

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 & Énergétique, Génie Civil

Présentée et soutenue le 18/05/2023

Par : **Oumaima NASRY**

**Étude Expérimentale des Propriétés Thermophysiques et Caractérisation
Chimique – Minéralogique des matériaux de Génie Civil incorporés par
des déchets de Verre en Poudre**

JURY

Mohammed Ouadi BENSALAH	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat.	Président
Abderrahim DINANE	PES, École Royale Navale de Casablanca.	Rapporteur/Examineur
Asmae ARBAOUI	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat.	Rapporteur/Examineur
Hanae LOUTFI	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat.	Rapporteur/Examineur
Abdelkbir BELLAOUCHOU	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat.	Examineur
Lahcen AZRAR	PES, Université Mohammed V, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Rabat	Examineur
Mohamed CHARIA	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat.	Invité
Abderrahim SAMAOUALI	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat.	Directeur de Thèse

Année Universitaire: **2022/2023**

*"Le pouvoir de transformation du verre réside dans sa capacité à capturer et
refléter le monde qui nous entoure."*

B.H

Dédicace

Je dédie cette thèse

*À mon père Dr. **Habib** NASRY qui m'a encouragée et supportée*

durant toutes ces années d'études.

*À ma mère **Meryem** Jamil, qui m'a appris et m'a dirigée vers la gloire.*

*À ma grande sœur **Jihane**, qui a partagé avec moi tous les moments d'émotion*

lors de la réalisation de ce travail.

*À mon frère médecin **Aboujihade**, qui m'a accompagnée dans tous les moments de folies et de joies*

*À ma petite sœur **Sahar**, à qui je donne de l'amour, de la force et d'espoir.*

Je dédie cette thèse

*À mon fiancé **Hamza**,*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon **amour** et **affection** à toi.*

*Je remercie le bon **Dieu** qui a croisé **nos** chemins.*

*Depuis que je t'ai connu, **tu** n'as cessé de me soutenir et de m'épauler.*

*À mes chers meilleurs amis **Rawaa** et **Walid**,*

J'imagine quelle serez votre joie aujourd'hui,

*Je vous dédie ce travail en témoignage de ma **profonde** affection*

*En souvenirs de notre **union** qui s'est tissée au fil de **nos** moments de vie partagée.*

*À mes amies, **Marwa** et **Jihane**, Je vous souhaite tout le **bonheur** du monde.*

Remerciements

Le présent travail a été effectué au sein du Laboratoire Thermodynamique et Énergétique à la Faculté des sciences de Rabat, sous la direction de Monsieur *Abderrahim Samaouali*, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat et responsable de l'Équipe de Thermodynamique et Énergétique.

J'exprime mes profonds remerciements tout d'abord à Monsieur **Abderrahim SAMAOUALI**, Professeur d'enseignement supérieur, mon directeur de thèse, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire Thermodynamique et Énergétique et ainsi d'avoir accepté de diriger mon mémoire de thèse. Sa patience, sa disponibilité et son expertise ont été inestimables pour moi et ont été déterminantes dans la réalisation de cette thèse. J'apprécierai toujours cette confiance qu'il m'a accordée.

Je tiens à exprimer ma gratitude à **Monsieur Mohammed Ouadi BENSALAH**, Professeur d'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, pour sa contribution à cette thèse en sa qualité de président de jury.

Je témoigne aussi toute ma gratitude à **Monsieur Abderrahim DINANE**, Professeur d'enseignement supérieur, d'avoir apporté son aide et sa compétence tout au long de cette thèse.

Je remercie également **Madame Asmae ARBAOUI**, Professeur d'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, d'avoir bien voulu accepter de participer en sa qualité de rapporteur de cette thèse.

Mes remerciements vont également à **Madame Hanae LOUTFI**, Professeur d'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, pour son appui et son intérêt envers mon travail de recherche en sa qualité de rapporteur.

Je remercie **Monsieur Abdelkbir BELLAOUCHOU**, Professeur d'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, pour sa participation et sa contribution à ma thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers **Monsieur Lahcen AZRAR**, Professeur d'enseignement Supérieur, à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Université Mohammed V de Rabat, pour sa participation dans ce travail en tant qu'examineur.

Je tiens à remercier **Monsieur Mohamed CHARIA**, Professeur d'enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, d'avoir bien voulu s'intéresser et participer à l'évaluation de ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les Professeurs de notre Centre de Recherche en Énergie, Équipe de Thermodynamique et Énergétique, de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat d'avoir partagé leurs soutiens et leurs grandes connaissances. Je remercie spécialement le professeur Younes El RHAFARI pour son accompagnement et ces conseils pertinents au cours de ce travail.

Je tiens à remercier, tous les Rapporteurs et Examineurs de ce travail, pour l'intérêt qu'ils ont témoigné à l'égard de mon travail.

Je suis sincèrement reconnaissante à **Monsieur Adil Hafidi ALAOUI**, professeur d'enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, pour sa contribution à cette thèse. Je vous remercie pour votre aide, votre soutien et accompagnement depuis mon projet de fin d'études du Master de Sciences et technique jusqu'au fin de ce travail.

Je remercie aussi les collègues chercheurs et doctorants du laboratoire pour l'ambiance conviviale et leur sympathie aux bons moments de recherche que nous avons partagés ensemble. Mes remerciements s'adressent spécialement aux doctorants Ayoub El mouzazi et Reda.

Résumé

Les matériaux de construction constituent une ressource importante en énergie. En effet, le secteur de construction des bâtiments connaît actuellement une croissance remarquable dans la fabrication des matériaux de construction. L'objectif principal de ce travail est d'étudier expérimentalement les formulations des nouveaux matériaux écologiques et environnementaux à base d'autres matières premières locales. Cette étude nous mène à valoriser les déchets industriels du verre, qui ne présentent pas de cycles de vie de recyclage à nos jours. L'approche expérimentale consiste à étudier le comportement chimique, minéralogique, morphologique, mécanique et thermo physique de ces nouveaux matériaux composites écologiques. L'analyse microstructurale, chimique et minéralogique des différents échantillons ont été effectuées en utilisant le Microscope électronique à balayage couplée à un spectromètre à dispersion d'énergie (MEB-EDS) ainsi que la diffraction des rayons X (DRX). Le comportement mécanique des matériaux composites a été étudié afin de justifier leur utilisation dans le domaine de construction. Les paramètres thermo physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique et effusivité thermique) ont été déterminés en fonction de la teneur en eau du matériau (état sec/ saturé) ainsi en fonction de la température (20 °C, 30 °C, 40 °C et 50 °C) à l'aide d'un appareil CT Mètre. Ce travail reporte les mesures à l'échelle d'échantillon des nouveaux matériaux composites binaires et ternaires. La première partie de cette étude concerne principalement l'incorporation de la poudre de verre dans le mortier à différents pourcentages (0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40%, 50 % et 60 %). La deuxième partie concerne la substitution de la poudre de verre (10, 20, 30 % en poids) dans les blocs de terre rouge. Ainsi ce matériau composite de terre rouge a été stabilisé par 6 et 12 % de ciment, d'où l'appellation du matériau composite ternaire. Les résultats de ce travail montrent une diminution de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique en fonction de la substitution de la poudre du verre dans ces nouveaux matériaux. L'incorporation des déchets de verre en poudre en tant qu'ajout à la place du ciment/liant pourrait améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment tout en réduisant sa consommation énergétique.

Mots-clés : Poudre de verre sodocalcique ; Matériaux composites ; mortier ; bloc de terre stabilisé au ciment ; Terre rouge ; Propriétés thermo physiques ;

Abstract

Building materials are an important energy resource. Indeed, the building construction sector is currently experiencing remarkable growth in the manufacture of building materials. The main objective of this work is to experimentally study the formulations of new ecological and environmental materials based on other local raw materials. This study leads us to recover the industrial waste of glass, which does not present recycling life cycles to ours. The experimental approach that we have chosen consists in studying the chemical, mineralogical, morphological and thermophysical behavior of these new ecological composite materials. The microstructural, chemical and mineralogical analysis of the different samples was carried out using the Scanning Electron Microscope coupled to EDX (SEM-EDX) as well as X-ray diffraction (XRD). The thermo-physical parameters (thermal conductivity, specific heat, thermal diffusivity and thermal effusivity) were determined according to the water content of the material (dry/saturated state) as well as according to the temperature (20 °C, 30 °C, 40°C and 50°C) using a CT Meter device. This work reports sample-scale measurements of new binary and ternary composite materials. The first part of this study mainly concerns the incorporation of glass powder into the mortar at different percentages (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% and 60%). The second part concerns the substitution of red earth (10, 20, and 30% by weight) by glass powder. Thus, this composite material was stabilized by 6 and 12% cement, hence the name of the ternary composite material. The results of this work showed a decrease in thermal conductivity and specific heat as a function of the substitution of glass powder in these new materials. The incorporation of powdered glass waste as an addition instead of cement/binder could improve the thermal insulation of the building envelope while using its energy consumption.

Keywords: Soda lime waste glass; Composite material; bloc stabilized with cement; Red soil; mortar; Thermo physical properties

Production Scientifique : Publications

1. **Nasry, O.**, Samaouali, A., Belarouf, S., Moufakkir, A., Sghiouri El Idrissi, H. «*Thermophysical Properties of Cement Mortar Containing Waste Glass Powder*», *Cristal, MDPI*. 2021, 11(5), 488.
2. **Nasry, O.**, Samaouali, A., Sghiouri El Idrissi, H., Bouhaddour, N., Alaoui, A.H. « *Experimental Study of the Thermophysical Properties of the Red Earth Composite Stabilized with Cement Containing Waste Glass Powder* », *Cristal, MDPI*. 2022, 12(3), 396
3. Sghiouri El Idrissi, H., El Rhaffari, Y., **Nasry, O.**, Bouhaddour, N., and Samaouali, A. « *Thermo-physical characterization of oil shal from the timahdit region in Morocco* ». *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 24, Number 1, 2021, pp. 97-111, ISSN: 0973-5763.
4. Abdelkrim Moufakkir , Sara Belarouf , **Oumaima Nasry** , Abderrahim Samaouali, Hraïta Mohammed , Saïfed-Dîn Fertahi and Abdellah Elbouzidi «*Chemical mineralogical characterization of red earth doped with different cooper powder contents*” ». *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 22, Number 2, 2021, Pages 151-168, ISSN: 0973-5763
5. Nora Bouhaddour, Abdelkrim Moufakkir, Abderrahim Samaouali, Hanane Sghiouri El Idrissi, **Nasry Oumaima**, Sara Belarouf and Saïf Ed din Fertahi”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);

Liste des communications scientifiques

Communication orale :

1. **Nasry O.**, Hafidi A.A., Samaouali A. « *Etude thermique, chimique et minéralogique des mortiers à base des déchets de verre en poudre.* » 1ere édition de la journée de l'oriental pour l'environnement » (JOE1),Oujda, 14-16 Octobre 2019

Posters

1. **O. Nasry**, H. Soulami, Y. EL RHAFARI, M. Hraïta, L. Laanab, A. Hafidi Alaoui & A. Samaouali. « *Caractérisation thermophysique des mortiers substitués à haute teneur en poudre de verre pour l'utilisation dans les anciens bâtiments* », RIPAM – Rabat 2019.
2. H. Soulami, **O. Nasry**, M. Hraïta, J.A.AAZIM, S.EL MELLOUKI, & A. Samaouali. « *Caractérisation thermophysique d'un matériau composite à base de l'argile utilisé dans la restauration et la réhabilitation des monuments historiques*», RIPAM – Rabat 2019.

Glossaire

Notations :

λ : conductivité thermique (W/mK)

ρ_{bs} : masse volumique du béton durci séché

ρ_{ba} : masse volumique du béton durci saturé

ρ_{ssd} : masse volumique réelle saturée surface sèche du granulat

ν : coefficient de Poisson

ρC_p : capacité thermique volumique ($J/m^3.K$)

q : flux thermique (W/m^2)

φ_r : densité de flux thermique de rayonnement

λ_r : conductivité thermique de rayonnement

α : diffusivité thermique (m^2/s)

T : température ambiante (°C)

f_c : résistance en compression du béton (MPa)

C_p : capacité thermique massique (chaleur massique) ($J/m^2.K$)

S_r : degré de saturation

m : la masse homogène (g)

V : le volume (m^3)

V_p : Volume total des pores

V_t : Volume total de l'échantillon solide

d : La densité en phase solide (g/cm^3)

d_{app} : La densité apparente (g/cm^3)

μ : La viscosité ($Pa.s$)

P : La pression (Pa)

c_j : fraction volumique

W : teneur en eau

e : Effusivité thermique ($J.k^{-1}.m^{-2}.s^{1/2}$)

Q : Quantité de chaleur échangée par unité de surface

α : L'angle d'incidence des rayons X

V : Le volume compacté (m^3)

Abréviations :

PO : pâte de ciment ordinaire

MO : mortier ordinaire

TR : Terre rouge

PV : Poudre de verre

MC : Matériau composite binaire

MTC : Matériau ternaire composite

CP : Ciment Portland

CPJ : Ciment Portland composé

RAS : Réaction Alkali Silice

BTS : Brique de terre stabilisant

MGP : Mortier de poudre de verre

DRX : Diffraction des rayons X

MEB : Microscope électronique à balayage

EDX : Énergie de dispersion des rayons X

SL : Verres Sodocalciques,

LMP : Verres des Lampes fluorescentes,

FNL : Verres des tubes cathodiques

CR : Verres Cristaux.

RTCM : Réglementation thermique de construction au Maroc

AIE : Agence internationale de l'énergie

PNDM : Programme national des déchets ménagers

Nomenclatures couramment utilisé dans la chimie du ciment

SiO_2 : Dioxyde de silicium

Al_2O_3 : Oxyde d'aluminium

K_2O : Oxyde de potassium

MgO : Oxyde de magnésium

P_2O_5 : Oxyde de phosphore

CaO : Oxyde de calcium
CaSO₄ : Sulfate de calcium
CaCO₃ : Carbonate de calcium
MgCO₃ : Carbonate de magnésium
FeO : Oxyde de fer
Fe₂O₃ : Oxyde de fer(III)
Fe₂O₄ : Oxyde de fer (IV)
ZnO : Oxyde de zinc
TiO₂ : Dioxyde de titane
H₂O : Eau
H₂O₂ : Eau oxygénée

Abréviations chimiques des composés du ciment

C3S : Silicates tricalciques, composé de 3 parties de calcium et 1 de silice
C2S : Silices dicalciques, composé de 2 parties de calcium et 1 de silice
C3A : Aluminates tricalciques, composé de 3 parties de calcium et 1 d'aluminium
CH : Portlandite, composé de calcium et d'eau liée.
C6AS3H32 : Ettringite (AFt), composé de 6 parties de calcium, 3 de silice, 3 d'aluminium et 2 d'eau liée.
C4AF : Aluminoferrite tétracalcique ; 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ ; un minéral présent dans certains ciments qui contribue à leur résistance au feu et à l'abrasion.
Ca(OH)₂ : Portlandite
C-S-H gel : Gel de silicates de calcium hydraté
CAC : Calcite
CSH II : Silicates de calcium hydraté de type II
CH : Carbonate de calcium hydraté
C-S-H : Silicates de calcium hydratés, une phase cristalline qui se forme lors de l'hydratation du ciment. Cette phase est importante pour les propriétés mécaniques et durabilité des matériaux de ciment.
G-C : Gypsum-Calcite, un mélange de gypse et de calcite qui peut se former lors de l'hydratation du ciment et qui peut affecter les propriétés mécaniques des matériaux de ciment.
AC : Anhydrite, un minéral qui peut être utilisé comme additif dans les ciments pour améliorer leur résistance à l'abrasion.

AFm : Monosulfate aluminique hydraté, un minéral qui se forme lors de l'hydratation du ciment et qui peut affecter les propriétés mécaniques et durabilité des matériaux de ciment.

AFt : Ettringite, un minéral qui se forme lors de l'hydratation du ciment et qui peut affecter les propriétés mécaniques et durabilité des matériaux de ciment.

Légende des tableaux :

Tableau I- 1: Coefficient de transmission thermique U et résistance thermique R en résidentiel. (RTCM 2011).	11
Tableau I- 2: Caractéristiques techniques des types d'isolant (Fiches techniques des matériaux industriels).	14
Tableau I- 3 : Compositions chimiques des verres communs commerciaux [38].	21
Tableau I- 4: Composition chimiques des différents couleurs de verre [38].	22
Tableau I- 5: Formateurs, stabilisateurs et modificateurs de différents type de verre (% de poids)[38] ..	23
Tableau I- 6: Réactions d'hydratation des composés du ciment portland [44].	28
Tableau I- 7: Quantité d'eau optimale pour chaque mélange en poudre de verre [51].	35
Tableau I- 8: Étude bibliographique des résistances à la compression et leur indice d'activité (IA) du béton et mortier substitué en poudre de verre à jours [30].	37
Tableau I- 9: L'indice d'activité des bétons substitués par différent type de poudre de verre[38].	39
Tableau II- 1: Valeurs d'équivalent de sable suivant la norme NFP 18-560.	49
Tableau II- 2: Pourcentages des passants et de refus d'un échantillonnage de la poudre de verre.	52
Tableau II- 3: Formulation des mortiers composites binaires	60
Tableau II- 4: Conditionnement des échantillons pour la mesure des paramètres thermiques.	61
Tableau II- 5 : Formulation des matériaux composites ternaires (BTS : bloque de terre stabilisant)	63
Tableau III- 1 : Composition chimique de la poudre de verre, ciment Portland et la terre rouge obtenus par analyse EDX.	75
Tableau III- 2: Comparaison de la composition chimique de la poudre de verre de 100,200 et 300 μm prise dans différentes zones selon les analyses EDX.	79
Tableau III- 3: Composition chimique des matériaux composites ternaires: (a) échantillon témoin (BTS), (b) 0% PV + 6% ciment, (c) 0% PV + 12% ciment, (d) 10% PV + 0% ciment, (e) 10% PV + 6% ciment, (f) 10% PV + 12% ciment, (g) 30% PV + 0% ciment, (h) 30% PV + 6% ciment, and (i) 30% PV + 12% ciment.	93
Tableau IV- 1: Masses volumiques des échantillons à l'état sec et saturé.	104
Tableau IV- 2: Propriétés thermiques des échantillons binaires à l'état sec et saturé à Température ambiante 20° C.	115
Tableau IV- 3: Résultats numériques de la conductivité thermique en fonction de la substitution de la poudre de verre à différent température.	119
Tableau IV- 4: Résultats numériques de chaleur spécifique en fonction de la substitution de la poudre de verre à différent température	121
Tableau IV- 5: Résultats numériques de la densité des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et l'ajout du ciment à Température ambiante.	126
Tableau IV- 6: Valeurs numériques des résultats de mesure de la conductivité thermique des blocs de terre rouge relatives à la figure IV-23.	131
Tableau IV- 7: Valeurs numériques des résultats de mesure de la chaleur spécifique des blocs de terre rouge relatives à la figure IV-23.	134

Tableau IV- 8: Valeurs numériques des résultats de mesure de la diffusivité thermique des blocs de terre rouge relatives à la figure IV-27.	137
Tableau IV- 9: Valeurs numériques des résultats de mesure de l'effusivité thermique des blocs de terre rouge relatives à la figure IV-29.	139

Légende des figures :

Figure I- 1: zones climatiques annuelles adaptées à la réglementation thermique de construction au Maroc (RTCM 2011).	9
Figure I- 2 : Exemple des types de matériaux de construction bénéficiant des caractéristiques thermiques performantes.	16
Figure I- 3 : diagnostic de l'état de gestion des déchets -ministère fédéral de la coopération économique et du développement	19
Figure I- 4: Diagramme du mécanisme d'hydratation du ciment Portland	27
Figure I- 5: Résistance à la compression du béton contenant 30 % de poudre de verre compare au béton de référence[30].	31
Figure I- 6: Description du phénomène des réactions alcali-silice	32
Figure I- 7: Les matériaux source de géopolymère ternaire Al_2O_3 -CaO-SiO ₂ [50].	33
Figure I- 8: Comparaison des études de propriétés mécaniques du béton substitué en poudre de verre (0 % à 60 %)	34
Figure I- 9 : Mesure de temps de prise à l'aide de la méthode de Vicat [51].	35
Figure I- 10: Microscope électronique à balayage des microbilles de verre dans le mortier à 28 jours et 1 an respectivement.	36
Figure I- 11 : Effet de la composition chimique du verre en poudre sur la résistance à la compression[38].	37
Figure I- 12: La quantité de portlandite présenté dans le béton substitué par différent type de poudre de verre[38].	38
Figure II- 1: Collecte, lavage des bouteilles de verre	
Figure II- 2: Concassage des bouteilles de verre	49
Figure II- 3 : Broyeur mécanique de type Funnel P-1 V2A	
Figure II- 4: Tamisage de la poudre de verre	50
Figure II- 5: Lavage, séchage à 105 °C et tamisage du sable	51
Figure II- 6: Analyse granulométrique de la poudre de verre et le sable	51
Figure II- 7: Analyse granulométrique de la poudre de verre et la terre rouge	53
Figure II- 8: Principe de mesure par la plaque chaude gardée	56
Figure II- 9: Appareil de mesure CT Meter	58
Figure II- 10: Boîte à gants	58
Figure II- 11: Échantillons des mortiers témoin et substitués à différents pourcentages de la poudre de verre	61
Figure II- 12: Échantillons des blocs d'argile stabilisée au ciment (de 0 à 12 %) et à la poudre de verre de (0 à 30%)	64
Figure III- 1 : Diffraction des rayons X de la poudre de verre.	71
Figure III- 2: Diffraction des rayons X du ciment Portland.	71
Figure III- 3: Diffraction des rayons X de la terre rouge en poudre	72
Figure III- 4: Microscope électronique à balayage de (a)la poudre de verre et (b) du ciment Portland.....	74
Figure III- 5: Microscope électronique à balayage de la terre rouge.	74
Figure III- 6: Comparaison de la microscopie de la poudre de verre de 100, 200 et 300 μm à différents grossissements (x 50 et x 100)	77

Figure III- 7: Comparaison de la composition chimique de la poudre de verre de 100,200 et 300 μm selon les analyses EDX	78
Figure III- 8 : Diffraction des rayons X de (a) MGP 0% (b) MGP 10% (c) MGP 50% (d) MGP 60%.....	82
Figure III- 9: Diffraction des rayons X de (a) MGP 0% (b) MGP 10% (c) MGP 50% (d) MGP 60%	82
Figure III- 10: Microscope électronique à balayage des mortiers témoin et composites substitués par 10, 50 et 60 % de la poudre de verre.....	85
Figure III- 11: MEB de la terre rouge et la poudre de verre suivant différents grossissements (x 10 μm et 500 μm).....	87
Figure III- 12: Microscope électronique à balayage des matériaux composites ternaires : (a) échantillon témoin (RSB); (b) 0 % PV + 6% ciment; (c) 0 % PV + 12% ciment; (d) 10 % PV + 0 % ciment; (e) 10 % PV + 6% ciment; (f) 10 % PV + 12 % ciment; (g) 30 % PV + 0% ciment; (h) 30% PV + 6% ciment; (i) 30 % PV + 12 % ciment.....	91
Figure III- 13: Diffraction des rayons X de (a) échantillon témoin (RSB); (b) 0% PV + 6% ciment; (c) 0% poudre de verre + 12% ciment; Q, quartz; C, calcite.....	94
Figure III- 14: Diffraction des rayons X de ; (d) 10% PV + 0% ciment ; (e) 10% PV + 6% ciment ; (f) 10% PV + 12% ciment ; Q, quartz ; C, calcite.....	95
Figure III- 15: Diffraction des rayons X de (g) 30% PV + 0% ciment ; (h) 30% GP + 6% ciment ; (i) 30% poudre de verre + 12% ciment. Q, quartz ; C, calcite.	95
Figure IV- 1: Résistance à la compression des mortiers témoin et substitué en poudre de verre à l'âge de 7j, 28j, et 90 jours.	102
Figure IV- 2: masse volumique des mortiers composites binaires à 90 jours	104
Figure IV- 3: relation entre la conductivité thermique et la masse volumique des mortiers composites binaires.....	105
Figure IV- 4: Résultats de la conductivité thermique du mortier composite binaire à l'état sec et saturé à température ambiante	106
Figure IV- 5: Comparaison d l'effet de la conductivité thermique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante	108
Figure IV- 6: Résultats de la chaleur spécifique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante	109
Figure IV- 7: Comparaison d l'effet de la chaleur spécifique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante	110
Figure IV- 8: Résultats de la diffusivité thermique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante	111
Figure IV- 9: Comparaison d l'effet de la diffusivité thermique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante	113
Figure IV- 10: Résultats de l'effusivité thermique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante	114
Figure IV- 11: L'effet de l'effusivité thermique du mortier binaire en fonction du pourcentage de la poudre de verre à l'état sec et saturé à température ambiante	115
Figure IV- 12: Résultats de la conductivité thermique du mortier binaire en fonction de la température	117
Figure IV- 13: Effet de la substitution de la poudre de verre sur la conductivité thermique en fonction de la température	118
Figure IV- 14: Effet de la Température sur la conductivité thermique en fonction de la substitution de la poudre de verre	118

Figure IV- 15: Résultats de la chaleur spécifique du mortier binaire en fonction des différents cas de température.....	120
Figure IV- 16: Effet de la substitution de la poudre de verre sur la chaleur spécifique en fonction de la température.....	121
Figure IV- 17: Effet de la substitution de la poudre de verre sur la diffusivité thermique en fonction de la température.....	122
Figure IV- 18: Résistance à la compression des terres rouges stabilisées au ciment et substitué en poudre de verre.	125
Figure IV- 19: Résultats de la densité des blocs de terre rouge en fonction des pourcentages de poudre de verre et de ciment.....	127
Figure IV- 20: Variation de la densité des blocs de terre rouge à l'état sec à température ambiante ...	128
Figure IV- 21: Résultats de la conductivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la densité du matériau à l'état sec à température ambiante.....	129
Figure IV- 22: Résultats de la conductivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et du ciment à l'état sec à température ambiante.....	130
Figure IV- 23: Résultats de la conductivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et l'ajout du ciment à l'état sec à température ambiante.....	131
Figure IV- 24: Résultats de la chaleur spécifique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et du ciment à l'état sec à température ambiante	133
Figure IV- 25: Résultats de la chaleur spécifique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et l'ajout du ciment à l'état sec à température ambiante	134
Figure IV- 26: Résultats de la diffusivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et du ciment à l'état sec à température ambiante.....	136
Figure IV- 27: Résultats de la diffusivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et l'ajout du ciment à l'état sec à température ambiante.....	136
Figure IV- 28: Résultats de l'effusivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et du ciment à l'état sec à température ambiante	138
Figure IV- 29: Résultats de l'effusivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et l'ajout du ciment à l'état sec à température ambiante	139

Table des matières

Citation.....	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Résumé	v
Abstract	vi
Production Scientifique : Publications.....	vii
Liste des communications scientifiques	viii
Glossaire	ix
Légende des tableaux :	xiii
Légende des figures :	xv
Table des matières.....	xviii
Introduction générale	1
Chapitre I	6
Étude bibliographique.....	6
Introduction	7
I.1- Préambule : Contexte général de l'étude	7
I.1.1 Réglementation thermique marocaine :	8
I.1.2 Isolation thermique dans le bâtiment :	12
I.1.3 Type d'isolant thermique :	12
I.2. Problématique du sujet :	16
I.3 Étude bibliographique des matériaux incorporés par la poudre de verre :	17
I.4 Généralités sur les verres :	18
I.4.1 Situation géographique du recyclage des déchets de verre au Maroc :	18
I.4.2 Principaux types de verre :	19
I.4.3 Caractéristiques chimiques des verres en fonction de leurs types et couleurs :	21
I.4.4 Types de verre, broyage et pourcentage d'incorporation :	22
I.5 Généralités sur le ciment Portland :	24
I.5.1 Mécanisme d'hydratation du ciment Portland :	24
I.5.1.1. Hydratation des silicates :	24
I.5.1.2. Hydratation des aluminates :	25
I.5.2 Phases d'hydratation du ciment Portland :	25
I.5.3 Réactions d'hydratation du ciment :	27
I.6 Facteurs qui influencent l'hydratation du ciment portland :	28
I.6.1 : Composition chimique du clinker :	29
I.6.2 : Finesse du ciment :	29

I.6.3 : Rapport (E/C) :	29
I.6.4 : Influence de la température :	29
I.7 La poudre de verre dans les bétons et mortiers :	30
I.7.1 Propriétés à jeune âge :	30
I.7.1.1 La finesse de la poudre de verre :	30
I.7.1.2 Le rapport eau/liant (E/L) :	31
I.7.1.3 L'absorption quasi nulle de la poudre de verre :	31
I.7.1.4 Le pourcentage d'incorporation de la poudre de verre :	32
I.7.2 Durabilité des bétons- réaction pouzzolanique/ réaction Alkali-silice :	32
I.8 Propriétés mécaniques du béton incorporé en poudre de verre :	33
I.8.1 Influence de la poudre de verre sur les propriétés mécaniques du mortier :	34
I.8.1.1 Quantité d'eau optimale :	34
I.8.1.2 Temps de prise :	35
I.8.1.3 Microstructure :	36
I.8.1.4 Résistance mécanique :	36
I.8.2 Réactions pouzzolaniques :	37
I.8.2.1 Méthode d'analyse indirecte :	37
I.8.2.2 Méthode d'analyse directe :	38
I. 9. Généralités sur le transfert de chaleur :	39
I.9.1- Modes de transfert de chaleur :	39
I.9.2- Transfert thermique dans un milieu poreux :	41
I.9.3 Propriétés thermo-physiques des matériaux solides hétérogènes :	41
I.9.3.1 Inertie thermique :	41
I.9.3.2 Conductivité thermique :	42
I.9.3.3 Chaleur spécifique :	43
I.9.3.4 Diffusivité thermique :	43
I.9.3.5 Effusivité thermique :	43
I.9.4 Classification des pores et indices des vides :	44
Conclusion :	45
CHAPITRE 2 :	46
Méthodologie expérimentale : Matériaux locaux, méthodes et essais :	46
II.1 Introduction :	47
II.2 Caractérisation des matériaux solides hétérogènes :	47
II.2.1 Masse volumique apparente et absolue :	47
II.2.2 Module de finesse :	48
II.2.3 Équivalent de sable :	48
II.3 Caractéristiques physiques des matériaux étudiés :	49
II.3.1 La poudre de verre :	49

II.3.2 Le sable :	50
II.3.3 Ciment Portland :	52
II.3.4 Eau de gâchage :	52
II.5 Méthode de mesure des propriétés thermiques :	55
II.5.3 Méthode du fil chaud :	56
II.6 Caractérisation technique (Test Méthodes) :	56
II.6.1 Diffraction des rayons X :	56
II.6.2 Microscope électronique à balayage (MEB) et spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) :	57
II.6.3 Appareil de mesure de la résistance à la compression :	57
II.6.4 Appareil de mesure de la conductivité thermique CT METER :	57
II.7 Procédure expérimentale des matériaux composites binaires (ciment/ poudre de verre) :	60
II.7.1 Formulation et confection des matériaux composites binaires :	60
II.7.2 Conditionnement des échantillons :	60
II.8.1 Formulation et confection des matériaux composites ternaires :	63
Conclusion :	64
CHAPITRE 3 :	66
Résultats expérimentaux des comportements chimiques et minéralogiques des matériaux composites binaires et ternaires :	66
III.1 Introduction :	67
III.1 Appareils utilisés pour la caractérisation des matériaux de base :	70
III.2 Diffractions des rayons X en poudre (DRX) :	70
III.2.1 Résultats expérimentaux des diffractions des rayons X de la poudre de verre :	70
III.2.2 Résultats expérimentaux des diffractions des rayons X du ciment Portland :	70
III.2.3 Résultats expérimentaux des diffractions des rayons X de la terre rouge :	72
III.3 Microscope électronique à balayage (MEB) :	72
III.3.1 Résultats expérimentaux du Microscope électronique à balayage de la poudre de verre et du ciment Portland :	72
III.3.2 Résultats expérimentaux du Microscope électronique à balayage de la terre rouge :	74
III.4 Microanalyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDX) :	75
III.5 Effet du broyage de la poudre de verre sur la morphologie des particules :	76
III.6 Résultats expérimentaux des diffractions des rayons X des mortiers composites binaires (mortier en poudre de verre) :	81
III.7 Résultats expérimentaux du Microscope électronique à balayage des matériaux composites binaires :	83
III.8 Résultats expérimentaux du Microscope électronique à balayage de la terre rouge et la poudre de verre :	87
III.3.10 Résultats expérimentaux de la composition chimique des matériaux composites ternaires :	92
III.3.11 Résultats expérimentaux de la diffraction des rayons X des matériaux composites ternaires :	93
Conclusion :	96

Chapitre 4	97
Résultats expérimentaux des comportements mécaniques et thermophysiques des matériaux composites binaires et ternaires.....	97
IV.2 Conditions expérimentales des matériaux composites binaires :.....	101
IV.2 Comportement mécanique des mortiers témoin et substitué en poudre de verre :.....	101
IV.3 Masse volumique et son effet sur la conductivité thermique :.....	103
IV.4 Influence de la teneur en eau sur les paramètres thermiques à température ambiante :.....	106
IV.4.1 Variation de la conductivité thermique en fonction du taux de substitution de verre à l'état sec et saturé:	106
IV.4.2 Variation de la chaleur spécifique en fonction du taux de substitution de verre à l'état sec et saturé.....	108
IV.4.3 Variation de la diffusivité thermique en fonction du taux de substitution de verre à l'état sec et saturé : ..	111
IV.4.4 Variation de l'effusivité thermique en fonction du taux de substitution de verre à l'état sec et saturé : ..	113
IV.5 Influence de la température sur la conductivité thermique et la chaleur spécifique :	115
IV.5.1 Effet de la Température sur la conductivité thermique des mortiers substitués à différent pourcentage de poudre de verre :	116
IV.5.2 Effet de la Température sur la chaleur spécifique du mortier substitué en différent pourcentage de poudre de verre.....	119
IV.5.3 Effet de la Température sur la diffusivité thermique du mortier substitué en poudre de verre :	122
IV.6. Propriétés mécaniques des blocs de terre rouge stabilisés au ciment et substitué par la poudre de verre : ..	124
IV.7. Propriétés thermophysiques du matériau composite ternaire :	125
IV.7.1 Relation entre la densité et la conductivité thermique des blocs de terre rouge stabilisé au ciment et substitué par la poudre de verre:	125
IV.6.2 Effet de la poudre de verre sur la conductivité thermique des blocs de terre rouges stabilisé au ciment :	129
IV.6.3 Effet de la poudre de verre sur la chaleur spécifique des blocs de terre rouges stabilisé au ciment et substitué en poudre de verre :	132
IV.6.4 Effet de la poudre de verre sur la diffusivité thermique des blocs de terre rouges stabilisé au ciment et substitué en poudre de verre :	134
IV.6.5 Effet de la poudre de verre sur l'effusivité thermique des blocs de terre rouge stabilisé au ciment et substitué en poudre de verre :	137
Conclusion générale et perspectives.....	141
Annexes.....	146
BIBLIOGRAPHIE	153

Introduction générale

Introduction générale :

L'impact de l'activité humaine sur l'environnement est un sujet de préoccupation croissant, en raison de l'accélération de cette activité et de la production de déchets et de pollution qui l'engendre. L'augmentation constante de la consommation énergétique a des conséquences néfastes sur l'environnement, en particulier sur l'effet de serre qui contribue au réchauffement climatique.

Dans le secteur des matériaux de construction des bâtiments, la solution était d'accroître l'utilisation des matériaux locaux et des déchets industriels afin de diminuer l'utilisation des matériaux de grosse consommation énergétique tel que l'acier, le béton et le ciment.

Dans le but de résorber ces déchets de la nature, de diminuer la pollution et de contribuer à protéger l'environnement, des matériaux de construction dans le secteur de bâtiment ont été fabriqués à partir des déchets industriels. Ce mémoire vient donc à contribuer à l'étude de ces nouveaux matériaux de construction écologiques.

La production du mortier est beaucoup plus demandée, après le béton. Le ciment Portland (liant hydraulique) est la matière première utilisée dans la fabrication du mortier. La fabrication de ce matériau consomme de grandes quantités de ressources naturelles (calcaire et argiles) et génère d'énormes volumes de dioxyde de carbone (décarbonatation durant la préparation du clinker). En effet, la production du ciment est très énergivore et génère de quantités très importantes de l'émission de gaz à effet de serre. Ainsi, il est devenu urgent de trouver des alternatives au ciment afin de réduire cet impact environnemental de la production et de l'utilisation de ces matériaux. Le défi consiste donc à développer de nouveaux matériaux écologiques qui puissent remplacer ou compléter le ciment tout en maintenant ou en améliorant les performances mécaniques et thermiques des matériaux de construction. Cela nécessite des recherches scientifiques approfondies et des innovations technologiques pour trouver des matériaux alternatifs qui soient à la fois durables, écologiques et performants. Parmi ces alternatives, on peut citer les matériaux activés par les alcalis, les matériaux à base de poudres de verre et d'autres matériaux innovants qui peuvent contribuer à la création d'un nouveau matériau de construction performant et

écologique. En travaillant sur ces alternatives, nous pouvons à la fois réduire la consommation de ciment et aussi développer son impact environnemental.

L'isolation thermique des bâtiments peut présenter des avantages environnementaux et assurer une qualité de vie. Plusieurs matériaux locaux peuvent être utiles dans de nombreux matériaux de construction sans dépense d'énergie contrairement aux matériaux de construction ordinaires.

Le recyclage des déchets de verre dans les matériaux de construction devient un sujet d'actualité durant les dernières décennies. Ce matériau recyclable peut présenter de nombreux avantages dans le domaine de génie civil, en vue de sa réactivité chimique avec le ciment. D'autres matériaux locaux peuvent faire objet de la diminution de la consommation énergétique dans le secteur de construction. Dans la littérature, la fabrication des blocs de terre à base d'argile comprimée et stabilisée au ciment s'est largement développée dans divers pays en raison des avantages spécifiques qu'ils présentent en comparaison aux matériaux de construction ordinaire.

Nous proposons dans ce travail d'étudier deux types de matériaux de construction avec incorporation des déchets de verre de type sodocalcique et dont les conductivités thermiques sont suffisamment faibles pour que le nouveau matériau écologique soit judicieux pour une isolation thermique. Nous avons étudié les propriétés mécaniques, thermo physiques et minéralogiques du mortier ordinaire et incorporé la poudre de verre à différentes proportions, afin de spécifier le pourcentage utile pour atteindre les paramètres mécanique et thermo physique favorables. Les briques de terre sont caractérisés par certaines propriétés (faible masse volumique, faible conductivité thermique) qui justifient leur utilisation pour l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments (les briques alvéolées, les briques creuses...). Il s'avère nécessaire d'étudier des matériaux locaux pour le développement des nouveaux matériaux verts afin d'améliorer l'isolation thermique des bâtiments et dont le coût de production sera faible.

La valorisation des briques de terre rouges stabilisées au ciment et incorporées à différentes proportions de la poudre de verre recyclé, n'est pas encore développée dans le domaine de la science des matériaux de construction et constitue le second objet de ce travail. Parmi les techniques étudiées pour la production des matériaux de construction à base d'argile, nous en citons la méthode de mélange et stabilisation.

L'effet de la poudre de verre sur les propriétés mécaniques et thermiques des blocs d'argile stabilisée au ciment est présenté dans ce mémoire. Les caractérisations chimiques et minéralogiques de l'ensemble des échantillons justifient les paramètres thermophysiques résultats. Cette étude est réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage, une microanalyse à rayons X dispersive en énergie, une diffraction des rayons X et un appareil de CT Meter.

Ce rapport est présenté en quatre chapitres.

Le chapitre I présente le contexte environnemental et bibliographique de cette étude. Une synthèse bibliographique sur les propriétés mécaniques et thermiques des mortiers et bétons ordinaires, ainsi que les blocs de terre rouge stabilisés aux ciments sont présentés dans ce chapitre bibliographique. Les techniques de mesure des propriétés thermo physiques, hygrothermiques, minéralogiques et chimiques sont décrites. L'analyse de ces études met en évidence les formulations, les méthodes de confection, les compositions chimiques de la poudre de verre et les réactions pouzzolaniques.

Le chapitre II décrit les matériaux locaux étudiés, et leur utilisation dans le domaine de construction, Il s'avère utile de trouver une bonne formulation des mortiers ciment, terre rouge ordinaire et blocs de terre stabilisé au ciment en fonction de la substitution de la poudre de verre recyclé. L'étude préliminaire du choix du type de verre est déduite des recherches bibliographiques. Les méthodes de confection et les modes de préparation des échantillons dans le laboratoire montrent le rôle primordial afin d'assurer une bonne crédibilité des résultats expérimentaux. Les appareils des essais mécaniques, thermo physiques, chimiques, hygrothermiques et minéralogiques, réalisés au sein du laboratoire Thermodynamique et énergétique LTE, le centre national de recherche scientifique et technique CNRST, et le laboratoire mécanique et génie civil de la Faculté des sciences et techniques de Tanger LMGC sont également présentés dans ce chapitre.

Le chapitre III porte sur une étude microscopique, chimique et une analyse de la composition minéralogique par diffraction X. Ces analyses ont pour objet de bien justifier le comportement mécanique et thermo physique des nouveaux matériaux substitués. Ce chapitre présente d'abord une analyse détaillée des matériaux primaires (poudre de verre, terre rouge, et ciment portland). La caractérisation de ces matériaux permettra par la suite d'interpréter le comportement de ces matériaux composites

écologiques. La deuxième partie de ce chapitre porte sur l'analyse chimique, minéralogique et microscopique des différents échantillons du mortier en poudre de verre, en fonction des substitutions ajoutées. La troisième partie du chapitre concerne l'analyse du matériau composite ternaire (terre rouge, ciment et poudre de verre). Cette caractérisation permettra d'analyser le comportement mécanique et thermo physique de ce nouveau matériau composite.

Le chapitre IV porte sur une étude des propriétés mécaniques et thermo physiques des deux types de matériaux écologiques étudiés dans le cadre de ce mémoire, ainsi que l'effet de la variation de la température basse et le pourcentage de saturation en eau dans les matériaux poreux sur ces propriétés. Cette étude nous a permis de mieux comprendre le comportement mécanique et thermo physique de ces matériaux et de déterminer leur potentiel en tant que matériaux de construction écologiques.

Chapitre I

Étude bibliographique

Introduction

Le premier chapitre bibliographique de cette thèse présente une synthèse des recherches antérieures sur les propriétés mécaniques et thermiques des mortiers et bétons ordinaires, ainsi que sur les blocs de terre rouge stabilisés aux ciments. Cette synthèse a pour but de fournir une vue d'ensemble des travaux de recherche existants dans le domaine et d'identifier les contraintes de connaissances et les opportunités de recherche pour la suite du travail.

L'étude des propriétés des matériaux de construction est cruciale pour comprendre leur comportement lorsqu'ils sont soumis à des conditions environnementales spécifiques. Les propriétés thermiques, telles que la conductivité thermique et la chaleur spécifique, sont importantes pour évaluer leur performance en matière de conservation de l'énergie et de confort thermique à l'intérieur des bâtiments.

Dans ce chapitre, nous décrivons aussi les différentes techniques de mesure des propriétés thermo physiques, hygrothermiques, minéralogiques et chimiques des matériaux de construction. Nous discutons également des paramètres clés qui influencent les propriétés des matériaux de construction, tels que les formulations, les méthodes de confection, les compositions chimiques de la poudre de verre et les réactions pouzzolaniques.

I.1- Préambule : Contexte général de l'étude

Le développement durable du système énergétique se caractérise par la réduction de la consommation de toutes les ressources énergétiques. La diminution du changement climatique, auxquelles notre planète est exposée, est contribué par l'économie d'énergie. La plupart des bâtiments qu'ils soient à usage bureau, logement, commerce ou industriel constituent des systèmes dont leurs consommations énergétiques est importantes. Le confort thermique en est un constituant principal qui dépend des occupants. Plusieurs mises en œuvre peuvent être effectuées pour l'amélioration de la conception thermique ainsi que l'efficacité énergétique des bâtiments adaptée aux climats de chaque pays.

L'un des soucis majeurs dans notre planète est le réchauffement climatique. Une grande consommation énergétique et d'autres maladies sont engendrées par l'usage des appareils de brassage d'air dans certains pays. Au niveau mondial, le secteur du bâtiment constitue lui seul autour de 28 % de la consommation énergétique finale (Réglementation thermique de construction

au Maroc RTCM 2010). Par ailleurs, selon le scénario 450 de l'AIE (agence internationale de l'énergie), le potentiel d'économies d'énergie dans le secteur de bâtiment est de l'ordre de 40%, et cela via plusieurs mesures économiques rentables. En effet, l'AIE estime que les bâtiments consomment environ 40 % de l'énergie mondiale. Les constructions d'aujourd'hui conditionnent durablement les consommations de demain. Un bâtiment bien conçu sera plus performant, économique et moins coûteux qu'un bâtiment rénové.

La stratégie du Maroc liée auxancements des grands programmes de construction annuel impacte l'évolution du secteur de bâtiments en termes de la consommation énergétique. Ainsi, l'amélioration du niveau de vie et la baisse des prix des équipements de chauffage, climatisation, chauffage d'eau etc...engendre une augmentation sensible énergétique. La valorisation des déchets industriels est une des méthodes de construction alternative à travers l'utilisation des matériaux bénéficiant d'une faible conductivité thermique. Une autre méthode de construction alternative pourrait être utile à travers l'utilisation des matériaux locaux tels que (la terre rouge, les briques d'argile cuite, blocs de terre comprimés et/ou stabilisés). Ces matériaux sont reconnus par leur grande inertie thermique. Le Maroc ainsi que d'autres pays d'Afrique utilise ces matériaux dans les habitations. Cependant, pour la sécurité des occupants, tout matériau de construction doit répondre à certaines normes d'un point de vue conformité aux normes du pays, durabilité et économique [2]–[6].

I.1.1 Réglementation thermique marocaine :

La réglementation thermique marocaine présente les exigences techniques normatives dans le domaine de construction. Elle est développée dans le cadre du code d'efficacité énergétique suivant deux approches. L'approche performante définit les besoins spécifiques annuels de chauffage et de climatisation. En outre, l'approche prescriptive spécifie les besoins pour chaque type de bâtiment et chaque zone climatique. La RTCM définit les impacts sociaux, économiques, énergétiques et environnementaux selon chaque zone climatique et pour chaque type de bâtiment.

Le territoire marocain est subdivisé en zones climatiques suite à l'analyse des données climatiques enregistrées par 37 stations météorologiques. Une première approche permettait de classer le zonage climatique en fonction du degré jour d'hiver et d'été suivant 18 °C et 21 °C respectivement comme température de référence. Cependant, il n'était pas pratique d'adopter deux zonages saisonniers différents. Une étude statistique est menée par des experts internationaux sur la base des fichiers climatiques annuels de chauffage et climatisation dans onze villes marocaines représentatives. Le Maroc est caractérisé par une grande variabilité climatique, avec des zones très

froides dans les montagnes et des zones très chaudes dans les régions désertiques. Pour mieux comprendre cette variabilité climatique et adapter les systèmes de chauffage et de climatisation aux besoins des différentes régions, il a été décidé de mettre en place un zonage climatique annuel.

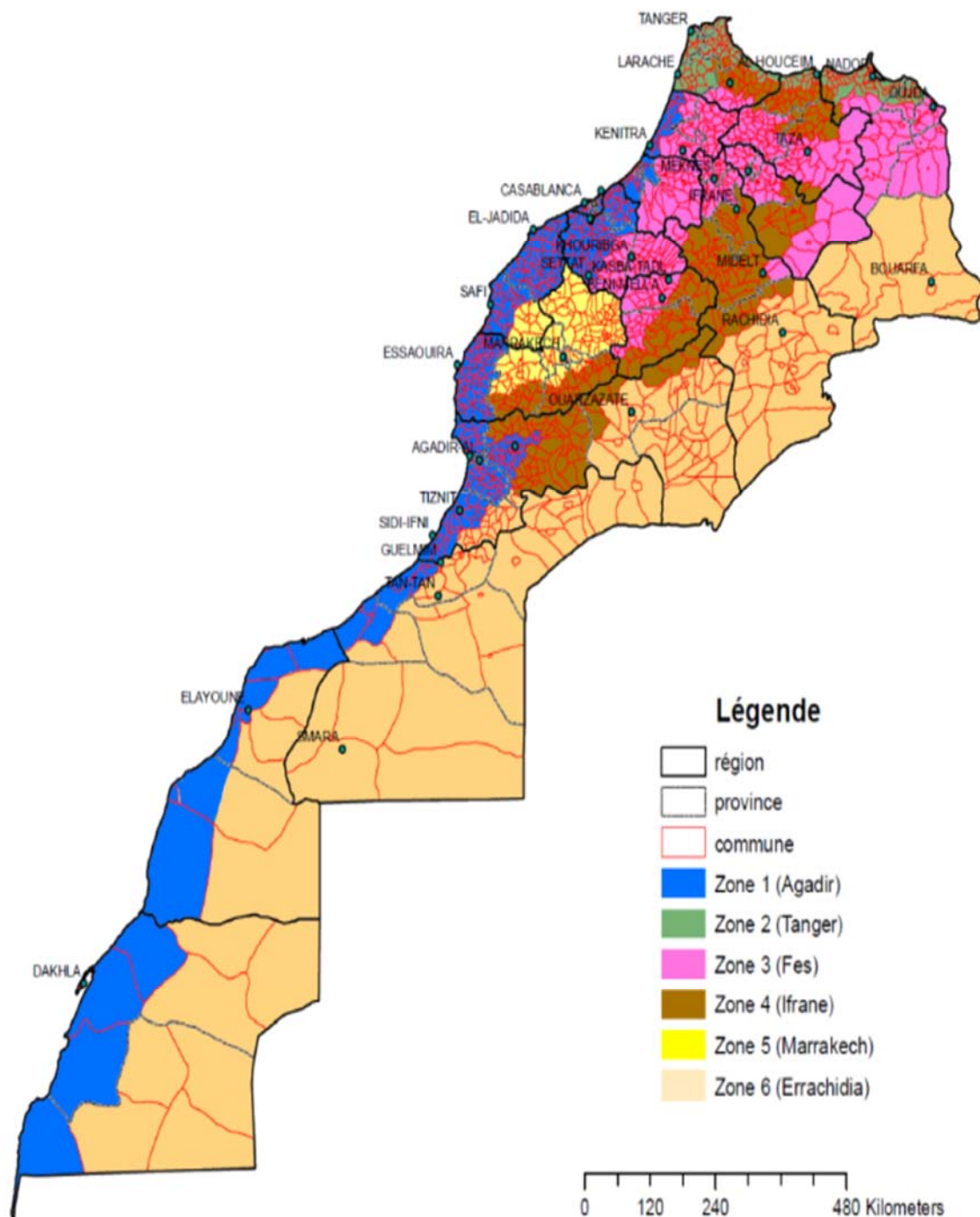


Figure I- 1: zones climatiques annuelles adaptées à la réglementation thermique de construction au Maroc (RTCM 2011).

La figure I-1 représente le zonage climatique annuel du Maroc. Ce zonage a été établi à partir de l'analyse des données climatiques enregistrées par 37 stations météorologiques à travers le pays. Il a été déterminé que le Maroc était divisé en 5 zones climatiques, allant de la zone la plus froide (zone 1) à la zone la plus chaude (zone 5). Ces zones représentées sur la figure I-1 montrent également les villes marocaines prises en compte dans l'étude statistique. Ce zonage climatique annuel permet de mieux comprendre les besoins en chauffage et en climatisation de chaque région du Maroc et de développer des systèmes adaptés à ces besoins.

La RTCM a classé les types de bâtiments selon deux types représentant des cas de construction courant au Maroc :

- Les bâtiments résidentiels (collectif économique, collectif semi-standing, villa individuelle)
- Les batiments ternaires (hotel, hopital, école, batiment administratif)

Les exigences de la réglementation thermique marocaine ont été fixées par des critères de performances dont les niveaux retenus permettant de réduire les besoins de la consommation du chauffage et de climatisation.

Parmi les spécifications techniques de cette réglementation dans les bâtiments résidentiels, des paramètres importants ont été étudiés pour la prise en compte dans la conception, la production et l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Parmi ces caractéristiques, nous en citons le coefficient de transmission thermique et la résistance thermique. La fabrication et l'utilisation des matériaux de construction à haute résistance thermique contribuent à réduire les besoins en chauffage et en climatisation du bâtiment, tandis que l'installation de fenêtres à faible coefficient de transmission thermique aide à maintenir la chaleur l'intérieur de la maison en hiver et à prévenir l'excès de chaleur en été. Nous pouvons citer les exigences retenus dans le tableau suivant I-1.

