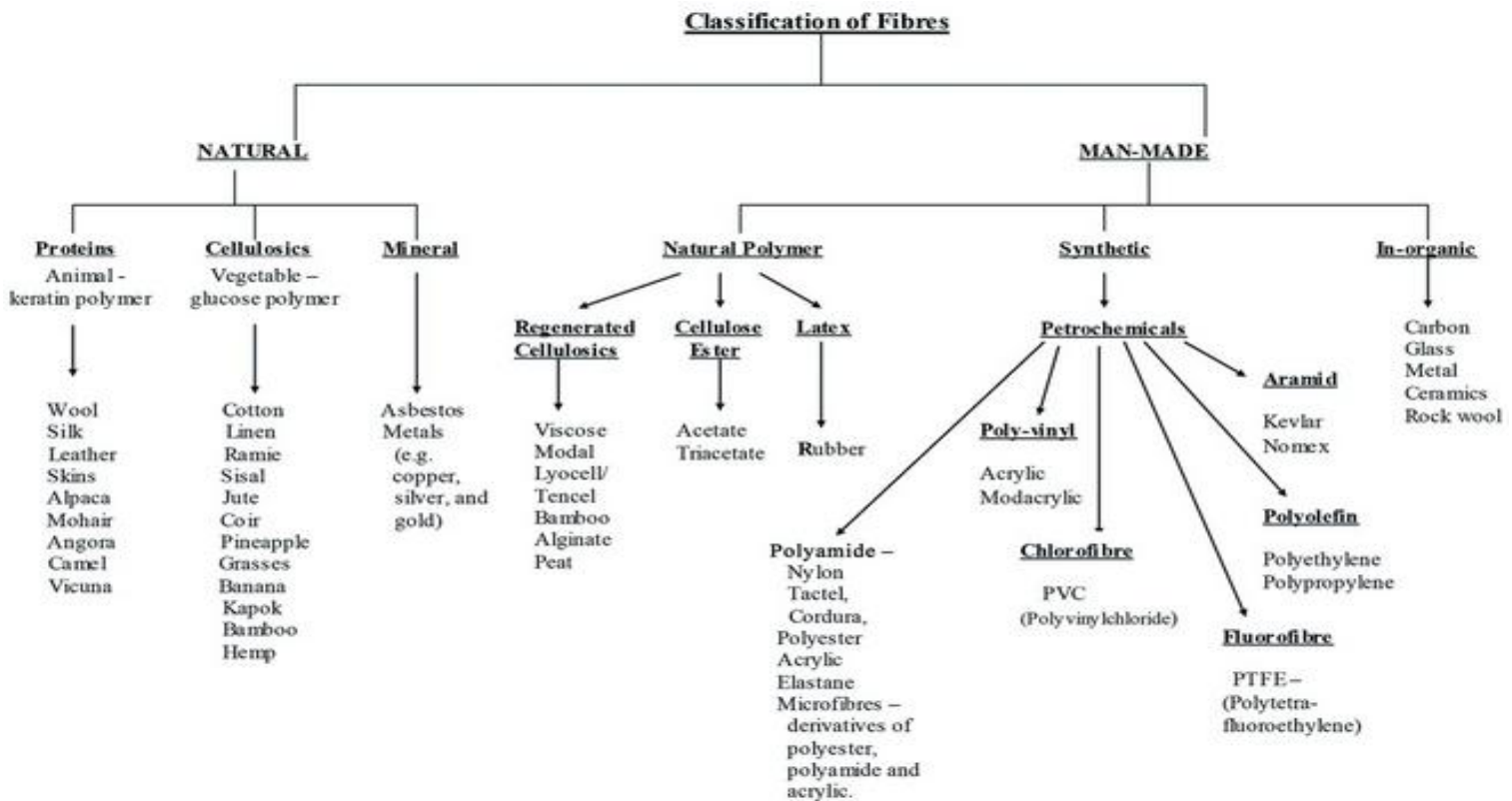


Figure 7 : Classification des fibres

I.6.12 Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont élaborées à partir de polymères de synthèse dérivés de substances fournies par l'industrie pétrochimique. Leur développement a débuté au début du 20ème siècle, suite au succès de la fibre de Viscose. Depuis, de nombreuses fibres synthétiques ont été développées, chacune offrant des propriétés adaptées à des applications spécifiques. Comme les fibres artificielles / synthétiques sont soutirées par filage.

Ces fibres sont très prisées par de nombreux industriels en raison de leur coût réduit, de leur disponibilité tout au long de l'année, et surtout de leur capacité à être adaptées et à modifier leurs propriétés selon les besoins. Malgré leurs avantages, les fibres synthétiques font l'objet de nombreuses critiques environnementales. Ces préoccupations concernent à la fois leur processus de production et leur fin de vie, notamment en raison des défis liés à leur recyclage.

Sur le marché, nous distinguons principalement trois catégories de fibres synthétiques :

-  Les polyamides, plus connus sous le nom de Nylons
-  Les polyester
-  Les fibres issues de dérivés polyvinyliques

Chacune de ces catégories possède des propriétés spécifiques, mais toutes partagent les mêmes enjeux environnementaux qui soulèvent des questions quant à leur utilisation à long terme dans l'industrie de la construction.

Les polyoléfines, en particulier les polyéthylènes et les polypropylènes, gagnent en popularité dans le domaine des fibres synthétiques. Leur part de marché est en constante augmentation, atteignant aujourd'hui environ 8% de la production totale de fibres synthétiques [51]. Cette tendance témoigne de l'évolution dynamique du secteur et de l'émergence de nouvelles alternatives dans l'industrie des fibres artificielles.

I.6.13 Les fibres artificielles

Les fibres synthétiques occupent une place prépondérante dans le secteur industriel, avec une utilisation particulièrement en génie civil. Cette catégorie englobe une variété de matériaux, notamment les fibres de verre, d'acier et de carbone, ainsi que d'autres types moins courants. Actuellement, ces fibres dominent le marché de la construction, étant les plus largement adoptées dans cette industrie [52]. Leur popularité s'explique par leurs propriétés mécaniques avantageuses et leur polyvalence, qui les rendent adaptées à de nombreuses applications dans la construction moderne.

I.6.14 Les fibres naturelles

Les fibres naturelles sont des fibres obtenues à partir de plantes, d'animaux et de minéraux. [53]. Le coton, la laine, la soie, le lin, le chanvre, le jute et la ramie sont des exemples de fibres naturelles. Ces fibres sont utilisées pour fabriquer une large gamme de produits, notamment des textiles, du papier et des matériaux de construction. Elles sont également utilisées dans la production de bioplastiques et de bio-composites. Les fibres naturelles sont renouvelables, biodégradables et sont considérées comme une alternative écologique aux fibres synthétiques.

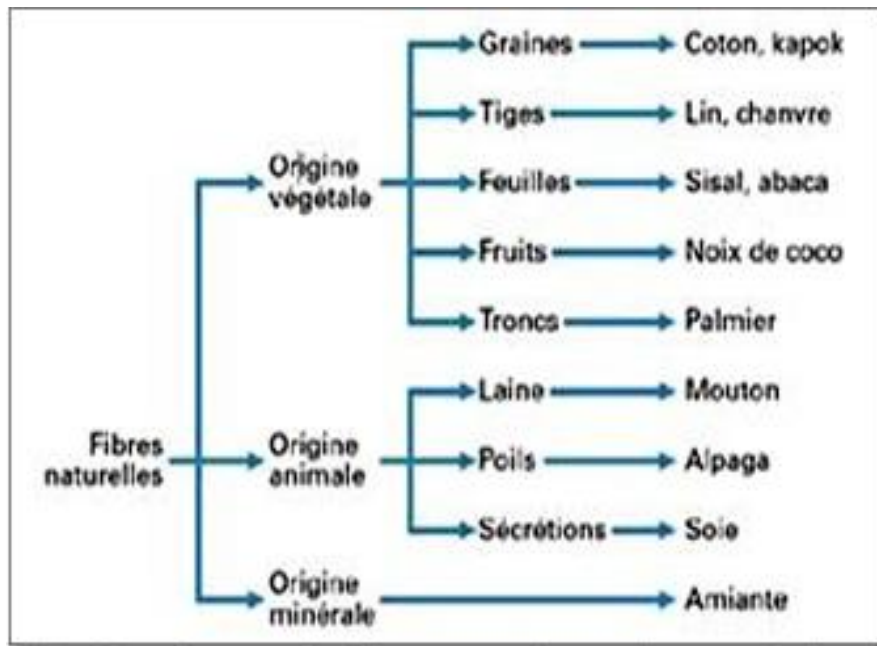


Figure 8 : Les fibres naturelles (Baley, 2013) [39]

I.6.15 Les fibres animales

La laine, fibre primordiale et largement utilisée, se distingue par ses qualités d'isolation thermique remarquables [54], sa forte capacité d'absorption (16-18%) et son élasticité considérable (45%). Les fibres d'origine animale sont catégorisées selon leur provenance, notamment :

- ✚ Poils : la laine, alpaga, chameau, angora, cachemire,
- ✚ Sécrétions : fils d'araignée, soie (Bombyx Mori),



Figure 9 : Illustrations de quelques fibres animales, de gauche à droite: cocon de soie, fibres d'Angora et fibres d'Alpaga

I.6.16 Fibres végétales

Les fibres végétales sont issues de diverses parties des plantes, qu'il s'agisse de la tige, comme c'est le cas pour le lin, ou de la feuille, comme les fibres de palmier dattier. Elles sont incluses intégrante de la biomasse et se distinguent par leur faible densité, leur capacité d'isolation

thermique, leurs résistances élevées à la traction, ainsi que par leur biodégradabilité, constituant un atout majeur sur le plan écologique [55]. Leurs capitaux constitutants sont la lignine les pectines la cellulose et l'hémicellulose, dont les proportions amènent l'ensemble de leurs propriétés.

I.6.17 Fibres minérales

L'amiante a captivé l'intérêt des industriels en raison de sa remarquable résistance aux températures élevées et aux flammes. Il est un bon isolant électrique, et résiste aux attaques chimiques. Il a un grand pouvoir absorbant. Il est utilisé dans en construction et variées installations industrielles. Récemment, en Europe, il a été interdit dans la construction à cause des risques cancérogènes [51].

I.6.18 Classification des fibres selon la dimension

D'un point de vue géométrique, nous pouvons distinguer trois grands types de renforts :

- ✚ Les fibres longues (longueur comparable aux dimensions de la pièce, figure 10 a) ;
- ✚ Les fibres courtes (de longueur faible devant les dimensions de la pièce, figure 10 b) ;
- ✚ Les particules, ou charges renforçant es (figure 10 c).

La matrice qui regroupe tous ces renforts les répartit entre eux et les protège des agressions extérieures, comme mentionné précédemment. De plus, lors de l'utilisation de fibres comme renforts, elles peuvent être soit orientées dans une direction spécifique, soit disposées de manière aléatoire. [56].

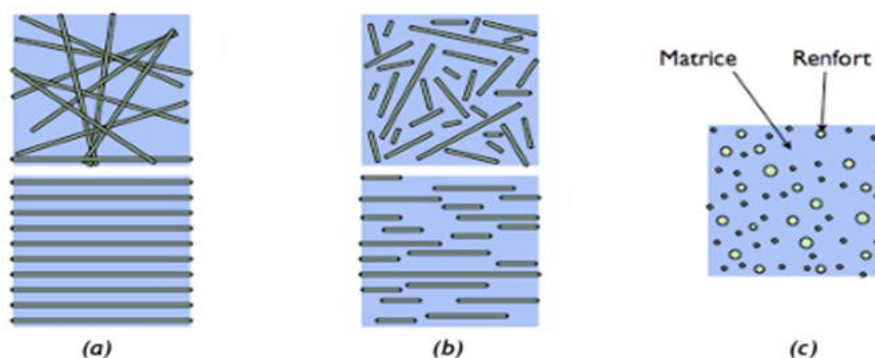


Figure 10 : Les structures géométriques des composites:
(a) fibres longues, (b) fibre courtes, (c) particules

I.6.19 Séquelle des fibres sur les propriétés mécaniques

Puisque la recherche sur les caractéristiques mécaniques des matériaux terreux incorporant des fibres ne correspond pas à l'objectif central de cette thèse, notre recherche bibliographique se concentre particulièrement sur la résistance à la traction et la durabilité. Des recherches

antérieures sur les blocs de terre comprimée ont démontré que l'incorporation de fibres naturelles limite la taille des fissures observées lors du retrait, ce qui améliore la durabilité et la résistance à la traction au niveau de la durabilité. ([57]-[58]) mentionne que l'intégration de fibres dans le matériau terre crée un réseau de fibres omnidirectionnel, ce qui renforce la résistance à la traction et au cisaillement. Les travaux de Khedari et son équipe (2005) [59] ont porté sur des briques d'argile compactée renforcées par des fibres de noix de coco. Leurs conclusions mettent en évidence une modeste réduction de la capacité de résistance à l'écrasement. Cette baisse de performance est liée à trois aspects principaux :

- ✚ La taille des fibres
- ✚ La texture superficielle des fibres
- ✚ La quantité de fibres par unité de volume

Les chercheurs ont constaté qu'en augmentant la proportion de fibres de coco, nous affaiblirons la liaison entre les fibres et la matrice argileuse. Ce relâchement des liens se manifeste par une réduction de la résistance du matériau face aux forces de compression.

Ces découvertes soulignent la nécessité de trouver un juste milieu dans l'incorporation des fibres de coco comme agent stabilisant, afin de tirer parti de leurs avantages tout en limitant leur influence négative sur les caractéristiques mécaniques des briques.

I.6.20 Effet des fibres sur les propriétés thermiques

La conductivité thermique de la terre est impactée par différents éléments externes et internes à ses éléments constitutifs. D'après [6] et [60], il est courant que la conductivité thermique de la bauge fluctue entre 0,47 et 1 W.m⁻¹.K⁻¹, ce qui dépend spécifiquement de la quantité de paille, de la densité et de l'eau. Selon Aymerich [6], nous avons observé une baisse de la conductivité thermique des briques produites à partir de terre argileuse pressée et consolidée considérablement avec l'augmentation de la quantité de fibres, ce qui peut atteindre jusqu'à 50%.

Les teneurs et les dimensions des fibres ont également un impact sur la conductivité thermique, comme l'ont prouvé les travaux de Millogo [61]. L'existence de fibres dans le matériau terre a un impact significatif sur sa densité, Ce qui provoque une baisse de sa conductivité thermique. Selon une étude réalisée par Laurent [10] sur une terre à fibre de paille, une variation de 0,5 % à 22 % de la fibre entraîne une baisse importante de la densité, passant de 1700 kg. m⁻³ à 600 kg. m⁻³. L'ajout de paille entraîne une porosité additionnelle en fonction de son pourcentage, ce qui diminue la conductivité thermique.

De plus, les recherches menées par Nguyen [62] ont démontré que les échantillons de béton de chanvre préparés avec de la chènevotte sans fibre présentaient une conductivité thermique plus élevée par rapport à ceux avec fibre. Cette observation suggère que l'ajout de fibres végétales encourage une porosité inter granulaire accrue, ce qui a un impact sur les caractéristiques thermiques des matériaux.

Nguyen (2010) a également montré que les échantillons de béton de chanvre préparés avec de la chènevotte sans fibre avaient une conductivité thermique supérieure à ceux avec fibre. L'incorporation de fibres végétales favorise une porosité inter granulaire plus élevée, ce qui a un effet sur les caractéristiques thermiques des matériaux.

Conclusion

Grâce à ce chapitre, nous avons pu obtenir davantage d'informations sur les divers stabilisants applicables dans ce domaine, tels que les fibres et le ciment, ainsi que sur les méthodes, les principes et les mécanismes de stabilisation de la terre. L'ajout de stabilisants permet d'améliorer considérablement les caractéristiques de nombreuses variétés de terre. Toutefois, chaque type de terre a son propre stabilisant adapté. Aujourd'hui, plusieurs produits sont utilisés pour stabiliser les sols ou les terres à bâtir.

**CHAPITRE II : GENERALITES SUR
LES MILIEUX POREUX ET LES
PROPRIETES DE TRANSFERT DE
CHALEUR**

Introduction

En puisant amplement son inspiration de la physique des corps continus, la science des terrains tire sa spécificité de la composition particulière de ses éléments. La terre, à l'échelle microscopique, est un matériau discontinu, mais en raison de la quantité importante de ses composants, la notion de continuité peut généralement être maintenue : pour illustrer, un récipient à couture rempli de sable fin renferme approximativement un million de particules. À cette configuration particulière du terrain est liée une perméabilité, qui représente l'espace vacant entre les particules, occupé par un liquide, qu'il soit aqueux ou gazeux, tel que l'eau ou l'air. Le défi de l'identification des sols consiste à caractériser les matériaux de manière suffisamment précise pour pouvoir comparer différents matériaux sur lesquels des constructions analogues ont été réalisées, ou même pour comparer les différents états d'un même matériau. En dehors des caractéristiques immédiatement observables, telles que la couleur, l'odeur et l'état, une série de tests de laboratoire permet d'atteindre cette précision [63].

Les milieux poreux désignent les matériaux constitués de particules imbriquées les unes les autres de manière à laisser des vides entre elles, ces vides sont appelés pores. Les pores peuvent être occupés par un fluide, tel que les gaz comme l'air ou le méthane, ou bien des liquides comme l'eau et les hydrocarbures. Les fluides peuvent s'écouler librement à travers ces pores.

Certains matériaux naturels inertes ou vivants sont des milieux poreux. Des formations naturelles comme les sols, les couches sédimentaires, la plupart des roches constituent des exemples de milieux poreux inertes. Les végétaux comme les troncs de palmiers dattiers, sont aussi des matériaux poreux. Un matériau poreux peut être élaboré artificiellement suivant un processus de fabrication bien déterminé selon une finalité bien définie, soit pour une opération de filtrage, soit pour apporter des propriétés macroscopiques particulières, pour divers besoins industriels ou domestiques (améliorer l'isolation thermique pour la mousse isolante).

II.1. GENERALITES SUR LES MILIEUX POREUX

II.1.1 Description des milieux poreux

II.1.1.1 Définition et morphologie des pores

Un environnement perméable se caractérise généralement comme un corps solide renfermant des espaces vides, dénommés cavités, appelés pores, qui peuvent être soit interconnectés, soit isolés. Pour qu'un fluide puisse circuler à travers un milieu poreux donné, il est nécessaire qu'au moins une partie de sa porosité soit composée de pores interconnectés. Ces pores, qui présentent une grande variété de formes et de dimensions, forment des réseaux poreux offrant de multiples

voies de passage pour un fluide. La porosité interconnectée se compose principalement de 2 éléments : des chambres poreuses reliées par des passages étroits appelés les gorges des pores ou canalicules. Cette configuration est illustrée dans la figure 11.

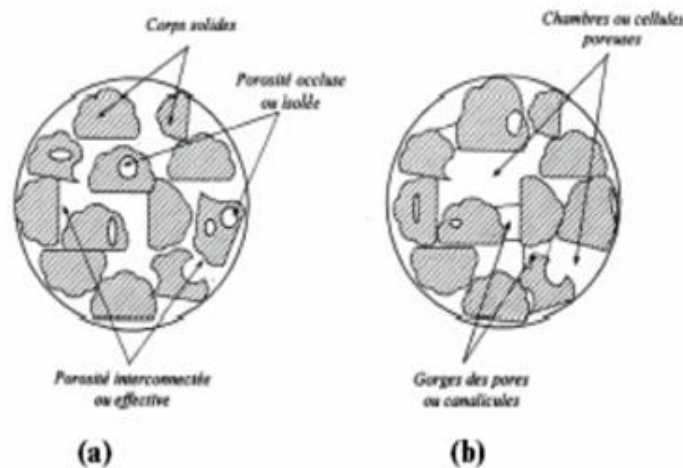


Figure 11 : Aspect de l'espace poreux (Dana, 1999)

Un milieu poreux se compose de grains de tailles variées, entre lesquels sont interconnectés des pores interstitiels et des fissures.

Les cavités sont des espaces vacants plus ou moins arrondis, de faibles proportions (de l'ordre du millimètre), existant entre les éléments solides ou les particules qui ne sont jamais contigus. Les proportions des espaces vacants sont intimement liées à celles des particules, dont l'évaluation est plus aisément réalisable. [64].

Cette catégorie de sols poreux comprend principalement les alluvions fluviales ou glaciaires, les masses d'éboulis et tous les remblais artificiels. Nous pouvons également y inclure les formations gréseuses et les conglomérats perméables. Ces sols sont constitués de grains cimentés ou non, entre lesquels circule un réseau très dense de canaux interstitiels.

Nous pouvons définir un milieu poreux comme un matériau solide avec de très petites cavités à l'intérieur, les pores. Quand le volume des pores reste inchangé, nous considérons que le milieu poreux est indéformable. Dans un milieu poreux, le déplacement d'un fluide est très différent de celui dans des conduites fermées ; les parois rugueuses sont très résistantes au déplacement du fluide. C'est pour ça le fluide circule plus lentement dans un milieu poreux que dans des tuyaux. . Le mouvement des fluides est étudié à l'aide de modèles de milieu poreux, car la complexité des canaux empêche une analyse approfondie du déplacement des particules.

II.1.2 Etude granulométrique du milieu poreux

La granulométrie comprend différentes méthodes de laboratoire utilisées pour étudier les caractéristiques physiques, pétrographiques et géométriques d'un environnement. Les milieux poreux se créent lorsque des particules ou des grains solides se regroupent. Leur diamètre et leur surface font partie des caractéristiques géométriques principales de ces éléments [64].

L'analyse granulométrique vise à mettre en évidence les diamètres des grains en utilisant des diamètres de granulométrie, étudier les propriétés des vides en se basant sur celles des grains, évaluer de manière quantitative les roches meubles, et calculer les dimensions des granules.

Dans un environnement poreux tel qu'un terrain granulaire naturel, les particules d'eau s'écoulent dans des trajectoires onduleuses, déterminées par la taille, la forme et l'organisation des grains minéraux, qui doivent être considérées comme des dimensions aléatoires. En analysant la granulométrie d'un sol, nous pouvons créer une courbe granulométrique qui présente deux caractéristiques : sa position dans le diagramme et sa pente.

II.1.3 Paramètres hydrodynamiques d'un milieu poreux

II.1.3.1 Conductivité hydraulique $K(\theta)$

Le coefficient de conductivité hydraulique K d'un matériau évoque sa capacité à permettre le passage de l'eau à travers lui. Cette conductivité hydraulique est déterminée comme le facteur de proportionnalité reliant le flux q au gradient de potentiel ϕ inférant l'écoulement, selon l'équation :

$$K(\theta) = \frac{-q}{grad \phi} \quad (1)$$

En ce qui concerne le déplacement de l'eau sans l'effet thermique et osmotique. Le potentiel

Φ de l'eau dans le sol non saturé se réduit à la somme de 2 termes :

- Potentiel matriciel ψ .
- Potentiel gravitaire Z , qui représente l'action de la pesanteur, soit :

$$\phi = \psi + (-Z) \quad (2)$$

Dans le cas où l'effet gravitationnel est inférieur aux effets capillaires, le potentiel de l'eau est égal au potentiel matriciel :

$$\phi = \psi \quad (3)$$

La conductivité hydraulique $K(\phi)$ est fortement influencée par la concentration en eau, ainsi que par l'évolution historique de cette concentration, et par conséquent par la succion. Lorsque le milieu est saturé, ce coefficient est égal au coefficient de perméabilité classique de Darcy.

En cas d'anisotropie du milieu, K revêt la forme d'un tenseur. D'un point de vue théorique, $K(\theta)$ peut être exprimé sous la forme :

$$K(\theta) = K_g f_w K_{rw}(\theta) \quad (4)$$

K_g : Perméabilité intrinsèque (m^2).

f_w Fluidité de l'eau définie par : $f_w = \frac{\rho_w \cdot g}{\mu_w} (m^{-1} s^{-1})$.

Où ρ_w : La masse volumique de l'eau ($kg \cdot m^{-3}$).

μ_w est le coefficient de viscosité dynamique de l'eau ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$).

K_{rw} La perméabilité relative de l'eau est une mesure de la capacité d'un sol à permettre le passage de l'eau par rapport à son état de saturation. Cette valeur peut varier de 0 pour un sol entièrement sec à 1 pour un sol avec un degré de saturation de 100%.

II.1.3.2 Diffusivité D

La diffusivité a été définie initialement par Childs & Collis-George en 1950 [65], sous la forme suivante :

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (5)$$

Notons que le concept de diffusivité ne suppose pas un mouvement d'eau par diffusion moléculaire dans les pores et qu'il n'existe pas d'analogie directe entre la première loi de Fick et l'équation de l'écoulement, à l'exception d'un plan horizontal.

La diffusion simplifie le traitement mathématique des équations qui décrivent la circulation horizontale en introduisant la diffusivité. Toutefois, le rapport entre $D(\theta)$ et $\psi(\theta)$ est très influencé par l'hystérésis.

Il est important de souligner également que la diffusivité est influencée non seulement par la concentration en eau, mais également par son gradient. De plus, la diffusivité est influencée par

la géométrie du milieu poreux, la nature de l'interaction entre le fluide et la matrice solide, ainsi que par les paramètres initiaux et les conditions aux limites de l'écoulement.

La loi de Fick s'exprime comme suit :

$$J_a = -D_a \frac{\partial C}{\partial y} \quad (6)$$

J_a Flux massique d'air à travers une surface unité du sol ($\frac{M}{L^2 T}$).

D_a Coefficient de transmission d'air à travers le sol ($\frac{L^2}{T}$).

C : Concentration d'air exprimée comme la masse d'air par unité de volume ($\frac{M}{L^3}$).

II.1.3.3 Les différentes phases du milieu

Un milieu poreux comprend une partie solide et des pores, ce dernier étant occupé par un ou plusieurs fluides. Cette structure se divise en trois phases distinctes : la phase solide (matrice), la phase liquide (fluides dans les pores) et la phase gazeuse (air dans les pores). La phase solide, liée à la structure du matériau, de masse m_s et de volume V_s . La phase liquide, généralement de l'eau ou une solution porale contenue dans le matériau, de masse m_l et de volume V_l . La phase gazeuse, l'air humide, de masse m_g et de volume V_g .

La matrice solide contient un réseau de pores capillaires. Nous différencions 2 types de porosité: la porosité ouverte (ou percolant), formée de pores interconnectés permettant à travers le matériau le transfert de matière, et la porosité fermée, composée de pores isolés ou de réseaux sans connexion avec l'extérieur. Dans l'espace poreux, nous trouvons généralement deux phases: liquide, principalement constituée d'eau, et gazeuse, composée d'une combinaison d'humidité atmosphérique et d'air déshydraté sec [66].

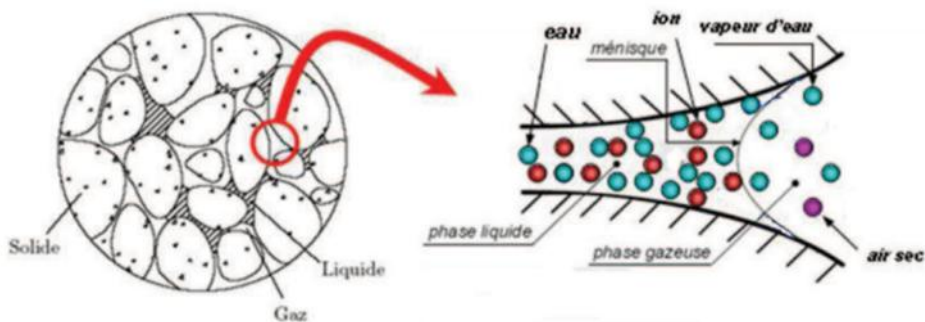


Figure 12 : Description d'un milieu poreux avec les trois phases représentées

II.1.4 Grandeurs caractéristiques d'un milieu poreux

II.1.4.1 Porosité

a. Définition

La mesure du volume des vides dans des échantillons peut permettre de déterminer soit la porosité ouverte (volume des vides relié à l'extérieur et accessible au fluide), également appelée porosité effective, soit la porosité totale. La différence entre ces deux porosités résulte de la présence de pores non accessibles au fluide susceptible de s'écouler dans le milieu, ainsi que de la présence d'eau liée aux grains par des forces moléculaires. Ces pores non accessibles et l'eau liée aux grains sont ce que nous appelons la porosité fermée.

La porosité est repérée par η , la partie qui n'est pas occupée par la phase solide est appelée volume apparent unitaire. [67] qui est représenté sous la forme suivante :

$$\eta = \frac{V_v}{V_t}, \text{ en \%} \quad (7)$$

b. Différents types de porosités

La porosité efficace η_e , coefficient de porosité

L'eau libérée par drainage gravitaire total d'une roche saturée est appelée porosité effective. L'eau gravitaire, V_e , est le volume de l'eau que l'échantillon peut contenir à l'état saturé, puis libéré lors d'un égouttage complet, en rapport avec son volume total, V_t . Elle est principalement influencée par la configuration de la surface spécifique des grains dans le matériau poreux, est représentée par la formule :

$$\eta_e = \frac{V_e}{V_t} \quad (8)$$

La porosité effective c_r

C'est la proportion entre le volume retenu et le volume global apparent :

$$c_r = \frac{V_r}{V_t} \quad (9)$$

La porosité d'interstice et fissure

Porosité d'interstice due à l'existence de pores, d'interstices interconnectés d'origine en général primaire : porosité d'un milieu poreux. Volume de ces vides rapporté au volume total de la roche. Par opposition à la porosité de fissure qui se réfère à la proportion d'espace vide ou de vides discontinus, généralement sous forme de fissures ou de fractures, dans un matériau rocheux.

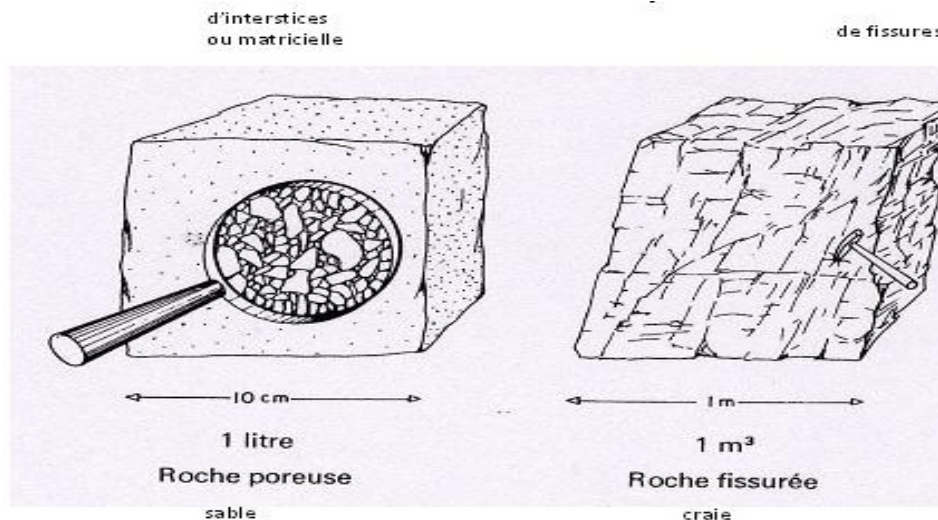


Figure 13 : Typologie des porosités (BRGM)

La porosité ouverte et fermée

Les vides communiquent entre eux permettant la circulation des fluides. Selon la dimension et la géométrie des pores, le matériau est plus ou moins perméable et moins résistant au transfert de chaleur, nous parlons de la porosité ouverte, en revanche les vides à l'intérieur du matériau ne communiquent pas entre eux. Le matériau reste imperméable, et surtout, a une conductivité thermique diminuée, car l'air emprisonné dans les cavités donne au matériau des qualités intéressantes dans le cas de la porosité fermée.

