



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA de Bejaia
Faculté de technologie
Département de GENIE CIVIL

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master en génie civil
Option : Structures

Thème :

Elaboration de brique cuite isolante

Présenté par :

M^{lle} BELABBAS Tafat

M^{lle} MEDJAHED Ouardia

Devant le jury composé de :

- | | |
|------------------------------------|--------------|
| - M ^r BRARA Ali | Président |
| - M ^{me} GUENOUNOU Kahina | Examinatrice |
| - M ^r BOUZIDI Med Amine | Encadrant |

Année universitaire : 2023/2024

« Chaque bonne réalisation, grande ou petite, connaît ses périodes de corvée et de triomphe, un début, un combat et une victoire »

Gandhi.

Tables de matières :

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Introduction générale

<i>1.1. Introduction</i>	<i>1</i>
<i>1.2. Histoire de la brique.....</i>	<i>1</i>
<i>1.3: La brique cuite en Algérie.....</i>	<i>2</i>
<i>1.4. Les matières premières utilisées dans briques</i>	<i>3</i>
<i>1.4.1. Minéralogie des argiles</i>	<i>3</i>
<i>1.4.2. Structure et classification des minéraux argileux.....</i>	<i>4</i>
<i>1.4.3. Propriétés physico-chimiques des minéraux argileux.....</i>	<i>8</i>
<i>1.5. Procédé de fabrication de la brique</i>	<i>9</i>
<i>1.5.1. Extraction des matières premières.....</i>	<i>10</i>
<i>1.5.2. Préparation de l'argile.....</i>	<i>10</i>
<i>1.5.3. Façonnage</i>	<i>10</i>
<i>1.5.4. Séchage.....</i>	<i>11</i>
<i>1-5.5. Cuisson.....</i>	<i>11</i>
<i>1.5.6. Refroidissement.....</i>	<i>11</i>
<i>1.5.7. Contrôle de qualité.....</i>	<i>11</i>
<i>1.5.8. Emballage et expédition.....</i>	<i>11</i>
<i>1.6. Formes des briques cuites.....</i>	<i>11</i>
<i>1.6.1- Les briques perforées</i>	<i>12</i>

I.6.2- Les briques creuses	12
I.6.3- Les briques pleines.....	13
I.6.4- Briques Réfractaires.....	13
I.7. Processus de cuisson.....	14
I.8. Condition de fabrication de briques à base de déchets.....	14
I.9. Les propriétés des briques à base de déchets	15
I.10. Les propriétés technologiques des briques.....	16
I.11. Valorisation des déchets dans des briques cuites	16
I.11.1. Marc du café	17
I.11.2. Sugar scum.....	19
I.13 : Etat de l'art	20
I.14 : Conclusion	23
Chapitre II : Matériels et méthodes	
II.1. Introduction	24
II.2. Matériaux étudiés	24
II.2.1. Caractérisation des matières premières.....	25
II.2.1.1 : Argile bordj Bou Arreridj	25
II.2.1.2 : Le marc du café (MC).....	25
II.2.1.3 : L'écume de sucre (sugar scum).....	26
II.3. Procédures expérimentales.....	26
II.3.1. Détermination des limites d'Atterberg	26
II.3.1.1. La limite de liquidité (W_L).....	27
II.3.1.2. La limite de plasticité (W_p).....	27
II.3.1.3. Indice de plasticité (I_p)	28
II.3.2. Analyse granulométrique par tamisage	28
II.4. Utilisation des déchets dans la fabrication de la brique, étude laboratoire	29
II.4.1. Confection des éprouvettes.....	29
II.4.2. Matériels	29

II.4.3. Matériaux	29
II.4.4. Mode opératoire	29
II.4.4.1. préparation de la matière première	29
II.4.4.2. Mélange de matières premières	32
II.5. Façonnage des échantillons de la brique au laboratoire (avec ajout sugar scum)	33
II.5.1. Préparation du mélange.....	33
II.5.2. Moulage	33
II.5.3. Pressage.....	34
II.5.4. Séchage	34
II.5.5. Cuisson.....	34
II.6: Façonnage des échantillons de la brique au laboratoire (avec ajout marc du café).....	37
II.6.1. Préparation du mélange.....	37
II.6.2. Moulage	37
II.6.4. Séchage	39
II.6.5. Cuisson.....	39
II.7. Caractérisations des briques avec ajout (marc du café et sugar scum)	40
II.7.1. Caractéristiques physiques.....	40
II.7.1.1. Perte en poids au séchage.....	40
II.7.1.2. Perte en masse après la cuisson	41
II.7.1.3. Absorption de l'eau	41
II.7.1.4. Porosité à l'eau:	42
II.7.2. Caractéristiques thermo-physiques	45
II.7.2.1. Conductivité thermique ;	45
II.7.3. Caractéristiques mécaniques	47
II.7.3.1. Résistance à la flexion.....	47
II.7.3.2. Résistance à la compression	49
II.7.4. Analyses chimique et minéralogique	50

II.7.4.1. Spectroscopie infrarouge	50
II.7.4.2 Analyse par diffraction aux rayons X (DRX)	51
II.7.4.3. Analyse chimique par la spectrométrie de fluorescence X (XRF)	53
II.8. Conclusion	54

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.1. Introduction.....	55
III.2. Caractérisation géotechnique des sols.....	55
III.2.1. Limites d'Atterberg	55
III.2.2. La courbe granulométrie.....	57
III.3. Les résultats d'analyse chimique par la spectrométrie de Fluorescence X.....	58
III.4. Les résultats de la perte au feu.....	60
III.5. Résultats des briques avec ajout du marc de café	61
III.5.1. Les résultats de la compression	61
III.5.2. Les résultats de la conductivité thermique	63
III.5.3. Les résultats de la porosité:	65
III.6. Résultats des briques avec ajout de sugar scum.....	67
III.6.1. Les résultats de la compression	67
III.6.2 : Les résultats de la flexion	69
III.6.3. Les résultats de la conductivité thermique.....	71
III.6.4. Les résultats de la porosité	73
III.7. Résultats de l'infra-rouge (IR)	75
III.8. Les résultats de la DRX	80
III.9. Conclusion.....	81

Conclusion générale

Références bibliographiques

Résumé

Remerciements

Après ces années de labeur, d'angoisse et parfois d'appréhension, nous tenons tout d'abord à exprimer nos plus sincères remerciements à Dieu le Tout-Puissant et Miséricordieux pour nous avoir donné la chance, la patience et le courage de réaliser ce travail.

Ce travail a pu voir le jour grâce à l'apport scientifique et aux encouragements de *M^r Bouzidi*, qui a accepté de nous encadrer et de nous guider tout au long de cette recherche. Nous lui sommes reconnaissantes pour la confiance qu'il nous a accordée et pour ses précieux conseils. Nous exprimons ici notre profond respect et nos vifs remerciements pour son dévouement.

Notre gratitude s'adresse également à *M^r Ould Amer Ahmed*, qui nous a fourni la matière première nécessaire à cette recherche, ainsi qu'à *M^r Si Ahmed Chabane*, pour leurs conseils avisés et leur orientation précieuse lors des moments critiques. Nous apprécions également leurs qualités humaines exceptionnelles, leur soutien constant et leur expérience dont nous avons eu l'honneur de bénéficier à de nombreuses reprises.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury, *M^r Brara* et *M^{me} Guenounou*, qui nous font l'honneur d'accepter d'examiner notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du Département de génie civil qui ont contribué à notre formation. En particulier *M^r Lillouch*, chef du département de génie civil, pour son accueil chaleureux et son aide précieuse, ainsi que *M^r Boukellouda* et *M^r Meziani* pour leur soutien constant et leur encouragement à aller de l'avant.

Nous adressons également nos sincères reconnaissances aux techniciens du laboratoire pédagogique de génie civil, *M^r Zoubiri* et *M^{me} Saci*, pour leur disponibilité, sans oublier *M^{me} Bouzeroura* du laboratoire de recherche pour son accueil chaleureux et son aide précieuse.

Nos remerciements vont également à l'ensemble de l'équipe du laboratoire CRAPC, *M^r Ait Merzeg* et *M^r Djermoune*, ainsi qu'à *M^{me} Bradai* du laboratoire de génie des procédés.

Enfin, un grand merci à nos proches qui nous ont soutenues, encouragées et épaulées tout au long de ce travail, et plus particulièrement durant les derniers mois de rédaction.

Merci infiniment.

OUARDIA & TAFAT

Dédicaces

Louange à Dieu avec remerciement et gratitude. Grâce à Lui, aujourd'hui je vois un rêve longtemps attendu devenir réalité, dont je suis fière.

Je célèbre l'aboutissement de ce chemin difficile, parsemé d'embûches. Avec patience, ambition, détermination et foi en Dieu, j'ai surmonté les nombreux défis. Chaque difficulté a renforcé mes rêves plutôt que de me vaincre. Depuis mon entrée à l'université, j'attendais ce moment précieux. Le voyage a été long et ardu, mais j'ai réussi à réaliser mon rêve de devenir ingénieure en génie civil, une réalisation que je n'aurais jamais imaginée.

Je dédie cet humble et modeste travail à mes chers parents:

Autant de phrases et d'expressions, aussi éloquentes soient-elles, ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance pour mes parents qui m'ont inculqué le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Leurs conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Leur patience infinie, leur compréhension et leurs encouragements ont été pour moi un soutien indispensable. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain, et je ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté. Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant espérés, et le fruit de votre soutien infaillible. Que Dieu le Tout-Puissant vous préserve, vous accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et vous protège de tout mal.

À mes chers frères Aissam, Doudour et Akssyl,

Ceux qui m'ont soutenue sans limites et m'ont donné sans compter, merci pour vos conseils et vos encouragements. Vous me poussez à aller de l'avant et à croire encore en mon rêve, et surtout à le réaliser. Je me rends compte que les mots ne suffisent pas pour vous décrire ni même pour vous remercier d'avoir toujours été à mes côtés. Vous avez tant fait pour moi.

À mes fidèles amis : Atika, Sara, Boubkeur, Ouahab, Ferial, Ali, Djahida, Lisa, Zineb, vous êtes une part précieuse de cette réussite. Ainsi qu'à mes tantes et mes cousines adorées : Sabrina, Karima, Firouz, Samira. Sans oublier M^{me} Atroune Lydia. Je ne vous remercierai jamais assez pour votre aide précieuse. Les moments précieux partagés ensemble sont irremplaçables.

À la mémoire de mes chers oncles Abdelkader et Youcef. Bien que vous ne soyez plus parmi nous, votre mémoire vit en moi et inspire chacun de mes accomplissements. Je dédie également ces lignes aux deux anges qui nous ont quittés trop tôt Nesrine et Khalissa

Enfin, à ma meilleure amie et binôme, Tafat, ce fut un voyage rempli de défis et de réalisations. Chaque étape porte en elle une leçon que nous emportons avec nous vers l'avenir. J'ai été très contente de te connaître. Merci pour ton sens de l'humour, et merci pour ton amitié.

Ce mémoire est le témoignage d'un combat que j'ai mené contre moi-même ! Enfin, j'ai réussi, je suis diplômée !

Ouardia...

Dédicaces

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

À mes chers parents,

Vous qui m'avez donné la vie, l'amour et les valeurs essentielles, je vous dédie ce travail. Votre soutien infaillible et vos sacrifices ont été la clé de mon succès. Merci de croire en moi et de me pousser à réaliser mes rêves. Maman, ta présence et tes prières incessantes ont toujours été une source d'espoir pour moi. Papa, tes encouragements, ton soutien et ton amour ont permis à mes études de se dérouler sans entraves. Je vous aime profondément.

À mes sœurs adorées, Tiziri, Tala et Talwith,

Vous avez été mes premières amies, mes confidentes et mes soutiens constants. Merci pour vos encouragements, vos rires et votre amour inconditionnel. Vous avez illuminé mon chemin

À mes amis fidèles, Youba, Boubkeur, Sara, Narimen, Sofiane et Sassa

Pour les moments de partage, de complicité et de soutien, je vous remercie du fond du cœur . Vous êtes une part précieuse de cette réussite.