Les spécifications thermiques exigées par la RTCM impliquent de développer de nouvelles technologies dans le secteur des bâtiments neufs et rénovant. La conception d'un bâtiment économique et performant nécessite des solutions technologiques dans l'isolation des bâtiments.

	Taux des baies vitrées TGBV	U des toitures exposées (W/m².K)	U des murs extérieurs (W/m².k)	U des fenêtres (W/m².k)	R minimale des planchers sur sol (m².k/W)	Facteur Solaire FS' des vitrages
Zone climatique réglementaire Z1	≤ 15%	≤ 0,75	≤ 1,20	≤ 5,80	NE	NE
	16 – 25 %	≤ 0,75	≤ 1,20	≤ 5,80	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26 – 35 %	≤ 0,75	≤ 1,20	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,5
	36 – 45 %	≤ 0,65	≤ 1,20	≤ 3,30	NE	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,3
Zone climatique réglementaire Z2	≤ 15%	≤ 0,75	≤ 0,80	≤ 5,80	NE	NE
	16 – 25 %	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26 – 35 %	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,5
	36 – 45 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	NE	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,3
Zone climatique réglementaire Z3	≤ 15%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 0,75	NE
	16 – 25 %	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 0,75	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26 – 35 %	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 2,60	≥ 0,75	Nord : NE Autres : ≤ 0,5
	36 – 45 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 1,90	≥ 0,75	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,5
Zone climatique réglementaire Z4	≤ 15%	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 3,30	≥ 1,25	NE
	16 – 25 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 3,30	≥ 1,25	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26 – 35 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	≥ 1,25	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,6
	36 – 45 %	≤ 0,49	≤ 0,55	≤ 1,90	≥ 1,25	Nord : ≤ 0,6 Autres : ≤ 0,5
Zone climatique réglementaire Z5	≤ 15%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 1,00	NE
	16 – 25 %	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 3,30	≥ 1,00	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26 – 35 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,6 Autres : ≤ 0,4
	36 – 45 %	≤ 0,49	≤ 0,55	≤ 1,90	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,5 Autres : ≤ 0,3
Zone climatique réglementaire Z6	≤ 15%	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 1,00	NE
	16 – 25 %	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 3,30	≥ 1,00	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26 – 35 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,6 Autres : ≤ 0,4
	36 – 45 %	≤ 0,49	≤ 0,55	≤ 1,90	≥ 1,00	Nord : ≤ 0,5 Autres : ≤ 0,3

NE : Pas d'exigence.

Tableau I- 1: Coefficient de transmission thermique U et résistance thermique R en résidentiel.
(RTCM 2011).

I.1.2 Isolation thermique dans le bâtiment :

Le confort thermique dans un bâtiment dépendra de plusieurs facteurs qui apportent une bonne isolation thermique. Il est nécessaire de mettre en œuvre des matériaux d'isolation particulièrement performant afin d'économiser dans la consommation des équipements du chauffage et climatisation [7], [8] [9].

Dans les modes de construction courants, les matériaux isolants présentent certaines caractéristiques tel que :

- La légèreté en sa matière physique
- La capacité de résister à la pluie, le vent (cas d'isolant extérieur)
- La résistance mécanique acceptable
- La rigidité de l'isolant en cas de contact avec d'autres matériaux (pièces de fixation.)
- La résistance thermique élevée

La mise en œuvre d'isolants se fait tant par l'intérieur que par l'extérieur. La conception architecturale de la façade du bâtiment est un paramètre important dans la mise en exécution de ces matériaux isolants. L'architecte pourrait proposer des habillages de façade en panneaux préfabriqués. Cet habillage extérieur de la façade permettra le choix de prévoir un isolant extérieur posé sur le gros œuvre. Un traitement de pont thermique sera primordiale afin d'habiller complètement la construction.

I.1.3 Type d'isolant thermique :

Les isolants thermiques diffèrent suivant différents paramètres. Ci-dessous, un aperçu des principales caractéristiques par type d'isolant (Voir Tableau I.2).

Les matériaux utilisés dans plusieurs isolants comme la fibre de verre, granulats de verre, la terre cuite peuvent être confectionnés dans des matériaux spécifiques qui entrent dans la composition des éléments d'isolants. Le tableau I.2 présente les masses volumiques et les caractéristiques techniques des isolants les plus rencontrés dans le marché du bâtiment.

Type d'isolant	Matière première	densité	Conductivité thermique	Caractéristiques techniques
Laine de verre minérale	- Diabase - Calcaire	- 10 à 15 kg/m ³	- 0,032 à 0,042 W/mK	- Bon affaiblissement acoustique. - Bon isolant thermique - très performant et commun - Combustible
Laine de roche	- Sable - Débris de verre	- 35 kg/m ³	- 0,037 W/m.K	- Très bon isolant thermique - Durabilité et résistance aux vieillissement - Très bon absorbant acoustique - Incombustible
Polystyrène expansé	- polymérisation des billes de styrène qui en sont issues avec de l'eau et du gaz pentane	- 10 a 30 kg/m ³	- 0,028 à 0,038 W/mK	- Isolant thermique - Leger - Mise en œuvre facile - Stabilité dimensionnel
Polystyrène extrudé	- Granulats de polystyrène - Additifs (agents expansifs) - Obtention final d'une pate extrudée selon l'épaisseur désirée.	- 30 Kg/m ³	- 0.027 à 0.040 W/m.K	- Isolant synthétique - Mieux adapté pour les milieux humides en sa qualité de compression

Laine de bois	- Lignine de bois	- 50 à 170 kg/m ³	- 0,036 à 0,042 W/m.°C	- Isolant thermique - Ecologique - Adapté pour les milieux non humides
---------------	-------------------	------------------------------	------------------------	--

Tableau I- 2: Caractéristiques techniques des types d'isolant (Fiches techniques des matériaux industriels).

Il existe des principaux matériaux de construction utilisés pour le remplissage des murs dans le secteur de construction des bâtiments (figure I.2). Ces matériaux présentent des caractéristiques thermo physiques performants.

- Les bétons légers de pouzzolane : les granulats de pouzzolane sont leur matière première. On désigne les granulats pouzzolanes poreux par des projections issus des éruptions volcaniques. La masse volumique du béton de pouzzolanes naturelles varie de 1100 et 1500 Kg/m³. Ses propriétés physiques et mécaniques le rendent utile comme béton isolant et porteur.
- Les bétons mousses : Ces bétons se caractérisent par des bulles d'air introduites par l'intermédiaire d'une mousse. Les caractéristiques thermiques et phoniques rendent ce matériau très utile comme matériau isolant. Ces types de matériau ont une bonne résistance au feu et au gel.
- La terre cuite : Ce matériau permet de construire et isoler simultanément. Les blocs de terre cuite permettent un faible coefficient de conductivité thermique ($\lambda = 0.46 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). Elle est également caractérisée par sa forte inertie qui permet une meilleure régulation de température et préserve une fraîcheur des espaces construits.
- Le béton cellulaire autoclavé : Ce matériau se caractérise par sa faible masse volumique, grâce aux bulles de gaz d'hydrogène qu'il dégage. Ce béton préfabriqué peut être un béton porteur avec armature ou non structurel.

Afin de concevoir un bâtiment énergétique plus performant, il est nécessaire de promouvoir des solutions technologiques dans l'isolation des bâtiments dès les premières phases de conception du projet. La réduction des déperditions d'énergie dans les bâtiments permet la diminution de la consommation d'énergie.

Cette déperdition d'énergie provient essentiellement de la chaleur traversant l'enveloppe du bâtiment (Mur, toit, sol, fenêtre, porte, plancher...). La problématique de ces déperditions, c'est qu'elles proviennent de la mauvaise isolation des murs. Ces derniers représentent environ 16 à 25 % des déperditions de chaleur. Le recouvrement de la maçonnerie extérieure du bâtiment par des couches d'isolation extérieure permet d'éliminer les ponts thermiques. Cependant, l'isolation intérieure, qui est très répandue en Afrique, est souvent appliquée avec une isolation des combles pour traiter les ponts thermiques.

Béton léger de pouzzolane



Béton mousse



Bloc de terre cuite



Béton cellulaire autoclavé



Figure I- 2 : Exemple des types de matériaux de construction bénéficiant des caractéristiques thermiques performantes.

La perte totale de la chaleur est représentée par 10 à 40 % des ponts thermiques des bâtiments. Le traitement de ces ponts thermiques deviendra nécessaire afin d'améliorer la qualité du confort thermique du bâtiment. Parmi les solutions envisagées, nous pouvons utiliser des rupteurs de ponts thermiques au niveau du raccordement entre la façade, le voile et la dalle.

Les déperditions thermiques au niveau des murs peuvent être traitées suivant une autre solution technique. L'isolation répartie en est un autre type qui consiste à conserver la consommation du chauffage le plus long possible. Le béton cellulaire ou brique de terre cuite alvéolé est un des exemples des matériaux ayant à la fois la fonction porteuse et isolante. Cette fonctionnalité a pour intérêt de construire des éléments structurels des bâtiments. La déperdition au niveau du pont thermique reste basse en raison de la capacité isolante du mur. Cependant, le matériau avec isolation répartie peut bénéficier d'une bonne performance mécanique avec des propriétés thermiques améliorées.

I.2. Problématique du sujet :

Le secteur de construction reconnaît une croissance remarquable dans la fabrication des matériaux de construction durant ces dernières années [2]–[6]. Le mortier est beaucoup plus demandé dans le domaine de construction, puisqu'il assure plusieurs fonctions telles que le collage des murs de maçonneries. Le ciment portland, étant la matière première de la fabrication du mortier, permet d'assurer la fonction du liant hydraulique. Ce matériau à base du calcaire et d'argile, consomme de grande quantité des ressources naturelles non renouvelables[10]. Il émet aussi d'énorme quantité du CO₂ durant sa phase de fabrication (décarbonatation du calcaire, combustibles fossiles du four). En 2019, la quantité du ciment fabriqué au Maroc était de 15 Millions de tonnes

(Membres internes de l'association professionnelle des cimentières au Maroc APC). Ainsi le chiffre de production de ciment était de 16,9 millions de tonnes en 2019, en France (Businesscoot : Société de recherche de marché qui fournit des données et des analyses sur les industries en Europe).

Le véritable challenge dans le secteur de construction est de trouver de nouveaux matériaux écologiques plus performants et environnementaux afin de minimiser la consommation des ressources naturelles [11]–[17]. La production mondiale du verre est de 140 millions de tonnes en 2016 et 191 millions de tonnes en 2019 (Fédération des chambres syndicales de l'industrie du verre). Le volume des déchets de verre ne cesse d'évoluer chaque année. Par exemple, aux Nations Unis le volume des déchets de verre est environ 14 millions de tonnes (selon la base de données mondiale des déchets de l'Organisation des Nations unies).

Cependant, cette thématique, d'incorporation de la poudre de verre dans le béton ordinaire, a été abandonnée en raison des complexités qui se trouvent en terme de développement des réactions alcali-silices, ce que l'on appelle "le cancer du béton". Récemment, des nouvelles recherches commencent à faire objet du développement des matériaux de construction à base de la poudre de verre en contrôlant les réactions RAS, et en favorisant les nouvelles réactions chimiques qui participent à l'amélioration de son comportement mécanique [19], [27], [29], [30], [32]–[36].

I.3 Étude bibliographique des matériaux incorporés par la poudre de verre :

Durant les deux dernières décennies, le recyclage des déchets de verre dans les matériaux de construction a fait l'objet de plusieurs recherches [19], [27], [29], [30], [32]–[36].

Le recyclage des déchets de verre dans les matériaux de construction devient un sujet de recherche depuis les années 2000 [18]–[23], [20], [24]–[27]. Plusieurs chercheurs ont travaillé sur la substitution du verre comme granulats ou comme poudre dans le mortier et/ou béton vu sa compatibilité chimique et physique avec les autres constituants (sable, ciment, gravillon). Ces études montrent que les déchets de verre peuvent être utilisés pour la fabrication du mortier et du béton [19], [28]–[32].

La compatibilité chimique et physique de certains types de poudre de verre avec le ciment et le sable, leur permet d'être utilisées dans la fabrication du mortier et du béton. Les performances thermiques de la poudre de verre pourraient être aussi bénéfiques à l'isolation thermique des bâtiments. Les particules fines du verre favorisent une réaction chimique pouzzolanique rapide

par rapport à une réaction alcali silice ASR plus lente [33], [37]. Expérimentalement, la composition chimique du verre joue un rôle très important dans la réaction pouzzolanique et la diminution de la vitesse des réactions alcali-silices (RAS) [38], et par la suite elle influence les propriétés physiques et mécaniques des matériaux à base des déchets de verre. Il en sort que le choix du type de verre doit se faire en fonction de sa teneur en formateurs, stabilisateurs de verre qui doivent être importants par rapport à celle en modificateur de verre. Concernant les propriétés mécaniques du béton à base des déchets de verre en poudre, il a été montré récemment qu'une teneur de 60% de poudre de verre permet d'améliorer nettement les performances mécaniques du béton [19]. Les résultats issus de la littérature encouragent l'utilisation du verre comme ajout dans les matériaux de construction.

Les résultats issus de la littérature encouragent l'utilisation du verre comme ajout dans les matériaux de construction[54], [55]. Cependant, plusieurs travaux de recherche se focalisent actuellement sur l'étude des propriétés thermiques du béton et/ou mortier ordinaire [56]–[58]. L'objectif étant de synthétiser de nouveaux matériaux présentant de faible conductivité thermique consommant donc peu d'énergie qui seront des futurs candidats dans le secteur de bâtiment.

L'étude des propriétés thermiques des mortiers à forte teneur en poudre de verre n'a pas été effectuée jusqu'à présent. En effet, l'objectif de ce travail est de mener une étude expérimentale détaillée sur la variation des paramètres thermo-physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique et effusivité thermique) en fonction de l'ajout du verre recyclé. Une caractérisation de ces différents paramètres est également présentée en fonction de la variation d'autres paramètres hygrothermiques tel que la température et la teneur en eau.

I.4 Généralités sur les verres :

I.4.1 Situation géographique du recyclage des déchets de verre au Maroc :

L'activité de fabrication du verre d'emballage (sodocalcique) est bien dominée par une seule société marocaine située à Casablanca appelée Sevam (Société d'exploitation de verreries Leader au Maroc). La rentabilité du recyclage des bouteilles de verre reste très limitée par la distance qui sépare le lieu de récupération et la plateforme de valorisation à savoir Casablanca. La diminution du recyclage du verre par cette société est principalement due aux :

- Manque de tri par type de verre

- Difficulté de distinguer le verre blanc et le verre coloré
- Rejet du verre coloré

Toutefois, à l'échelle internationale, le taux de recyclage des verres demeure élevé par rapport au Maroc, à cause de la disponibilité des tris optique/magnétique des couleurs et types de verre. Cependant, le Maroc vise le taux de 20 % de recyclage des déchets fixé par le programme national des déchets ménagers PNDM comme un objectif à atteindre en 2020 (figure I.3).



Figure I- 3 : diagnostic de l'état de gestion des déchets -ministère fédéral de la coopération économique et du développement

I.4.2 Principaux types de verre :

Les principaux verres commerciaux ont fait objet des recherches bibliographiques afin de distinguer les caractéristiques principales de chacun. Nous citons les types suivants :

- Verre sodocalcique : ce type de verre se distingue sous forme de bouteille à base de silice, calcium et sodium. Il est généralement le plus disponible et utilisable dans le marché marocain.

- Verre borosilicate : Il est utilisé dans le domaine des laboratoires expérimentaux. Ce type de verre présente un faible coefficient de dilatation et se distingue donc par une bonne résistance aux chocs thermiques.
- Verre céramique : Ce type de verre est caractérisé par sa température de fusion qui est plus haute que celle du sodocalcique.
- Verre Cathode ray tube (CRT): Le verre cathode ray tube est généralement utilisé dans la fabrication des outils électroniques, il contient des métaux lourds sous forme d'oxydes tels que PbO, SrO ou encore BaO.
- Verre à plomb : L'ajout du plomb au verre permet d'ajouter son éclat, il est fréquemment utilisé dans les verres à usage lumineux.

Types de verre	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	PbO
Verre sodocalcique									
Contenants	66-75	0.7-7		12-16	0.1-3	0.1-5	6-12		
Verre flotté	73-74			13.5-15	0.2	3.6-3.8	8.7-8.9		
Verre plat et mince	71-73	0.5-15		12-15		1.5-3.5	8-10		
Ampoule électrique	73	1		17		4	5		
Verre trempé	75	1.5		14			9.5		
Verre borosilicate									
Appareils verres de laboratoire	81	2	13	4					
Pharmaceutique	72	6	11	7	1				
Verres plombés									
Pièces de télévision en couleur	54	2		4	9				23

Tubes néon	63	1		8	6				22
Pièces électroniques	56	2		4	9				29
Verre optique	32			1	2				65
Verre au baryum									
Panneau de télévision en couleur	65	2		7	9	2	2	2	2
Couronne de verre optique	36	4	19						41
Verre aluminosilicate									
Tubes de combustion	62	17	5	1		7	8		
Fibre de verre renforcé	64.5	24.5		0.5		10.5			

Tableau I- 3 : Compositions chimiques des verres communs commerciaux [38].

I.4.3 Caractéristiques chimiques des verres en fonction de leurs types et couleurs :

Les compositions chimiques des verres se différent d'un type à un autre. Le tableau I-3 présente les compositions chimiques des différents verres communs dans le marché de l'industrie du verre. Nous pouvons distinguer la forte domination de la silice et du calcium pour les verres de type sodocalcique. Le verre CRT contient des métaux lourds sous forme d'oxydes tels que le PbO, SrO ou encore BaO. Le borosilicate contient également de forte teneur en silice ainsi qu'une faible teneur en sodium et calcium. L'effet de la couleur du verre sur sa composition chimique est également présenté sur le tableau I-4. Nous pouvons conclure des légères variations des pourcentages de dominations de la silice. Cependant, le verre de couleur verte présente une forte teneur en calcium en comparaison avec les autres couleurs de verre. Le choix du type de verre étudié dans le cadre de ce mémoire a été basé sur l'ensemble des recherches bibliographiques établis[42]. Les études expérimentales ont été faites sur les bouteilles de verre de type sodocalcique de couleur verte.

Composition chimique	Verre ambré	Verre vert	Verre marron	Verre blanc
SiO ₂	70.66	72.25	72.1	69.82
CaO	9.12	12.35	-	8.76
Na ₂ O	8.32	10.54	-	8.42
Al ₂ O ₃	6.53	2.54	1.74	1.02
Fe ₂ O ₃	2.52	-	0.31	0.55
MgO	1.45	1.18	-	3.43
K ₂ O	1.03	1.15	-	0.13
TiO ₂	0.27	-	-	-
P ₂ O ₅	0.07	-	-	-
MnO ₂	0.04	-	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-	0.01	-
SO ₃	-	-	0.13	0.20
Na ₂ O+K ₂ O	-	-	14.11	-
CaO+MgO	-	-	11.52	-

Tableau I- 4: Composition chimiques des différents couleurs de verre [38].

I.4.4 Types de verre, broyage et pourcentage d'incorporation :

La composition chimique du verre joue un rôle très important pour le développement de la réaction pouzzolanique et la diminution de la vitesse des réactions RAS. Une étude des différents types de verre (sodocalcique, fluorescence verre des lampes ,verre cristal ...) a prouvé que la composition chimique influence sur les propriétés physiques et par la suite les propriétés mécaniques des matériaux à base des déchets de verre [38]. Le choix du type de verre doit se faire donc en fonction de la teneur en formateurs de verre, stabilisateurs de verre qui doit être importante par rapport aux modificateurs de verre. Ces derniers favorisent la réaction pouzzolanique et réduit la réaction RAS [39]. Les formateurs, stabilisants, modificateurs régulent la dissolution du verre dans l'environnement alcalin pendant l'hydratation du ciment. (Voir tableau I.6).

	SL	LMP	FNL	CR
<i>Glass formers</i>				
SiO ₂ + Al ₂ O ₃	72.46	70.73	59.13	58.66
<i>Glass stabilizers</i>				
CaO + MgO	12.77	8.11	4.42	0.41
<i>Glass modifiers</i>				
Na ₂ O _{eq} + PbO	≈13.90	19.34	31.31	36.38

Avec SL : Sodocalciques, LMP : Lampes fluorescentes, FNL : tube cathodique et CR : Cristaux.

Tableau I- 5: Formateurs, stabilisateurs et modificateurs de différents type de verre (% de poids)[38]

Cette recherche nous pousse à surveiller de près les oxydes qui causent les réactions alcali-silices. Nous pouvons conclure qu'une teneur élevée en modificateurs de verre ainsi qu'une faible quantité des formateurs de verre et de stabilisants favorise la réaction alcali-silice. Par conséquent, une teneur élevée en stabilisants de verre avec une légère réduction des modificateurs de verre favorise la réaction pouzzolanique tout en réduisant fortement la formation des produits expansifs.

Une autre recherche a été faite sur l'effet du temps de broyage des particules de la poudre du verre. L'effet du temps de broyage des particules de la poudre du verre sur la résistance mécanique du matériau, a résulté que 90min est le temps optimal du broyage des particules du verre [40]. Or 0-3µm est la taille maximum de la poudre du verre qui a un effet positif sur l'indice d'activité à jeune âge. Quant à 3-10 µm contribue plus sur les propriétés mécaniques à long terme (réaction pouzzolanique).

En 2017, la recherche commence à se développer sur les bétons à haute teneur en poudre du verre. [19] . D'autres recherches mettent l'accent sur l'étude des propriétés mécaniques du béton ou mortier à base des déchets de verre [41]. Les résultats trouvés encouragent l'utilisation du verre comme substituant dans les matériaux de construction. Actuellement, la recherche scientifique commence à mettre de la lumière sur l'étude des propriétés thermiques du béton/mortier, à savoir qu'un matériau avec des propriétés thermiques performantes (faible conductivité thermique) est un matériau qui consomme peu d'énergie dans le secteur de bâtiment.

I.5 Généralités sur le ciment Portland :

Le clinker portland est un mélange des roches de calcaires dures et d'autres silico-alumineuses. Il est obtenu par la cuisson du mélange de calcaire et d'argile. Le processus de cuisson permet de transmettre une quantité de chaleur qui assure la qualité désirée de la matière cuite et ce en vue de fabriquer des ciments hydrauliques suivant les spécifications des normes.

I.5.1 Mécanisme d'hydratation du ciment Portland :

Les ciments courants contenant du clinker Portland assurent la fonction liante, grâce à laquelle le béton passe de l'état initial de fluide moulable à l'état final solide et mécaniquement résistant. Il est constitué d'au moins deux tiers, en masse, de silicates de calcium di et tricalciques (Norme NF P15-301). Les caractéristiques de la pâte de ciment durci impactent progressivement les propriétés mécaniques du béton[43]. Il est donc primordial de comprendre la structure de la pâte de ciment hydraté. La prise du ciment est un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide à l'état solide. La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment C3S, C2S, C3A, et C4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau.

I.5.1.1. Hydratation des silicates :

Les silicates tricalciques (C3S) et les silicates bicalciques (C2S) se dissolvent au contact de l'eau, sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. La cinétique d'hydratation du C2S est plus lente par rapport au C3S, ainsi la quantité de Portlandite formée est plus faible.

Les C-S-H sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable. L'enchevêtrement du gel C-S-H donne sa solidité au ciment : les C-S-H se développent à la surface des grains de ciment non hydratés et combler progressivement les interstices capillaires entre les grains. Au bout de quelques heures, la couche d'hydrates qui enrobe les grains de ciment devient assez épaisse pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau vers les composants anhydres du système. L'hydratation ralentit de plus en plus, mais peut se poursuivre pendant des mois voir des années.

I.5.1.2. Hydratation des aluminates :

L'aluminat tricalcique C3A est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. Les cimentiers ajoutent du gypse au clinker afin de retarder l'hydratation des aluminates et contrôler ces réactions.

Les réactions avec les aluminates s'effectuent en plusieurs étapes :

- Formation d'ettringite :

Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite TSA (trisulfoaluminate de calcium hydraté) : Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

- Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté :

Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AFm) : $((\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{CaSO}_4), 12\text{H}_2\text{O})$.

- Hydratation des aluminates résiduels : Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfo-aluminate. Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminat (C_3A) et l'aluminoferrite (C_4AF) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du C_3A , l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé.

I.5.2 Phases d'hydratation du ciment Portland :

L'hydratation du ciment portland se fait suivant la réaction des quatre phases minérales qui le composent. La cinétique globale de l'hydratation est contrôlée principalement par le C3S. Il existe cependant une synergie entre ces différentes réactions.

Les réactions d'hydratation s'écrivent par les équations suivantes :



La figure I.4 présente la courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment. Cette courbe représente l'évolution de la chaleur dégagée par le ciment au cours du temps lorsqu'il est mélangé avec de l'eau. Elle est obtenue en mesurant la chaleur dégagée par le ciment à intervalles réguliers de temps à une température constante 25°C. La courbe peut être découpée en quatre périodes :

Période 1 : réactions initiales

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C3S et le C3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables).

Période 2 : période dormante

Le dégagement de chaleur est faible. Aucune évolution de la pâte ne semble se produire. Les réactions chimiques ont pourtant commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase (ions calcium, silicates, hydroxydes et sulfates). Quand l'eau de gâchage est saturée en ions, le début de la prise se produit. Le pH de la solution augmente, ce qui ralentit la dissolution des constituants.

Période 3 : période d'accélération

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et créent donc un solide.

Période 4 : période de ralentissement

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel. La chaleur dégagée diminue. Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. C'est pendant cette période que l'ettringite de type AFt se dissout afin de se transformer en type AFm. Les mécanismes complexes à l'origine de la création des différents produits de l'hydratation que sont les silicates et les aluminates sont l'adsorption, l'hydrolyse, la dissolution, la solvation et la cristallisation.

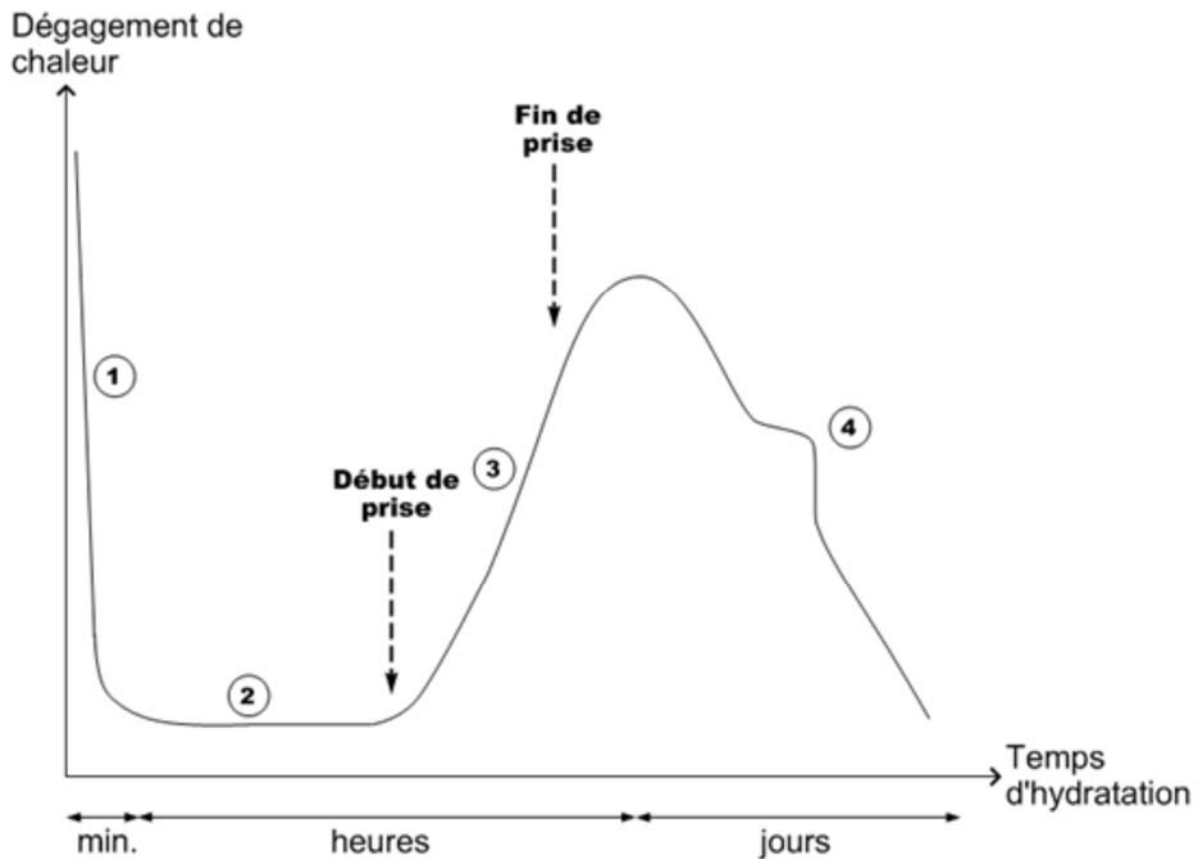


Figure I- 4: Diagramme du mécanisme d'hydratation du ciment Portland

I.5.3 Réactions d'hydratation du ciment :

La prise du ciment présente un ensemble de réactions chimiques d'hydratation qui permettent le passage de la pâte de ciment de l'état liquide à l'état solide. La pâte de ciment hydraté indique les résultats de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment (C3S, C2S, C3A et C4AF). Ces derniers réagissent pour former de nouveaux liens composés qui entraîne la prise et le durcissement du matériau. L'étude des réactions d'hydratation du ciment sont présentés dans le tableau I-5.

$2(3\text{CaO}.\text{SiO}_2)$ Silicates tricalcique	$+6\text{H}_2\text{O}$ eau	$=3\text{CaO}.\text{SiO}_2.8\text{H}_2\text{O}$ Silicates de calcium hydrates	$+3(\text{CaO}.\text{H}_2\text{O})$ Hydroxyde de calcium
$2(2\text{CaO}.\text{SiO}_2)$ Silicates bicalciques	$+4\text{H}_2\text{O}$ eau	$=3\text{CaO}.\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$ Silicates de calcium hydrates	$+\text{CaO}.\text{H}_2\text{O}$ Hydroxyde de calcium
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminates tricalcique	$+3(\text{CaO}.\text{SO}_3.2\text{H}_2\text{O})$ gypse	$+26\text{H}_2\text{O}$ eau	$=6\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{SO}_3.32\text{H}_2\text{O}$ ettringite
$2(3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3)$ Aluminates tricalcique	$+6\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{SO}_3.32\text{H}_2\text{O}$ ettringite	$+4\text{H}_2\text{O}$ eau	$=3(4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SO}_3.13\text{H}_2\text{O})$ Monosulfoaluminate de calcium
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminates tricalciques	$+\text{CaO}.\text{H}_2\text{O}$ Hydroxyde de calcium	$+12\text{H}_2\text{O}$ eau	$=4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.12\text{H}_2\text{O}$ Aluminate tetracalcique hydraté
$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ Aluminoferrite tetracalcique	$+10\text{H}_2\text{O}$ eau	$+2(\text{CaO}.\text{H}_2\text{O})$ Hydroxyde de calcium	$6\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3.12\text{H}_2\text{O}$ Aluminoferrite de calcium hydraté

Tableau I- 6: Réactions d'hydratation des composés du ciment portland [44].

I.6 Facteurs qui influencent l'hydratation du ciment portland :

Le processus d'hydratation du ciment est un phénomène complexe et de nombreux facteurs peuvent l'influencer :

I.6.1 : Composition chimique du clinker :

Le clinker est un facteur qui conditionne l'hydratation du ciment, car les différentes phases ne réagissent pas à la même vitesse. Malgré la présence du gypse, l'hydratation de C3A reste rapide et très exothermique. Concernant l'influence du gypse, il en existe une quantité optimale pour qu'à la fin de la conversion de l'ettringite en monosulfoaluminate, il ne reste quasiment plus de C3A anhydre. Ceci est bénéfique pour la durabilité du béton, puisque le C3A représente un effet néfaste vis-à-vis des attaques sulfatiques. D'autre part, la cinétique d'hydratation de C2S est 10 fois plus lente que celle de C3S. Par conséquent, un ciment sera d'autant plus réactif qu'il se compose davantage de C3S.

I.6.2 : Finesse du ciment :

À quantité d'eau égale, plus la distribution des tailles de grains est fine et homogène, plus l'hydratation est rapide, et plus la chaleur d'hydratation dégagée est importante. Cependant, l'influence de la finesse sera moins marquée si le rapport Eau/Ciment (E/C) est faible.

I.6.3 : Rapport (E/C) :

L'eau de gâchage fournit un milieu à la fois de dissolution et de dispersion des grains de clinker et surtout une source d'eau pour les réactions chimiques. Elle exerce aussi une influence sur la taille des hydrates. Plus E/C est petit, plus le dégagement de chaleur au sein du matériau à jeune âge est violent, d'une part, puisque les réactions chimiques ont un avancement plus élevé et, d'autre part, car il est bien connu que l'eau a une capacité thermique plus faible que les autres constituants des matériaux.

I.6.4 : Influence de la température :

La température est un facteur important qui peut affecter l'hydratation sur plusieurs aspects. Compte tenu du caractère thermoactif de l'hydratation, la température peut accélérer ou retarder les réactions entre l'eau et le ciment. En général, une température élevée peut accélérer la vitesse d'hydratation du ciment au jeune âge. À l'inverse, une réduction de température diminue la cinétique d'hydratation. Les réactions peuvent même s'arrêter si la température descend à moins de -10°C. L'hydratation à température élevée peut conduire à une précipitation compacte et violente d'hydrates. Les C-S-H formés sont plus denses, mais moins homogènes. Pour un même rapport E/C et à un degré d'hydratation identique, la formation des C-S-H plus denses et la réduction de la fraction d'ettringite (dont le volume molaire est très important) ont pour conséquence un remplissage de la porosité capillaire moins efficace. Il s'ensuit à court terme, une résistance de la pâte qui se développe plus rapidement en raison d'une cinétique d'hydratation plus

activée et de la formation de C-S-H plus denses. Cependant, à long terme, la résistance finale est réduite en raison d'une porosité capillaire plus grande et d'une microstructure plus hétérogène.

I.7 La poudre de verre dans les bétons et mortiers :

La poudre de verre est un ajout cimentaire alternatif. Elle est caractérisée par sa forte teneur en silice amorphe (SiO_2) qui résulte à des propriétés pouzzolaniques intéressantes. La poudre de verre se réagit avec la chaux pour produire d'autres hydrates secondaires. Plusieurs recherches ont été l'objet de cette problématique de l'utilisation de la poudre de verre dans le béton et/ou mortier [45]. Les propriétés mécaniques, à jeune âge et la durabilité des matériaux à base de la poudre de verre sont présentées dans les paragraphes suivants.

I.7.1 Propriétés à jeune âge :

L'effet de la poudre de verre sur l'ouvrabilité des bétons et mortiers frais dépend de plusieurs facteurs. Nous en citons :

- La finesse de la poudre de verre
- Le rapport Eau/liant (E/L)
- L'absorption quasi nulle de la poudre de verre
- Le pourcentage d'incorporation de la poudre de verre

I.7.1.1 La finesse de la poudre de verre :

Il s'avère qu'une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable. L'effet de la taille des particules de la poudre de verre sur la résistance mécanique a été étudié dans cette recherche [30]. La figure ci-dessous (I.5) montre que plus la poudre de verre est fine, nous optons plus à avoir un matériau mécaniquement résistant [46].

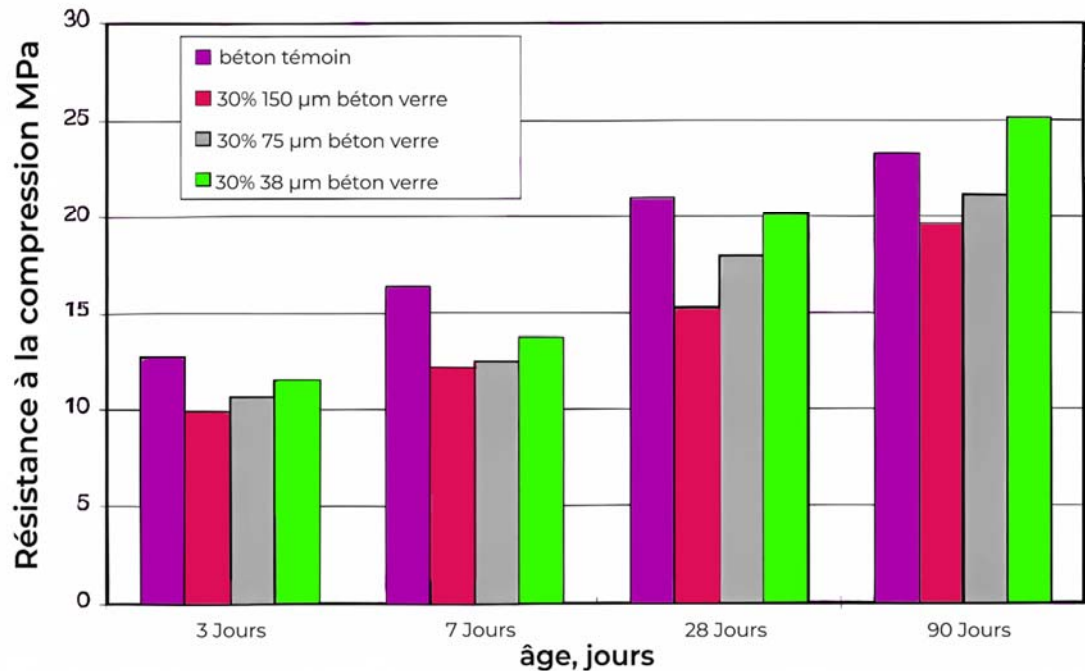


Figure I- 5: Résistance à la compression du béton contenant 30 % de poudre de verre compare au béton de référence[30].

I.7.1.2 Le rapport eau/liant (E/L)

L'eau de gâchage fournit un milieu de dissolution et une source d'eau pour formation des hydrates par les réactions chimiques. Plus le rapport E/L est petit, les réactions chimiques seront moins avancer. En outre, l'ajout des super plastifiants pourrait impacter le rapport E/L. Cependant, les dimensions des pores dépendront également de ce facteur en plus des autres paramètres décrites dessus.

I.7.1.3 L'absorption quasi nulle de la poudre de verre

La poudre de verre est un matériau amorphe riche en silice (SiO_2). Les particules de poudre de verre se caractérisent par leur faible teneur d'absorption d'eau, en complément d'autres matériaux cimentaires tel que les cendres volantes. Ce facteur constitue aussi un paramètre de diminution du dosage de ces matrices [47].

I.7.1.4 Le pourcentage d'incorporation de la poudre de verre

La différence des pourcentages d'incorporation dépendront des facteurs impactant principalement les propriétés mécaniques à jeune âge ainsi qu'au long terme [48], [49].

L'étude des propriétés thermiques aura également son impact sur le choix des taux d'ajout de la poudre de verre. Le paragraphe suivant décrit les différents comportements de la résistance mécanique en fonction des pourcentages d'incorporation de la poudre de verre.

I.7.2 Durabilité des bétons- réaction pouzzolanique/ réaction Alkali-silice :

Le problème majeur qui peut être créé lors de l'incorporation de la poudre de verre dans la matrice ciment est la réaction alcali- Silice RAS. Lors de cette réaction chimique appelée autrement par le "Cancer du béton", les ions Na^+ et K^+ attaquent la silice du verre pour former un gel. La formation des fissures est donc causée par la pression générée par le gel qui peut engendrer une expansion du béton. Cette réaction chimique diminue les performances mécaniques du béton (figure I-6).

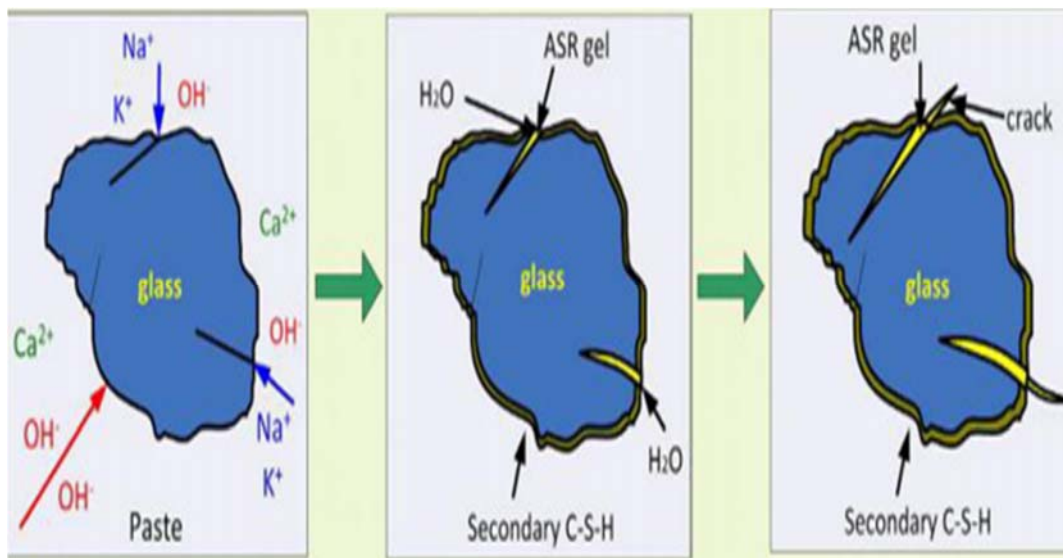


Figure I- 6: Description du phénomène des réactions alcali-silice

L'avantage de la poudre de verre est qu'il présente une réaction favorable appelée pouzzolanique. Cette réaction est provoquée par la grande quantité de la silice en plus de la finesse des grains de poudre de verre. La figure I-7 représente les matériaux source de géopolymère ternaire $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$. Le verre est synthétisé à partir de précurseurs aluminosilicates et de sources de calcium important. De nombreuses recherches ont démontrées que les propriétés pouzzolaniques du verre augmentent avec la diminution de la taille des particules de verre [28]. Une étude a montré que les

particules fines du verre favorisent une réaction pouzzolanique rapide par rapport à une réaction RAS plus lente [37].

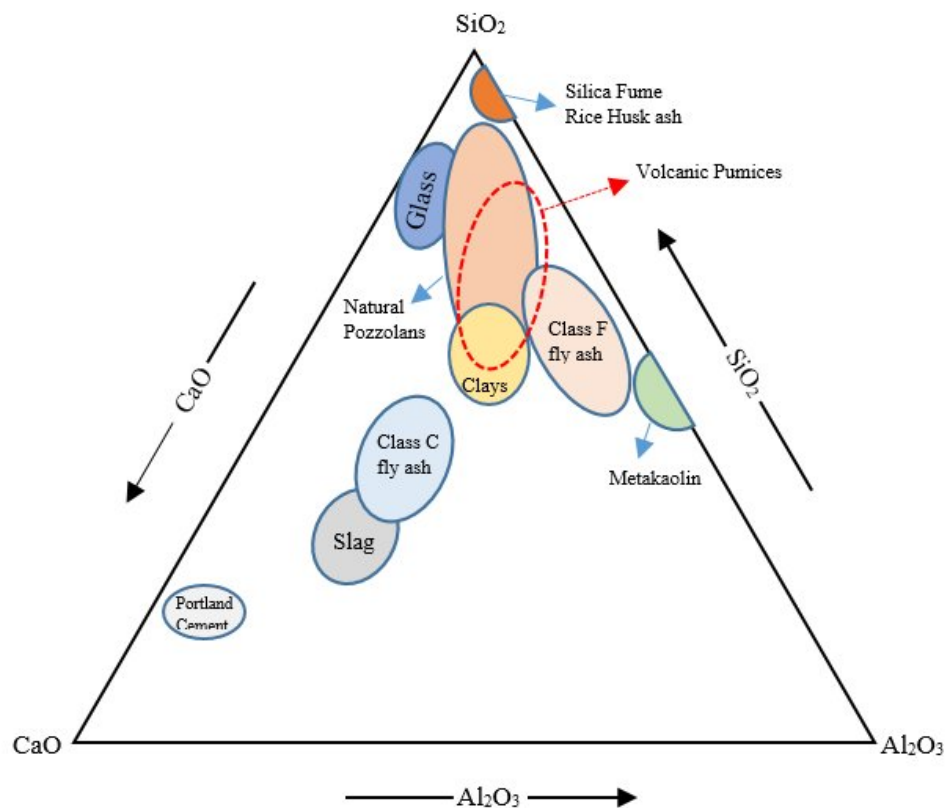


Figure I- 7: Les matériaux source de géopolymère ternaire Al_2O_3 - CaO - SiO_2 [50]

Réaction pouzzolanique : $CaO + SiO_2 + H_2O \rightarrow C-S-H$ [I.3]

I.8 Propriétés mécaniques du béton incorporé en poudre de verre :

Les propriétés mécaniques du béton à base de poudre de verre ont été étudiées dans plusieurs études bibliographiques jusqu'à un pourcentage de 60 % [19] [40] [41]. La figure I-8 montre une variation de l'évolution du comportement mécanique. Cette variation dépend principalement de plusieurs paramètres :

- Méthode de confection
- Formulation du béton à base de la poudre de verre
- Granulométrie des agrégats de verre
- Type de ciment portland

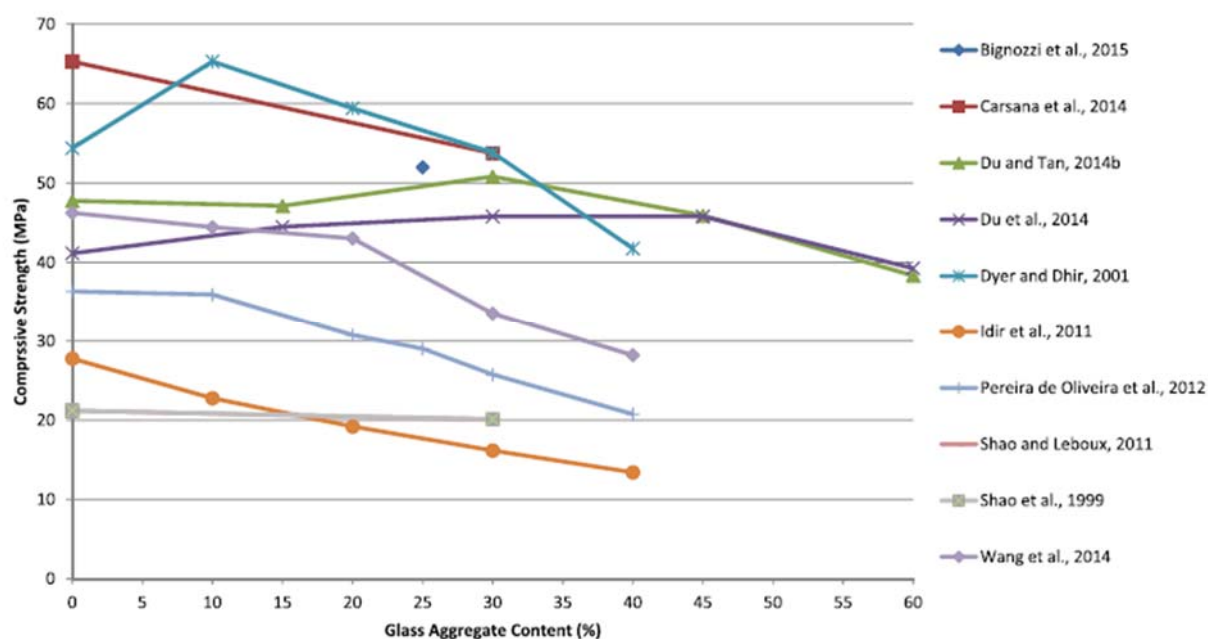


Figure I- 8: Comparaison des études de propriétés mécaniques du béton substitué en poudre de verre (0 % à 60 %)

I.8.1 Influence de la poudre de verre sur les propriétés mécaniques du mortier :

La poudre de verre tel que d'autres ajouts minéraux (cendres volantes, fumée de silice) est un liant hydraulique sans clinker. Dans ce paragraphe, nous allons étudier l'influence de la poudre de verre sur la quantité optimale de l'eau, le temps de prise, la microstructure ainsi que la résistance mécanique du mortier.

La poudre de verre présente un rôle important dans la diminution de la porosité interstitielle des granulats et le remplacement de la fraction non hydratée du ciment dans les interstices.

I.8.1.1 Quantité d'eau optimale :

En remplaçant une partie du ciment par des microbilles de verre de granulométrie moyenne, un liant hydraulique nécessite une certaine quantité d'eau optimale, pour que la pâte soit de bonne consistance ou que la prise soit faite dans les bonnes conditions. Les résultats trouvés dans le tableau I-7 suivant présentent les quantités d'eau optimale pour chaque pourcentage de substitution des microbilles de verre. Le liant hydraulique (ciment+ microbille de verre) demande donc une constante quantité d'eau pour assurer une bonne consistance.

	M0	M5	M10	M15	M20	M25	M30	M35
Eau (%)	33.0	31.4	30.8	30.0	29.0	28.0	28.0	28.0

Le pourcentage % est par rapport à la masse totale du liant (ciment microbilles de verre)

Tableau I- 7: Quantité d'eau optimale pour chaque mélange en poudre de verre [51].

I.8.1.2 Temps de prise :

L'évaluation du temps de prise se fait à l'aide de la méthode de Vicat, qui permet d'enfoncer une aiguille normalisée à partir du sommet de l'échantillon (40mm). Les résultats présentés dans la figure ci-dessous (I-9) montrent une légère variation pour les premiers instants ($t < 70$ min). Un changement remarquable est analysé à partir de 135 ± 10 min. La présence des microbilles de verre à 5 % et 10 % retarde le temps de fin de prise de 30 min par rapport au temps de fin de prise du ciment ordinaire. Nous pouvons donc constater un effet retardateur de prise pour les faibles substitutions. Le temps de prise est réduit pour les concentrations des microbilles de verre à partir de 15 %.

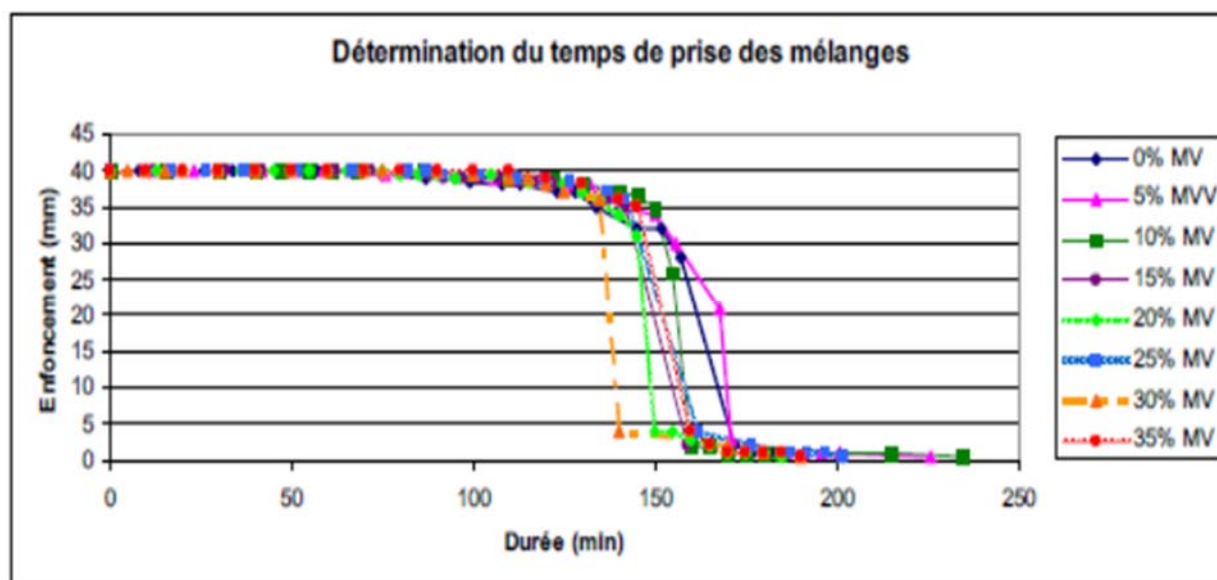


Figure I- 9 : Mesure de temps de prise à l'aide de la méthode de Vicat [51].