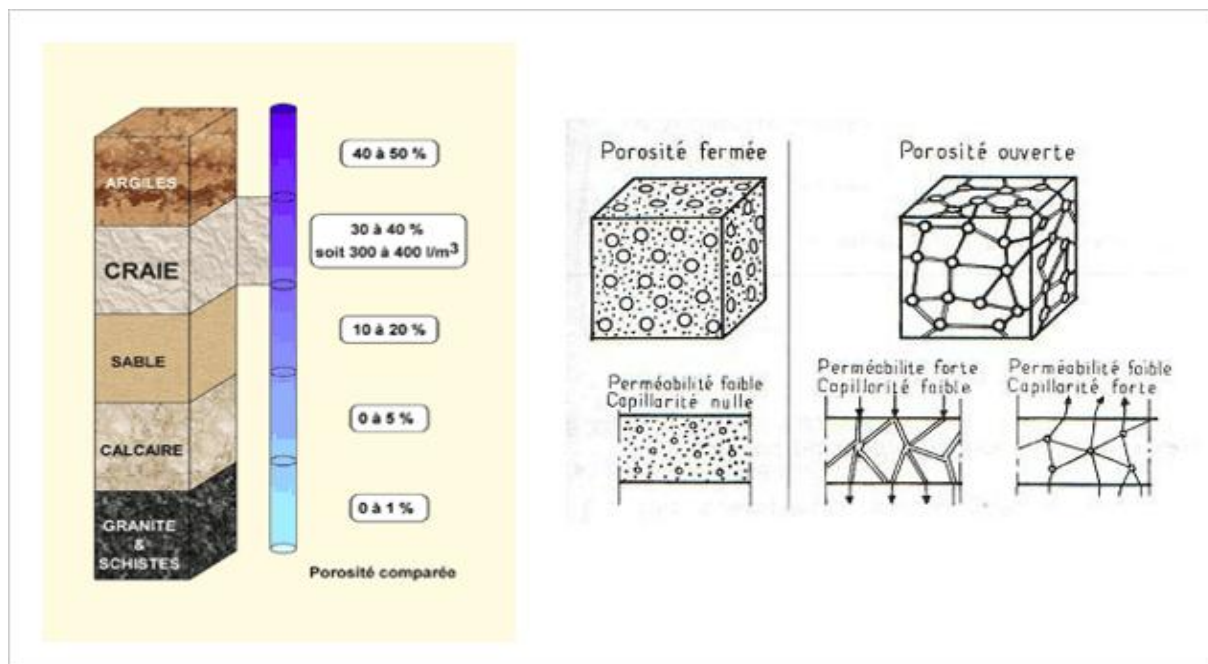


Figure 14 : Types de porosité des matériaux

II.1.4.2 La distribution de taille des pores

Il est essentiel de comprendre la répartition des tailles de pores pour mieux réguler les processus de transport et de transfert dans les milieux poreux. La distribution de taille des pores peut être mesurée de différentes manières, notamment par la technique de la porosimétrie au mercure, la diffusion de la lumière laser, la microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie de relaxation nucléaire. L'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) a établi une classification des milieux poreux en fonction de la taille de leurs pores (de diamètre D) comme suit :

- ✚ Les micropores : pores avec un diamètre inférieur à 2 nm.
- ✚ Les méso pores : pores avec un diamètre entre 2 nm et 50 nm.
- ✚ Les macros-pores : pores avec un diamètre $>$ à 50 nm.

Généralement, les pores percolant ont des tailles différentes et des formes qui évoluent le long de l'écoulement [68].

II.1.4.3 Striction

Quand la forme d'un pore évolue tout au long de son parcours, la partie la plus petite constitue une striction. Ces rétrécissements influencent le flux des fluides à seuil d'écoulement, indépendamment de l'origine de ce seuil (pression capillaire, adsorption isotherme, thermoporosimétrie, etc.), parce que ce sont les plus petits diamètres qui contrôlent le flux dans le port percolant.

II.1.4.4 Connectivité

À l'exception de quelques cas rares, tels que dans les végétaux, les pores percolant sont interconnectés et forment un réseau. La connectivité, notée C , représente le nombre de boucles qui peuvent être formées en traversant chaque pore une seule fois. Pour une surface fermée, la connectivité est équivalente au nombre de coupes de "branches" (ou de pores, dans notre cas) qu'il est envisageable de le faire sans la diviser complètement en 2 parties. Cette connectivité permet de créer des modèles de réseaux, de distinguer les pores isolés des parties mortes du réseau percolant [69].

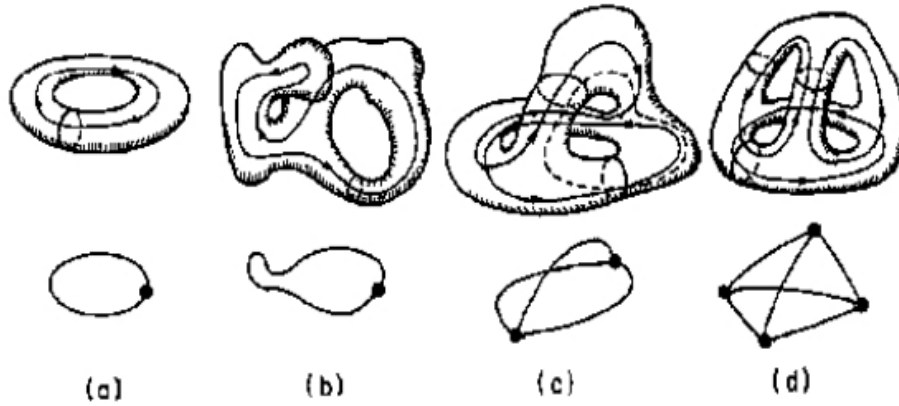


Figure 15 : Illustration du concept de la connectivité, d'après [12]. a-C=1 ; b-C=1 ; c-C=2 ; d-C=3

II.1.4.5 Teneur en eau

La connectivité est un paramètre utilisé dans un milieu pour évaluer la quantité d'eau présente. Pour quantifier cette eau, nous utilisons généralement deux mesures distinctes :

✚ La teneur en eau massique / volumique

La teneur en eau massique est définie comme l'alliance entre la masse d'eau liquide (m_l) et la masse de la matrice solide (m_s). Cette mesure permet d'exprimer la quantité d'eau par rapport à la masse du matériau sec.

$$u = \frac{m_l}{m_s} \quad (10)$$

En revanche, la teneur en eau volumique (θ_l) est définie comme le rapport entre le volume d'eau liquide (V_l) et le volume total (V_s) :

$$\theta_l = \frac{V_l}{V_s} \quad (11)$$

II.1.4.6 Le degré de saturation

Le rapport entre le volume d'eau et le volume des vides dans un sol est connu sous le nom de degré de saturation, noté S_r . Il s'agit d'un paramètre sans dimension qui est couramment exprimé en pourcentage. Un sol complètement sec a un degré de saturation de 0 %, tandis qu'un sol saturé en eau a un degré de saturation de 100 %.

II.2. LES MATERIAUX COMPOSITES

Les matériaux composites se caractérisent par la combinaison d'au moins deux composants non miscibles mais possédant chacun une forte adaptabilité. Les attributs correspondants de ces composants se combinent pour former des matériaux aux propriétés thermiques, mécaniques

et/ou physico-chimiques progressées. La spécialité des matériaux composites réside dans leur capacité à adapter leurs propriétés à des besoins spécifiques. Cette adaptabilité en fait un atout majeur et les aide à lutter avec les matériaux traditionnels tels que les métaux et les alliages.

II.2.1 Principes fondamentaux des matériaux composites :

Les matériaux assemblés comprennent généralement un agent de renforcement et un adhésif, l'adhésif est souvent appelé matrice. Le rôle du renfort est d'apporter une résistance mécanique au composite [70]. D'autre part, la matrice assure la liaison entre les différents composants et gère la transmission de force, tout en maintenant la stabilité face aux changements d'environnement et de température. Le choix du couple renfort/matrice détermine les propriétés finales du matériau composite. Parmi les types de renfort fibreux fréquemment utilisés, nous pouvons citer :

- ✚ La fibre de verre est la plus utilisée aujourd'hui [71].
- ✚ Fibre de carbone, utilisée pour des applications structurales [72].
- ✚ Les fibres aramides sont employées dans des domaines plus spécifiques, tels que la protection contre les balles [73].
- ✚ De leur côté, les fibres naturelles émergent rapidement en raison de leur faible coût et de leur impact positif sur l'environnement [74].

Il y a aussi des matrices, classées en trois grandes familles : matrices organiques, céramiques et métalliques.

Trois types de polymères peuvent être employés dans les matrices organiques : les polymères thermoplastiques, thermodurcissables et les élastomères. Grâce à cette variété de renforts et de matrices, il est possible de modifier les matériaux composites en fonction des besoins particuliers. Le développement industriel de ces matériaux repose sur l'amélioration de leurs caractéristiques physico-mécaniques.

II.3. TRANSFERTS DE CHALEUR

Lorsqu'un système interagit avec son environnement, cela entraîne un échange d'énergie qui induit une transformation dans ce dernier. Deux formes d'énergie sont impliquées : le travail et la chaleur.

Ce dernier aspect est très important et intervient dans les mécanismes de transfert de d'énergie. Le second principe de la thermodynamique démontre que la chaleur se transfère d'un corps chaud à un corps froid, ou, de manière équivalente, d'une grande température à une température

inférieure. Par conséquent, le système ne sera pas en équilibre thermique pendant ce transfert. Ainsi, nous parlons de transfert thermique pour décrire un échange de chaleur dû à une différence de température.

II.3.1 Modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur, également appelé transfert thermique, peut être décrit comme l'échange d'énergie entre deux corps en raison d'une variation de température. Il y a trois principales méthodes de transfert de chaleur

- ✚ La diffusion thermique, aussi connue sous le nom de conduction thermique.
- ✚ Le spectre thermique.
- ✚ La convection est un mélange de conduction et de circulation de fluides.

Les capitaux modes de circulation de la chaleur sont la conduction et le rayonnement, tandis que la convection consiste à conduire et à déplacer un fluide. Il est essentiel d'établir les problèmes de manière adéquate en prenant en considération ces divers mécanismes, car il est rare qu'un seul mode de transfert soit impliqué ; souvent, deux voire trois modes peuvent être utilisés en continu.

II.3.1.1 Conduction thermique

La conduction correspond à la transmission de chaleur, ou à l'échange d'énergie interne, par une différence de température entre deux parties d'un milieu solide, liquide ou gazeux, ou entre deux milieux en contact physique (c'est-à-dire un gradient de température présent dans un milieu). Nous étudions principalement ce phénomène dans les milieux solides, car dans les milieux fluides (liquides ou gazeux), il est souvent lié à un mouvement de matière, un mécanisme de convection.

L'unique mécanisme de transfert de chaleur dans un solide homogène, opaque et compact est la conduction. Ce phénomène s'effectue progressivement, c'est-à-dire que si une partie d'un solide est chauffée, la chaleur se répand progressivement à travers celui-ci. La rupture du solide interrompt le transfert de chaleur.

L'un des exemples fréquents de conduction est celui d'une barre de métal chauffée à l'une de ses faces. La conduction a une origine microscopique, c'est-à-dire qu'elle agit comme un mécanisme de transduction de la chaleur à travers le matériau.

II.3.1.2 Rayonnement thermique

Le rayonnement thermique peut être considéré comme une forme particulière de rayonnement électromagnétique, avec le rayonnement solaire comme exemple le plus simple. Contrairement à la conduction et à la convection, le rayonnement thermique est le seul mode de transfert de chaleur qui peut se propager dans le vide, car il n'a pas besoin de support matériel pour se déplacer d'un corps à haute température vers un autre plus froid.

Tout corps émet un rayonnement tant que sa température est différente de 0 Kelvin. Ce qui distingue le rayonnement thermique des autres ondes électromagnétiques est son origine, c'est-à-dire la température du corps émetteur. Ainsi, le rayonnement thermique est essentiellement un phénomène de surface.

Un exemple classique est le chauffage d'un objet par le soleil. Dans cette situation, l'énergie lumineuse émise par le soleil (source d'énergie à haute température), est absorbée par l'objet sans qu'il y ait de contact direct entre le soleil et l'objet. Cela entraîne une augmentation de la température de l'objet, démontrant ainsi que le rayonnement est effectivement un mode de transfert d'énergie.

II.3.1.3 Convection thermique

La convection est le mode de transfert thermique qui implique le déplacement d'un fluide (gazeux ou liquide - c'est-à-dire un écoulement) et un échange de chaleur avec une surface à une température différente.

Par exemple, cela se produit le long d'un radiateur. L'air froid entre en contact avec le radiateur, se réchauffe, se dilate, puis monte sous l'effet de la poussée d'Archimède. Il est ensuite remplacé par de l'air froid, créant ainsi des courants de fluide dans l'air ambiant.

Nous distinguons généralement deux types de convection :

- ✚ La convection forcée, qui résulte de l'action d'une pompe, d'un ventilateur, ou de tout autre moyen externe qui génère un mouvement du fluide.
- ✚ La convection naturelle, où le mouvement du fluide est causé par des différences de densité, elles-mêmes dues à des différences de température [75].

Pour un transfert de chaleur entre une surface solide et un fluide en mouvement, le flux thermique échangé est modélisé par la loi de Newton [76]. Cette loi décrit quantitativement le transfert de chaleur par convection dans ce type de configuration :

$$\Phi = h S (T_1 - T_2) \quad (12)$$

Avec Φ flux en Watt (W), S est la surface du corps en contact avec le fluide en m^2 . et h est le coefficient de Newton en $W/m^2.K$

II.4. LES PROPRIETES THERMO PHYSIQUES

II.4.1 Conductivité thermique

Ce paramètre désigne la capacité d'un matériau à échanger ou conserver la chaleur. À mesure que la conductivité thermique réduit, le matériau devient plus isolant. Dans l'éventualité où la terre, sa conductivité thermique dépend surtout de sa densité / porosité. À l'état pur, la terre n'agit pas comme un isolant thermique, mais elle peut acquérir cette propriété lorsque nous y incorporons une autre particule comme la poudre de bois [77].

La conductivité thermique de la terre est influencée par divers éléments :

- ✚ Les capacités de transfert thermique des minéraux de la phase solide.
- ✚ La proportion relative de ces éléments dans le matériau.
- ✚ La densité et la porosité ont un impact sur le degré de compaction.
- ✚ L'organisation interne des pores et de la phase solide.
- ✚ Les interactions entre les particules du matériau.
- ✚ La température de la substance.
- ✚ La quantité d'eau dans le matériau [78].

II.4.2 La résistance thermique

Cette caractéristique, symbolisée par R, évalue sa capacité à réduire le débit de chaleur à travers lui. En d'autres termes, elle indique la capacité d'un matériau à résister au flux de chaleur, que ce soit du chaud vers le froid ou vice versa.

Plus le coefficient de résistance thermique d'un matériau est élevé, plus celui-ci est isolant. Cela signifie que le matériau par conduction laisse passer la chaleur à un rythme encore lent.

En revanche, un matériau présentant une faible résistance thermique permettra à la chaleur ou au froid de traverser rapidement sa surface, surtout en contact direct avec celle-ci.

Comprendre la résistance thermique d'un matériau est essentiel, notamment dans la conception de l'isolation thermique des bâtiments, où le but est de réduire au minimum les échanges

thermiques à travers les parois pour maintenir un environnement intérieur confortable et économe en énergie.

II.4.3 Capacité thermique

La capacité thermique, également appelée chaleur spécifique, représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un mètre cube de matériau de 1 Kelvin [79].

II.4.4 Diffusivité thermique

Ce facteur mesure la profondeur à laquelle la chaleur s'étend après un certain laps de temps dans un matériau. Elle représente l'aptitude à transmettre une fluctuation de température du matériau. En d'autres termes, plus la diffusivité thermique est élevée, plus la température à l'intérieur du matériau augmente rapidement. Cela est généralement observé lorsque la conductivité thermique de la paroi est haute et que sa capacité thermique est faible [80].

La diffusivité thermique est habituellement évaluée à l'aide d'une technique transitoire, souvent désignée sous le nom de "laser-flash" [81]-[82]. Cette méthode implique l'application d'une impulsion laser sur une surface de l'échantillon, ce qui entraîne l'établissement d'un équilibre thermique à travers le matériau, créant ainsi un flux de chaleur vers la surface non irradiée.

II.4.5 Effusivité thermique

Le degré d'effusivité d'un matériau désigne sa capacité à transmettre de l'énergie à son environnement. Plus précisément, elle mesure la capacité d'un matériau à absorber ou à libérer de la puissance thermique. Cette capacité est plus grande que la conductivité thermique du matériau est élevée, ce qui favorise la transmission rapide de la chaleur, et l'élévation de sa chaleur volumique, ce qui indique la quantité de chaleur stockée par unité de volume du matériau[77].

Dans le cas du rayonnement, nous introduisons l'émissivité du corps qui représente la perte de chaleur par radiation d'un corps [83].

II.5. TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES MILIEUX POREUX

II.5.1 Modèles de la conductivité thermique en milieu poreux

Dans le contexte des matériaux terreux, qui peuvent être considérés comme des milieux poreux en raison de la présence de la matrice argileuse, plusieurs modes de transfert thermique peuvent se produire. La conduction se produit à travers la matrice solide ainsi que dans les fluides

présents dans les pores, tandis que les mouvements convectifs et radiatifs peuvent également se produire dans une certaine mesure. Des chercheurs proposent que les transferts thermiques dans les matériaux terreux soient plus complexes. Pour les composites, certaines parties pourraient être considérées comme des milieux poreux [84]. Généralement, la contribution de la convection et du rayonnement dans les pores est souvent perçue comme marginale par rapport aux transferts par conduction au sein des différentes phases dans les milieux poreux à température et pression ambiantes [85], [86]. Cependant, le transfert thermique est considéré purement par conduction lorsque le fluide saturant reste immobile sous un gradient thermique, comme c'est le cas lorsque ce dernier est piégé dans les pores [87]. La convection naturelle joue un rôle important dans les transferts thermiques à partir d'un certain diamètre de pores, déterminé par le nombre de Grashof. Lorsque ce nombre dépasse 1000, la convection dans les pores doit être prise en compte [88]. La convection devient significative pour des pores de diamètre supérieur ou égal à 10 mm, avec de l'air à pression atmosphérique et une différence de température de 10°C. Par ailleurs, le transfert par rayonnement à travers les pores devient pertinent dans les milieux très poreux (plus de 50%) avec un rayon d'accès aux ports dépassant 100 μm [89].

Dans notre cas, pour une porosité généralement inférieure à 25%, Dans ce contexte, nous faisons l'hypothèse simplificatrice d'ignorer les effets de convection et de rayonnement à l'intérieur des pores du matériau. Cette simplification permet de se concentrer sur les autres modes de transfert thermique, probablement la conduction, dans l'analyse du comportement thermique du matériau, nous concentrant uniquement sur le transfert par conduction à travers les différentes phases. Notre étude se focalise principalement sur la conductivité thermique du matériau terre. Cette propriété est essentielle car elle gouverne le mode de transfert thermique par conduction et offre une indication directe sur les capacités isolantes ou conductrices du matériau. La conductivité thermique permet ainsi d'évaluer l'efficacité du matériau terre en termes de performance thermique dans les applications de construction.

Cependant, l'évaluation de la conductivité thermique dans les milieux poreux et hétérogènes n'est pas simple et dépend de plusieurs paramètres. Il s'agit plutôt d'une conductivité thermique équivalente ou effective de tout le milieu avec ses différents constituants, ce qui peut être déterminé à partir de modèles théoriques, analytiques et numériques développés dans la littérature.

La littérature scientifique propose de nombreux modèles pour calculer la conductivité thermique, basés sur la résolution de l'équation de l'énergie. Cette section vise à présenter une

liste complète des modèles capables de fournir des résultats précis pour l'estimation de la conductivité thermique apparente des milieux granulaires. Ces modèles sont essentiels pour comprendre et prédire le comportement thermique de ces matériaux, ce qui est crucial dans divers domaines, notamment la construction et l'ingénierie des matériaux.

Ces modèles sont des instruments de calcul pour explorer la propagation de chaleur dans les matériaux granulaires. Ils doivent prendre en compte à la fois les petites échelles (forme des particules, zones de contact) et les grandes échelles (conditions aux limites, porosité). La difficulté provient de la nécessité d'inclure divers phénomènes physiques comme le transport/liquéfaction, les principes d'interaction entre les grains, la transmission et la circulation de chaleur, tout en considérant l'état des éléments du milieu (phase conductrice) et la structure fine du milieu (dimension et aspect des grains).

Plusieurs modèles existent pour estimer dans les matériaux granulaires la conductivité thermique effective. Ces approches variées permettent de calculer cette propriété thermique cruciale dans des milieux composés de particules distinctes. Dans cette présentation, nous nous concentrons sur quelques-uns des principaux modèles. Ces modèles peuvent être catégorisés en deux principales approches : l'approche par analogie électrique et l'approche par résolution exacte de l'équation de chaleur.

Faut noter que les modèles évoqués ici sont conçus spécifiquement pour les milieux granulaires à deux phases. Dans ces modèles, la phase fluide, quant à elle, est représentée par des espaces vides (pores) remplis uniquement d'air [89]. La phase solide est constituée d'un seul type de matériau, représenté par des molécules solides. Cette configuration simplifiée permet une modélisation plus précise des propriétés thermiques de ces matériaux particuliers.

II.5.1.1 Modèles de Hatta et Taya

Hatta et Taya [90] ont élaboré un modèle en 1985, pour estimer la conductivité thermique effective des fibres courtes dans différentes expositions. Leur approche tient compte de la forme des fibres ainsi que de leurs interactions dans différentes orientations. La formule de Hatta et Taya pour ce modèle est la suivante :

$$k_{eff} = k_m \left(1 - \frac{\varphi_{re}(k_{re}-k_m)[((k_{re}-k_m)(2s_{33}-s_{11})+3k_m)]}{3(k_{re}-k_m)^2(1-\varphi_{re})s_{33}s_{11}+k_m(k_{re}-k_m)R+3k_m^2} \right) \quad (13)$$

Avec : $R = 3(s_{11} - s_{33}) - \varphi_{re}(2s_{11} - s_{33})$, dont le facteur R est lié directement à la géométrie inclusions. Dans le cas des sphériques inclusions, $s_{11} = s_{22} = s_{33} = \frac{1}{3}$ donc :

$$k_{eff} = k_m \left[1 + \frac{\varphi_{re}}{\frac{(1-\varphi_{re})}{3} + \frac{k_m}{k_{re}-k_m}} \right] \quad (14)$$

II.5.1.2 Modèle de premier ordre pour la conductivité thermique

Selon cette approche, entre deux valeurs extrêmes se situe la conductivité thermique réelle. La valeur minimale (série) correspond à un milieu où le flux de chaleur traverse perpendiculairement les strates, tandis que la valeur maximale (parallèle) correspond à un milieu où les strates sont orientées parallèlement à la direction du flux de chaleur [91]. Selon Wiener en 1912, ce modèle utilise une analogie électrique pour résoudre le problème du transfert de chaleur dans les matériaux hétérogènes. [92]. Il suppose que les 2 phases sont arrangées parallèlement [93]. Ainsi, que l'effet de conductivité thermique est limité par les deux valeurs : k_{inf} et k_{sup} , avec : $k_{inf} \leq k_{eff} \leq k_{sup}$ [44].

$$\frac{k_{sup}}{k_m} = \varphi_m + \frac{k_{re}}{k_m} \varphi_{re} \quad (15)$$

$$\text{Et } \frac{k_{inf}}{k_m} = \frac{\frac{1}{k_m}}{\frac{\varphi_m}{k_m} + \frac{\varphi_{re}}{k_{re}}} \quad (16)$$

$$\text{Avec } \varphi_m = 1 - \varphi_{re} \quad (17)$$

k_{eff} : Conductivité de chaleur effective de composite matrice/renfort.

k_{re} : Conductivité de chaleur de renfort.

φ_m : Concentration volumique de la matrice.

φ_{re} : Concentration volumique de renfort.

k_{inf} : Conductivité de chaleur de la borne inférieure.

k_m : Conductivité de chaleur de la matrice.

k_{sup} : Conductivité de chaleur de la borne supérieure.

II.5.1.3 Modèle de Lewis et Nielson

En 1970, une avancée significative dans la modélisation des systèmes bi phasiques a été réalisée par Lewis et Nielsen [94]. Ils ont enrichi l'équation Halpin-Tsai afin de prendre en compte l'impact de la structure des particules et l'orientation ou le type de garnissage pour un système à 2 phases. Ce modèle précis, offre des résultats satisfaisants et applicables à différentes formes

et motifs de particules. La conductivité thermique effective d'un composite est attribuée par [95] :

$$k_{eff} = k_m \left(\frac{1+AB\varphi}{1-B\varphi w} \right) \quad (18)$$

$$\text{Avec : } B = \frac{\frac{k_{re}}{k_m} - 1}{\frac{k_{re}}{k_m} + A} \quad (19)$$

$$\text{Et } w = 1 + \left(\frac{1-\varphi_{max}}{\varphi_{max}^2} \right) \varphi \quad (20)$$

Dans cette équation :

φ_{max} Représente la fraction volumique d'empilement maximum des inclusions.

k_m Est la conductivité thermique de la matrice.

k_{re} Est la conductivité thermique des renforts.

φ Est la fraction volumique des renforts.

A est une constante qui dépend de la forme et de l'orientation des inclusions dans le composite [96].

II.5.1.4 Modèle de Krisher

Dans ce modèle, l'unité fondamentale est structurée en trois couches : une couche solide, une couche gazeuse, et une couche mixte composée de solide et de gaz. La conductivité thermique globale est déterminée par 2 types de conductivités : celle en série / parallèle [97]. Ces strates sont agencées en série par rapport à l'orientation du flux de chaleur. Cette configuration permet de modéliser les différents chemins que peut emprunter la chaleur à travers le matériau granulaire.

La conductivité thermique apparente peut-être exprimée comme suit en régime permanent:

$$\lambda_{app} = \frac{\lambda_{série} \lambda_{parallele}}{n_{kr} \lambda_{série} + (1-n_{kr}) \lambda_{parallele}} \quad (21)$$

Pour un lit fixe, les auteurs recommandent une valeur de $n_{kr}=0.2$ [98],

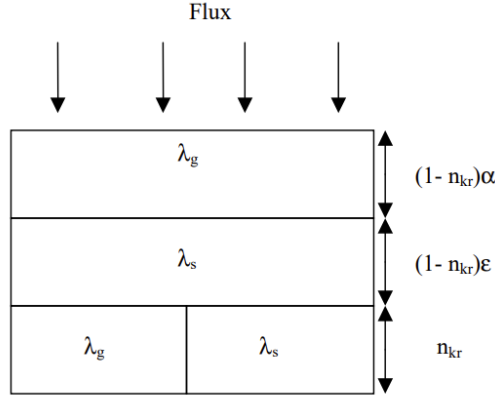


Figure 16 : Le flux

II.5.1.5 Modèle de Hamilton

Ce modèle s'appuie sur le modèle de Maxwell qui tient compte des particules de forme irrégulière. Hamilton y introduit ψ nommé sphéricité qui est un facteur géométrique. Ce facteur compare la surface d'une sphère théorique de volume identique à celui de la particule avec la surface réelle de celle-ci. Selon ce modèle, la conductivité thermique apparente du milieu est exprimée par une formule mathématique [99]. Cette approche permet une modélisation plus précise des matériaux granulaires composés de particules non sphériques.

$$\frac{\lambda_{app}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s + (n_h - 1)\lambda - (n_h - 1)\varepsilon(\lambda_f - \lambda_s)}{\lambda_s + (n_h - 1)\lambda_f + \alpha(\lambda_f - \lambda_s)} \quad (22)$$

Dans le modèle de Hamilton, le coefficient de forme géométrique ψ est inversement proportionnel au nombre de houilles (n_h), où n_h est le nombre de conductivités thermiques Alignées dans le sens du flux thermique. Ainsi, n_h peut être exprimé comme $n_h = \frac{3}{\psi}$

Lorsque $\psi = 1$, cela signifie que les particules sont sphériques, et dans ce cas, le modèle de Hamilton se ressemble au celui de Maxwell. En effet, lorsque les particules sont sphériques, la sphéricité (ψ) est maximale, ce qui correspond au cas où n_h devient le plus petit possible, soit $n_h = 1$.

II.5.1.6 Modèle de Maxwell

Dans l'approche de Maxwell, qui était initialement développée pour traiter les problèmes de conduction électrique dans des milieux hétérogènes, nous considérons que le milieu granulaire est formé de multiples particules sphériques ayant toutes le même diamètre (D_p). Cette hypothèse simplifie le modèle en supposant une uniformité dans la taille des grains qui composent le matériau. Ce modèle considère l'ensemble du système comprenant une phase continue et des particules sphériques non poreuses comme un milieu bi phasique. Il est

principalement utilisé pour caractériser les matériaux granulaires avec un grand nombre de vides. Dans ce modèle, les particules sont espacées les unes des autres, nous ignorons les interactions entre les champs thermiques des particules. [100].

La formule de Maxwell se présente comme suit :

$$k_{eff} = k_m \frac{2k_m + k_{ch} - 2(k_m - k_{re})\varphi}{2k_m + k_{ch} + 2(k_m - k_{re})\varphi} \quad (23)$$

Où :

k_m, k_{eff}, k_{re} : sont la conductivité thermique de la matrice, la conductivité thermique effective de composite, et la conductivité thermique de renfort

φ : La fraction volumique des renforts (des sphères)

II.5.1.7 Modèle d'Agari

Le modèle proposé par Agari étend les concepts des modèles série et parallèle pour s'adapter à des systèmes à plusieurs phases et à divers types d'implications. Il est formulé comme suit. [101][102] :

$$\log k_{eff} = \varphi C_2 \log k_{re} + (1 - \varphi) \log(C_1 K_m) \quad (14)$$

Où :

C_2 : Facteur intervenant lors de la formation de chaîne conductrice de particules.

C_1 : Facteur d'effet sur la cristallinité de la matrice polymère.