À mon oncle bien-aimé, Abdelkader, et ma tante bien-aimée, Aicha,

Bien que vous ne soyez plus parmi nous, votre amour et vos enseignements continuent de guider mes pas. Vous avez marqué ma vie de manière indélébile. Votre mémoire vit en moi et inspire chacun de mes accomplissements. Vous me manquez chaque jour.

Enfin, à ma meilleure amie et binôme, Ouardouche,

Merci pour ton amitié sincère et pour avoir été à mes côtés tout au long de ce parcours. Ta présence a été un soutien inestimable.

TAFAT...

Liste des figures

Chapitre I : Synthèse bibliographique

<i>Figure I.1 : Représentation schématique du cycle des argiles dans la croûte continentale.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure I.2 : Couche tétraédrique (T).....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.3 : Couche octaédrique (O).....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.4 : Structure des minéraux argileux</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.5 : Classification des phyllosilicates basée sur les formules structurales.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.6 : Forme des particules argileuses.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.7 : Etapes de fabrication de la brique</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.8 : briques perforées.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.9 : Les briques creuses</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.10 : Les briques pleines.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.11 : Briques Réfractaire</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.12 : Distribution géographique de la production et de la consommation du café.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I.13 : Marc du café.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I.14 : Cycle du marc de café</i>	<i>18</i>
<i>Figure I.15 : Sugar scum.....</i>	<i>19</i>

Chapitre II : Matériels et méthodes

<i>Figure II.16 : Aspect visuel du sol de Bordj Bou Arreridj</i>	<i>25</i>
<i>Figure II.17 : Aspect visuel du marc du café.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure II.18 : Aspect visuel du sugar scum</i>	<i>26</i>
<i>Figure II.19 : Appareil de Casa grande, spatule, tares et outilles à rainure.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.20 : Etapes technologique de l'élaboration des briques</i>	<i>30</i>
<i>Figure II.21 : Broyage de la matière première à l'aide d'un broyeur</i>	<i>31</i>
<i>Figure II.22 : Tamisage de la matière première (argile).....</i>	<i>31</i>
<i>Figure II.23 : Mélange (argile +sugar scum+ eau).....</i>	<i>32</i>
<i>Figure II.24 : Mesure et préparation de la pâte.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure II.25 : Remplissage du moule</i>	<i>33</i>
<i>Figure II.26 : Pressage des éprouvettes et moulage des briques</i>	<i>34</i>
<i>Figure II.27 : La cuisson des briques dans un four électrique.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure II.28 : La brique à la sortie du four.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure II.29 : Mélange (argile +marc de café+ eau)</i>	<i>36</i>

Figure II.30 : Remplissage du moule.....	37
Figure II.31 : Pressage des éprouvettes	38
Figure II.32 : Démoulage des briques.....	38
Figure II.33 : Séchage à l'étuve	39
Figure II.34 : La cuisson des briques dans un four électrique.....	39
Figure II.35 : La brique à la sortie du four.....	40
Figure II.36 : Briques (Sugar scum) immergés	41
Figure II.37 : Briques (marc du café) immergées	42
Figure II.38 : Détermination de la masse saturée d'eau des briques avec ajout sugar scum	43
Figure II.39 : Détermination de la masse saturée d'eau des briques avec ajout marc du café .	44
Figure II.40 : Pesée hydrostatique des briques avec ajout de sugar scum	44
Figure II.41 : Pesée hydrostatique des briques avec ajout du marc du café.....	45
Figure II.42 : Un CT-mètre et une sonde	46
Figure II.43 : Détermination de la conductivité thermique des briques (Sugar scum).....	47
Figure II.44 : Détermination de la conductivité thermique des briques (marc du café).....	47
Figure II.45 : Essai de flexion.....	48
Figure II.46 : Appareil de la résistance à la flexion	48
Figure II.47 : Essai de compression.....	49
Figure II.48 : Appareil de la résistance à la compression	50
Figure II.49 : Pastille	51
Figure II.50 : Spectrophotomètre IRAiffinity -1.....	51
Figure II.51 : Diffractogramme.....	52
Figure II.52 : Forme de pastille préparée.....	53
Figure II.53 : Spectroscope	54

Chapitre III : Résultats et Discussions

Figure III.54 : Classification du sol sur le diagramme de Casagrande des sols fins	56
Figure III.55 : Courbe granulométrique de l'Argile.....	57
Figure III.56 : Evaluation des pertes au feu des briques avec ajout de sugar scum	60
Figure III.57 ; Evaluation des pertes au feu des briques avec ajout de marc de café.....	60
Figure III.58 : Les résultats de la compression de briques avec ajout du marc du café	61
Figure III.59 : Les résultats de la conductivité thermique de briques avec ajout marc du café	63
Figure III.60 : Les résultats de la porosité (%) de briques avec ajout du marc du café.....	65
Figure III.61 : Les résultats de la compression de briques avec ajout sugar scum.....	67
Figure III.62 : Les résultats de la flexion de briques avec ajout sugar scum	69

Figure III.63 : Les résultats de la conductivité de briques avec ajout sugar scum.....	71
Figure III.64 : les résultats de la porosité des briques avec ajout sugar scum.....	73
Figure III.65 : Spectre Infrarouge de l'Argile.....	75
Figure III.66 : Spectre Infrarouge du café.....	76
Figure III.67 : Spectre IR de sugar scum.....	77
Figure III.68 : Spectre IR des briques avec ajout de sugar scum.....	78
Figure III.69 : Spectre IR des briques avec ajout du marc de café.....	79
Figure III.70 : Spectre DRX des échantillons avec ajout de sugar scum.....	80

Liste des tableaux

Chapitre II : Matériels et méthodes

<i>Tableau II.1 : Les compositions des mélanges pour 0%, 7,5% ,15% d'ajout (sugar scum).....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau II.2 : Les compositions des mélanges pour 0%, 3% ,6% d'ajout (le marc du café)</i>	<i>36</i>

Chapitre III : Résultats et Discussions

<i>Tableau III.3 : Estimation de la plasticité d'un sol</i>	<i>55</i>
<i>Tableau III.4 : Limite d'Atterberg de l'argile</i>	<i>55</i>
<i>Tableau III.5 : Résultats de l'analyse granulométrique de l'argile</i>	<i>57</i>
<i>Tableau III.6 : Composition chimique de l'argile</i>	<i>58</i>
<i>Tableau III.7 : Composition chimique du sugar scum.....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau III.8 : Composition chimique des échantillons des briques de sugar scum.....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau III.9 : Composition chimique des échantillons des briques du marc de café</i>	<i>59</i>
<i>Tableau III.10 : Résultats du spectre IR d'argile</i>	<i>75</i>
<i>Tableau III.11 : Résultats du spectre IR du marc de café</i>	<i>76</i>
<i>Tableau III.12 : Résultats du spectre IR de sugar scum.....</i>	<i>77</i>
<i>Tableau III.13 : Résultats du spectre IR des briques avec ajout du sugar scum.....</i>	<i>78</i>
<i>Tableau III.14 : Résultats du spectre IR des briques avec ajout du marc de café</i>	<i>79</i>



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale:

Depuis des millénaires la terre est utilisée en construction, il s'agit d'une matière première présente partout, renouvelable et surtout recyclable, réduisant ainsi les émissions de CO₂. La terre crue était utilisée dans les constructions sous différentes formes soit en pisé, en torchis, en adobe ou encore en brique de terre comprimée et brique cuite. 30 % de la population mondiale, vit dans un habitat en terre selon CRAT (Centre international de la construction en terre), ou l'argile et la matière première destinée à la fabrication des briques de construction, présente un intérêt croissant car son application industrielle ne cesse de se diversifier. On peut ainsi envisager d'économiser cette matière première grâce à l'utilisation de certains déchets industriels, végétaux et agroalimentaires.

L'augmentation accrue de la production agricole et le développement de l'agro-industrie dans de nombreux pays du monde, ont donné lieu à de grandes quantités de déchets agricoles qui ne sont souvent pas convenablement gérées ou utilisées. Toutefois des efforts sont entrepris pour leurs valorisations dans l'alimentation animale et aussi comme engrais et carburant pour la production de l'énergie. Mais peu de travaux ont été réalisés pour développer l'utilisation de ces déchets dans la production de matériaux de construction (1). Les éco-matériaux à base d'argile sont l'avenir de la construction. Les techniques utilisées pour les créer sont actuellement vues comme une solution prometteuse pour traiter et valoriser les déchets. Cette approche permet de réduire considérablement la quantité de déchets, de stabiliser les polluants toxiques, et de transformer les déchets en matériaux utiles. L'utilisation de déchets industriels et agro-alimentaires pour fabriquer des matériaux de construction innovants offre une chance de réduire l'impact environnemental de l'industrie de la construction tout en valorisant des résidus souvent considérés comme des problèmes.

Aujourd'hui, le recyclage des déchets mis en décharge et l'économie d'énergie sont des champs de recherche très importants. La valorisation des déchets agricoles et industriels dans la fabrication des briques représente une solution prometteuse pour ces problématiques. Les briques élaborées à partir de ces déchets permettent de réduire la consommation de ressources naturelles non renouvelables, de récupérer les déchets dangereux, et de produire des matériaux de construction à des propriétés mécanique, thermique et acoustiques adéquats, ou l'augmentation de la demande de briques cuites à base d'argile, on peut se retrouver avec le recyclage ou la réutilisation des déchets dans les matériaux de construction afin de diminuer la quantité d'argile utilisé dans la fabrication de brique, en remplacent une quantité d'argile

par un pourcentage d'un déchet organiques et inorganique pour la fabrication des briques cuites dans le but d'améliorer leurs caractéristiques physiques, notamment leur pouvoir d'isolation. Une des possibilités pour renforcer l'isolation d'un produit est d'augmenter sa porosité, ainsi sa résistance.

Dans notre recherche nous avons utilisé deux déchets comme ajout dans les briques qui sont le marc du café et sugar scum, ou l'incorporation de ces deux types de déchets dans la fabrication de briques cuites vise à créer un produit à la fois performant et respectueux de l'environnement. Cette démarche s'inscrit dans une perspective d'économie circulaire où les déchets sont transformés en ressources utiles, réduisant ainsi la dépendance aux matières premières et minimisant l'empreinte écologique survenu par l'industrie de la construction.

Ce travail vise à répondre à la problématique suivante : Comment fabriquer et optimiser une brique cuite à partir de trois variables (la quantité d'eau ; la température de cuisson ; le pourcentage de remplacement) tout en gardent les propriétés de brique conformes aux recommandation exigé par la norme de fabrication des briques cuites afin d'attendre une construction durable et économique ?

- Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur les matériaux de construction écologiques et les techniques d'incorporation de déchets dans les briques cuites.
- Le deuxième chapitre détaille la méthodologie expérimentale utilisée pour la fabrication des briques, incluant les caractéristiques des matériaux utilisés, les procédés de fabrication et les tests de performance.
- Le troisième chapitre discute des résultats obtenus en termes de propriétés mécaniques et thermiques des briques élaborées.
- Enfin, la dernière partie conclut en mettant en lumière les contributions de cette recherche et les perspectives pour de futures études.



CHAPITRE I

Synthèse Bibliographique

I.1. Introduction :

Les briques ont longtemps été considérées comme des éléments fondamentaux dans le domaine de la construction, offrant une combinaison unique de durabilité, de résistance et d'isolation thermique. Au fil des siècles, le processus de fabrication des briques a connu plusieurs évolutions majeures. Au départ, la brique crue, faite d'argile séchée au soleil, était largement utilisée, particulièrement dans les régions sèches. Cependant, avec l'avancée des techniques de construction et la découverte du feu, la brique cuite a émergé comme une innovation cruciale. Ce procédé de cuisson de l'argile à haute température a transformé les briques en matériaux extrêmement solides et résistants, capables de supporter des charges lourdes et de résister aux intempéries. Aujourd'hui, la brique cuite reste un matériau de choix dans de nombreuses constructions, appréciée pour ses qualités esthétiques, sa durabilité et sa capacité à maintenir des bâtiments confortables et sécurisés (1).