I.8.1.3 Microstructure :

Les microbilles de verre semblent n'y avoir ni cohérence, ni réaction entre les billes et les constituants du mortier à l'âge de 28 jours. Contrairement, les microbilles de verre semblent créer des nouveaux liens sur la surface des particules à l'âge d'un an. La figure I-10 montrent clairement que des réactions chimiques se créent avec des produits d'hydratation de ciment. Au-delà de 90 jours, nous pouvons commencer à atteindre les réactions pouzzolaniques qui se produisent.

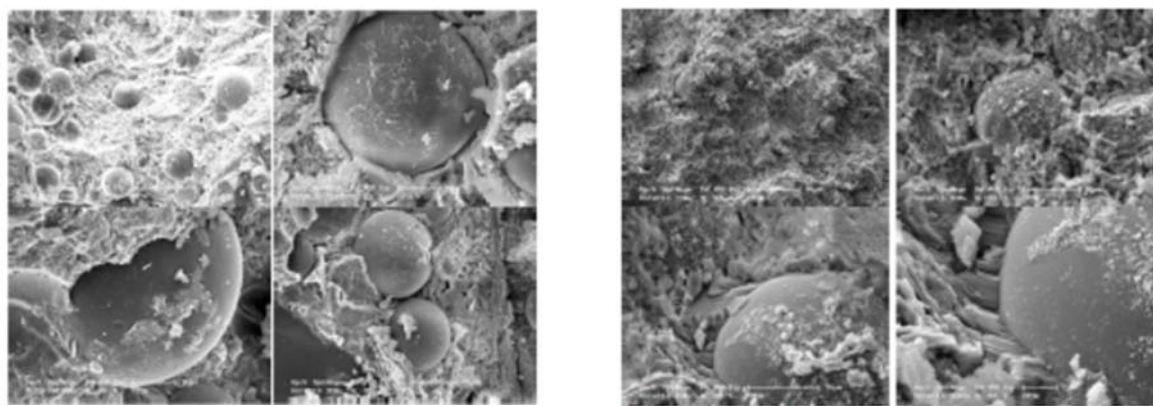


Figure I- 10: Microscope électronique à balayage des microbilles de verre dans le mortier à 28 jours et 1 an respectivement

I.8.1.4 Résistance mécanique :

Les mesures des résistances mécaniques des échantillons de mortier substitué par des microbilles de verre sphériques peuvent confirmer les résultats trouvés de la microstructure. Les résultats dessous (tableau I-8) indiquent une diminution des propriétés mécaniques à jeune âge (entre 3 et 7 jours). La résistance mécanique décroît proportionnellement en fonction des pourcentages d'ajout des microbilles de verre. Contrairement, à 28 jours, la résistance mécanique du mortier témoin s'approche de celle des mortiers mélangés. Nous pouvons donc considérer que les microbilles de verre jouent un rôle d'ajout minéral tel que les cendres volantes, qui est une source potentiel pour l'économie de ciment.

Mélange	3jours R ₃ MPa	IA (%)	7 jours R ₇ (MPa)	IA (%)	14 jours R ₁₄ (MPa	IA (%)	28 jours R ₂₈ (MPa)	IA (%)
M0	36.6		36.5		48.1		52.7	
M15	27.4	74.7	36.5	100	43.6	90.7	46.1	87.4

M20	27.7	75.6	32.2	88.0	40.2	83.6	43.8	83.2
M25	25.2	68.9	28.6	78.3	34.2	71.1	40.3	76.4

Tableau I- 8: Étude bibliographique des résistances à la compression et leur indice d'activité (IA) du béton et mortier substitué en poudre de verre à jours [30].

I.8.2 Réactions pouzzolaniques :

Ce paragraphe décrit les deux méthodes d'analyse des réactions pouzzolaniques.

I.8.2.1 Méthode d'analyse indirecte :

Une étude a été menée dans le but de mesurer les propriétés mécaniques des différents types de verre afin de surveiller leurs comportements pouzzolaniques (figure I.11). Les résultats des tests mécaniques montrent que le verre de tube cathodique (FNL) et le sodocalcique (SL) présentent principalement un comportement pouzzolanique alors que le verre crystal (CR) a une activité moindre. Les valeurs de la résistance à la compression du verre FNL et SD approchent à celle du ciment portland de type CEMI après 60 jours. Cependant, la résistance à la compression la plus faible est celle du verre crystal (CR) et les lampes fluorescentes (LMP).

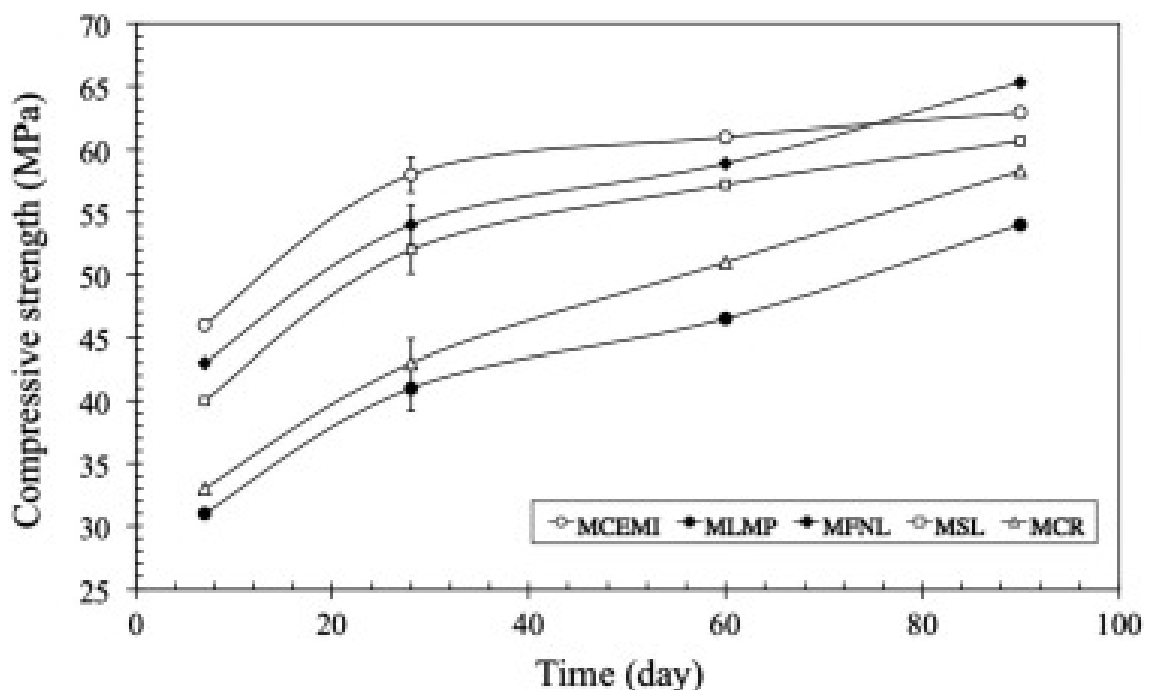


Figure I- 11 : Effet de la composition chimique du verre en poudre sur la résistance à la compression[38].

I.8.2.2 Méthode d'analyse directe :

Cette méthode permet de quantifier la portlandite encore présente dans la matrice cimentaire.

La figure I-12 montre la quantité de portlandite présentée dans le béton substitué par différent type de poudre de verre. Le tableau I-9 montre l'indice d'activité de ces bétons. Selon les résultats de ces recherches, le type de verre crystal représente une faible indice d'activité entre 87 et 90 jours, ceci présume une forte expansion et par la suite, une formation des gels expansifs. Le verre sodocalciques (SL) présente un indice d'activité élevé à 90 jours avec une faible expansion ce qui montre la présence du comportement pouzzolanique. Le type de verre tube cathodique (FNL) présente une teneur en portlandite de 15 % à 28 jours, la portlandite réagit avec la chaux, ce qui montre aussi le comportement pouzzolanique. En outre, le type de verre des lampes fluorescentes (LMP) présente une faible valeur d'indice d'activité ainsi qu'une faible expansion. Nous pouvons conclure que la portlandite peut également être impliquée dans la RAS, ce qui veut dire que la diminution de la portlandite ne peut pas être directement liée à la réaction pouzzolanique.

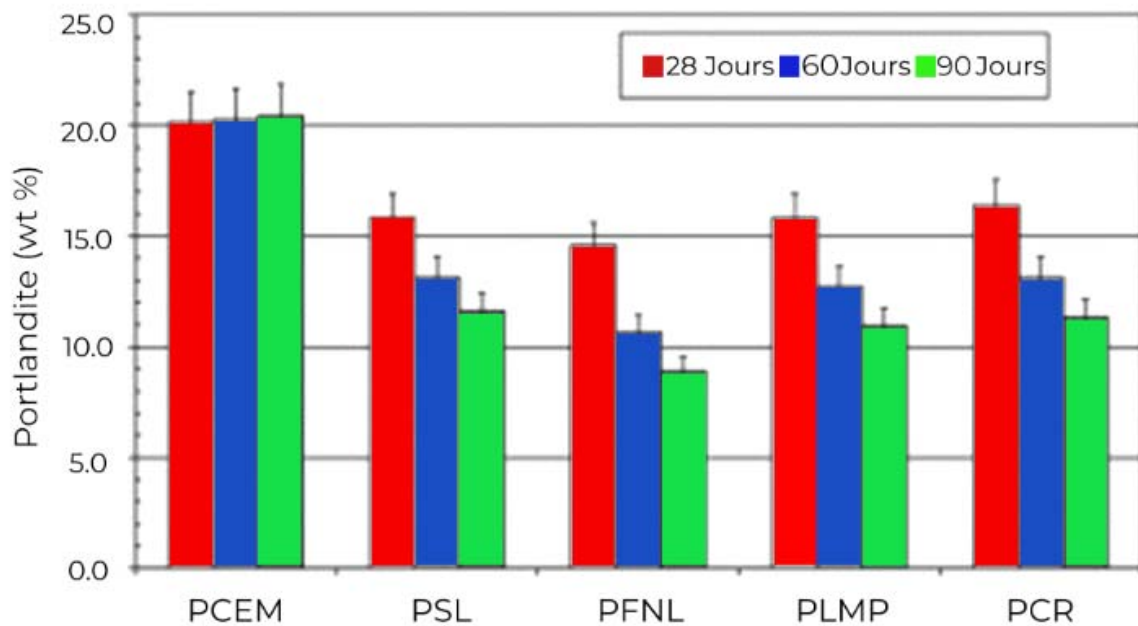


Figure I- 12: La quantité de portlandite présentée dans le béton substitué par différent type de poudre de verre[38].

	Activity index	
	28 days	90 days
MSL	88	94
MFNL	93	106
MLMP	68	84
MCR	73	87
Limits set by EN 450-1	≥75	≥85

Tableau I- 9: L'indice d'activité des bétons substitués par différent type de poudre de verre[38].

I. 9. Généralités sur le transfert de chaleur :

I.9.1- Modes de transfert de chaleur :

La conductivité thermique est définie comme la quantité de chaleur transférée par unité de surface isotherme dans une unité de temps et sous un gradient de température unitaire. Cette conductivité peut être étudiée en régime permanent ou transitoire. Dans un régime permanent, la température est constante et la loi de Fourier est utilisée pour décrire la conduction.

$$\vec{\varphi} = -\lambda \nabla T \quad [I.4]$$

où :

$\vec{\varphi}$ (W/m²) est la densité de flux thermique

λ (W/m.K) est la conductivité thermique du matériau

∇T (K/m) est le gradient de température

L'équation de la loi de Fourier pour la conduction de la chaleur peut être exprimée sous forme vectorielle et écrite dans différents systèmes de coordonnées selon la géométrie de surface considérée (cartésiennes, cylindriques ou sphériques). Pour notre étude, nous nous intéressons aux murs de bâtiments qui ont une surface plane et une épaisseur limitée, nous avons donc retenu d'utiliser le système de coordonnées cartésiennes. Dans ce système, l'équation de la loi de Fourier peut être écrite sous la forme suivante :

La loi de Fourier peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\vec{\phi}(x,y,z,t) = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T(x,y,z,t) \quad [I.5]$$

Cette équation relie le flux de chaleur, représenté par le vecteur $\vec{\phi}$, à la variation de la température, représentée par le gradient de la température λT .

Dans un système en régime transitoire, les propriétés thermiques du matériau peuvent varier au cours du temps en raison des changements de température. Par conséquent, la conductivité thermique, la densité et la capacité thermique spécifique du matériau peuvent varier, ce qui affecte la manière dont la chaleur est transférée à travers le matériau.

L'équation de transfert de chaleur décrit la manière dont la chaleur est transférée à travers le matériau en fonction de la conductivité thermique, de la densité et de la capacité thermique spécifique du matériau, ainsi que de la température et du temps. Elle est donc un outil important pour analyser le comportement des systèmes thermiques en régime transitoire, et est utilisée dans de nombreuses applications, notamment en ingénierie thermique pour concevoir et optimiser des systèmes de refroidissement ou de chauffage.

$$\lambda \Delta T + P = \rho c_m \frac{\partial T}{\partial t} \quad [I.6]$$

où :

ρ (kg/m³) : la masse volumique du solide ;

c_m (J/kg.K) : la capacité thermique massique du matériau

Le transfert de chaleur par convection est un autre mode de transfert de chaleur, où l'écoulement d'un fluide chaud se déplace le long d'une surface froide ou entre une surface solide et la couche limite d'un fluide en mouvement. Ce phénomène est souvent caractérisé par une différence de masse volumique entre le fluide froid et le fluide chaud, et le gradient de température peut être influencé par des facteurs externes tels que la ventilation ou la pompe. La convection de chaleur peut être forcée lorsque des forces extérieures sont appliquées au fluide.

$$\phi = (T_1 - T_2) \quad [I.7]$$

avec :

ϕ : le flux en Watt (W) ;

S : la surface du corps en contact avec le fluide en (m²) ;

h : le coefficient de NEWTON en (W/m^2K) .

Le transfert de chaleur par rayonnement thermique est un phénomène où un corps chauffé émet des radiations de longueurs d'onde spécifiques, qui dépendent de la température du corps.

La compréhension de ces différents modes de transfert de chaleur est essentielle pour comprendre le comportement thermique des matériaux. Les paramètres tels que la conductivité thermique, la diffusivité thermique et le coefficient d'échange par convection sont importants pour étudier le transfert de chaleur. Ces paramètres sont souvent étudiés expérimentalement pour améliorer les performances thermiques des matériaux dans des applications spécifiques.

I.9.2- Transfert thermique dans un milieu poreux :

Dans le domaine de construction, les matériaux utilisés sont souvent des milieux poreux constitués des trois phases : solide, liquide et gazeuse. La phase solide des matériaux de construction représente principalement le squelette de la structure, la phase liquide est présentée sous forme d'eau libre et adsorbée et la phase gazeuse représente l'air humide du matériau lors du changement de phase liquide-gazeuse. Nous déduisons que le transfert de la chaleur thermique englobe tous les phénomènes cités dans le paragraphe précédents. Le mode de conduction thermique se produit principalement dans les pores et le squelette solide du matériau. Dans le cas d'un matériau poreux sec, la conductivité de la phase gazeuse est souvent négligeable. La convection se produit entre deux fluides et donc dans les pores occupés par le liquide. Tout de même, elle est considérée négligeable dans le domaine des matériaux poreux en raison de l'échelle microscopique des pores. À température ambiante et pression atmosphérique, le diamètre des pores qui tient en compte le mode de convection est d'environ 10mm [52]. La radiation devient importante à des températures élevées et des diamètres de pores supérieurs à 100microns [53].

I.9.3 Propriétés thermo-physiques des matériaux solides hétérogènes :

I.9.3.1 Inertie thermique :

L'inertie thermique indique la proportion d'un matériau à garder longtemps sa température lors d'une perturbation de l'équilibre thermique. Le matériau est dit inertie, s'il atteint lentement son équilibre. Le matériau est dite peu inerte, s'il atteint son équilibre au bout d'un temps bref. Ce

temps caractéristique dépend de l'inertie du matériau mais dépend aussi de l'écart des températures d'équilibre. Généralement, plus le matériau est dense, plus il est inerte.

L'équation de l'inertie thermique est une équation fondamentale qui décrit comment la température d'un matériau varie en réponse à une variation de la chaleur. Elle prend en compte les propriétés thermiques du matériau, telles que sa masse volumique et sa capacité thermique massique, ainsi que sa conductivité thermique. En utilisant l'opérateur gradient, l'équation décrit comment la chaleur se propage à travers le matériau en fonction de la variation de température dans l'espace et dans le temps. L'équation de l'inertie thermique est largement utilisée en ingénierie pour comprendre le comportement thermique des matériaux dans diverses applications, telles que la conception de systèmes de refroidissement et de chauffage, l'analyse des transferts de chaleur dans les bâtiments et les processus industriels, ainsi que la modélisation des phénomènes thermiques dans la nature. Elle s'exprime généralement sous la forme :

$$\rho C_p (dT/dt) = \nabla \cdot k \quad [I.8]$$

où :

ρ est la masse volumique du matériau,

C_p est sa capacité thermique massique,

T est la température du matériau,

t est le temps,

∇ est l'opérateur gradient,

k est la conductivité thermique du matériau.

Cette équation indique que la variation de la température (dT/dt) à un certain endroit dans le matériau dépend de la quantité de chaleur qui y est transférée (la divergence de la conductivité thermique $\nabla \cdot k$), ainsi que des propriétés thermiques du matériau (sa masse volumique ρ et sa capacité thermique massique C_p).

I.9.3.2 Conductivité thermique :

La conductivité thermique d'un matériau est le flux de chaleur qui traverse sa paroi. Ce paramètre indique la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction. Plus la conductivité

thermique est faible, plus le matériau est résistant au transfert par conduction. Ce paramètre représente une donnée intrinsèque à chaque matériau fin de caractériser ses performances isolantes.

I.9.3.3 Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique d'un matériau est la capacité à emmagasiner la chaleur par rapport à son poids. Plus le matériau est dense, plus la chaleur spécifique est élevée.

$$Cm \left(\frac{KJ}{K} \cdot kg \right) = \frac{Cv \left(\frac{KJ}{m^3} \cdot K \right)}{\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \quad [I.9]$$

avec :

cm : La capacité thermique massique

Cv : La capacité thermique volumique

P : La masse volumique

I.9.3.4 Diffusivité thermique :

La diffusivité thermique est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un matériau. Ce paramètre fait intervenir la conductivité thermique et la capacité thermique d'un matériau. Plus la diffusivité thermique est faible, plus la vitesse de propagation de chaleur est lente.

$$D = \frac{\lambda}{\rho Cm} \quad [I.10]$$

avec :

λ : la conductivité thermique ;

cm : la capacité thermique massique à pression constante ;

ρ : la masse volumique.

I.9.3.5 Effusivité thermique :

L'effusivité thermique d'un matériau est la capacité à absorber un apport de chaleur. Elle caractérise la sensation de chaud ou de froid qu'émet un matériau. Plus l'effusivité thermique est élevée, plus le matériau absorbe rapidement de l'énergie en surface sans avoir à absorber de la

chaleur dans son intérieur. Tout comme la diffusivité thermique, l'effusivité utilise la conductivité thermique et la capacité thermique pour le calcul de son paramètre.

$$E = \sqrt{\lambda \rho C m} \quad [I.11]$$

I.9.4 Classification des pores et indices des vides :

Les pores sont des espaces vides qui influencent directement les phénomènes hydriques, mécaniques et thermiques. La classification des pores en fonction de leur taille est complexe et varie selon les auteurs et les méthodes utilisées. Toutefois, l'Union Internationale de la Chimie Pure et Appliquée propose une classification basée sur le diamètre des pores, distinguant les micropores (< 2 nm), les méso pores (2 nm à 50 nm), les macropores (50 nm à 10 µm) et les bulles d'air (> 10 µm).

La porosité est définie comme le rapport du volume des vides sur le volume total de l'échantillon. Elle peut être calculée par l'équation suivante :

$$\text{porosité (\%)} = (\text{volume des vides} / \text{volume total de l'échantillon}) \times 100 \quad [I.12]$$

L'indice des vides est un rapport entre le volume des vides et le volume des grains dans un échantillon. Il peut être calculé par la formule suivante :

$$ev = \text{Volume de vide} / \text{Volume de solide}, \quad [I.13]$$

où V_v est le volume des vides et V_s est le volume total de l'échantillon.

Les pores peuvent avoir une grande variété de formes et d'arrangements, qui affectent leur capacité à stocker des fluides ou des gaz, leur perméabilité, leur conductivité thermique et électrique, leur résistance mécanique, leur surface spécifique et leur réactivité chimique. Les pores sont présents dans une large gamme de matériaux, tels que les roches, les sols, les métaux, les polymères, les céramiques, les membranes, les catalyseurs et les matériaux biologiques. Leur caractérisation est donc essentielle pour comprendre et optimiser les propriétés et les performances de ces matériaux dans diverses applications.

Conclusion :

Le chapitre bibliographique présenté dans cette thèse fournit une synthèse complète des recherches antérieures sur les propriétés mécaniques et thermiques des mortiers et bétons. Cette synthèse permet d'avoir une vue d'ensemble des travaux de recherche existants dans ce domaine et d'identifier les contraintes de connaissances et les opportunités de recherche pour la suite du travail. Les propriétés thermiques des matériaux de construction sont d'une importance cruciale pour comprendre leur comportement dans des conditions environnementales spécifiques. Les recherches bibliographiques des propriétés thermo-physiques, hygrothermiques, minéralogiques et chimiques des matériaux de construction incorporés par les déchets de verre ont également été discutées dans ce chapitre. En outre, les paramètres clés qui influencent les propriétés des matériaux de construction, tels que les formulations, les méthodes de confection, les compositions chimiques de la poudre de verre et les réactions pouzzolaniques, ont été discutés. La synthèse des travaux existants dans ce domaine est essentielle pour la compréhension des propriétés des matériaux de construction et pour l'élaboration de nouveaux matériaux qui répondent aux exigences de performance thermique et mécanique pour les bâtiments.

CHAPITRE 2

**Méthodologie expérimentale :
Matériaux locaux, méthodes et essais**

II.1 Introduction :

Le chapitre présent décrit les différents matériaux étudiés dans le cadre de ce travail. Les matériels utilisés pour toutes les caractérisations techniques sont également présentés. Une description détaillée des méthodes de confection et de préparation des échantillons au sein du laboratoire est aussi présentée dans ce travail.

Ce chapitre présente deux grandes parties sur les matériaux étudiés dans le cadre de cette thèse.

La première partie concerne l'étude des matériaux composites binaires. La poudre de verre est incorporée par pourcentage de poids de ciment. L'étude de ces matériaux binaires est faite sur la base de plusieurs paramètres, nous en citons principalement :

- Pourcentage de substitution de la poudre de verre
- Effet du broyage de la poudre de verre
- Préparation des échantillons en fonction de la saturation en eau (Etat sec/saturé)
- Effet de la température sur les échantillons préparés

II.2 Caractérisation des matériaux solides hétérogènes :

II.2.1 Masse volumique apparente et absolue :

La masse volumique apparente est régie par la norme française européenne NF-EN 1-554. Elle est définie comme étant la masse par unité de volume apparente du corps qui est constitué par la matière du corps, ainsi que les vides qu'elle contient.

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad [II.1]$$

Où :

γ : Masse volumique apparente

M : Masse du matériau solide

V : Volume total du matériau.

La masse volumique absolue est régie par la norme NF EN 18-301. Elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière solide sans tenir compte des vides qu'elle contient.

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s} \quad [II.2]$$

Où :

γ_s : Masse volumique absolue

Ms : Masse du matériau solide

Vs : Volume total du matériau solide

II.2.2 Module de finesse :

Les sables utilisés dans le mortier et le béton présente une granulométrie telle que les particules fines ne soient ni en excès, ni en faible proportion. Le dosage en eau est déterminé suivant le module de finesse du sable. Si les grains fins sont trop dominants, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau. Si les grains des sables sont assez grossiers, la plasticité du mélange sera insuffisante et la mise en œuvre sera difficile. Le module de finesse est défini par le caractère plus ou moins fin du sable. Il correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés pour les tamis de modules de 0.08 ; 0.2, 0.4 ; 0.63 ; 1 ; 2 ; et 5.

La norme NF P-18-560 est définie pour le calcul du module de finesse. Les valeurs moyennes sont indiquées comme suivant :

$$Mf = \frac{\Sigma \text{des refus sur les tamis } 0.08; 0.2; 0.4; 0.63; 1; 2 \text{ et } 5 \text{ (en \%)}}{100} \quad [II.3]$$

Mf= 1.8-2.2 : Le sable est à majorité de particule fine

Mf= 2.2-2.8 : Le sable est préférentiel pour le mortier, béton

Mf= 2.8-3.3 : Le sable est peu grossier. La maniabilité du béton est très faible.

II.2.3 Équivalent de sable :

Le paramètre physique de l'équivalent de sable est référé par la norme NF P18 598. L'équivalent de sable évalue la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'échantillon de sable est lavé selon un processus normalisé et reposé après pendant 20 minutes. L'équivalent de sable est défini comme suivant :

$$ES = \frac{H1}{H2} \times 100 \quad [II.4]$$

Où :

ES: Équivalent de sable

H1 : Hauteur de l'éprouvette sable propre+ éléments fins

H2 : Hauteur de l'éprouvette sable propre seulement

On en déduit l'équivalent de sable selon le tableau référé de la norme NFP 18-560 :

N°	Équivalent de sable (%)	Observations
1	ESV < 65 ESP < 60	Sable argileux ; risque de retrait ou de gonflement de béton.
2	65 < ESV < 75 60 < ESP < 70	Sable légèrement argileux ; de propreté admissible.
3	75 < ESV < 85 70 < ESP < 80	Sable propre, convenant au béton à haute qualité.
4	ESV > 85 ESP > 80	Sable très propre ; absence de plasticité de béton.

Tableau II- 1: Valeurs d'équivalent de sable suivant la norme NFP 18-560.

II.3 Caractéristiques physiques des matériaux étudiés :

II.3.1 La poudre de verre :

Les déchets de verre utilisés dans le cadre de cette étude sont des bouteilles vertes transparentes de type sodocalcique, souvent utilisé pour la fabrication des bouteilles, flacons et vitrages. Le verre sodocalcique est considéré le plus disponible de l'ordre de 90% du global de la production des verres. Les bouteilles de verre ont été collectées des décharges, lavé, concassé manuellement, puis broyé sous forme d'une poudre à l'aide d'un broyeur (Voir figure II.1 et II.2). Nous notons que ce type de déchets nécessite de prévoir des précautions lors de son usage, il peut provoquer des toxicités lors de son broyage[59].

La figure II-6 représente l'analyse granulométrique des particules du verre broyé suivant la norme NF P 18-560.



Figure II- 1: Collecte, lavage des bouteilles de verre



Figure II- 2: Concassage des bouteilles de verre

Le verre concassé ont été finement broyés à l'aide d'un broyeur mécanique de type Funnel P-1 V2A jusqu'à l'obtention de la finesse désirée.

Les échantillons de la poudre de verre ainsi que le sable ont été tamisé suivant une série de tamis de différents diamètres. Les figures ci-dessous (II.3 et II.4) présentent les refus de la poudre de verre en fonction des diamètres des tamis.

L'analyse granulométrique est présentée suivant la norme NF P 18-560.



Figure II- 3 : Broyeur mécanique de type Funnel P-1 V2A

Figure II- 4: Tamisage de la poudre de verre

II.3.2 Le sable :

Le sable utilisé est un sable de concassage des régions de Rabat-Sale. Le sable a été lavé puis séché à 105 °C pendant 24h. La figure II.5 et II.6 représente l'analyse granulométrique des différents matériaux utilisés suivant la norme française NF P-18-560. Le module de finesse du sable est de 2,371 (conforme à la norme NF P-18-560) ce qui présente un sable préférentiel. L'équivalent de sable est 78%, ce qui présente un sable propre, convenant à un béton de propreté admissible.



Figure II- 5: Lavage, séchage à 105 °C et tamisage du sable

Analyse granulométrique :

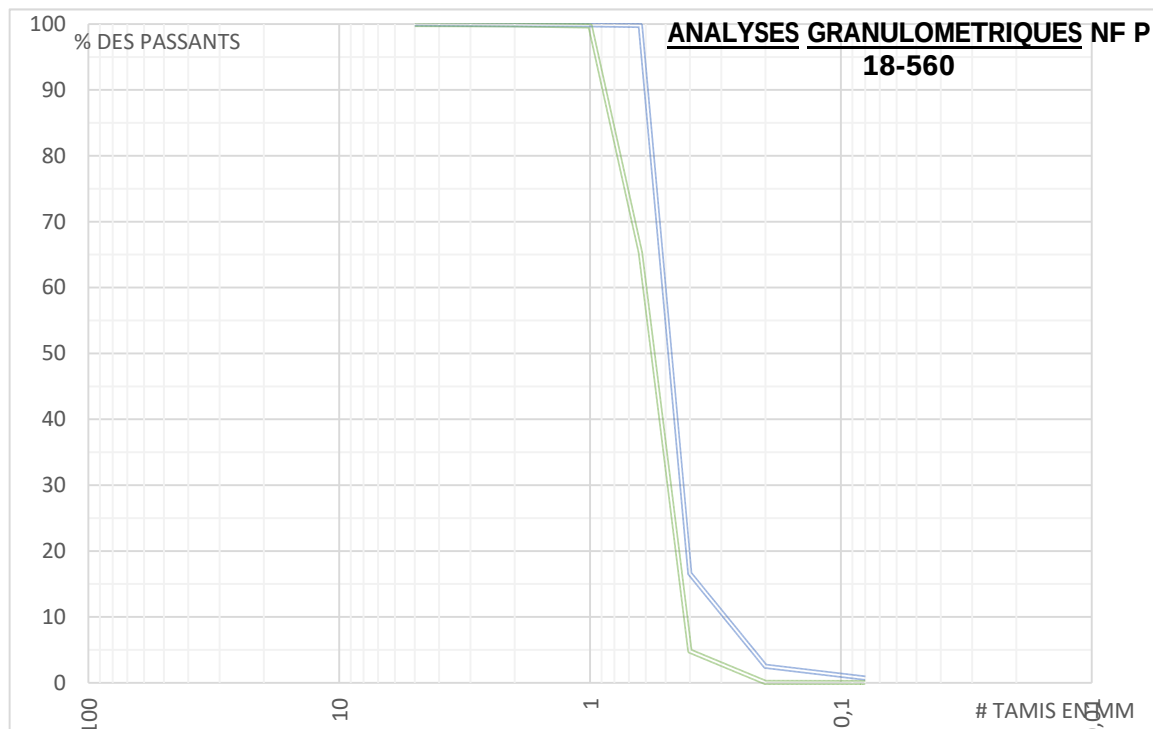


Figure II- 6: Analyse granulométrique de la poudre de verre et le sable

Le tableau ci-dessous II.2 indique les pourcentages de refus et de passants des différents diamètres de tamis.

Tamis (mm)	Passant (g)	Passant (%)	Refus (%)
0,08	2	0,71	99,29
0,2	30	2,51	97,49
0,4	268,01	16,58	83,42
0,63	1660	99,80	0,191
1	1664,9	99,94	0,051
2	1665	99,95	0,045
5	1670	100	0

Tableau II- 2: Pourcentages des passants et de refus d'un échantillonnage de la poudre de verre

II.3.3 Ciment Portland :

Le ciment portland utilisé est de classe II appelé aussi ciment portland composé. Ce type de ciment est adapté souvent pour le béton armé, ainsi pour les structures massives qui exigent une élévation de température modérée. La surface spécifique du ciment est de $3800\text{cm}^2/\text{g}$ ainsi sa masse volumique est de $3,05\text{ g/cm}^3$ ciment Portland de type CPJ 45 contient un ratio minimum de Clinker de 65 %, le reste étant constitué d'ajouts (cendres volantes et pouzzolanes). Ce type de ciment est souvent approprié pour le béton armé, ainsi que pour les structures massives qui nécessitent une élévation modérée de la température.

II.3.4 Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la confection des différents échantillons est une eau de robinet, potable. La température de l'eau utilisée pour préparer les différents échantillons est maintenue constante.

II.3.5 Terre rouge :

La terre rouge provenant de la région de Rabat-Sale a été tamisée manuellement et séchée au four à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 24 h. La figure ci-dessous II.8 présente l'analyse granulométrique de la terre rouge.

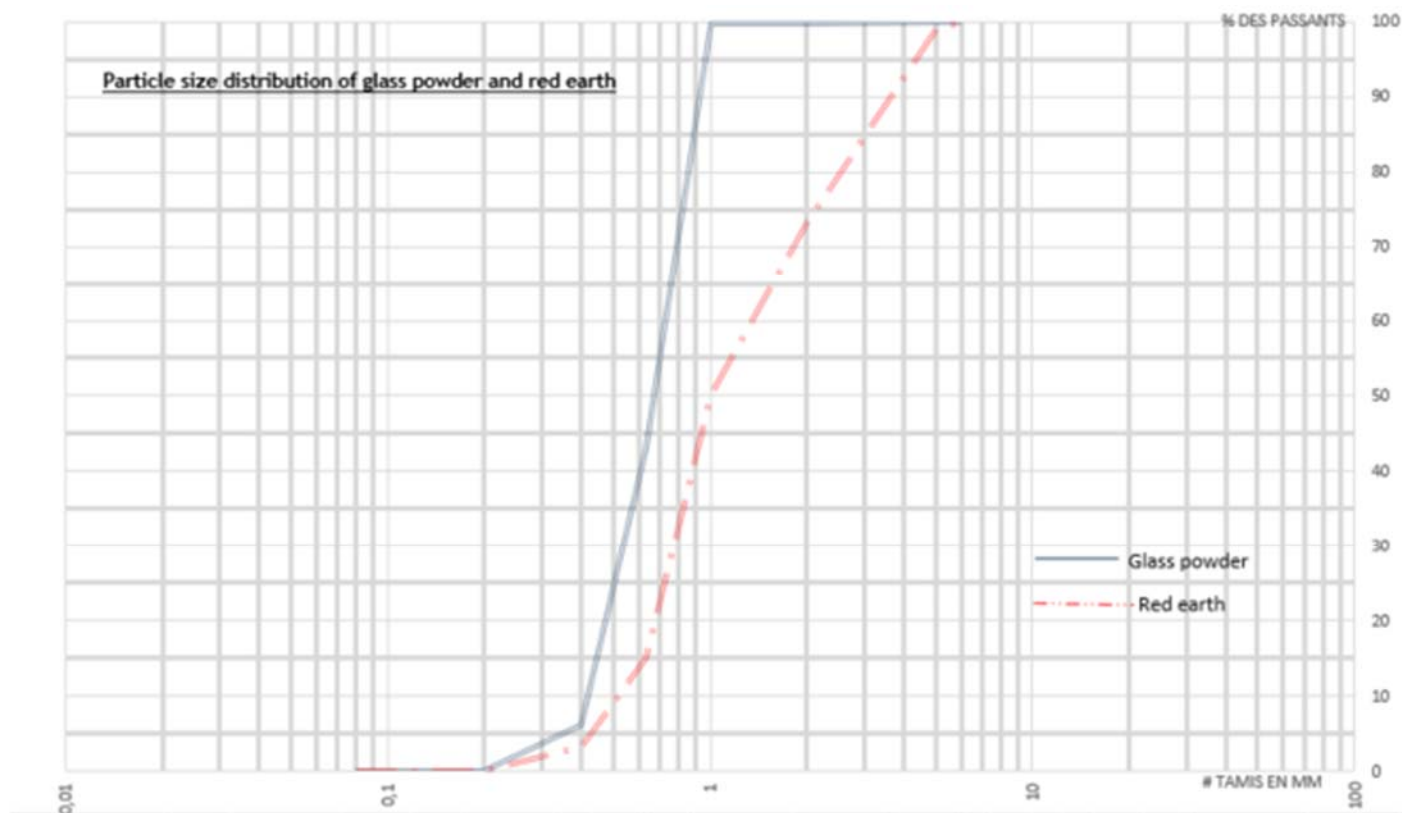


Figure II- 7: Analyse granulométrique de la poudre de verre et la terre rouge

Partie I

Méthodes de mesure des propriétés thermiques

II.5 Méthode de mesure des propriétés thermiques :

II.5.1 Mesure des propriétés thermiques :

Ce paragraphe décrit les principales méthodes de mesure des propriétés thermiques des solides utilisés dans le domaine de la recherche scientifique. Les paramètres de la conductivité thermique, la chaleur massique et la diffusivité thermique permettent de conclure d'autres propriétés thermiques comme : l'effusivité thermique, le coefficient de transmission surfacique etc. Et ce, en plus de la caractérisation physique du matériau, à savoir la masse volumique, la géométrie et l'état hygrométrique.

Il est nécessaire de citer plusieurs méthodes de mesures des propriétés thermiques. Nous pouvons classifier les méthodes suivant les deux régimes permanents et transitoires. Cette classification intervient selon l'intégration du paramètre du temps. Les méthodes de mesure des propriétés thermiques permanents sont très complexes en vue des conditions de mesure assez strictes et du long temps nécessaire afin d'assurer un gradient de température permanent traversant le matériau solide. Nous présentons par la suite les techniques de mesure les plus fréquentes dont une en régime permanent et l'autre en régime transitoire.

II.5.2 Méthode de la plaque chaude gardée :

Cette méthode permet de mesurer les propriétés thermiques des solides dans le régime permanent. Elle est la plus précise techniquement en termes de résultats. Dans cette méthode, un anneau est prévu pour empêcher les fuites de chaleur latérale des matériaux. L'échantillon à tester est placé sur la plaque chaude et l'anneau est utilisé pour empêcher les fuites de chaleur latérale des matériaux. La chaleur se diffuse à travers l'échantillon et se transfère à la plaque plus froide. Les capteurs de température sont utilisés pour mesurer la variation de température à travers l'échantillon et la plaque froide.

En utilisant cette méthode, la conductivité thermique et la diffusivité thermique du matériau peuvent être calculées avec une précision élevée dans le régime permanent, c'est-à-dire lorsque la température dans l'échantillon et sur la plaque froide sont stables. Cela permet de mesurer les propriétés thermiques des matériaux avec une grande précision

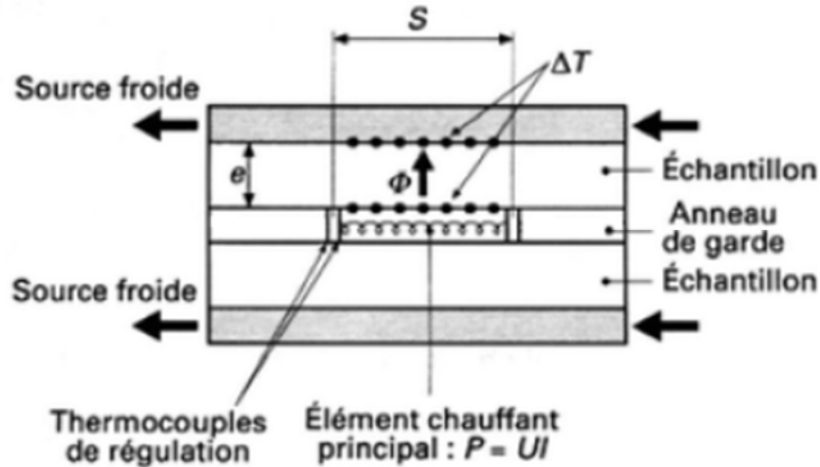


Figure II- 8: Principe de mesure par la plaque chaude gardée

II.5.3 Méthode du fil chaud :

La méthode du fil chaud, ou Hot-disk est une technique de source de plane transitoire (TPS). Le principe consiste à poser une sonde thermique entre deux échantillons. La distance limite entre la sonde et le bord de l'échantion doit être inférieure à la profondeur de propagation[52]. L'équation suivante représente la distance pour laquelle la chaleur s'est propagée durant une durée $t_{\max}$.

$$\Delta p = \beta \sqrt{d} t_{\max} \quad [\text{II.5}]$$

Dont β est une constante choisie selon l'exactitude,

d : la diffusivité thermique, $t_{\max}$ est la durée totale de la mesure expérimentale.

Cette méthode de TPS permet de mesurer la résistance de la sonde pendant l'impulsion de la chaleur.

II.6 Caractérisation technique (Test Méthodes) :

L'étude expérimentale se compose de deux parties : la première partie porte sur l'analyse chimique, morphologique et minéralogique des échantillons, et la deuxième partie comporte sur les mesures des propriétés physico thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique et effusivité thermique).

II.6.1 Diffraction des rayons X :

Les diagrammes de diffraction des rayons X sur poudres ont été recueillis à une température ambiante de 25 ° C, sur la plage d'angle 2θ de $10^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ avec un pas de $0,04^\circ$ à l'aide d'un

diffractomètre Siemens D5000 fonctionnant en configuration de Bragg avec anticathode en cuivre avec $K\alpha = 1.54056 \text{ \AA}$, ainsi qu'un détecteur à base de silice[60].

II.6.2 Microscope électronique à balayage (MEB) et spectromètre à dispersion d'énergie (EDS)

La morphologie de la poudre de verre et du ciment a été vérifiée avec JEOL IT 100 de type MEOL et afin de permettre une taille de particule allant jusqu'à 4 nm au minimum, une fine couche dorée était utile pour rendre la surface plus conductrice. Le SEM utilisé dans cette étude est associé à un spectromètre à dispersion d'énergie (E.D.S.) afin de déterminer la composition atomique des échantillons. De plus, il permet une microanalyse (qualitative, quantitative) d'échantillons de poudres et de solides.

II.6.3 Appareil de mesure de la résistance à la compression :

La méthode de mesure de la résistance mécanique d'une éprouvette est déterminée dans des conditions avant qu'elle ne soit pliée ou cassée. La charge maximale qui peut être appliquée à l'éprouvette est mesurée pour déterminer sa résistance. Les conditions expérimentales utilisées pour les essais de résistance mécanique suivent les normes établies par la norme NF EN 196-1 pour les mortiers. La méthode de mesure est effectuée à l'aide d'un équipement spécifique, une presse asservie en effort de marque 3R, qui permet de contrôler et de mesurer la force appliquée à l'éprouvette pendant l'essai.

II.6.4 Appareil de mesure de la conductivité thermique CT METER :

Les propriétés thermiques ont été mesurées par un dispositif « CT METER » standard livré par la société moderne des études électroniques(SMEE). L'appareil est constitué principalement par une sonde à anneau chaud d'épaisseur 0,2mm de dimension (60*90mm) et de rayon 10mm à placer entre deux échantillons identiques parallélépipédiques, comme indiqué dans la figure II.9. La résistance de chauffage est de $2,20 \Omega$. La puissance est de 1 W, durée de chauffage 400 s, temps de mesure 500 s. Ce dispositif CT mètre permet de mesurer à la fois la conductivité thermique ($W / (mK)$) et la chaleur spécifique (kJ / m^3K) [35][18]. L'incertitude de mesure standard est de 5 %. Cette méthode permet des mesures dans un état non- stationnaire de la température. Les dimensions de la sonde ou le capteur de choc thermique sont (Épaisseur=0,2 mm, Diamètre=30 mm, dimension 60x90 mm). Le système est équipé d'un système d'acquisition électronique et d'un logiciel de traitement des données. Ces propriétés thermiques ont été déterminées à différentes températures à l'aide d'une boîte à gants à température contrôlée (figure II.10). Elle

est constituée d'un congélateur commercial d'un volume de 400 litres dont les dimensions intérieures sont : 120 cm de longueur, 48 cm de largeur et 72 cm de profondeur. Le couvercle est en plexiglass transparent de 20 mm d'épaisseur. À l'intérieur du congélateur, deux ventilateurs sont entrainés par des micromoteurs de 11 watts permettant de brasser l'air et d'homogénéiser sa température. Devant chaque ventilateur, deux résistances chauffantes de 25 watts sont fixées. Suivant la puissance de chauffage désirée. Un thermomètre à contact est placé devant l'un des ventilateurs, pour commander les résistances chauffantes par l'intermédiaire d'un relais électronique. L'incertitude de mesure de température de la boîte à gants est de 0,01 °C.



Figure II- 9: Appareil de mesure CT Meter



Figure II- 10: Boîte à gants

Partie II

Procédure expérimentale des Matériaux composites binaires : mortier ciment- poudre de verre

II.7 Procédure expérimentale des matériaux composites binaires (ciment/ poudre de verre) :

II.7.1 Formulation et confection des matériaux composites binaires :

Les échantillons des mortiers composites ont été préparés dans des moules de dimension (4x7x9) cm³. Le mortier témoin est constitué du ciment portland, sable et eau. La poudre de verre est ajoutée dans le mortier suivant les pourcentages en masse suivants : (10, 20, 30, 40, 50, 60 %) avec un rapport E/C de 0,4 et un rapport Ciment/Sable (C/S) 1/3. Le Tableau II.3 représente les confections des échantillons étudiés.

	Ciment (g)	Eau (g)	Sable (g)	Poudre de verre (g)	Rapport E/C	Rapport C/S
Mortier témoin	250	100	750	0	0,4	1 /3
10% MGP*	225	100	750	25	0.4	1 /3
20%MGP	200	100	750	50	0,4	1 /3
30%MGP	175	100	750	75	0,4	1 /3
40%MGP	150	100	750	100	0,4	1 /3
50%MGP	125	100	750	125	0,4	1 /3
60%MGP	100	100	750	150	0,4	1 /3

*MGP : Mortar Glass Powder – Mortier en poudre de verre

Tableau II- 3: Formulation des mortiers composites binaires

Les échantillons ont été préparés suivant la norme la norme NF EN 196-3. La poudre de verre, sable et ciment portland ont été mélangés sec pendant 10min, après l'ajout de l'eau, le temps de vibration de la pâte est de 10 min, puis les échantillons ont été confectionnés dans des moules d'acier de dimension (4x7x9) cm³. La confection a été faite couche par couche de 20mm. Le démoulage a été fait 24 heures après la confection. Ensuite, les échantillons ont été imbibés dans un bac d'eau de 20± 1°C pendant 28 jours.

II.7.2 Conditionnement des échantillons :

Les échantillons de mortier ont été séchés dans une étuve menée d'une ventilation à 60 °C, afin de mesurer leurs propriétés thermiques à l'état sec, ensuite ils ont été imbibés dans un bac d'eau

pendant 48 heures afin de mesurer les paramètres thermiques à l'état saturé. Les propriétés thermiques des échantillons (figure II.11) ont été mesurées aussi en fonction de la variation de la température (20, 30, 40 et 50 °C). Les échantillons ont été séchés dans une étuve menée d'une ventilation à 60 °C jusqu'à la stabilisation de masse. Le Tableau II.5 indique les conditionnements des échantillons étudiés pour les tests thermiques. Les mesures des propriétés thermiques ainsi des masses volumiques ont commencé à l'âge de 91 jours, où les réactions pouzzolaniques commencent à se développer [61]. Chaque mesure est la moyenne de 3 mesures, avec une marge de temps de 10 min entre chaque mesure [56].

Objectifs	Conditionnement		Protocole
Effet de la température	Etat sec	20 °C	Échantillons séchés dans une étuve menée d'une ventilation 60 °C, jusqu'à la stabilisation de masse.
		30 °C	
		40 °C	
		50 °C	
Effet de la teneur en eau	Etat sec	20 °C	Échantillons séchés dans une étuve menée d'une ventilation à 60 °C
	Etat saturé	20 °C	Échantillons imbibés dans un bac d'eau pendant 48 heures

Tableau II- 4: Conditionnement des échantillons pour la mesure des paramètres thermiques



Figure II- 11: Échantillons des mortiers témoin et substitués à différents pourcentages de la poudre de verre

Partie III

Procédure expérimentale des matériaux
composites ternaires :

Terre rouge - ciment portland - poudre de
verre

II.8 Procédure expérimentale des matériaux composites ternaires : terre rouge - ciment Portland - poudre de verre :

II.8.1 Formulation et confection des matériaux composites ternaires :

Les échantillons ont été préparés dans des moules de 4x7x9 cm³. La terre rouge a été moulée manuellement avec une teneur en eau de 25 %. L'échantillon témoin est composé uniquement de la terre rouge et l'eau. Les échantillons de blocs de terre rouge sont stabilisés par le ciment de 6 % et 12 % de poids (figure II.12).

Les matériaux composites ternaires sont composés de terre rouge, ciment et poudre de verre. L'ajout de la poudre de verre était de (0 à 30 %) de poids de terre rouge. Le tableau II-6 résume la confection de tous les échantillons préparés. Les échantillons ont été démoulés puis durcis pendant 28 jours. Les propriétés thermiques des échantillons ont été mesurées à l'état sec à 20 °C.

	Code	Terre rouge (g)	Eau (ml)	Ciment portland (g)	Poudre de verre (g)
0 %Cement	BTS* Témoin	1000	300	0	0
	BTS + 10 % PV	900	300	0	100
	BTS + 20 % PV	800	300	0	200
	BTS + 30 % PV	700	300	0	300
6 %Cement	BTS 6	940	300	60	0
	BTS 6 + 10 % PV	840	300	60	100
	BTS 6+ 20 % PV	740	300	60	200
	BTS 6+ 30 % PV	640	300	60	300
12 % Cement	BTS 12	900	300	120	0
	BTS 12 + 10 % PV	780	300	120	100
	BTS 12 + 20 % PV	680	300	120	200
	BTS 12 + 30 % PV	580	300	120	300

***BTS : Brique de terre stabilisant**

Tableau II- 5 : Formulation des matériaux composites ternaires (BTS : bloque de terre stabilisant)

La figure II-12 présente un groupe d'échantillonnage des différents pourcentages de substitution des trois matériaux (poudre de verre, ciment et terre rouge).



Avec : **(a)** control sample (BTS); **(b)** 0% GP + 6% cement; **(c)** 0% GP + 12% cement; **(d)** 10% GP + 0% cement; **(e)** 10% GP + 6% cement; **(f)** 10% GP + 12% cement; **(g)** 20% GP + 0% cement; **(h)** 20% GP + 6% cement; **(i)** 20% GP + 12% cement; **(j)** 30% GP + 0% cement; **(k)** 30% GP + 6% cement; **(l)** 30% GP + 12% cement.

Figure II- 12: Échantillons des blocs d'argile stabilisée au ciment (de 0 à 12 %) et à la poudre de verre de (0 à 30%

Conclusion :

Le chapitre de méthodologie expérimentale de cette thèse a présenté une description détaillée des matériaux locaux, des méthodes et des essais utilisés dans cette étude. Deux grandes parties ont été présentées dans ce chapitre. Les différents paramètres étudiés pour ces matériaux binaires ont été présentés, tels que le pourcentage de substitution de la poudre de verre, le broyage de la poudre de verre ainsi que la préparation des échantillons en fonction de la saturation en eau. En outre, les méthodes de confection et de préparation des échantillons ont été décrites en détail pour assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats. Les matériaux étudiés dans cette thèse sont d'une grande importance pour l'élaboration de nouveaux matériaux

de construction qui répondent aux exigences de performance thermique et mécanique pour les bâtiments. Les résultats obtenus grâce à cette méthodologie expérimentale contribueront à l'avancement des connaissances dans le domaine des matériaux de construction et pourront servir de base pour des études futures.

CHAPITRE 3

**Résultats expérimentaux des comportements
chimiques et minéralogiques des matériaux
composites binaires et ternaires**

III.1 Introduction :

Dans le domaine de la recherche des matériaux, il est essentiel de caractériser les matières premières et les matériaux composites avant de pouvoir les utiliser dans des applications spécifiques. Cela peut être accompli à l'aide d'une analyse chimique et minéralogique, ainsi qu'une analyse morphologique pour étudier la forme et la texture des échantillons. La caractérisation de ces matériaux peut être effectuée en utilisant divers techniques analytiques, telles que la diffraction des rayons X et la microscopie électronique à balayage. Dans ce présent chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux de l'étude des échantillons des matériaux composites binaire et ternaire. Nous mettons en évidence la composition chimique et minéralogique de ces échantillons. Nous avons également effectué une analyse morphologique afin de statuer sur leurs formes et textures. Il est important de caractériser d'abord les matières premières ainsi que tous autres matériaux composites. Ces premiers essais permettent de définir le comportement thermo physique des échantillons. Les méthodes d'analyse utilisée dans ce chapitre sont : la Diffraction des Rayons X (*DRX*), la Microscopie Électronique à Balayage (MEB) associée à la microanalyse par Énergie Dispersive de Rayons X (*MEB-EDX*). Ces analyses permettent d'interpréter les propriétés physiques et chimiques des matériaux, ce qui est crucial pour leur utilisation dans le domaine des matériaux de construction.