II.5.1.8 Modèle de Bruggeman

Ce modèle, proposé par Bruggeman en 1935 [103] , est utilisées pour prédire la conductivité thermique effective d'un matériau composite. Il est basé sur les suppositions formulées par Maxwell et est donné par la formule suivante [104] :

$$1 - \varphi_{re} = \frac{k_{eff} - k_{re}}{k_m - k_{re}} \left(\frac{k_m}{k_{eff}} \right)^{\frac{1}{1+\chi}} \quad (25)$$

k_m, k_{eff}, k_{re} Représentent respectivement la conductivité thermique effective du composite, la conductivité thermique de la matrice et la conductivité thermique du renfort.

φ_{re} Est la concentration volumique du renfort.

χ est une constante qui dépend de la géométrie des inclusions, prenant la valeur de 2 pour des inclusions sphériques et 1 pour des inclusions cylindriques.

II.5.1.9 Modèle de Hamilton-Crosser

Le modèle de Hamilton-Crosser étend les principes de Maxwell pour s'adapter à des molécules de formes variées. Sa formulation est la suivante [102][104] :

$$k_{nf} = \left(\frac{k_s + (n-1)k_f - (n-1)\varphi(k_f - k_s)}{k_s + (n-1)k_f + \varphi(k_f - k_s)} \right) k_f \quad (26)$$

Où n est un facteur de forme donné par : $n = \frac{3}{\psi}$

Avec : ψ : est la sphéricité ($\psi = 1$: cas de la forme sphérique).

II.5.2 Les approches pour évaluer la conductivité thermique

L'identification des propriétés thermiques d'un matériau consiste à étudier les réponses qu'il offre lorsqu'il est soumis à une variation de température. Cette perturbation peut se manifester par un flux de chaleur ou par des températures imposées. En analysant expérimentalement la réponse à cette perturbation thermique, notamment en termes de flux ou de température, les paramètres thermo-physiques tels que la conductivité thermique (λ), la diffusivité thermique (α), etc., du matériau sont déterminés. Par exemple, la diffusivité thermique est évaluée dans le régime transitoire de la perturbation tandis que la conductivité thermique est évaluée dans le régime permanent ou transitoire ([105]- [106]).

II.5.2.1 Les approches en état stable stationnaire

Récemment avancées dans les techniques expérimentales de mesure de la conductivité thermique ont ouvert de nouvelles perspectives. Habituellement, ces mesures nécessitent l'utilisation de techniques d'excitation, selon le schéma suivant : une face de l'échantillon à étudier (parfois l'échantillon entier) est exposée pendant une durée variable à un flux thermique selon le matériau examiné. En suivant l'évolution de la température en fonction du temps, la conductivité thermique peut être déduite. La relation entre la variation de température et l'écoulement du temps dépend du modèle thermique utilisé pour analyser ces données.

Le choix de la méthode de mesure de la conductivité thermique dépend de plusieurs paramètres. Lorsqu'il est nécessaire de choisir la meilleure combinaison entre matériau et précision, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- ✚ Les dimensions et rapports de dimensions.
- ✚ Le type de matériau : granulaire, semi-infini, etc.
- ✚ La simplicité de la méthode.

- ✚ Les tolérances ou précisions requises pour certains paramètres, etc.
- ✚ Le régime thermique : stationnaire, transitoire, quasi-stable.
- ✚ La forme géométrique de l'échantillon (2D, 3D, axisymétrique, etc.

Cette partie explique diverses façons d'estimer la conductivité thermique, en tenant compte des diverses formes d'excitation et de l'évolution temporelle [107]. Dans une première analyse, les méthodes d'excitation peuvent être classées en deux catégories : les méthodes photo-thermiques [108] et les méthodes électrothermiques [109]. Une seconde distinction est basée sur le régime thermique temporel de l'échantillon, conduisant à une distinction entre mesures stationnaires et instationnaires.

a. La méthode « Plaque chaude gardée »

Un flux de chaleur unidirectionnel traverse un échantillon plat. Nous mesurons la différence de température entre ses extrémités. C'est un test en régime permanent (ISO 8302) [110]. L'échantillon est une plaque fine [92]. Un maintien actif diminue les pertes latérales. [109]. Un enroulement résistif génère la chaleur. Des thermocouples mesurent la température [111].

La méthode d'identification et le modèle sont considérés comme simples car ils se basent sur un transfert de chaleur unidirectionnel en régime permanent. Ce type de transfert est décrit par une équation spécifique, qui n'est pas fournie dans le texte donné. Cette approche simplifiée permet une analyse plus directe des propriétés thermiques du matériau étudié : $T_1 - T_2 = R_\varphi$ dont :

$$R = \frac{e}{\lambda S} \quad (27)$$

Cette technique est spécialement appropriée pour déterminer la conductivité thermique des matériaux isolants. Cependant, sa mise en œuvre est complexe et elle présente plusieurs défis expérimentaux :

- ✚ Parvenir à un fonctionnement constant, ce qui peut prendre un temps considérable, parfois jusqu'à 24 heures.
- ✚ Obtenir un écoulement de chaleur unidirectionnel à travers le modèle.
- ✚ Effectuer des mesures précises du flux de chaleur et des températures.

Une extension supplémentaire de cette méthode implique l'utilisation de deux fluxmètres pour mesurer le flux unidirectionnel. En utilisant cette approche, le flux traversant l'échantillon peut

être calculé en prenant la moyenne du flux entrant et sortant, comme illustré dans la figure 17 b.

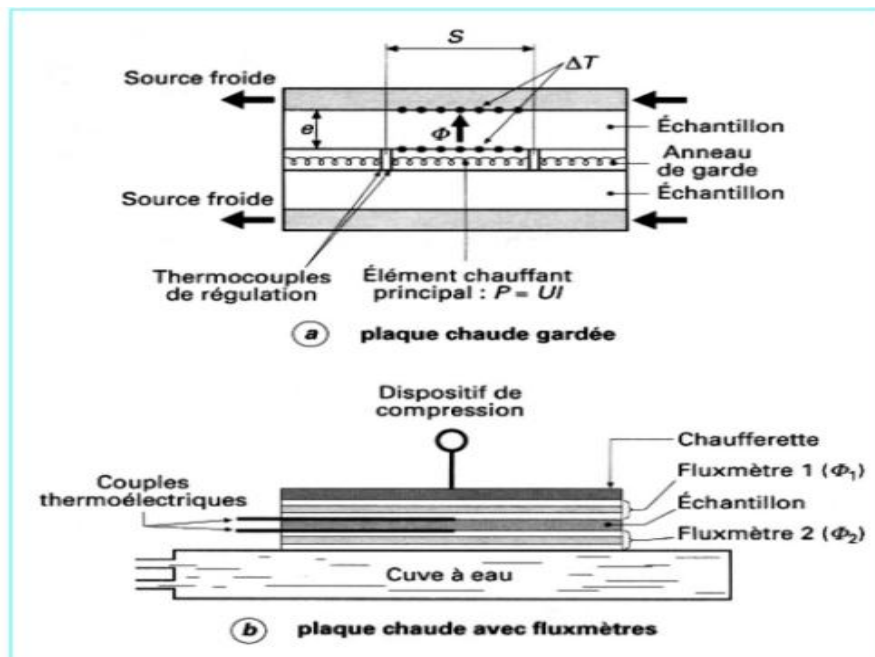


Figure 17 : Plaques chaudes

b. La méthode du « Barreau gardée »

Le dispositif de cette méthode est fondamentalement similaire à celui de la méthode de la plaque chaude gardée, mais leur géométrie diffère. Cette approche est particulièrement adaptée aux matériaux fortement conducteurs tels que les métaux. Dans cette méthode, nous chauffons un barreau à l'aide d'un élément chauffant dont la puissance est mesurée avec précision, assurant ainsi une bonne connaissance du flux thermique. Un isolant soumis au même gradient de température limite les échanges thermiques latéraux. À chaque niveau du barreau, la température de l'isolant est la même que celle de l'échantillon. Cette approche peut aussi être utilisée à des températures élevées. Elle demeure une référence dans les laboratoires de métrologie tels que les Instituts Nationaux de Métrologie (INM). La température est mesurée à plusieurs points, offrant ainsi deux avantages :

- ✚ Elle permet d'obtenir la conductivité thermique à différentes températures en cas de gradient élevé.
- ✚ Elle permet de corriger le modèle thermique en cas de pertes latérales éventuelles.

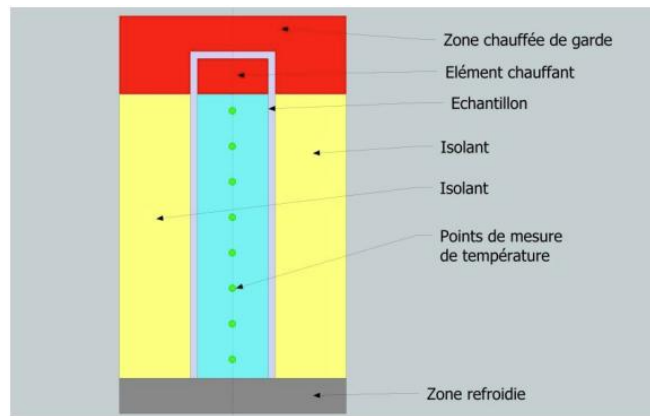


Figure 18 : Mesure de la conductivité de chaleur par Barreau gardée

II.5.2.2 Les approches en état instable

Le champ d'application de ces méthodes est très étendu, grâce à plusieurs avantages :

- ✚ Elles permettent des mesures directes des paramètres thermo-physiques du milieu.
- ✚ La durée d'excitation thermique est courte.
- ✚ Elles sont faciles à mettre en œuvre.

Les techniques instationnaires utilisent des signaux de température en régime transitoire pour évaluer la conductivité thermique. En utilisant l'équation de conservation de l'énergie, le modèle de mesure établit une relation directe entre les paramètres d'entrée et les grandeurs mesurées. Grâce à ces méthodes, il est possible d'étudier la conductivité thermique dans des contextes dynamiques.

Ces méthodes constituent un progrès indéniable dans la caractérisation thermo-physique des milieux et fournissent des résultats de mesure fiables. Malgré leur efficacité, ces méthodes ont des limites :

- ✚ Problèmes lors de la préparation des matériaux à tester.
- ✚ Défis dans l'évaluation précise de la méthode.

Ces contraintes peuvent affecter la fiabilité et l'applicabilité des résultats obtenus.

Plusieurs techniques de mesure en régime transitoire ont été élaborées pour déterminer la conductivité thermique des matériaux. Ces méthodes instationnaires permettent d'observer les changements de température au fil du temps, offrant ainsi des avantages par rapport aux méthodes en régime permanent, notamment en termes de rapidité d'exécution et de capacité à mesurer d'autres propriétés thermiques simultanément, parmi lesquelles nous pouvons citer la méthode du fil chaud [112], [98], la méthode du plan chaud [113]-[114], la méthode du ruban

chaud [114] , la méthode de la pastille chaude [115] et la méthode du Hot Disk[115]. Dans le prochain paragraphe, nous détaillerons deux méthodes choisies pour mesurer avec précision la conductivité thermique des matériaux granulaires :

- La méthode du fil chaud
- La méthode du Hot Disk

Ces techniques permettent d'obtenir des mesures fiables de la conductivité de chaleur dans les milieux composés de particules. La méthode du « Fil chaud »

Il s'agit de la méthode du fil chaud, largement reconnue et utilisée dans l'industrie (ISO 8894), initialement développée pour mesurer les conductivités des liquides et ensuite étendue aux solides isolants à hautes températures, en particulier les céramiques. Cette méthode de mesure est particulièrement simple à mettre en œuvre [116]: un fil métallique fin est placé entre deux blocs du matériau à mesurer, avec une rainure pratiquée dans l'un des blocs pour assurer un bon contact thermique entre eux. À un moment précis, une puissance constante (P_0) est délivrée et mesurée, tandis que simultanément. Il est possible d'enregistrer la variation de température du fil en utilisant soit un couple thermoélectrique soudé sur le fil (méthode du croisillon), soit directement en mesure de sa résistance. [117].

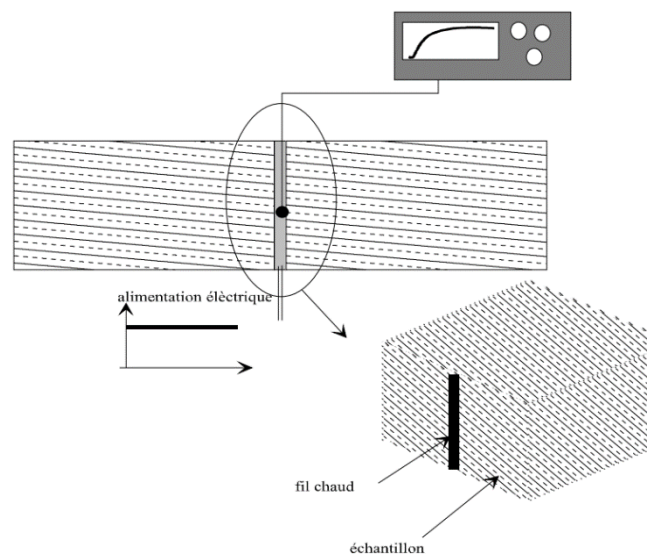


Figure 19 : Dispositif expérimental du fil chaud

Cette méthode de mesure de la conductivité thermique est relativement simple. Elle consiste à générer un flux thermique radial constant ϕ à l'aide d'un fil chauffant. Ensuite, la variation de la température du fil $T(t)$ est mesurée, soit en utilisant un thermocouple soudé au milieu du fil, soit en évaluant la résistance électrique du fil [118].

En supposant un transfert de chaleur radial dans un milieu semi-infini, la valeur de la température du fil de longueur l peut être estimée par la relation suivant :

$$T(t) = \frac{\varphi}{4\pi l \lambda} \quad (28)$$

En traçant le profil de la température $T(t)$ selon $\ln(t)$ (Figure 20), la pente α de la partie linéaire de la courbe permet de déterminer la conductivité thermique [119] [120].

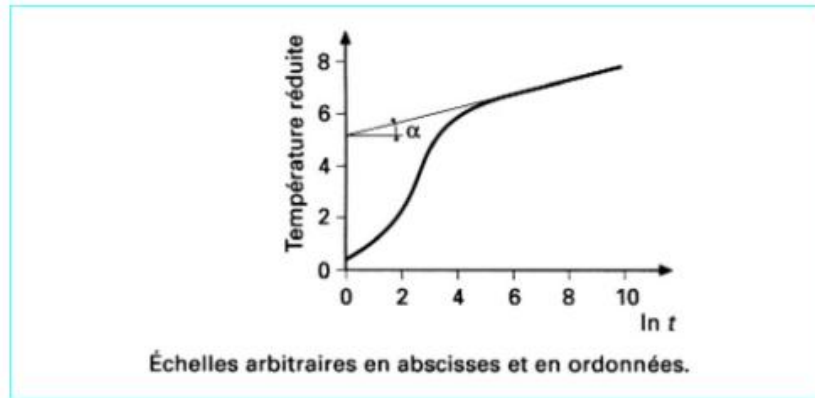


Figure 20 : Méthode du fil chaud : exemple de thermo gramme

a. La méthode du « Hot Disc »

Cette technique mesure simultanément la conductivité / la diffusivité thermique et déduit la capacité thermique des matériaux. C'est un système expérimental est basique, avec une sonde (résistance thermique) située au milieu des deux parties de l'échantillon. Le modèle considère la sonde comme des anneaux sources concentriques (rayon r_s). La distance à laquelle le flux pénètre (d_{pen}) est cruciale pour estimer les propriétés thermo physiques, définie par l'équation (29) :

$$d_{pen} = c_1 \sqrt{t_{exp} \lambda} \quad (29)$$

t_{exp} Est la durée de l'excitation thermique et c_1 est une constante.

Le milieu analysé cylindrique de rayon r , est considéré comme semi-infini en le comparant à la sonde. Au début du régime transitoire, avant que la chaleur ne parvienne aux bords de l'échantillon ($d_{pen} < r - r_s$), la conductivité thermique du matériau est calculée. Cette évaluation utilise l'équation (30), qui établit une relation entre la température moyenne mesurée par la sonde, la puissance de chauffage et les caractéristiques de l'échantillon :

$$T(t) = \frac{V \Psi}{\pi^2 r_s \lambda} \quad (30)$$

Ou = $\sqrt{\frac{ta}{r_s^2}}$, la grandeur sans dimension fonction du temps caractéristique de l'élément Hot

Disc est généralement notée $f(\tau)$. Cette fonction représente la configuration dans laquelle l'échantillon possède une dimension limitée perpendiculairement à l'axe de la sonde.

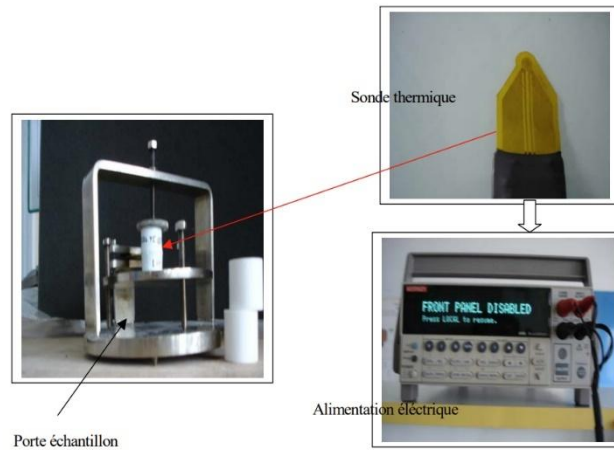


Figure 21 : Dispositif expérimental de la méthode du Hot Disk

b. La méthode « Flash »

Cette approche s'avère très utile pour évaluer la conductivité thermique sur de petites quantités. [81][121]. Elle devient indispensable pour les mesures à haute température, où la température ne peut être mesurée précisément par pyrométrie de contact. Contrairement à d'autres méthodes, celle-ci ne nécessite pas une mesure précise de la température. Cependant, elle ne permet que de mesurer la diffusivité thermique, définie comme suit :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

λ : la conductivité thermique.

ρ : la masse volumique.

c : la chaleur massique.

Nous pouvons voir le schéma du dispositif expérimental ci-dessous : un échantillon est chauffé par un flash lumineux, un laser ou un bombardement ionique, et l'élévation de température est mesurée sur l'autre face à l'aide de la pyrométrie.

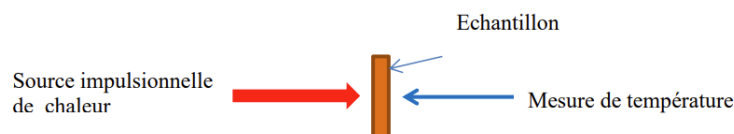


Figure 22 : Schéma du dispositif expérimental

Le principe consiste ensuite à analyser le thermo gramme, c'est-à-dire la montée en température sur la partie postérieure de l'échantillon, afin de déterminer la diffusivité thermique.

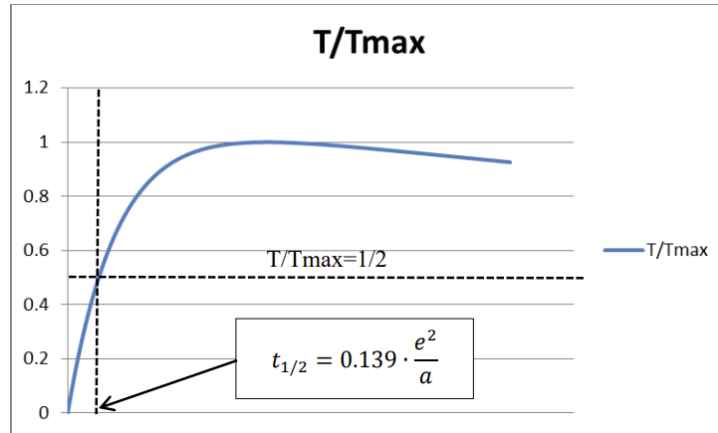


Figure 23 : Thermo gramme en face arrière en fonction du temps

En fonction du temps, le thermo gramme en face arrière présente une diminution après l'obtention de $T_{\max}$ en raison de la nature non adiabatique de l'expérience.

La méthode la plus fondamentale pour déterminer la diffusivité consiste à trouver le temps vital, $t_{\frac{1}{2}}$ afin d'atteindre une élévation de température égale à la moitié de l'élévation maximale (dans le cas d'un système adiabatique). La diffusivité peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$a = 0,139 \frac{e^2}{t_{\frac{1}{2}}} \quad (31)$$

où e l'épaisseur du représentant [122].

c. La méthode « ruban chaud »

Une résistance chauffante plane de faible épaisseur est positionnée entre deux échantillons du matériau à caractériser. Un échelon de flux de chaleur constant est appliqué à la résistance chauffante, et l'évolution de la température $T_0(t)$ est relevée au centre de cette résistance en recourant à un thermocouple. De plus, la température $T_2(t)$ de la face non-chauffée de l'échantillon peut être évaluée à l'aide d'un autre thermocouple. Lorsque la résistance présente des dimensions transversales bien supérieures à l'épaisseur de l'échantillon, nous pouvons considérer le transfert de chaleur comme unidirectionnel au centre et le modéliser en utilisant la méthode des quadripôles. Par la suite, nous utilisons une méthode d'estimation de paramètres afin de déterminer les valeurs :

- ✚ L'effusivité thermique E , exprimée par $E = \sqrt{\lambda \rho c}$, et dans certains cas de la conductivité thermique du matériau à caractériser,
- ✚ les résistances de contact R_{c1} à l'interface sonde/échantillon et R_{c2} à l'interface échantillon/matériau connu, sont déterminées de manière à minimiser l'écart entre les courbes théoriques et expérimentales de la température $T_0(t)$ [122].
- ✚ la capacitance thermique (mc_s), de l'ensemble sonde + résistance chauffante,

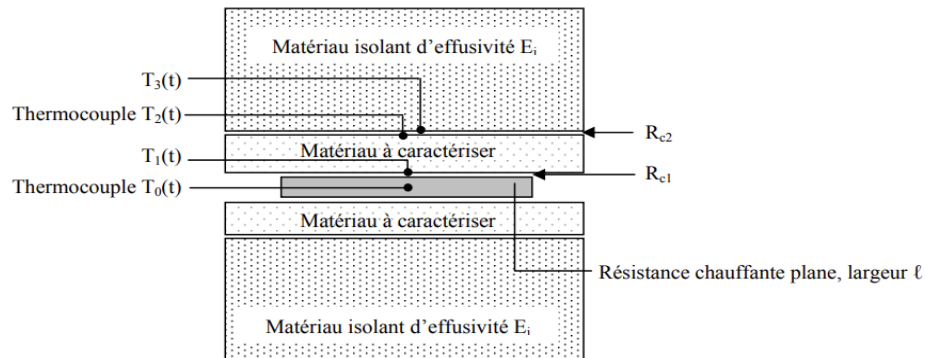


Figure 24 : Vue plane du dispositif expérimental dans la méthode du plan chaud

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons expliqué les milieux poreux et homogènes ainsi que les paramètres hydrodynamiques et les caractéristiques du milieu poreux. Nous avons également introduit les transferts de chaleur et les trois modes de transfert (conduction, convection et rayonnement). Un aperçu des propriétés thermo physiques telles que la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique a été présenté.

Les études sur les modèles et les techniques de mesure de la conductivité et diffusivité thermique des milieux hétérogènes et poreux ont révélé que l'évaluation de l'expression de la conductivité thermique n'est pas aussi simple. Il s'agit plutôt de déterminer une conductivité thermique équivalente ou effective pour l'ensemble du milieu avec ses différents constituants.

Notre but est d'identifier une approche fiable pour l'évaluation thermique des milieux granulaires. La méthode sélectionnée doit allier rapidité et précision. Le choix de la méthode doit s'adapter aux propriétés physiques du milieu étudié et aux moyens disponibles, bien que plusieurs options restent envisageables.

La nature granulaire du milieu pose une contrainte pour l'utilisation des méthodes stationnaires. Bien que ces méthodes puissent s'appliquer à des milieux compactés, la fabrication d'échantillons de grande taille présente des difficultés importantes. Ainsi, les méthodes

instationnaires apparaissent comme une alternative intéressante, offrant un gain de temps considérable et une manipulation plus aisée des échantillons.

CHAPITRE III : METHODES ET TECHNIQUES DE CARACTERISATION EXPERIMENTALES

Introduction

Il est essentiel de maîtriser toutes les propriétés inhérentes de la terre rouge (granulométrie, compactage, composition chimique, minéralogique et micro structurale. En effet, il est fondamental de bien appréhender les spécificités et les propriétés intrinsèques de ces matériaux pour évaluer leurs performances potentielles dans le développement de nouveaux produits. La composition minéralogique et chimique qualitative des échantillons a été résolue par diffraction des rayons X (DRX) et par microanalyse à dispersion d'énergie des rayons X (EDX), respectivement. De plus, une observation par microscopie électronique à balayage (MEB) afin d'étudier la composition et la morphologie des échantillons. Les résultats de l'analyse granulométrique, réalisée par tamisage, ont révélé la répartition en pourcentage des grains solides en fonction de leurs tailles.

III.1 METHODES ET TECHNIQUES DE CARACTERISATIONS

III.1.1 La Conductivité thermique

III.1.1.1 Dispositif expérimental : CT-METRE

Les mesures des paramètres thermo physiques des différents échantillons ont été réalisées à l'aide d'un appareil de mesure appelé CT- METRE (figure 25). Cet appareil a été développé par la société SAVOISIENNE COORDIN TRAVAUX BAT (SCTB) conforme à la norme NF.EN 993-15 (MEKHERMECHE 2012). Il repose sur la combinaison d'un dispositif chauffant et d'un capteur de température (tous deux intégrés dans la même sonde à anneau). Son fonctionnement repose sur la mesure de l'augmentation de la température du capteur pendant une période de chauffage spécifique en fonction du matériau étudié. La sonde anneau (figure 25) se compose d'un fil résistif et d'un thermocouple dans un support isolant en Kapton. Elle est placée entre deux échantillons identiques du matériau à étudier. Cette méthode est utilisée selon des critères spécifiques.

- ❖ La température de mesure est -20 à 80°C.
- ❖ La conductivité est déterminée entre 0,02 à 5 W.m⁻¹. K⁻¹.
- ❖ Les échantillons sont de dimension 70x70x50mm.

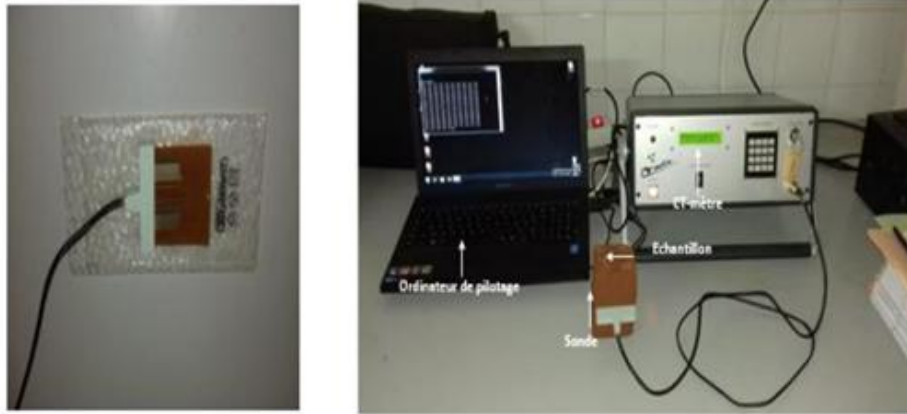


Figure 25 : CT-Mètre (Appareil de mesure des paramètres thermo physiques) structure thermodynamique-énergétique FSR

III.1.1.2 Principes De Mesure

Le dispositif expérimental comprend les éléments suivants :

- un centre de commande qui peut ajuster la puissance et la durée de chauffage. Ce centre de commande est également capable d'interpréter les mesures effectuées. Il est possible de le connecter à un ordinateur pour collecter des données de mesure.
- Une sonde en forme d'anneau souple avec un élément chauffant d'un diamètre de 30 millimètres. La position de cette sonde entre deux échantillons plats offre la possibilité de suivre la montée en température. Un flux de chaleur est introduit dans l'anneau chauffé, et un thermocouple connecté à la sonde enregistre au fil du temps la température augmentée localement.

Comme indiqué dans la relation suivante, le matériau présente une conductivité thermique qui est liée à cette fluctuation de température. [123].

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} (\ln(t) + K), \quad (32)$$

Avec :

ΔT : différence de température entre le début et la fin de l'essai (en kelvins K).

λ : conductivité thermique du matériau (en watts par mètre-kelvin, W/ (m.K)).

q : flux linéique injecté (en watts par mètre-kelvin, W/ (m.K)).

t : temps (en secondes, s).

k : constante qui regroupe les termes relatifs à la diffusivité du matériau et à la résistance de contact

Cette relation permet de quantifier la conductivité thermique d'un matériau en mesurant la variation de température à travers celui-ci lorsqu'un flux de chaleur est appliqué.

Pour déterminer la conductivité thermique, nous effectuons une régression linéaire de la courbe ΔT en fonction du logarithme naturel de t ($\ln(t)$). Le coefficient de corrélation R^2 reflète la qualité de l'ajustement du modèle aux données expérimentales. La puissance de chauffage et la durée de chauffage sont ajustées de manière à obtenir une élévation de température suffisante ($>10^\circ\text{C}$) et un coefficient de corrélation élevé (R^2) [11].

Afin de respecter les hypothèses du modèle de la sonde annulaire, il est essentiel de s'assurer que les dimensions des échantillons sont plus grandes que le volume de la sonde de mesure. Le tableau 2 résume les caractéristiques mécaniques et électriques de l'unité de contrôle de l'appareil CT-Mètre.

Tableau 2 : Les caractéristiques mécaniques et électriques de l'unité de contrôle de l'appareil CT-Mètre

Caractéristiques	Valeurs
Puissance délivrée pour la sonde anneau (w)	de 0 à 2,5
Temps de chauffage (s)	400
Temps de mesure (s)	500
Résistance (ohm)	2,5
Dimension du coffret (mm)	400 x 145 x 260
Poids du coffret (kg)	8
Alimentation secteur	230Vac/ 50-60 Hz

III.1.2 La Capacité thermique volumique

La quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité de masse d'un matériau d'un degré Celsius (ou Kelvin) est appelée la capacité thermique massique et est mesurée en joules par kilogramme par degré Kelvin ($\text{J/kg}^\circ\text{K}$) [78].

$C = \rho \cdot c$ (33) avec ρ : masse volumique [kg/m^3] et $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ (34)

Les Chaleurs spécifiques des composants du matériau terre [78] :

- Minéraux : 700-800 J/kg/°K.
- Argiles : 800-950 J/kg/°K.
- Paille : 1600 J/kg/°K.
- Chanvre : 1700 J/kg/°K.
- Air : 1005 J/kg/°K.
- Eau : 4184 J/kg/°K.

Cette caractéristique quantifie l'énergie thermique requise pour augmenter d'un degré Celsius la température d'un kilogramme du matériau en question. L'appareil utilisé pour mesurer cette propriété est appelé CT-Mètre. Cette mesure est effectuée simultanément avec celle de la conductivité thermique, la différence résidant uniquement dans les types de stimulations thermiques appliquées. Dans cette méthode, l'échantillon est stimulé par un signal thermique provenant d'un élément chauffant. Ce processus permet d'observer la réponse thermique du matériau, fournissant ainsi des informations sur ses propriétés thermiques. La réponse thermique du matériau est ensuite captée à l'aide d'un couple thermoélectrique. Les résultats de cette mesure sont ensuite affichés sur un écran d'ordinateur grâce à un système d'acquisition de données.