I.2. Histoire de la brique :

a/L'antiquité :

La brique cuite est l'évolution naturelle de la brique crue, apparue lorsque l'homme a maîtrisé l'art de la poterie et cherché à rendre les briques durables par la cuisson. Ce processus nécessite des fours plus grands, beaucoup de combustible et une organisation collective du travail, le rendant possible uniquement dans des sociétés civilisées. La première brique cuite a probablement été fabriquée au Moyen-Orient vers 3000 avant notre ère, bien que cette technique ait pu être réinventée ailleurs. Les briques étaient utilisées pour divers types de constructions, comme des murs défensifs, des ponts et de grands édifices religieux. Vers 1000 avant J.-C., des briques émaillées aux couleurs vives étaient déjà produites, atteignant un niveau artistique remarquable, comme en témoignent les pièces exposées au musée de Pergame à Berlin.

Les Grecs ont introduit la brique en Europe, où elle était initialement cachée derrière le marbre dans les constructions classiques. Plus tard, les Romains, plus ingénieurs qu'artistes, ont utilisé massivement la brique pour leurs bâtiments publics et leurs travaux de génie civil (2).

b/Le moyen âge :

Après la chute de l'Empire romain, l'Empire byzantin et le monde musulman continuent d'utiliser la brique de terre cuite. En témoignent la grande église Sainte-Sophie à Istanbul et la grande mosquée de Cordoue en Espagne. En revanche, au nord des Alpes et des Pyrénées, la construction en brique de terre cuite décline presque totalement, faute d'organisation sociale. La fabrication de briques en quantité suffisante nécessite une structure sociale qui fait défaut à cette époque troublée. Quelques rares bâtiments de l'époque mérovingienne et carolingienne montrent des réutilisations de briques gallo-romaines. La brique réapparaît dans le sud de la France autour de l'an mil, avec des édifices comme la basilique Saint-Sernin à Toulouse, puis revient sur les bords de la mer du Nord un siècle plus tard (2).

c/L'époque moderne :

La révolution industrielle a marqué un tournant majeur pour la brique, à partir de la seconde moitié du XVIIIe siècle. Devenue un produit de masse grâce à l'intervention des ingénieurs, elle a bénéficié de leur ingéniosité dans le développement de fours et de machines à mouler. Les dispositifs présentés lors des grandes expositions universelles étaient souvent complexes, tentant de reproduire les gestes des ouvriers. Cela a conduit à l'adage populaire selon lequel « les ingénieurs sont le meilleur moyen de faire faillite » dans le domaine de la fabrication de briques (2).

I.3: La brique cuite en Algérie :

Les matériaux en terre cuite sont utilisés depuis des siècles dans divers domaines, notamment la construction, pour fabriquer briques, carreaux, conduits de fumée, etc. En Algérie, les constructions traditionnelles utilisaient l'argile, avec des méthodes artisanales. Au 19e siècle, la production s'est modernisée avec la mécanisation et l'utilisation de fours modernes. La réduction des impacts environnementaux et sanitaires est désormais une priorité, nécessitant des technologies modernes pour minimiser les dommages tout au long du cycle de vie des matériaux (3).

I.4. Les matières premières utilisées dans briques :

Les matières premières utilisées dans la fabrication des produits de terre cuite sont essentiellement des terres argileuses. Ces dernières se composent d'une grande fraction argileuse qui leur donne des propriétés particulières, une faible conductivité thermique (4) (5), et une tenue mécanique adaptée à leurs applications, justifiant ainsi leur choix pour la production des briques de terre cuite. Dans cette section seront présentés la minéralogie des argiles et les principaux minéraux argileux utilisés dans la production des produits de terre cuite (6).

I.4.1. Minéralogie des argiles :

Les argiles sont des matériaux sédimentaires de la couche superficielle de la croûte terrestre, résultent de la dégradation physique et chimique des minéraux des roches éruptives et magmatiques (comme le granite et le basalte) par l'action des eaux de surface. Ces résidus détritiques sont transportés par des glaciers, des cours d'eau ou le vent, puis se déposent dans les bassins de sédimentation (7).

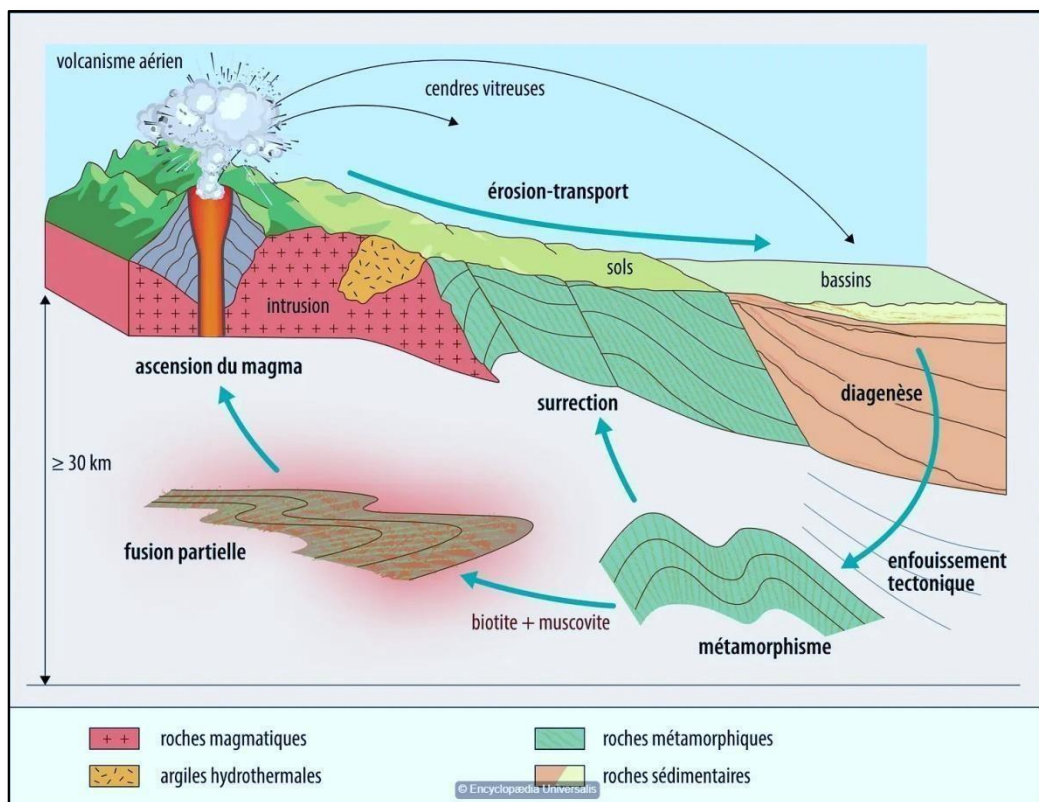


Figure I.1 : Représentation schématique du cycle des argiles dans la croûte continentale (d'après R.J. Merriman, 2005)

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Les argiles Ce sont des particules microscopiques mesurant moins de 0,002 mm (2 μm). Les particules d'argile se distinguent des autres fractions du sol par leur composition chimique et leurs propriétés physiques.

- **Chimiquement** : l'argile à l'état naturel est composée de divers minéraux associés, tels que des carbonates (dolomite, diobertite, calcite, aragonite), de la silice (cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, diaspore) ainsi que des minéraux ferrifères (8).
- **Physiquement** : les argiles sont constituées de cristaux fins, de forme irrégulière ou hexagonale, plats et allongés. Leur surface spécifique est nettement plus grande que celle des particules grossières, anguleuses ou sphériques (8).

I.4.2. Structure et classification des minéraux argileux :

Les minéraux argileux donnent aux argiles leurs propriétés bien connues : la plasticité et le durcissement à la cuisson. Ces minéraux sont de très petits cristaux colloïdaux, visibles uniquement au microscope électronique.

Des études par diffraction des rayons X ont révélé que ces minéraux sont constitués d'un empilement de feuillets unitaires, formant une structure semblable à un jeu de cartes. La figure I.3 illustre cet empilement, montrant les surfaces basales, les bordures des particules ainsi que les espaces inter-feuillets.

❖ Les phyllo silicates comme éléments fondamentaux :

Les argiles sont constituées de minéraux dont les particules sont essentiellement des phyllosilicates. La structure de base des phyllosilicates est un feuillet bidimensionnel silicaté résultant de l'accumulation de couches tétraédriques (T) et octaédriques (O) d'oxygène.

Les couches tétraédriques et octaédriques sont formées par des plans d'oxygènes créant des cavités. La stabilité est assurée par des cations : Si^{4+} , souvent remplacé par Al^{3+} ou Fe^{3+} dans les tétraèdres, et Al^{3+} , Fe^{2+} , ou Mg^{2+} dans les octaèdres, avec Mg^{2+} dominant dans les couches trioctaédriques (8).

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

- Le plan de tétraèdres (T) est composé de tétraèdres d'atomes d'oxygène autour de chaque atome Z. Chaque groupement ZO_4 est partagé par trois atomes d'oxygène avec les tétraèdres adjacents, ce qui crée un réseau hexagonal plan. La base est liée par des liaisons atomiques à deux atomes de silicium pour chaque oxygène.

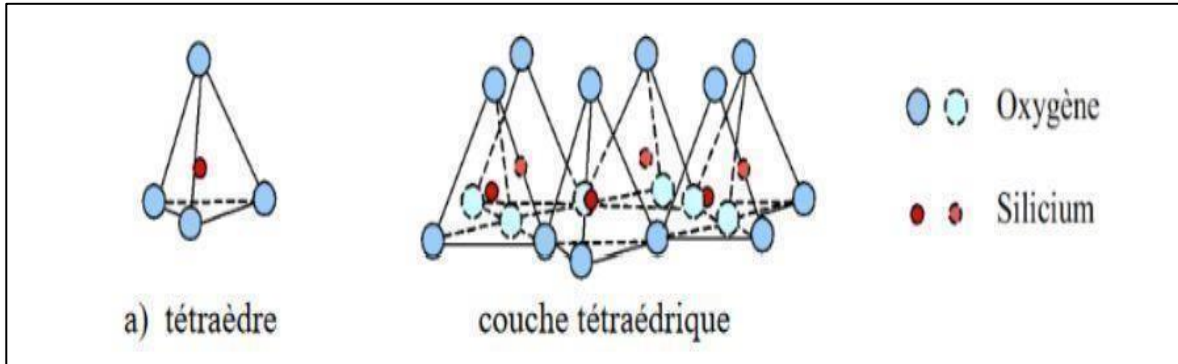


Figure I.2 : Couche tétraédrique (T) (9)

- Le plan d'octaèdres (O), composé d'atomes d'oxygène et de groupements hydroxyles autour de chaque atome M, forme un réseau hexagonal continu. L'empilement des couches tétraédriques et octaédriques crée des cavités pour des ions bivalents ou trivalents. La couche octaédrique peut être occupée par 2 M^{3+} (comme Al^{3+}) ou 3 M^{2+} (comme Mg^{2+}), distinguant ainsi les phyllosilicates dioctaédriques (deux sites sur trois occupés) des phyllosilicates trioctaédriques (tous les sites occupés).

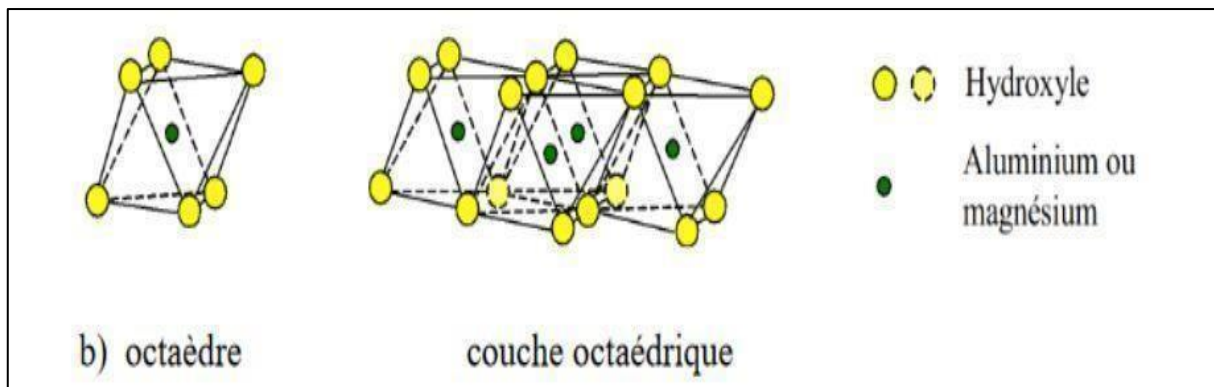


Figure I.3 : Couche octaédrique (O) (9)

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

❖ Classification des phyllo silicates:

On classifie les argiles en fonction de leur épaisseur et de leur structure, de leur composition chimique, de leur espace inter foliaire et de leur capacité d'échange de cations.