Ce chapitre présente 3 parties :

La **partie I** de ce chapitre concerne la caractérisation technique des matériaux de base qui seront utilisés dans les matériaux composites étudiés. Ces matériaux de base comprennent la poudre de verre, le sable, le ciment Portland et la terre rouge. La caractérisation de ces matériaux inclut l'analyse de leurs propriétés physiques et chimiques, ainsi que l'analyse de leur structure et de leur morphologie. Cette étape est cruciale pour comprendre comment ces matériaux vont interagir entre eux et comment ils vont influencer les propriétés thermo physiques finales des matériaux composites.

La **partie II** de ce chapitre porte sur la caractérisation des matériaux composites binaires. Ces matériaux sont obtenus en substituant la poudre de verre en formulation du mortier ordinaire. La caractérisation de ces matériaux inclut l'analyse de leurs propriétés physiques et chimiques, ainsi que l'analyse de leur structure et morphologie.

Dans la **partie III** de ce chapitre, nous étudions les matériaux composites ternaires, qui sont obtenus en mélangeant trois matériaux de base différents (le ciment Portland, la poudre de verre et la terre rouge). Nous analysons les propriétés physiques et chimiques de ces matériaux, ainsi que leur texture, structure cristalline et leur morphologie.

Partie I

Caractérisation technique des matériaux
de base : Poudre de verre – sable -
ciment Portland - terre rouge

III.1 Appareils utilisés pour la caractérisation des matériaux de base :

Avant de procéder à une étude expérimentale des matériaux composites, il faut tout d'abord caractériser les matières premières qui les composent. On effectuera la caractérisation chimique, minéralogique et morphologique de ces matériaux. Les techniques de caractérisation utilisées sont :

- Diffraction des rayons X en poudre (DRX)
- Microscope électronique à balayage (SEM)
- Spectromètre à dispersion d'énergie (EDS)

III.2 Diffractions des rayons X en poudre (DRX) :

Cette technique permet de déterminer la composition chimique et minérale d'un échantillon en analysant la diffraction de faisceaux de rayons X sur les cristaux présents dans le matériau. Des analyses de diffractions des rayons X ont été réalisées sur tous les échantillons afin d'étudier et d'analyser de plus près le comportement thermo physique des matériaux contenant la poudre de verre.

III.2.1 Résultats expérimentaux des diffractions des rayons X de la poudre de verre :

La caractérisation minéralogique des différents matériaux de base est présentée ci-dessous. L'analyse des diffractions des rayons X de la poudre de verre illustrée à la figure III-1 confirme la structure amorphe du matériau. Aucun pic cristallin n'est clair.

III.2.2 Résultats expérimentaux des diffractions des rayons X du ciment Portland :

Les données DRX du ciment Portland présentées sur la figure III-2 indiquent clairement la présence principalement d'alites et deuxièmement de bélites, ainsi que de pics moins intenses représentant l'aluminate et la ferrite.

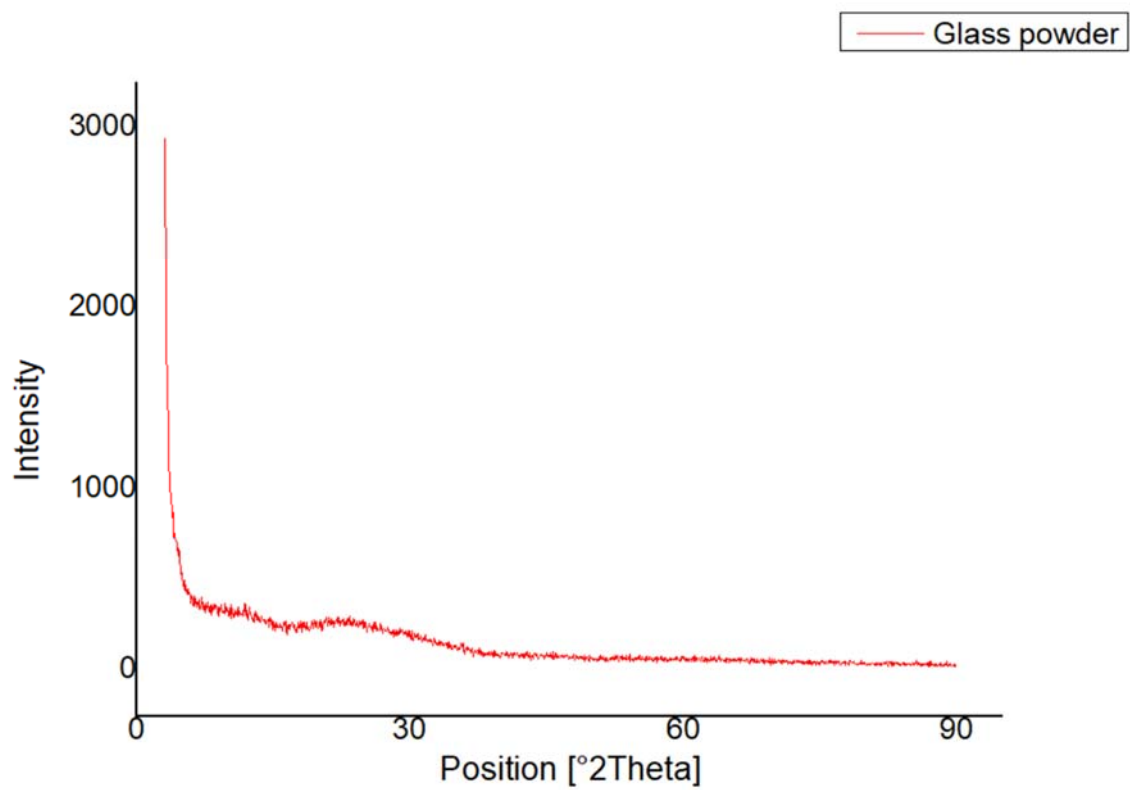


Figure III- 1 : Diffraction des rayons X de la poudre de verre

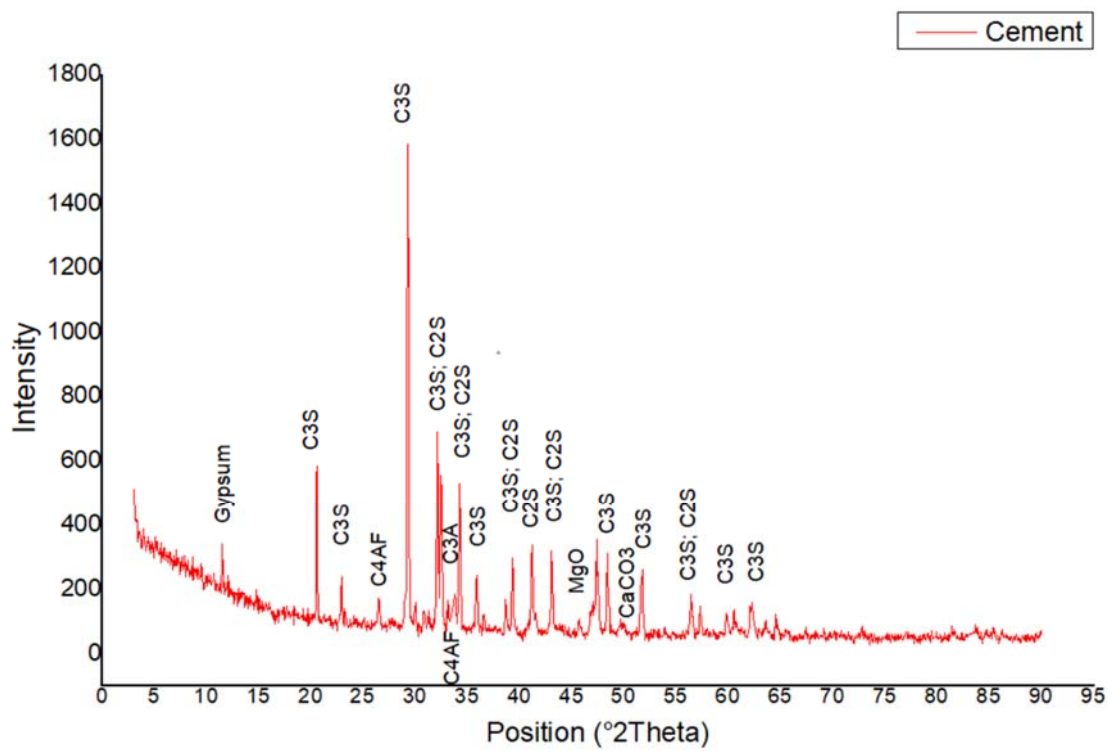


Figure III- 2: Diffraction des rayons X du ciment Portland

III.2.3 Résultats expérimentaux des diffractions des rayons X de la terre rouge :

La figure III-3 présente les résultats de l'analyse minéralogique de la terre rouge, réalisée à l'aide de la technique de diffraction des rayons X (DRX). Les résultats montrent que le constituant principal de la terre rouge est le quartz, un minéral du groupe des silicates. La muscovite, également présente dans l'échantillon, appartient au groupe des silicates appartenant à la famille des micas. Elle se présente sous la forme de feuillets minces et transparents, souvent blancs ou gris. Ces résultats ont été confirmés par Dao et al. dans leur étude[62].

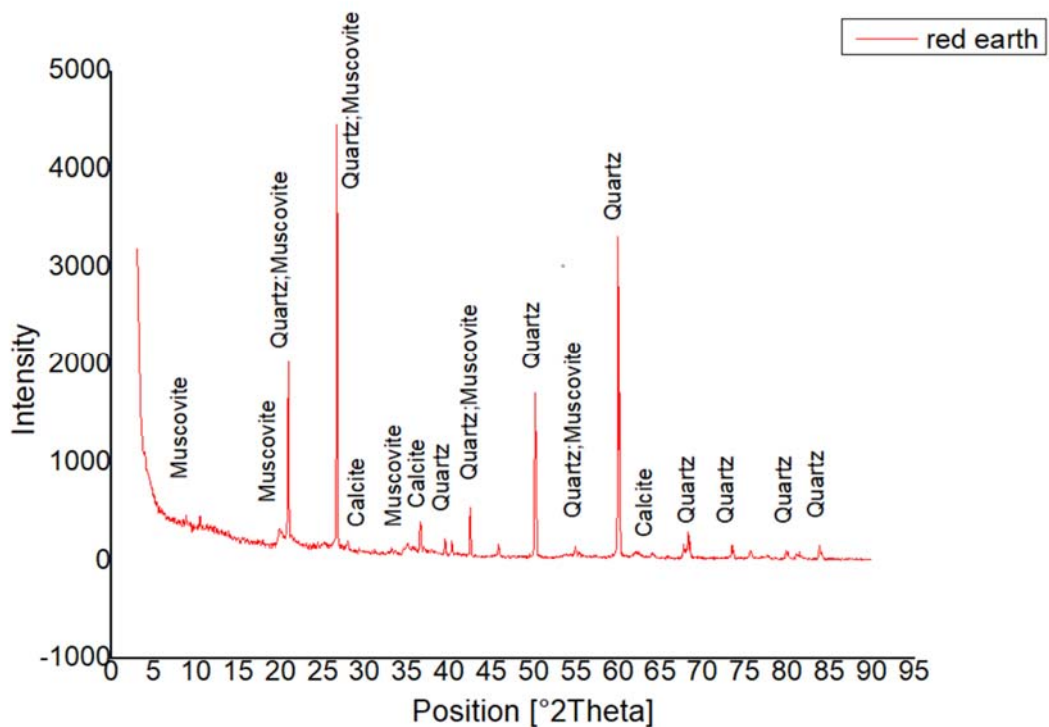


Figure III- 3: Diffraction des rayons X de la terre rouge en poudre

III.3 Microscope électronique à balayage (MEB) :

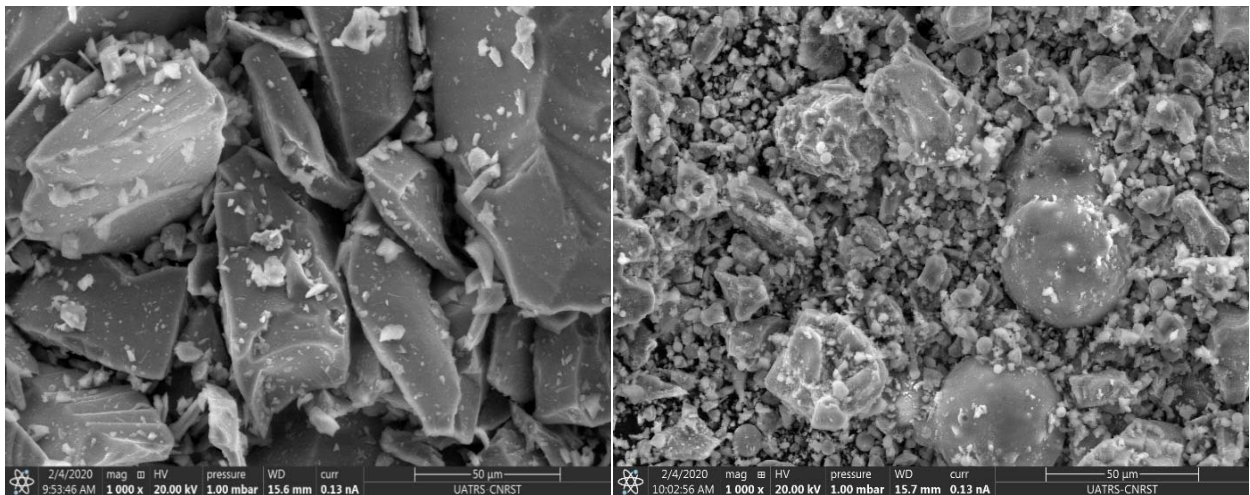
Le microscope électronique à balayage utilisé dans cette étude est associé à un spectromètre à dispersion d'énergie (E.D.S.) afin de déterminer la composition atomique des échantillons. Nous présentons d'abord une comparaison des formes morphologiques des différents matériaux étudiés.

III.3.1 Résultats expérimentaux du Microscope électronique à balayage de la poudre de verre et du ciment Portland :

La figure III-4 montre les micrographies électroniques à balayage (MEB) de deux échantillons de poudre de verre et de ciment Portland. Lors de l'analyse de la poudre de verre, on observe une morphologie lisse et pointue, avec des grains triangulaires de tailles variables allant de 58 μm à

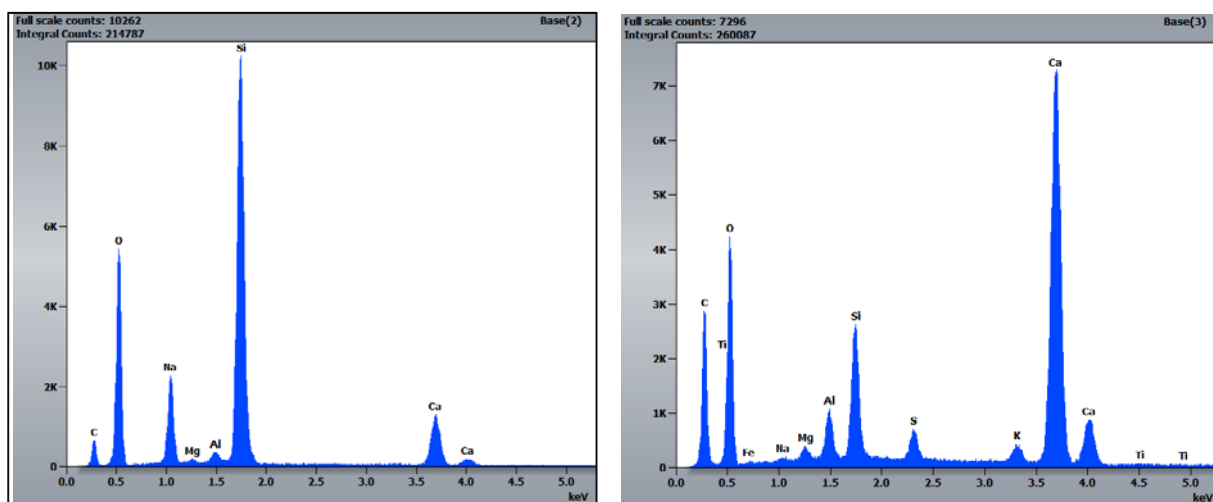
100 μm . En effet, la taille des grains peuvent influencer la porosité et la densité du matériau, ainsi que sa conductivité thermique. En revanche, l'analyse du ciment Portland révèle une structure sphérique assez régulière, avec des grains plus fins d'environ 1 μm et une variabilité de taille. Cette fine granulométrie peut également avoir un impact sur les propriétés du matériau composite, en particulier sur sa résistance mécanique et sa durabilité. Ces résultats indiquent que la poudre de verre possède une morphologie complexe et irrégulière, tandis que la structure du ciment Portland est plus homogène et régulière. Ces différences de morphologie peuvent avoir une influence sur les propriétés physiques et thermiques des matériaux composites obtenus à partir de ces matériaux de base. En analysant la morphologie et la granulométrie de ces matériaux de base, il est possible de prévoir certaines de leurs propriétés dans le matériau composite final.

Ensuite, nous avons effectué une analyse E.D.S. sur ces matériaux afin de déterminer leur composition chimique et de confirmer l'identification de leurs constituants minéraux. Les résultats de l'analyse E.D.S. montrent que la poudre de verre est principalement composée de la silice (Si) et de moyenne teneur en sodium (Na) tandis que le ciment Portland est principalement constitué de silice (Si), d'alumine (Al) et de calcium (Ca).



(a) Poudre de verre

(b) ciment portland CPJ 45



(a) Poudre de verre

(b) ciment portland CPJ 45

Figure III- 4: Microscope électronique à balayage de (a)la poudre de verre et (b) du ciment Portland

III.3.2 Résultats expérimentaux du Microscope électronique à balayage de la terre rouge:

La figure III-5 montre la forme sphérique des particules de la terre rouge sous un grossissement équivalent à 500 μm . Cette morphologie peut être due à un processus de broyage ou de concassage lors de la production de la terre rouge[63].

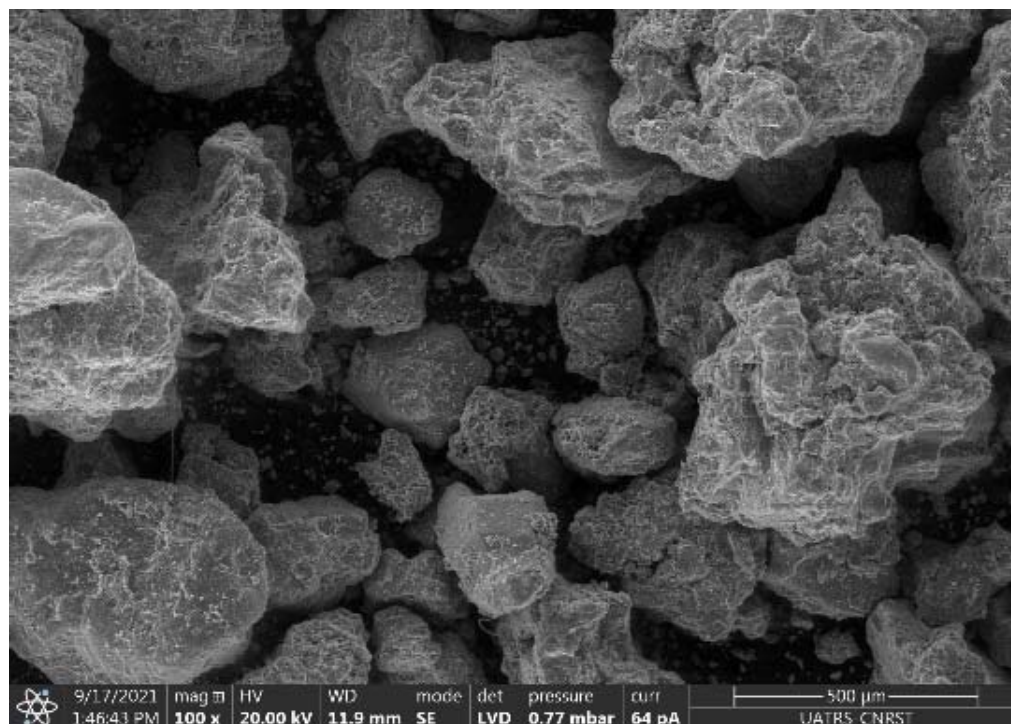


Figure III- 5: Microscope électronique à balayage de la terre rouge

III.4 Microanalyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDX):

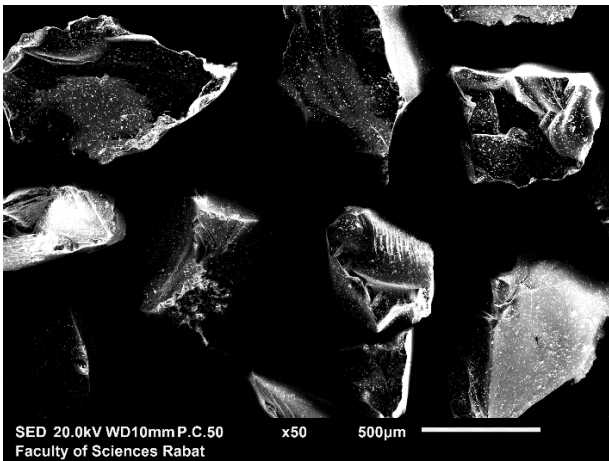
Les résultats de la microanalyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDX) sont présentés dans le tableau III.1. La poudre de verre sodocalcique contenait un grand pourcentage atomique d'oxygène et de silicium, ainsi qu'un petit pourcentage atomique de modificateurs de verre (K, Na, Pb) [36]. Par contre le ciment se caractérise par le silicate tricalcique (Ca_3SiO_5), le silicate dicalcique (Ca_2SiO_4), l'aluminate tricalcique ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_5$) et l'aluminoferrite de calcium ($\text{Ca}_4\text{Al}_n\text{Fe}_{2-n}\text{O}_7$)[64]. La formule de chacun de ces minéraux peut être décomposée en calcium de base, silicium, aluminium et oxydes de fer, avec forte domination en calcium (composant principal du calcaire qui représente environ 80% de matière première dans la fabrication de ciment portland), et à faible composition de silicium, aluminium, sodium et carbone. La poudre de la terre rouge contenait un pourcentage atomique de silicium et d'aluminium, ainsi qu'une petite quantité atomique de titane et de magnésium.

Element (at. %)	Poudre de verre	Ciment Portland	Terre Rouge
O	42.77	44.49	48.62
Na	10.75	0.23	3.28
Mg	0.21	0.57	0.48
C	-	12.10	8.13
Al	0.8	1.92	11.15
Si	38.45	6.48	18.93
Ca	6.83	31.32	0.56
K	0.13	1.04	1.19
Ti	-	0.13	0.62
Fe	0.07	1.72	7.04
Total	100.00	100.00	100.00

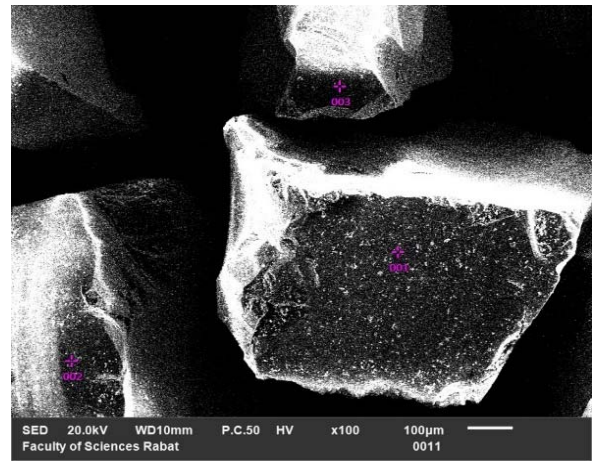
Tableau III- 1 : Composition chimique de la poudre de verre, ciment Portland et la terre rouge obtenus par analyse EDX.

III.5 Effet du broyage de la poudre de verre sur la morphologie des particules :

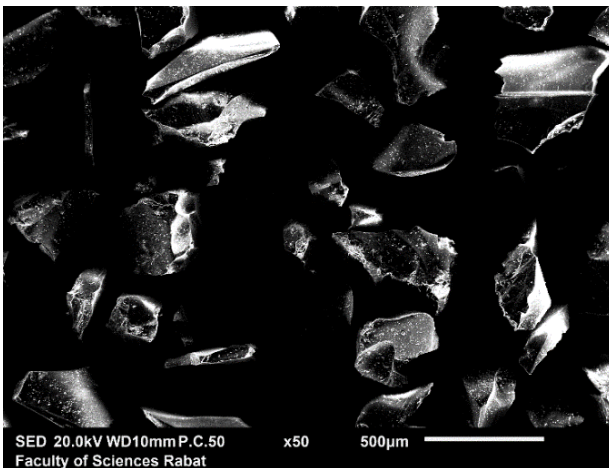
Afin de bien identifier la poudre de verre, qui est l'objet principal des études expérimentales réalisées dans le cadre de cette thèse, une première étude a été effectuée sur la taille des particules de la poudre de verre pour analyser l'effet de l'intensité du broyage sur la composition chimique et morphologique. Nous avons étudié trois différentes granulométries de la poudre de verre de : 100 μm , 200 μm et 300 μm .



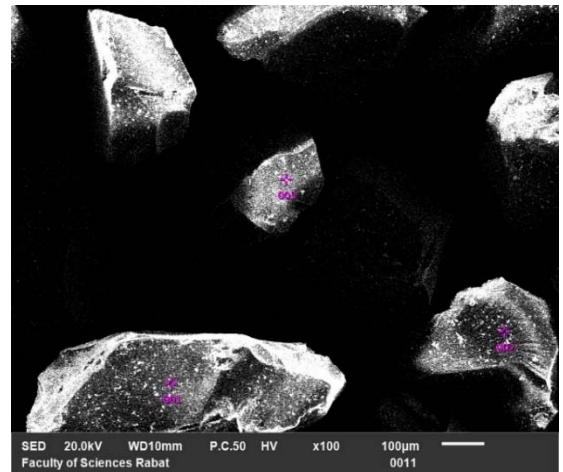
Poudre de verre_300 μm (x50)



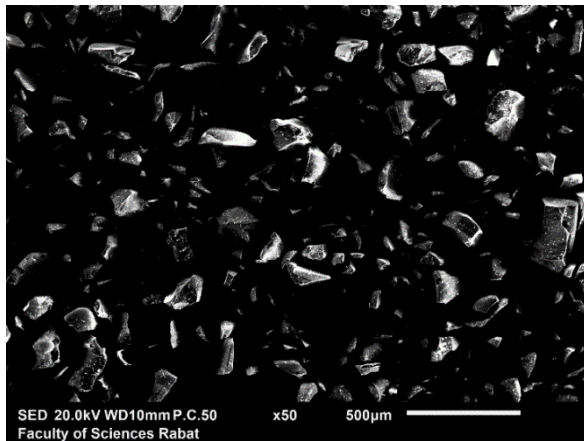
Poudre de verre_300 μm (x100)



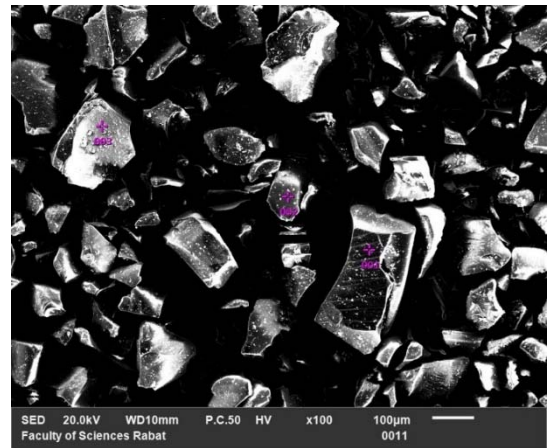
Poudre de verre_200 μm (x50)



Poudre de verre_200 μm (x100)



Poudre de verre_100μm (x50)

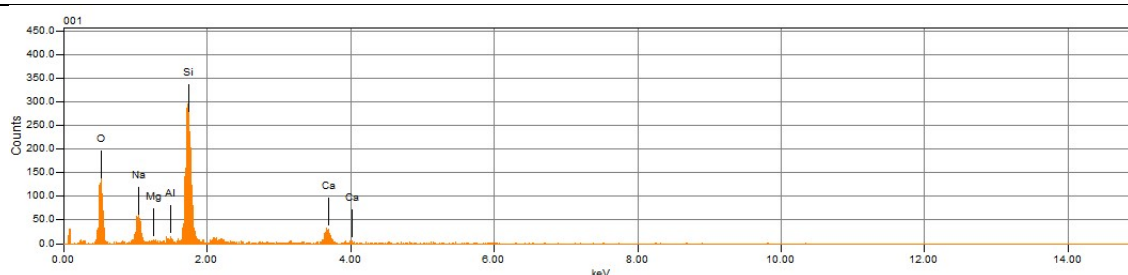


Poudre de verre_100μm (x100)

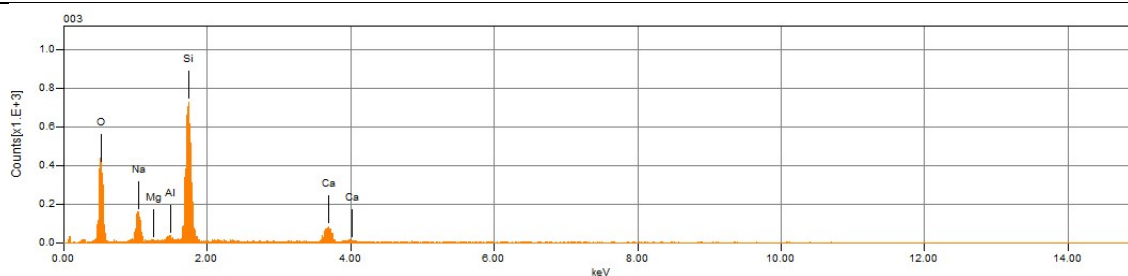
Figure III- 6: Comparaison de la microscopie de la poudre de verre de 100, 200 et 300 μm à différents grossissements (x 50 et x 100)

La figure III-6 illustre deux grossissements morphologiques (x 50) et (x100) de la poudre de verre en fonction des trois granulométries : 100 μm, 200 μm et 300 μm. Il est important de noter que la morphologie des particules de poudre de verre ne change pas lorsqu'elle est soumise à différents niveaux de broyage. Cependant, il est également connu que plus le broyage est long, plus les particules de verre deviennent fines et pointues. Cette propriété est importante car elle peut avoir un impact sur les propriétés mécaniques et chimiques du matériau composite obtenu à partir de ces particules de verre[54]. Les particules de verre plus fines et pointues peuvent être plus facilement dispersées dans le matériau composite et peuvent également augmenter la quantité de la portlandite, ainsi que les nouveaux liens CSH pour obtenir une résistance mécanique du matériau favorable. En effet, ces particules fines et pointues peuvent mieux s'intégrer dans la matrice du ciment et renforcer ainsi les liens entre les différents éléments constitutifs du matériau composite.

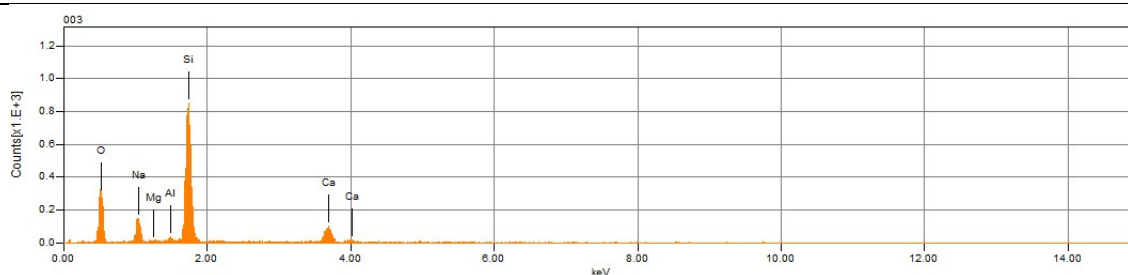
Poudre de verre 300 μm



Poudre de verre 200 μm



Poudre de verre 100 μm



Ciment Portland CPJ 45

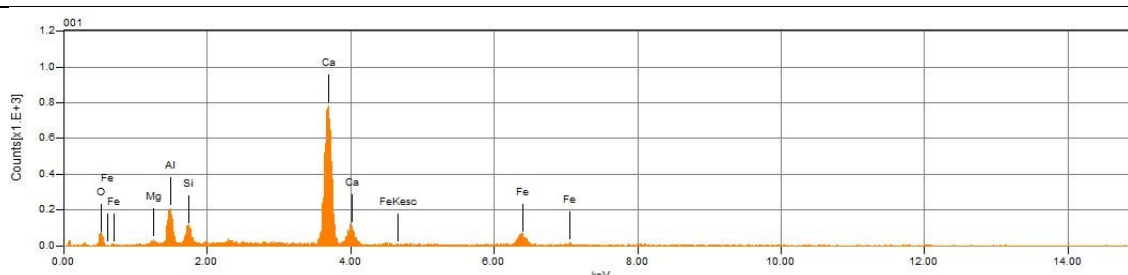


Figure III- 7: Comparaison de la composition chimique de la poudre de verre de 100,200 et 300 μm selon les analyses EDX

La figure III-7 montre la comparaison chimique des trois tailles granulométriques de la poudre de verre. Nous remarquons dans un premier temps que la teneur en silice ne dépend pas de la taille de broyage. Une légère diminution du Sodium (Na) pourrait être remarquable en fonction de la diminution des tailles des particules de verre. En effet, lorsque le broyage est plus long, les particules de verre obtenues sont plus fines et donc plus pointues et aiguës. Cependant, cela n'a pas d'impact sur la teneur en silice de la poudre de verre, qui reste constante quelle que soit la

taille des particules obtenues. Les analyses EDX montrent que la teneur en sodium peut diminuer légèrement avec la diminution de la taille des particules de verre. Cela peut être dû à la perte de certains éléments lors du processus de broyage, qui peuvent être difficiles à retenir dans les particules de verre plus fines.

	Poudre de verre 300µm				Poudre de verre 200µm				Poudre de verre 100µm			
	Zone1	Zone2	Zone3	Moy	Zone1	Zone2	Zone3	Moy	Zone1	Zone2	Zone3	Moy
O	58,55	55,09	49,14	54,26	45,25	54,17	49,29	49,57	48,71	49,83	42,97	47,17
Na	14,17	12,64	11,38	12,73	11,05	13,91	12,01	12,32	12,68	13,39	10,75	12,27
Mg	0,56	0,31	0,47	0,45	0,51	0,5	0,17	0,39	0,28	0,31	0,21	0,27
Al	1,03	0,1	1,11	0,75	0,65	1,15	0,94	0,91	0,71	0,71	0,8	0,74
Si	33,16	31,19	38,45	34,27	36,98	28,54	31,97	32,50	33,17	27,42	32,91	31,17
Ca	5,12	2,97	5,15	4,41	2,34	3,21	5,45	3,67	4,45	4,57	6,83	5,28
Total	100	100	100	--	100	100	100		100	100	100	

Tableau III- 2: Comparaison de la composition chimique de la poudre de verre de 100,200 et 300 µm prise dans différentes zones selon les analyses EDX

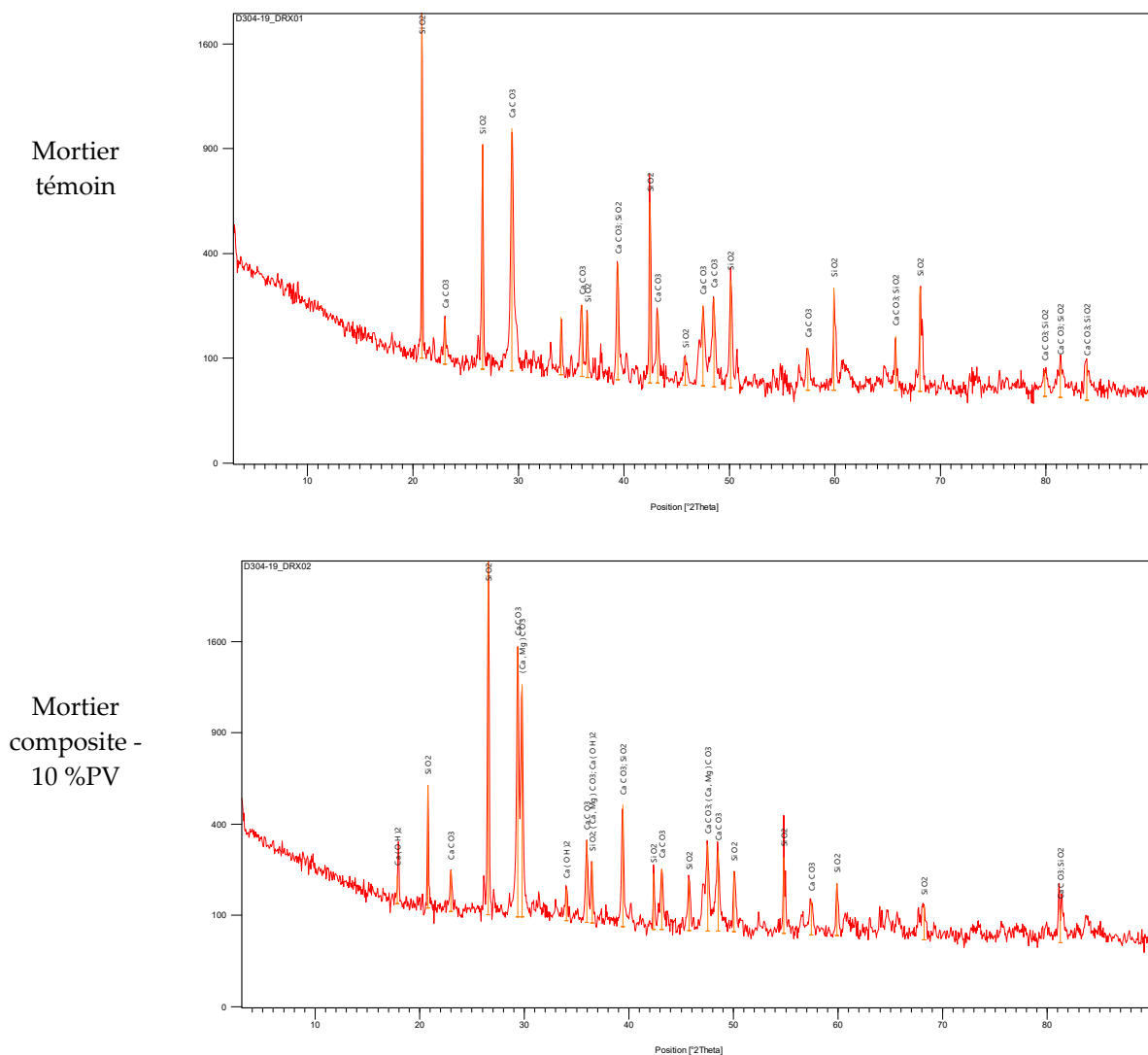
Le tableau III-2 présente les résultats de l'analyse spectrométrie à dispersion d'énergie effectuée sur les différentes tailles de poudre de verre (300 µm, 200 µm et 100 µm). Pour chaque taille de poudre, les résultats ont été obtenus à partir de trois différentes zones d'analyse sur l'échantillon, avec une moyenne des résultats présentée en dernière colonne. Les résultats indiquent une légère diminution de la teneur en sodium (Na) lorsque la taille de la poudre de verre diminue. Cependant, la teneur en silice (O) reste relativement constante quel que soit la taille de la poudre [65]. Ces résultats suggèrent que la morphologie des particules de poudre de verre ne change pas en fonction de la taille de broyage, mais que la taille des particules est réellement affectée par le temps de broyage.

Partie II

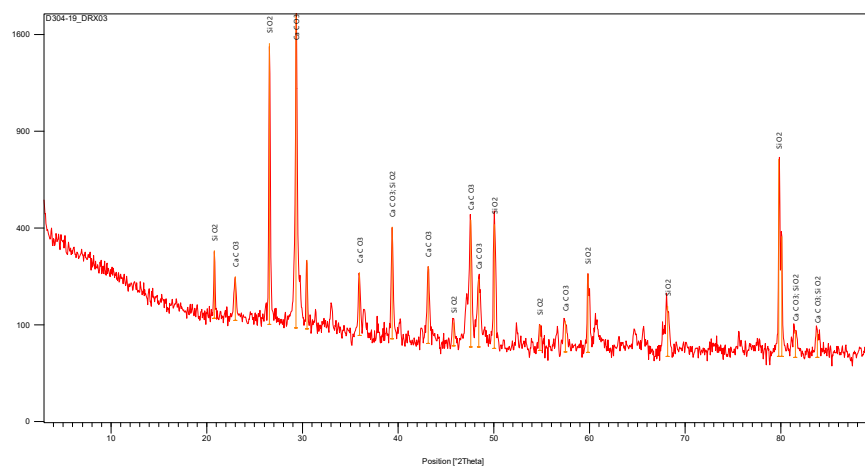
Caractérisation technique des matériaux composites binaires

III.6 Résultats expérimentaux des diffractions des rayons X des mortiers composites binaires (mortier en poudre de verre) :

La diffraction des rayons X a été utilisée pour analyser la structure cristalline des matériaux composites contenant de la poudre de verre. Les figures III-8 et III-9 montrent les diffractions obtenues pour les différents mélanges de 0%, 10%, 50% et 60% de poudre de verre substituée au mortier. Nous pouvons remarquer que la diffraction de l'état pur (mortier) contenant 0% de poudre de verre est similaire à celle du ciment Portland pur, avec la présence de diffractions caractéristiques du quartz (SiO_2), de C2S et du C3S. Pour les mélanges contenant une forte teneur de la poudre de verre, nous observons l'apparition de nouvelles diffractions, correspondant aux minéraux présents dans la poudre de verre, tels que l'alumine (Al_2O_3) et la silice (SiO_2). Ces résultats indiquent que la poudre de verre interagit avec le ciment Portland durant la réaction de durcissement, formant de nouveaux minéraux cristallins.



Mortier
composite -
50 %PV



Mortier
composite -
60 %PV

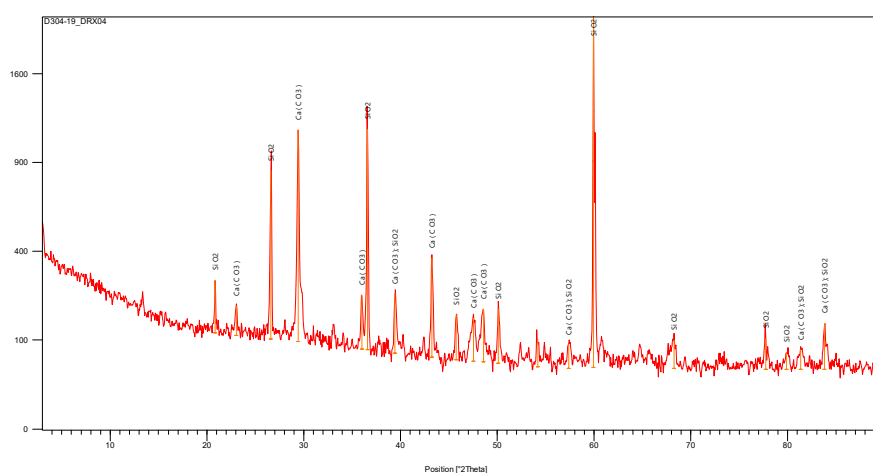


Figure III- 8 : Diffraction des rayons X de (a) MGP 0% (b) MGP 10% (c) MGP 50% (d) MGP 60%

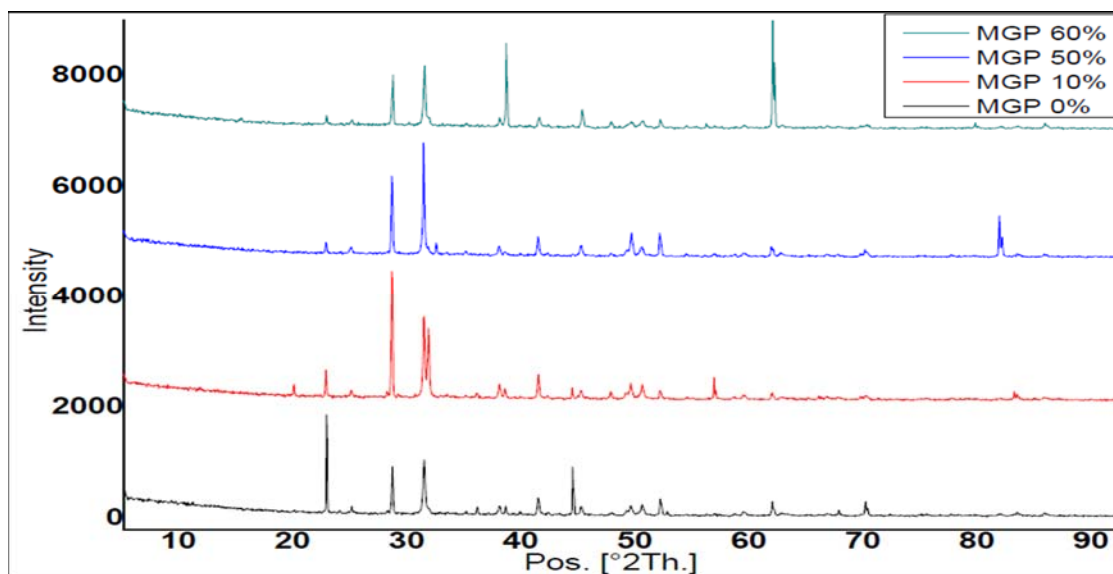
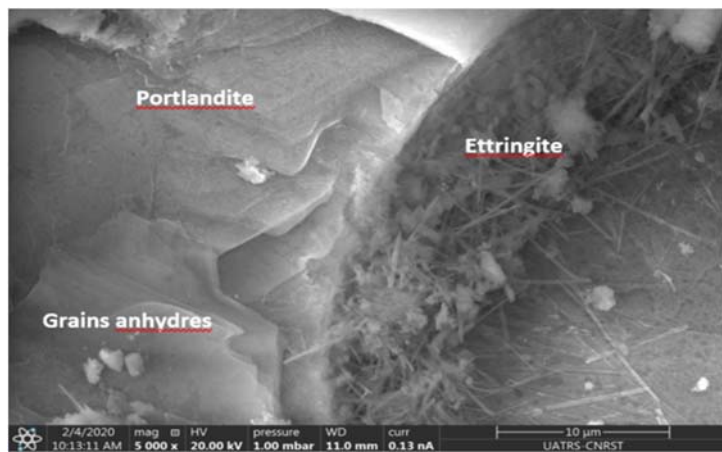


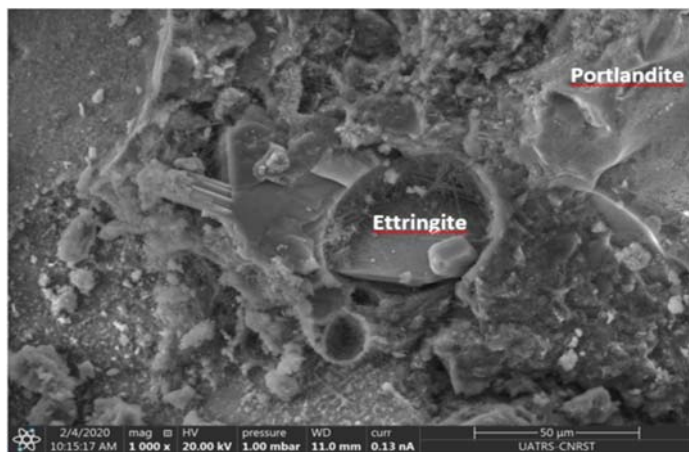
Figure III- 9: Diffraction des rayons X de (a) MGP 0% (b) MGP 10% (c) MGP 50% (d) MGP 60%

III.7 Résultats expérimentaux du Microscope électronique à balayage des matériaux composites binaires :

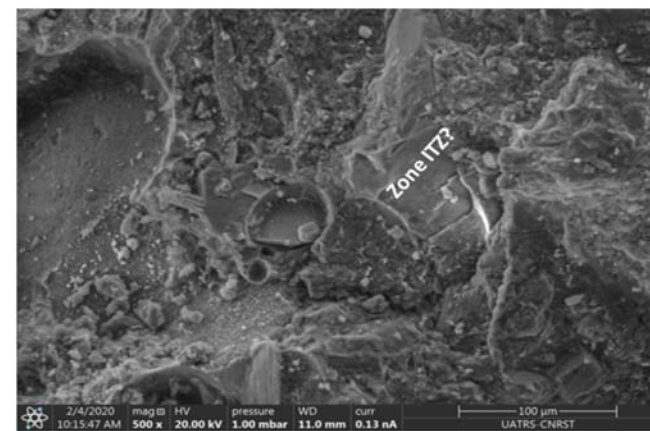
Les mortiers composites sont formés par le mortier témoin ainsi que différents pourcentages de la poudre de verre (0 %, 10 %, 50 % et 60 %). Les microstructures des mélanges en poudre de verre étaient également observées à l'aide du MEB et présentés sur les figures III-10. La composition chimique de la poudre de verre rend ce matériau composite pouzzolanique [66]. Cette réaction pouzzolanique pourrait densifier la pâte en raison des nouveaux liens C-S-H [61]. Une interaction plus faible des éléments Ca et Si de l'alumine confirmant que le mélange en poudre de verre diminuera la quantité de portlandite, et augmentera la quantité de C-S-H car la poudre de verre est riche en Al_2O_3 . Le mélange avec 10 % de poudre de verre a montré des formations de gel C-S-H, hydratation secondaire due à la caractérisation pouzzolanique, comme on peut le voir sur la figure, cependant, cette densification de la microstructure n'était pas évidente dans 50% et 60% de la poudre de verre. La différence de répartition de la taille des pores peut être observée d'après les différents grossissements pour chaque mélange. Il a été identifié donc que l'utilisation de la poudre de verre dans le mortier entraîne des modifications dans sa morphologie. En effet, l'ajout de la poudre de verre dans le mélange de ciment Portland peut avoir un impact sur la microstructure du matériau final. Lors de la réaction de pouzzolanique, la poudre de verre réagit avec l'eau et le ciment Portland pour former de nouveaux produits hydratés, tels que le C-S-H. Ces nouveaux produits hydratés peuvent densifier la pâte et augmenter la quantité de C-S-H dans le matériau final, ce qui peut avoir un impact sur ses propriétés mécaniques.