III.1.3 Effusivité et Diffusivité thermique

L'effusivité thermique est un paramètre important qui influe sur la sensation de chaud ou de froid que nous ressentons au contact de ce matériau. Voici comment cela fonctionne :

- **Effusivité élevée** : Si un matériau a une effusivité élevée, cela signifie qu'il est capable d'absorber rapidement une grande quantité d'énergie thermique tout en maintenant sa surface à une température relativement stable.
- **Effusivité faible** : En revanche, un matériau ayant une effusivité faible a tendance à se réchauffer ou à se refroidir rapidement en surface en absorbant peu d'énergie thermique.

La diffusivité thermique caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage à travers un matériau. Plus précisément, elle indique à quelle vitesse une variation de température se propage dans un matériau donné par conduction thermique. Une diffusivité thermique élevée signifie que la chaleur se propage rapidement à travers le matériau, tandis qu'une diffusivité thermique faible signifie que la propagation de la chaleur est plus lente, ces valeurs sont obtenues en utilisant les équations suivantes, telles que décrites dans la référence [124] :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (35)$$

$$Et \quad D = \frac{\lambda}{c} \quad (36)$$

Où λ représente la conductivité thermique du matériau.

ρ : sa masse volumique.

c : sa capacité thermique massique.

E : est l'effusivité thermique (SI) est le $(J/K \ m^2 s^{\frac{1}{2}})$.

D : est la diffusivité thermique (m^2/s).

III.1.4 Cellule de mesure à différentes températures : boîte à gants

La détermination des propriétés thermo-physiques a été réalisée à différentes températures à l'aide d'une boîte à gants hermétique à température contrôlée. Cette boîte à gants se compose d'un congélateur commercial d'une capacité de 400 litres, avec des dimensions internes de 120 cm de longueur, 48 cm de largeur et 72 cm de hauteur (comme illustré dans la Figure 26).

Le couvercle de cette boîte à gants est fabriqué en plexiglas transparent avec une épaisseur de 40 mm. À l'intérieur du congélateur, deux ventilateurs sont alimentés par de petits moteurs de 11 watts. Ces ventilateurs sont utilisés pour agiter l'air et assurer une répartition homogène de la température à l'intérieur de la boîte.

Pour contrôler la température, il est possible d'activer une ou plusieurs résistances chauffantes en fonction de la puissance de chauffage requise. Un thermomètre à contact est installé à l'intérieur de la boîte, et sa température est régulée par un dispositif électronique de contrôle de T . L'incertitude absolue de T maintenue dans la boîte à gants thermo-réglée est de $\pm 1^\circ C$.

Cette configuration permet de maintenir des conditions thermiques précises et stables pour effectuer des mesures précises des propriétés thermo-physiques des échantillons à différentes températures.



Figure 26 : Boîte à gants hermétique régulée en température de 15°C à 80°C

III.1.5 Granulométrie

La granulométrie et la plasticité, exprimées par les limites d'Atterberg, représentent des critères essentiels afin d'évaluer la pertinence du sol pour des applications spécifiques [125]. La granulométrie influe sur la malléabilité et le processus de séchage de la terre. Bien que certaines terres ne répondent pas aux exigences granulométriques pour être utilisées dans des agissements de construction en terre crue, telles que BTC, l'ajout de stabilisants appropriés peut améliorer leurs performances. Plusieurs méthodes de mesure de la granulométrie sont disponibles, notamment le tamisage, le sédimentier, l'imagerie, la diffraction laser et la microscopie. En manque de ces outils, des évaluations peuvent être effectuées immédiatement sur le terrain.

La granulométrie vise à mesurer les tailles des grains et leurs proportions dans un matériau. Cela se fait en triant et pesant les grains de différentes tailles à l'aide de tamis. Les résultats sont présentés graphiquement. Cette méthode est cruciale dans la construction et le génie civil pour évaluer la qualité des matériaux. Elle est réglementée par la norme NF P 18-560 pour les granulats de plus de 50 micromètres (0,05 mm).

Les tamis sont des dispositifs composés de treillis métalliques ou de plaques perforées avec des mailles de taille spécifique. Ils sont définis par la taille de leurs mailles, commençant à 0,08 mm, avec une progression géométrique de rapport 1,259. Un tamiseur à vibration est illustré dans la Figure 27.

Le rejet, dans le contexte de la granulométrie, désigne la portion des grains qui reste dans un tamis. Le rejet cumulé englobe tous les grains bloqués jusqu'au tamis en question, incluant les

grains du tamis lui-même, ainsi que les grains des tamis supérieurs. Les masses cumulées de ces rejets sont exprimées en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon total. Ces pourcentages sont ensuite utilisés pour analyser numériquement ou graphiquement la distribution granulométrique, permettant d'évaluer la répartition des résidus en fonction de la taille des grains par rapport à l'ensemble du granulat.



Figure 27 : Un tamiseur à vibration



Figure 28 : Différents échantillons en poudre très fin

III.1.6 Diffractométrie de rayons X (DRX)

Le Laboratoire de Diffraction de Rayons-X sur Poudre (PANalyticalX'Pert PRO MPD) permettent d'identifier les minéraux cristallisés qui constituent le matériau, les analyses ont été effectuées au CNRST (Maroc). Il est équipé d'un tube RX à technologie céramique avec une anticathode en bois ($\lambda = 1,54\text{\AA}$), un générateur de 3 kW offrant une plage de tension de 10 à 60 kV et un courant tube réglable de 5 à 80 mA. Il est doté d'un porte-échantillons tournant (Spinner), d'un goniomètre vertical θ - θ avec codage optique permettant la lecture directe de la position angulaire sur les bras du goniomètre, et d'un passeur d'échantillons automatique pouvant accueillir jusqu'à 45 échantillons.

De plus, il est équipé d'un monochromateur arrière afin de filtrer la raie $K\beta$ du bois et éventuellement la fluorescence de l'échantillon, d'un détecteur Liner à grande vitesse d'acquisition X'Celerator, et offre une résolution inférieure à $0,04^\circ$ en 2θ . Ce laboratoire permet l'identification de phases, l'analyse semi-quantitative, et l'affinement Rietveld. Il dispose de mini broyeurs pour la préparation des échantillons, d'une base de données PDF2, et utilise le logiciel HighScore Plus© pour le traitement des résultats.

Le montage utilisé permet d'obtenir des spectres par réflexion (méthode de Bragg-Bretano). L'identification des composés cristallins s'appuie sur la comparaison des valeurs expérimentales des distances réticulaires avec les données de la littérature. Un Logiciel de type DIFFRAC-plus permet de dépouiller le spectre de diffraction des RX et d'identifier les phases cristallines de l'échantillon à analyser. Les raies de diffraction sont comparées aux spectres de différentes phases compilées dans les fiches JPCDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

Les rayons X frappent un cristal sous un certain angle. Les plans atomiques du cristal réfléchissent ces rayons comme des miroirs parallèles.

Cette version simplifiée conserve l'idée principale tout en réduisant les détails techniques pour une compréhension plus facile. Ce processus génère un phénomène de diffraction. L'intensité de la lumière diffractée devient importante uniquement quand les ondes provenant des plans successifs sont en phase. Cela crée des interférences constructives, conformément à la loi de Bragg [126].

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (37)$$

Où :

d : est la distance inter réticulaire, c'est-à-dire distance entre deux plans cristallographiques.

θ : est le demi-angle de déviation (moitié de l'angle entre le faisceau incident et la direction du détecteur).

n : est l'ordre de réflexion (nombre entier).

λ la longueur d'onde des rayons X.



Figure 29 : La diffraction des rayons X (DRX) CNRST-UATRS (Rabat-Maroc)

III.1.7 Microscopie électronique à balayage (MEB) et microanalyse par dispersion d'énergie des rayons X (EDX)

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique utilisée dans différents domaines (sciences des matériaux, géo matériaux, matériaux de constructions...) qui repose sur les interactions entre les électrons et la matière, permettant ainsi d'obtenir des images à haute résolution de la surface d'un échantillon. Dans cette méthode :

Un faisceau d'électrons est dirigé vers la surface de l'échantillon, ce qui entraîne l'émission de diverses particules sous forme de rayonnements, notamment des électrons secondaires, des électrons rétrodiffusés et des rayons X. L'analyse de ces différents types de rayonnements fournit des informations précieuses sur la composition et la structure de la matière constituant l'échantillon.

Le Laboratoire de Microscopie Électronique à Balayage (Quattro ESEM) est équipé d'une source à canon à émission de champ (FEG) et propose différents modes de vide pour l'analyse de divers types d'échantillons, pour répondre aux besoins spécifiques des différents types d'échantillons. Il propose un mode de vide haute pression de 6×10^{-6} mbar, idéal pour l'analyse

d'échantillons conducteurs. Pour les échantillons semi-conducteurs, il offre un mode de vide basse pression allant de 0.1 à 1.3 mbar. Enfin, pour les échantillons biologiques, il propose un mode de vide environnemental avec une plage de pression de 0.1 à 40 mbar. Il offre une résolution de 1.2 nanomètre, ce qui permet une observation détaillée des échantillons. Le microscope offre un grossissement allant jusqu'à 1 000 000 fois, ce qui permet d'explorer les échantillons à une échelle microscopique très fine.

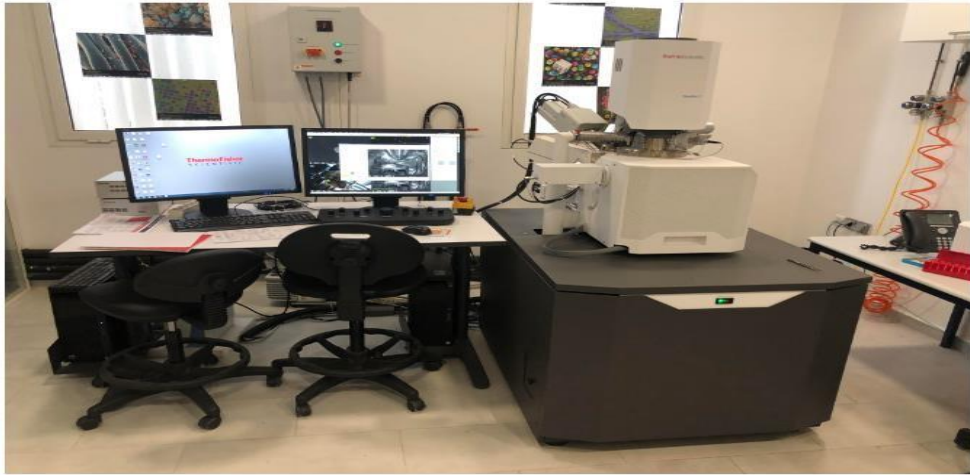


Figure 30 : Appareil microscope électronique à balayage CNRT-UATRS (Rabat-Maroc)

Le microscope électronique à balayage (MEB) est équipé d'un système de microanalyse à rayons X (détecteur EDX-EDAX) ainsi que d'un capteur d'électrons réfléchis. Cela permet d'obtenir la composition chimique de l'échantillon avec une sensibilité qui peut détecter des éléments jusqu'au Bore. Ces analyses ont été réalisées au CNRST, UATRS, à Rabat au Maroc.

III.2 MATIERES ET METHODES

III.2.1 Etude des propriétés thermo-physique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis et du bois Araucaria d'El Jadida

III.2.1.1 Caractérisation des propriétés physico-mécaniques

L'objectif du présent travail est l'étude de la caractérisation physico-mécanique et thermique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis provenant de la forêt marocaine. Le choix de mener cette investigation est principalement basé sur l'énorme succès de ce type d'espèce établi dans le Programme National de Reboisement. Plus spécifiquement, l'étude met en évidence la détermination de la contrainte de rupture en compression axiale et du module d'élasticité longitudinal par la méthode BING. Par contre, l'essai de dureté est réalisé en adoptant la méthode Monnin qui examine le retrait volumétrique et linéaire, les coefficients de retrait et

l'anisotropie. Les essais physico-mécaniques ont été réalisés à des taux d'humidité du bois variant de 14% à 16%. Les résultats obtenus ont permis de classer le bois d'Eucalyptus Camaldulensis comme lourd, nerveux, dur et à forte anisotropie. Par ailleurs, dans cette étude, la diffusivité, l'effusivité et la conductivité thermique, la chaleur spécifique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis à différentes températures : 25°C, 35°C, 50°C, 60°C et 70°C ont été déterminées. Les analyses révèlent que le bois d'Eucalyptus Camaldulensis présente une conductivité thermique supérieure dans la direction longitudinale que dans les directions radiale et tangentielle [130].

III.2.1.2 Modification thermique du Bois d'Eucalyptus Camaldulensis

a. Méthode de préparation des échantillons

Les échantillons de bois étudiés sont obtenus à partir de bois prélevés sur les grumes d'Eucalyptus Camaldulensis. Trois exemplaires arboricoles quadragénaires sont choisis, avec une structure homogène sur toute la longueur du fût, sans aucun défaut et avec un minimum de ramifications. Les arbres choisis ont une hauteur de 24 m et une circonférence comprise entre 40cm et 65cm. Les propriétés physiques ont été réalisées sur des éprouvettes cubiques de dimension $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ dans les trois directions (radiale, tangentielle et longitudinale). Les dimensions et les masses des éprouvettes ont été mesurées respectivement à l'aide d'un comparateur Mitutoyo d'une sensibilité de 0,001 mm et d'une balance Sartorius d'une sensibilité de 0,001 g. Pour les propriétés mécaniques, 240 éprouvettes ont été sélectionnées, dont 120 de dimensions $2 \times 2 \times 6 \text{ cm}^3$ destinées à la détermination de la contrainte de rupture axiale, tandis que 120 de dimensions $2 \times 2 \times 36 \text{ cm}^3$ ont été utilisées pour la détermination du module d'élasticité longitudinale par la méthode BING.

b. Propriétés physico-mécaniques

La teneur en eau (H) qui indique la proportion d'eau présente dans l'échantillon de bois, exprimée en pourcentage de sa masse comparée à son état totalement sec (équation (38)) :

$$H(\%) = \frac{(M - M_0)}{(M_0)} * 100 \quad (38)$$

Où M : masse et M_0 : masse anhydre.

La teneur en humidité du bois est déterminée par la méthode la plus précise, notamment la pesée des éprouvettes avant et après le séjour des échantillons de bois dans l'étuve à une température constante de 103 °C (± 2) pendant 48 heures.

Le taux d'humidité à saturation des fibres (PSF), le retrait volumétrique (2) (utilisé pour évaluer la stabilité dimensionnelle du bois), l'anisotropie (rapport du retrait tangentiel sur le retrait radial), et la densité ont été déterminés selon la norme française et la NF B 51-006 :

$$R_v(\%) = \frac{(V_s - V_0)}{V_0} * 100 \quad (39)$$

Où R_v : retrait volumétrique, V_s taille de l'échantillon saturé d'eau et : V_0 volume de l'échantillon anhydre.



Figure 31 : Schéma de principe de l'essai mécanique

L'expérience de compression dans l'axe a été effectuée sur 3 éprouvettes de $2 \times 2 \times 6 \text{ cm}^3$ à un taux d'humidité moyen de 15%. Il consiste à écraser des échantillons de bois de 2 à 4 cm^2 de section, par compression, dans la direction parallèle à l'orientation des fibres de bois (direction longitudinale) jusqu'à la rupture, en mesurant la charge maximale qui a provoqué l'écrasement de l'échantillon testé.

L'essai de dureté a été effectué sur des échantillons de dimensions $2 \times 2 \times 6 \text{ cm}^3$ et d'une humidité d'environ 16% par la méthode Monnin selon la norme française NF B51-013. Au cours de l'essai, une force d'intensité égale à 1960 N, à travers un cylindre d'un diamètre de 30 mm, est administrée de manière graduelle et orthogonalement à l'orientation des fibres avec une vitesse de 6mm/min. La dureté de Monnin « N » (équation (40)) est donnée par l'expression suivante :

$$N = \frac{1}{15 - 0.5(900 - a^2)^{0.5}} \quad (40)$$

La caractérisation de l'état élastique du matériau bois a été réalisée par la méthode « BING » (beam identification by non-destructive grading).

Après avoir été pesé, l'échantillon de bois de dimension $2 \times 2 \times 36 \text{ cm}^3$ a été positionnée sur deux bandes élastiques, en tenant compte l'orientation prédéfinie de la contrainte et la symétrie des supports. Le dispositif d'enregistrement sonore a été installé à l'une des extrémités.

La contrainte est provoquée par la percussion dans la direction tangentielle du bois sur l'extrémité libre de l'échantillon.

La précision du spectre et les sommets de fréquence identifiés ont été vérifiés sur l'écran, ils étaient suffisamment clairs et distincts.

Le module d'élasticité longitudinal et le module de cisaillement transversal sont évalués à partir d'au moins deux sommets. Ces sommets sont numérotés de manière ascendante en fonction de leur fréquence. Par la suite, l'opération de mesure est répétée à plusieurs reprises pour vérifier la valeur obtenue pour le module de résistance.

c. Propriétés thermiques

Les propriétés de transfert thermique d'un matériau dépendent de ses constituants, de la matrice solide, de la porosité et des liens entre les diverses formes de transferts présentes dans le matériau.

Dans la présente étude, nous avons déterminé l'effusivité « E », la conductivité thermique « λ », la chaleur spécifique « C » et la diffusivité « D » du bois d'Eucalyptus Camaldulensis. Ces deux premières propriétés thermiques sont déterminées expérimentalement. La diffusivité et l'effusivité sont obtenues respectivement à partir des équations (41) et (42) :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (41)$$

$$\text{Et } D = \frac{\lambda}{c} \quad (42)$$

Avec ρ : masse volumétrique.

Les propriétés thermiques sont quantifiées par la conductivité thermique, qui est déterminée expérimentalement et influencée par la microstructure du matériau et les conditions de stockage. En effet, le matériau ligneux contient de nombreux capillaires, qui sont à l'origine de deux phénomènes physiques : le transfert d'eau liquide à travers le réseau de pores et la condensation capillaire. Les particules se comportent comme des pompes capillaires et contrôlent l'eau présente dans le matériau. Pour le second phénomène (condensation capillaire), le changement de phase se produit dans les capillaires les plus fins, au cours duquel la vapeur d'eau passe sous forme liquide, mouillant ainsi le bois. Ces phénomènes seront d'autant plus

favorisés que l'environnement extérieur sera plus humide. Un comportement similaire par rapport à l'humidité de l'air ambiant est également observé dans le liant.

Cette sensibilité à l'humidité, des constituants du bois, à des répercussions immédiates sur les propriétés thermiques de ce matériau. L'eau, élément très conducteur, remplace l'air isolant du bois. Des variations importantes de la conductivité thermique sont alors observées et quantifiées expérimentalement en fonction de l'humidité ambiante.

Les échantillons de bois sont utilisés pour déterminer les propriétés thermiques, en particulier (λ , c , D , E). Les échantillons de bois sont préparés à partir de bois, sans défauts apparents, de forme cubique orientée dans les trois directions habituelles du bois (longitudinale, radiale et tangentielle). Les échantillons de bois ont été traités dans le laboratoire de science et de technologie du bois du Centre de recherche forestière de Rabat-Maroc. Les mesures ont été effectuées au centre de l'énergie, Faculté des sciences, Université Mohammed V, Rabat, Maroc à l'aide de l'appareil CT-Mètre au Laboratoire de thermodynamique - énergie. L'appareil utilisé permet de déterminer expérimentalement la conductivité thermique et la chaleur spécifique selon la norme NF EN 993-15 de 2005. Les caractéristiques moyennes (taille, dimensions, humidité et densité) sont indiquées dans le tableau 3 pour un taux d'humidité d'environ 12 % [130].

Tableau 3 : Caractéristiques des échantillons destinés à la détermination des propriétés thermiques

Masse (g)	Dimension (mm)			Humidité (%)	(kg/m ³)
	R	L	T		
501	79,39	77,67	82.13	12,01	987,30

La mesure de la conductivité thermique a été réalisée par conductimètre à l'aide de l'appareil CT-mètre figure 32. Il est équipé des accessoires nécessaires, notamment une sonde spécifique pour les matériaux solides, une boîte à gants figure 33 constituée d'un thermocouple qui sert à fixer la température et une interface qui couple l'ensemble avec un ordinateur pour afficher et traiter les valeurs numériques enregistrées.

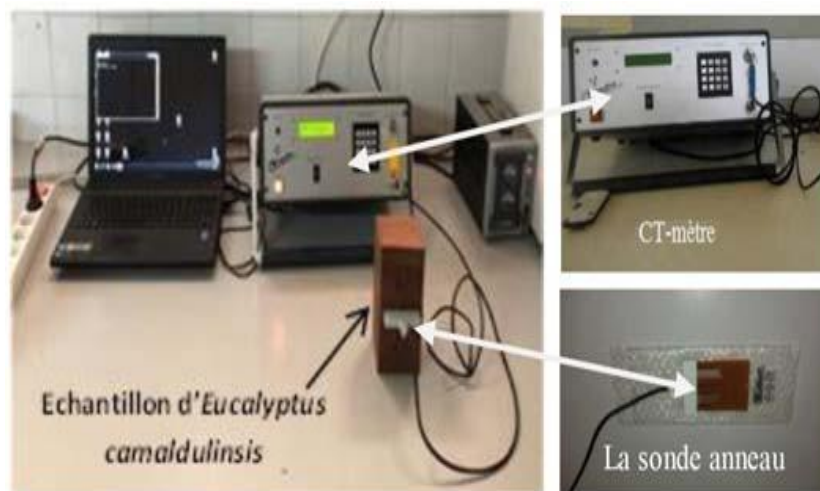


Figure 32 : Test visant à déterminer la conductivité thermique du bois d'Eucalyptus Camaldulensis

La boîte à gants assume un rôle dans le maintien des changements de température de l'échantillon grâce à un thermomètre de contact qui fixe la température demandée.



Figure 33 : Boîte à gant thermo régulée en fonction de la température

III.2.2 Analyse des propriétés thermo-physiques et du processus de séchage du bois d'Araucaria de la ville d'El Jadida

L'objectif de cette étude est, d'une part, de connaître ce type de bois et, d'autre part, d'étudier les processus de caractérisation thermo-physique du bois d'araucaria provenant de la ville d'El Jadida, au Maroc, ainsi que les processus liés à l'évaporation. Le bois est défini industriellement comme un matériau anisotrope et hétérogène formé au cours des nombreuses années de la vie d'un arbre. L'étude anatomique du bois implique généralement l'examen de trois directions de référence, les directions axiales, radiales et tangentielles. Et l'étude des éléments constitutifs du

bois étant orientée dans plusieurs directions, il résulte de l'expérience que ses propriétés thermiques diffèrent dans la direction longitudinale, radiale ou tangentielle, où les essais thermo-physiques sont réalisés à des teneurs en eau du bois comprises entre 10 et 11 %. Quant à cela, les propriétés thermiques, l'étude a mis en évidence la détermination de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique, de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermique du bois d'araucaria à différentes températures : 25°C, 35°C, 50°C et 60°C. Les résultats sont obtenus expérimentalement avec un "CT-Mètre". Il a été démontré que ce type de bois est plus conducteur de chaleur dans la direction longitudinale que dans les directions radiale et tangentielle. Il a été également observé que le taux d'évaporation dans des conditions bien déterminées, il faut choisir une enceinte à température fixe, et ajouter du Na Cl aux échantillons pour maintenir l'humidité à 75 %, ce qui donne également des résultats importants.

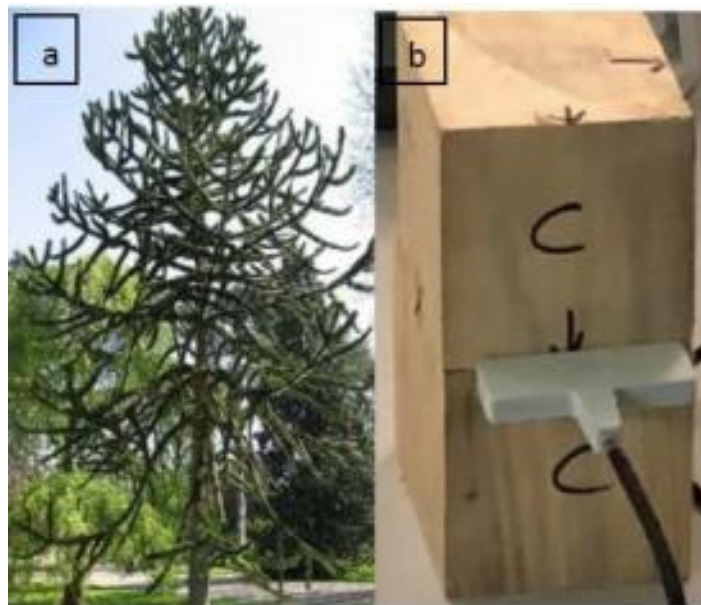


Figure 34 : a) Arbre Araucaria, b) Échantillons d'Araucaria

III.2.2.1 Préparation d'étude sur le CT-mètre pour la mesure de la conductivité thermique

La mesure de la conductivité thermique d'un matériau s'effectue à l'aide d'un conductimètre utilisant un appareil "CT-mètre" relié par des accessoires tels que des sondes pour matériaux solides (utilisant une sonde annulaire) et liquides (utilisant une sonde filaire) afin de nous permettre d'évaluer la conductivité thermique et la chaleur spécifique volumique. Une boîte à gants composée d'un thermocouple qui sert à fixer la température et d'une interface qui couple l'ensemble avec un ordinateur afin d'afficher et d'examiner les valeurs numériques mesurées.

L'appareil CT-Mètre (Figure 25), facilement transportable, devait effectuer des calculs afin de permettre d'évaluer avec précision les propriétés thermiques d'un certain nombre de matériaux,

tels que : substances pulvérulentes, bitume, terre, béton cellulaire, roches, produits complexes ou résines, brique.

Les propriétés mécaniques et électriques de l'unité de contrôle :

- Puissance délivrée pour la sonde annulaire : 0 à 2,5 W.
- Temps de chauffe : 400 s.
- Temps de mesure : 500 s.
- Résistance : 2,5 ohms.
- Dimension de l'armoire : 400 * 145 * 260 (mm).
- Poids du boîtier : 8 kg.
- Alimentation électrique : 230Vac / 50-60 Hz.

La sonde annulaire est constituée d'un circuit imprimé souple (0,2 mm d'épaisseur - 60 * 90 mm), qui est destiné à être inséré entre deux pièces plates de l'échantillon à mesurer (leurs surfaces ont été préalablement corrigées).

La boîte à gants joue un rôle dans la conservation des variations de température d'un échantillon. Dans notre cas l'échantillon de bois (*Araucaria*), est composée de trois matériels reliés entre eux et donnant chacun leur fonction : un thermomètre de contact qui régule la température demandée, des ampoules lors du lancement de l'échantillon dans la boîte à gants pour chauffer l'échantillon puis un ventilateur qui brasse la chaleur dans la boîte.



Figure 35 : Lancement d'échantillons d'Araucaria dans l'appareil CT-Mètre

III.2.3.2 Cinétique de séchage

Lorsque les échantillons sont à leur porosité saturée, les expériences d'évaporation sont réalisées à la fin de l'expérience de capillarité. Ils sont conditionnés dans des sacs en néoprène de manière à laisser la face supérieure en contact avec le milieu ambiant. Le joint est renforcé par une bande de téflon. Ces éprouvettes sont placées pour séchage dans une enceinte hermétiquement fermée : il s'agit de parallélépipèdes rectangulaires, dont les dimensions sont de 30 cm de haut, 40 cm de long et 35 cm de large. A l'intérieur, un double couvercle situé à 5 cm du fond, limite le refoulement du milieu lors des ouvertures, ce qui est nécessaire pour la pesée des éprouvettes.

L'expérience est appliquée dans une enceinte dont l'air est conditionné, où la température est maintenue constante à 22 °C, et dans laquelle une saumure maintient le milieu à une humidité relative constante. Dans notre expérience nous avons choisi le sel Na Cl qui donne une humidité relative de 75% dans les conditions de notre expérience. Les balances sont ensuite mises en marche régulièrement jusqu'à ce que le poids de l'échantillon soit constant. La cuve est hermétiquement fermée, ce qui permet de maintenir une humidité proche de la saturation et d'annuler la superposition des phénomènes d'évaporation [131].

Conclusion

L'étude approfondie des propriétés de la terre rouge et des matériaux associés a permis d'acquérir une meilleure compréhension de leurs caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques. Grâce aux différentes techniques de caractérisation mises en œuvre, notamment la diffraction des rayons X (DRX), la microanalyse à dispersion d'énergie des rayons X (EDX) et la microscopie électronique à balayage (MEB), il a été possible d'identifier la composition et la structure des échantillons étudiés.

Par ailleurs, les analyses thermo physiques et granulométriques ont apporté des éléments essentiels sur la conductivité thermique, la capacité thermique volumique et les propriétés mécaniques de ces matériaux. L'étude des bois d'Eucalyptus Camaldulensis et d'Araucaria d'El Jadida a, quant à elle, permis d'évaluer leurs caractéristiques thermiques et leur comportement au séchage, apportant ainsi des données précieuses pour leur utilisation potentielle dans diverses applications.

Ces résultats ouvrent la voie à des perspectives d'optimisation des matériaux étudiés en fonction de leurs propriétés spécifiques, ce qui pourrait favoriser le développement de nouvelles applications industrielles et environnementales adaptées aux besoins actuel

CHAPITRE IV : ANALYSE RESULTATS EXPERIMENTAUX

Introduction

Le Chapitre IV de cette étude se concentre sur la caractérisation expérimentale d'un composite innovant constitué de terre rouge renforcée par des microfibrilles de bois. Ce matériau hybride, combinant des propriétés naturelles de la terre rouge et des caractéristiques mécaniques et thermiques des microfibrilles de bois, présente un potentiel significatif pour des applications dans le domaine de la construction durable. L'objectif principal de ce chapitre est d'analyser les propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et thermo-physiques de ce composite, en mettant l'accent sur l'influence de l'incorporation des microfibrilles de bois sur ses performances globales.