Les phyllo silicates sont classés en trois familles principales :

- Les minéraux TO ou 1/1 sans inter feuillet, l'équidistance basale est alors de 7,1Å (la kaolinite). Avec de l'eau comme inter feuillet, l'équidistance basale est de 10,1Å (l'halloysite)
- Les minéraux TOT ou 2/1 sans inter feuillet, l'équidistance basale varie de 9,2 & 9,3Å (la pyrophyllite). Avec un inter feuillet constitué de cations, l'équidistance de base est de 10Å (les micas). Avec des cations alcalins, l'équidistance basale varie de 14 à 15Å (les vermiculites et les smectites).
- Les minéraux TOTO ou 2/1/1 avec un inter feuillet constitué d'octaèdres de type brucite, l'équidistance basale est de 14,2Å (les chlorites)
- Les minéraux inter-stratifiés: Le minéral inter stratifié régulier est formé de l'empilement régulier de feuillets de minéraux argileux simples différents (par exemple A-B-A-B-A- B...). Un inter stratifié est considéré comme irrégulier si l'empilement des différents types de feuillets est aléatoire, c'est-à-dire qu'il ne dessine aucune séquence répétitive (10) (11) (12).

La classification de l'argile dépend du type de couche de base et de la taille de l'unité structurale, mesurée en angströms ($1\text{Å}=10^{-10}\text{m}$). Selon leur réactivité avec l'environnement, en particulier l'eau, les argiles sont divisées en quatre grandes catégories :

Kaolinite : un minéral avec une structure basique T-O de 7 Å, composée d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique.

Illite : un minéral avec une structure T-O-T de 10 Å, où une couche octaédrique est entourée par deux couches tétraédriques.

Chlorite : un minéral avec une structure T-O-T-O de 14 Å, comprenant une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques et une feuille intermédiaire.

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Smectites (Montmorillonite) : un minéral avec des flocons et des ions dans une structure T-O-T de 10 Å, où une couche octaédrique est insérée entre deux couches T-O-T. La distance de base peut varier en fonction du type d'ion intercalé et de leur hydratation.

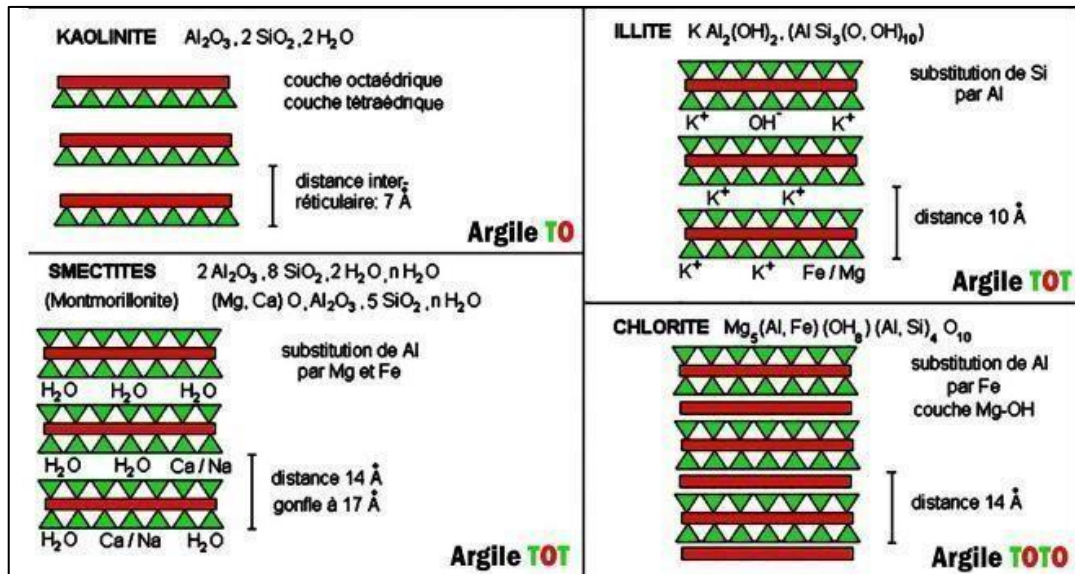


Figure I.4 : Structure des minéraux argileux

La classification suivante a été proposée par Bailey (1980), déduite notamment des travaux de Mackenzie (1965) et Brindley (1966) :

Charge par maille	DI-OCTAEDRIQUE	TRIOCTAEDRIQUE
# 0	Pyrophyllite $(Al_4)(Si_8)O_{20}(OH)_4$	Talc $(Mg_6)(Si_8)O_{20}(OH)_4$
SMECTITES		
0,4 à 1,2	Montmorillonite $M^+_y(Al_{4-y}Mg_y)(Si_8)O_{20}(OH)_4$ Beidellite / Nontronite $M^+_y(Al_4/Fe_4)(Si_{8-x}Al_x)O_{20}(OH)_4$	Hectorite - Stevensite $M^+_y(Mg_{6-y}Li_y)(Si_8)O_{20}(OH)_4$ Saponite $M^+_x(Mg_6)(Si_{8-x}Al_x)O_{20}(OH)_4$
1,2 à 1,8	Illites $K^{+x+y}(Si_{8-x}Al_x)(Al_{4-y}M^{2+}_y)O_{20}(OH)_4$	Vermiculites $M^{+x+y}(Mg_{6-y}M^{3+}_y)(Si_{8-x}Al_x)O_{20}(OH)_4$
MICAS		
2	Muscovite $K^+_2(Al_4)(Si_6Al_2)O_{20}(OH)_4$	Phlogopite $K^+_2(Mg_6)(Si_6Al_2)O_{20}(OH)_4$
4	Margarite $Ca^{2+}_2(Al_4)(Si_4Al_4)O_{20}(OH)_4$	Clintonite $K^+_2(Mg_6)(Si_4Al_4)O_{20}(OH)_4$

Figure I.5 : Classification des phyllosilicates basée sur les formules structurales et la charge du feuillet par maille (8)

I.4.3. Propriétés physico-chimiques des minéraux argileux :

Les minéraux argileux se distinguent par diverses caractéristiques physico-chimiques, dont les principales sont les suivantes (13).

- **Capacité d'échange cationique :**

La charge négative des particules argileuses, telles que les smectites, est compensée par l'adsorption de cations, principalement du sodium et du calcium, sur leurs surfaces et entre les feuilles. Il est possible d'échanger ces cations avec d'autres cations du système. La charge des illites est principalement compensée par le potassium, qui renforce les feuillets et les empêche de gonfler en présence d'eau. Il est donc difficile d'échanger du potassium. La capacité d'échange cationique est un indicateur de la capacité d'une argile à échanger des cations, qui sont entourés d'une coquille d'eau. Par ordre de substitution, les cations de valence plus élevée sont plus facilement substitués par ceux de valence plus faible : $Li^+ < Na^+ < H^+ < K^+ < NH_4^+ \ll Mg^{++} < Ca^{++} \ll Al^{+++}$. On utilise ces échanges cationiques afin d'améliorer les propriétés mécaniques de l'argile (14).

- **Plasticité :**

L'épaisseur d'une argile influence sa plasticité, qui peut être augmentée en la broyant rapidement. Cette propriété est liée à la fragilité des matériaux argileux, les rendant déformables à l'échelle macroscopique sous l'effet d'une force externe (15).

- **Bonne capacité de compactage :**

La compression de la pâte d'argile dans un moule permet d'obtenir des matériaux de formes variées et denses. Les minéraux argileux présentent également d'autres caractéristiques importantes liées à leur forme, leur surface spécifique, leur capacité d'échange cationique et leur aptitude à adsorber l'eau (16).

- **Capacité de gonflement :**

La pression de gonflement dépend principalement de la surface spécifique moyenne : plus la surface est grande, plus la force agissant sur cette surface est importante, ce qui entraîne un changement de volume significatif et une pression de gonflement élevée (17).

- **Forme et surface spécifique :**

Les argiles sont aplaties et se présentent sous forme d'aiguilles (assez rares) ; de lattes et de flocons. Les argiles ont une surface spécifique importante en raison de leur petite taille et de leurs formes spécifiques (16).

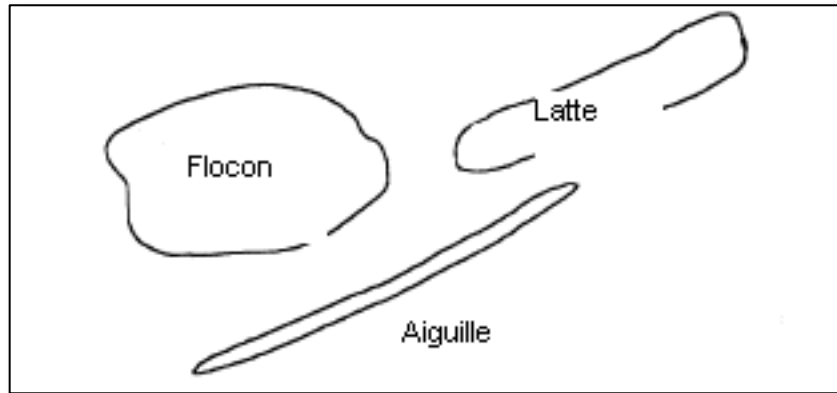


Figure I.6 : Forme des particules argileuses

I.5. Procédé de fabrication de la brique :

La fabrication de la brique est toujours la même et n'a pas fondamentalement évolué, même si ses formes et le type d'argile utilisée sont différents. Les étapes du processus de fabrication sont l'extraction et la préparation de l'argile, le moulage, le séchage et la cuisson de la brique.

Les étapes de fabrication sont représentées dans la figure suivante et peuvent être présumées comme suit :

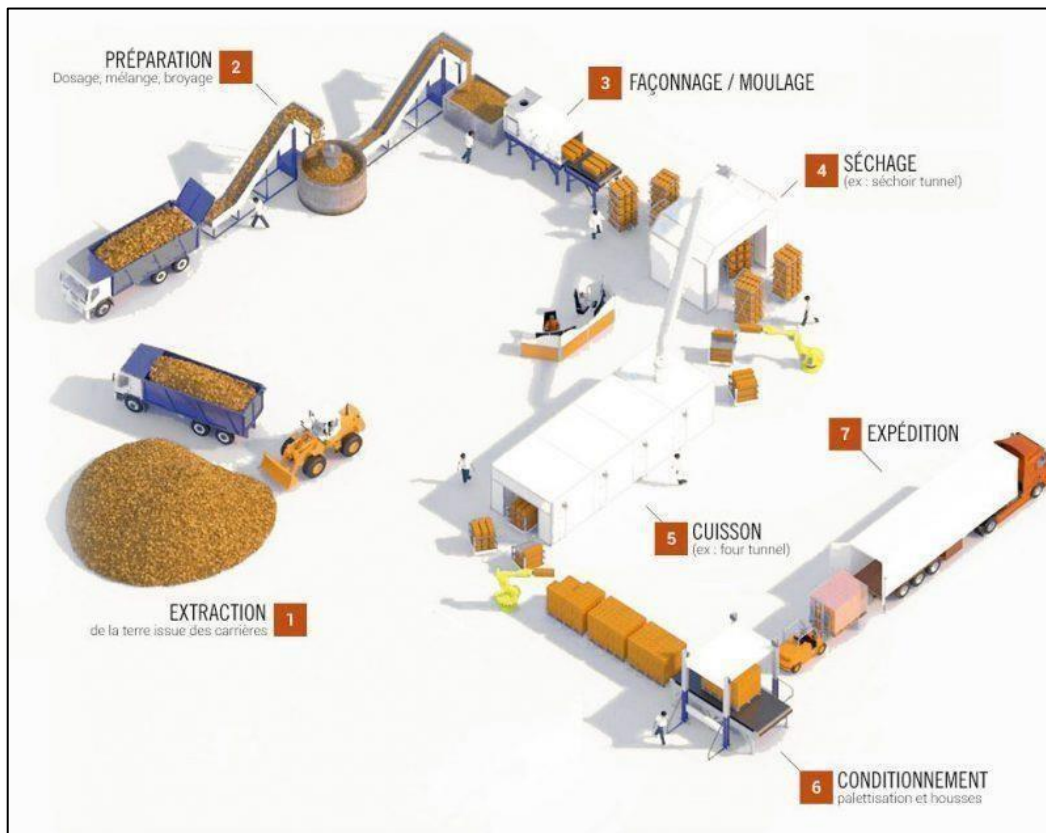


Figure I.7 : Etapes de fabrication de la brique

I.5.1. Extraction des matières premières :

Les matières premières (les argiles), généralement extraites des carrières, subissent une préparation préliminaire avant leur incorporation dans le mélange, incluant l'enlèvement des impuretés, le concassage, le broyage et le dosage.