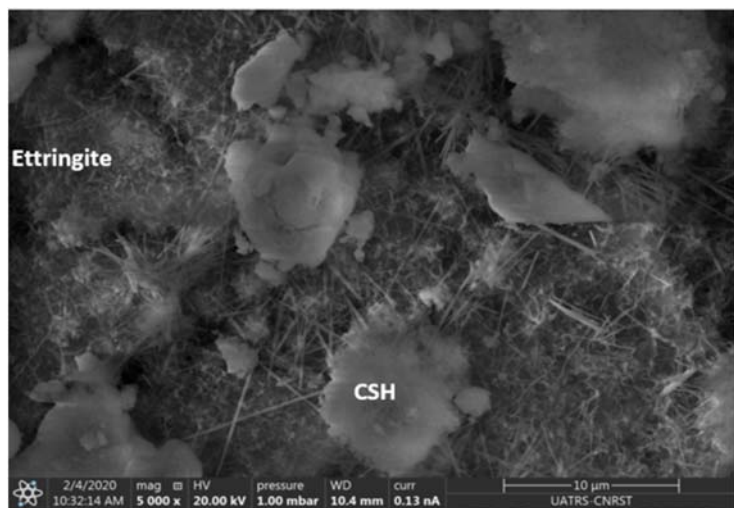
Mortier témoin



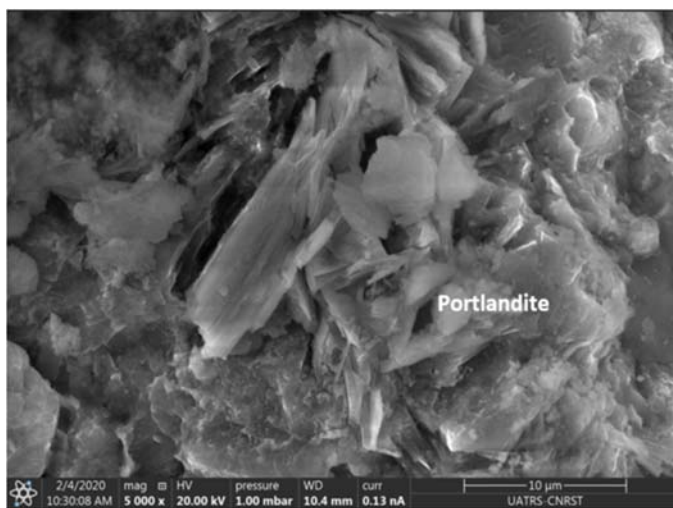
Mortier témoin



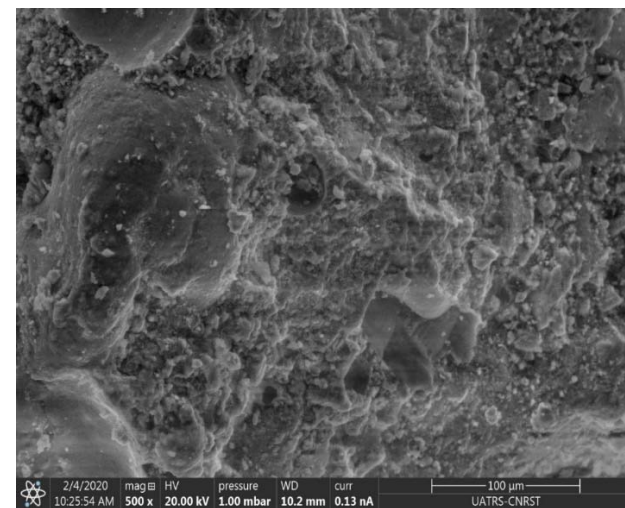
Mortier témoin



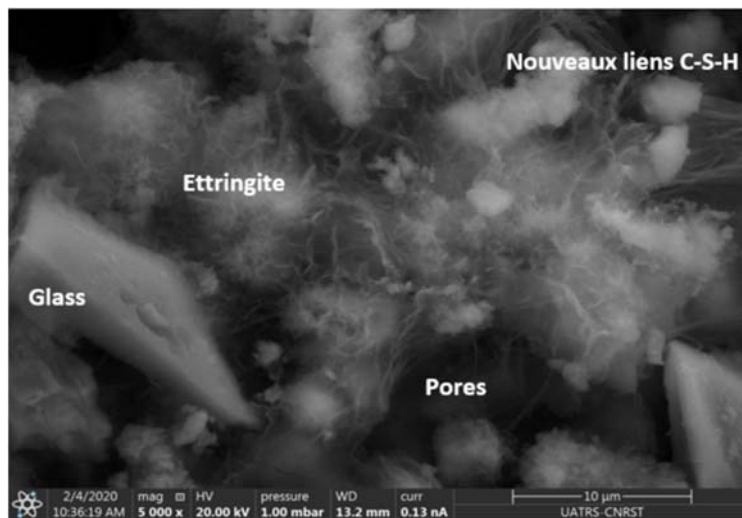
Mortier composite (10 % Poudre de verre)



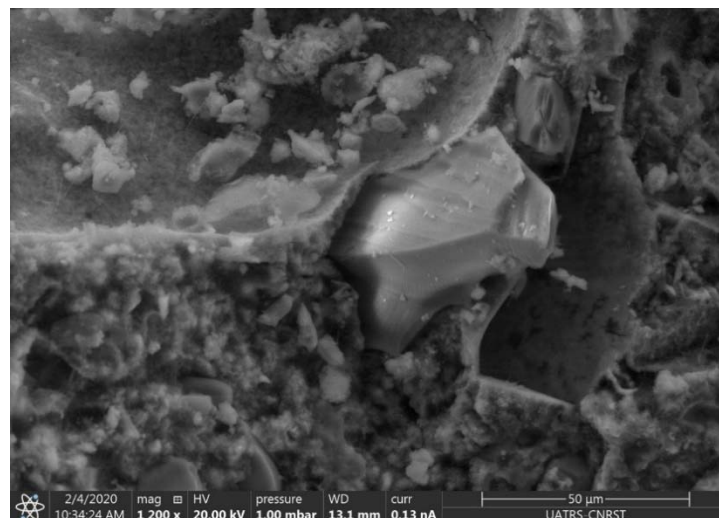
Mortier composite (10 % Poudre de verre)



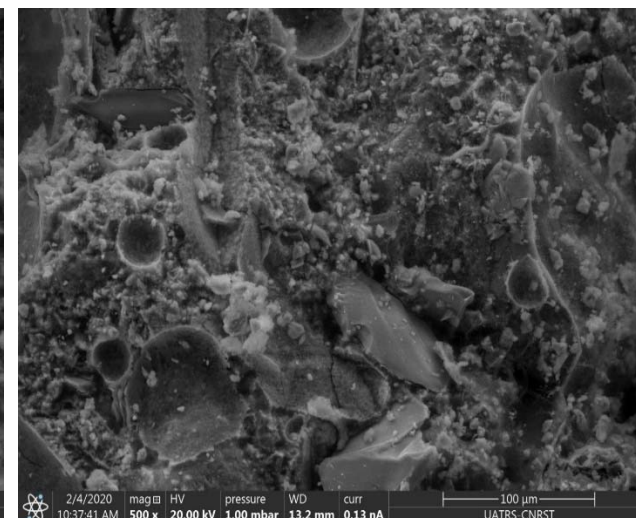
Mortier composite (10 % Poudre de verre)



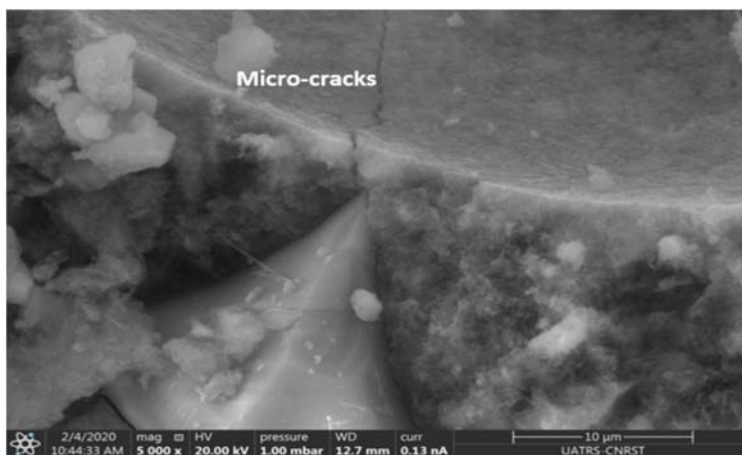
Mortier composite (50 % Poudre de verre)



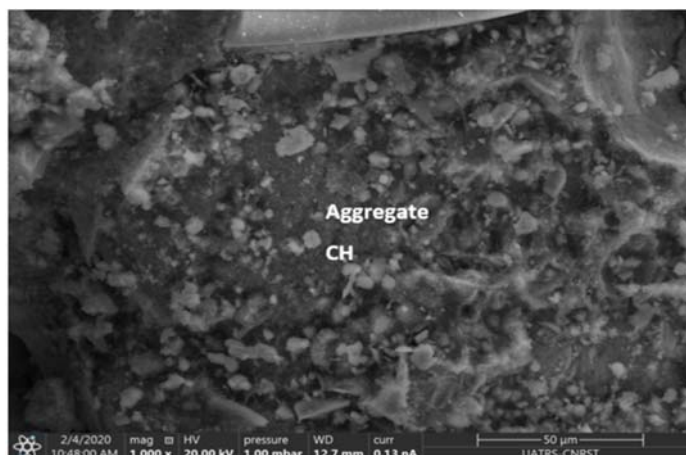
Mortier composite (50 % Poudre de verre)



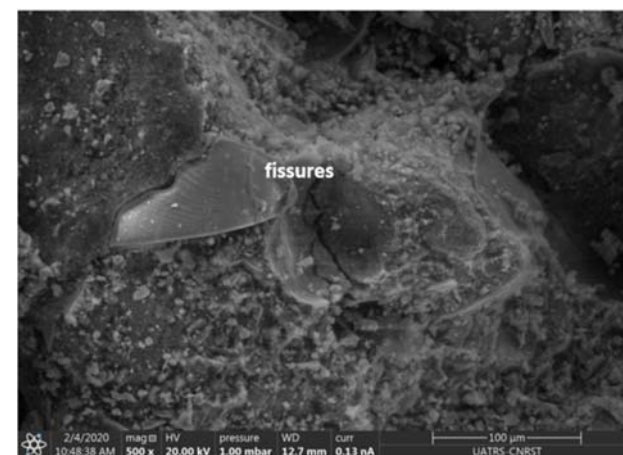
Mortier composite (50 % Poudre de verre)



Mortier composite (60 % Poudre de verre)



Mortier composite (60 % Poudre de verre)



Mortier composite (60 % Poudre de verre)

Figure III- 10: Microscope électronique à balayage des mortiers témoin et composites substitués par 10, 50 et 60 % de la poudre de verre

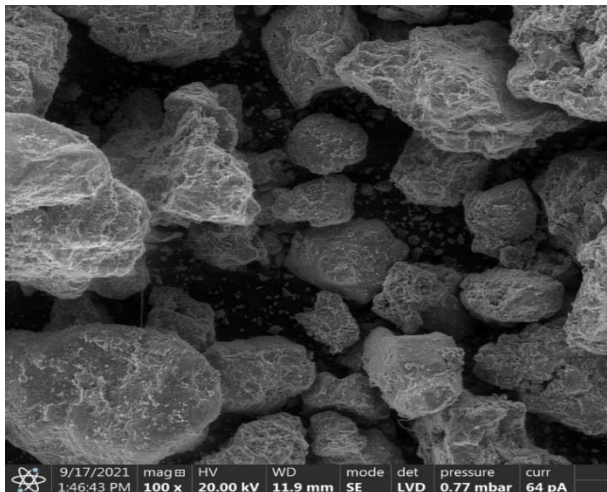
Partie III

Caractérisation technique des matériaux composites ternaires

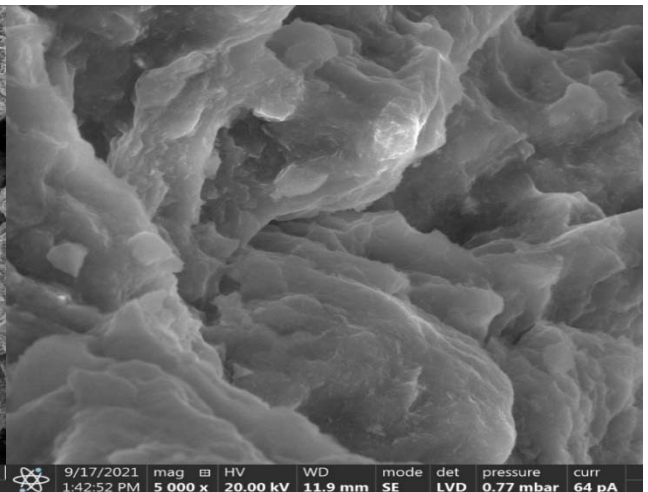
III.8 Résultats expérimentaux du Microscope électronique à balayage de la terre rouge et la poudre de verre :

La figure III-11 illustre la morphologie de la terre rouge et la poudre de verre selon différents grossissements. Dans la fraction argileuse, nous remarquons la présence de la muscovite (l'illite) qui est le minéral prédominant. L'illite est présente sous forme de paillette présentant un bord aigu. Dans la plage que nous avons prospectée, nous avons détecté selon l'EDS associé, un état de matériau non pur, contenant des éléments atomiques tracés tel que le magnésium et l'oxyde de fer en pourcentage faible. La poudre de verre a été broyée mécaniquement, elle présente des formes angulaires et des arêtes vives. La texture des particules possède un aspect plus lisse en comparaison avec des particules de la terre rouge ou du ciment portland ordinaire.

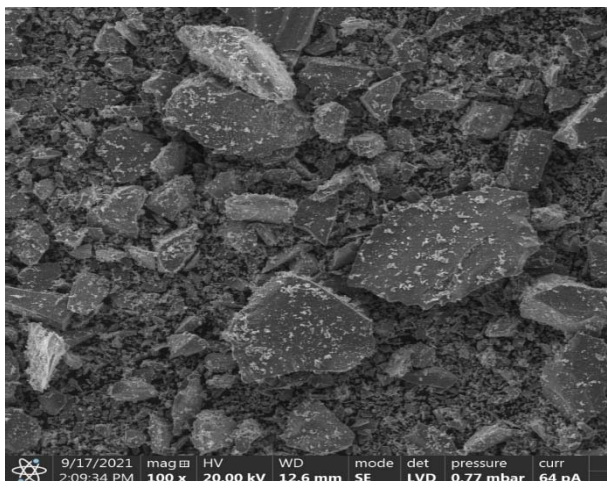
Terre rouge_500 μm



Terre rouge_10 μm



Poudre de verre_500 μm



Poudre de verre_10 μm

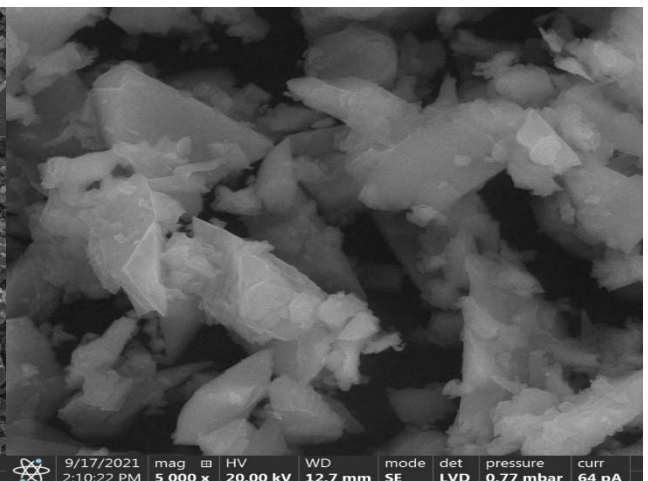


Figure III- 11: MEB de la terre rouge et la poudre de verre suivant différents grossissements ($\times 10 \mu\text{m}$ et $500 \mu\text{m}$)

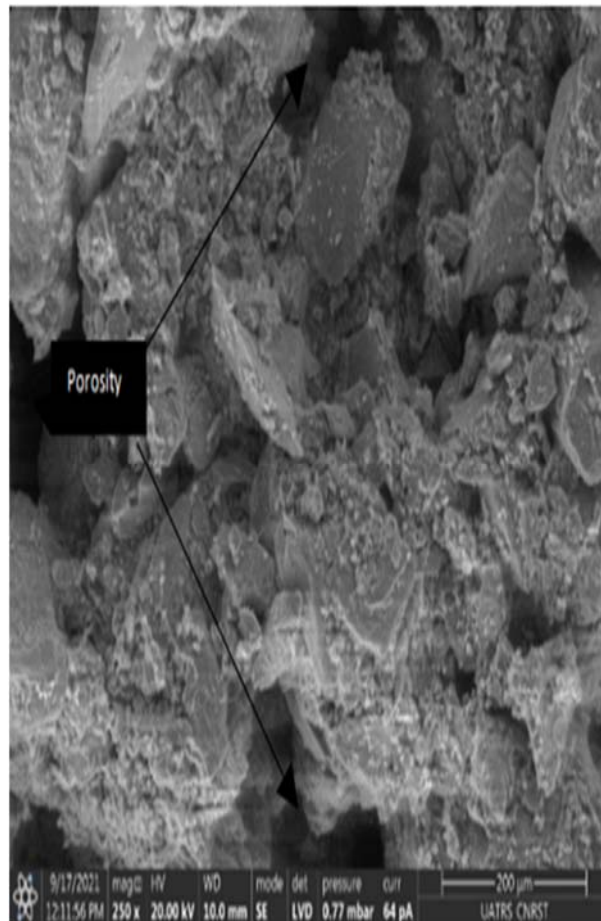
III.9 Résultats expérimentaux du Microscope électronique à balayage des matériaux ternaires :

La figure III-12 représente la caractérisation microscopique des différents échantillons des briques de terre rouge stabilisés au ciment et substitué à 10 et 30 % de poudre de verre. Les échantillons composites constitués de poudre de verre, ciment et terre rouge représentent des hydrates de C-S-H secondaire formé en tant que produit de réaction de la silice amorphe et de la portlandite. Des agglomérations apparaissent en forme d'aiguilles à la surface de poudre de verre. Les résultats trouvés sont conformes à celles de Y. Jiang et al.[34].

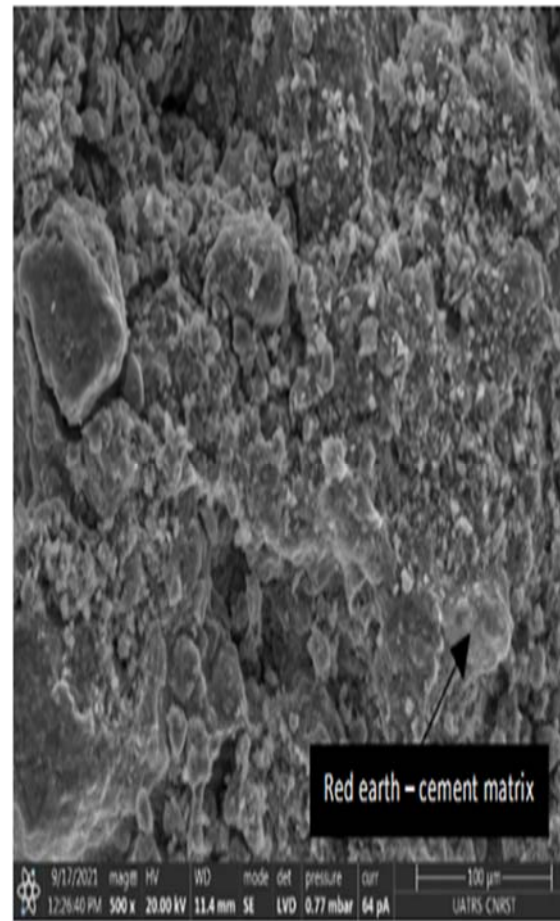
Ces hydrates, composés de plaquettes de portlandite (CH) et des silicates de calcium hydratés (CSH) plus ou moins compacts se développent aussi bien dans la zone de contact argile ciment que dans la matrice argileuse [67]. La présence des hydrates, composés de plaquettes de portlandite (CH) et des silicates de calcium hydratés (CSH) montre qu'il se forme des liaisons argile-ciment qui renforcent l'aptitude du matériau composite à résister aux sollicitations mécaniques. Ce renforcement des liaisons augmente avec la teneur en ciment ce qui explique que les échantillons sont plus compacts pour les teneurs en ciment élevées [68]. En analysant les microstructures des matériaux composites ternaires contenant de la poudre de verre, de la terre rouge et du ciment Portland, il est possible de voir comment ces différents matériaux interagissent entre eux et comment leur combinaison peut influencer les propriétés du matériau composite ternaire [57], [68].

La présence de la poudre de verre dans le matériau composite entraîne une réaction pouzzolanique[34], c'est-à-dire une réaction chimique entre l'alumine contenue dans la poudre de verre et le ciment Portland qui conduit à la formation de nouveaux hydrates C-S-H (silicate de calcium hydraté). Cette réaction peut contribuer à la densification de la microstructure du matériau et à une augmentation de sa résistance mécanique [69]. De même, la présence de la terre rouge dans le matériau composite peut conduire à la formation de liaisons argile-ciment, renforçant ainsi l'aptitude du matériau à résister aux sollicitations mécaniques[67].

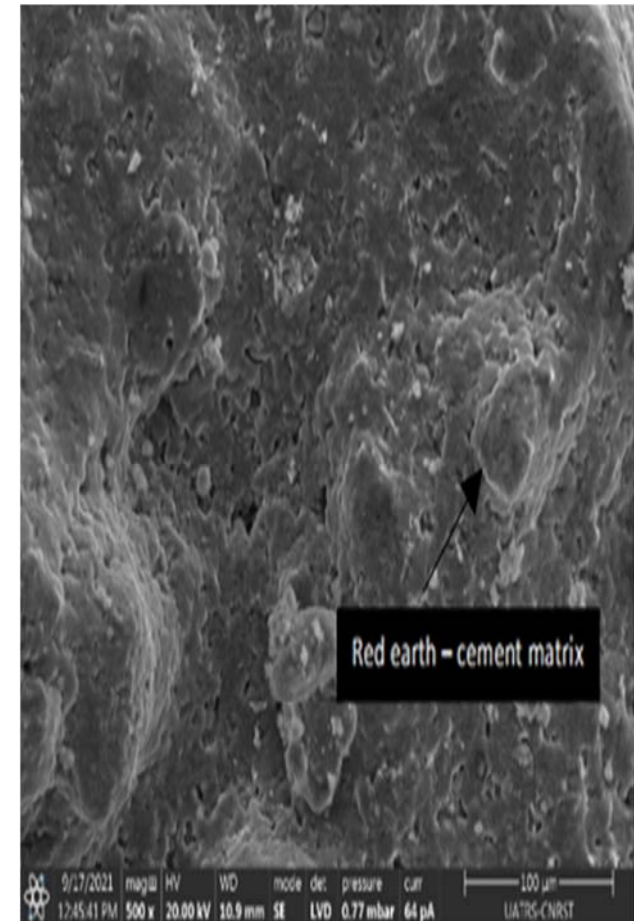
(a) Echantillon témoin (BTS)



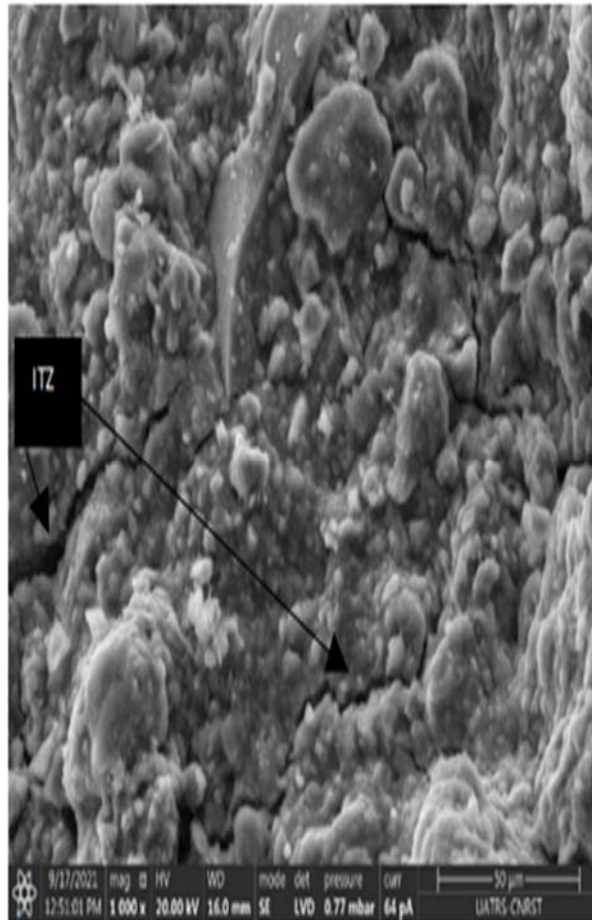
(b) 0 % PV + 6 % cement



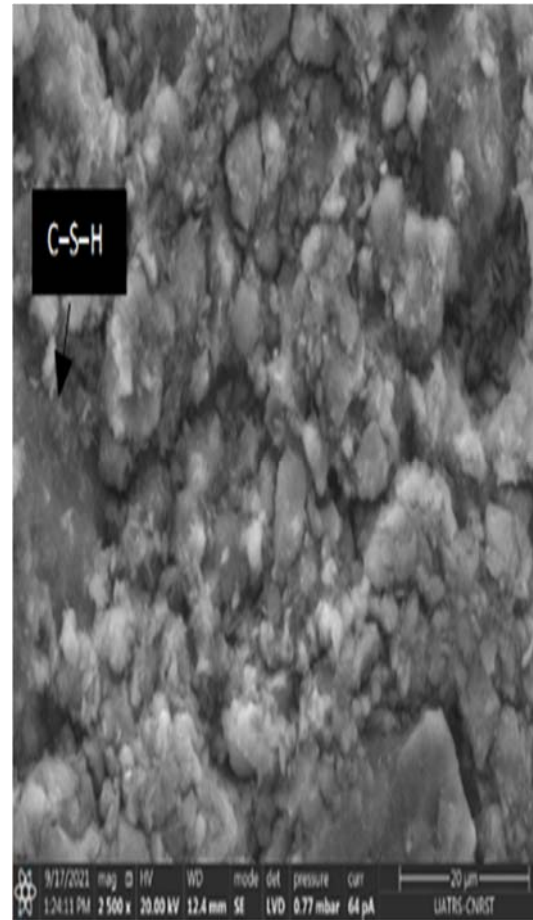
(c) 0 % PV + 12 % cement



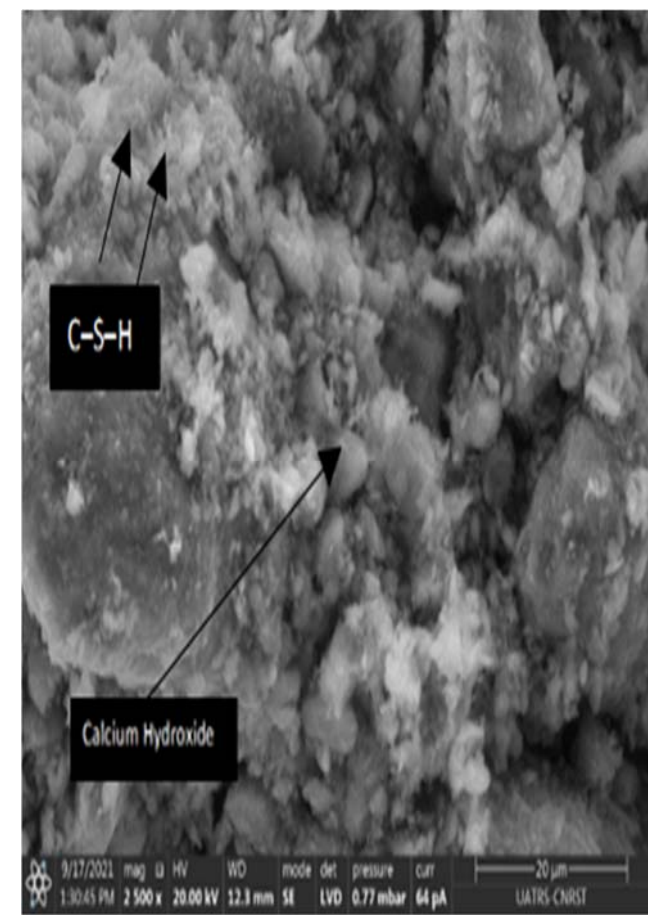
(d) 10 % PV + 0 % cement



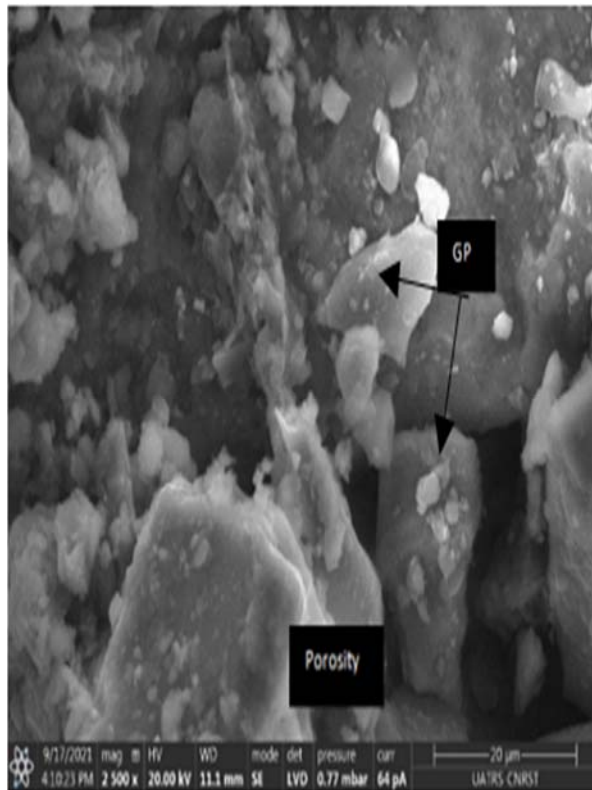
(e) 10 % PV + 6 % cement



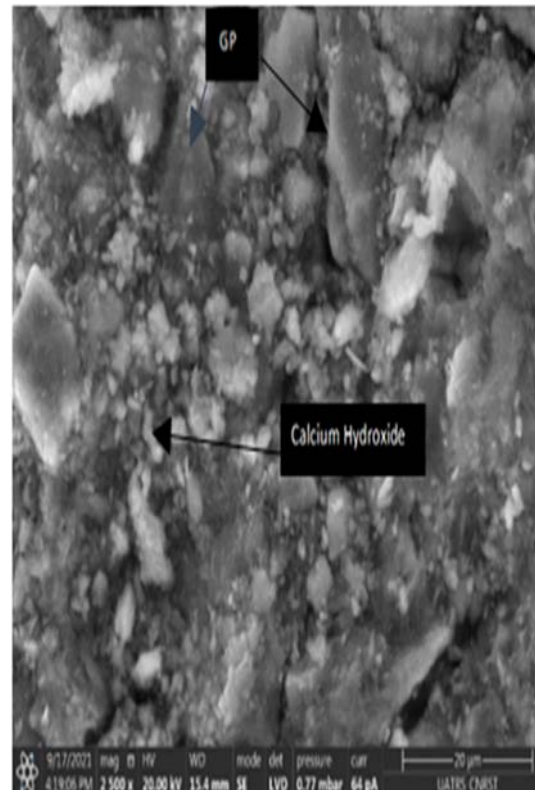
(f) 10 % PV + 12 % cement



(g) 30 % PV + 0 % cement



(h) 30 % PV + 6 % cement



(i) 30 % PV + 12 % cement

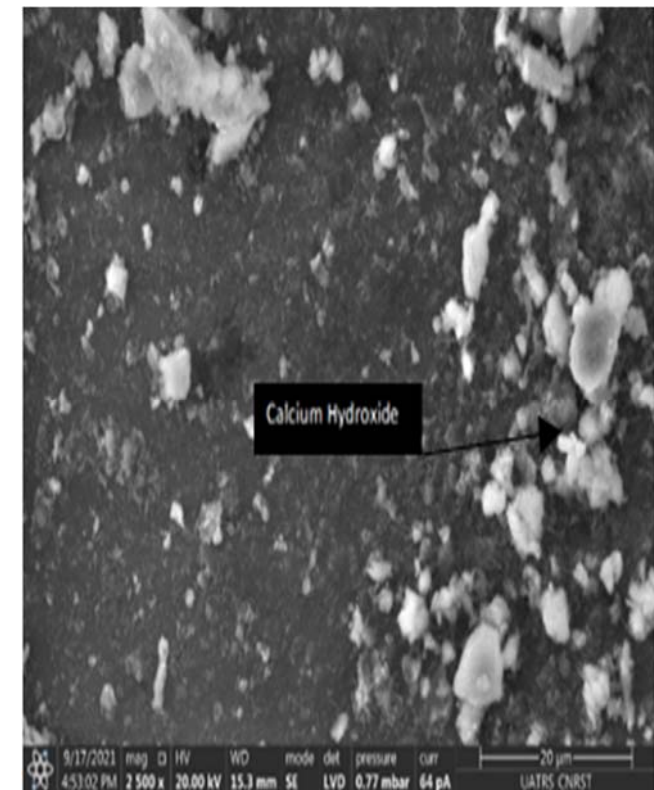


Figure III- 12: Microscope électronique à balayage des matériaux composites ternaires : (a) échantillon témoin (RSB); (b) 0 % PV + 6% ciment; (c) 0 % PV + 12% ciment; (d) 10 % PV + 0 % ciment; (e) 10 % PV + 6% ciment; (f) 10 % PV + 12 % ciment; (g) 30 % PV + 0% ciment; (h) 30% PV + 6% ciment; (i) 30 % PV + 12 % ciment.

III.3.10 Résultats expérimentaux de la composition chimique des matériaux composites ternaires :

Le tableau III.3 présente la composition chimique des matériaux composites ternaires de terre rouge substitué à (0, 10, 20, 30 %) et stabilisé par (0, 6, 12 %). Les résultats de l'EDX montrent que la teneur en silice diminue avec l'augmentation de la quantité de poudre de verre et de ciment dans les matériaux composites ternaires de terre rouge. Cette diminution peut être expliquée par les réactions chimiques qui se produisent lors de la fabrication des composites et par la nature chimique des matériaux ajoutés.

La poudre de verre contient principalement des silicates de calcium et de sodium, ainsi que d'autres éléments tels que l'aluminium et le potassium. L'ajout de poudre de verre à la terre rouge peut conduire à une diminution de la teneur en silice, car une partie de la silice de la terre rouge peut se lier avec le calcium et le sodium provenant de la poudre de verre pour former des silicates. Ces silicates nouvellement formés peuvent ainsi remplacer une partie de la silice dans le matériau composite.

Le ciment est également principalement composé de silicates de calcium et d'aluminium, ainsi que d'autres éléments tels que le fer et le magnésium. L'ajout de ciment peut également conduire à une diminution de la teneur en silice, car le calcium et l'aluminium contenus dans le ciment peuvent réagir avec la silice de la terre rouge pour former des nouveaux liens hydratés de silicates.

En outre, lors de la fabrication des composites, des réactions chimiques se créent entre les différents composants. Le mélange de la terre rouge avec du ciment, de l'eau et de la poudre de verre produit une réaction de cimentation, au cours de laquelle le ciment et l'eau réagissent pour former des composés cimentaires qui lient les différents composants ensemble. Cette réaction peut également entraîner une diminution de la teneur en silice, car certains des composés cimentaires formés peuvent contenir du calcium et de l'aluminium, qui réagissent avec la silice pour former des silicates.

La diminution de la teneur en silice dans les matériaux composites ternaires de terre rouge substitué à la poudre de verre et au ciment peut être expliquée par la formation de silicates à partir des éléments contenus dans la poudre de verre et le ciment, ainsi que par les réactions chimiques qui se produisent lors de la fabrication des composites. Ces interprétations permettent de mieux comprendre les propriétés des matériaux composites ternaires et peuvent aider à optimiser leur composition pour répondre à des besoins spécifiques dans le secteur des bâtiments.

Élément (%)	a	b	c	d	e	f	g	h	i
C	4.35	5.29	7.26	4.19	4.40	5.83	7.47	7.58	8.68
O	52.83	53.18	54.94	50.21	52.58	51.85	52.28	52.80	52.28
Na	3.58	0.38	0.42	0.87	0.80	0.41	3.68	3.61	6.46
Mg	0.64	0.42	0.23	0.59	0.54	0.49	0.54	0.30	0.41
Al	4.91	4.82	8.23	9.01	9.10	9.22	4.36	4.20	2.32
Si	22.64	17.22	10.72	23.23	18.77	15.31	24.71	24.00	21.18
K	0.47	0.85	1.07	0.93	0.99	1.09	0.50	0.69	0.42
Ca	4.81	7.66	17.14	2.18	4.61	8.44	3.23	4.05	6.57
Ti	0.39	0.41	0.32	0.45	0.59	0.49	-	-	0.35
Fe	5.38	6.36	3.26	8.34	7.50	6.98	3.09	2.77	1.32
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tableau III- 3: Composition chimique des matériaux composites ternaires: (a) échantillon témoin (BTS), (b) 0% PV + 6% ciment, (c) 0% PV + 12% ciment, (d) 10% PV + 0% ciment, (e) 10% PV + 6% ciment, (f) 10% PV + 12% ciment, (g) 30% PV + 0% ciment, (h) 30% PV + 6% ciment, and (i) 30% PV + 12% ciment.

III.3.11 Résultats expérimentaux de la diffraction des rayons X des matériaux composites ternaires :

Les analyses DRX des matériaux composites sont présentées à la figure III-13. Les échantillons étaient composés principalement de minéraux de quartz et de calcite. Cette analyse globale a indiqué qualitativement la présence dominante de pics de quartz et de calcite. Les figures III-13, III-14 et III-15 montrent les résultats de la diffraction des rayons X pour chaque matériau composite. L'état pur du matériau présente des pics pour les minéraux de quartz et de calcite. Le pic de quartz est le plus intense, tandis que le pic de calcite est plus faible. Le pic de quartz est associé à la cristallisation de la silice dans la pâte de ciment, tandis que le pic de calcite est associé à la présence de calcite dans la poudre de verre. Lorsque la teneur en poudre de verre est augmentée, on observe une augmentation de l'intensité du pic de quartz et une diminution de l'intensité du pic de calcite. Cela indique que

la cristallisation de la silice est favorisée par l'ajout de poudre de verre avec le ciment, tandis que la présence de calcite est diminuée. De plus, on peut observer la présence de nouveaux pics pour les différents mélanges de poudre de verre. Ces pics sont associés à la cristallisation de nouveaux minéraux tels que l'alumine et la silice amorphe. La cristallisation de ces minéraux est due à la réaction de pouzzolanité entre la poudre de verre et le ciment Portland, qui se produit au-delà de 90 jours. La réaction de pouzzolanité est un processus qui permet de produire de nouveaux hydrates à partir de la silice et de l'alumine présentes dans la poudre de verre.

La diffraction des rayons X montre que l'ajout de poudre de verre au ciment Portland entraîne une modification de la cristallisation des minéraux présents dans le matériau composite. La cristallisation de la silice est favorisée, tandis que la présence de calcite est diminuée.

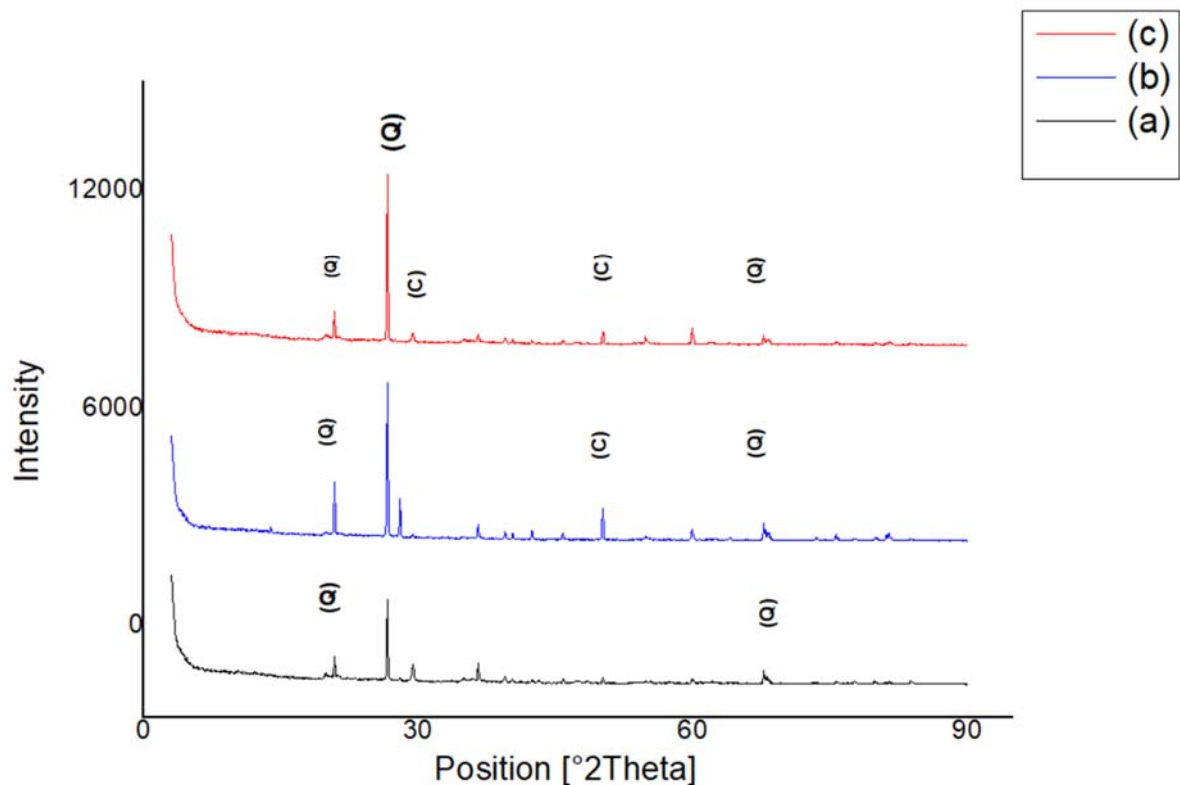


Figure III- 13: Diffraction des rayons X de (a) échantillon témoin (RSB); (b) 0% PV + 6% ciment; (c) 0% poudre de verre + 12% ciment; Q, quartz; C, calcite.

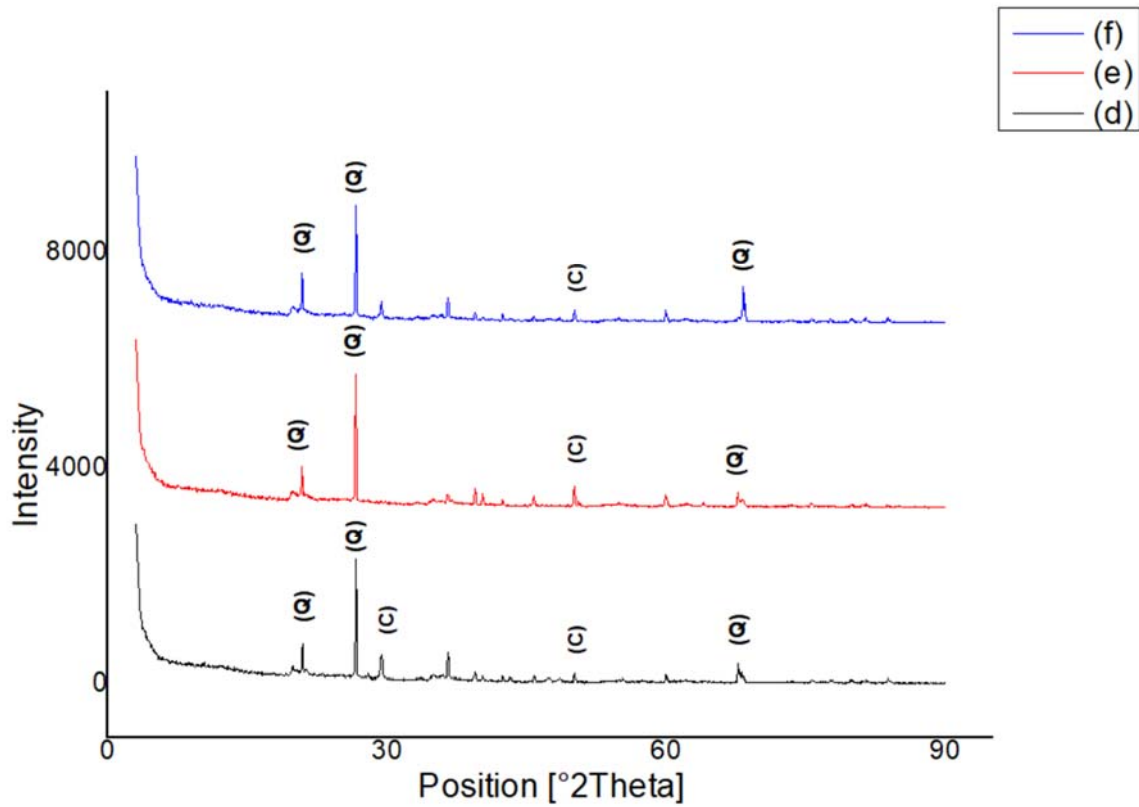


Figure III- 14: Diffraction des rayons X de ; (d) 10% PV + 0% ciment ; (e) 10% PV + 6% ciment ; (f) 10% PV + 12% ciment ; Q, quartz ; C, calcite.

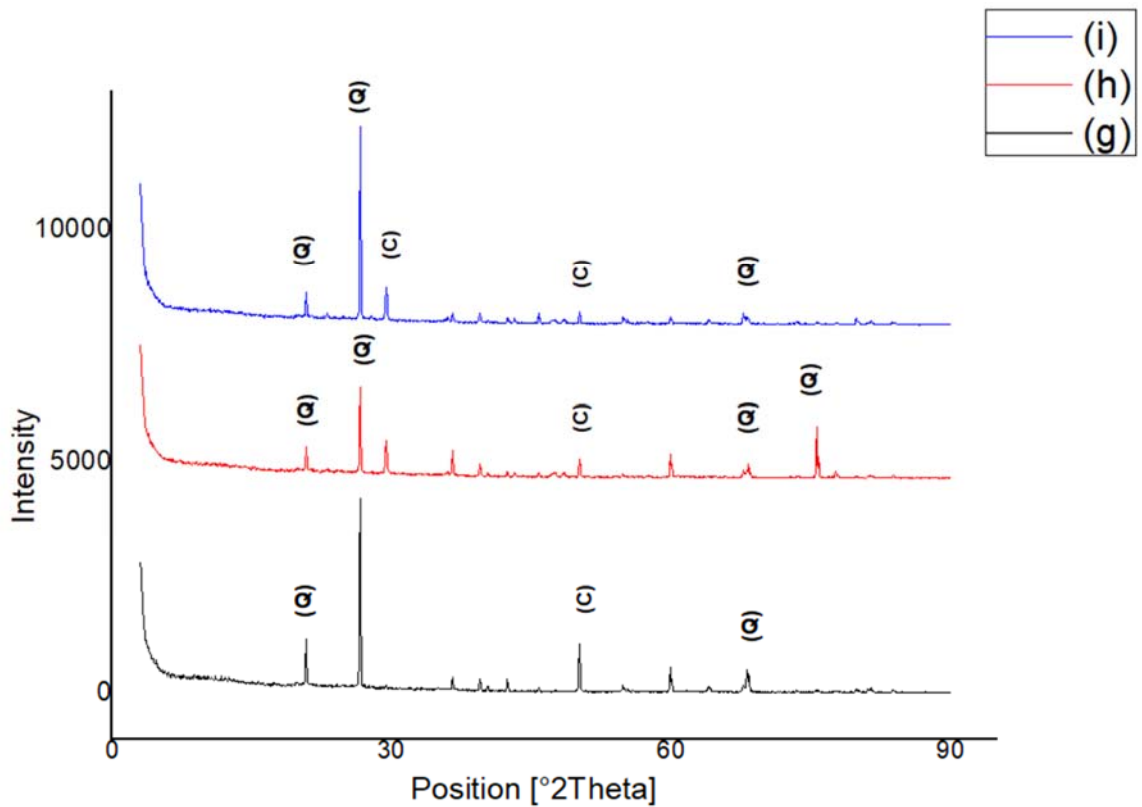


Figure III- 15: Diffraction des rayons X de (g) 30% PV + 0% ciment ; (h) 30% GP + 6% ciment ; (i) 30% poudre de verre + 12% ciment. Q, quartz ; C, calcite.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux de l'étude chimique, morphologique et minéralogique des matériaux composites binaires et ternaires étudiés dans le cadre de cette thèse. Nous avons mis en évidence la composition chimique et minéralogique de ces échantillons, ainsi que leur morphologie. Les méthodes d'analyse utilisées, notamment la diffraction des rayons X et la microscopie électronique à balayage, ont permis d'interpréter les propriétés physiques et chimiques des matériaux étudiés. Les résultats obtenus ont permis de comprendre le comportement des matériaux composites dans des conditions environnementales spécifiques, ce qui est crucial pour leur utilisation dans le domaine des matériaux de construction. En conclusion, les résultats de ce chapitre permettent de mieux comprendre les propriétés des matériaux composites et ouvrent de nouvelles perspectives pour leur utilisation dans des applications spécifiques.

Chapitre 4

Résultats expérimentaux des comportements
mécaniques et thermophysiques des
matériaux composites binaires et ternaires

IV.1 Introduction :

Le comportement mécanique et thermique d'un matériau présentent un des aspects les plus importants car il peut avoir un impact significatif sur l'utilisation, la durabilité et les performances des nouveaux matériaux composites. Dans le domaine de la construction, il est essentiel de connaître les propriétés thermiques des matériaux utilisés afin de garantir le confort des utilisateurs et une utilisation efficace de l'énergie. Le chapitre 4 porte sur l'analyse du comportement mécanique et thermophysique des matériaux composites. Les performances mécaniques visent à déterminer le domaine d'utilisation des nouveaux matériaux composites dans le domaine de construction. L'analyse du comportement thermique vise à évaluer les propriétés thermiques des matériaux étudiés, telles que leur conductivité thermique, leur diffusivité thermique, leur effusivité thermique et leur capacité calorifique. Ces propriétés ont une grande importance pour le choix des matériaux dans des applications spécifiques, telles que l'isolation thermique des bâtiments[58]. Nous avons également étudié l'influence de la variation de la température et du taux de saturation d'eau sur le comportement thermique des matériaux composites. Dans cette partie, nous présenterons les résultats obtenus pour chaque matériau étudié, en comparant les différences du comportement thermique en fonction de leur composition et de leur morphologie. La conclusion de ce chapitre présente une discussion des résultats obtenus et de leur impact sur l'utilisation potentielle de ces matériaux dans le domaine de construction.

Ce chapitre est composé en trois parties :

La partie I présente le comportement mécanique des matériaux composites en poudre de verre. La résistance à la compression est mesurée à l'âge de 7j, 28j et 90j des différents matériaux présentés dans ce chapitre. Le comportement mécanique est étudié pour statuer sur son domaine d'utilisation dans les matériaux de construction avant de juger l'utilité de son application thermique.

La partie II concerne l'analyse des comportements thermophysiques des matériaux composites binaires à savoir le mortier substitué à différents pourcentages de poudre de verre (0 % ; 10% ; 20% ; 30% ; 40% ; 50% et 60%). Une étude sur les propriétés physiques est également présentée en fonction de la teneur en eau (état sec et saturé). Nous avons également étudié l'effet de la variation de la température basse à usage des bâtiments (20°C ; 30°C ; 40°C et 50°C) sur les propriétés thermophysiques de ces matériaux composites.

La partie III présente l'analyse des comportements thermophysiques ternaires des blocs de terre stabilisés au ciment (0% ;6% et 12%) et substitué à différents pourcentages de poudre de verre (0% ; 10% 20% et 30%) à température ambiante. Une étude physique de la masse volumique de ces matériaux en fonction de sa conductivité thermique est également présentée de ce chapitre.

Partie I

Propriétés mécaniques et thermo physiques des matériaux composites binaires

IV.2 Conditions expérimentales des matériaux composites binaires :

Les propriétés mécaniques du mortier composite binaire ont été mesurées à l'âge de 7 j, 28 j et 90 j, à l'aide d'un appareil de compression mécanique. Les échantillons du mortier témoin, et mortier substitué à (0, 10, 20, 30, 40, 50 et 60 %) ont été préparé dans des éprouvettes de 4x4x16 cm³. Les échantillons ont été démoulés ensuite sous 48h, et conserver par des films plastiques jusqu'au jour du concassage.

Les propriétés thermiques du mortier à base des déchets de verre ont été étudiées et interprétées dans cette partie. Premièrement, les échantillons du mortier témoin et mortier substitué en poudre de verre (0 % jusqu'à 60 % de la poudre de verre) ont été étudiés à température ambiante. Nous avons mesuré les paramètres thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique et effusivité thermique) afin d'évaluer l'influence de l'eau dans les mortiers sur ces paramètres. Les mesures de ces paramètres ont été réalisées à l'état sec (séchage à l'étuve) et saturé (immersion dans l'eau). (Voir conditionnement de la préparation des échantillons). Ensuite, nous avons mesuré l'influence de la température ambiante sur les paramètres de la thermo physique (conductivité thermique, chaleur spécifique) pour ces échantillons (mélange de mortier de poudre de verre (0% jusqu'à 60 %)).

Pour effectuer les mesures de la conductivité thermique et la chaleur spécifique, nous avons posé la sonde au-dessus et ensuite au-dessous des échantillons et la valeur retenue est la valeur moyenne.

IV.2 Comportement mécanique des mortiers témoin et substitué en poudre de verre :

Les données présentées dans la figure IV-1 représentent les résultats de tests de la résistance à la compression mécanique pour différents types de mortiers. En examinant les résultats, on peut voir que la résistance à la compression mécanique des mortiers substitués à 10% de poudre de verre est légèrement inférieure à celle des mortiers témoins, à jeune âge. Cela peut s'expliquer par le fait que la poudre de verre est un matériau plus fragile que les autres composants du mortier, ce qui peut affecter la résistance à jeune âge du matériau. Cependant, à mesure que la quantité de poudre de verre dans le mortier substitué augmente, la résistance à la compression mécanique diminue considérablement. Les mortiers substitués à 60 % de poudre de verre présentent une résistance à la compression mécanique à jeune âge, significativement plus faible que les mortiers témoins.

Les réactions pouzzolaniques font référence aux réactions chimiques qui se produisent entre les composants du mortier et des matériaux pouzzolaniques. Ces réactions peuvent se produire en delà de 90 jours, après la fabrication du mortier, créant de nouveaux liens CSH (silicate de calcium hydraté) qui augmentent la résistance et la durabilité du matériau. L'augmentation de la résistance mécanique observée au-delà de 90 jours dans les mortiers pouzzolaniques substitués en poudre de verre peut donc être attribuée à la formation de nouveaux liens CSH. Cela suggère que les mortiers substitués à la poudre de verre peuvent offrir des avantages en termes de résistance à long terme, même s'ils peuvent présenter une résistance inférieure à court terme.