VI.1 DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES MATERIAUX

IV.1.1 Conductivité thermique

Les mesures de la conductivité thermique sont illustrées dans le tableau 9 :

Tableau 4 : Valeurs expérimentales de la conductivité thermique en fonction de la température d'un échantillon d'araucaria à trois faces

Direction	25°C	35°C	50°C	60°C
Longitudinal	0,314	0,318	0,333	0,352
Radial	0,219	0,219	0,227	0,242
Tangential	0,192	0,196	0,205	0,229

A partir du tableau 9, nous pouvons tracer par logiciel à différentes températures un profil de conductivité thermique d'un échantillon de bois du genre araucaria dans trois directions :

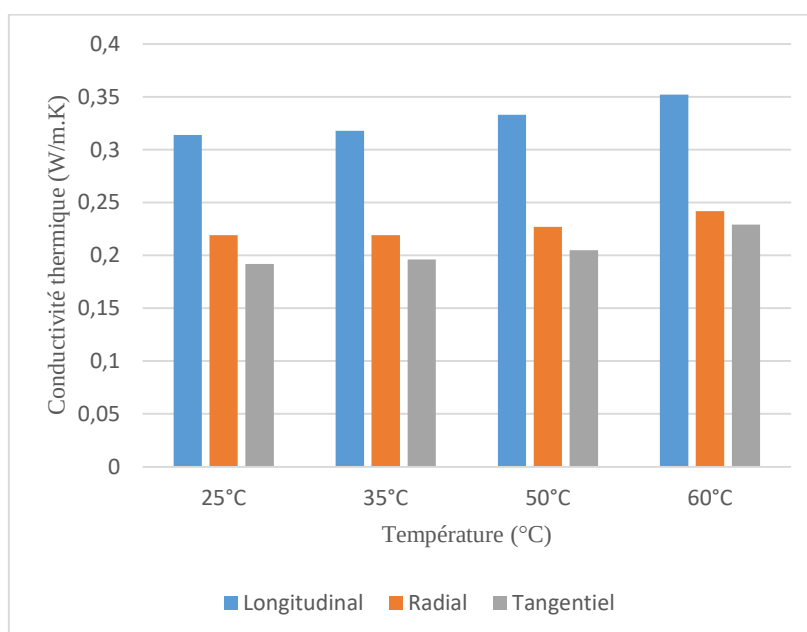


Figure 36 : Conductivité thermique en fonction de température pour l'échantillon d'araucaria à trois voies

L'illustration 44, qui présente l'évolution de la conductivité thermique selon diverses plages de température, pour ce type de bois appelé Araucaria, montre que la conductivité thermique est plus élevée sur l'axe longitudinal que sur les autres axes radiaux et tangentiels, ce qui signifie que ce type de bois est un conducteur de chaleur dans la direction axiale (longitudinale).

IV.1.2 Chaleur thermique spécifique au volume

Nous pouvons observer les mesures de la chaleur volumique spécifique dans le tableau 10 :

Tableau 10 : La chaleur volumique spécifique (kJ/m³.K) en fonction de la température de l'échantillon d'Araucaria à trois faces

Direction	25°C	35°C	50°C	60°C
Longitudinal	1564	1559	1697	1767
Radial	844	844	870	927
Tangential	780	818	890	1113

Le tableau 10 permet de tracer par logiciel un profil thermique spécifique pour chaque unité de volume à différentes températures de l'échantillon de bois d'araucaria sur les trois directions :

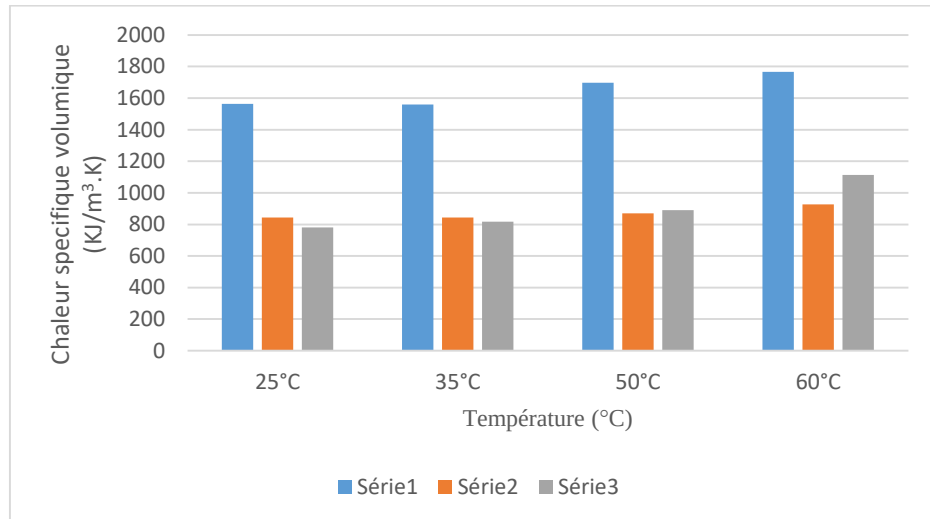


Figure 37 : Effet expérimental de la température sur l'état thermique spécifique d'un échantillon d'Araucaria à trois faces

La figure 45, qui présente le profil de la chaleur spécifique par unité de volume à différents degrés de température sur l'échantillon d'araucaria, montre que la chaleur spécifique par unité de volume est plus élevée à une température donnée de 60 °C sur l'axe longitudinal que sur les deux autres axes radial et tangentiel, et qu'elle se dégrade pratiquement sous l'effet de la chaleur [131].

IV.1.3 Diffusion thermique

La diffusivité thermique évaluée par conduction la rapidité de propagation de la chaleur dans un matériau. Elle dépend de la chaleur volumique spécifique et conductivité du matériau [13]. Cette propriété est essentielle pour comprendre le comportement thermique des matériaux :

$$D = \lambda / C \quad (41)$$

Avec : C (J/K.m³), nous obtenons les valeurs semi-expérimentales suivantes de la diffusion thermique D (m²/s).

Tableau 11 : Valeurs expérimentales de la diffusivité thermique en fonction de la température d'un échantillon d'Araucaria à trois faces

Direction	25°C	35°C	50°C	60°C
Longitudinal	2,00E-07	2,03E-07	1,96E-07	1,99E-07
Radial	2,59E-07	2,59E-07	2,61E-07	2,62E-07
Tangentiel	2,46E-07	2,39E-07	2,30E-07	2,05E-07

À partir du tableau 11, nous pouvons utiliser un logiciel pour tracer le changement de la diffusivité thermique à différentes températures pour l'échantillon de bois d'araucaria sur les trois axes :

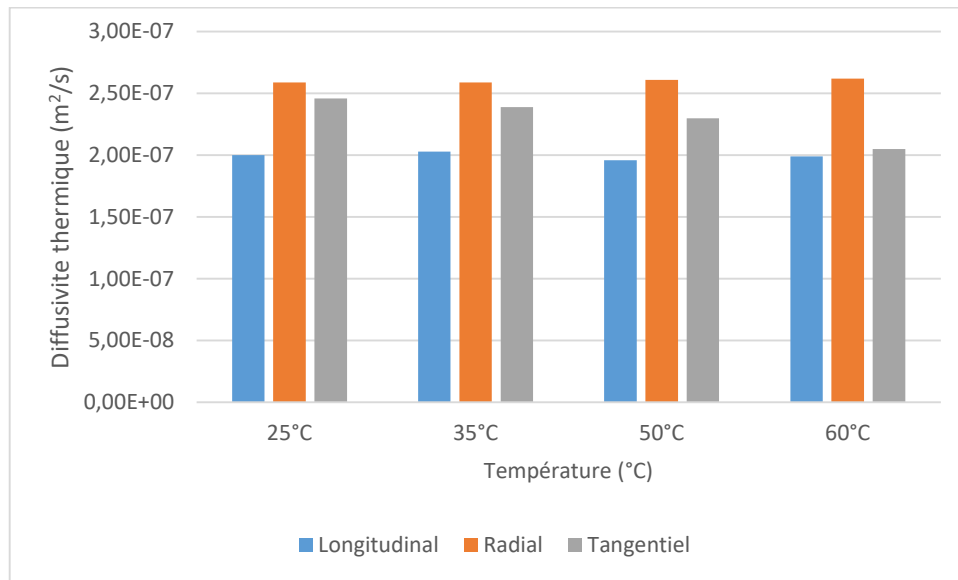


Figure 38 : Diffusivité thermique en fonction de la température

La figure 46, qui montre la diffusivité thermique en fonction de différentes températures (25°C, 35°C, 50°C et 60°C) appliquées à l'échantillon de bois d'araucaria, montre que la diffusivité thermique est plus élevée sur l'axe radial que sur les deux autres axes tangentiels et longitudinaux.

IV.1.4 Effusivité thermique

L'effusivité thermique d'un matériau caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle est exprimée par la relation suivante [14-17] :

$$E \text{ (J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{.K)} = \sqrt{\rho\lambda c} \quad (42)$$

À partir de cette relation, nous obtenons les valeurs semi-empiriques suivantes pour l'effusivité thermique $E \text{ (J/m}^2\text{.K.s}^{1/2}\text{)}$, dont les mesures sont données dans le tableau 12.

Tableau 12 : Résultats semi-empiriques de l'effusivité thermique en fonction de la température pour un échantillon d'Araucaria à trois faces

Direction	25°C	35°C	50°C	60°C
Longitudinal	7,01E+02	7,04E+02	7,38E+02	7,89E+02
Radial	4,30E+02	4,35E+02	4,49E+02	4,84E+02

Tangentiel	3,87E+02	4,00E+02	4,14E+02	4,57E+02
------------	----------	----------	----------	----------

À partir du tableau 12, nous pouvons utiliser un logiciel pour tracer la variation de l'effusivité thermique à différentes températures pour l'échantillon de bois d'araucaria dans les trois directions.

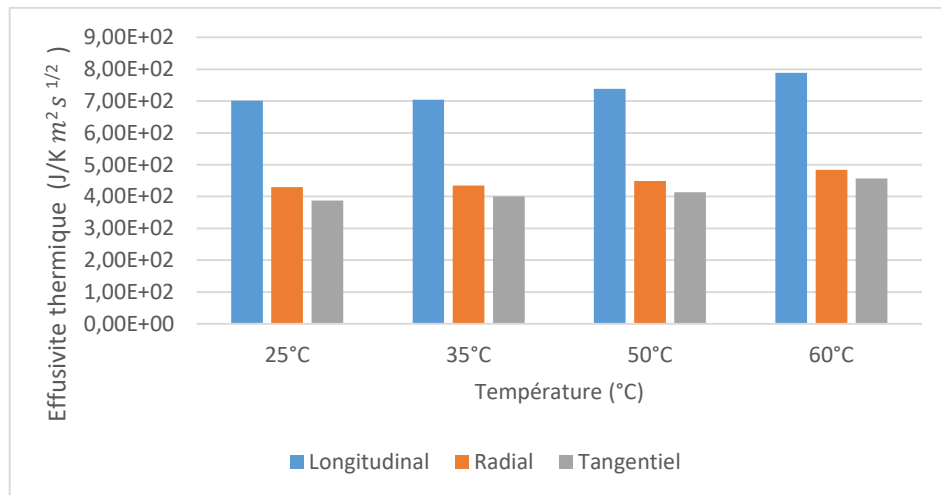


Figure 39 : Effusivité thermique en fonction de la température dans le cas d'un échantillon d'Araucaria à trois faces

La figure 47 illustre l'effusivité thermique en fonction de différents degrés de température, pour le bois d'araucaria, que l'effusivité thermique augmente sur l'axe longitudinal de la température donnée de 60°C équivalente à 7,89E+02 (J / m².K.s¹/²) par rapport aux deux autres axes radial et tangentiel.

IV.1.5 Taux d'humidité

La mesure de l'humidité s'effectue par la relation (43), après avoir pris des mesures telles que le pesage dans une balance analytique et le séchage dans une étuve pendant au moins 72 heures afin que la masse reste stable [131].

Nous mesurons d'abord la masse de l'échantillon d'araucaria (m_h). Après séchage, la masse anhydre (m_0) est calculée et l'humidité ou la teneur en eau est exprimée par l'expression suivante:

$$H_u = \frac{m_h - m_0}{m_f} * 100 \quad (43)$$

A partir du calcul numérique, la teneur en eau de l'exemplaire étudié suivant le tableau 13. Ces échantillons ont été étudiés dans des formes rectangulaires, chaque échantillon est divisé en

deux, et ensuite procéder à des traitements thermiques dans l'étuve à 40°C pendant 72 heures pour réduire cette dernière.

Tableau 13 : Niveau d'humidité de l'échantillon d'araucaria

Masse (g)	Dimension (mm)			Humidité (%)		Masse volumique (kg/ m ³)
320.50	R	L	T	Secs	Brut	633.399
	79.37	77.66	82.10	10,79	9,73	

Les mesures du tableau 13 dérivent de la figure 48,

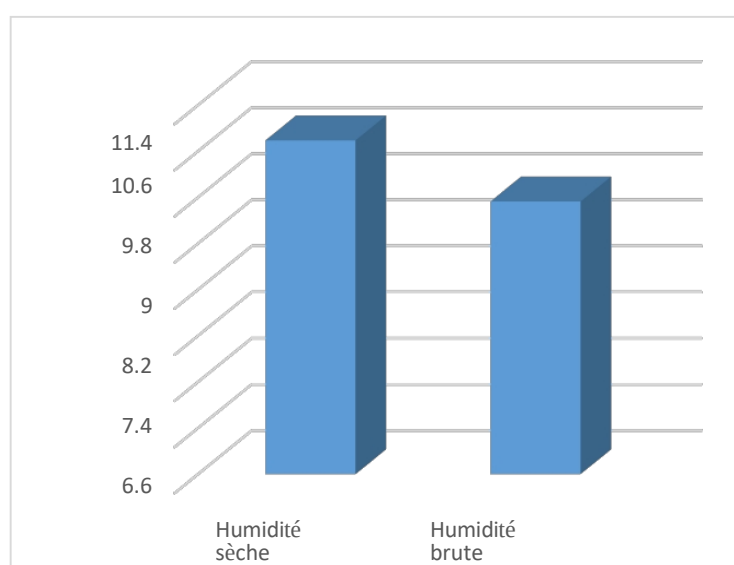


Figure 40 : Profil d'humidité du bois d'Araucaria

Tableau 14 : Cinétique de séchage mesurée sur l'échantillon d'Araucaria après saturation capillaire sous une humidité relative de 75 %, une température de 22 °C et sans agitation de l'air

Humidité relative	Flux	Saturation critique	Temps de saturation critique
H.R 75%	$F \text{ (g.cm}^{-2} \cdot \text{h)}^{-1}$	$S_c \text{ (%)}$	$t_{sc} \text{ (h)}$
araucaria	$-2,2.10^{-3}$	76,4	140

D'après la figure 49 qui montre la courbe de cinétique d'évaporation de l'échantillon d'araucaria à 75% d'humidité relative (HR), échantillon de 5 cm de haut et 6,25 cm² de surface, nous pouvons décomposer cette courbe en trois étapes, la première étape qui est linéaire à un flux

constant $F = -2.2 \cdot 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ et a un temps de saturation critique t_{sc} (h) de 140 h, la saturation critique dans cet échantillon est de 76,4%, le deuxième stade qui est caractérisé par une courbe non rectiligne, par un flux diminue avec le temps, puis le troisième stade sa courbe est linéaire à un flux très faible constant qui s'évanouit au cours du temps.

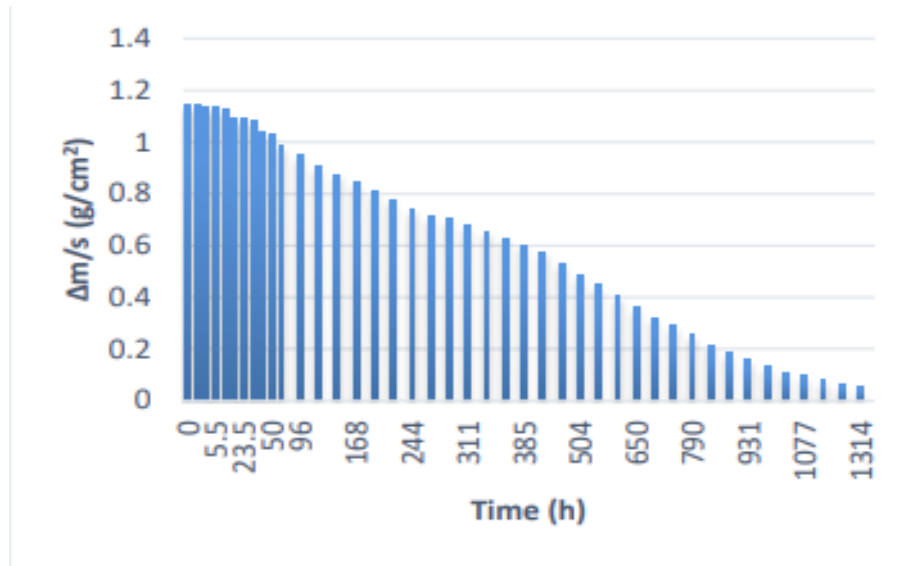


Figure 41 : Courbe cinétique d'évaporation de l'échantillon d'araucaria à 75% d'humidité relative, tube à essai de 5 cm de hauteur et 6,25 cm² de surface

Après cette étude de caractérisation thermique ainsi que le séchage sur l'échantillon de bois d'araucaria provenant de la ville d'el Jadida au Maroc, nous concluons d'une part que la conductivité thermique ainsi que la chaleur spécifique par unité de volume sont augmentées à une température de 60 °C sur la direction longitudinale que les deux autres axes radial et tangentiel, ce qui indique que ce type de bois est conducteur de chaleur sur l'axe axial (longitudinal), et d'autre part, nous pouvons résumer les résultats du séchage du bois en trois parties, premièrement, le taux d'évaporation (F_1) est stable, (S_r) dépend de l'humidité relative, la perte de poids est constante mais doit être négligeable.

IV.2 ETUDES EXPERIMENTALES SUR LE COMPOSITE TERRE ROUGE INCORPOREE PAR DES MICROFIBRES DE BOIS

IV.2.1 Matière première et préparation des échantillons

La matière première essentielle pour la construction, à savoir la terre à bâtir, est principalement d'origine minérale et est prélevée dans le sol, spécifiquement dans l'horizon organique B, qui correspond au sol. Cette démarche est entreprise après avoir exclu la couche supérieure riche en matières organiques, connue sous le nom d'horizon A, qui est réservée à des fins agricoles plutôt qu'à la construction.

La terre rouge utilisée dans ce contexte a été extraite à proximité de la ville de Rabat, plus précisément dans la région d'Oulja Salé. Cette matière, communément appelée terre rouge, sert de matière première pour la production industrielle de briques en terre comprimée (BTC). Elle est généralement composée d'un mélange d'argile, de limon, de sable, et éventuellement de graviers et de cailloux. Ces éléments sont ensuite transformés en un matériau de construction durable.

IV.2.2 Préparation des éprouvettes

De petits échantillons parallélépipédiques sont moulés à la main dans un moule en Inox de dimensions 118.4 x 83.5 x 55.7 mm avec divers mélanges de terres et poudre de bois. La terre et le stabilisant sont d'abord homogénéisés à sec. Ensuite, l'eau est ajoutée progressivement jusqu'à l'obtention de la consistance désirée. La teneur réelle mesurée en eau de ce mélange est d'environ de 200 ml. Pour avoir une porosité constante, les éprouvettes sont soumises à un compactage régulier avec une masselotte de 1 kg dans une chambre climatique à 20°C et 50% d'humidité relative. Elles sont ensuite séchées en étuve à 40°C pour une durée de 72 heures jusqu'à obtention d'une masse stable. Tous les échantillons contenant de la poudre de bois, ainsi que l'échantillon de référence (sans stabilisant), sont pesés à l'aide d'une balance électronique de précision de 0,01g marque Sartorius Entris. Ces éprouvettes sont utilisées dans les mesures des propriétés thermo physiques λ , C, D, E.

IV.2.3 Mesure de la distribution granulaire

L'analyse de la taille des grains évalue la distribution pondérale des éléments solides en fonction de leur granulométrie. Pour cette étude, la méthode de tamisage a été employée pour les particules dont le diamètre varie de 0,03 mm à 0,61 mm. Le protocole de tamisage a suivi la norme [INOX, ISO/TS 3310⁻¹]. Un échantillon de terre rouge pesant 4500g au total a été soumis à un tamisage à travers des tamis en série, en usant une tamiseuse électronique de marque Bera Test. La masse de matériau retenue sur chaque tamis a ensuite été mesurée avec précision.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 15, ci-après. La distribution granulométrique est présentée dans la Figure 50.

Tableau 15 : Tableau de granulométrie

Diamètre de tamis (mm)	0,61	0,38	0,18	0,08	0,06	0,03
Refus (g)	19,46	349,41	1915,74	1208,96	630,97	0
Refus cumulé (g)	4124,54	4105,08	3755,67	1839,93	1209,09	0
Refus cumulé (%)	91,65	91,22	83,45	40,88	26,86	0
Tamisât (%)	8,35	8,78	16,55	59,12	73,14	99,99

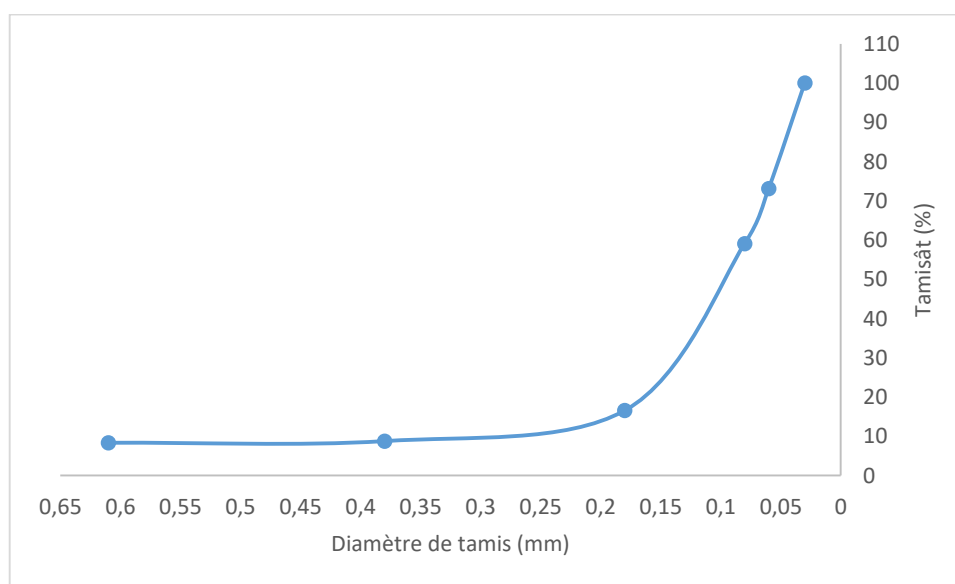


Figure 42 : La courbe granulométrique

L'analyse de la courbe granulométrique révèle que l'échantillon de terre rouge est composé principalement de particules fines. Plus précisément :

- ✚ Plus de 10,38% des particules traversent un tamis de 0,03 mm d'ouverture,
- ✚ Plus de 83,18% des particules passent à travers un tamis de 0,08 mm d'ouverture,

En se référant à la classification des fractions granulaires établie par la norme [ISO/TS 3310⁻¹], nous constatons que l'échantillon présente une composition mixte. Il contient à la fois des grains fins et des grains grossiers, bien que la proportion de particules fines soit nettement prédominante.

IV.3. CARACTERISATION CHIMIQUE, MINERALOGIQUE

L'objectif de cette partie expérimentale, est la détermination de la composition minéralogique de quatre échantillons de la terre rouge contenant du bois en poudre à différent pourcentage (0%, 5%, 15%, 20%). Ces échantillons sont nommés Ech0, Ech5, Ech15, Ech20 respectivement. L'échantillon de référence sans incorporation de poudre de bois est nommé Ech0.

La caractérisation minéralogique a été faite par diffraction des rayons X (DRX).

L'examen de la microstructure a été effectué à l'aide d'un appareil de microanalyse basé sur la dispersion d'énergie des rayonnements X (EDX) associé à un microscope électronique à balayage. Cette configuration a permis de visualiser les spectres des éléments chimiques qui composent la structure analysée.

IV.3.1 Analyse par diffraction des rayons X

L'étude minéralogique par DRX, des quatre représentants (Ech0, Ech5, Ech15, Ech20), a concerné une portion de chaque échantillon mis en poudre très fin. Les différents diffractogrammes sont présentés dans la figure 51. Les spectres de l'échantillon de référence Ech0 (figure 51) montrent qu'il existe une forte proportion de quartz (SiO_2). Le quartz est matérialisé par sa réflexion à 73° avec une intensité faible et à 59° avec une forte intensité. Nous remarquons aussi une forte trace de Muscovite vanadique $\text{K}(\text{Al}_2)(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH}_2)$ dans le matériau avec une intensité suffisante. La composition minéralogique de la terre peut avoir un effet sur les propriétés physiques, et thermiques.

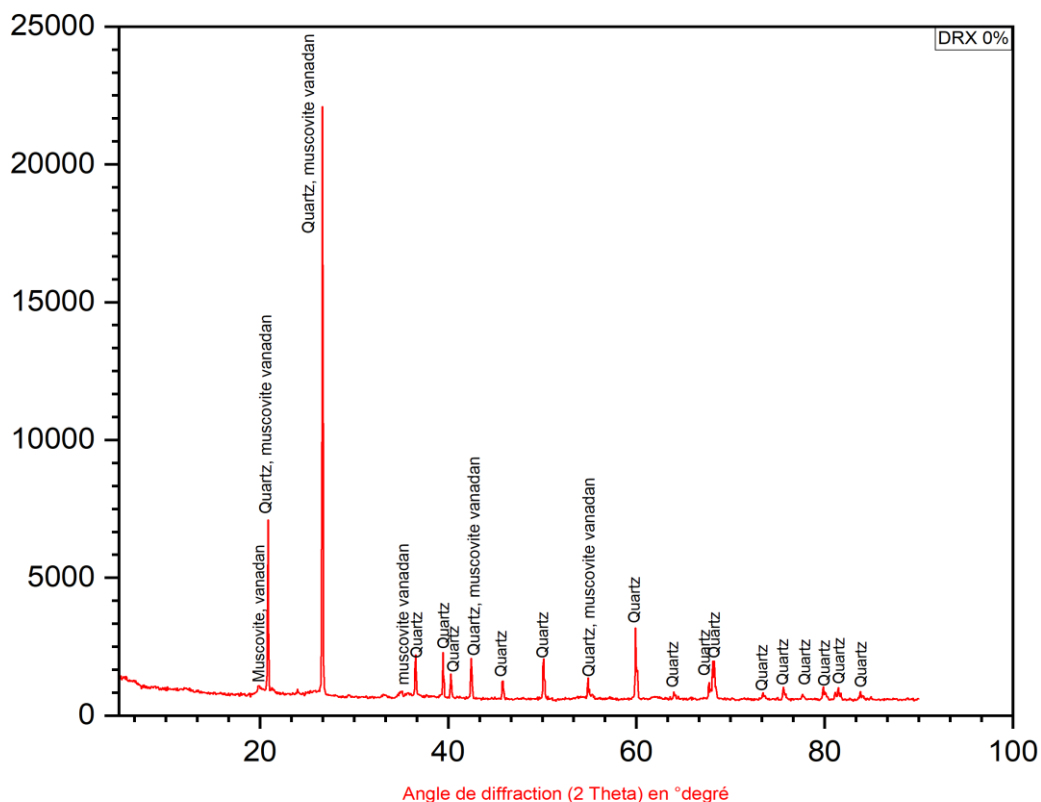
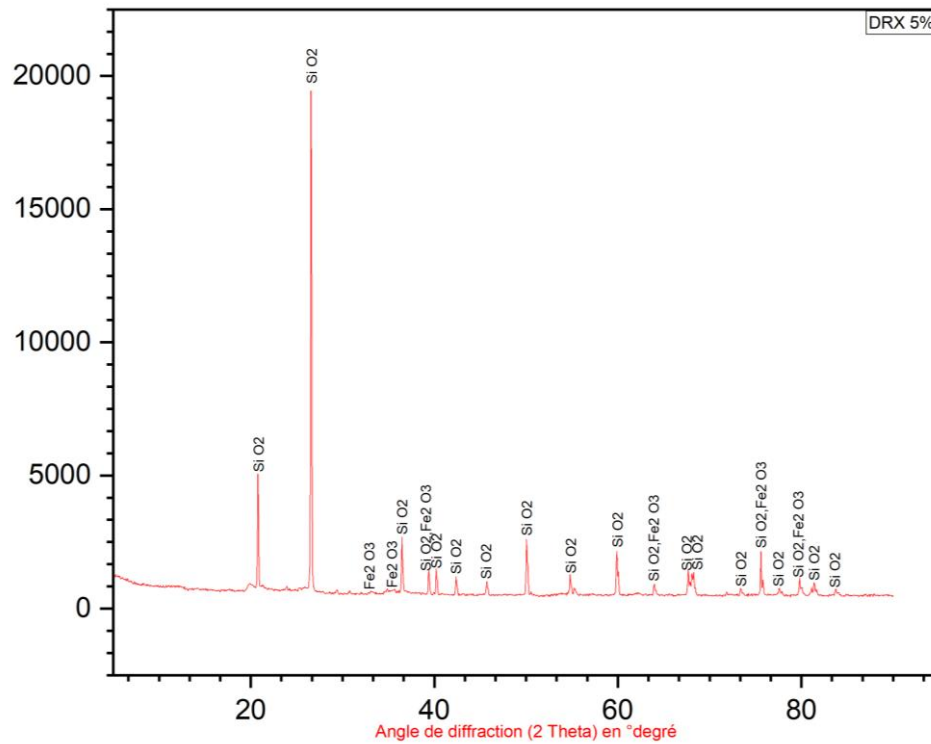
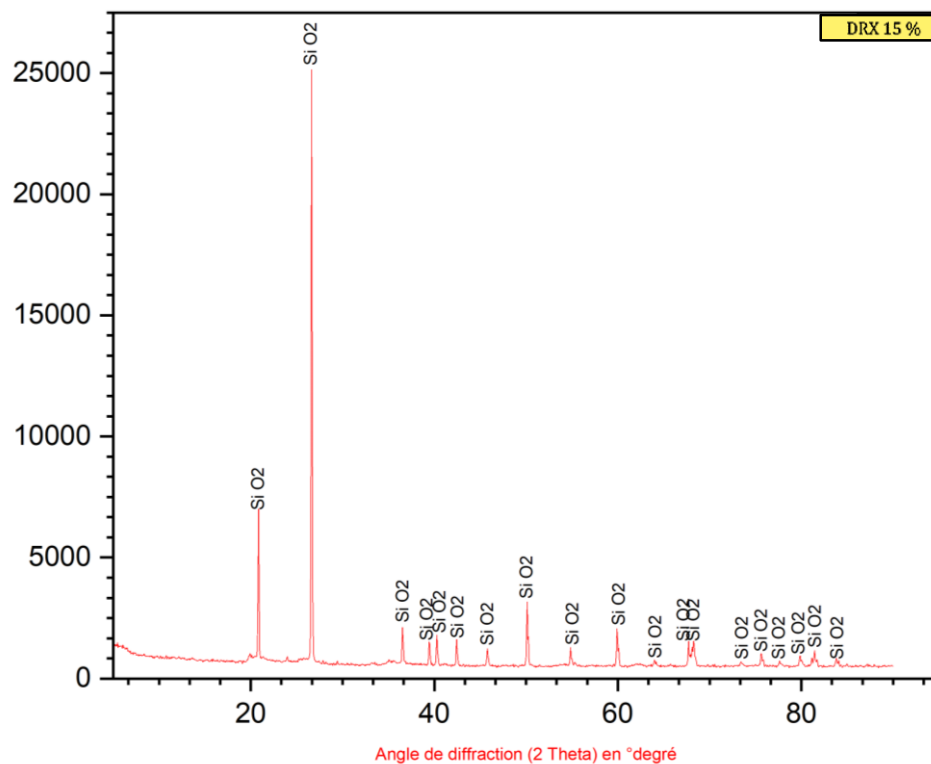


Figure 43 : Ech0 (100% La terre rouge)

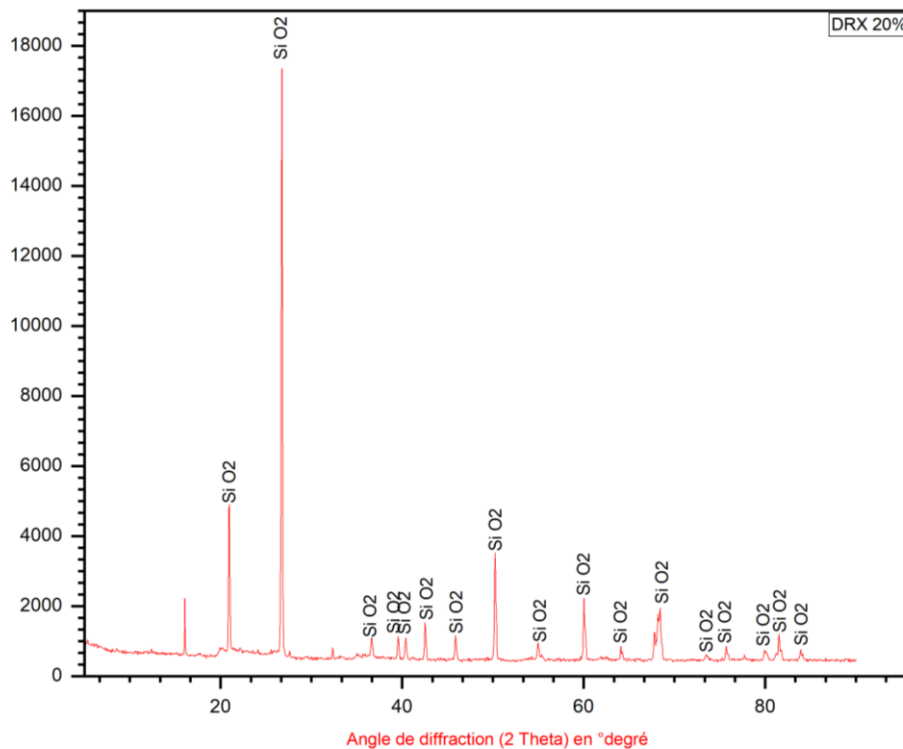
Les figures 52a, 52b, 52c illustrent les spectres des échantillons Ech5, Ech15, Ech20 contenant un pourcentage respectivement de 5%, 15%, 20% de bois en poudre. Nous constatons l'existence d'un pic principal de la silice (SiO_2) sous forme de quartz. Le quartz est matérialisé par sa réflexion à 20° et 26° . Il représente la phase la plus dominante dans tous les échantillons, sa teneur est plus de 78 %. Nous observons aussi l'apparition de deux nouveaux pics à 33° et 35° pour un ajout de bois de 5%. Par contre, ces pics ont disparu pour un ajout de plus de 15% de particules de bois. Ces deux pics correspondent à l'effet de l'incorporation du bois en poudre sur la minéralogie de la terre rouge. Ce nouveau minéral peut influencer les propriétés thermophysiques, notamment la conductivité thermique.



a) Ech5 (la terre rouge dopée par 5% de la teneur en bois)



b) Ech15 (la terre rouge dopée par 15% de la teneur en bois)



c) Ech20 (la terre rouge dopée par 20% de la teneur en bois)

Figure 44 : Diffractogrammes obtenus pour les quatre échantillons de terre rouge avec différents pourcentages de bois en poudre :a) échantillon Ech5 (5% de poudre bois), b) Ech15 (15% de poudre bois), c)Ech20 (20% de poudre bois),

La figure 53 regroupe les différents diffractogrammes des quatre échantillons. A titre de comparaison, nous constatons que les échantillons étudiés, présentent les mêmes phases minérales. Nous remarquons que l'intensité de ces deux pics, caractéristiques de l'incorporation du stabilisant en poudre, diminue avec le pourcentage de bois ajouté et atteint une valeur minimale pour l'échantillon Ech20 (20% de la teneur en bois).