I.5.2. Préparation de l'argile :

L'argile est broyée et mélangée avec de l'eau et parfois d'autres matériaux pour obtenir une consistance homogène

I.5.3. Façonnage :

L'argile préparée est façonnée en briques à l'aide de presses ou de filières pour obtenir les dimensions et la forme souhaitées.

I.5.4. Séchage :

Les briques façonnées sont séchées à l'air libre ou dans des séchoirs pour éliminer l'humidité. Ce processus peut durer plusieurs jours.

I-5.5.Cuisson :

Les briques séchées sont ensuite cuites dans des fours à haute température (entre 900 et 1200°C) pour durcir et atteindre leur résistance finale.

I.5.6. Refroidissement :

Les briques cuites sont laissées à refroidir progressivement pour éviter les fissures et garantir leur durabilité.

I.5.7. Contrôle de qualité :

Les briques sont inspectées pour vérifier leur qualité, leur forme, et leur résistance. Les briques défectueuses sont éliminées.

I.5.8. Emballage et expédition :

Les briques conformes aux standards de qualité sont emballées et expédiées vers les chantiers de construction.

Chaque étape est cruciale pour assurer la qualité et la durabilité des briques cuites utilisées dans la construction.

I.6. Formes des briques cuites :

Avant de découvrir les différents types de briques, il faut savoir que les briques cuites, fabriquées à partir d'argile et de sable, sont des matériaux durables et polyvalents, prisés pour leur résistance, leur isolation thermique et leur durabilité. Voici un aperçu des principaux types de briques cuites et leurs caractéristiques.

I.6.1- Les briques perforées :

Briques comportant des perforations pour réduire le poids, améliorer l'isolation thermique et faciliter le séchage et la cuisson.



Figure I.8 : briques perforées

I.6.2- Les briques creuses :

Briques avec des cavités importantes, légères, offrant une bonne isolation thermique et utilisées souvent pour les cloisons et les murs non porteurs.



Figure I.9 : Les briques creuses

I.6.3- Les briques pleines :

Les briques pleines sont, comme leur nom l'indique, entièrement "fermées". Elles sont soit directement moulées à la presse soit à la filière.



Figure I.10 : Les briques pleines

I.6.4- Briques Réfractaires :

Briques résistantes aux hautes températures, utilisées pour les cheminées, fours et autres structures exposées à de fortes chaleurs.



Figure I.11 : Briques Réfractaire

I.7. Processus de cuisson :

Les transformations des argiles en briques cuites ressemblent beaucoup au processus de métamorphisme thermique à haute température, mais avec une différence majeure : dans un contexte géologique, ces transformations prennent des dizaines à des milliers d'années, alors que pour les briques, la cuisson dure entre un et deux jours.

Les transformations minéralogiques jouent un rôle crucial en influençant les propriétés finales des briques cuites.

Il est donc essentiel pour un fabricant de briques de bien comprendre la composition minéralogique des matières premières et leur évolution pendant la cuisson. La nature des phases minérales formées après la cuisson dépend principalement de la composition chimique, de la minéralogie, de la température de cuisson, de la durée de cuisson et de l'atmosphère de cuisson (18).

I.8. Condition de fabrication de briques à base de déchets :

Le procédé de cuisson est une étape cruciale pour déterminer les propriétés finales des briques. Ces propriétés dépendent principalement du comportement et des transformations des matières premières pendant la cuisson.

Pour cuire correctement les briques, il faut prendre en compte plusieurs paramètres : la température finale de cuisson, la vitesse de cuisson et la durée de cuisson. La nature des matières premières, qu'elles soient physiques, chimiques ou minéralogiques, influence ces conditions de cuisson. La phase liquide, qui joue un rôle majeur dans les propriétés finales des briques, commence à se former vers 900°C et se termine autour de 1050°C. Des promoteurs de fusion comme les oxydes de fer, la chaux et les alcalins favorisent cette fusion à des températures plus basses, augmentant la quantité de phase liquide et améliorant les propriétés mécaniques des briques.

Les propriétés de chaque type de déchet déterminent les conditions de cuisson optimales pour produire des briques conformes aux normes de construction. La plupart des études sur l'utilisation de déchets industriels dans la fabrication des briques cherchent à déterminer les meilleures conditions de cuisson tout en utilisant le maximum de déchet possible.

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Lorsque les déchets contiennent des agents fondants, de basses températures de cuisson suffisent pour obtenir les propriétés désirées. En revanche, pour les déchets avec des phases résistantes, des températures plus élevées sont nécessaires. Il est aussi crucial de prêter attention à la vitesse de cuisson car des transformations de forme, comme celle du quartz alpha en quartz bêta autour de 573°C, peuvent fragiliser les briques. Pour éviter ce problème, certains chercheurs utilisent des paliers de cuisson avant d'atteindre la température finale. Ces paliers permettent aussi d'évacuer les gaz de manière contrôlée, prévenant ainsi une détérioration des propriétés mécaniques des briques (19).

I.9. Les propriétés des briques à base de déchets :

L'évaluation de la faisabilité d'utiliser des déchets dans la fabrication de briques est étudiée dans la littérature en examinant les aspects suivants :

- Les propriétés physiques et mécaniques des briques faites avec des déchets industriels.
- Le comportement environnemental de ces briques, notamment la lixiviation et la mobilité des contaminants (comme les métaux lourds et les métalloïdes).
- Les dégagements gazeux pendant la cuisson, en quantifiant et déterminant les gaz libérés.

En d'autres termes, on ne peut pas parler de recyclage ou de valorisation d'un déchet industriel dans la fabrication de briques sans considérer l'ensemble du cycle de vie du produit (fabrication, utilisation et démolition). De plus, le produit fini contenant des déchets ne doit pas poser de menace à la santé des travailleurs (par contact ou inhalation de poussières) ni à l'environnement.

Actuellement, le comité européen de normalisation (CEN) développe des normes techniques qui prennent en compte les exigences de santé, de sécurité et d'environnement pour tous les produits de construction, y compris ceux contenant des déchets (19).

I.10. Les propriétés technologiques des briques :

La valorisation des déchets industriels dans la fabrication de briques commence par évaluer leurs propriétés technologiques : résistance mécanique, porosité, absorption d'eau, densité, et pertes au feu. Ces propriétés sont mesurées selon les normes de construction de chaque pays. L'objectif est de comparer les résultats obtenus avec les exigences des normes pour déterminer si les déchets peuvent être utilisés dans les briques. La plupart des études utilisent des normes européennes (CEN : Comité Européen de Normalisation américaines), américaines (ASTM : American Society for Testing and Materials) et d'autres normes (20).

- **Résistance mécanique:** C'est un indicateur de qualité essentiel exigé par les normes de construction. La caractérisation mécanique inclut des essais de compression uniaxiale et de flexion sur des échantillons, pour évaluer si le matériau peut être utilisé en construction.
- **Porosité :** Elle influence fortement la résistance mécanique, l'absorption d'eau, et la perméabilité de la brique. La porosité dépend de la température de cuisson et de la minéralogie des matières premières. Une cuisson à haute température produit une structure vitreuse, avec une contraction importante et une variation de la porosité.
- **Pertes au feu :** Elles sont importantes car elles indiquent la porosité du produit, ce qui affecte les autres propriétés technologiques. Les pertes au feu dépendent de la décomposition des matières organiques, des carbonates, et des sulfures (19).

I.11. Valorisation des déchets dans des briques cuites :

Les avancées industrielles et technologiques ont entraîné une augmentation importante de la quantité et de la variété des déchets, posant de grands défis environnementaux et économique. Dans ce contexte, la valorisation des déchets industriels et alimentaires devient essentielle pour le développement durable et la gestion des ressources. Avec la croissance de la population et l'urbanisation rapide, La production de déchets augmente rapidement, ce qui rend leur gestion et leur valorisation essentielles pour protéger l'environnement et favoriser une économie circulaire.

L'industrie du bâtiment offre une bonne solution pour intégrer divers types de déchets, notamment dans la fabrication de briques. Les matériaux ajoutés pour produire des briques poreuses se divisent en deux catégories : organiques et inorganiques.

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Les ajouts organiques, comme l'herbe, le tabac, les résidus de papier et le marc du café, se décomposent pendant la cuisson des briques, créant des pores qui améliorent leurs propriétés isolantes.

Les ajouts inorganiques, comme la perlite, la diatomite, sugar scum, augmentent également la porosité des briques tout en améliorant leur résistance thermique et mécanique. Ainsi, l'intégration de ces déchets dans les matériaux de construction représente une approche innovante et durable pour l'industrie du bâtiment (21) (22).

Dans cette recherche, deux types d'ajouts ont été utilisés dans la fabrication de briques cuites :

- Le marc de café, un déchet alimentaire organique.
- Sugar scum, un déchet industriel inorganique.

I.11.1. Marc du café :

Aujourd'hui, le café occupe une place cruciale en tant que ressource économique, étant le produit agricole le plus échangé en volume et la seconde matière première la plus commercialisée dans le monde, juste après le pétrole. En effet, il est la deuxième boisson la plus consommée après l'eau. Cependant, la croissance rapide de cette industrie s'accompagne d'une augmentation spectaculaire des déchets agricoles. Dans les pays producteurs de café, ces déchets sont non seulement une source majeure de contamination, mais aussi un sérieux problème environnemental (23) (24).

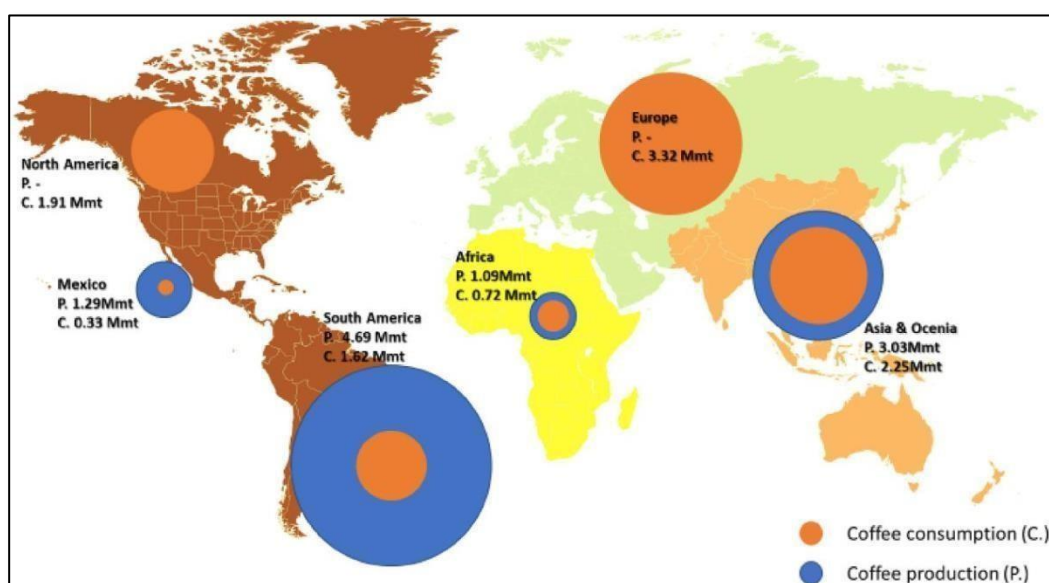


Figure I.12 : Distribution géographique de la production et de la consommation mondiale du café (BATTISTA et al. 2020)

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

- Définition du marc de café :

Le marc de café est en effet considéré comme un déchet solide qui est produit après la consommation de café moulu. Il s'agit des résidus restants des grains de café qui ont été torréfiés et moulus, puis infusés dans de l'eau chaude ou traités à la vapeur d'eau (25).