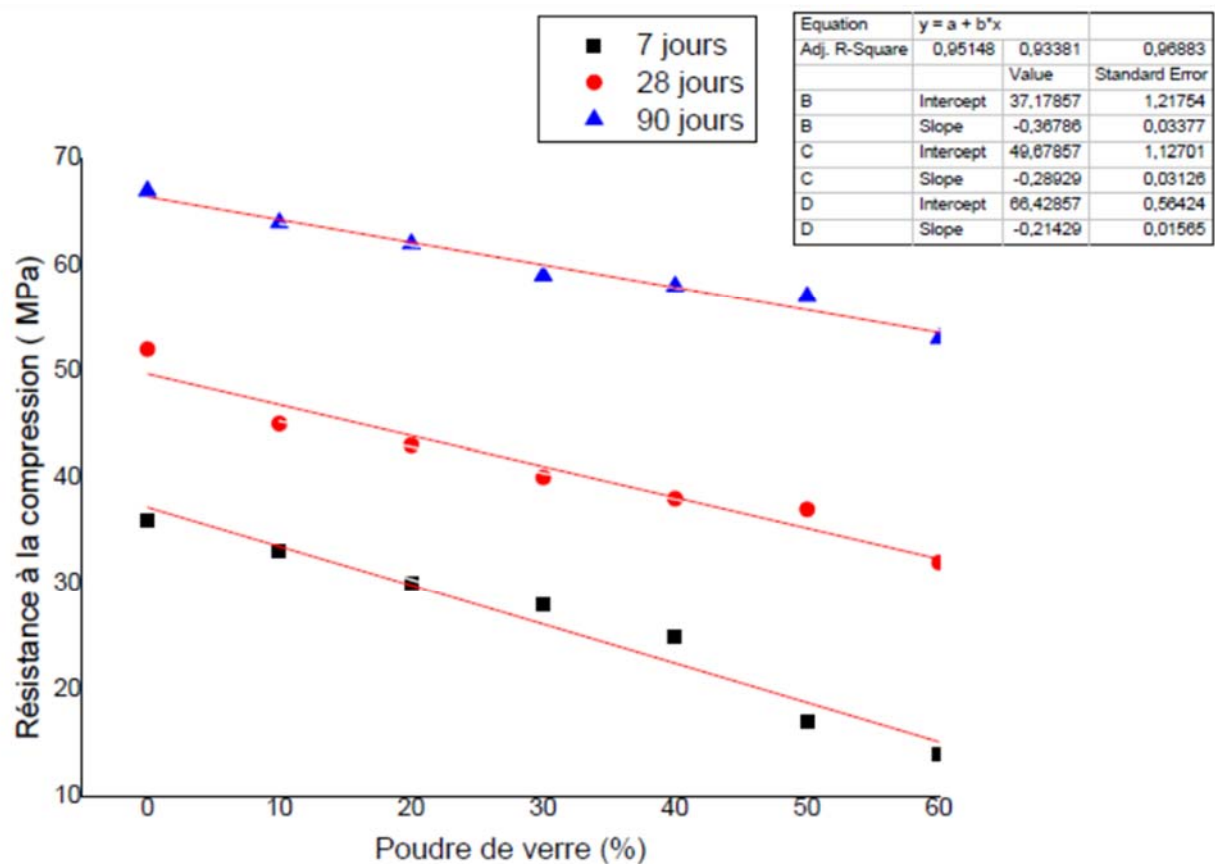


Figure IV- 1: Résistance à la compression des mortiers témoin et substitué en poudre de verre à l'âge de 7j, 28j, et 90 jours.

Le tableau IV-1' indique la variation de la résistance à la compression du mortier composite binaire, à forte teneur en poudre de verre par rapport au mortier témoin. La résistance à la compression diminue d'une manière remarquable au moyen terme, entre 28 jours et 90 jours. Ceci est dû à l'activation des réactions de pouzzolanicités du verre avec la matrice cimentaire. Les résultats du microscope électronique à balayage sont conformes avec les performances mécaniques de ce matériau.

	7 jours	28 jours	90 jours
Mortier témoin	37	52	67
MGP 10%	35	45	64
MGP 20%	30	40	62
MGP 30%	28	43	59
MGP 40%	25	40	58
MGP 50%	17	37	57
MGP 60%	14	32	53

Tableau IV-1' : Résultats numériques des résistances de compression du mortier composite binaire à l'âge de 7 jours, 28 jours et 90 jours.

Il est important de noter que l'objectif de cette étude est de caractériser les performances mécaniques des matériaux composites, afin de juger d'abord leur utilité et application dans le domaine de construction. Le tableau IV-2' indique les pourcentages de variation de la résistance à la compression du mortier composite binaire. Nous pouvons conclure que la résistance à la compression du mortier substitué à 60 % de poudre de verre, à l'âge de 90 diminue légèrement de 21 % en comparaison avec le mortier témoin.

	7 jours	28 jours	90 jours
ΔR_c (MGP 60 % - MGP 0 %)	62 %	38 %	21 %

Tableau IV-2' : pourcentages de variation de la résistance à la compression du mortier composite binaire

IV.3 Masse volumique et son effet sur la conductivité thermique :

Les masses volumiques des échantillons du mortier ont été mesurés à température ambiante dans les deux états hydriques à l'aide d'une balance qui mesure la masse des échantillons en grammes avec une marge d'incertitude de 0.2 grammes. Le pied à coulins permet de mesurer le volume des échantillons. Le tableau IV-1 donne les mesures de la masse volumique des échantillons du mortier à différentes pourcentages de la poudre de verre (0 % jusqu'à 60 %) à l'état sec et à l'état saturé. Nous constatons la diminution de la masse volumique en fonction du pourcentage de la poudre de verre. De même, la masse volumique augmente, lorsqu'on passe de l'état sec à l'état saturé. Ceci est dû au fait qu'à l'état saturé, les pores sont occupés par l'eau au lieu de l'air. Et par conséquent, la masse volumique de l'eau est plus grande que celle de l'air [70].

MGP(%)	0	10	20	30	40	50	60
SATURE	2,1	2,07	2,04	2,02	2,01	2	1,98
SEC	2,06	1,97	1,95	1,94	1,9	1,86	1,83

Tableau IV- 1: Masses volumiques des échantillons à l'état sec et saturé

La masse volumique des mortiers diminue légèrement à l'état sec de 2,06 à 1,83 g/cm³ et à l'état saturé de 2,1 à 1,98 g/cm³ en fonction de l'ajout de la poudre du verre (tableau IV-2). À l'état sec, la diminution de la masse volumique dépend essentiellement de l'augmentation de la surface spécifique de la poudre du verre et de la forme de la poudre du verre qui rend le matériau plus compact. À l'état sec, la masse volumique des échantillons diminue de 11 % lorsqu'on passe de l'état pur à 60 % de poudre de verre, et à l'état saturé, la masse volumique diminue de 6 % lorsqu'on passe de l'état pur à l'état mélange de 60 % de poudre de verre. Ceci pourrait être expliqué par la faible absorption de l'eau dans le verre. L'augmentation de la masse volumique des échantillons à l'état saturé par rapport à l'état sec pourrait être expliqué par l'occupation d'eau dans les pores vides en air, ce qui induit par la suite à l'augmentation de la masse volumique des mortiers

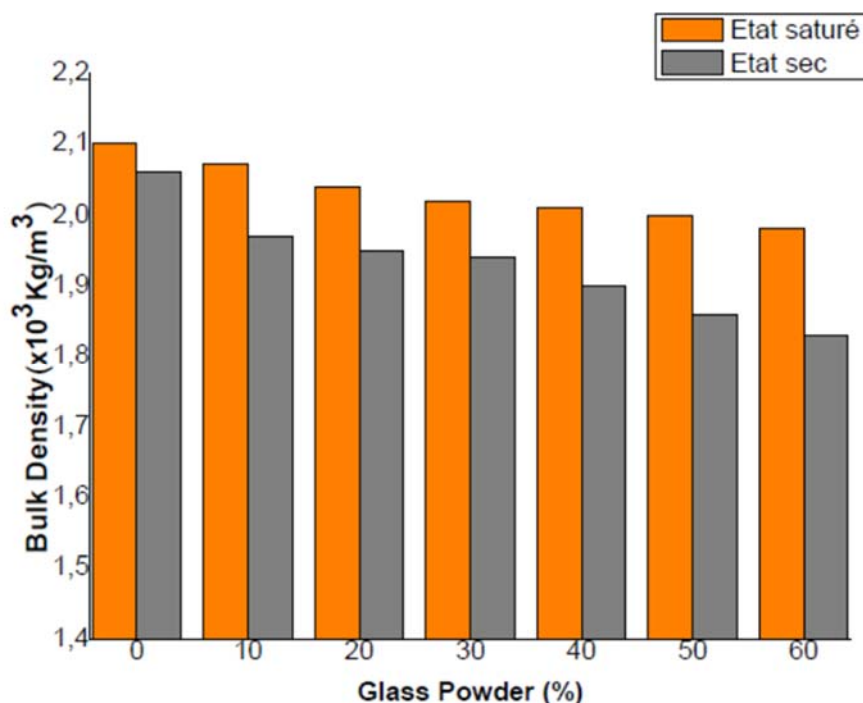


Figure IV- 2: masse volumique des mortiers composites binaires à 90 jours

La figure IV-3 montre la variation de la conductivité thermique du mortier incorporé par la poudre de verre en fonction de la masse volumique pour différentes valeurs du pourcentage de la poudre de verre. On constate que la variation est linéaire :

$$\lambda = a\rho + b$$

λ : la conductivité thermique. ρ : la masse volumique

$a = 2.38$ et $b = -3.49$ sont des constantes déduites de la figure IV-3.

Plus la poudre de verre est ajoutée dans le mortier, la conductivité thermique diminue en fonction de la diminution de la masse volumique. L'augmentation du taux de substitution de la poudre de verre conduit à une augmentation du volume des pores qui cause une densité plus faible, et par conséquent la conductivité thermique des mortiers diminue. La densité a un effet significatif sur la conductivité thermique[71], une augmentation de la densité résulte sur une augmentation de la porosité et par la suite une augmentation de la conductivité thermique. Selon la figure IV-3, il est possible d'établir une loi empirique qui permet d'écrire la variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique dans le cas des mortiers à différents taux de substitution de poudre de verre.

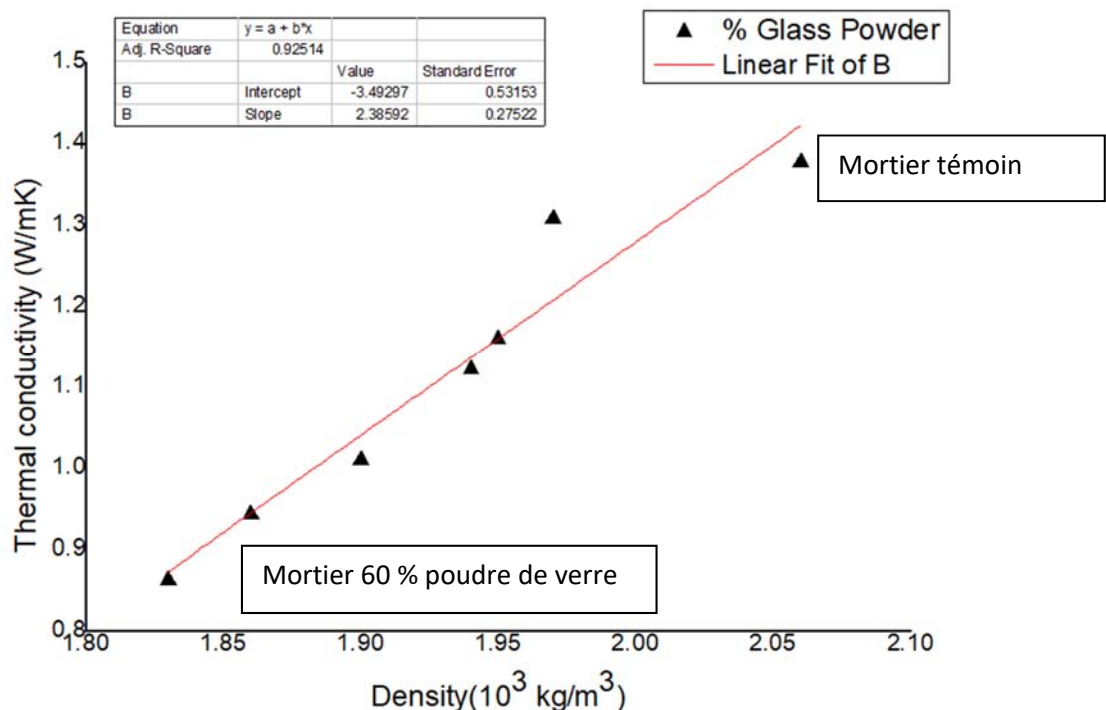


Figure IV- 3: relation entre la conductivité thermique et la masse volumique des mortiers composites binaires

IV.4 Influence de la teneur en eau sur les paramètres thermiques à température ambiante :

IV.4.1 Variation de la conductivité thermique en fonction du taux de substitution de verre à l'état sec et saturé:

La caractérisation thermique des échantillons du mortier témoin et mortiers à haute teneur en poudre de verre a été faite à température ambiante 21 ± 1 °C. L'étude a été réalisée suivant deux états hydriques, à l'état sec (séchage dans une étuve à 60 °C) et à l'état saturé (imbibition dans un bac d'eau pendant 48h).

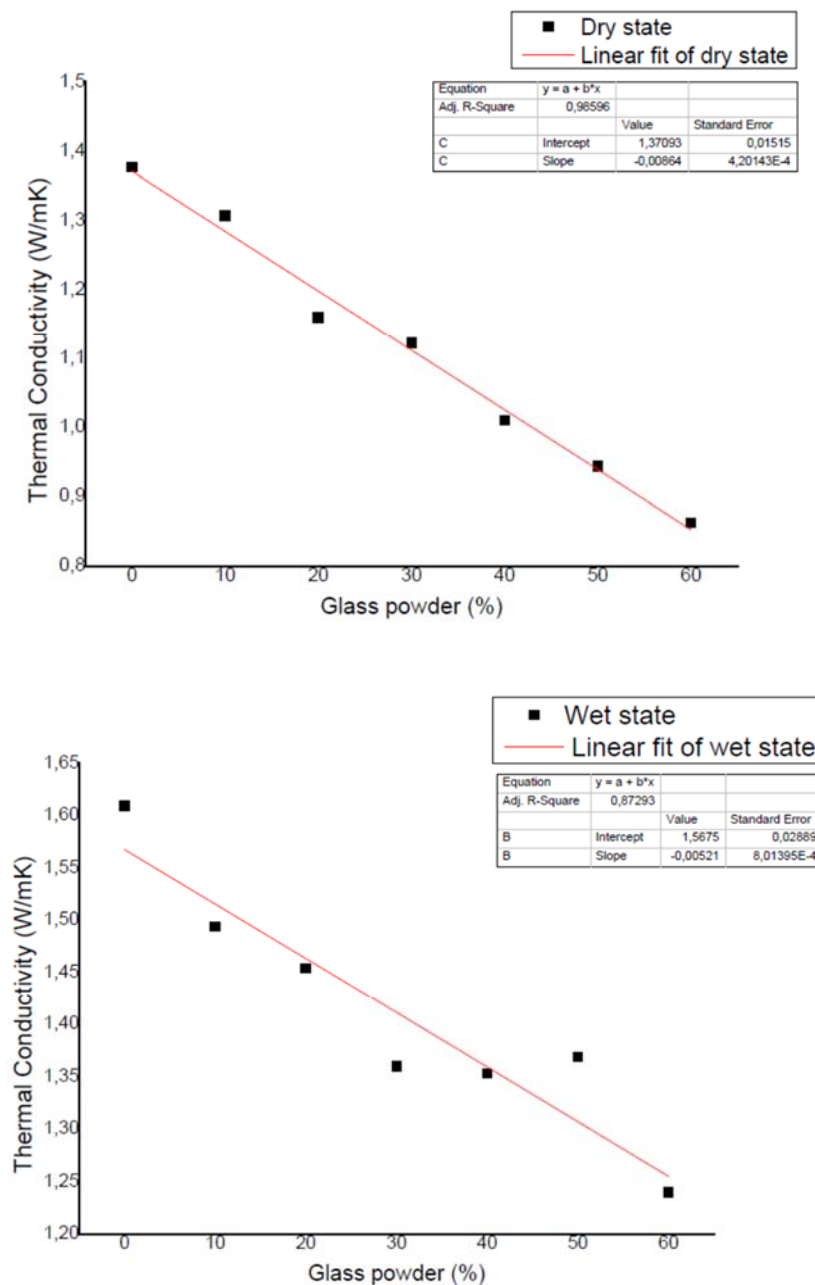


Figure IV- 4: Résultats de la conductivité thermique du mortier composite binaire à l'état sec et saturé à température ambiante

Les figures IV-4 et IV-5 montrent l'évolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage d'ajout de poudre de verre, à l'état sec et à l'état saturé. On constate que la conductivité thermique à l'état saturé est plus grande qu'à l'état sec.

À l'état sec, la conductivité thermique diminue de 37 %, (de 1,377W/mK à 0,863W/mK), et à l'état saturé, la diminution est de 23 %, (de 1,609 à 1,24W/mK).

La conductivité thermique diminue avec l'ajout de la poudre de verre, ce qui est confirmé par les travaux de recherche bibliographique [72]. La conductivité thermique des mortiers dépend essentiellement de la taille et distribution des pores, de la nature minéralogique de la phase solide du matériau et du degré de cristallisation des phases minéralogiques. Le verre étant donc amorphe qu'il soit moins conducteur chose qui explique la faible conductivité thermique des mortiers. L'incorporation de la poudre de verre dans le mortier permet aussi une augmentation des pores et par la suite une diminution de la conductivité thermique des échantillons, ce qui est en accord avec la référence [33]. À l'état sec, les échantillons incorporés avec un taux de substitution de la poudre de verre élevé (40, 50,60 %) contiennent de l'air dans les pores. Or, la conductivité thermique de l'air est de 0,0262W/mK environ 100 fois plus faible que celle du béton[52].

L'augmentation de la conductivité thermique des mortiers à l'état saturé (immersion dans l'eau) est due à la quantité d'eau absorbée dans les pores. Par ailleurs, un taux de substitution de la poudre de verre élevé pour les échantillons saturés en eau conduit à une augmentation des pores accessibles en eau. Or, la conductivité thermique de l'eau à température ambiante est plus élevée à celle de l'air ce qui explique l'augmentation de la conductivité thermique à l'état saturé.

L'incorporation de la poudre de verre dans le mortier peut entraîner une augmentation de la porosité des échantillons et, par conséquent, une réduction de leur conductivité thermique. Cela signifie que l'ajout de poudre de verre dans le mortier peut créer des pores supplémentaires qui peuvent être remplis d'air, ce qui diminue la capacité du matériau à transmettre la chaleur. Lorsqu'ils sont secs, les échantillons contenant une forte proportion de poudre de verre (40%, 50% ou 60%) présentent de l'air dans leurs pores. Or, la conductivité thermique de l'air est d'environ 0,0262 W/mK, soit environ 100 fois moins que celle du béton. Cela signifie que lorsque les échantillons sont secs, l'air présent dans les pores peut réduire significativement la conductivité thermique du matériau. Lorsqu'ils sont immergés dans l'eau, la conductivité thermique du matériau composite binaire, qui est le mortier substitué en poudre de verre, augmente en raison de l'eau absorbée dans leurs pores. Cela s'explique par le fait que l'eau a une conductivité thermique plus élevée que l'air, ce qui permet au matériau de mieux transmettre la chaleur lorsqu'il est immergé dans l'eau.

En conclusion, un matériau composite et écologique avec une conductivité thermique de 0,86 W/mK pourrait être considéré comme un matériau isolant pour les éléments non structurels d'un bâtiment. Cependant, il est important de noter que la conductivité thermique n'est qu'un seul facteur à prendre en compte dans le choix d'un matériau isolant. D'autres paramètres tels que la chaleur spécifique, la diffusivité thermique et la durabilité doivent également être pris en compte.

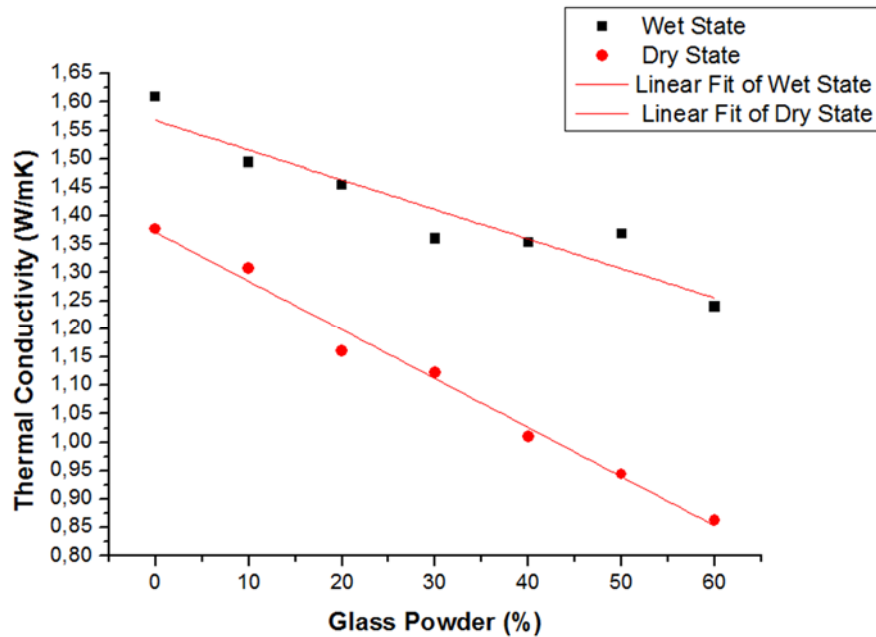


Figure IV- 5: Comparaison d l'effet de la conductivité thermique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante

IV.4.2 Variation de la chaleur spécifique en fonction du taux de substitution de verre à l'état sec et saturé

Les mesures de la chaleur spécifique des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre de verre, et dans les deux états hydriques (saturé/sec) sont présentées sur les figures IV-6 et IV-7. À l'état sec, la chaleur spécifique diminue en fonction de l'ajout des pourcentages de verre de 2155 à 1757 KJ/m³K) soit une variation de 19 % lorsque la substitution passe de 0 % à 60 %.

La diminution de la chaleur spécifique à l'état saturé est de 2325 à 1979 kJ/m³K soit une variation de 15%. Contrairement à la conductivité thermique, la chaleur spécifique ne dépend pas de la manière dont sont agencés ses différents constituants mais de la fraction volumique de ses composants ainsi leur chaleur spécifique respective[52].

La chaleur spécifique de la poudre de verre à température ambiante est de 1.37 kJ/kg.K, celle de l'air est de 1 kJ/kg K et celle de l'eau est de 4,1813 kJ/kgK.

La légère diminution de la chaleur spécifique à l'état sec en fonction de l'augmentation des pourcentages de la poudre de verre pourrait être expliqué par la faible valeur de la chaleur spécifique du verre, ainsi l'augmentation du volume d'air dans les pores en fonction du taux de substitution de la poudre de verre n'a pas une influence remarquable puisque la valeur de la chaleur spécifique de l'air est plus faible par rapport à celle du mortier ciment.

La saturation des échantillons par immersion conduit à l'augmentation de la quantité d'eau absorbée dans les pores. L'augmentation de la chaleur spécifique du matériau est attribuée au remplacement de l'air qui a une faible valeur de chaleur spécifique par rapport à l'eau.

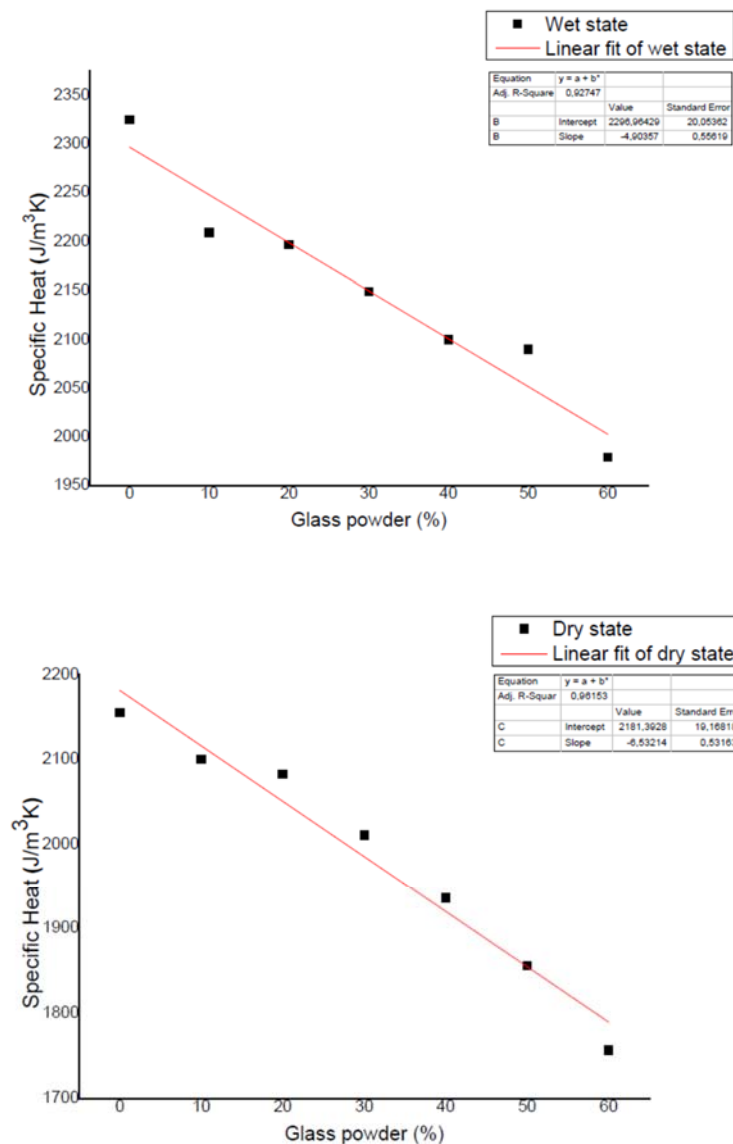


Figure IV- 6: Résultats de la chaleur spécifique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante

La chaleur spécifique d'un matériau dépend de sa composition chimique, de sa structure atomique et des fractions volumiques de chaque constituant dans le matériau composite. La substitution de la poudre de verre entraîne une modification de la composition chimique du matériau. La poudre de verre est principalement composée de silice, qui est un matériau à faible conductivité thermique. Lorsqu'elle est ajoutée au mortier, elle remplace une partie de la matière organique et de la cimentation qui sont présentes dans le mortier traditionnel. Cette modification de la composition chimique peut entraîner une diminution de la chaleur spécifique du mortier, car la silice a une chaleur spécifique inférieure à celle de la matière organique et de la cimentation. De plus, nous avons pu déterminer que l'incorporation de la poudre de verre entraîne la création de nouveaux liens chimiques, appelés liens CSH (Calcium Silicate Hydrate). Ces liens sont formés entre la silice de la poudre de verre et le ciment du mortier, et peuvent contribuer à une diminution de la chaleur spécifique du matériau. Cela s'explique par le fait que les liens CSH sont moins stables thermiquement que les autres liens chimiques présents dans le mortier, et donc moins capables de stocker de la chaleur. En résumé, la diminution de la chaleur spécifique du mortier contenant de la poudre de verre est principalement due à la modification de sa composition chimique, à la création de nouveaux liens CSH et la fraction volumique de la poudre de verre. Ces facteurs contribuent à une diminution de la capacité du matériau à stocker de la chaleur[67].

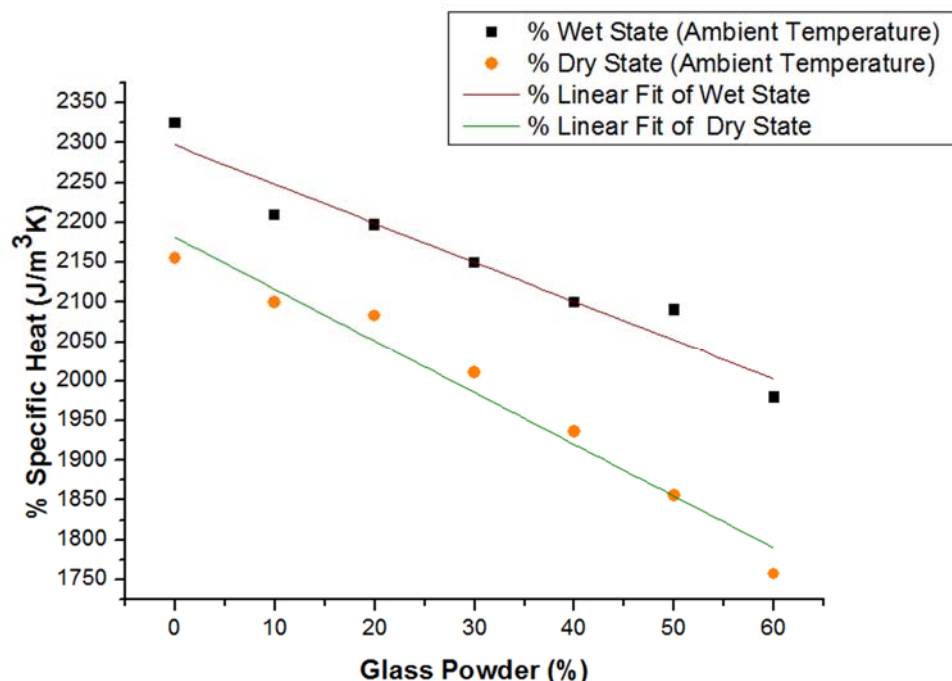


Figure IV- 7: Comparaison de l'effet de la chaleur spécifique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante

IV.4.3 Variation de la diffusivité thermique en fonction du taux de substitution de verre à l'état sec et saturé :

La diffusivité thermique est le quotient de la conductivité thermique sur la chaleur spécifique.

$$d = \lambda / C_p$$

d : diffusivité thermique ; λ : la conductivité thermique ; C_p : la chaleur spécifique.

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures IV-8 et IV-9.

La diffusivité thermique a diminué de 0,63 à 0,49 en moyenne de 22% à l'état sec par rapport à l'état saturé qui a diminué de 0,69 à 0,64 en moyenne de 7% en fonction de la substitution de la poudre de verre.

Le passage de l'état sec à l'état saturé montre une augmentation de la diffusivité thermique, et ceci s'explique par l'occupation des pores par l'eau.

Par ailleurs, les résultats précédents ont montré une diminution de la conductivité thermique et de la masse volumique en fonction de l'ajout de la poudre de verre, et une légère diminution de la chaleur spécifique.

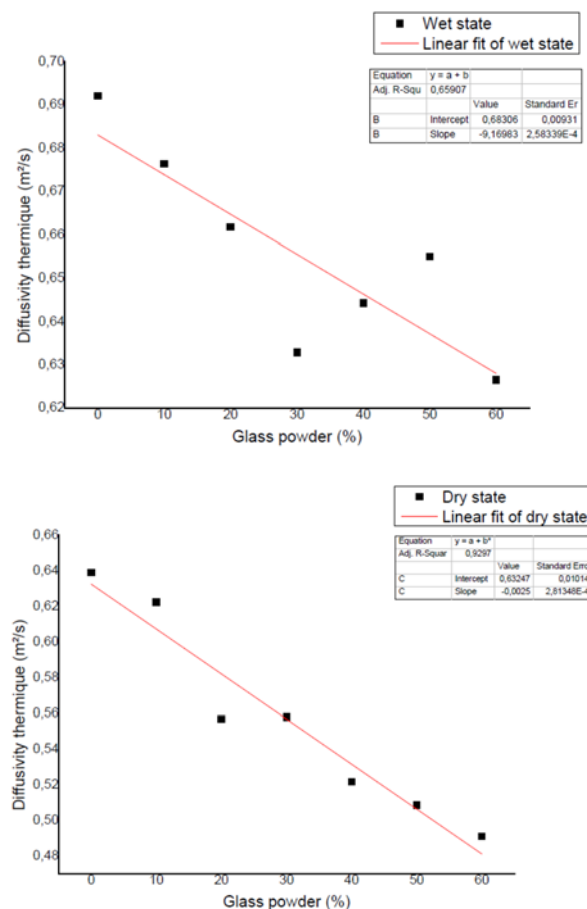


Figure IV- 8: Résultats de la diffusivité thermique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante

En effet, la diffusion de la chaleur se fait principalement par convection à l'intérieur des pores et plus ces derniers sont petits, moins il y a de place pour la circulation de l'air et donc moins la chaleur peut se diffuser. Cela peut expliquer pourquoi la diffusivité thermique du mortier diminue avec l'ajout de poudre de verre.

Cependant, il est important de noter que d'autres facteurs peuvent également influencer la diffusivité thermique du matériau, notamment la porosité, la conductivité thermique, la densité, la microstructure, la nature et la quantité de poudre de verre.

- La porosité : l'ajout de poudre de verre augmente la porosité du mortier, ce qui peut entraîner une diminution de la diffusivité thermique en raison de la présence d'air dans les pores du matériau.
- La conductivité thermique : la conductivité thermique du verre est inférieure à celle du ciment, ce qui peut entraîner une réduction de la diffusivité thermique du mortier en poudre de verre.
- La densité : la densité du mortier en poudre de verre est inférieure à celle du mortier classique, ce qui peut également contribuer à une diminution de sa diffusivité thermique.
- La microstructure : la microstructure du mortier en poudre de verre est déduite différente de celle du mortier classique, ce qui peut avoir un impact sur sa diffusivité thermique.
- La nature et la quantité de poudre de verre ajoutée : Le choix du type de verre sodocalcique, contenant une grande quantité de formateur de verre dont la silice ainsi que la quantité de poudre de verre ajoutée contribuent à la diminution de la diffusivité thermique du mortier [73]. En effet, plus la quantité de poudre de verre est élevée, plus la diffusivité thermique du mortier peut être réduite.

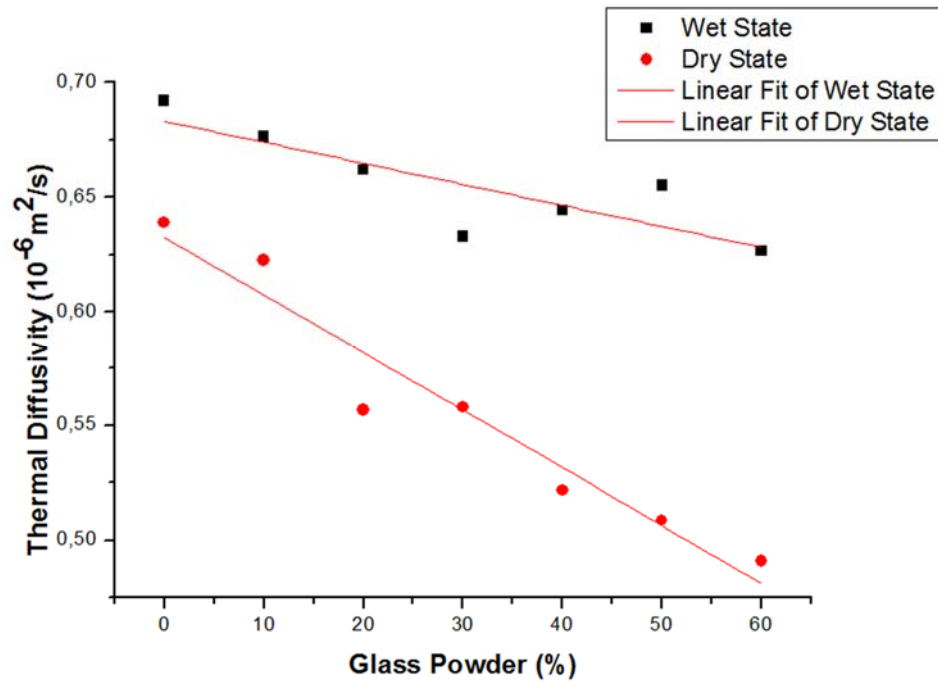


Figure IV- 9: Comparaison d l'effet de la diffusivité thermique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante

IV.4.4 Variation de l'effusivité thermique en fonction du taux de substitution de verre à l'état sec et saturé :

Les mesures de l'effusivité thermique du mortier composite binaire contenant une forte teneur en poudre de verre ont été déduites par l'équation suivante :

$$e = \sqrt{\lambda} * \rho C_p$$

Où e : l'effusivité thermique ;

λ : la conductivité thermique ;

C_p : la chaleur spécifique

Les résultats expérimentaux de la variation de l'effusivité thermique en fonction de la substitution de la poudre de verre sont présentés dans la figure IV-10 et IV-11. Il existe plusieurs facteurs qui peuvent influencer l'effusivité thermique d'un mortier de poudre de verre. Tout d'abord, la conductivité thermique du mortier peut affecter son effusivité thermique.

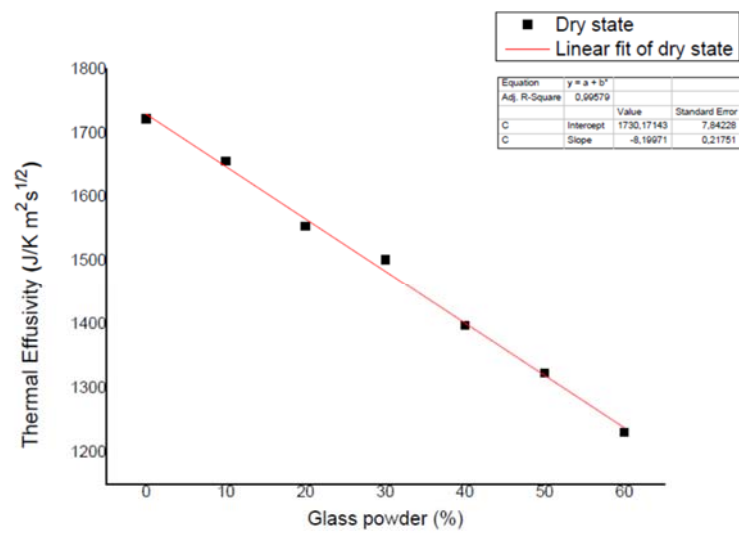
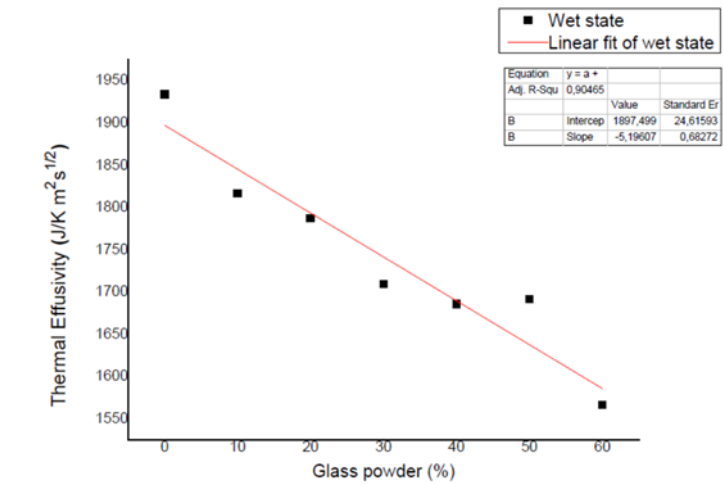


Figure IV- 10: Résultats de l'effusivité thermique du mortier binaire à l'état sec et saturé à température ambiante

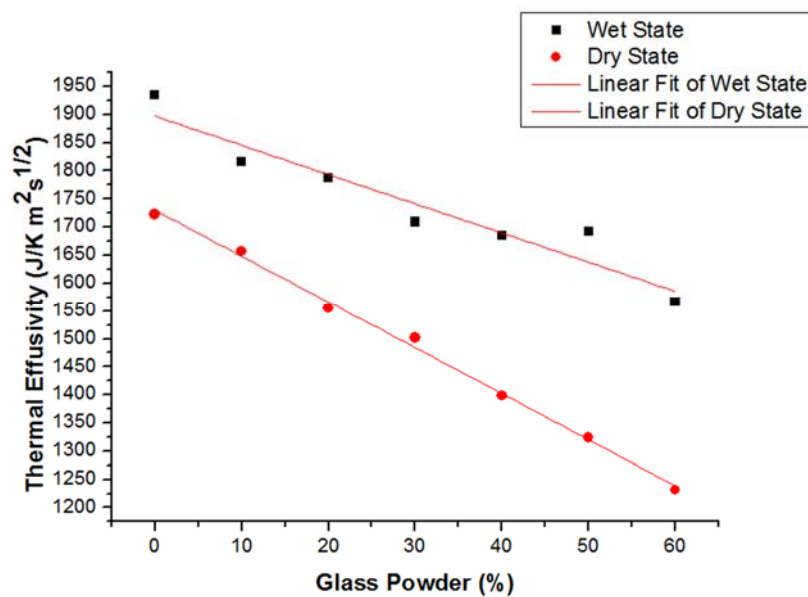


Figure IV- 11: L'effet de l'effusivité thermique du mortier binaire en fonction du pourcentage de la poudre de verre à l'état sec et saturé à température ambiante

Le tableau IV-2 présente un récapitulatif des valeurs numériques de la masse volumique et les propriétés thermiques des échantillons des mortiers composites binaires à l'état sec et à l'état saturé à température ambiante (20 °C) pour différents pourcentages du mélange de la poudre de verre.

Propriétés	Masse volumique		Conductivité thermique		Chaleur spécifique		Effusivité thermique		Diffusivité thermique	
Etat	saturé	sec	saturé	sec	saturé	sec	saturé	sec	saturé	sec
Mortier témoin	2,10	2,06	1,61	1,38	2325	2155	1934,15	1722,62	0,69	0,64
10 % MGP	2,07	1,97	1,49	1,31	2209	2100	1816,66	1656,71	0,68	0,62
20 % MGP	2,04	1,95	1,45	1,16	2197	2083	1787,30	1554,44	0,66	0,56
30 % MGP	2,02	1,94	1,36	1,12	2149	2011	1709,57	1502,11	0,63	0,56
40 % MGP	2,01	1,90	1,35	1,01	2100	1936	1685,62	1398,34	0,64	0,52
50 % MGP	2,00	1,86	1,37	0,94	2090	1856	1691,51	1323,66	0,66	0,51
60 % MGP	1,98	1,83	1,28	0,86	1979	1757	1589,71	1231,38	0,65	0,49

Tableau IV- 2: Propriétés thermiques des échantillons binaires à l'état sec et saturé à Température ambiante 20° C

IV.5 Influence de la température sur la conductivité thermique et la chaleur spécifique :

La température est un facteur qui influence les propriétés thermiques du béton et des mortiers. Dans la littérature[37], des recherches sont réalisées sur les propriétés thermiques du mortier à base du verre à haute température, pour des utilisations dans le domaine industriel. Or, très peu nombreuses sont les études sur les propriétés thermiques des mortiers de verre à basse température.

Dans cette partie, nous avons étudié l'influence de la température ambiante sur la conductivité thermique et la chaleur spécifique du mortier témoin et mélange du mortier verre à différents pourcentages de substitution (10, 20, 30, 40, 50,60 %) pour des températures allant de 20 °C à 50 °C. Les échantillons sont dans un état sec obtenus après pré séchage à l'étuve.

IV.5.1 Effet de la Température sur la conductivité thermique des mortiers substitués à différent pourcentage de poudre de verre :

Les résultats sont présentés sur les figures IV-12, IV-13 et IV-14 montrent une augmentation de la conductivité thermique en fonction de la température. En parallèle, on constate une diminution de la conductivité thermique en fonction de la substitution de la poudre de verre. La conductivité thermique augmente de 1,377 à 1,684 W/mK pour le mortier témoin lorsque la température s'élève de 20 °C à 50 °C, et augmente de 0,863 à 1,11 W/mK pour le mortier à haute teneur en poudre de verre (60 % de la poudre de verre).

Par ailleurs, on observe de plus près, une augmentation nette de la conductivité thermique entre 20 et 40 °C qui semble ralentit au-delà de 40 °C. Généralement, la conductivité thermique des mortiers dépend des trois différentes phases qui les composent, la phase solide, liquide et gazeuse qui s'évaluent dans cette plage de température (20 à 50 °C).

L'augmentation de la conductivité thermique en fonction de la température de la phase solide des bétons et mortiers dépend des phases minéralogiques des différents constituants et de leur proportion dans le matériau. La conductivité thermique évolue avec l'augmentation de la température ambiante pour plusieurs minéraux (quartz amorphe...). Par ailleurs, le mortier à base de la poudre de verre contient des minéraux tels que le quartz. Les échantillons ayant été séché à l'étuve nous permettent de supposer, théoriquement, que l'augmentation de la température ne dépend pas de la présence d'eau, sauf l'eau piégée dans les pores fermées et l'eau absorbée. L'augmentation de la conductivité thermique peut être expliquée donc par la conduction de l'eau piégée, l'eau adsorbée et l'air. Or, les valeurs de la conductivité thermique de l'air et de l'eau dans la plage de température (20-50 °C) sont de (0,0262 à 0,028 W/mK) et (0,5818 à 0,6445 W/mK) respectivement. Ces valeurs restent donc modestes et ne peuvent pas expliquer entièrement cette augmentation de la conductivité avec la température.

Ceci pourrait être expliqué aussi par la diminution des pores entre les grains qui se chauffent en augmentant la température[21]. La taille des particules du verre est fine supérieure à 100µm et par la suite le flux de chaleur passe entre les particules du verre, sable et ciment.

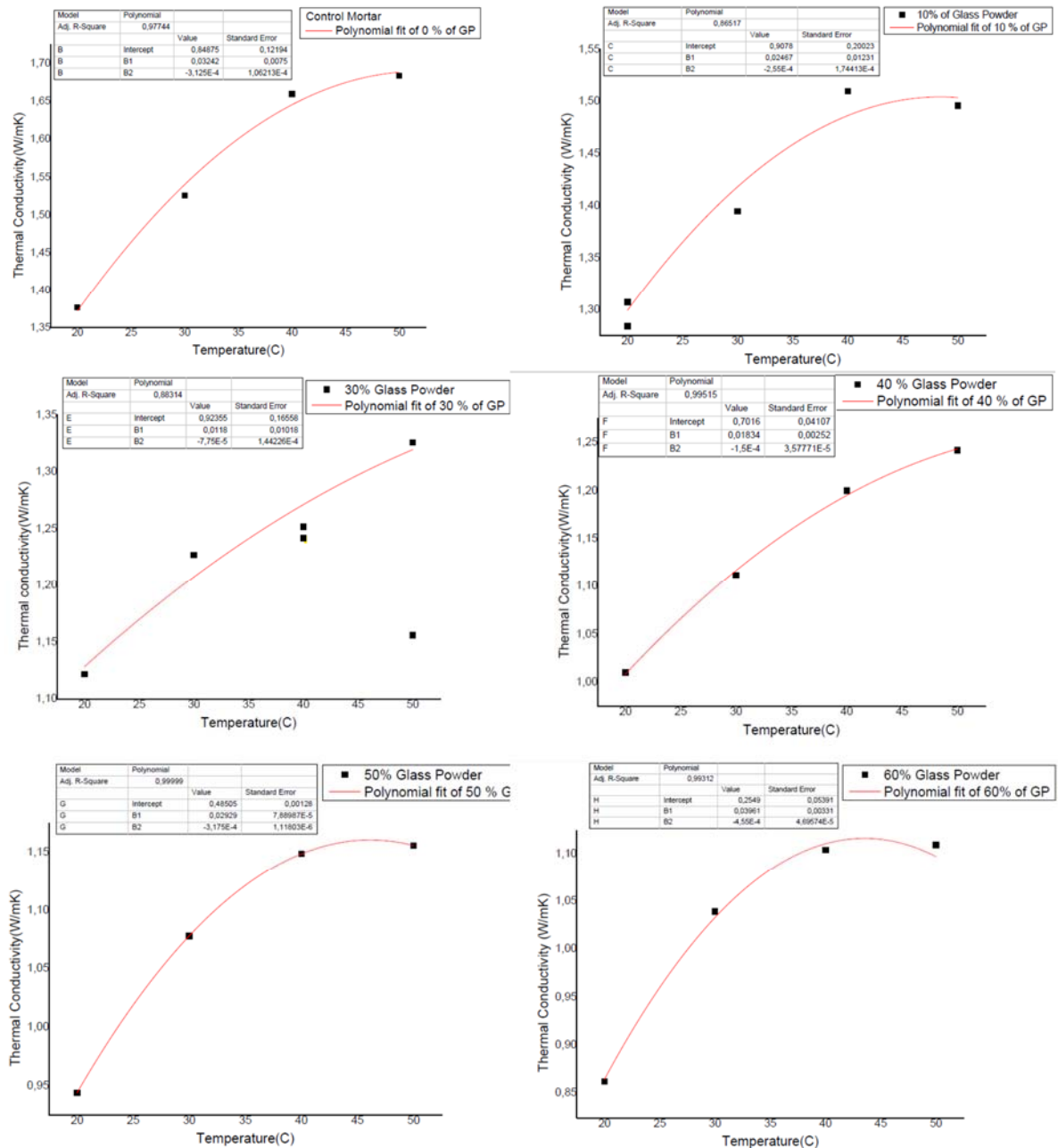


Figure IV- 12: Résultats de la conductivité thermique du mortier binaire en fonction de la température

Lorsque la température augmente, les particules du matériau se mettent en mouvement et se vibrent plus rapidement. Cela permet une augmentation de l'énergie cinétique des particules, ce qui facilite le transfert de chaleur par diffusion. En d'autres termes, plus la température est élevée, plus les particules sont mobiles et donc capables de transmettre la chaleur plus facilement, ce qui se traduit par une augmentation de la conductivité thermique.

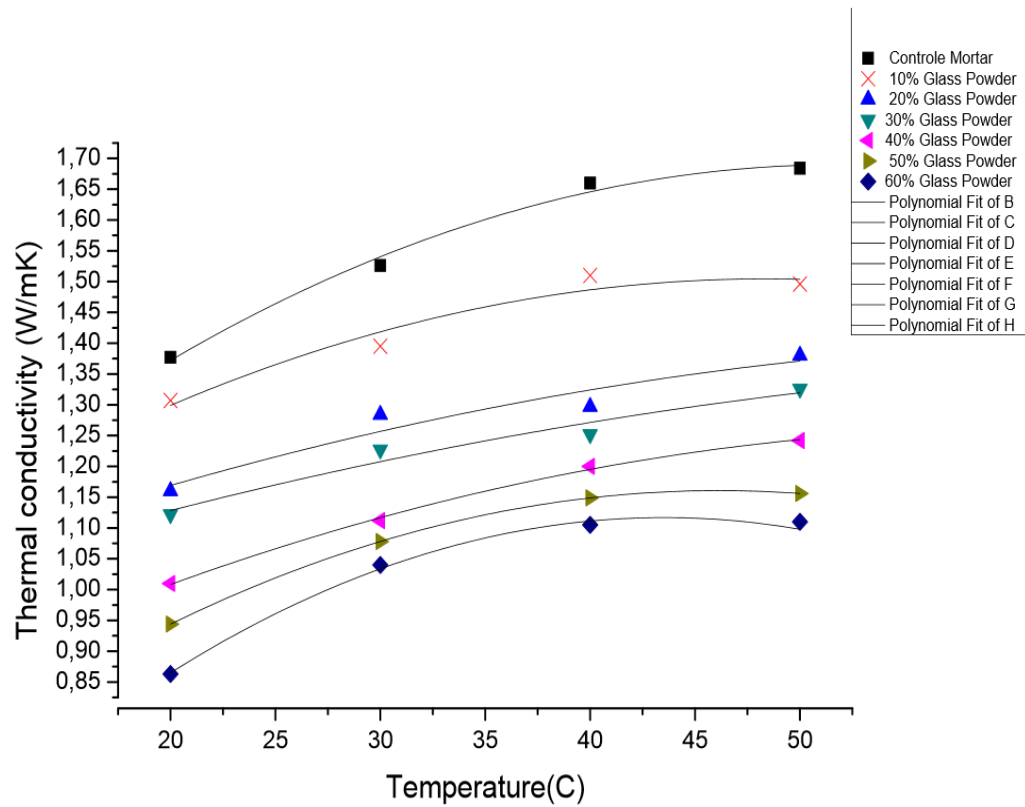


Figure IV- 13: Effet de la substitution de la poudre de verre sur la conductivité thermique en fonction de la température

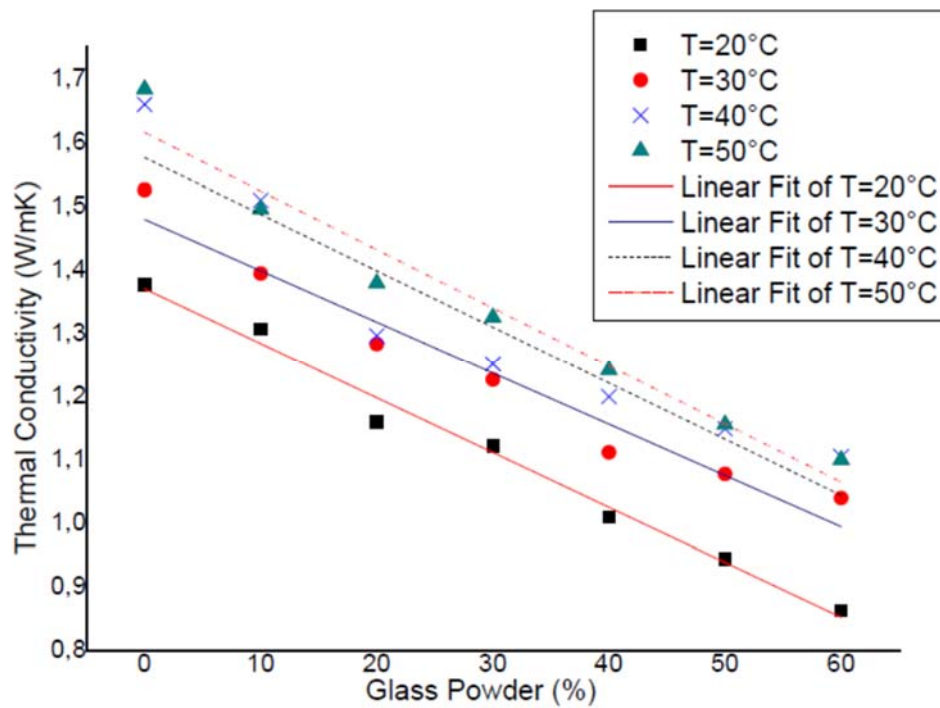


Figure IV- 14: Effet de la Température sur la conductivité thermique en fonction de la substitution de la poudre de verre

Le tableau IV-3 donne les résultats numériques de la conductivité thermique en fonction de la température pour différents pourcentages de substitution de la poudre de verre.