IV.3.2 Microscopie électronique à balayage (MEB) et microanalyse chimique par (EDX)

Plusieurs fragments d'échantillons de la terre rouge, avec et/ou sans stabilisation par le bois en poudre, ont été visualisés à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage environnemental type FEI, Quattro S. Il permet l'observation haute résolution dans des conditions dites environnementales (Figure 54). Les échantillons sont observés à différents grossissements sans métallisation.

IV.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.4.1 Échantillon de Référence

Les images MEB, de fragment de l'échantillon de référence Ech0, présentés dans la Figure 54 mettent en évidence des particules parfois agglomérées de taille comprise entre 5 et 100 μm . Plusieurs grossissements (X500, X1000, X2500, X5000, X 10 000) montre que ces particules sont des agglomérats de particules plus petites de géométrie sphérique dont le diamètre est voisin de 100 μm . Nous visualisons ainsi les agglomérats, formés de particules primaires, mis en évidence par les mesures granulométriques. La taille micrométrique des particules primaires confère à la poudre un état très divisé qui peut être expliqué par sa surface spécifique élevée. Le matériau terre rouge, généralement, possède une surface rugueuse et granulaire. Il a une structure cristalline organisée qui apparait clairement dans les microphotographies à différents grossissements.

La microanalyse de la composition chimique par EDX au MEB, de cet échantillon (Figure 54) réalisée, montre la présence d'une forte teneur en Oxygène (47,1 %), une teneur en Silicium (17,8%), une teneur en Aluminium (11,8%) et une teneur un peu faible de fer (10,9%).

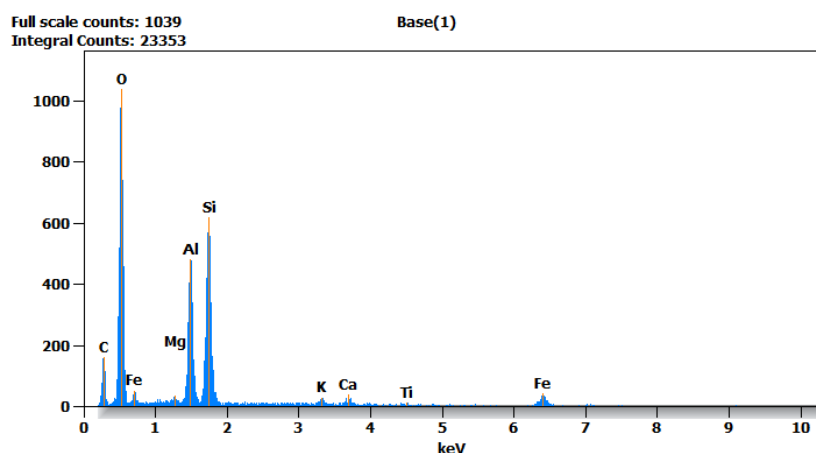


Figure 46 : Micrographies MEB Ech0

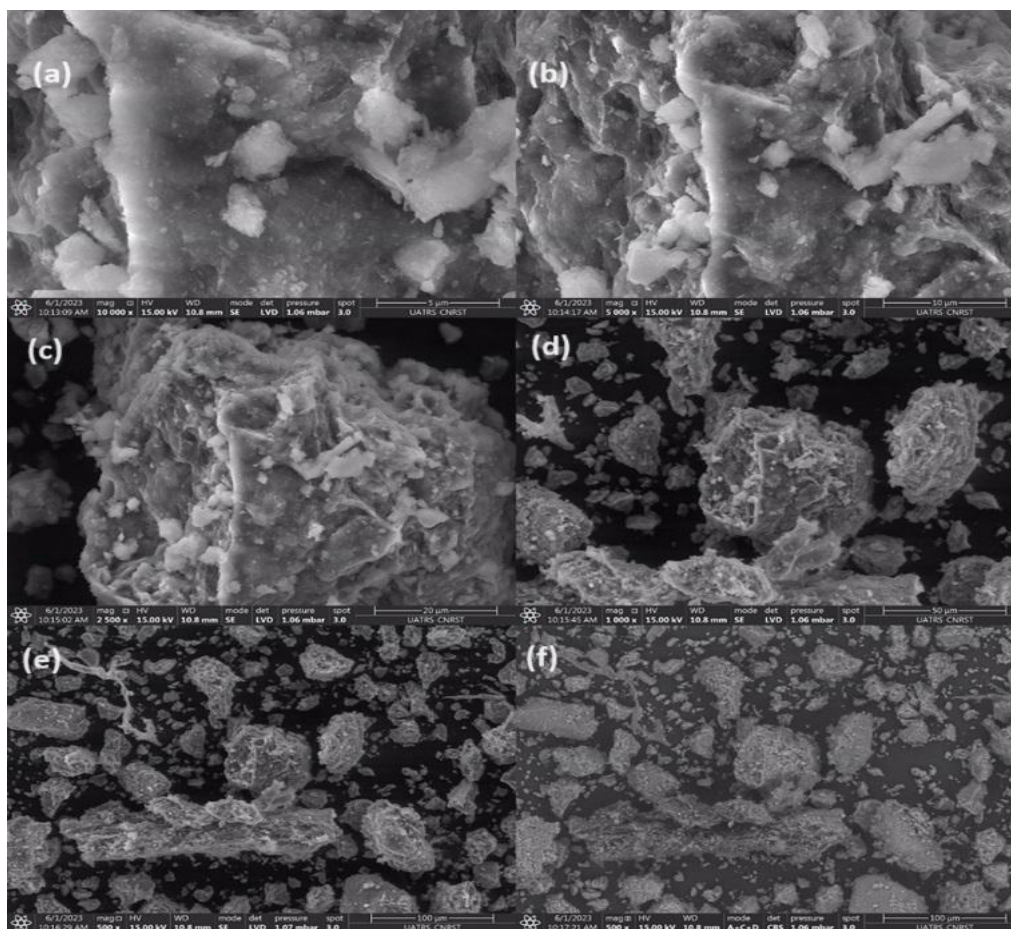


Figure 47 : Spectres EDX de l'échantillon Ech0 de référence (La terre rouge)

Néanmoins, d'autres éléments ont été détectés avec de faible proportion comme Calcium (1,5%), le Potassium (1 %), le Magnésium (0,4%) et des traces de Titane (0,5%). Ces éléments chimiques qualitatifs sont représentés dans le tableau 16 ci-après. (Pm est le pourcentage massique, Pa est le pourcentage atomique).

Tableau 16 : Analyse des composants de la terre rouge sec

Element	Pa %	Pm %
C	9.0	14.9
O	47.1	58.3
Mg	0.4	0.3
Al	11.8	8.6
Si	17.8	12.6
K	1.0	0.5
Ca	1.5	0.7
Ti	0.5	0.2
Fe	10.9	3.9
Total	99.99	99.99

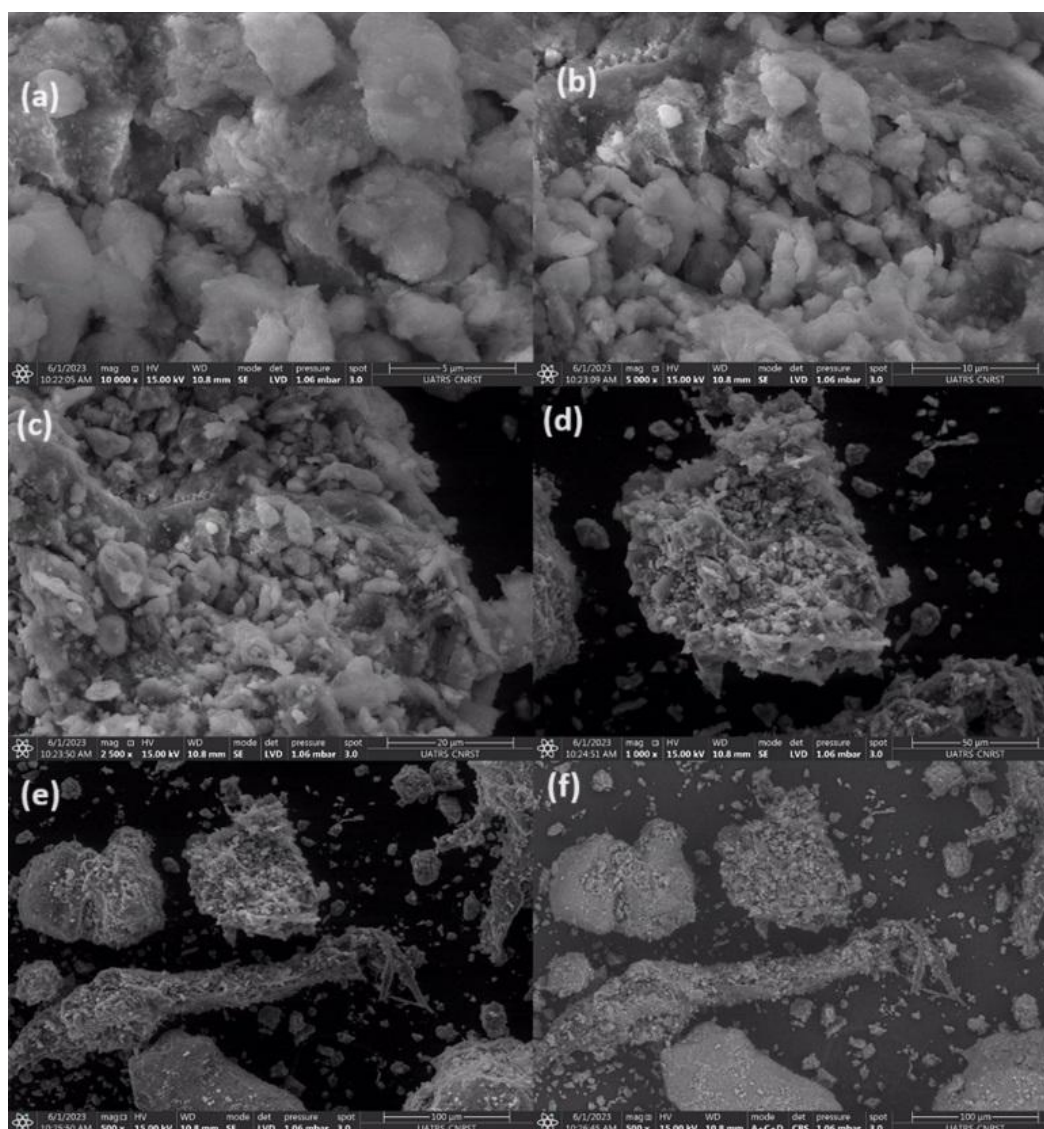


Figure 48 : Six micrographies observées au MEB de l'échantillon Ech5

La figure 56 présente six micrographies observées au MEB de l'échantillon Ech5, de la terre rouge dopée par une teneur de bois en poudre. Les calèches ont été obtenues en électrons secondaires par distincts élargissements adoptés à l'échantillon Ech0. Nous constatons une légère modification de la morphologie et la structure du matériau, et une augmentation de sa granularité qui est due à l'augmentation de l'ordre cristallin.

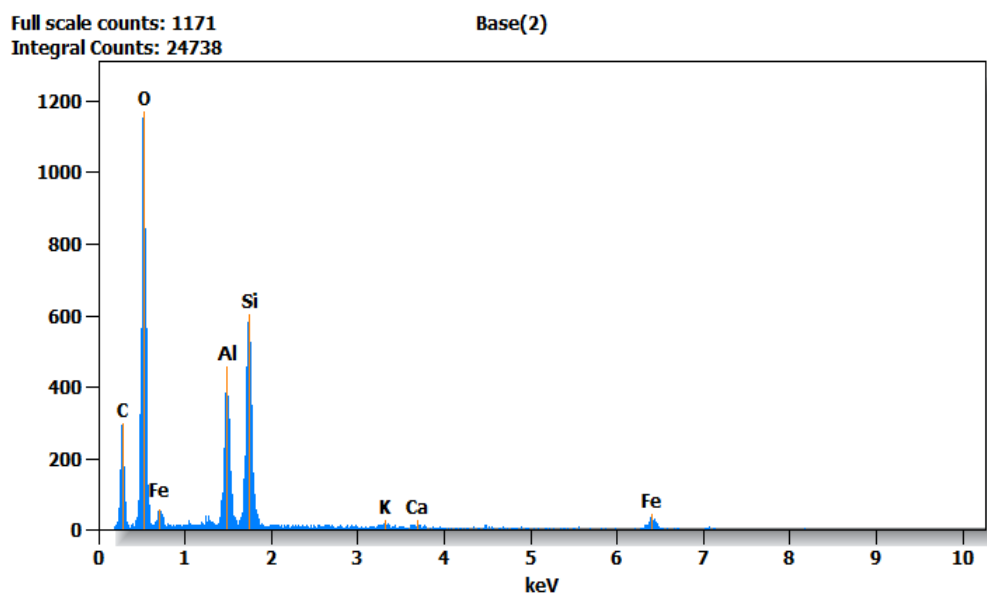


Figure 49 : Spectres EDX de l'échantillon (Ech5) de la terre rouge dopée avec 5% de poudre en bois

La figure 57 représente des spectres élémentaires chimiques par EDX au MEB, de l'échantillon Ech5. Les spectres de microanalyse (EDX) montrent des pics d'intensités différentes, caractéristiques des éléments qui composent l'échantillon dopé par les particules de bois. Les compositions élémentaires chimiques qualitatives de l'échantillon examiné, sont représentées sur le tableau 17. Nous avons constaté que l'élément Oxygène a un pourcentage remarquable de 50,8%, le Carbone 14,6%, le Silicium 16,2% et le Fer 7,4%.

D'autres substances ont été découvertes avec des proportions très faibles d'aluminium (9,6%), le Potassium (0,6 %), et le Calcium (0,8%) avec une disparition de magnésium et du Titane.

Tableau 17 : Échantillon terre rouge contenant 5% de bois en poudre (Ech5)

Element	Pm %	Pa %
C	14.6	22.2
O	50.8	57.8
Al	9.6	6.5
Si	16.2	10.5
K	0.6	0.3
Ca	0.8	0.4
Fe	7.4	2.4
Total	99.99	99.99

La figure 58 illustre six micrographies observées au MEB d'un fragment de l'échantillon Ech15 terre rouge contenant une teneur de bois en poudre. Les images, ci- dessous, ont été obtenues pour différents grossissements cités précédemment. Nous observons toujours une modification de la structure et aussi la morphologie du matériau dopée.

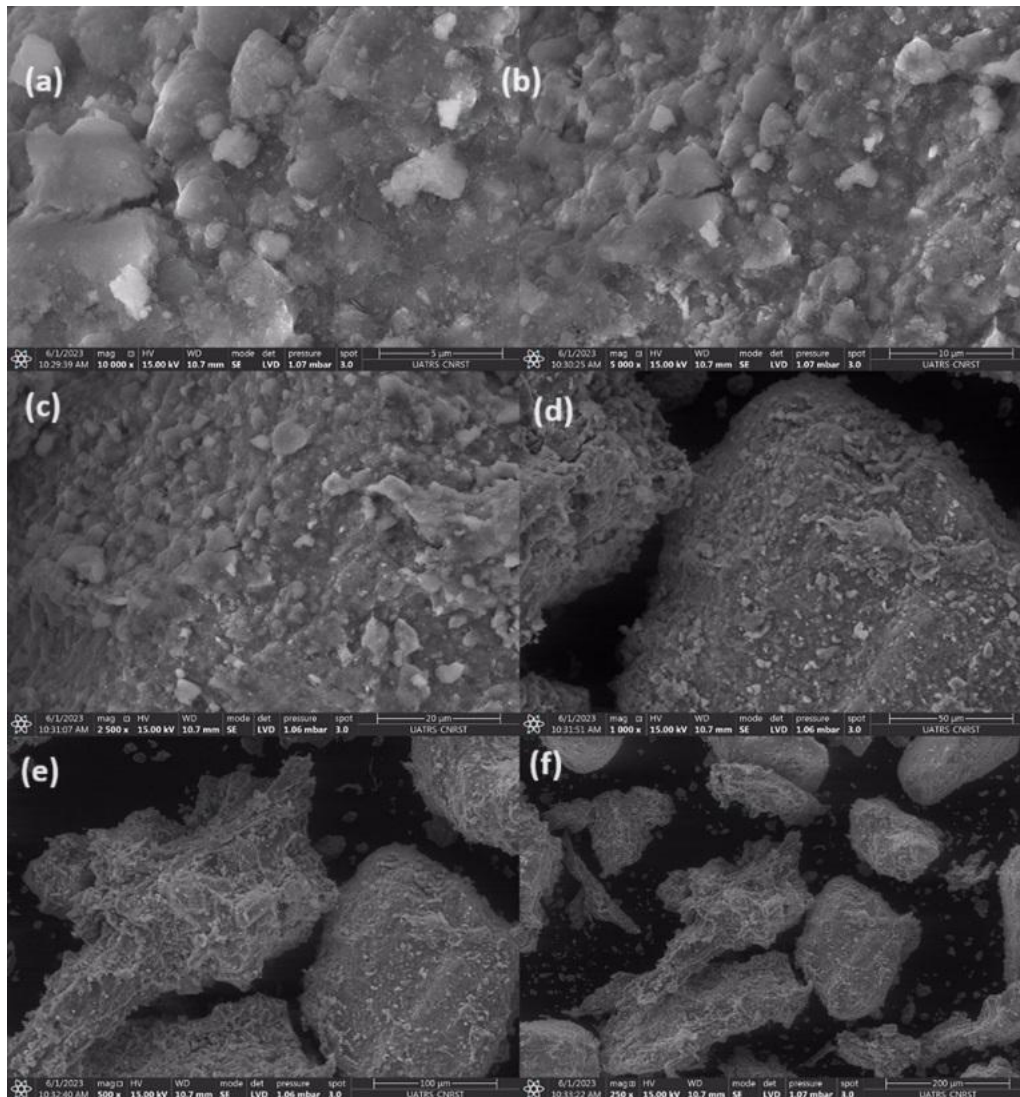


Figure 50 : Les spectres élémentaire chimique par EDX au MEB Ech15

La figure 59 illustre des spectres élémentaires chimiques par EDX au MEB de l'échantillon Ech15. Les compositions élémentaires chimiques qualitatives de l'échantillon examiné sont présentées dans le tableau 18 ci-dessous. La composition des éléments chimiques n'est pas modifiée de manière significative. Le pourcentage de l'oxygène est de 48,7%, le carbone de 10,5%, l'aluminium de 9.7%, le fer de 9,1 % et le silicium de 19,6%. D'autres éléments ont été observés par des taux faibles comme le calcium avec un pourcentage de 0.7%, le potassium de 1,1% et le magnésium de 0.5% avec une disparition du Titane.

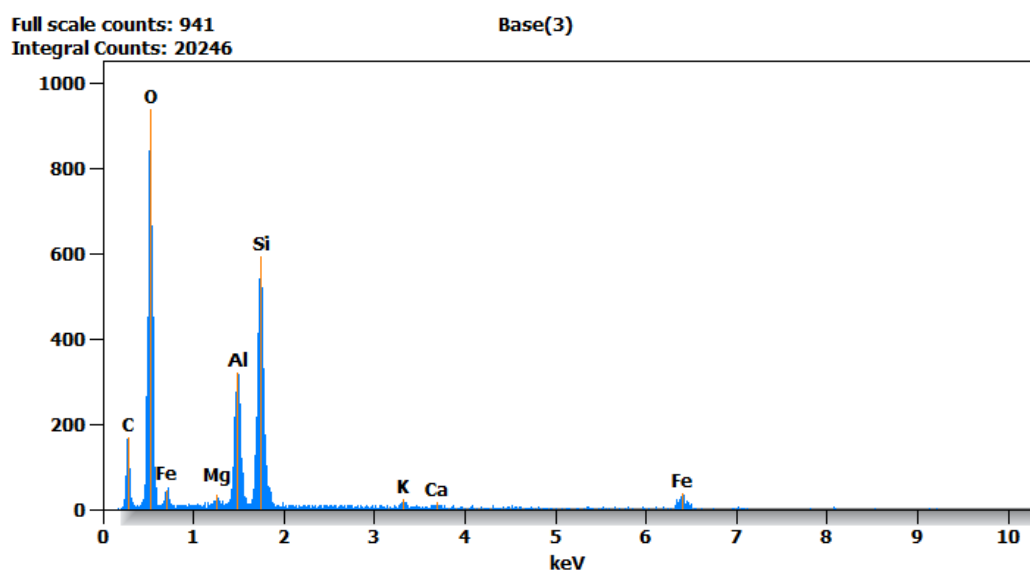


Figure 51 : Spectres EDX de l'échantillon (Ech15) de la terre rouge dopée avec 15% de poudre en bois

Tableau 18 : Échantillon de la terre rouge contenant 15% en poudre (Ech15)

Element	Weight %	Atom %
C	10.5	16.8
O	48.7	58.5
Mg	0.5	0.4
Al	9.7	6.9
Si	19.6	13.4
K	1.1	0.5
Ca	0.7	0.3
Fe	9.1	3.1
Total	99.99	99.99

La figure 60 représente des spectres élémentaires chimiques par EDX au MEB, de l'échantillon Ech20. Les spectres de microanalyse (EDX) présentent des pics d'intensités différentes caractéristiques des éléments composants de l'échantillon étudié. Les compositions élémentaires chimiques qualitatives de l'échantillon examiné sont présentées dans le tableau 18. Les pourcentages des éléments chimiques qualitatifs sont l'Oxygène (48,3%), le Carbone (7,8%), l'Aluminium (19,5%), le Fer (6,5%) et le Silicium (17,2%), des faibles valeurs de Potassium avec un pourcentage de (0,6%), et la disparition du Magnésium, Calcium et le Titane.

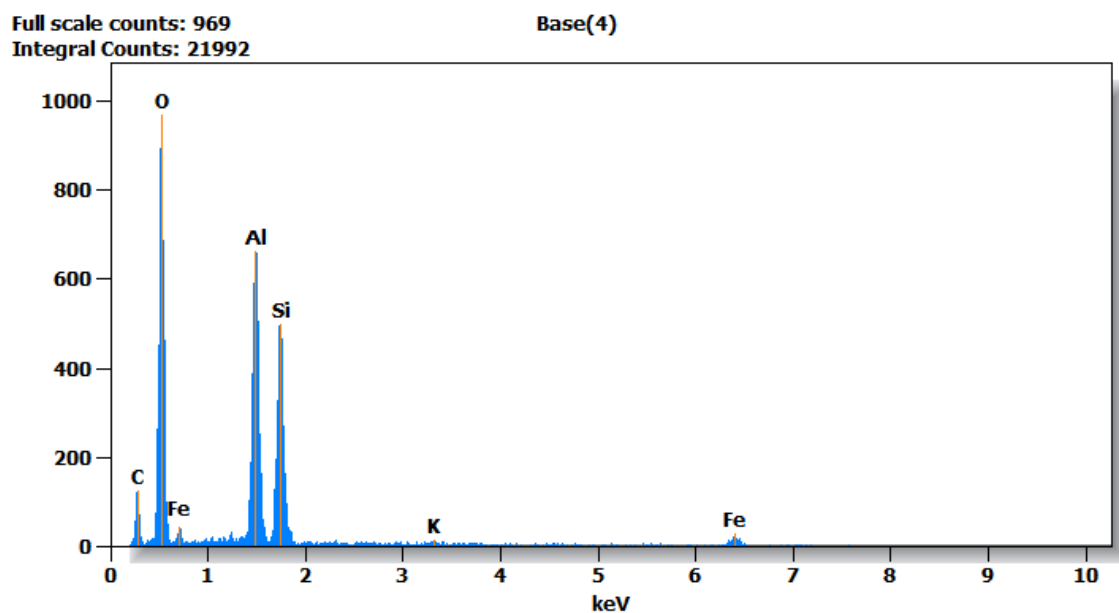


Figure 52 : Spectres EDX de l'échantillon (Ech20) de la terre rouge dopée avec 20% de bois en poudre

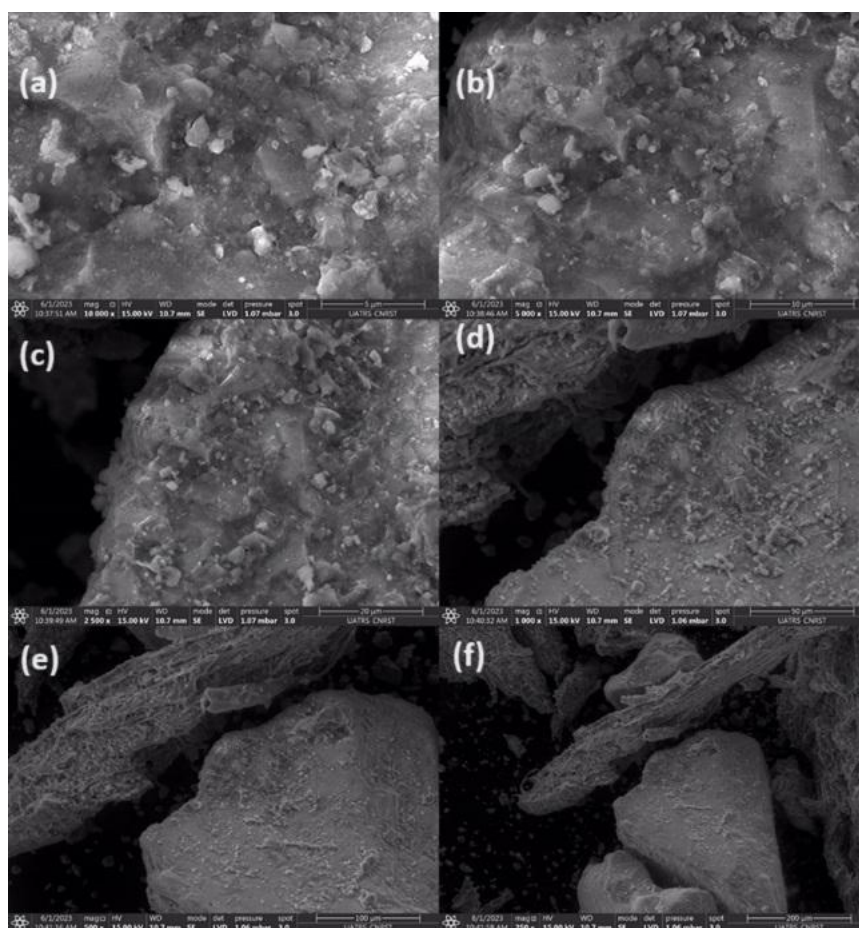


Figure 53 : Les spectres élémentaires chimiques par EDX au MEB (Ech20)

La figure 61 présente six micrographies observées au MEB de l'échantillon (Ech20), terre rouge dopée par une teneur de bois en poudre. Les allégories ont été soutirées pour différents

grandissements déjà adoptés à l'échantillon Ech0. Nous constatons un changement microstructurale significatif des micrographes Figure 61(a, b, c, d). L'ajout de bois a créé une zone de fusion qui est visible dans l'image de la figure 61, a. Les particules de bois ont rempli la porosité inter granulaire et intra-granulaire, ce qui montre que le matériau devient moins conducteur de la chaleur.