Figure I.13 : Marc du café



Figure I.14 : Cycle du marc de café

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

I.11.2. Sugar scum :

Sugar scum est un sous-produit du raffinage du sucre, utilisé pour éliminer les polluants organiques des solutions aqueuses. Des expériences d'adsorption en lots sont menées afin d'évaluer l'impact de différentes conditions opérationnelles sur cette élimination des polluants organiques (26).

Au cours de l'épuration calco-carbonique du sucre, la chaux est ajoutée dans le but d'éliminer par décantation et filtration les impuretés dissoutes ou en suspension dans le sirop. Cette chaux est ensuite saturée au moyen de dioxyde de carbone (CO₂) (**Decloux, 2002**).

Ensuite le sirop carbonaté est passé à travers des filtres à bougies, elle a pour but d'éliminer les carbonates de calcium en suspension dans le sirop carbonaté (**M C G, 2010**) (26).



Figure I.15 : Sugar scum

I.13 : Etat de l'art :

En 2015, Aeslina Abdul Kadir et all ont mené une recherche sur l'utilisation de divers déchets dans la fabrication de briques, notamment les mégots de cigarettes et la sciure de bois. Ils ont trouvé que l'intégration des déchets de café dans les briques offre plusieurs avantages. Bien que la densité des briques ait diminué jusqu'à 30 % avec l'augmentation des pourcentages de déchets de café, les valeurs de résistance à la compression restaient conformes aux normes minimales. De plus, l'incorporation des déchets de café n'a pas entraîné de lixiviation des métaux lourds au-delà des limites fixées par l'USEPA, ce qui permet de préserver la qualité des briques tout en respectant les réglementations. Ainsi, l'utilisation des déchets de café dans les briques réduit les problèmes d'élimination des déchets et l'impact environnemental, tout en améliorant les propriétés des briques et en respectant les normes de construction.

En 2018 Y. El maguana et all : La présente étude montre que l'écume de sucre est un matériau efficace pour la préparation d'un adsorbant approprié pour l'élimination des colorants dans les eaux usées. La conception de Doehlert et la fonction de désirabilité ont été utilisées pour déterminer les conditions optimales pour la préparation d'un adsorbant avec un rendement élevé et une bonne qualité d'adsorption du bleu de méthylène. L'augmentation de la température de calcination augmente la capacité d'adsorption du bleu de méthylène et réduit le rendement. Les conditions optimales ont été identifiées comme étant une température de calcination de 986°C et une durée de 61 minutes. Dans ces conditions, les réponses expérimentales pour le rendement et la capacité d'adsorption du bleu de méthylène étaient respectivement de 49,74% et de 24,52 mg-g⁻¹, ce qui est en accord acceptable avec les valeurs prédites. L'adsorbant préparé dans des conditions optimales s'est avéré plus efficace que la poudre d'écume de sucre en raison de sa surface spécifique et de sa porosité supérieure. Ces valeurs reflètent un pouvoir adsorbant intéressant de l'adsorbant préparé.

En 2018, Adriana Kovalcik et all ont mené une recherche sur la valorisation du marc de café usagé (SCG : Spent Coffee Grounds). Leur étude examine la composition des SCG, les méthodes d'isolement et le traitement biotechnologique pour leur valorisation. Ils se sont concentrés sur la détoxification des hydrolysats de SCG pour améliorer leur utilisation industrielle. Les méthodes de valorisation du marc de café usé ont été explorées dans divers secteurs industriels, mettant en évidence les composés bioactifs présents et les processus de détoxification nécessaires pour une utilisation multiple.

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Le potentiel de réutilisation des SCG sous forme de lipides, de composés phénoliques et de glucides a été identifié, offrant de multiples applications industrielles. La valorisation des SCG par fractionnement et purification peut améliorer l'utilisation de ces déchets pour produire des produits à valeur ajoutée, soulignant l'importance des SCG comme source de composés utiles pour diverses industries.

En 2021, Mohammad Saberian et all ont étudié l'utilisation des grains de café usagés (SCG) dans la construction, en se concentrant sur leurs pratiques écologiques et leur potentiel comme agrégats. Bien que la recherche soit encore limitée et nécessite des études supplémentaires pour des applications pratiques sur le terrain, les résultats montrent que les SCG peuvent être utilisés comme agrégats dans les matériaux de construction, notamment dans les agrégats argilo-céramiques légers. Les SCG, avec une densité comprise entre 0,6 et 1,4 et une teneur en humidité élevée, s'avèrent viables pour la construction. Toutefois, des tests pratiques supplémentaires sont nécessaires pour confirmer leur efficacité. La demande de SCG pour les applications civiles devrait rester constante, et l'analyse du cycle de vie ainsi que les considérations de coûts sont essentielles pour évaluer leur utilisation à grande échelle..

En 2023, Jyoti Sorout et all ont mené une étude sur l'évaluation de la résistance des briques contenant divers déchets comme additifs. Ils ont découvert que l'ajout de déchets améliore la résistance des briques, réduit l'absorption d'eau et diminue la porosité. La géo polymérisation des briques à base de cendres volantes s'est révélée être une méthode économe en énergie et durable. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour la production et l'utilisation à grande échelle de ces briques. La normalisation, les politiques et la sensibilisation du marché sont essentielles pour l'acceptation des briques recyclées. Les briques contenant des cendres volantes, des déchets plastiques et des déchets de construction présentent une résistance supérieure, et les briques non cuites à base de cendres volantes montrent une efficacité énergétique accrue.

En 2023, Wen Yan et all ont mené une recherche sur l'utilisation de déchets de café moulu comme agrégats fins dans le béton, en se concentrant sur l'amélioration de la résistance au cisaillement grâce à un renforcement au charbon actif. Ils ont trouvé que la cendre de café moulue améliore la résistance au cisaillement du béton.

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

Le charbon actif, jusqu'à une concentration de 1,5 %, renforce cette résistance. De plus, la technique ELM permet de prévoir avec précision la résistance au cisaillement des mélanges de béton, surpassant le modèle TLBO. La cendre de café moulue peut également remplacer le ciment, contribuant ainsi à une production de béton plus durable. Le SCGA améliore la résistance initiale au cisaillement dans diverses variantes de mélanges de béton.

En 2023, Wen Yan et all ont étudié l'utilisation de la cendre de café moulue comme agrégat fin dans le béton, en mettant en évidence son effet positif sur la résistance au cisaillement grâce à un renforcement au charbon actif. Ils ont démontré que le charbon actif non seulement améliore la résistance au cisaillement, mais accélère également le processus de durcissement du béton. La technique ELM (Extreme Learning Machine) s'est avérée particulièrement efficace pour prédire avec précision la résistance au cisaillement, surpassant le modèle TLBO. En plus d'améliorer les performances du béton, l'utilisation de cendre de café moulue favorise une gestion durable des déchets et des pratiques de construction respectueuses de l'environnement.

En 2024 Y. El maguana, Dans cet article, une membrane céramique à base d'anorthite a été fabriquée à partir de cendres volantes et d'écume de sucre, et utilisée pour filtrer le bleu de méthylène d'une solution aqueuse. Les conditions optimales de fabrication ont été déterminées : 1197 °C, 12,06 % d'écume de sucre et un temps de frittage de 253 minutes. La membrane obtenue a une densité de 2,16 g/cm³, une porosité de 34,66 % et une résistance à la compression de 28,24 MPa, avec une perméabilité élevée et une bonne résistance chimique. Elle a montré un taux de rétention élevé pour le bleu de méthylène, suggérant son potentiel pour le traitement des effluents industriels. Des tests supplémentaires avec des effluents industriels réels sont recommandés pour évaluer ses performances en conditions réelles.

I.14 : Conclusion :

Les produits en terre cuite remplissent de nombreuses fonctions, ce qui en fait des solutions efficaces et économiques. Ils répondent bien aux préoccupations environnementales croissantes, respectent les exigences du développement durable et sont considérés comme l'un des matériaux les plus sains. Ces dernières années, de nombreux problèmes liés à la fabrication de la terre cuite ont été résolus, touchant tant les produits eux-mêmes que leur mise en œuvre et les procédés de fabrication. Ces matériaux promettent un avenir brillant, car leur capacité d'adaptation passée laisse présager qu'ils sauront relever les défis futurs.



CHAPITRE II

Matériels et Méthodes

II.1. Introduction :

La brique est un matériau de construction connue par sa fragilité et difficulté à confectionner, elle possède des caractéristiques qui varient en fonction des composantes. Il s'agit principalement de (l'argile et de l'eau).

L'objectif de ce travail actuel est d'exploiter les déchets dans la production de briques. Ce chapitre se compose de deux sections : d'abord, une section consacrée à la caractérisation des matières premières, puis une section qui se concentre sur la fabrication du produit final.

Ces dernières constituent un moyen pour la connaissance des changements de phases de la réactivité des matériaux pendant l'opération de la combustion à différentes températures. Elles fournissent des informations précieuses pour le système de leurs calcinations. Il est donc nécessaire de procéder à une analyse thermique des déchets utilisés (dans cette étude) pour prévoir avec plus de précision comment vont-ils se comporter dans les mélanges (argile résidus).

II.2. Matériaux étudiés :

Nous avons utilisé les matériaux locaux suivant :

- Argile : de la wilaya de Bordj Bou Arreridj
- Eau de gâchage : l'eau potable du laboratoire pédagogique du département de génie civil
- Le déchet alimentaire (Marc du café) (MC)
- Le déchet industriel (sugar scum) (SS)

II.2.1. Caractérisation des matières premières :

II.2.1.1 : Argile bordj Bou Arreridj :

❖ Origine du sol :

Cette argile appartient à la région d'Oued lahmer Medjanna Bordj Bou Arreridj (Algérie) (27)
L'argile de Bordj Bou Arreridj est une argile rouge (Figure II.16) sa couleur est due à sa richesse en oxyde de fer.



Figure II.16 : Aspect visuel du sol de Bordj Bou Arreridj

II.2.1.2 Le marc du café (MC) :

Le marc de café récupéré dans la cafétéria de l'université de Bejaïa targua ouzemmour



Figure II.17 : Aspect visuel du marc du café

II.1.2.3 : L'écume de sucre (sugar scum) :

Sugar scum est le déchet qui provient de l'entreprise agroalimentaire CEVITAL, dans le secteur du raffinage de sucre.



Figure II.18 : Aspect visuel du sugar scum

II.3. Procédures expérimentales :

II.3.1. Détermination des limites d'Atterberg :

- **Principe de l'essai : (norme NF P 94-051 : 2018)**

Cette norme est destinée à la détermination des deux limites d'Atterberg qui sont la limite de liquidité et de plasticité, le test est réalisé sur la fraction nominale inférieure à 400 μm . Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance.



Figure II.19 : Appareil de Casa grande, spatule, tares et outils à rainure

II.3.1.1. La limite de liquidité (W_L) :

C'est la limite qui sépare l'état plastique de l'état liquide, w_l est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1cm de la rainure après 25 chocs. Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples des valeurs expérimentale (I_g N, W), et elle peut se calculer sous la forme suivante :

$$W_L = W \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

Les valeurs sont exprimées en pourcentage et arrondies au nombre entier le plus proche

II.3.1.2. La limite de plasticité (W_p) :

La limite de plasticité (W_p) est la teneur en eau conventionnelle de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3mm. En considère que cette limite est atteinte si la rupture se fait pendant le soulèvement.

W_p est la moyenne des teneurs en eau à partir de deux essais, la valeur est exprimée en pourcentage et l'intervalle de l'arrondissement et de 1 à 2 %.