Propriétés	Conductivité thermique (W/mK)			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
Mortier témoin	1,377	1,526	1,66	1,684
10 % MGP	1,307	1,395	1,51	1,496
20 % MGP	1,16	1,284	1,297	1,38
30 % MGP	1,122	1,227	1,252	1,326
40 % MGP	1,01	1,112	1,2	1,242
50 % MGP	0,944	1,078	1,149	1,156
60 % MGP	0,863	1,04	1,105	1,1

Tableau IV- 3: Résultats numériques de la conductivité thermique en fonction de la substitution de la poudre de verre à différent température

IV.5.2 Effet de la Température sur la chaleur spécifique du mortier substitué en différent pourcentage de poudre de verre

La chaleur spécifique est une variable thermodynamique qui varie en fonction de la Température. Les résultats de la chaleur spécifique des mortiers ordinaire et substitués en poudre de verre en fonction de la température sont représentés sur les figures IV-15 et IV-16. Les chaleurs spécifiques des différents échantillons augmentent avec l'accroissement de la température 20 °C jusqu'à 50 °C. La chaleur spécifique du mortier témoin présente une augmentation de 12 % entre 20 et 50 °C. Or, la valeur de la chaleur spécifique du mortier à haute teneur en poudre de verre 60 % augmente de 19 % dans la plage de température (20, 50 °C).

Une recherche a montré que pour toutes les formulations des bétons, la chaleur massique diminue jusqu'à valeur minimale lorsque la température est entre 5 et 20 °C, puis, elle remonte avec l'accroissement de la température jusqu'à 50 °C [52], ce qui est similaire aux résultats obtenus.

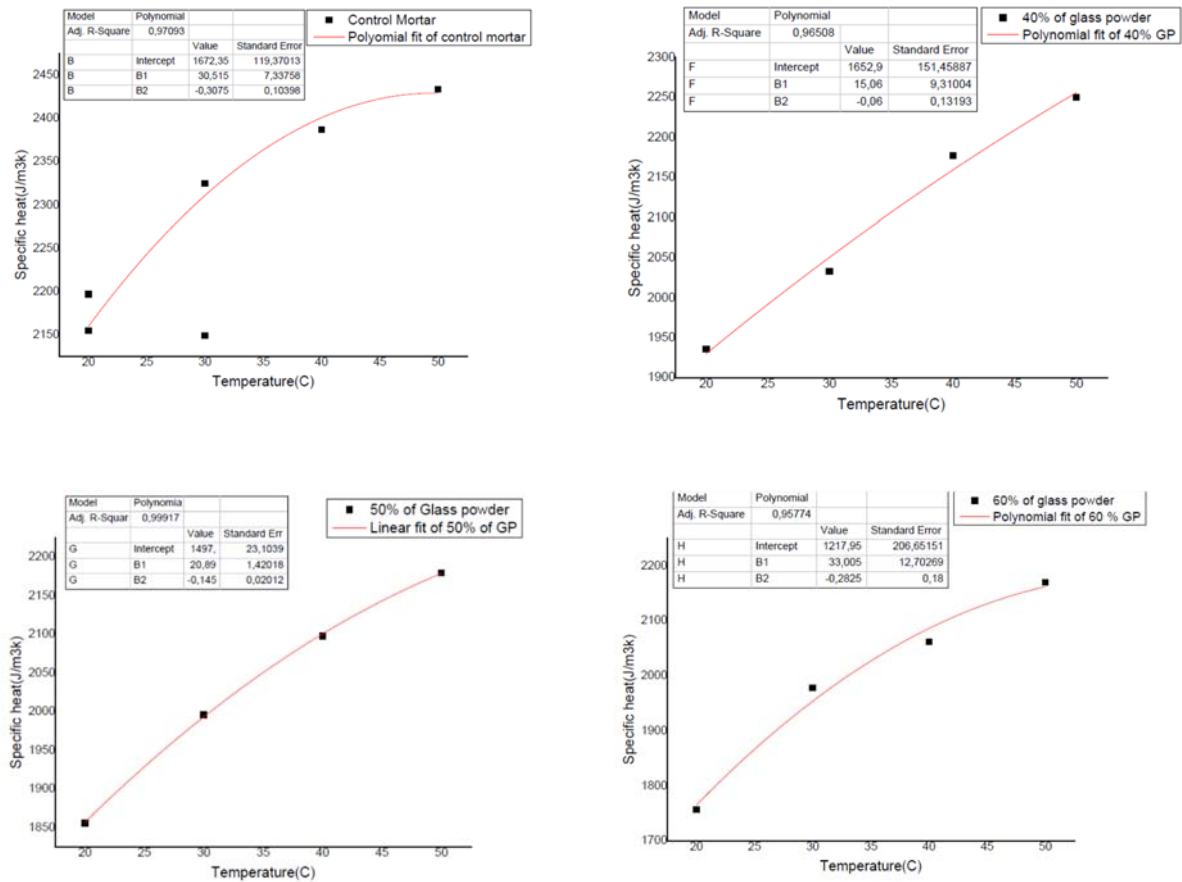


Figure IV- 15: Résultats de la chaleur spécifique du mortier binaire en fonction des différents cas de température

Lorsque la température augmente, l'énergie reçue par le matériau se traduit par une vibration de particules constituant le matériau, ce qui augmente la chaleur spécifique. Cette augmentation est généralement liée à la nature des particules du matériau et à leur structure, qui peuvent influencer la manière dont elles absorbent et retiennent l'énergie reçue[74].

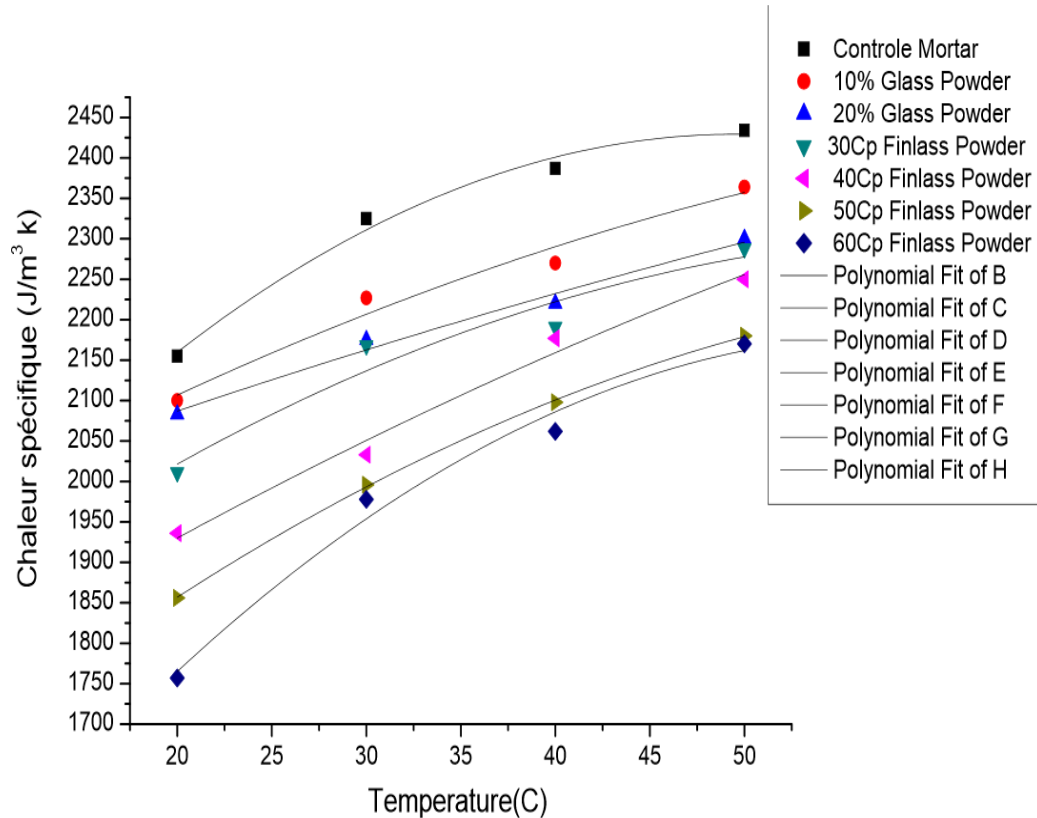


Figure IV- 16: Effet de la substitution de la poudre de verre sur la chaleur spécifique en fonction de la température

Le tableau IV-4 donne les valeurs expérimentales des mesures de la chaleur spécifique du matériau composite binaire en fonction de l'augmentation de la température et le pourcentage de substitution du mortier. On constate que la chaleur spécifique augmente avec la température et diminue avec l'augmentation du pourcentage de la poudre de verre.

Chaleur spécifique				
Température	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
Mortier témoin	2155	2325	2387	2434
10 % MGP	2100	2227	2270	2364
20 % MGP	2083	2175	2220	2300
30 % MGP	2011	2168	2191	2288
40 % MGP	1936	2033	2177	2250
50 % MGP	1856	1996	2098	2180
60 % MGP	1757	1978	2062	2170

Tableau IV- 4: Résultats numériques de chaleur spécifique en fonction de la substitution de la poudre de verre à différent température

IV.5.3 Effet de la Température sur la diffusivité thermique du mortier substitué en poudre de verre :

La figure IV-16 illustre une légère augmentation de la diffusivité thermique du mortier substitué en poudre de verre en fonction de l'augmentation de la température. Cependant, nous remarquons une légère diminution à partir de 40 °C. Il est normal que la diffusivité thermique augmente légèrement avec la température, car cela reflète la capacité accrue des particules du matériau à transmettre la chaleur. Cependant, il est également possible que la diffusivité thermique diminue à des températures élevées à partir de 40 °C, car cela peut indiquer que les propriétés thermiques du matériau ont été altérées par cette température. Par exemple, si la haute température a conduit à une dégradation des liens chimiques du matériau, cela peut entraîner une diminution de sa conductivité thermique et, par conséquent, de sa diffusivité thermique.

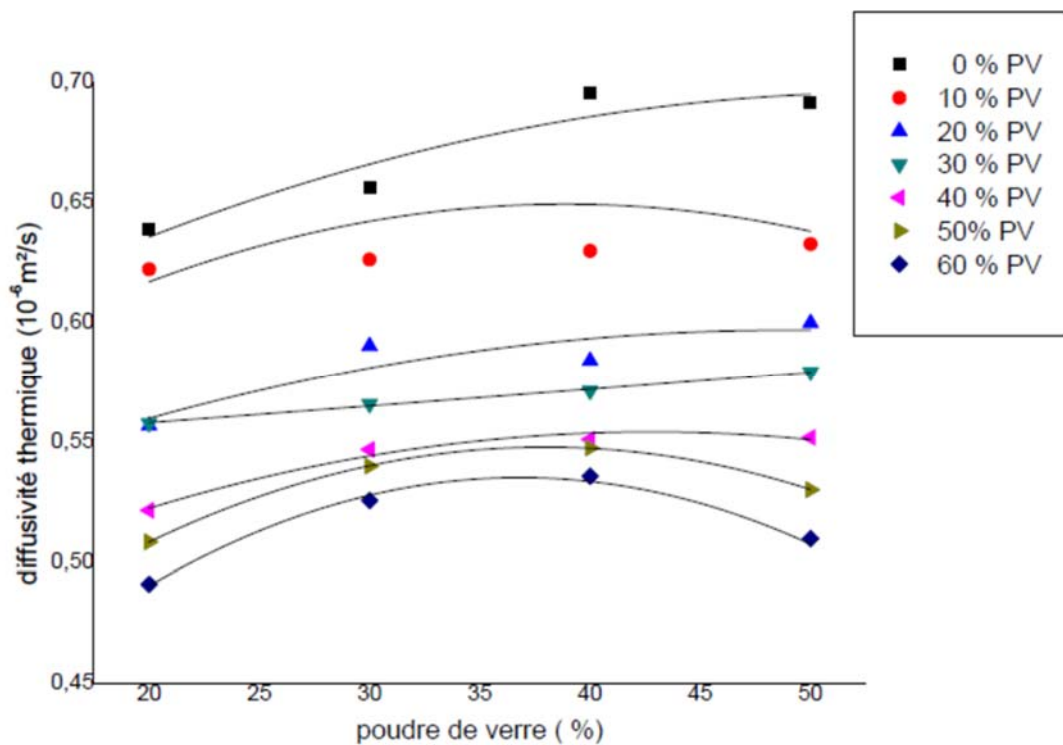


Figure IV- 17: Effet de la substitution de la poudre de verre sur la diffusivité thermique en fonction de la température

Partie II

*Propriétés mécaniques et thermo
physiques des matériaux composites
ternaires : Terre rouge – ciment – poudre
de verre*

IV.6. Propriétés mécaniques des blocs de terre rouge stabilisés au ciment et substitué par la poudre de verre :

L'étude mécanique porte sur le contrôle de la durabilité d'un matériau composite ternaire : terre rouge, ciment, poudre de verre. La figure IV-18 présente les résultats de mesure de la résistance à la compression des échantillons de poudre de verre substitué, et stabilisé par le ciment, selon différents pourcentages.

La terre rouge est un matériau argileux naturel qui a une faible résistance mécanique et une grande sensibilité de l'humidité. Le ciment a été ajouté à la terre rouge pour améliorer sa résistance mécanique et sa durabilité. Cela est dû aux propriétés physiques et chimiques du ciment, qui le rendent capable de former une matrice solide en se liant avec les particules de terre (matrice ciment – argile) décrit dans le chapitre III.

Lorsque le ciment est ajouté à la terre rouge, il réagit chimiquement avec l'eau pour former des cristaux de silicate de calcium hydratés (C-S-H) qui se lient aux particules de terre. Cette réaction chimique améliore la cohésion des particules de terre et augmente leur résistance à la compression, ce qui rend les blocs de terre plus solides et durables.

En revanche, la poudre de verre a une faible capacité à former une matrice solide avec les particules de terre. Bien qu'elle puisse remplacer une partie du ciment dans la formulation des blocs de terre, l'ajout de poudre de verre peut réduire la quantité de ciment disponible pour former la matrice solide. Par conséquent, l'ajout de poudre de verre affaiblit la cohésion des particules de terre, à jeune âge et diminue légèrement leur résistance à la compression.

En résumé, la résistance mécanique de la terre rouge augmente avec le ciment car celui-ci améliore la cohésion des particules de terre et leur résistance à la compression. En revanche, la poudre de verre a une faible capacité à former une matrice solide avec les particules de terre et affaiblit la cohésion des particules, ce qui diminue leur résistance à la compression.

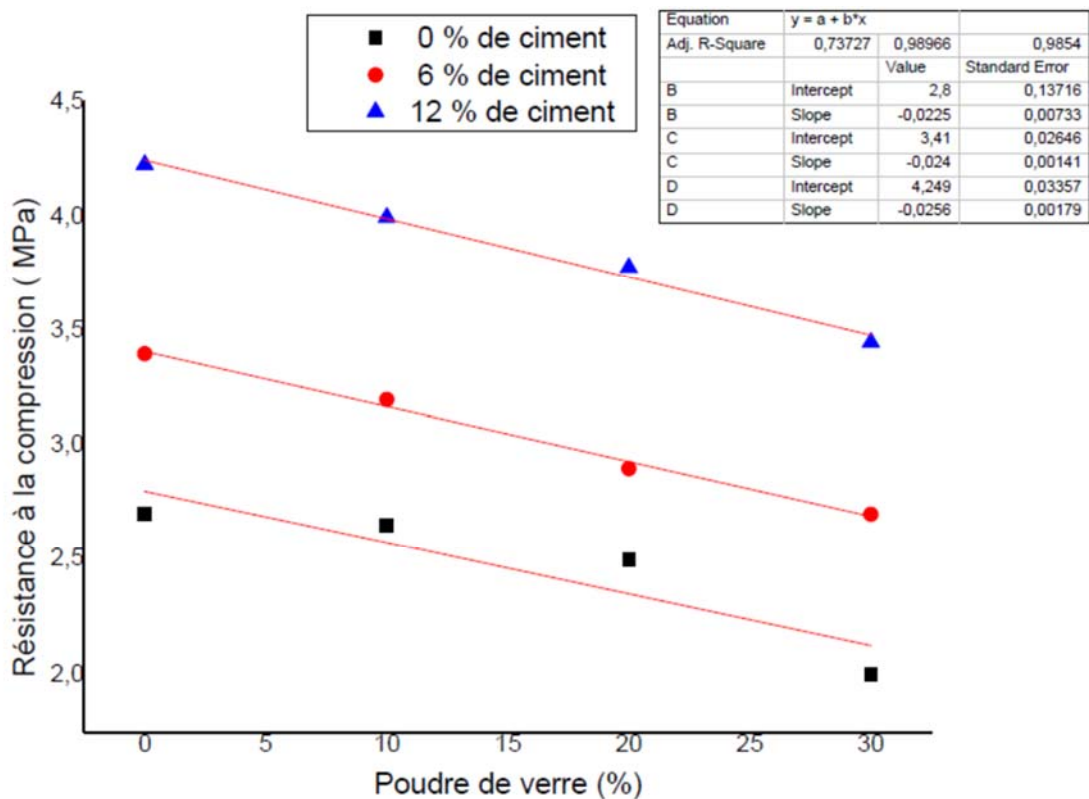


Figure IV- 18: Résistance à la compression des terres rouges stabilisées au ciment et substitué en poudre de verre.

Le tableau IV-4' indique les pourcentages de variation de la résistance à la compression du mortier composite ternaire, à 30 % de poudre de verre par rapport au bloc de terre rouge. La résistance à la compression diminue de 18,43 %.

	0 % ciment	6 % ciment	12 % ciment
ΔR_c (BTS 30 % - BTS 0 %)	25,92%	20,58%	18,43%

Tableau IV-4' : Pourcentages de variation de la résistance de compression du matériau composite ternaire

IV.7. Propriétés thermophysiques du matériau composite ternaire :

IV.7.1 Relation entre la densité et la conductivité thermique des blocs de terre rouge stabilisé au ciment et substitué par la poudre de verre:

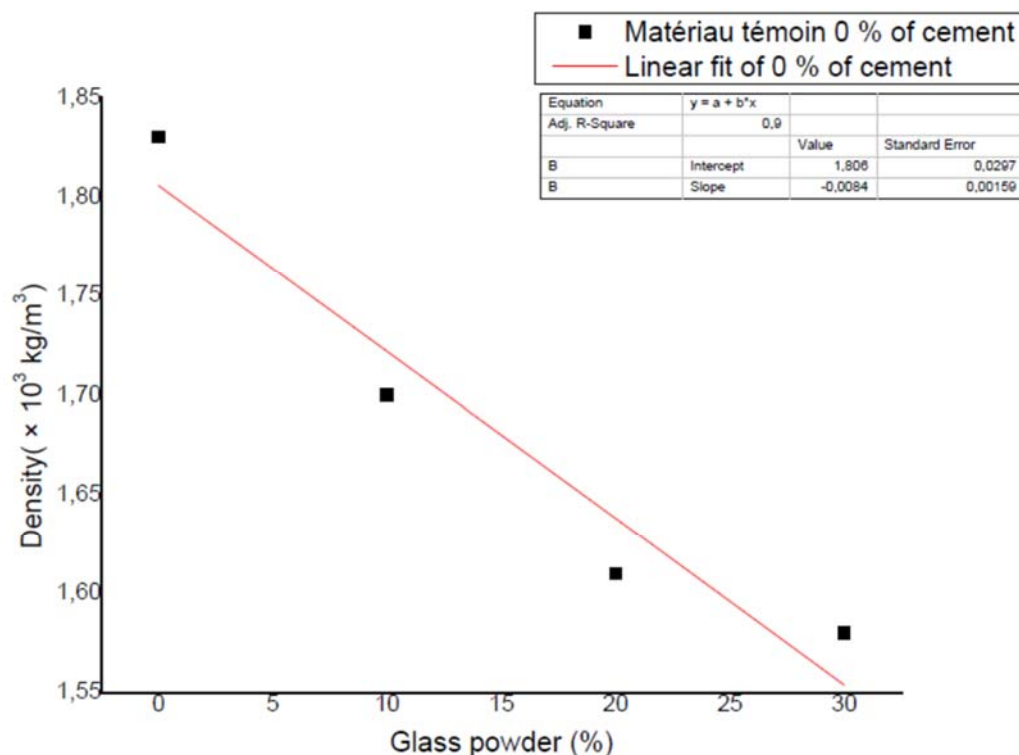
Le tableau IV-5 représente les masses volumiques des échantillons de la terre rouge substitués par la poudre de verre et stabilisés au ciment. La mesure a été effectuée à l'état sec à température ambiante pour les échantillons étudiés. La masse volumique des blocs de terre rouge, substitués par 0, 10, 20, et 30 % de la poudre de verre, diminue légèrement de 1.83 à 1.58 g/cm³ soit une variation de 14 %.

La masse volumique s'augmente avec l'ajout du ciment stabilisant de 6 et 12 %, soit une variation de 20 % et 10 % (Figure IV-19 et figure IV-20).

La diminution de la masse volumique avec l'ajout de la poudre de verre dépend principalement de l'augmentation de la taille des pores des morphologies aiguës et pointues du verre. La diminution du volume poreux avec la substitution du ciment est due à la finesse de ce matériau qui rend la pâte plus compacte [75]. Les résultats confirment les lois générales de la conductivité thermique pour les matériaux poreux. Ce phénomène pour les blocs de terre est similaire aux résultats de ces études bibliographiques. [76], [77].

	0 % ciment	6 % ciment	12 % ciment
0 % poudre de verre	1,83	2,26	2,43
10 % poudre de verre	1,7	2,09	2,33
20 % poudre de verre	1,61	1,9	2,3
30 % poudre de verre	1,58	1,82	2,2

Tableau IV- 5: Résultats numériques de la densité des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et l'ajout du ciment à Température ambiante



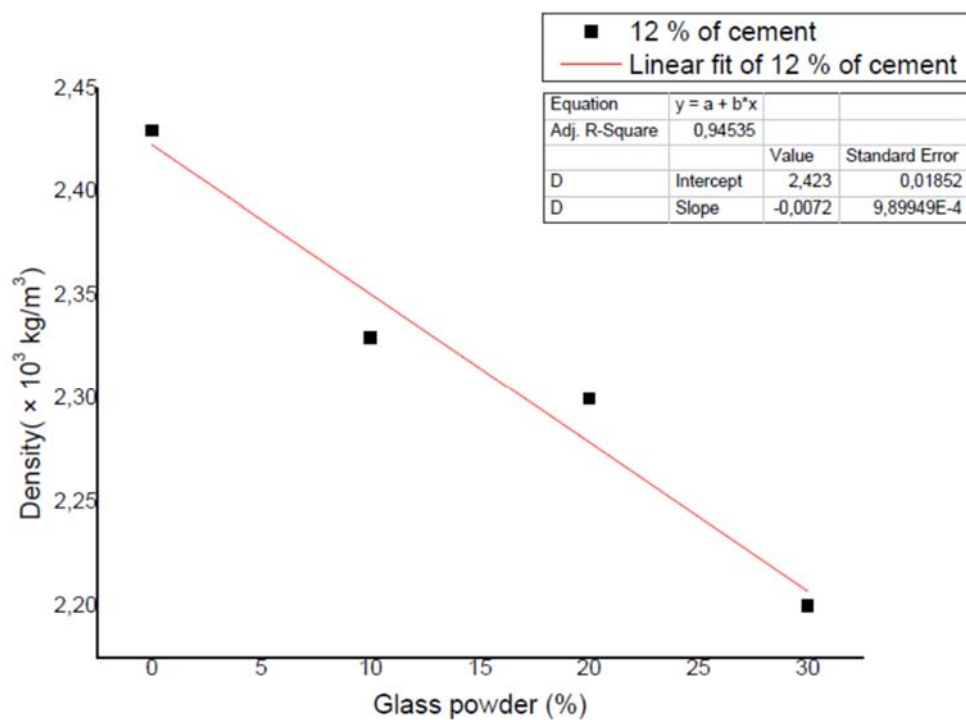
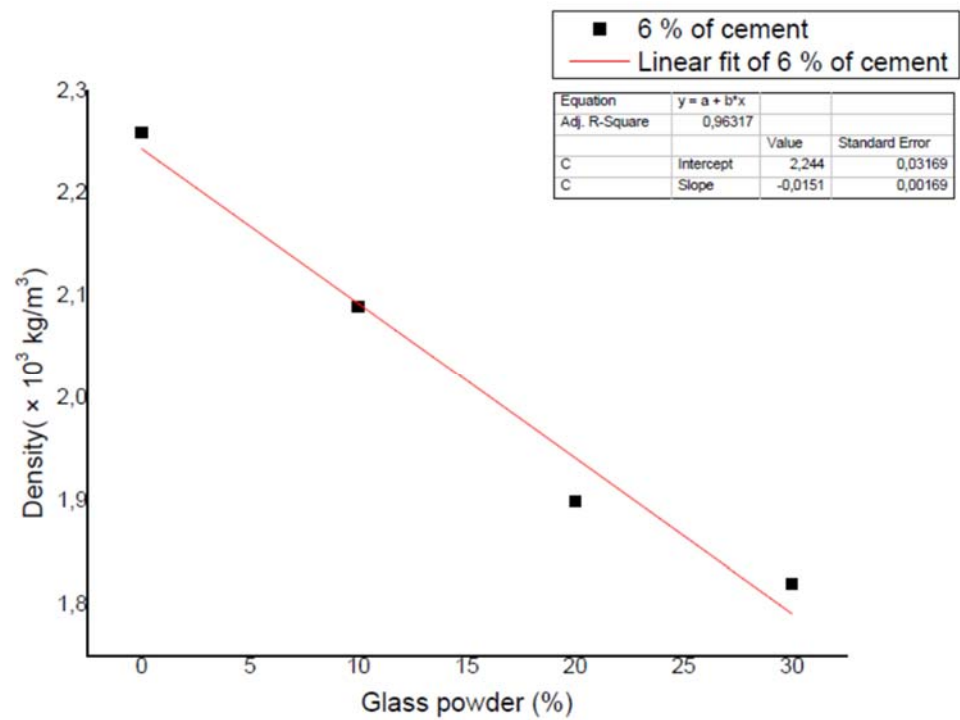


Figure IV- 19: Résultats de la densité des blocs de terre rouge en fonction des pourcentages de poudre de verre et de ciment

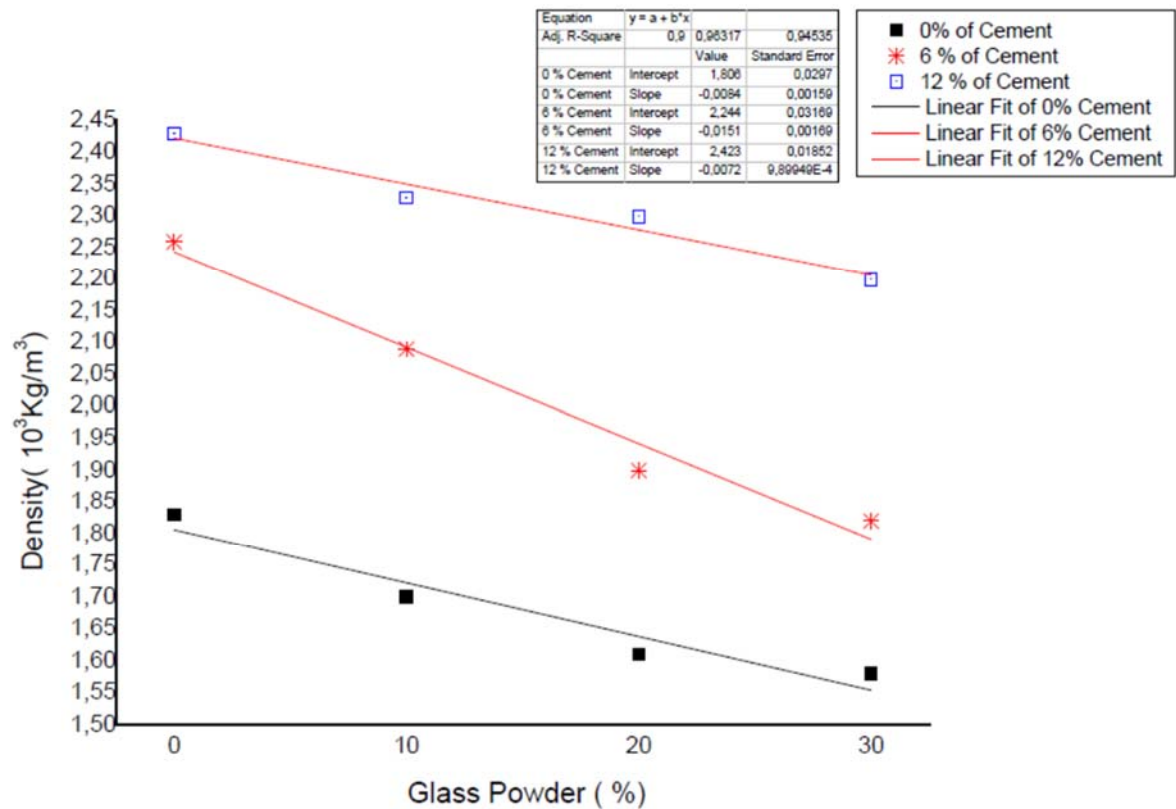


Figure IV- 20: Variation de la densité des blocs de terre rouge à l'état sec à température ambiante

En d'autres termes, lorsque la poudre de verre est incorporée dans les blocs de terre rouge, leur masse volumique diminue légèrement figure IV-21. Cette variation de masse volumique est plus importante lorsque la proportion de poudre de verre est plus élevée (0, 10, 20 et 30%). Il est important de noter que l'ajout de ciment stabilisant peut avoir un impact sur la conductivité thermique des blocs de terre rouge [67]. Selon les données présentées, l'ajout de 6 et 12% de ciment stabilisant a entraîné une augmentation respective de la conductivité thermique des blocs. Cela peut être expliqué par le fait que le ciment est un matériau qui a une conductivité thermique relativement élevée, ce qui peut contribuer à augmenter la conductivité thermique totale des blocs lorsqu'il est ajouté en quantité suffisante[78].

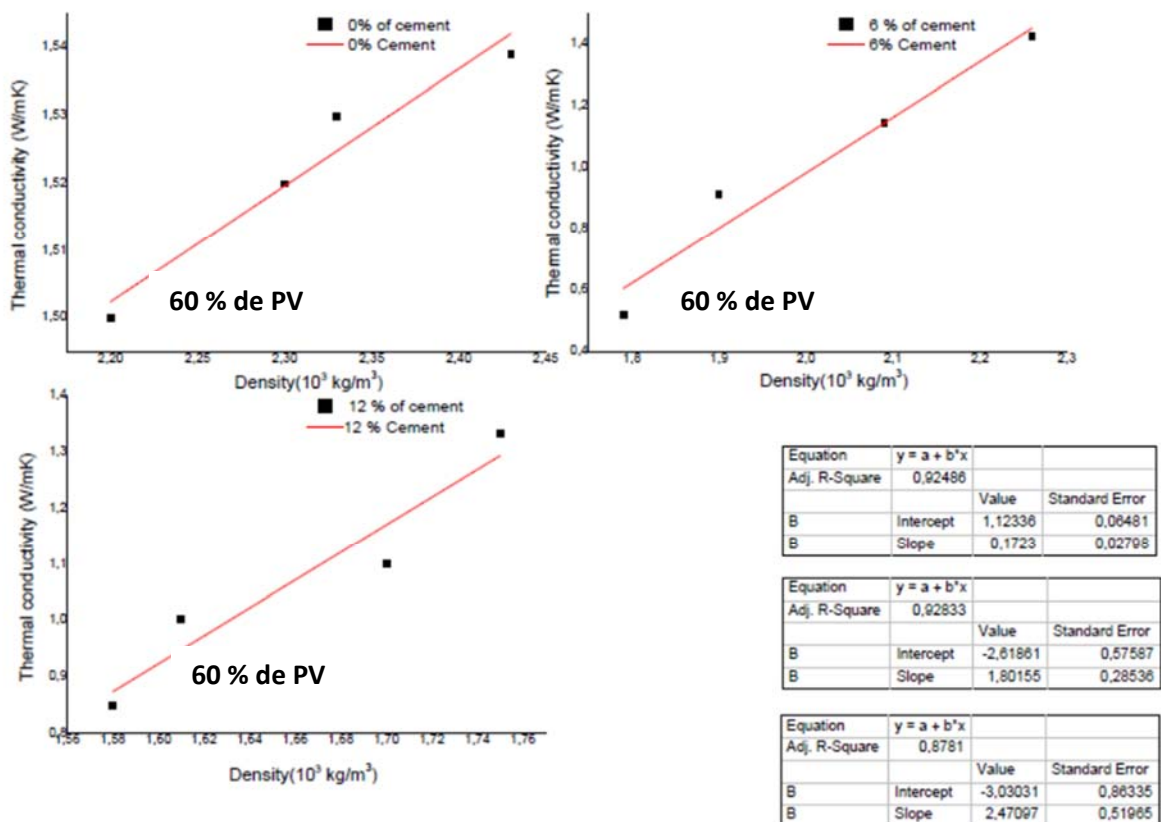


Figure IV- 21: Résultats de la conductivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la densité du matériau à l'état sec à température ambiante

IV.6.2 Effet de la poudre de verre sur la conductivité thermique des blocs de terre rouges stabilisé au ciment :

La caractérisation thermique des échantillons de la terre rouge stabilisée au ciment et substituée en poudre de verre a été réalisée à l'aide d'un appareil CT Meter à température ambiante 21 ± 1 °C. Les résultats présentés dans les figures IV-22 et IV-23 représentent une diminution de 53,97 % de la conductivité thermique des blocs de terre rouge substitués à la poudre de verre, (de 1,334 W/mK à 0,614 W/mK), ainsi une augmentation est remarquée de 47,22 % et 40,41 % pour un ajout de 6 et 12 % de ciment. La diminution de la conduction thermique des blocs de terre substituée en poudre de verre pourrait être expliquée par l'augmentation du volume poreux. Nous attribuons cette diminution du fait que le verre est amorphe et non conducteur[18].

La conductivité thermique des blocs de terre rouge augmente avec l'ajout du ciment stabilisant, ce qui est conforme avec ce travail cité [79]. La morphologie sphérique et fine du ciment permet une diminution de la porosité et par la suite une diminution du volume poreux du matériaux [80]. Tiskatine et al. ont également trouvé que les particules de ciment augmentent le contact et les

liaisons entre les grains d'argile afin d'assurer un bon compactage et par la suite une augmentation de la conductivité thermique du matériau [81].

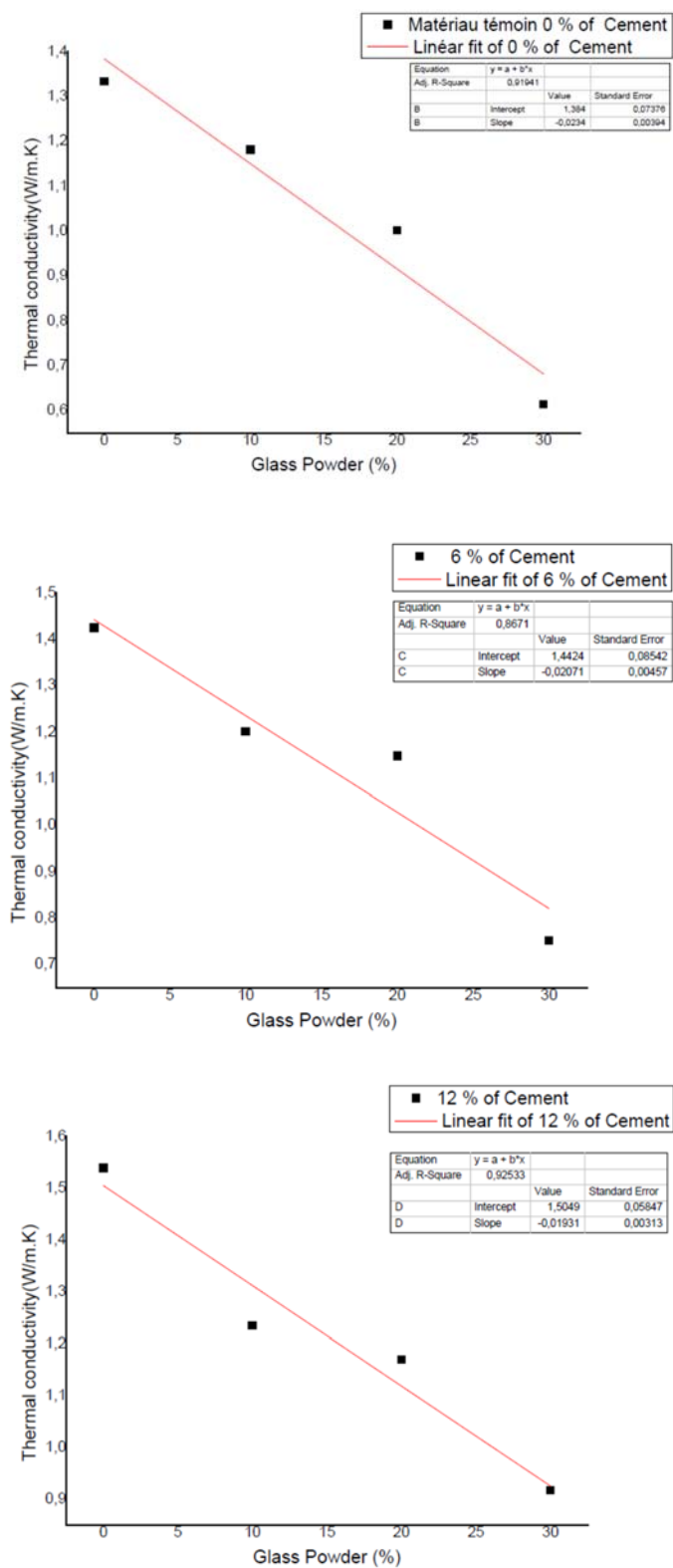


Figure IV- 22: Résultats de la conductivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et du ciment à l'état sec à température ambiante

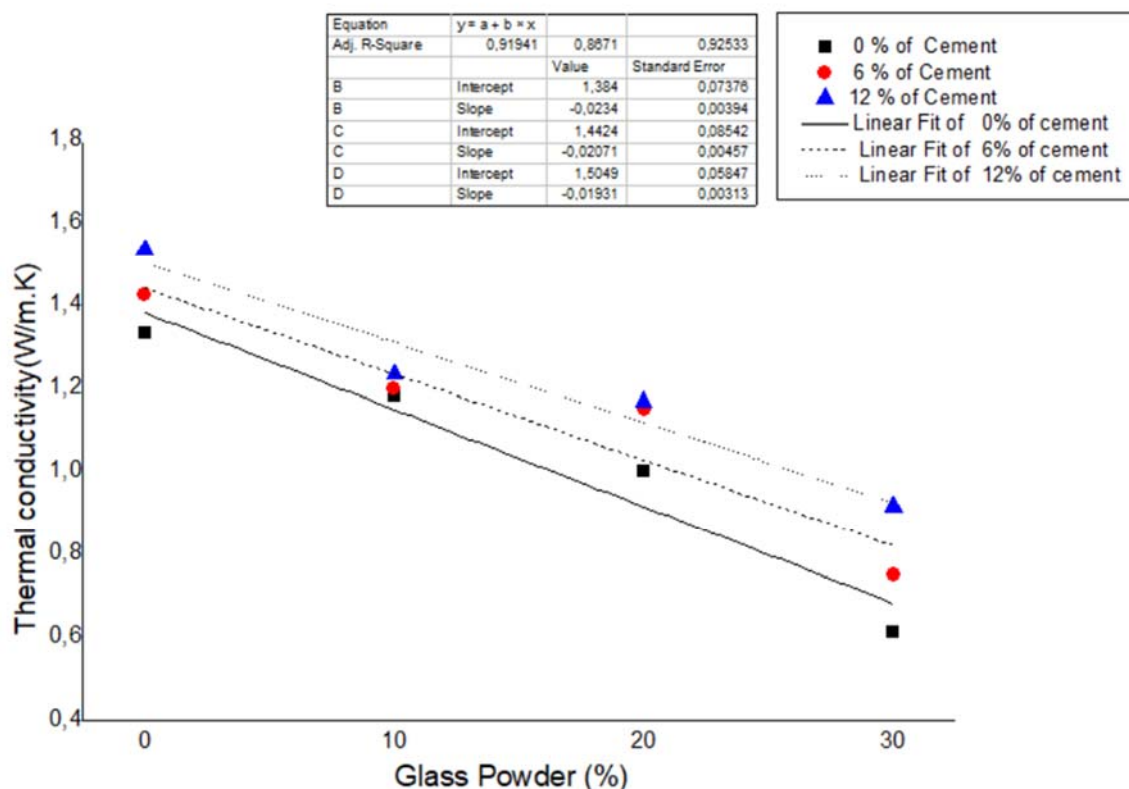


Figure IV- 23: Résultats de la conductivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et l'ajout du ciment à l'état sec à température ambiante

Le tableau IV-6 représente les valeurs numériques des résultats de mesures de la conductivité thermique des échantillons de terre rouge stabilisés au ciment et substitués par la poudre de verre. Nous constatons que l'ajout du ciment augmente la conductivité thermique alors que l'ajout de la poudre de verre diminue la conductivité thermique.

Conductivité thermique			
	0 % ciment	6 % ciment	12 % ciment
0 % de poudre de verre	1,334	1,425	1,539
10 % de poudre de verre	1,182	1,201	1,235
20 % de poudre de verre	1,002	1,149	1,17
30 % de poudre de verre	0,614	0,752	0,917

Tableau IV- 6: Valeurs numériques des résultats de mesure de la conductivité thermique des blocs de terre rouge relatives à la figure IV-23.

IV.6.3 Effet de la poudre de verre sur la chaleur spécifique des blocs de terre rouges stabilisé au ciment et substitué en poudre de verre :

Les mesures de la chaleur spécifique des blocs de terre stabilisés au ciment en fonction du taux de substitution de la poudre de verre sont représentées dans la figure IV-24.

La chaleur spécifique des échantillons des matériaux composites diminue de 45,42 % lorsqu'on passe de 0 % à 30 % de poudre de verre.

Pour l'ajout de 6 % de ciment, la chaleur spécifique du matériau augmente de 37 % lorsqu'on passe de 0 % à 30 % de la poudre de verre, alors que l'ajout de 12 % de ciment, augmente de 25 % lorsqu'on passe de 0% à 30 % de la poudre de verre.

La chaleur spécifique dépend essentiellement des fractions volumiques et des chaleurs spécifiques des différents composants de ce matériau composite.[52].

La diminution de la chaleur spécifique des échantillons en fonction du pourcentage de la poudre de verre peut être expliqué par le quantitatif des différentes fractions volumiques[82]. L'augmentation du pourcentage de la poudre du verre déduit à une diminution du pourcentage de la terre rouge. Cependant, Nicolas et al. confirment la diminution de la chaleur spécifique de ce matériau composite due à la faible valeur de la chaleur spécifique du verre 1.37 kJ/kgK et celle de l'air 1 kJ/kg K présent dans les pores[52].

L'augmentation de la chaleur spécifique avec l'ajout des pourcentages de ciment de 6 et 12 % est également présentée dans les figures IV-24 et IV-25. Cette augmentation est due à l'occupation des particules de ciment dans les pores et par la suite une diminution des pores vides[83] .Les fractions volumiques représente moins de quantités d'air qui a une chaleur spécifique faible [84]. Néanmoins, la chaleur spécifique du ciment étant plus élevée que celle de l'air, ce qui est attribué à l'augmentation de la chaleur spécifique du matériau composite ternaire.

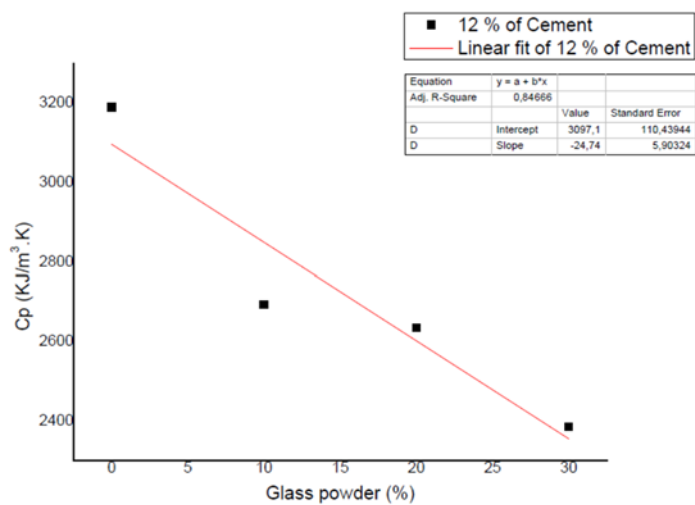
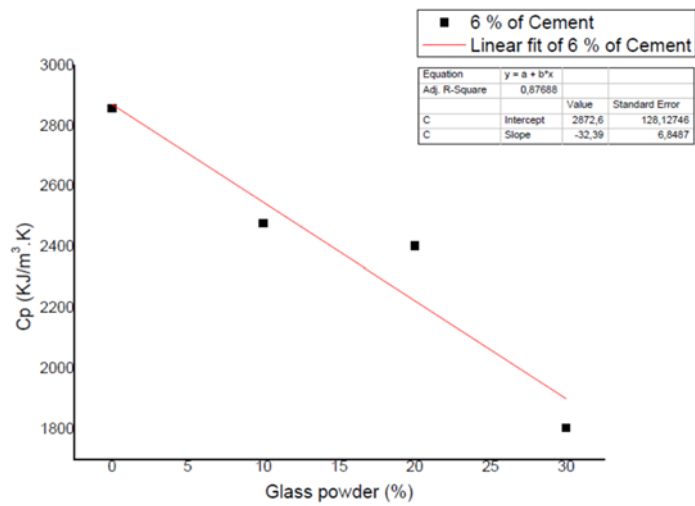
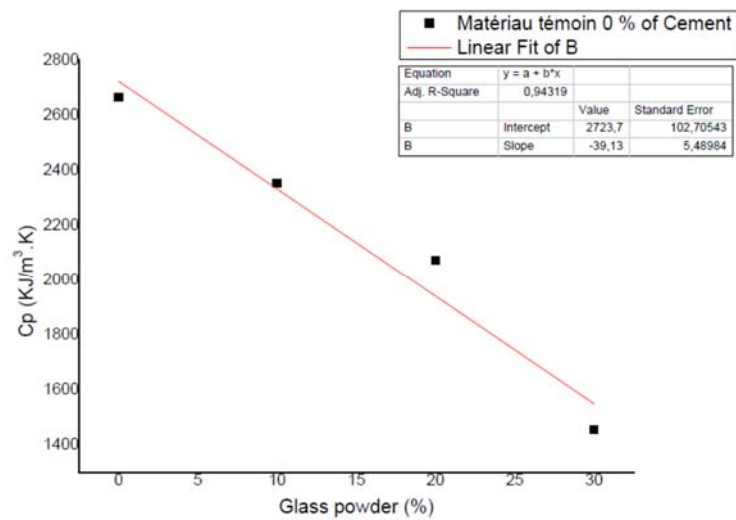


Figure IV- 24: Résultats de la chaleur spécifique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et du ciment à l'état sec à température ambiante

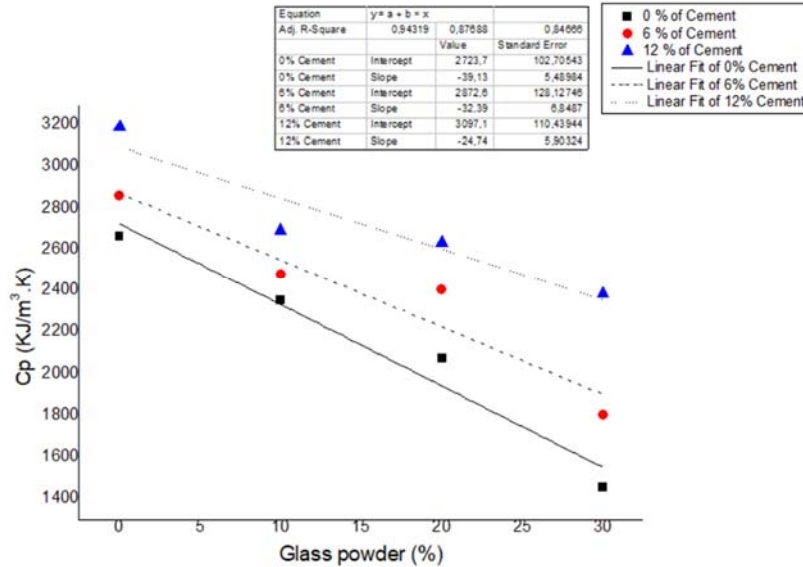


Figure IV- 25: Résultats de la chaleur spécifique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et l'ajout du ciment à l'état sec à température ambiante

Le tableau IV-7 représente les valeurs numériques des résultats de mesures de la chaleur spécifique des échantillons de terre rouge stabilisés au ciment et substitués par la poudre de verre. L'ajout de la poudre de verre diminue progressivement la chaleur spécifique des échantillons.

	0 % cement	6 % cement	12 % cement
30 % de poudre de verre	1455	1804	2385
20 % de poudre de verre	2073	2405	2635
10 % de poudre de verre	2353	2479	2694
0 % de poudre de verre	2666	2859	3190

Tableau IV- 7: Valeurs numériques des résultats de mesure de la chaleur spécifique des blocs de terre rouge relatives à la figure IV-23.

IV.6.4 Effet de la poudre de verre sur la diffusivité thermique des blocs de terre rouges stabilisé au ciment et substitué en poudre de verre :

La diffusivité thermique représente le quotient de la conductivité thermique sur la chaleur spécifique. Les figures IV-26 et IV-27 présentent les résultats déduits de la relation suivante.