Tableau 19 : Les compositions élémentaires chimiques qualitatives de l'échantillon

Element	Weight %	Atom %
C	7.8	12.7
O	48.3	58.7
Al	19.5	14.1
Si	17.2	11.9
K	0.6	0.3
Fe	6.5	2.3
Total	99.99	99.99

IV.4.2 Comparaison des différents échantillons (Ech0, Ech5, Ech15, Ech20)

D'un point de vue expérimental, comme l'illustre le tableau 20, ci-après. Les résultats obtenus par microanalyse de la composition chimique par EDX au MEB des échantillons : Ech0, Ech5, Ech15, Ech20 sont regroupés et comparés dans le Tableau 20.

Tableau 20 : La composition chimique des différentes compositions

Elements en pourcentage massique (%)	Ech0	Ech5	Ech15	Ech20
C	9	14,6	10,5	7,8
O	47,1	50,8	48,7	48,3
Mg	0,4	-	0,5	-
Al	11,8	9,6	9,7	19,5
Si	17,8	16,2	19,6	17,2
K	1	0,6	1,1	1,6
Ca	1,5	0,8	0,7	-
Ti	0,5	-	-	-
Fe	10,9	7,4	9,1	6,5

D'autre part, il est utile d'indiquer que cette méthode n'est pas quantitative à proprement dit, mais elle reste pourtant, un procédé de caractérisation captivante dans notre travail, en effet, Elle a permis de mettre en évidence une altération minéralogique des trois échantillons contenant des particules de bois. En effet, nous constatons que lorsque nous ajoutons une teneur de bois en poudre de 5 à 20%, l'élément Titane disparaît.

En revanche, le pourcentage de Carbone a abaissé considérablement. Cette diminution est due probablement à la réaction chimique, qui s'est produite dans le matériau terre, entre le bois ajouté et le Carbone. En revanche, la présence des traces de Magnésium dans les échantillons

Ech5, Ech15, Ech20 sont probablement due aux impuretés lors de la préparation des échantillons. En plus, nous observons une légère diminution du Fer. Celui-ci peut réagir avec l'oxygène pour donner les ions Fe_2O_3 . Ces ions sont responsables de la couleur rougeâtre de la terre.

D'après l'analyse minéralogique par DRX pour l'échantillon de référence Ech0, nous constatons toujours l'apparition de pic d'une intensité relative très forte à 22° , qui correspond au quartz, avec la présence sous forme de traces de Muscovite. Après l'incorporation de bois en poudre, nous observons l'apparition de pics dioxyde de Fer et dioxyde de Silice. Cela se reflète, respectivement, sur tous les échantillons Ech5, Ech15, Ech20, avec une intensité qui augmente légèrement au cours de l'ajout de composition de bois. Lorsque nous ajoutons 20% de la teneur en bois poudre dans la terre rouge, l'analyse chimique MEB-EDX, montre que les différentes micrographies possèdent une périodicité sur la morphologie à la surface du matériau dopé. Cette périodicité est due à la structuration et l'organisation du réseau cristallin de la terre rouge. Ensuite le spectre EDX a fourni une analyse qualitative et quantitative de la terre rouge. Pour l'échantillon Ech0, nous observons l'abondance de Fer et Silice et la présence sous forme de traces de Vanadin.

IV.5 CARACTERISATION DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES

L'objectif de cette partie expérimentale est d'examiner l'influence du taux de compactage sur les propriétés thermo physiques des échantillons de terre rouge non stabilisée, en particulier la conductivité thermique. Le taux de compactage (ou compacité) se définit comme l'alliance entre la masse volumique apparente sèche d'un matériau et la masse volumique de l'échantillon de référence. En d'autres termes, il s'agit du rapport entre le volume de l'échantillon compacté et le volume total de l'échantillon. Le compactage implique une réduction du volume de l'échantillon, résultant de la diminution des vides remplis d'air. Plus les grains du matériau sont serrés les uns contre les autres, meilleures sont les propriétés mécaniques et thermiques. Le compactage se distingue de la consolidation, car il s'agit d'un tassement du matériau sous l'effet d'une force dynamique, tandis que la consolidation se produit sous le poids propre du matériau.

IV.5.1 Impact du compactage sur la conductivité thermique

a. Préparation des Eprouvettes

Cette étude expérimentale vise à compacter quatre échantillons de terre rouge. Le compactage est effectué dans un moule en inox standard de géométrie cubique mesurant $8 \times 6 \times 5 \text{ cm}^3$ Une quantité de terre rouge acheminée au laboratoire de thermodynamique-énergétique d'une unité

de construction de briques de terre comprimée, située à proximité de Rabat. L'échantillon de terre rouge se présente initialement sous forme de grains solides de différentes tailles. La terre rouge a été préalablement séchée dans une étuve pendant au moins 48 heures à une température moyenne de 40°C afin de ne pas altérer sa composition minéralogique. Après séchage, l'échantillon a été tamisé pour éliminer toutes les impuretés éventuelles.

Afin de comprendre l'effet du compactage sur le comportement thermo physique des échantillons étudiés, plusieurs essais ont été réalisés. Pour ces essais, une quantité de terre séchée, d'une masse de 0,573 kg et ayant une masse volumique de 2391,18 kg/m³. Chaque masse de cet échantillon a été mesurée avec une balance de précision Sartorius (0,01 g).

Les quatre échantillons de même masse ont été compactés en suivant une méthode classique. Les échantillons pâteux et humides ont été introduits dans quatre moules identiques et compressés à l'aide de quatre masselottes de poids différents (0,250 kg, 0,500 kg, 0,750 kg, 1 kg). Les quatre échantillons ont été nommés respectivement Ech250, Ech500, Ech750, et Ech1000.

b. Protocole de mesure de la conductivité thermique

La mesure de la conductivité thermique pour les échantillons (Ech250, Ech500, Ech750, Ech1000) à 20°C est utilisée pour la caractérisation thermo physique. Les actions sont entreprises en régime temporaire. Le CT-mètre est le moyen de mesure utilisé dans le laboratoire de Thermodynamique-énergétique. La valeur moyenne obtenue à partir de trois mesures distinctes sur chaque échantillon représente la conductivité thermique de la terre rouge, avec une incertitude absolue de 8 %. L'incertitude sur les trois mesures de chaque échantillon est estimée à environ 0.06, tandis que l'erreur de l'appareil de mesure est estimée à environ 0.02. La masse volumique en vrac d'un matériau est généralement définie comme la masse volumique d'un mètre cube du matériau sous forme de tas, incluant à la fois les vides inters particulaires et intra particulaires (2391,18 kg/m³). Cette propriété physique diffère en fonction de la granulométrie et de la porosité du granulat. La densité s'élève de 2100 kg/m³ à 2600 kg/m³ pour la terre dense. Nous pouvons expliquer cette variabilité par l'origine de la terre, sa nature ou la méthode de mesure.

Tableau 21: Mesures expérimentales de la conductivité thermique en tenant compte de la masse volumique, du volume compacté à température de 20°C

Échantillons	V_c (cm ³)	ρ (kg/m ³)	ΔV (cm ³)	$\Delta \rho$ (kg/m ³)	λ (W/m.K)	$\Delta \lambda$ (W/m.K)
Ech250	219,36	2616,15	0,20	0,810	1,20	0,04
Ech500	210	2732,76	0,19	0,845	1,31	0,05
Ech750	198,48	2891,37	0,19	0,923	1,44	0,04
Ech1000	188,73	3040,74	0,18	0,742	1,59	0,05

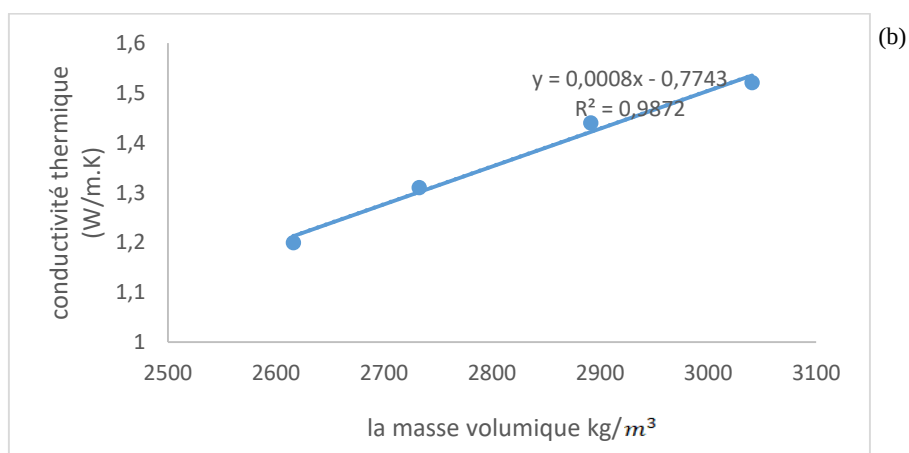
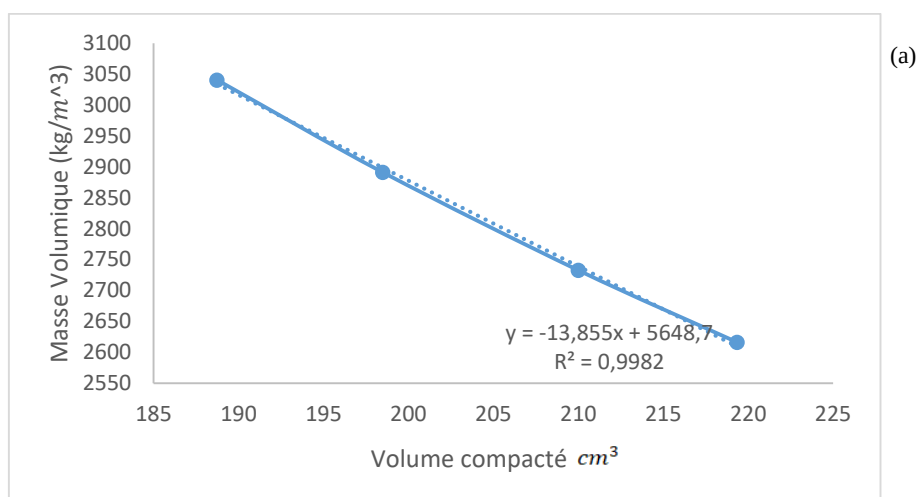


Figure 54 : L'effet de la masse volumique et le volume compacté sur la conductivité Thermique à température ambiante $T=20^{\circ}\text{C}$

La figure 62 (a) montre clairement que lorsque le volume compacté diminue, la masse volumique de l'échantillon augmente. Par exemple, une force de compactage a entraîné une

réduction de 13,9% du volume compacté de l'échantillon Ech250 ($219,36\text{cm}^3$). La conductivité thermique augmente lorsque la masse volumique augmente (figure 62 (b)). La conductivité thermique augmente de 18,5 % pour une élévation de 14 % de la masse volumique. Cette dernière a un impact sur la conductivité thermique du matériau, lorsque la masse volumique augmente, la conductivité thermique augmente également [2] [127]-[128].

IV.5.2 Terre rouge stabilisée par la poudre de bois

La visée de cette démarche est de mesurer à l'échelle expérimentale l'évolution des caractéristiques thermiques et physiques des blocs composés de terre rouge substitués par des blocs d'argile.

La variation des propriétés thermo-physiques de blocs de terre rouge substitués par de la poudre de bois. La terre rouge utilisée largement comme substance de construction et ses propriétés thermo-physiques sont généralement améliorées par l'ajout de différents types de fibres. Cette étude a été menée pour analyser l'effet du stabilisateur à base de poudre de bois sur les blocs de terre rouge comprimés.

Plusieurs échantillons de terre rouge ont été remplacés par de la poudre de bois dans différents pourcentages de 0 %, 5 %, 15 % et 20 % en poids, respectivement. En utilisant le CT-mètre, nous mesurons les propriétés thermo-physiques telles que la conductivité thermique, la capacité thermique volumétrique, la densité et déduisons la diffusivité thermique et l'effusivité thermique par des relations empiriques. Les résultats expérimentaux obtenus montrent une diminution significative de la conductivité thermique et que notre matériau peut être utilisé pour améliorer le confort thermique du bâtiment.

Méthode de préparation des échantillons

Pour préparer l'échantillon, nous le passons d'abord au tamis, afin de nous assurer que nous obtenons une poudre de terre (granulés fins) que nous utiliserons pour fabriquer nos échantillons. Les petits échantillons sont façonnés à la main dans un moule en acier inoxydable de $8\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 5\text{ cm}$. L'échantillon est ajouté au moule après l'avoir préparé à l'aide la quantité d'eau nécessaire additionnée progressivement. La quantité d'eau jointe est enregistrée. Les échantillons sont ensuite séchés et homogénéisés dans un four bien programmé. Pour obtenir une porosité constante, les échantillons sont soumis à une pression régulière de 500 grammes. Les échantillons ont été étiquetés comme échantillon 00, échantillon 05, échantillon 15 et échantillon 20 avec respectivement 0%, 5%, 15% et 20% de poudre de bois stable.

Les échantillons ont été confectionnés à partir de terre rouge et de poudre de bois, sans défauts apparents, sous la forme d'un cube aux dimensions de l'échantillon $8\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ orientés dans les trois directions habituelles. Les mesures ont été effectuées en utilisant un dispositif CT-mètre. L'appareil utilisé permet de déterminer expérimentalement la conductivité thermique et la capacité thermique volumétrique selon la norme NF EN 993-15 de 2005 [9]-[13].

Le CT-mètre est équipé des accessoires nécessaires, y compris une sonde spécifique pour les matériaux solides et une interface qui couple l'unité avec un ordinateur pour afficher et traiter les valeurs numériques enregistrées (figure 63).



Figure 55 : CT-mètre

IV.6 RESULTATS ET DISCUSSION

IV.6.1 Influence de l'ajout de la poudre de bois sur les paramètres thermo-physiques

a. Protocole de mesure de la conductivité thermique

La conductivité thermique est une caractéristique propre à chaque matériau et indique la quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique. Elle est exprimée en W/m.K . La valeur de la conductivité thermique quantifie le pouvoir du matériau à conduire la chaleur.

La conductivité thermique du matériau étudié est la moyenne de trois mesures sur chaque échantillon avec une incertitude absolue de 8 %. Cette valeur est trouvée par la sommation de l'incertitude sur les trois mesures de chaque échantillon qui est de l'ordre de 0.06 et l'erreur de l'appareil de mesure de l'ordre de 0.02 [129].

Le tableau 22 montre les valeurs de conductivité thermique des échantillons : Ech00, Ech05, Ech15, Ech20 dopés avec 0%, 5%, 15% puis 20% de bois à température ambiante. Ces résultats ont été obtenus à l'aide d'un tomodensitomètre [129].

Tableau 22 : Valeurs de conductivité thermique des échantillons

Échantillons	Pourcentage de poudre de bois(%)	Conductivité thermique λ (w/m.K)
Ech00	0%	1,200
Ech05	5%	0,669
Ech15	15%	0,452
Ech20	20%	0,290

A partir des mesures présentées dans le tableau 22, la courbe de la figure 64 a été tracée, montrant l'évolution de la conductivité thermique λ (W/m.K) en fonction de la teneur en poudre de bois à la température ambiante de 20°C.

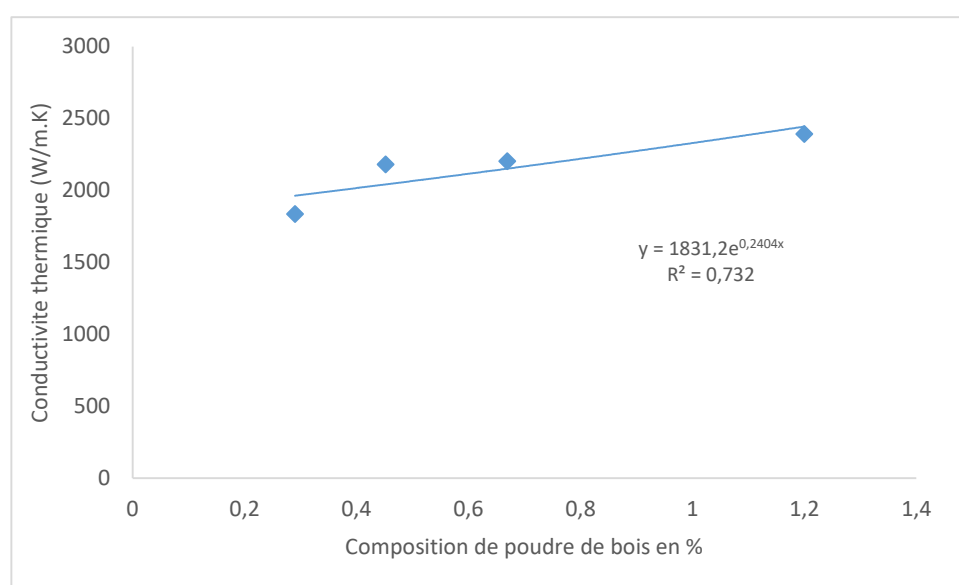


Figure 56 : Diagramme de l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur de poudre de bois à la température de 20

Les résultats présentés dans la figure 64 montrent que si le pourcentage de poudre de bois augmente, la conductivité thermique augmente [129]. Cette diminution s'explique par la cimentation des porosités inter granulaires et intra-granulaires de la terre rouge. Les figures d'analyses DRX montrent clairement une diminution aussi a des minéraux conducteurs de la chaleur tel que le Quartz.

b. Protocole de la capacité thermique volumétrique C ($\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$)

Dans le tableau 23, nous présentons les mesures de la capacité thermique volumétrique ($\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$) recueillies à la température de 20°C . L'instrument utilisé pour mesurer la capacité thermique volumétrique est identique à celui employé pour évaluer la conductivité thermique. L'évolution de cette capacité en fonction de l'incorporation de poudre de bois est illustrée dans la figure 65. Il est important de noter que la marge d'erreur pour cette mesure a été évaluée à $\pm 5\%$, ce qui indique un bon niveau de précision tout en reconnaissant une certaine variabilité dans les résultats.

À partir des mesures obtenues dans le tableau 23, La figure 65 présente une courbe tracée, représentant la variation de la capacité thermique volumétrique en fonction de la teneur en poudre de bois à une température ambiante fixe de 20°C [129].

Tableau 23 : Valeurs expérimentales de la capacité thermique volumétrique en fonction de la teneur en poudre de bois à la température ambiante de 20°C

Échantillons	Pourcentage de bois poudre (%)	La masse volumique (kg/m^3)	Capacité thermique volumique C ($\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$)	Capacité thermique spécifique c ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
Ech00	0%	2391.18	2244	0,9384
Ech05	5%	2202.31	1564	0,7101
Ech15	15%	2180.16	1262	0,5788
Ech20	20%	1834.39	0988	0,5385

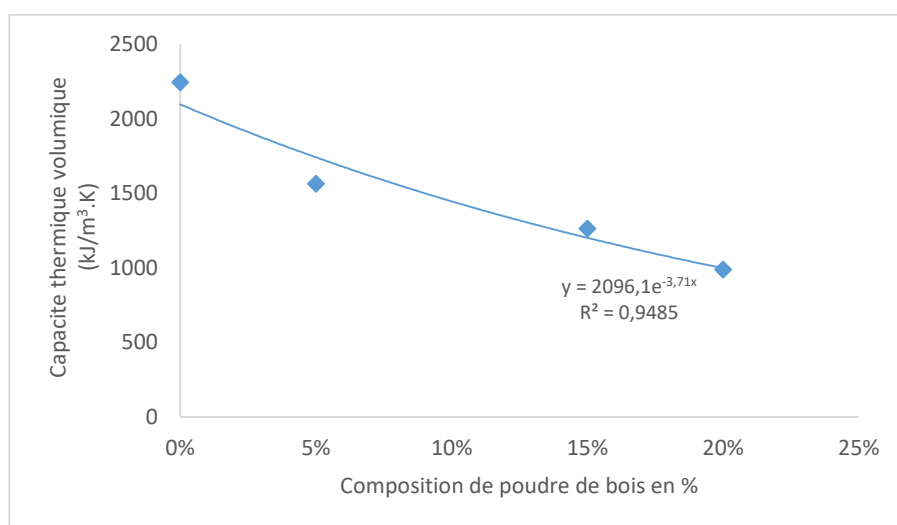


Figure 57 : Diagramme de l'évolution de la capacité thermique en fonction de la teneur de poudre de bois

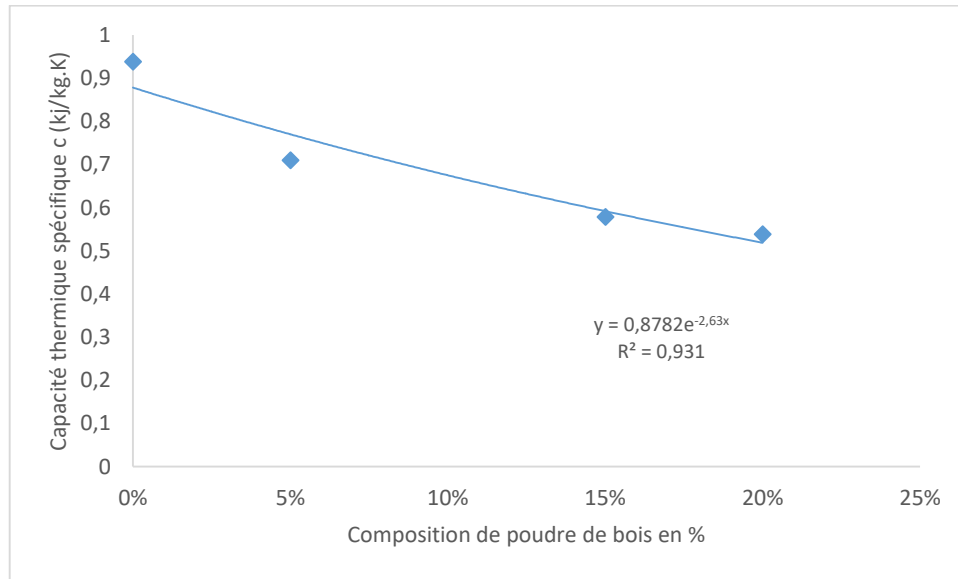


Figure 58 : Diagramme de l'évolution de la capacité thermique en fonction de la teneur de poudre de bois

A partir de l'analyse des courbes expérimentales, il a été observé que la capacité thermique volumétrique diminue avec l'incorporation de poudre de bois. Cette diminution est estimée à un taux de 12,21%. L'ajout de 20% de poudre de bois à 20°C permet de diminuer une capacité thermique jusqu'à 988 kJ/m³.K, alors qu'elle était 2244 kJ/m³.K. Nous pouvons noter que cette diminution de capacité thermique est proportionnelle à la conductivité thermique [129].

c. Mesure de la diffusivité thermique D (m²/s)

Ces mesures sont déterminées selon l'équation (44) pour calculer la diffusivité thermique des quatre échantillons : Ech00, Ech05, Ech15 et Ech20, fixés avec de la poudre de bois dans différents rapports : 0%, 5%, 15% et 20%, respectivement. Les échantillons sont à l'état sec et à une température de 20°C.

Nous avons :

$$D = \frac{\lambda}{c} \quad (44)$$

Les valeurs de la diffusivité thermique pour chaque échantillon étudié sont représentées dans le tableau 24 et illustrées dans la figure 67.

Tableau 24 : Variation de la D en fonction du pourcentage de poudre de bois à température ambiante ($T = 20^{\circ}\text{C}$)

Échantillons	Pourcentage de bois poudre (%)	Diffusion thermique D (m^2/s)
Ech00	0%	$5,76 \times 10^{-7}$
Ech05	5%	$3,94 \times 10^{-7}$
Ech15	15%	$3,58 \times 10^{-7}$
Ech20	20%	$3,23 \times 10^{-7}$

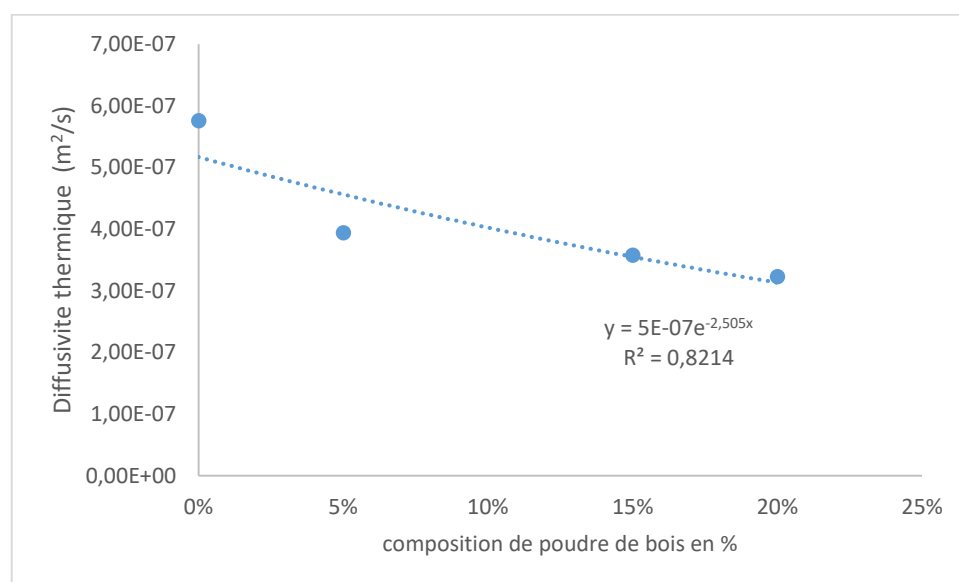


Figure 59 : Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en poudre de bois.

Les résultats exposés précédemment démontrent que si le pourcentage de bois augmente, la diffusivité thermique diminue pour chaque isotherme. Plus la quantité de poudre de bois ajoutée est importante, plus la diffusivité thermique diminue. Plus la quantité de poudre de bois ajoutée est importante, plus la diffusivité thermique diminue. Cette dégradation s'explique par la grande valeur de la diffusivité thermique du bois, qui est de $5.76 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Par la suite, nous observons que l'ajout de 20% de poudre de bois à une température fixe de 20°C permet d'atteindre une diffusivité thermique de $3.23 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. L'augmentation du taux de dopage entraîne une légère augmentation de ce phénomène.

d. Mesure de l'effusivité thermique E ($\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{0,5}$)

En utilisant l'équation (45), nous avons obtenu les résultats de l'effusivité thermique pour chaque échantillon étudié (0%, 5%, 15% et 20%) à température ambiante, représentés dans le tableau 25 et illustrés par la figure 68 :

$$E = \sqrt{\lambda \cdot C} \quad (45)$$

Tableau 25 : L'effusivité thermique en tenant compte du pourcentage de la teneur en poudre de bois à la température ambiante de 20°C

Échantillons	Pourcentage de bois poudre (%)	Diffusion thermique E ($\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2}$)
Ech00	0%	1641
Ech05	5%	1023
Ech15	15%	0755
Ech20	20%	0535

La figure 68 montre que l'effusivité thermique des échantillons (Ech00, Ech05, Ech15 et Ech20) diminue avec l'ajout de poudre de bois entre 0% et 20%. En effet, pour l'échantillon de référence Ech00 (100% terre rouge), l'effusivité thermique est de 1641 ($\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{0,5}$). Pour l'échantillon Ech20 (20% de poudre de bois), l'effusivité thermique est de 535 $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{0,5}$. L'effusivité thermique dépend donc de la conductivité thermique, puis de la capacité thermique volumétrique. Lorsque la conductivité thermique diminue, la valeur de la capacité thermique volumétrique diminue et, par conséquent, l'effusivité thermique diminue.

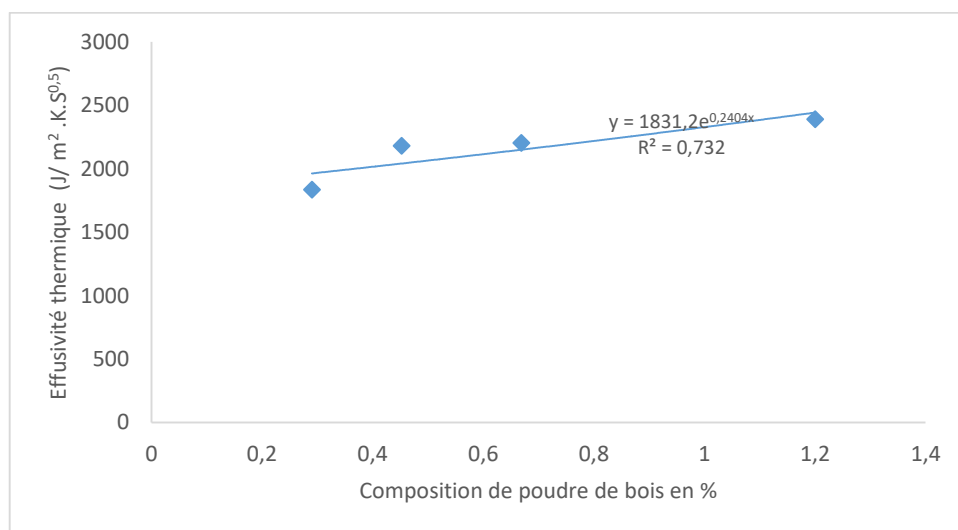


Figure 60 : Graphique montrant l'impact de la concentration en sciure de bois sur l'effusivité thermique à température fixe ($T=20$ C)

IV.6.2 Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité

Tableau 26 représente les mesures expérimentales de la conductivité thermique et de la densité des échantillons : échantillon 00, échantillon 05, échantillon 15 et échantillon 20 dopés avec 0 %, 5 %, 15 % et 20 % de teneur en bois à température ambiante. Ces résultats ont été obtenus à l'aide d'un CT-mètre.

Tableau 26 : Valeurs de conductivité thermique et densité des échantillons : Ech00, Ech05, Ech15 et Ech20 à température ambiante

Échantillons	Pourcentage de bois poudre (%)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m ³)
Ech00	0%	1,200	2391,18
Ech05	5%	0,669	2202,31
Ech15	15%	0,452	2180,16
Ech20	20%	0,290	1834,39

Suite aux mesures présentées dans le tableau 26, la courbe de la figure 69 a été tracée, qui montre la variation de la conductivité thermique λ (W/m.K) en fonction de la densité ρ (kg/m³) à une température ambiante de 20°C. Les résultats obtenus dans la figure 69 montrent que si une quantité mesurée de la composition est ajoutée, la conductivité thermique diminue et la densité aussi. Ceci est lié aux conditions environnementales telles que l'humidité et la porosité.