II.3.1.3. Indice de plasticité (I_p) :

C'est l'étendue des teneurs en eau pour lesquelles le sol garde une consistance plastique, c'est-à-dire la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. (I_p) est défini par la relation suivante :

$$I_p = W_L - W_P$$

II.3.2. Analyse granulométrique par tamisage (NF EN 933-1) :

➤ *But de l'essai :*

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol, par la mesure de la quantité des particules retenues (le refus) ou passantes (le tamisât), afin de tracer la courbe granulométrique, ainsi caractériser le sol à étudier.

➤ *Principe de l'essai :*

L'essai consiste à faire passer un échantillon de sol à travers une colonne de tamis de différentes ouvertures, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le classement des grains (suite à leur passage à travers les ouvertures) s'obtient par vibration de la colonne des tamis à l'aide d'une tamiseuse.

➤ *Mode opératoire :*

On installe les différents tamis sur la tamiseuse, commençant d'abord de la partie inférieure en déposant le fond, puis la série de tamis de 0,08mm, 0,1mm, 0,125mm, 0,4mm, 0,63mm, 1,00 mm, finalement le tamis avec 2,00 mm d'ouverture, et le couvercle est également déposé en haut de la colonne, afin d'empêcher toute perte de matériaux pendant le tamisage. après on verse la quantité d'argile en haut de la colonne des tamis, par la suite on démarre la tamiseuse et la laisser vibrer pendant 30min, une fois l'opération est terminée, on pèse le refus sur chaque tamis.

II.4. Utilisation des déchets dans la fabrication de la brique, étude laboratoire :

II.4.1. Confection des éprouvettes :

Deux types d'éprouvettes ont été confectionnés par compression :

- Des éprouvettes de forme rectangulaire de dimensions $(16 \times 4 \times 2) \text{ cm}^3$ pour les briques (Argile +ajout du marc du café)
- Des éprouvettes de forme rectangulaire de dimensions $(8 \times 5 \times 1)$ pour les briques (Argile +ajout de sugar scum)

II.4.2. Matériels :

- Un moule en acier de $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$.
- Un moule en acier de $8 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$
- Broyeur
- Un tamis de 0,125mm (125 μm)
- Une balance
- Un récipient
- Spatule
- Etuve
- Four

II.4.3. Matériaux :

- Matière première : argile de Bordj Bou Arreridj
- Ajout : le marc du café
- Ajout : sugar scum
- L'eau potable

II.4.4 Mode opératoire :

II.4.4.1. Préparation de la matière première :

Après échantillonnage les matières premières utilisées (argile+ajout) sont préalablement séchées 24h à l'étuve à 105°C, pour enlever le taux d'humidité.

Chapitre II : Matériels et méthodes

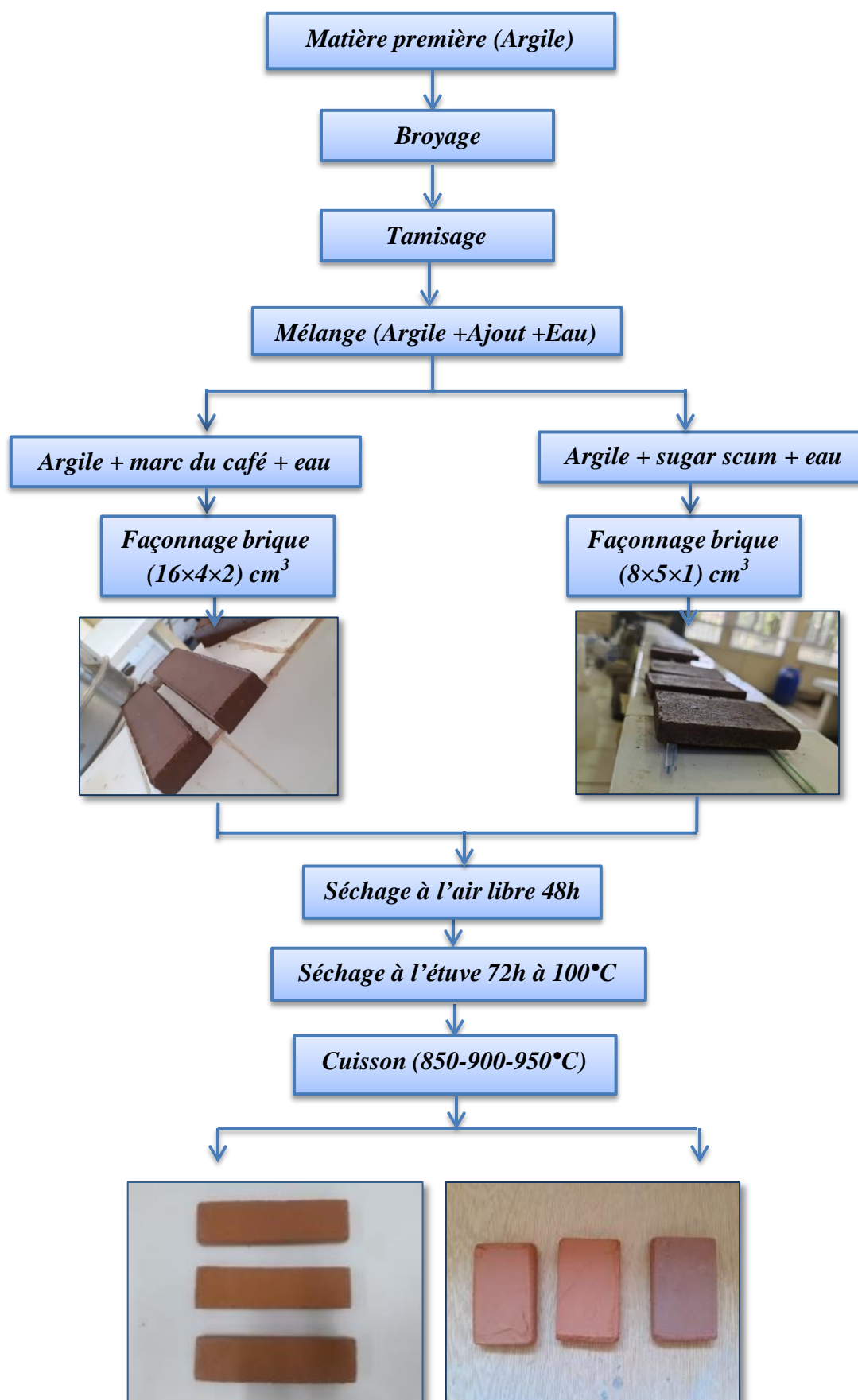


Figure II.20 : Etapes technologique de l'élaboration des briques

Chapitre II : Matériels et méthodes

❖ Broyage :

C'est une opération qui consiste à réduire les dimensions des grains de la matière première à une granularité assez fine.

L'argile broyée en totalité à l'aide d'un broyeur d'un calibre de 1 mm :



Figure II.21 : Broyage de la matière première à l'aide d'un broyeur

❖ Tamisage :

L'argile broyée est tamisée dans un tamis à fraction de 0,125 mm, comme la montre la (figure II.22) ci-dessous



Figure II.22 : Tamisage de la matière première (argile)

Chapitre II : Matériels et méthodes

II.4.4.2. Mélange de matières premières :

➤ 1^{er} mélange (Argile +Sugar scum) pour les éprouvettes 16×4×2 cm³ :



Figure II.23 : Mélange (argile +sugar scum+ eau)

Le mélange s'est fait en fonction du pourcentage de masse sèche ,15 séries d'échantillons ont été préparés avec des pourcentages d'ajouts différents

Tableau II.1 : Les compositions des mélanges pour 0%, 7,5% ,15% d'ajout (sugar scum)

Mélange	0%	7,5 %	15%
Argile %	100	92 ,5	85
Masse en g	285	263,625	242,25
Ajout%(sugar scum)	0	7,5	15
Masse en g	0	21,375	42,75
L'eau %	Varie de 6 ,8 et10 %	Varie de 6 ,8 et 10%	Varie de 6 ,8 et 10%

❖ Méthode de calcul :

Pour avoir une brique parallélépipédique de dimension 16×4×2 cm³, on prend 285g du mélange, par exemple pour 7,5% d'ajout on a :

$$\begin{array}{l}
 100\% \longrightarrow 285\text{g} \\
 7,5\% \longrightarrow MA
 \end{array}$$

Avec :

MA : masse d'ajout

$$MA = 285 \times 7,5 / 100, MA = 21 ,375 \text{ g}$$

II.5. Façonnage des échantillons de la brique au laboratoire (avec ajout sugar scum):

II.5.1. Préparation du mélange :

- On mesure la quantité d'argile, d'eau et d'ajout convenable
- Dans un récipient on verse les 285g du mélange (argile +sugar scum) puis on ajoute l'eau, à l'aide d'une spatule on mélange bien pour une homogénéité parfaite et une meilleure répartition de l'humidité dans le sol, voir la figure ci-dessous



Figure II.24 : Mesure et préparation de la pâte

II.5.2. Moulage :

La quantité du mélange adéquate est introduite dans le moule en métal de dimension intérieur de $(16 \times 4 \times 4)$ cm³. Le moule est conçu spécialement avec une rigidité suffisante, sans tassement ni déformation nuisible, en suivant un procédé précis qui consiste à compacter la terre progressivement au fur et à mesure qu'on ajoute de la matière comme montre-la. Puis on referme avec une pièce métallique, et on presse avec une force prédéfinie.



Figure II.25 : Remplissage du moule

II.5.3. Pressage :

- Après avoir versé le mélange dans le moule, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité 2000KN voir la figure , on compresse les éprouvettes avec une force de 5Mpa.
- La pression exercée sur les échantillons lors du moulage favorise le tassement des particules d'argile les unes sur les autres, minimisant ainsi les interstices entre les grains, puis on démoule la brique.



Figure II.26 : Pressage des éprouvettes et moulage des briques

II.5.4. Séchage :

les échantillons ainsi formés ont séchés à l'air libre au laboratoire pendant 72h pour être séchés ensuite à l'étuve à 105°C jusqu'à ce que le poids soit constante est atteinte lorsque la variation de masse entre trois pesées consécutives effectuées à au moins 24h d'intervalle, le séchage est une étape sensible et elle doit être longue , progressive et bien homogène pour but d'éliminer lentement l'eau de mouillage sans déformer le produit.

II.5.5. Cuisson :

Une fois que les briques sont bien séchées, elles sont cuites dans des fours électriques à différentes températures : 850°C, 900°C, et 950°C. Pendant ce processus, les briques subissent une série de transformations chimiques et physiques. Le refroidissement doit également être progressif pour éviter les chocs thermiques.

Chapitre II : Matériels et méthodes

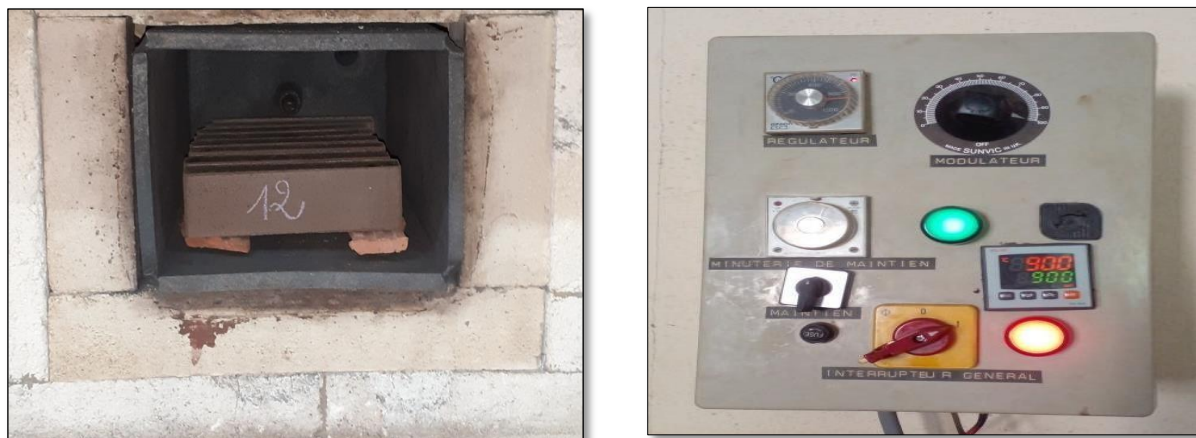


Figure II.27 : La cuisson des briques dans un four électrique



Figure II.28 : La brique à la sortie du four

Remarque :

Pour les différents pourcentages d'ajout, on suit la même méthode de façonnage. Pour chaque série en confectionne un nombre limité de brique avec une variation de la teneur en eau et les températures de cuisson.