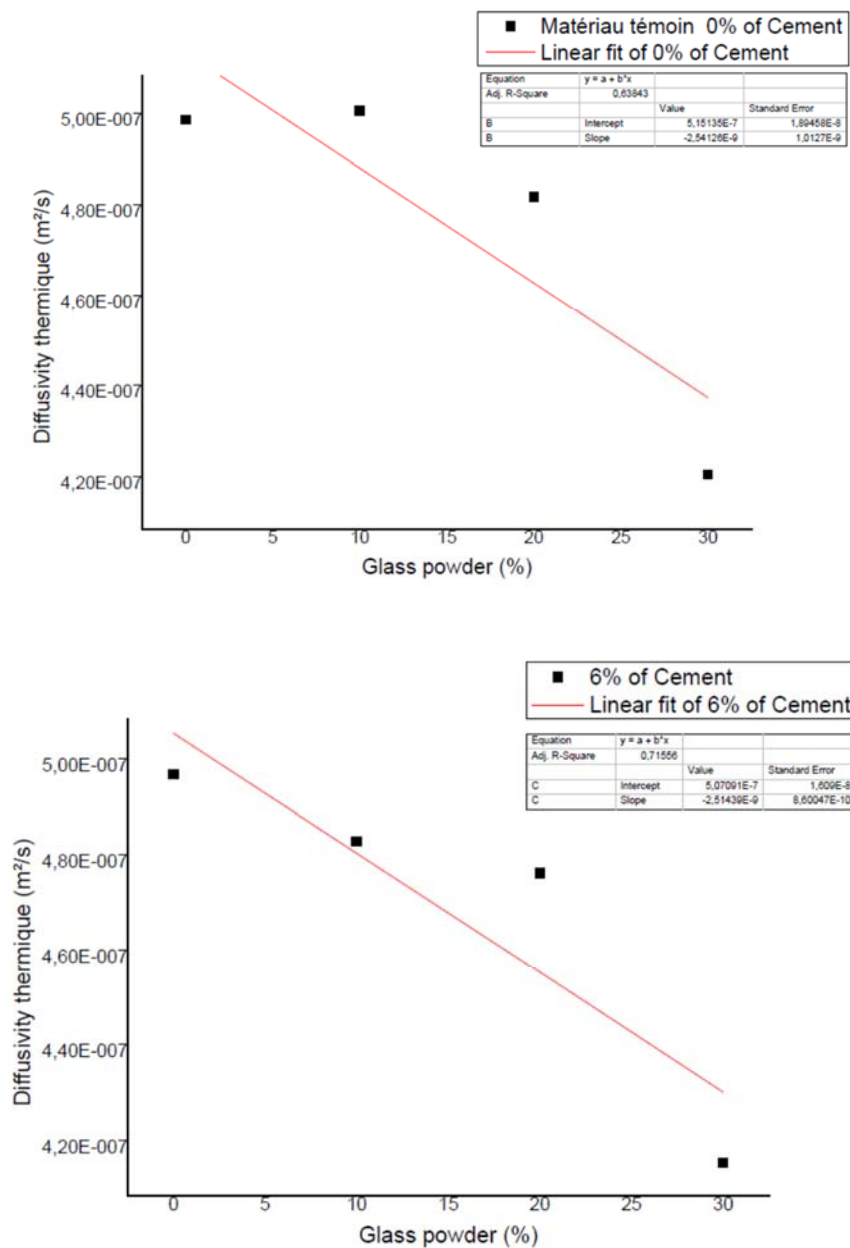
$$d = \lambda / C_p$$

d : diffusivité thermique ; λ : la conductivité thermique ; C_p : la chaleur spécifique volumique

La diffusivité thermique des blocs de terre substitués en poudre de verre a diminué en moyenne de 15.66 %, ainsi une diminution de ces échantillons avec l'ajout de 6 et 12 % de ciment est représentée respectivement en moyenne de 16,37 et 20,30 %.

La diminution de ce paramètre thermo physique dépend principalement de la diminution de la conductivité thermique et la chaleur spécifique de ces mêmes matériaux composites.

Ainsi, l'augmentation de la diffusivité thermique en fonction de l'ajout du pourcentage du ciment augmente en fonction de l'augmentation de la conductivité thermique et la chaleur spécifique.



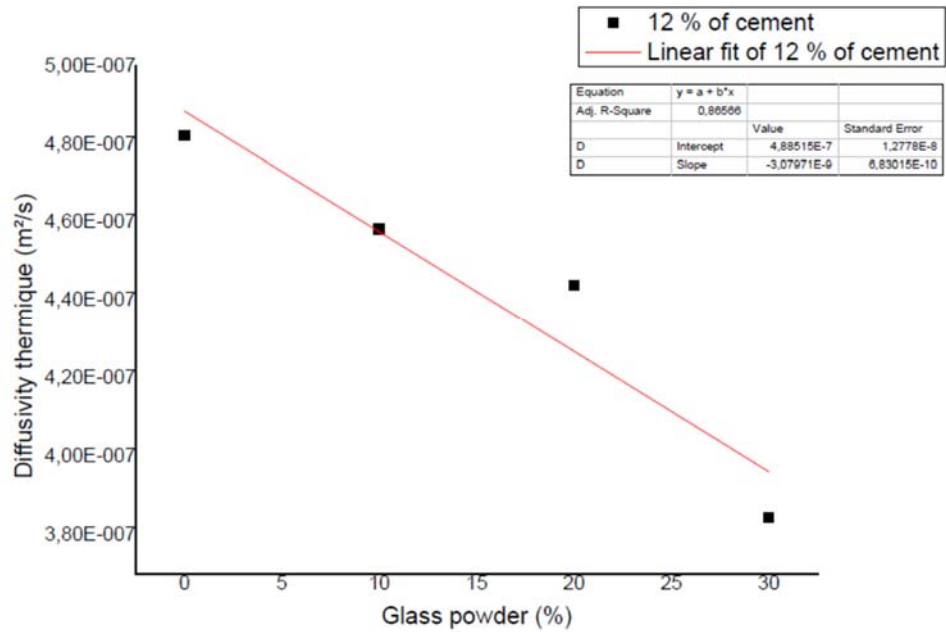


Figure IV- 26: Résultats de la diffusivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et du ciment à l'état sec à température ambiante

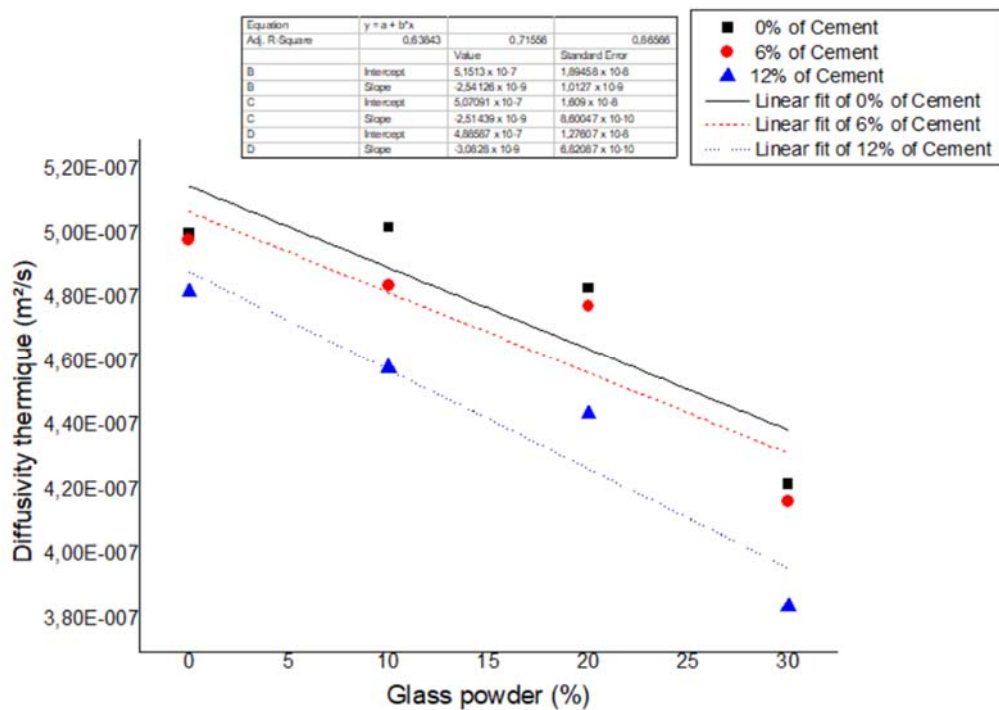


Figure IV- 27: Résultats de la diffusivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et l'ajout du ciment à l'état sec à température ambiante

Les valeurs numériques de la diffusivité thermique des terres stabilisés au ciment et substitué par la poudre de verre sont données dans le tableau IV-8.

Diffusivité thermique			
	0 % Ciment	6 % Ciment	12 % Ciment
0 % poudre de verre	4,22E-07	4,17E-07	3,84E-07
10 % poudre de verre	4,83E-07	4,78E-07	4,44E-07
20 % poudre de verre	5,02E-07	4,84E-07	4,58E-07
30% poudre de verre	5,00E-07	4,98E-07	4,82E-07

Tableau IV- 8: Valeurs numériques des résultats de mesure de la diffusivité thermique des blocs de terre rouge relatives à la figure IV-27.

IV.6.5 Effet de la poudre de verre sur l'effusivité thermique des blocs de terre rouge stabilisé au ciment et substitué en poudre de verre :

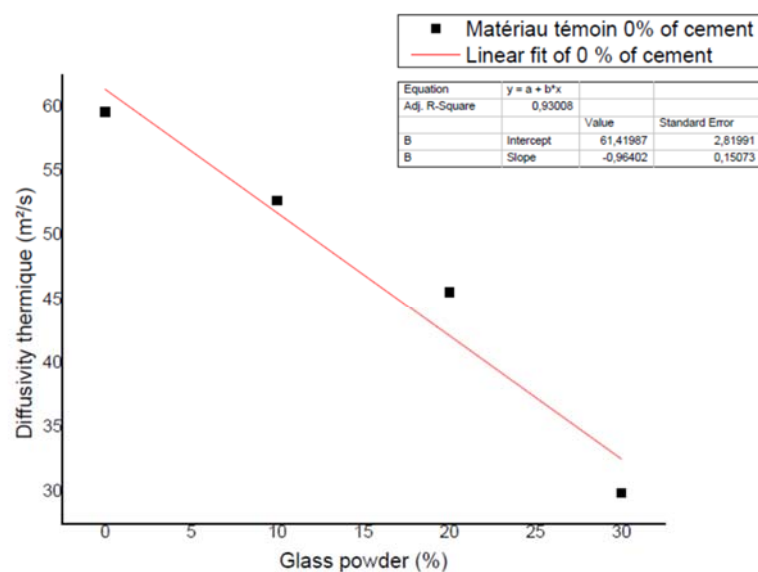
L'effusivité thermique est présentée sous la forme de l'équation suivante :

$$e = \sqrt{\lambda} * \rho C_p \quad (2)$$

Où e : l'effusivité thermique ; λ : la conductivité thermique ; C_p : la chaleur spécifique

Les valeurs de l'effusivité thermique présentées dans les figures IV-28 et IV-29 sont calculées suivant l'équation (2). L'effusivité thermique des échantillons substitués en poudre de verre a diminué en moyenne de 49,88 %.

Pour l'ajout de 6 % de ciment, l'effusivité thermique du matériau augmente de 42 % lorsqu'on passe de 0 % à 30 % de la poudre de verre, alors que l'ajout de 12 % de ciment, augmente de 33 % lorsqu'on passe de 0% à 30 % de la poudre de verre.



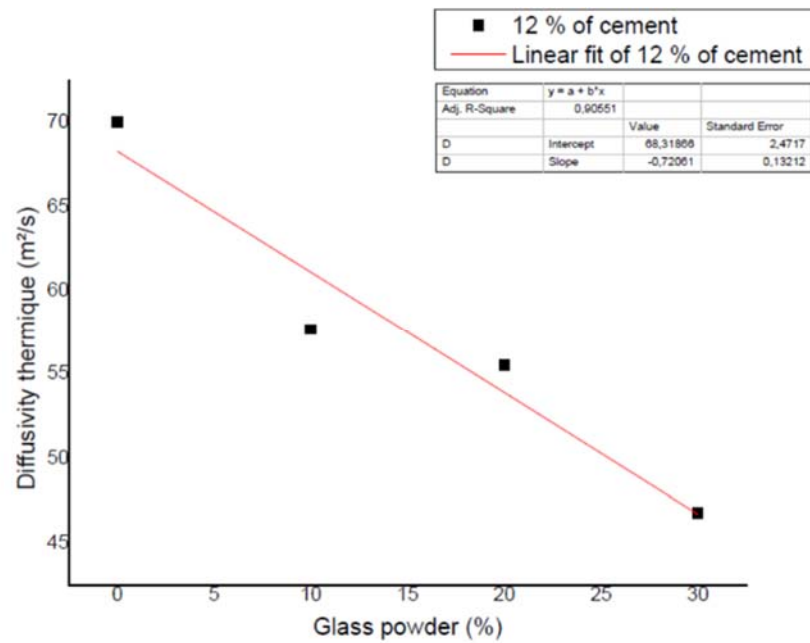
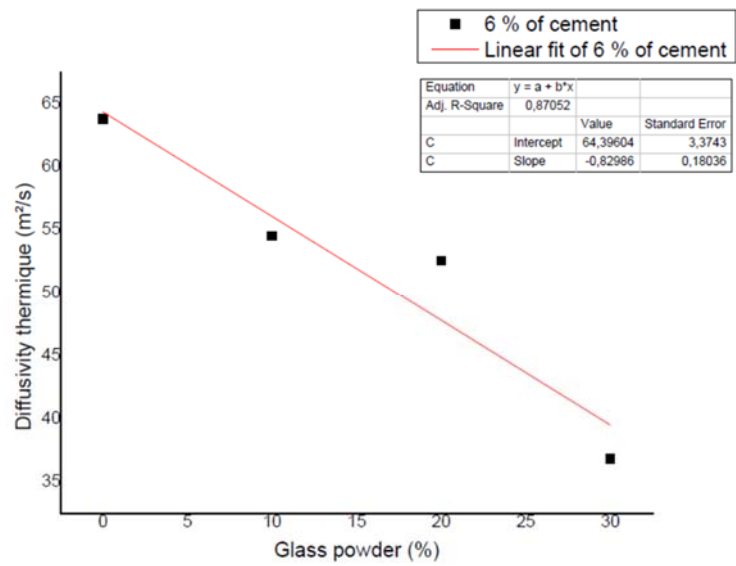


Figure IV- 28: Résultats de l'effusivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et du ciment à l'état sec à température ambiante

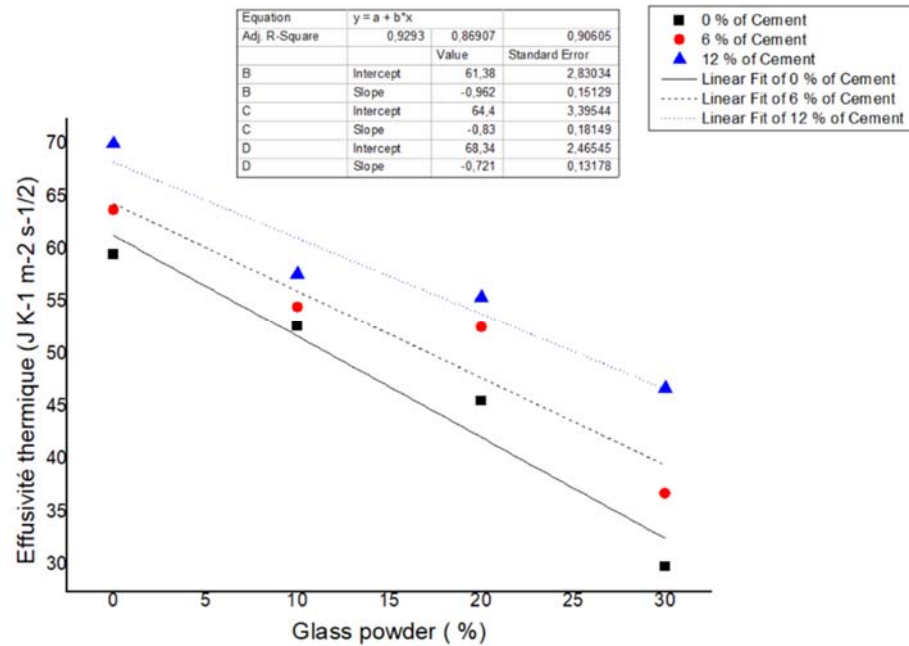


Figure IV- 29: Résultats de l'effusivité thermique des blocs de terre rouge en fonction de la substitution de la poudre de verre et l'ajout du ciment à l'état sec à température ambiante

Les résultats numériques de l'effusivité thermique des matériaux composites ternaires sont présentés dans le tableau IV-9. L'ajout de la poudre de verre diminue progressivement l'effusivité thermique de ces échantillons.

Effusivité thermique			
	0 % Ciment	6 % Ciment	12 % Ciment
0 % poudre de verre	59,67	63,83	70,06
10 % poudre de verre	52,74	54,57	57,68
20 % poudre de verre	45,58	52,57	55,53
30% poudre de verre	29,89	36,84	46,77

Tableau IV- 9: Valeurs numériques des résultats de mesure de l'effusivité thermique des blocs de terre rouge relatives à la figure IV-29.

CONCLUSION :

En conclusion de ce chapitre, l'analyse du comportement mécanique et thermophysique des matériaux composites binaires et ternaires a permis d'obtenir des résultats importants pour leur utilisation potentielle dans le domaine de la construction. Les propriétés mécaniques ont permis de déterminer le domaine d'utilisation de ces nouveaux matériaux, tandis que l'analyse du

comportement thermique a fourni des informations précieuses sur les propriétés thermiques des matériaux étudiés. Les résultats ont montré que la composition et la morphologie des matériaux ont une grande influence sur leur comportement thermique. L'étude de l'influence de la variation de la température et du taux de saturation d'eau sur le comportement thermique a également fourni des résultats importants pour le choix des matériaux dans des applications spécifiques, telles que l'isolation thermique des bâtiments. Enfin, la discussion des résultats obtenus a mis en évidence les avantages et les limites des matériaux composites étudiés pour leur utilisation dans le domaine de la construction.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives :

L'utilisation des matériaux de construction locaux devient une préoccupation de plus en plus importante, en raison de son impact environnemental et la nécessité de réduire les consommations des matières premières non renouvelable telles que le calcaire et l'argile. La valorisation des solutions innovantes dans le domaine de construction durable peut contribuer à la réduction de l'impact environnemental tout en favorisant l'économie locale.

La poudre de verre est un sous-produit du recyclage et des transformations des bouteilles de verre qui se caractérise par des propriétés chimiques, mécaniques et thermiques importantes dans le domaine de construction. Le verre de bouteille n'est pas entièrement recyclable en raison du manque d'équipements pour trier les différentes couleurs et types de verre, ce qui conduit à une accumulation importante dans les déchets municipaux.

La problématique de cette recherche porte sur l'utilisation des déchets de verre en poudre comme étant un matériau de construction durable, écologique et économique. Nous avons étudié deux types de matériaux de construction locaux qui engendrent ce recyclage des déchets de verre pour la fabrication des nouveaux matériaux.

Le premier matériau caractérisé est le mortier composé de ciment, de sable et d'eau. La poudre de verre a été ajoutée en substitution dans le ciment à différents pourcentages (0%,10%,20%,30%,40%,50% et 60%).

Le choix de la substitution à haute teneur en poudre de verre est déduit des recherches bibliographiques qui favorisent la forte teneur de l'utilisation de la poudre de verre en contrôlant d'autres paramètres tel que la finesse de la poudre (granulométrie à l'échelle micrométriques) ; type de composition de verre à forte teneur en stabilisateur de verre (silice) et moyennant sa teneur en modificateur de verre (sodium).

La caractérisation chimique et minéralogique du type de verre sodocalcique nous a permis de favoriser l'utilisation de la poudre de verre jusqu'à 60 %. Ainsi, le comportement mécanique des mortiers de ciment substitué en poudre de verre confirme ce choix de substitution. Le rapport eau/ciment (E/C) est de 0,4 suivant les règles de l'art et les normes en vigueur ; ainsi en raison de la faible absorption de l'eau par la poudre de verre, ce rapport était un paramètre fixe qui ne varier pas avec l'augmentation des pourcentages de substitution. Le rapport ciment/sable (C/S) est de 1/3 selon la norme française NF P 15-201.

Le deuxième matériau caractérisé dans le cadre de cette étude est la terre rouge stabilisée avec du ciment à différents pourcentages (0 :6 :12 %) et auquel nous l'avons substitué à la poudre de verre à différents taux (0 % ; 10% ; 20% et 30%). Les formulations des différents échantillons ont été décrites suivant les normes en vigueur. Nous avons choisi un pourcentage de substitution limite de 30% afin d'étudier et de caractériser un matériau composite ternaire et de pouvoir détecter l'impact des composants du ciment sur la poudre de verre en présence de la terre rouge. Les échantillons de chaque matériau décrit ont été préparés et testés selon les normes en vigueur.

L'objectif de ce mémoire est de résorber les déchets de verre surtout les verres en couleur vert, en l'utilisant comme matériaux de construction. Dans ce sens, nous avons déterminé les comportements thermo physiques de ces nouveaux matériaux de construction locaux et savoir si cela pourrait favoriser l'isolation thermique des bâtiments. Les caractérisations chimiques, morphologiques et minéralogiques ont été étudiées également selon les analyses MEB, EDX et DRX afin de caractériser les structures de chaque échantillon. Ces analyses caractéristiques ont permis une interprétation des comportements physiques et thermiques des matériaux composites.

Les résultats de nos études expérimentales ont montré que l'ajout de la poudre de verre dans les matériaux de construction entraîne une réduction de la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la diffusivité thermique ainsi que l'effusivité thermique à Température ambiante. Les diminutions variantes de la conductivité thermique, tout en respectant une résistance mécanique acceptable permet d'avoir un matériau de construction utilisé dans les éléments non structurels des bâtiments tel que les murs de séparations des chambres ; les façades non structurels ; les cloisons la maçonnerie ; la pose de carrelage et la réparation des bâtiments. Dans le mortier à base de poudre de verre, les propriétés thermiques ont diminué d'une manière significative à mesure que le pourcentage de la poudre de verre augmentait, atteignant un taux de 60 % de poudre de verre. La conductivité thermique a diminué en fonction de la substitution de la poudre de verre. Cette diminution pourrait être influencée par la structure amorphe et non cristalline de la poudre de verre. Il est important de noter que les matériaux cristallins disposent des atomes d'une manière ordonnés et bien structurées qui peut faciliter la transmission de la chaleur par conduction. Dans le cas des matériaux amorphes, les atomes sont moins organisés et peuvent avoir plus de difficulté à transmettre de la chaleur. La chaleur spécifique des échantillons a également diminué en fonction de l'ajout de la poudre de verre. Ce paramètre dépend également de la chaleur spécifique de chaque composant du matériau. La chaleur spécifique du ciment est comprise entre 840 et 860 J/kg.K ; ainsi la chaleur spécifique de l'eau est de 4180 J/kg.K à 20 °C et varie légèrement en fonction de la température. La chaleur spécifique de la poudre de verre a été étudié dans le cadre de cette thèse

est de 1.37 kJ/kg.K. Lorsque ces composants sont mélangés pour former un matériau composite, la chaleur spécifique du matériau final dépend de la proportion de chaque composant dans ce mélange. La masse volumique de ces échantillons ont confirmé que la poudre de verre absorbe peu les quantités d'eau des pores internes. Ce paramètre pourrait améliorer la maniabilité du matériau lors de sa préparation et facilite sa mise en œuvre. Ces échantillons de mortier composite binaire (ciment/poudre de verre) ont également été étudiés en fonction d'une variation de la température dans la plage convenable au secteur de bâtiment (de 20°C à 50°C). Les résultats des propriétés thermiques ont montré une augmentation de la conductivité thermique en fonction de la température. Nous avons pu conclure que la conductivité thermique a augmenté avec la température en raison des structures microscopiques du matériau. La poudre de verre permet de former des réseaux de pores dans le mortier, ce qui peut augmenter la surface accessible à la chaleur. La chaleur spécifique a également augmenté en fonction de la variation de température. Nous avons pu conclure que la chaleur spécifique du matériau peut être influencée par la structure microscopique et par la présence des pores. Il est important de noter que la chaleur spécifique augmente également avec l'augmentation de la température des différents composants ciment, eau, sable et poudre de verre.

Le matériau de terre rouge substitué en poudre de verre et stabilisé par le ciment présente également des résultats thermo physiques importants dans le développement durable du secteur de construction.

L'incorporation des déchets de verre en poudre dans les échantillons de la terre rouge diminue la conductivité thermique de 53,97% lorsque passe de l'état pur à l'état mélange à 30 % de la poudre de verre. Toutefois, la stabilisation des terres rouges avec du ciment permet de renforcer la résistance et la durabilité du matériau local. La substitution de la terre rouge par la poudre de verre peut également améliorer leur comportement thermique en fonction du pourcentage d'ajout de poudre de verre, de la composition chimique et minéralogique des matériaux. Les résultats des propriétés thermo physiques à température ambiante ont démontré la diminution de la conductivité thermique et la chaleur spécifique de ce matériau composite ternaire (terre rouge/ciment/poudre de verre).

En conclusion, les résultats expérimentaux montrent que l'utilisation de la poudre de verre dans les matériaux de construction est favorable et écologique pour l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments. Ce recyclage de la poudre de verre peut être une future option très

intéressante pour la construction des bâtiments durables et à faible consommation énergétique afin de répondre aux défis environnementaux actuels.

Il serait intéressant d'étudier d'autres propriétés des matériaux de construction à base de verre recyclé en poudre. Il serait également utile de comparer cette valorisation des déchets à d'autres matériaux durables pour déterminer leur adaptabilité à différentes applications de construction durable.

Annexes

Annexe- 1: Les mesures de la masse volumique des échantillons du mortier composite binaire substitué par la poudre de verre	148
Annexe- 2: Les mesures de la masse volumique des matériaux composites ternaires des blocs de terre rouge en poudre de verre et stabilisé par du ciment portland	149
Annexe- 3: Procédure de broyage et de tamisage de la poudre de verre.....	150
Annexe- 4: Méthode de confection des blocs de terre rouge, et préparation des moules	151
Annexe- 5: Préparation des blocs de terre rouge composite	152

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1						a,b,e; a>b										
2																
3		masses (g)	a1	a2	a3	a (mm)	b1	b2	b3	b (mm)	e1	e2	e3	e (mm)	volume(e³ * e)	masse volumique
4	0%1	521	95,68	95,54	95,11	95,443	66,480	66,500	66,360	66,447	38,820	39,600	39,450	39,290	249,173	2,090917
5	0%2	532	94,84	95,22	95,39	95,150	66,100	66,360	66,560	66,340	39,660	39,800	39,690	39,717	250,702	2,122045
6	5%1	527	93,82	93,71	93,52	93,683	68,090	68,160	68,080	68,110	40,790	40,800	40,110	40,567	258,847	2,035955
7	5%2	544	96,2	96,47	96,35	96,340	67,780	67,810	67,700	67,763	40,160	41,410	41,200	40,923	267,161	2,036228
8	10%1	520	95,31	94,96	94,63	94,967	66,740	67,920	66,660	67,107	41,080	41,400	40,620	41,033	261,501	1,988519
9	10%2	517	95,79	95,37	94,75	95,303	66,450	66,350	66,200	66,333	0,000	41,230	40,780	27,337	172,817	2,991611
10	15%1	530	96,79	96,62	96,57	96,660	68,170	68,110	68,160	68,147	40,150	40,660	39,840	40,217	264,909	2,000683
11	15%2	504	93,58	93,75	93,9	93,743	68,080	68,130	68,090	68,100	40,430	40,650	41,290	40,790	260,400	1,935483
12	20%2	507	95,27	95,5	96,23	95,667	66,700	66,620	67,150	66,823	38,090	41,100	40,930	40,040	255,966	1,980729
13	20%1	517	95,54	95,55	94,93	95,340	66,500	66,450	66,240	66,397	40,580	40,960	40,330	40,623	257,156	2,010451
14	25%1	518	96,94	95,53	94,95	95,807	66,700	66,180	66,170	66,350	41,360	41,670	40,250	41,093	261,221	1,982996
15	25%2	520	94,94	95,2	95,63	95,257	66,130	66,120	66,220	66,157	41,580	41,390	40,960	41,310	260,330	1,997455
16	30%1	530	96,54	96,62	96,63	96,597	68,460	68,220	68,250	68,310	40,440	40,650	40,650	40,580	267,768	1,979326
17	30%2	505	93,63	93,93	94,06	93,873	68,170	68,200	68,160	68,177	40,160	40,470	40,560	40,397	258,537	1,953295
18	35%1	508	95,56	95,05	94,89	95,167	66,220	66,440	66,610	66,423	40,950	40,810	40,220	40,660	257,024	1,976473
19	35%2	507	95,34	95,43	96,02	95,597	66,650	66,640	66,810	66,700	40,950	40,810	40,220	40,660	259,260	1,955564
20	40%1	507	95,09	95,05	95,53	95,223	66,150	66,100	66,470	66,240	40,630	40,500	40,000	40,377	254,680	1,990737
21	40%2	510	95,87	95,35	95,77	95,663	66,210	66,620	66,190	66,340	40,000	40,490	40,390	40,293	255,714	1,994417
22	45%1	479	95,33	95,7	95,96	95,663	66,400	66,600	66,820	66,607	40,060	40,880	40,290	40,410	257,485	1,860302
23	45%2	490	95,3	95,87	96,48	95,883	67,150	66,460	66,780	66,797	40,400	40,760	40,770	40,643	260,308	1,882387
24	50%1	462	95,14	95,21	95,3	95,217	66,49	66,45	66,44	66,460	36,08	35,03	34,59	35,233	222,960	2,072120
25	50%2	450	95,24	96,24	96,37	95,950	66,57	66,71	66,85	66,710	38,5	39,19	32,61	36,767	235,337	1,912152
26	60%1	503	95,68	96,54	96,75	96,323	66,46	66,32	66,37	66,383	40,58	40,47	40,76	40,603	259,628	1,937384
27	60%2	490	95,01	96,19	96,59	95,930	66,27	66,54	66,58	66,463	41,07	39,36	36,53	38,987	248,572	1,971258

Annexe- 1: Les mesures de la masse volumique des échantillons du mortier composite binaire substitué par la poudre de verre

a,b,c; a'c'b

		masses (g)	a1	a2	a3	a (mm)	b1	b2	b3	b (mm)	e1	e2	e3	e (mm)	volumé (a*b*c)	masse volumique
1	1a	428,4	65,41	62,05	62,32	63,260	89,18	91,18	91,4	90,5867	30,83	29,71	30,22	30,2533	173,367	2,47
	1b	417	60,34	60,36	62,42	61,040	91,33	89,74	91,85	90,9733	31,5	31,2	31,75	31,4833	174,827	2,39
2	2a	448	61,21	60,64	60,42	60,757	89,31	89,18	89,61	89,3667	36,57	36,35	36,51	36,4767	198,054	2,26
	2b	492	61,38	61,68	61,89	61,650	89,7	90,1	90,61	90,1367	36,57	36,3	35,4	36,0900	200,549	2,45
3	3a	477	66,56	66,46	66,51	66,510	94,65	96,27	96,46	95,7933	42,73	42,59	43,33	42,8833	273,219	1,75
	3b	480	66,16	66,56	66,86	66,527	95,5	95,49	95,64	95,5433	43,06	42,13	43,6	42,9300	272,871	1,76
4	4a	416,6	60,15	60,03	60,31	60,163	87,16	85,98	85,83	86,3233	35,46	36,56	35,89	35,9700	186,810	2,23
	4b	417	59,82	60,58	60,05	60,150	86,87	85,21	85,74	85,9400	33,68	33,2	33,8	33,2267	171,758	2,43
5	5a	500	65,77	65,81	65,8	65,793	94,64	95,1	94,9	94,8000	44,9	44,17	44,64	44,5700	278,227	1,80
	5b	500	66,4	65,25	66,2	65,950	93,63	93,24	93,6	93,4900	44,6	45,2	46,26	45,3533	279,633	1,79
6	6a	488,3	67,15	67,77	66,73	67,217	96,05	94,54	95,23	95,2733	44,64	45,41	45,94	45,3300	290,291	1,68
	6b	452	66,18	66,58	66,01	66,257	95	95,42	95,11	95,1767	44,97	44,52	44,5	44,6633	281,651	1,60
7	7a	413,7	59,2	59,9	59,96	59,687	87,61	88,01	88,98	88,2667	33,9	33,92	34,96	34,2600	180,493	2,29
	7b	416	60	60,14	60,56	60,233	89,03	88,5	89,2	88,9100	33,39	33,64	33,77	33,6000	179,940	2,31
8	8a	422,3	61,51	61,64	61,24	61,463	90,65	90,45	90,24	90,4467	37,03	36,27	35,78	36,3600	202,131	2,09
	8b	401,3	61,04	61,33	61,56	61,310	89,63	89,64	90,15	89,8067	34,44	34,94	35,47	34,9500	192,436	2,09
9	9a	381,5	60,61	60,64	60,91	60,720	89,63	89,47	89,13	89,4100	34,33	34,08	34,4	34,2700	186,051	2,05
	9b	369	58,93	60,06	60,7	59,897	89,63	88,56	89,07	89,0867	33,48	30,53	32,89	32,3000	172,353	2,14
10	10a	388,3	61,69	61,11	61,46	61,420	91,54	93,49	85,76	90,2633	30,44	31,73	31,54	31,2367	173,175	2,24
	10b	399,3	61,8	61,4	61,31	61,503	89,25	89,67	88,32	89,0800	33	34	34,09	33,6967	184,614	2,16
11	11a	395,8	65,47	65,4	65,67	65,513	94,38	93,98	93,77	94,0433	42,15	42,66	42,15	42,3200	260,737	1,52
	11b	401,9	66,14	65,84	66,45	66,163	94,14	94,5	94,74	94,4600	42,15	42,64	42,15	42,3133	264,369	1,52
12	12a	389,6	67,42	67,58	67,38	67,460	92,84	92,37	92,36	92,5233	39,77	39,2	39,64	39,5367	246,773	1,58
	12b	415,5	96,05	96,45	96,3	96,267	67,3	67,34	67,39	67,3433	41,4	41,15	41,38	41,3100	267,809	1,55

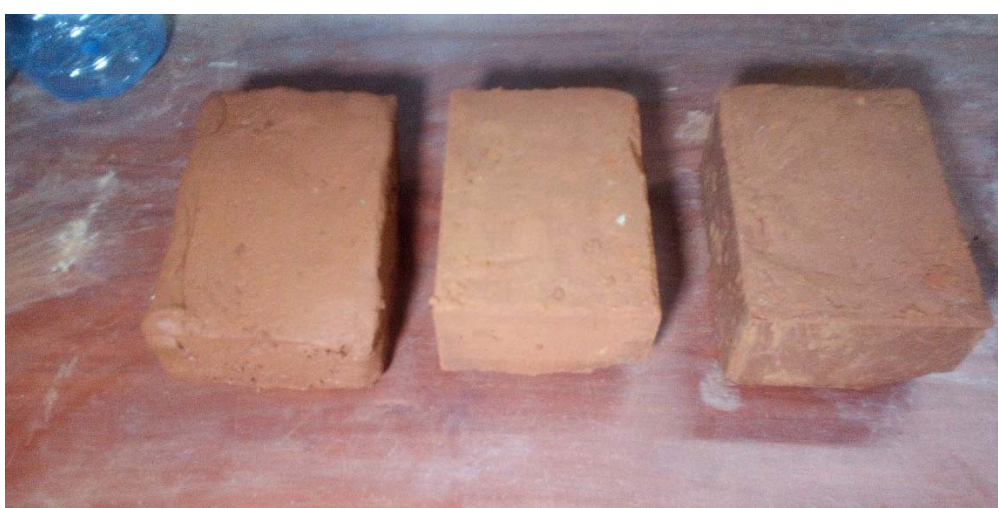
Annexe- 2: Les mesures de la masse volumique des matériaux composites ternaires des blocs de terre rouge en poudre de verre et stabilisé par du ciment portland



Annexe- 3: Procédure de broyage et de tamisage de la poudre de verre



Annexe- 4: Méthode de confection des blocs de terre rouge, et préparation des moules



Annexe- 5: Préparation des blocs de terre rouge composit

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. A. Shubbar, M. Sadique, P. Kot, and W. Atherton, "Future of clay-based construction materials – A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 210, pp. 172–187, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.206.
- [2] H. P. Nguyen, A. Mueller, V. T. Nguyen, and C. T. Nguyen, "Development and characterization of lightweight aggregate recycled from construction and demolition waste mixed with other industrial by-products," *Constr. Build. Mater.*, vol. 313, no. November, p. 125472, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125472.
- [3] N. Kongkajun, E. A. Laitila, P. Ineure, W. Prakaypan, B. Cherdhirunkorn, and P. Chakartnarodom, "Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, p. e00448, 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00448.
- [4] B. Colombo, P. Gaiardelli, S. Dotti, F. Caretto, and G. Coletta, "Recycling of Waste Fiber-Reinforced Plastic Composites : A Patent-Based Analysis," pp. 1–18, 2021.
- [5] L. Antonio, E. Fern, L. Salas-morera, and D. Suescum-morales, "Effect of the Composition of Mixed Recycled Aggregates on Physical – Mechanical Properties," 2021.
- [6] L. Rida, K. Bazzar, and A. H. Alaoui, "High-Volume Fly Ash Mortar Solution for Sustainable Development," *Adv. Intell. Syst. Comput.*, vol. 1104 AISC, no. October 2008, pp. 386–395, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-36671-1_33.
- [7] Y. Labiad, A. Meddah, and M. Beddar, "Physical and mechanical behavior of cement-stabilized compressed earth blocks reinforced by sisal fibers," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.446.
- [8] S. Boussaid, A. El Bakkouri, H. Ezbakhe, T. Ajzoul, and A. El Bouardi, "Comportement thermique de la terre stabilisée au ciment," *Rev. française génie Civ.*, vol. 5, no. 4, pp. 505–516, 2001, doi: 10.3166/rfgc.5.505-516.
- [9] "investigation des Ressources en Argiles du Gabon et leurs Utilisations Conventionnelles ou non dans les régions de Libreville et de Tchibanga."
- [10] C. Sgm, "Cours verres et ceramiques," pp. 1–33.
- [11] K. A. J. Ouedraogo, J. E. Aubert, C. Tribout, and G. Escadeillas, "Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant?," *Constr. Build. Mater.*, vol. 236, p. 117578, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117578.
- [12] P. Muñoz, V. Letelier, M. A. Bustamante, J. Marcos-Ortega, and J. G. Sepúlveda, "Assessment of mechanical, thermal, mineral and physical properties of fired clay brick made by mixing kaolinitic red clay and paper pulp residues," *Appl. Clay Sci.*, vol. 198, no. August, p. 105847, 2020, doi: 10.1016/j.clay.2020.105847.
- [13] H. Majdoubi *et al.*, "Thermal, mechanical and microstructural properties of acidic geopolymer based on moroccan kaolinitic clay," *J. Build. Eng.*, vol. 35, no. October 2020, p. 102078, 2021,

doi: 10.1016/j.jobe.2020.102078.

- [14] P. Guo, M. Bu, M. He, and Y. Wang, "Experimental investigation on thermal conductivity of clay-bearing sandstone subjected to different treatment processes: Drying, wetting and drying II," *Geothermics*, vol. 88, no. June, p. 101909, 2020, doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101909.
- [15] X. Xu, W. Zhang, C. Fan, and G. Li, "Effects of temperature, dry density and water content on the thermal conductivity of Genhe silty clay," *Results Phys.*, vol. 16, no. September 2019, p. 102830, 2020, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102830.
- [16] N. Laaroussi, G. Lauriat, M. Garoum, A. Cherki, and Y. Jannot, "Measurement of thermal properties of brick materials based on clay mixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 351–361, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.104.
- [17] C. Rivera-Gómez, C. Galán-Marín, V. P. López-Cabeza, and E. Diz-Mellado, "Sample key features affecting mechanical, acoustic and thermal properties of a natural-stabilised earthen material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 271, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121569.
- [18] O. Nasry *et al.*, "Thermophysical properties of cement mortar containing waste glass powder," *Crystals*, vol. 11, no. 5, pp. 1–12, 2021, doi: 10.3390/cryst11050488.
- [19] H. Du and K. H. Tan, "Properties of high volume glass powder concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 75, pp. 22–29, 2017.
- [20] S. E. Mohammadyan-Yasouj and A. Ghaderi, "Experimental investigation of waste glass powder, basalt fibre, and carbon nanotube on the mechanical properties of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 252, p. 119115, 2020.
- [21] Y. Du, W. Yang, Y. Ge, S. Wang, and P. Liu, "Thermal conductivity of cement paste containing waste glass powder, metakaolin and limestone filler as supplementary cementitious material," *J. Clean. Prod.*, vol. 287, p. 125018, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125018.
- [22] H. Cengizler, M. Koç, and O. Şan, "Production of ceramic glass foam of low thermal conductivity by a simple method entirely from fly ash," *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 20, pp. 28460–28470, 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.06.265.
- [23] M. B. Østergaard, B. Cai, R. R. Petersen, J. König, P. D. Lee, and Y. Yue, "Impact of pore structure on the thermal conductivity of glass foams," *Mater. Lett.*, vol. 250, pp. 72–74, 2019, doi: 10.1016/j.matlet.2019.04.106.
- [24] S. M. H. Shafaatian, J. R. Wright, and F. Rajabipour, "Performance of recycled soda--lime glass powder in mitigating alkali--silica reaction," *Green Mater.*, vol. 7, no. 1, pp. 28–39, 2018.
- [25] K. A. Zaidi, S. Ram, and M. K. Gautam, "Utilisation of glass powder in high strength copper slag concrete," *Adv. Concr. Constr.*, vol. 5, no. 1, p. 65, 2017.
- [26] H. Elaqla and R. Rustom, "Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 179, pp. 326–335, 2018.
- [27] Z. Kalakada, J. H. Doh, and G. Zi, "Utilisation of coarse glass powder as pozzolanic cement—A mix design investigation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 240, p. 117916, 2020.
- [28] Y. Jani and W. Hogland, "Journal of Environmental Chemical Engineering Waste glass in the production of cement and concrete – A review," vol. 2, pp. 1767–1775, 2014.
- [29] M. Kamali and A. Ghahremaninezhad, "Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 407–416, 2015.
- [30] A. Mohajerani, J. Vajna, T. H. H. Cheung, H. Kurmus, A. Arulrajah, and S. Horpibulsuk, "Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 443–467, 2017.

- [31] “ACI2014DUTan.”.
- [32] J.-X. Lu, B.-J. Zhan, Z.-H. Duan, and C. S. Poon, “Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates,” *Mater. & Des.*, vol. 135, pp. 102–111, 2017.
- [33] Y. Jani and W. Hogland, “Waste glass in the production of cement and concrete--A review,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 1767–1775, 2014.
- [34] Y. Jiang, T.-C. Ling, K. H. Mo, and C. Shi, “A critical review of waste glass powder--Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products,” *J. Environ. Manage.*, vol. 242, pp. 440–449, 2019.
- [35] H. Ez-Zaki, B. El Gharbi, and A. Diouri, “Development of eco-friendly mortars incorporating glass and shell powders,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 159, pp. 198–204, 2018.
- [36] G. M. S. Islam, M. H. Rahman, and N. Kazi, “Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice,” *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 6, no. 1, pp. 37–44, 2017.
- [37] Z. Pan, Z. Tao, T. Murphy, and R. Wuhler, “High temperature performance of mortars containing fine glass powders,” *J. Clean. Prod.*, vol. 162, pp. 16–26, 2017.
- [38] M. C. Bignozzi, A. Saccani, L. Barbieri, and I. Lancellotti, “Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 55, pp. 45–52, 2015.
- [39] K. Zheng, “Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali--silica reaction,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 67, pp. 30–38, 2016.
- [40] S. Liu, Q. Li, G. Xie, L. Li, and H. Xiao, “Effect of grinding time on the particle characteristics of glass powder,” *Powder Technol.*, vol. 295, pp. 133–141, 2016, doi: 10.1016/j.powtec.2016.03.030.
- [41] S. Liu, G. Xie, and S. Wang, “Effect of glass powder on microstructure of cement pastes,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 27, no. 5, pp. 259–267, 2015.
- [42] R. Algerienne, D. Et, D. E. M. En, and G. Civil, “Thème effet de poudre de verre sur les propriétés physico- mécaniques du béton de sable.”
- [43] A. Bouamrane, D. C. El’Ouazzani, L. Tiruta Barna, and K. Mansouri, “Valorisation des boues de papeterie comme matières premières secondaires dans les mortiers de ciment Portland: Incidence des conditions d’incinération sur la résistance mécanique des mortiers,” *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 605–614, 2014.
- [44] S. Guillou *et al.*, “UNIVERSITE M ’ HAMED BOUGARA - BOUMERDES FACULTE DES SCIENCES DE L ’ INGENIEUR Mémoire Valorisation du verre dans l ’ élaboration de béton durable (Approche expérimentale) Boumerdes 2012,” *Zair. Soc. Mater. Sci. Japan*, vol. 64, no. Lmdc, pp. 471–480, 2015.
- [45] M. Belouadah, Z. E. A. Rahmouni, and N. Tebbal, “Effects of glass powder on the characteristics of concrete subjected to high temperatures,” *Adv. Concr. Constr.*, vol. 6, no. 3, p. 311, 2018.
- [46] A. M. Matos and J. Sousa-Coutinho, “Waste glass powder in cement: macro and micro scale study,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 28, no. 7, pp. 423–432, 2016.
- [47] S. S. Hwang and C. M. M. Cortés, “Properties of mortar and pervious concrete with co-utilization of coal fly ash and waste glass powder as partial cement replacements,” *Constr. Build. Mater.*, p. 121415, 2020.
- [48] A. Omran, N. Soliman, A. Zidol, and A. Tagnit-Hamou, “Performance of ground-glass pozzolan

- as a cementitious material—a review,” *Adv. Civ. Eng. Mater.*, vol. 7, no. 1, pp. 237–270, 2018.
- [49] M. Belouadah, Z. E. A. Rahmouni, and N. Tebbal, “Influence of the addition of glass powder and marble powder on the physical and mechanical behavior of composite cement,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 158, pp. 366–375, 2019.
 - [50] Z. Safari, “STRENGTH AND DURABILITY CHARACTERISTICS OF PUMICE BASED M . Sc . THESIS PREPARED BY : Zrar Safari Mahmood MAHMOOD SUPERVISOR : Assoc . Prof . Dr . Mucip TAPAN VAN-2019,” no. September 2019, 2022, doi: 10.13140/RG.2.2.11821.82409.
 - [51] L. Augc, “Colloque International Francophone NoMaD 2012,” pp. 1–7, 2012.
 - [52] S. Nicolas, “Béton de structure à propriétés d ’ isolation thermique améliorées : approche expérimentale et modélisation numérique Le Hung Nguyen To cite this version : HAL Id : tel-00931711,” 2014.
 - [53] L. H. Nguyen and others, “Béton de structure à propriétés d’isolation thermique améliorées: approche expérimentale et modélisation numérique,” Cergy-Pontoise, 2013.
 - [54] A. I. U. M. R. Cnrs, E. Doctorale, A. Docteur, and V. Nam, “Valorisation du verre dans le béton Etude expérimentale du comportement de pâte,” pp. 1–119, 2013.
 - [55] “Optimisation des Poudres de verre dans le béton.” .
 - [56] D. D. A. Sinha, “Thermal properties of concrete,” *PARIPEX-INDIAN J. Res.*, vol. 3, no. 2, 2014.
 - [57] L. H. Nguyen, A.-L. Beaucour, S. Ortola, and A. Noumowé, “Experimental study on the thermal properties of lightweight aggregate concretes at different moisture contents and ambient temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 151, pp. 720–731, 2017.
 - [58] Y. Zhang, Q. Sun, and X. Yang, “Changes in color and thermal properties of fly ash cement mortar after heat treatment,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 72–81, 2018.
 - [59] I. Sa, “Fiche de donnees de securite de la poudre de verre 1.file:///C:/Users/OUMAIMA/Desktop/INFLUENCE DE MICROBILLES DE VERRE DE FORME SPHÉRIQUE - Copie.pdf,” pp. 1–3.
 - [60] “Protocole XRD-Francais-2008,” pp. 1–5, 2008.
 - [61] X. Hou, L. J. Struble, and R. J. Kirkpatrick, “Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 9, pp. 1683–1696, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.03.026.
 - [62] K. Dao, M. Ouedraogo, Y. Millogo, J. E. Aubert, and M. Gomina, “Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 84–96, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001.
 - [63] A. Mekhermeche, “Contribution à l’étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes,” 2012.
 - [64] F. Begarin, “Etude de paramètres endogènes et exogènes au ciment Portland Ordinaire influençant l’hydratation de sa phase principale : Le silicate tricalcique,” pp. 1–225, 2012.
 - [65] P. Chakartnarodom and P. Ineure, *Foam glass development using glass cullet and fly ash or rice husk ash as the raw materials*, vol. 608. 2014.
 - [66] S. Nahi, N. Leklou, A. Khelidj, M. N. Oudjit, and A. Zenati, “Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 120875, 2020.
 - [67] M. O. Boffoue, K. C. Kouadio, and C. H. Kouakou, “Influence de la teneur en ciment sur les

- propriétés thermomécaniques des blocs d'argile comprimée et stabilisée,” *Influ. la teneur en Cim. sur les propriétés thermomécaniques des blocs d'argile comprimée stabilisée*, vol. 11, no. 2, pp. 35–43, 2015, doi: 10.4314/afsci.v11i2.
- [68] T. D. E. Batiments and P. Meukam, “These - Valorisation des briques de terre,” 2004.
 - [69] Y. Sedjro, T. Kiki, Y. Sedjro, and T. Kiki, “microscopique des sols fins en technique routière To cite this version : HAL Id : tel-01476079 DOCTEUR DE L ’ UNIVERSITÉ DE BORDEAUX ET DE L ’ UNIVERSITÉ D ’ ABOMEY -CALAVI,” p. 211, 2017.
 - [70] V. De, L. P. De Verre, and D. Le Béton Autoplaçant, “UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE Faculté de génie Département de génie civil,” 2015.
 - [71] L. Zhang, A. Gustavsen, B. P. Jelle, L. Yang, T. Gao, and Y. Wang, “Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 151, pp. 504–511, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.047.
 - [72] P. Sikora, E. Horszczaruk, K. Skoczylas, and T. Rucinska, “Thermal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanosilica,” *Procedia Eng.*, vol. 196, pp. 159–166, 2017.
 - [73] M. TONYE Emmanuel and P. M. DUVAL Roger, “Caracterisation De Materiaux Locaux En,” 2004.
 - [74] O. H. Oren, A. Gholampour, O. Gencel, and T. Ozbakkaloglu, “Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 238, p. 117774, 2020.
 - [75] E. Hany, N. Fouad, M. Abdel-wahab, and E. Sadek, “Investigating the mechanical and thermal properties of compressed earth bricks made by eco-friendly stabilization materials as partial or full replacement of cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 281, p. 122535, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122535.
 - [76] L. Zhang, A. Gustavsen, B. P. Jelle, L. Yang, T. Gao, and Y. Wang, “Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 151, pp. 504–511, 2017.
 - [77] A. M. Tang, Y. J. Cui, and T. T. Le, “A study on the thermal conductivity of compacted bentonites,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 41, no. 3–4, pp. 181–189, 2008, doi: 10.1016/j.clay.2007.11.001.
 - [78] I. Asadi *et al.*, “Thermophysical properties of sustainable cement mortar containing oil palm boiler clinker (OPBC) as a fine aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, p. 121091, 2020.
 - [79] M. Saidi, A. S. Cherif, B. Zeghamati, and E. Sediki, “Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 566–577, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063.
 - [80] M. Ben Mansour, A. Jelidi, A. S. Cherif, and S. Ben Jabrallah, “Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 104, pp. 44–51, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024.
 - [81] R. Tiskatine *et al.*, “Thermo-physical analysis of low-cost ecological composites for building construction,” *J. Build. Eng.*, vol. 20, no. August, pp. 762–775, 2018, doi: 10.1016/j.jobbe.2018.09.015.
 - [82] M. Malik, S. K. Bhattacharyya, and S. V Barai, “Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review,” *Constr. Build. Mater.*, p. 121398, 2020.
 - [83] H. Ezbakhe, S. Bousad, A. El Bakkour, T. Ajzoul, and A. El Bouardi, “Etude Thermique de la Terre Stabilisée au Ciment Utilisée en Construction au Nord du Maro,” *Rev. Energie. Renouvelable, Journées Therm.*, vol. 69, no. May, pp. 69–72, 2001.
 - [84] O. Nasry, A. Samaouali, H. Sghiouri El Idrissi, N. Bouhaddour, and A. H. Alaoui, “Experimental

Study of the Thermophysical Properties of the Red Earth Composite Stabilized with Cement Containing Waste Glass Powder,” *Crystals*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/cryst12030396.