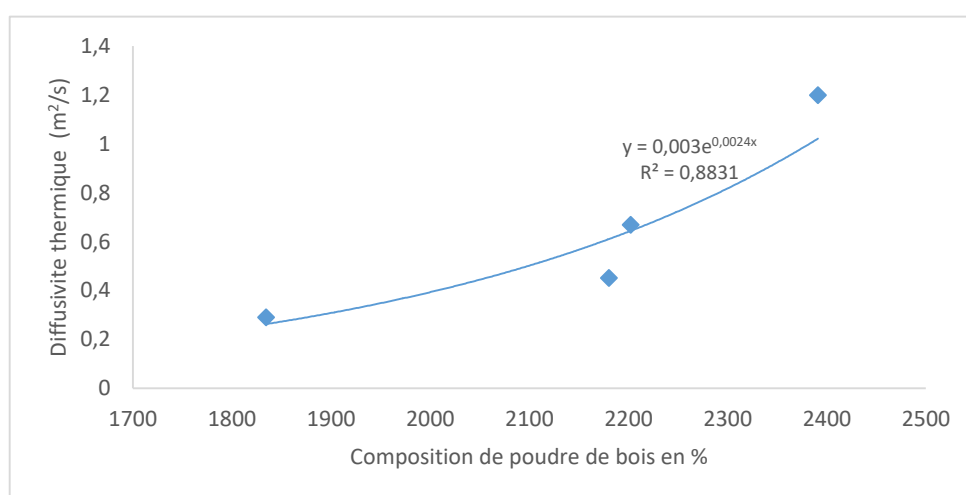


Figure 61 : Influence de la conductivité thermique sur la densité à température ambiante

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé diverses techniques issues de la littérature et utilisées pour la caractérisation expérimentale des échantillons de terre rouge, qu'ils soient non stabilisés (échantillon de référence) ou stabilisés avec de la poudre de bois. Ces techniques permettent d'effectuer des analyses physico-mécaniques, chimiques, minéralogiques et thermiques de ce matériau. L'étude de la caractérisation thermo-physique de plusieurs échantillons de terre rouge stabilisés avec de la poudre de bois a révélé que ces matériaux possèdent une faible conductivité thermique, les rendant adaptés à l'isolation thermique. Ce paramètre thermo-physique diminue avec l'augmentation de la teneur en bois, ce qui signifie que l'incorporation de cette dernière influence significativement les propriétés du matériau. En effet, la diffusion thermique des échantillons étudiés diminue lorsque le pourcentage de remplacement du fixateur varie entre 0 et 20 %. De plus, les valeurs de diffusivité et d'effusivité thermiques sont avantageuses, favorisant une sensation de confort pour les occupants. Toutefois, l'efficacité thermique ainsi que la capacité thermique spécifique décroissent avec l'augmentation de la teneur en bois, de même que la conductivité thermique, ce qui indique que la terre rouge mélangée à la poudre de bois perd progressivement sa conductivité. Nous avons démontré expérimentalement que ces propriétés dépendent fortement de plusieurs facteurs. La section suivante sera consacrée à la présentation de l'ensemble des résultats obtenus au cours de notre étude expérimentale.

CONCLUSION GENERALE

De nos jours, le réchauffement climatique est un phénomène de plus en plus constaté d'une région à l'autre partout dans le monde. Il se manifeste par une augmentation de température inhabituelle, disparition d'espèces végétales, montée des océans, manque de denrées alimentaires et ressources naturelles de plus en plus rares. La maîtrise ou le contrôle du changement climatique représente donc, un défi scientifique majeur pour les spécialistes et les chercheurs scientifiques.

Le développement de la construction en matériaux durables, notamment la terre est un véritable choix en vue de la réduction de l'émission des gaz à effet de serre. Dans la plupart des circonstances industrielles, nous faisons recours aux produits ciment et chaux pour stabiliser la terre. Cependant, la fabrication des liants hydrauliques, présente souvent des effets indésirables et retombées très négatives sur l'environnement, ce qui pose la question de la pertinence écologique de ces produits. En revanche, l'ajout des liants organiques : synthétiques, d'origine végétale, entraîne l'obtention d'un matériau durable en harmonie avec l'environnement et qui conduit à une diminution des gaz à effet de serre.

Le présent travail de recherches a pour objectif l'étude expérimentale des principales caractéristiques Thermiques des échantillons à base de la terre rouge stabilisée par poudre de bois. Nous avons proposé une stabilisation de la terre rouge par des particules de bois, matériau naturel anisotrope et hygroscopique.

La première étape de l'étude a consisté en une analyse approfondie des propriétés chimiques, minéralogiques et microstructurales de divers échantillons enrichis en poudre de bois. Cette caractérisation a été réalisée notamment grâce à l'examen des spectres obtenus par diffraction des rayons X (XRD), nous avons constaté que l'échantillon de référence (Ech00 : 100% terre rouge), présente une raie très intense en raison de la structure cristalline de la terre rouge. Avec l'ajout de bois en poudre à différents taux (5%, 15%, 20%), nous avons remarqué l'apparition de deux nouveaux spectres à 44° et à 51°. Cela se reflète, respectivement, sur tous les échantillons dont le seuil augmente progressivement avec l'incorporation du bois en poudre. En effet, l'interaction des micros-fibres (poudre) de bois avec les ions silicates de la terre rouge a engendré une nouvelle structure du matériau. Les micrographes donnés par MEB ont montré la morphologie d'une surface granulaire de la terre rouge. L'ajout d'une teneur en poudre de bois a montré une périodicité dans la morphologie de la surface du matériau. Cette périodicité est due à la structuration et à l'organisation du réseau cristallin de la terre rouge, ce qui a donné

lieu à l'augmentation de sa symétrie et donc de son ordre cristallin avec l'augmentation du pourcentage massique en poudre de bois substitué. L'étude menée sur la caractérisation thermo-physique de plusieurs échantillons de terre, stabilisés par la poudre de bois, a montré que ces matériaux possèdent une conductivité thermique faible (sont destinés donc à l'isolation thermique). Ce paramètre thermo physique a diminué avec l'ajout de la teneur en poudre de bois à la température constante de 20°C. En revanche, ces matériaux présentent des valeurs de diffusivité et d'effusivité thermiques favorables, contribuant ainsi à créer une sensation de confort pour les occupants. Ces propriétés thermiques jouent un rôle important dans la régulation de la température et la perception du bien-être thermique dans les espaces intérieurs.

Une partie de notre travail de recherche a porté sur l'étude des propriétés (thermo-physiques, mécaniques) du bois d'Eucalyptus Camaldulensis à provenance de la région du Rabat-Maroc. Les résultats trouvés ont permis de tirer la conclusion que le bois d'Eucalyptus Camaldulensis peut être qualifié de bois lourd, nerveux, à fort retrait, doté d'une faible stabilité et possédant d'importantes caractéristiques mécaniques et présente une conduction importante de la chaleur dans le sens longitudinal que dans les sens radial et tangentiel. Ceci peut être attribué à la structure anatomique de la matière ligneuse, notamment, les fibres qui assurent la liaison dans la structure du bois sont orientées suivant la direction longitudinale, contrairement aux deux autres directions usuelles du bois (radiale et tangentielle) où il y a présence des parois et membranes cellulaires en plus des rayons ligneux qui s'opposent au transfert de chaleur. L'Eucalyptus Camaldulensis est à croissance rapide, il produit de grande quantité de bois à âge d'exploitation réduite, mais lors de son séchage sa nervosité engendre l'apparition de défauts (fissuration, déformation,). Par la connaissance des propriétés thermiques du bois d'Eucalyptus Camaldulensis, nous pouvons maîtriser et contrôler l'opération de séchage et par la suite conserver les qualités physique et mécanique de ce type de bois et le qualifier de bois de bonne qualité pour être utilisé comme bois d'œuvre dans le secteur industriel. Cependant, nous avons choisis les microfibrilles d'Eucalyptus comme matériau de stabilisation de composite (terre rouge, bois).

Une autre partie de notre travail est consacrée aux études des propriétés thermiques et séchage, des échantillons de bois d'Araucaria à provenance de la ville d'El Jadida située sur la côte atlantique au milieu du Maroc. Les résultats trouvés ont mis en exergue que la conductivité thermique et la chaleur spécifique par unité de volume sont augmentées à une température de 60°C plus nettement suivant la direction longitudinale que dans les deux autres orientations radial et tangentiel, ce qui indique que ce type de bois est légèrement conducteur de chaleur

suivant l'axe axial (direction longitudinale). D'autre part, les résultats du séchage de ce type de bois montrent que la perte de poids est faible et approximativement constante dans les trois zones.

Enfin, les résultats obtenus indiquent, que les matériaux et/ou la composite terre rouge incorporée par des microfibrilles de bois d'Eucalyptus et représentent des systèmes prometteurs pour de nombreuses applications entre autres dans le domaine du bâtiment et travaux publics.

Les résultats de ce travail montrent une diminution des paramètres thermo physiques en fonction de la substitution du bois. Ceci pourrait améliorer l'isolation thermique et de l'enveloppe du bâtiment tout en réduisant sa consommation énergétique.

Dans le prolongement de ces travaux, il serait judicieux d'analyser les caractéristiques thermiques et hydriques de ce nouveau matériau composite (terre rouge contenant un renfort de bois d'Eucalyptus). Cette étude approfondirait notre compréhension de ses réactions aux changements de température et d'humidité. Notre laboratoire Thermodynamique-Energétique mène actuellement une étude sur la détermination de propriétés thermo physiques en incorporant divers matériaux. Cette recherche explore l'utilisation de matériaux végétaux tels que l'Araucaria et la paille, ainsi que de matériaux industriels comme le plastique, le verre et les fibres métalliques. L'objectif est d'évaluer l'impact de ces différents composants sur les propriétés thermiques des matériaux composites résultants. Cette étude pourrait fournir des informations précieuses pour le développement de nouveaux matériaux aux caractéristiques thermiques spécifiques, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans le domaine de la thermodynamique et de l'énergie.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Houben, H.; Guillaud, H. :Traité de construction en terre.CRA terre- Centre international de la construction en terre-Grenoble, Editions P. Marseille, 2006
- [2] Moufakkir, A.: The Thermal Behavior of the Laminated Composite Material (Clay Reinforced with Copper Fibers) On the Effect of Temperature and Composition,”JP, vol. 20, pp. 189–204, 2020
- [3] Mgniont, C.: Contribution à la formulation et à la caractérisation d’un écomatériau de construction à base d’agroressources (Thèse de doctorat), Université de Toulouse, 2010
- [4] Niroumand, H.; Kibert, C.J.; Saaly, M.: Evaluation of Earth Building Tools in Construction (EBTC) in earth architecture and earth buildings, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 70, 2017
- [5] Meloni, P.; Luigi, F.; Francesco, A.: Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties of an earthen material,” Constr. Build. Mater., 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.008>
- [6] Minke. G.: Earth Construction Handbook. Boston: : WIT Press, 2000
- [7] Erica, A.; Hubert, G.; Mary, H.: An overview of research in earthen architecture conservation. 2008
- [8] Patty, R. L.: The Relation of Colloids in Soil to its Favorable use in Pise or Rammed Earth Walls, South Dakota Agric. Exp. Stn., 1936
- [9] Crowley, M.: Quality Control for Earth Structures., Aust. Inst. Build. Pap., pp. 109–119, 1997
- [10] Laurent, J.P.: Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires optimisation d’outils de mesure « in situ » des paramètres thermiques,

- application à l'étude des propriétés thermiques du matériau terre, I.N.P. Grenoble, 1986.
- [11] Florence, C.; Sylvie, P.: Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content., *Constructi.* 2014.
 - [12] Laborel-Préneron, A.; Aubert, J.E.; Magniont, C.; Tribout, C.; Bertron, A.: "Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 111, pp. 719–734, May 2016, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.119.
 - [13] Meukam, P.; Noumowe, A.; Jannot, Y.; Duval, R.; "Caractérisation thermophysiques et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment. *Mat. Struct.* 36," *Mater. Struct.* 36, vol. 7, pp. 453–460, 2003, doi: 10.1007/BF02481525.
 - [14] Al Rim, K.; Ledhem, A.; Douzane, O.; Dheilly, R.M.; Queneudec, M.: "Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 21, no. 4, pp. 269–276, Aug. 1999, doi: 10.1016/S0958-9465(99)00008-6.
 - [15] Labat, M.; Magniont, C.; Oudhof, N.; Aubert, J.E.: "From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential," *Build. Environ.*, vol. 97, pp. 69–81, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2015.12.004.
 - [16] Cassandra, A.: *Alternative Construction: Contemporary Natural Building Methods.* John Wiley and Sons, Inc., New York,. 2000.
 - [17] Anger, R.; Fontaine, L.: *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*, Cité des s. Paris Belin, 2009.
 - [18] Ziegert; Röhlen, U. C.; Mochel, A.: *Construire en terre crue : construction, rénovation*,

- finitions, Le Moniteur. Paris, 2013.
- [19] Guillaud, H.; Doat, P.; Misse, A.; Moriset, S.: “Pisé ”technique”: traditions, évolutions, résistances, innovations et projections,” 2016.
- [20] Suresh, A.; Anand, K.B.: “Strength and Durability of Rammed Earth for Walling,” J. Archit. Eng. 23, no. 06017004, 2017.
- [21] Dewulf, M. : Le torchis: mode d’emploi, Eyrolles. 2015.
- [22] Akinwumi, I.I.; Awoyera, P.; Olamide, O.; “Indigenous earth building construction technology in Ota, Nigeria,” 2015.
- [23] Phung, T.A.:“Formulation et caractérisation d’un composite terre-fibres végétales : la bauge,” Caen Normandie, 2018.
- [24] Doat, P.; Hays, A.; Houben, H.; Matuk, S.; Vitoux, F.: Construire enterre, Editions A. , Paris, France, 1979.
- [25] Paulus, J.:“CONSTRUCTION EN TERRE CRUE: DISPOSITIONS QUALITATIVES, CONSTRUCTIVES ET ARCHITECTURALES,” Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées. 2014
- [26] Van Damme, H.: La terre, un béton d’argile, Pour la Sc. 2012
- [27] Tucker, Maurice, E.: Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks. Paris, 1981.
- [28] Robert, M.: Les sols cultivés. Édition 2. Éditeur Tec & Doc-Lavoisier, Paris, 1996.
- [29] Liébard, A.; De Herde, A.: Traité d’architecturée d’urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Le Moniteur. 2006.
- [30] Oliva, J.P.; Courge, S.: La conception bioclimatique : Des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation, Terre Viva. Mens, 2006.

- [31] Bouhicha, M. : “Performance of composite soil reinforced with barley straw, Cement and Concrete Composites,” Vol 27, Issue 5, Pages 617-621, May 2005
- [32] Rigassi, V.: “Blocs de terre comprimée.,” Man. Prod. CRA Terre-EAG, Friedrich Vieweg Sohn, vol. 1, p. 104, 1995.
- [33] Houben, H.; Guillaud, H.: *Traité de construction en terre*. 1989.
- [34] Anger, R.: “Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction,” l’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2011
- [35] Norton, J.: *Building With Earth: A handbook.*, Intermedia. london, 1997.
- [36] Burrough, V.S.: “Quantitative Criteria for the Selection and Stabilisation of Soils for Rammed Earth Wall Construction,” University of New South Wales, 2001.
- [37] Peltier, R.; Rumpler, A.H.: *Manuel du laboratoire routier*, 3rd ed. 1959.
- [38] Moevus, M.; Anger, R.; Fontaine, L.: “Hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction : a literature review”. 2011
- [39] Namango, S.S.: *Entwicklung von preisgünstigen Erdbaustoffen für Wandkonstruktionen: Untersuchung der Eigenschaften von gepressten Erdblocken stabilisiert mit Sisalfasern, Maniokpulver und Zement*. Bungoma, Kenya, 2006.
- [40] USACE, “Design and Construction of Levees,” 2000.
- [41] Gate, Stabilizers and Mortars (for compressed earth blocks). Eschbom, GTZ, 1993.
- [42] Minke, G.: *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 2009.
- [43] Danso, A.: *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 2015.

- [44] Rigassi, V.: "6017_BTC_Manuel_de_production.pdf." 1995.
- [45] Estabragh, A.R.; Bordbar, A.T.; Javadi, A.: "Mechanical Behavior of a Clay Soil Reinforced with Nylon Fibers," 2011.
- [46] Prabakar, J.; Sridhar, R.S.: "Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil," Constr. Build. Mater., 2002.
- [47] Ramirez, J. M.: "Les mécanismes de fatigue dans les fibres thermoplastiques," Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2004.
- [48] ROKBI, M.: "Comportement a la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-fibre de verre," Centre universitaire mohamed boudiaf de m'sila, 2001.
- [49] Galán-Marín, C.; Rivera-Gómez, C.; Petric, J.: "Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre," Constr. Build. Mater., 2010.
- [50] Rouag, H.: "abrication de fibre technique nanocomposite à base de polymère thermoplastique," UNIVERSITE SETIF-1-, 2014.
- [51] Taallah, B.: "Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres.," Université Biskra, 2014.
- [52] Sfar, K.: The Fiber Lab Episode 1 : Les Fibres Chimiques, La Fédérat. 2019.
- [53] Baley, C.: Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Paris, 2004.
- [54] Baley, C.: "Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites," 2013.
- [55] Derenne, E.: Coton, lin, chanvre & co : tout savoir sur les fibres textiles végétales. 2023.
- [56] Lionel, G.: Les Grandes Familles de Matériaux Composites. Paris, 2011.
- [57] Ramaswamy, S.; Ahuja, M.; Krishnamoorthy, S.: "Behavior of concrete reinforced

- with jute, coir, and bamboo fibres.,” *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.*, vol. 5, no. 1, pp. 3–13, 1983.
- [58] Rigassi, V.: “Project de construction et extension de herbier du diois a chatillon en diois,” 2005.
- [59] Khedari, J.; Watsanasathaporn, P.; Hirunlabh, J.: “Development of fibre-based soil–cement block with low thermal conductivity,” *Cem. Concr. Compos.*, 2005.
- [60] Röhlen: *Construire en terre crue* Paperback. 2013.
- [61] Millogo, Y; Morel, J.C.; Aubert, J.E.; Ghavami, K.: “Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers,” *Constr Build Mater*, vol. 52, pp. 71–78, 2014.
- [62] Thu, N.T.: “Contribution à l’étude de la formulation et du procédé de fabrication d’éléments de construction en béton de chanvre,” Université de Bretagne Sud, 2010.
- [63] Farhat, H.; Radhouani, M.S.: “Étude Tridimensionnelle Du Transfert Radiatif Dans Un Milieu Semi-Transparent Diffusant Anisotrope Par La Méthode Des Transferts Discrets Modifiée,” *Rev. Gen. Therm.*, vol. 36, no. 5, pp. 330–344, 1997, doi: 10.1016/S0035-3159(97)81597-8. 1997
- [64] Castany, G.: *Principes et méthodes de l’hydrogéologie*, Dunod Pari. Paris, 1982.
- [65] Childs, E.C.; Collis-George, N.: *The permeability of porous materials*. london, 1950.
- [66] Mchirgui, W.: “Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique : Application aux matériaux cimentaires Walid Mchirgui To cite this version : HAL Id : tel-00823902 Modélisation des transferts hydriques da,” 2013.
- [67] “Encyclopædia Universalis,” *Encyclopédie Universelle*. 1996.

- [68] Malvault, G.: “ Détermination expérimentale de la distribution de taille de pores d ’ un milieu poreux par l ’ injection d ’ un fluide à seuil ou analyse harmonique, l ’ École Nationale Supérieure d ’ Arts et Métiers Détermination expériment,” 2013.
- [69] Samaouali, A.: “ Experimental study of Chemical deterioration of Chellah Monument stones.”, Phys. Chem. News 44 (2008) 103-106, 2008
- [70] Aliprandi,: Matériaux réfractaires et céramiques techniques,. 1989.
- [71] “GFRP Composites market by resin type.” [Online]. Available:
[www.marketsandmarkets.com/Market%02Reports/ glass-fiber-reinforced -plastic-composites-market -1427](http://www.marketsandmarkets.com/Market%02Reports/glass-fiber-reinforced-plastic-composites-market-1427)
- [72] “Fibres de carbone.” [Online]. Available:
www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/mater/fibres/te %0Axfib.htm.
- [73] Illisible Institution: “Fibres d’aramide : éléments pour l’évaluation des risques,” pp. 295–306, 2003.
- [74] Nabi Saheb, D.; Jog, J.P.: “Natural fiber polymer composites: A review,” Adv. Polym. Technol., vol. 18, no. 4, pp. 351–363, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1098-2329(199924)18:4<351::AID-ADV6>3.0.CO;2-X ; 1999
- [75] Incropera, F.P.; Dewitt, D.P.; Bergman, T.L.; Lavine, A. S.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley. 2007.
- [76] Bories, S.; Prat, M.; Quintard, M.: “Transferts de chaleur dans les milieux poreux : Conduction, convection, rayonnement,” Tech. L’ingénieur, vol. 33, 2012.
- [77] Speyer, R.F.: Thermal analysis of materials, Marcel Dek. New York, 1994.
- [78] Ateliers, G.; Laurent, J.: “Propriétés thermiques du matériau terre Plan de la présentation,” 8 ème Festiv. des Archit. terre “Grains d’Isère 2010,” 2010.

- [79] Wilburn, F. W.: “Introduction to thermal analysis, techniques and applications,” *Thermochimica Acta*, vol. 155. pp. 383–385, 1989. doi: 10.1016/0040-6031(89)87162-x. 1989
- [80] Degiovanni, A.; Jannot, Y.: Product Overview Download Product Flyer Description Related Products Digital Evaluation Copy About the Author Permissions Table of Contents Thermal Properties Measurement of Materials. 2018.
- [81] Parker, W.J.; Jenkins, R.J.; Butler, C.P.; Abbott, G.L.: “Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity,” *J. Appl. physics*, 1961.
- [82] Baba, T.: “Analysis of one-dimensional heat diffusion after light pulse heating by the response function method,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 5 PART 3, doi: 10.1143/JJAP.48.05EB04, 2009
- [83] Gregory, B.; Spiros, H.; John, R.; Hiroshi, W.: “Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics,” Vol 47, Issue 27, pages 2429-2600, December 2015
- [84] Nguyen, L.H.: “Béton de structure à propriétés d’isolation thermique améliorées: Approche expérimentale et modélisation numérique,” Université de Cergy-Pontoise, 2013.
- [85] Cermak, V.; Rybach, L.: “Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks, in *Landolt-Bornstein Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik*,” vol. 1, pp. 305–343, 1982.
- [86] Van Brakel, J.: “Capillary liquid transport in porous media,” Technische Hogeschool.
- [87] Atlas, V. H.: *Wärmeübertragung Berechnung*, Germany: S. Berlin, Heidelberg, 2010.
- [88] Naital, B.: “Elaboration, caractérisation et modélisation de matériaux poreux. Influence de la structure poreuse sur la conductivité thermique effective,” Université de Limoges.

- [89] Helte, A.: “Radiative and conductive heat transfer in porous media: Estimation of the effective thermal conductivity,” *Appl. Phys*, vol. 73, 1993.
- [90] Hatta, H.; Taya, M.: “Effective thermal conductivity of a misoriented short fiber composite,” *Japanese J. Appl. Physics.*, vol. 58, pp. 2478–2486, 1985.
- [91] Agari, Y.; Ueda, A.; Nagai, S.: “Thermal Conductivity of a Polymer Composite,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 49, pp. 1625–1634, 1993.
- [92] Boudenne, L.; Ibos, M.F.; Gehin, E.; Majeste, A.J.C.: “Thermophysical Properties of Polypropylene/Aluminum Composites,” *J. Polym.*, vol. 42, pp. 722–732, 2003.
- [93] Mottram, J. T.: “Design charts for the thermal conductivity of particulate composites,” *Mater. Des.*, vol. 13, no. 4, pp. 221–225, doi: 10.1016/0261-3069(92)90028-G, 1992
- [94] Pal, R.: “On the Lewis-Nielsen model for thermal/electrical conductivity of composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 5, pp. 718–726, doi: 10.1016/j.compositesa.2008.02.008, 2008
- [95] Agoudjil, B.; Ibos, L.; Majesté, J. C.; Candau, Y.; Mamunya, Y. P.: “Correlation between transport properties of Ethylene Vinyl Acetate/glass, silver-coated glass spheres composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 2, pp. 342–351, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.10.003, 2008
- [96] Singh, I. V.; Tanaka, M.; Endo, M.: “Effect of interface on the thermal conductivity of carbon nanotube composites,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 46, no. 9, pp. 842–847, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.11.003, 2007
- [97] Bessenouci, M.Z.; Bibi TRIKI, E.N.; Khelladi, S.; Abene, A.: “Approches théoriques de la conductivité thermique apparente du béton de pouzzolane à l’aide d’une modélisation des matériaux poreux,” *Rev. des Energies Renouvelables*, vol. 14, no. 3, pp. 427–440, 2011.

- [98] Filali, M.: “Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures A mes parents ...,” Thèse, vol. thèse, pp. 1–211, 2006.
- [99] Hamilton, R. L.: “Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems,” *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 1, no. 3, pp. 187–191, doi: 10.1021/i160003a005, 1962
- [100] Flourey, J.; Carson, J.; Pham, Q. T.: “Modelling thermal conductivity in heterogeneous media with the finite element method,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 161–170, doi: 10.1007/s11947-007-0001-6, 2008
- [101] Neghar, F.: “Etude des propriétés thermiques d ’ un matériau composite à matrice polymère,” 2020.
- [102] Progelhof, R. C.; Throne, J. L.; Ruetsch, R. R.: “Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 9, pp. 615–625, 1976, doi: 10.1002/pen.760160905, 1976
- [103] Krupa, I.; Boudenne, A.; Ibos, L.: “Thermophysical properties of polyethylene filled with metal coated polyamide particles,” *Eur. Polym. J.*, vol. 43, no. 6, pp. 2443–2452, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2007.03.032, 2007
- [104] Ghebrid, N.: “Doctorat en sciences Doctorat en sciences Filière : Sciences Biologiques,” 2018.
- [105] Forero-Sandoval, I. Y.; Pech-May, N. W.; Alvarado-Gil, J. J.: “Measurement of the thermal transport properties of liquids using the front-face flash method,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 93, no. July, pp. 9–15, doi: 10.1016/j.infrared.2018.07.009, 2018
- [106] Nabil, M.; Khodadadi, J. M.: “Computational/analytical study of the transient hot wire-based thermal conductivity measurements near phase transition,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 111, pp. 895–907, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.043, 2017

- [107] Hladik, J.: Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux. 1990.
- [108] Balageas, D.: “Thermal diffusivity measurement by pulsed methods,” High Temp. Press., vol. 21, pp. 85–96, 1989.
- [109] Mumaw, J.: Heat transmission measurements in thermal insulations, Journal of ASTM International: Selected technical papers, Éditeur ASTM International, 1974
- [110] Xamán, J.; Lira, L.; Arce, J.: “Analysis of the temperature distribution in a guarded hot plate apparatus for measuring thermal conductivity,” Appl. Therm. Eng., vol. 29, no. 4, pp. 617–623, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.033, 2009
- [111] Ezbakhe, H.: “Caractérisation thermiques et mécaniques des matériaux poreux utilisés comme isolants simples ou porteurs,” UCPB Lyon, 1986.
- [112] Cull, J. P.: “Thermal conductivity probes for rapid measurements in rock,” J. Phys. E., vol. 7, no. 9, pp. 771–774, doi: 10.1088/0022-3735/7/9/026, 1974
- [113] Kusiak, A.; Battaglia, J.; Thermicar, F.: “Thermal characterization of materials through the hot plate / hot wire techniques,” pp. 67–77, 2015
- [114] Ladevie, B.: “Mise Au Point De Dispositifs De Caracterisation Thermophysique De Materiaux Isolants Solides Ou Pateux,” 1998.
- [115] Kriker, A. ; Chaib, H.: 978-3-330-87495-4. Édition universitaires européennes, 2021.
- [116] Zhang, X.; Degiovanni, A.; Zhang, X.; Mesure, A. D.: “Mesure de l’effusivité thermique de matériaux solides et homogènes par une méthode de ‘ sonde ,” J.Phys.III Fr., pp. 1243–1265, 1993.
- [117] Laurent, J. P.: “Evaluation des paramètres thermiques d’un milieu poreux: optimisation d’outils de mesure ‘in situ,” Int. J. Heat Mass Transf., vol. 32, no. 7, pp. 1247–1259, doi: 10.1016/0017-9310(89)90026-4, 1989

- [118] Gobbé, C.; Iserna, S. E.; Ladevie, B.: “Hot strip method: Application to thermal characterisation of orthotropic media,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 43, no. 10, pp. 951–958, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2004.02.002, 2004
- [119] Gustafsson, S. E.: “Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials,” vol. 804, pp. 797–804, 1991.
- [120] Jannot, V.; Degiovanni, A.: *Mesure des propriétés thermiques des matériaux*, 2e édition. 2024.
- [121] Hay, B.; Filtz, J.-R.; Batsale, J.C.: “Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash,” *Tech. d’analyse*, vol. 33, no. 0, doi: 10.51257/a-v1-r2955, 2004
- [122] Bathiebo, J.D.; Toguyeni, D.Y.K.; Koulidiati, J.: “ Etude expérimentale, par la méthode du plan chaud, des propriétés thermophysiques d’un bois tropical et d’un panneau isolant formulé avec des intrants locaux” *J. Soc. Ouest-Afr. Chim*, pp. 32–50, [Online]. Available: <http://www.soachim.org>, 2011
- [123] Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C.: *Conduction of Heat in Solids*, Publisher Oxford University Press, U.S.A.1986.
- [124] Izard, J. L.: “L’inertie thermique dans le bâtiment,” *ENVIROBAT-Méditerranée*, pp. 1–20, 2006.
- [125] Ouedraogo, J. K. A.: “Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux,” no. Lmdc, p. 168, 2019.
- [126] Jacques, C.: *Proceedings of the Aristotelian Society, Supplementary Volumes, Vol.4, Concepts of Continuity* , pp. 170-196 (27 pages) , 1924
- [127] Cordier, C.: “Caractérisation thermique et mécanique des bétons de chanvre. Rapport

de Stage,” 1999.

- [128] Nasry, O., “Valorisation des déchets de verre en poudre pour la fabrication des nouveaux matériaux de constructions écologiques- Comportement minéralogique-chimique-thermo physique : Approche théorique et expérimentale,” Université Mohamed 5 Rabat, 2022.
- [129] Bouhaddour, N.; “Experimental Determination of Thermal Conductivity, Volumetric Heat Capacity, Diffusivity and Thermal Effusivity of Red Earth Composite Stabilized By Wood Powder,” JP J. Heat Mass Transf., vol. 29, pp. 125–136, doi: 10.17654/0973576322047, 2022
- [130] Bouhaddour, N.: “Study of the Physico-Mechanical Properties of Thermally Modified Eucalyptus Camaldulensis Wood: the Case of the Moroccan Forest,” JP J. Heat Mass Transf., vol. 25, pp. 109–125, doi: 10.17654/0973576322007, 2022
- [131] Bouhaddour, N.: “Study of Thermo-Physical Characteristics and Drying of Araucaria Wood from the City of El Jadida, Morocco,” Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J., vol. 6, no. 2, pp. 274–278, doi: 10.25046/aj060231, 2021