Chapitre II : Matériels et méthodes

➤ 2^{ème} mélange (argile + marc du café (MC) pour les éprouvettes 8×5×1cm :



Figure II.29 : Mélange (argile + marc de café+ eau)

Le mélange s'est fait en fonction du pourcentage de masse sèche, des échantillons ont été préparés avec des pourcentages d'ajouts différents :

Tableau II.2 : Les compositions des mélanges pour 0%, 3% ,6% d'ajout (le marc du café)

Mélange	0%	3%	6%
Argile %	100	97	94
Masse en g	100	97	94
Ajout% (marc du café)	0	3	6
Masse en g	0	3	6
L'eau %	Varie de 6 ,8 et10 %	Varie de 6 ,8 et 10%	Varie de 6 ,8 et 10%

❖ **Méthode de calcul :**

Pour avoir une brique parallélépipédique de dimension 8×5×1 cm³, on prend 100g du mélange, par exemple pour 3 % d'ajout on a :

$$\begin{array}{l}
 100\% \longrightarrow 100g \\
 3\% \longrightarrow MA
 \end{array}$$

Avec :

MA : masse d'ajout

$$MA = 100 \times 3 / 100, \quad MA = 3 \text{ g}$$

II.6: Façonnage des échantillons de la brique au laboratoire (avec ajout marc du café):

II.6.1. Préparation du mélange :

- On mesure la quantité d'argile, d'eau et d'ajout convenable
- Dans un récipient on verse les 100 g du mélange (argile + marc du café) puis on ajoute l'eau, à l'aide d'une spatule on mélange bien pendant 10 min

II.6.2. Moulage :

- La quantité du mélange adéquate est introduite dans le moule en métal de dimension intérieur de (8×5×1) cm, on presse avec une force prédéfinie comme montre la figure



Figure II.30 : Remplissage du moule

II.6.3. Pressage :

On presse l'aide d'une presse hydraulique :



Figure II.31 : Pressage des éprouvettes



Figure II.32 : Démoulage des briques

Chapitre II : Matériels et méthodes

II.6.4. Séchage :

Les échantillons ainsi formés ont séchés à l'air libre au laboratoire pendant h 72h pour être séchés ensuite à l'étuve à 105°C jusqu'à ce que le poids soit constante.



Figure II.33 : Séchage à l'étuve

II.6.5. Cuisson :

Une fois que les briques sont bien séchées, elles sont cuites dans des fours électriques à différentes températures : 850 °C, 900 °C, et 950 °C.



Figure II.34 : La cuisson des briques dans un four électrique



Figure II.35 : La brique à la sortie du four

II.7. Caractérisations des briques avec ajout (marc du café et sugar scum) :

Une fois les éprouvettes de briques avec ajout du marc du café et sugar scum sont confectionnées, ces échantillons seront soumis à de différents essais.

Il s'agit de faire des analyses de l'aspect physique des matériaux confectionnés (la perte au feu, la porosité, la capacité d'absorption de l'eau), une résistance mécanique (résistance à traction par flexion, résistance à la compression) et le calcul de la conductivité thermique par méthode du fil chaud gardé et enfin les analyses chimiques et minéralogiques (FRX, DRX) et infrarouge (IF)

II.7.1. Caractéristiques physiques :

II.7.1.1. Perte en poids au séchage :

Les échantillons ont été pesés juste après démoulage W_p et après le séchage à l'étuve W_s , la perte en poids au séchage (P_s) est calculée par la relation suivante :

$$P_s (\%) = \frac{W_p - W_s}{W_p} \times 100$$

Avec :

P_s : perte en poids après séchage

W_p : poids de la brique à l'état plastique (après façonnage)

W_s : poids de la brique au séchage

II.7.1.2. Perte en masse après la cuisson :

La perte en masse est une perte en poids de l'échantillon après la cuisson, cette perte en poids est une propriété importante dans l'étude des briques. Plus une brique est compacte, plus ses performances mécaniques seront élevées, mais plus elle est légère, plus sa mise en œuvre sera facile et sa résistance thermique sera meilleure.

L'intervalle de tolérance de la perte au feu est fixé à 25% (28) (29).

Cette dernière devrait être, acceptable afin d'éviter une grande déformation de la brique

La perte au feu est calculée par la formule suivante :

$$\text{Pf (\%)} = \frac{W_s - W_f}{W_s} \times 100$$

Avec :

W_s : poids sec de la brique

W_f : poids de la brique après la cuisson

II.7.1.3. Absorption de l'eau : (la norme algérienne NA 1957)

Les échantillons de briques sont séchés et refroidis. Ils sont ensuite immergés dans l'eau pendant 2h. Comme montre les figures suivantes :



Figure II.36 : Briques (Sugar scum) immergés



Figure II.37 : Briques (marc du café) immergées

L'absorption d'eau est ensuite calculée par l'équation :

$$C (\%) = \frac{B-A}{A} \times 100$$

Avec :

A : la masse sèche

B : la masse humide

II.7.1.4. Porosité à l'eau: (BS 3921 /1985)

La porosité est le paramètre le plus important de toutes les propriétés de la brique, car elle influence la résistance mécanique, l'absorption d'eau et la perméabilité de la brique (30) .

Elle désigne le rapport entre le volume des pores et le volume total de l'échantillon .la porosité peut être ouverte ou fermé. Selon les produits.

La porosité de la brique est principalement ouverte est seules les températures de cuisson élevées permettent d'obtenir des porosités fermées dues au dégagement gazeux. Plusieurs facteurs peuvent influencer sur la porosité de la brique, mais le plus fréquent est le suivant :

Les températures élevées d es cuissons : au-delà de 950°C généralement, les produits cuits sont plus vitreux et subissent les plus grands changements de volume (soit une augmentation ou diminutions) et de porosité.

Chapitre II : Matériels et méthodes

- **Mode opératoire :**
- ❖ Les essais sont effectués sur toutes les éprouvettes de briques. les éprouvettes sont séchées dans une étuve à 105°C durant 24h. à la sortie de l'étuve on pèse les échantillons .la masse de l'échantillon sec est déterminée (masse A).
- ❖ On les échantillons secs d'eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient entièrement recouvertes d'eau. les éprouvettes sont maintenues immergées dans l'eau pendant 2h.
- ❖ Les éprouvettes sont ensuite retirées de l'eau, placées sur un linge sec avec lequel elles sont soigneusement et rapidement essuyées. On détermine la masse saturée d'eau (masse B).
- ❖ La porosité est déterminée par le rapport du volume total des vides ouverts du matériau au volume apparent .le volume des vides et le volume apparent sont exprimés par :

B-A et B-C respectivement.

La porosité ouverte à l'eau est ensuite calculée par l'équation suivante :

$$P (\%) = \frac{B-A}{B-C} \times 100$$



Figure II.38 : Détermination de la masse saturée d'eau des briques avec ajout de sugar scum



Figure II.39 : Détermination de la masse saturée d'eau des briques avec ajout marc du café

- ❖ Enfin les éprouvettes sont pesées dans l'eau (masse C) (pesée hydrostatique).



Figure II.40 : Pesée hydrostatique des briques avec ajout de sugar scum



Figure II.41 : Pesée hydrostatique des briques avec ajout du marc du café

II.7.2. Caractéristiques thermo-physiques :

II.7.2.1. Conductivité thermique ; (NF EN 12664)

C'est la capacité d'un matériau de laisser passer la chaleur à travers son épaisseur en régime permanent. La conductivité thermique λ d'un corps homogène et isotrope représente la densité du flux de chaleur de 1 Watt le traversant pour une différence ΔT de 1°C entre les températures des deux faces séparées par un mètre d'épaisseur. λ s'exprime, compte tenu de sa définition en $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$.

Plus la conductivité thermique λ d'un matériau est grande, plus le matériau laisse traverser la chaleur donc il est un bon conducteur de la chaleur et vice versa, plus le λ d'un matériau est faible plus le corps s'oppose au transfert de chaleur donc il est un bon isolant.

Il existe plusieurs facteurs qui influencent sur la conductivité thermique :

- La nature du matériau : les matières cristallines sont considérées comme les meilleurs conducteurs de chaleur contrairement aux matières vitreuses.
- La porosité de la matière : quand la porosité d'un matériau augmente sa conductivité thermique diminue. Car, la chaleur est mieux conduite par la matière pure que par l'air.

Chapitre II : Matériels et méthodes

La conductivité thermique de l'air immobile est très faible. Mais dans le cas des pores ouvertes et communicantes. Ces dernières favorisent un mouvement d'air entraînant le transfert de chaleur. En outre, plus le diamètre des pores est grand plus la conductivité augmente.

- D'autres facteurs comme la température, l'humidité et la pression.

Le dispositif utilisé est la méthode du fil chaud, l'appareillage utilisé est le CT-mètre.



Figure II.42 : Un CT-mètre et une sonde

❖ Principe :

La sonde est composée, d'un fil résistif et d'un thermocouple dans un support isolant, est positionné entre deux échantillons du matériau à caractériser. La méthode du fil chaud permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif.

Le principe de fonctionnement consiste, à mesurer l'élévation de la température subie par le capteur, durant la période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisé.

❖ Mode opératoire :

- L'essai doit être effectuait à des températures ambiantes
- On installe la sonde sur le CT-mètre et on règle quelques paramètres
- On prend deux briques d'une manière à éviter les vides entres elles
- On place la sonde au milieu, et on attend que le résultat s'affiche



Figure II.43 : Détermination de la conductivité thermique des briques (Sugar scum)



Figure II.44 : Détermination de la conductivité thermique des briques (marc du café)

II.7.3. Caractéristiques mécaniques :

Pour la réalisation de tout projet architectural, la connaissance de la résistance mécanique des matériaux est d'une grande utilité. Elle permet entre autres de s'assurer que les ouvrages à élaborer ou à dimensionner seront fiables et qu'ils ne s'écrouleront pas, ou encore qu'ils résistent aux contraintes auxquelles ils seront soumis (16).

II.7.3.1. Résistance à la flexion : (NF EN 196-1)

L'essai de flexion est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion. Appelé aussi l'essai de flexion 3 points qui permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau.

Chapitre II : Matériels et méthodes

L'essai consiste à soumettre le plan d'une éprouvette de dimensions (16×4×2) cm à une charge uniforme au moyen d'un vérin doté d'indicateurs de charge (capteurs de force) pour la lecture des forces appliquées

Nous appliquons une charge F progressive sur la face supérieure de notre échantillon jusqu'à la rupture du prisme afin d'obtenir la charge de rupture à partir de laquelle on peut calculer la résistance à la flexion à l'aide de la formule suivante :

$$Rf (\%) = \frac{1,5 \times Fl \times P}{H^3}$$

Avec :

Rf : la résistance à la flexion

Fl : la force appliquée en N

P : la longueur qui sépare les deux appuis égale à 100mm

H : côte de l'éprouvette est égale à 20mm

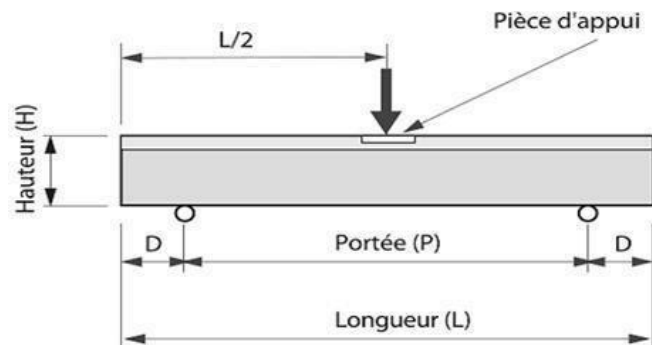


Figure II.45 : Essai de flexion

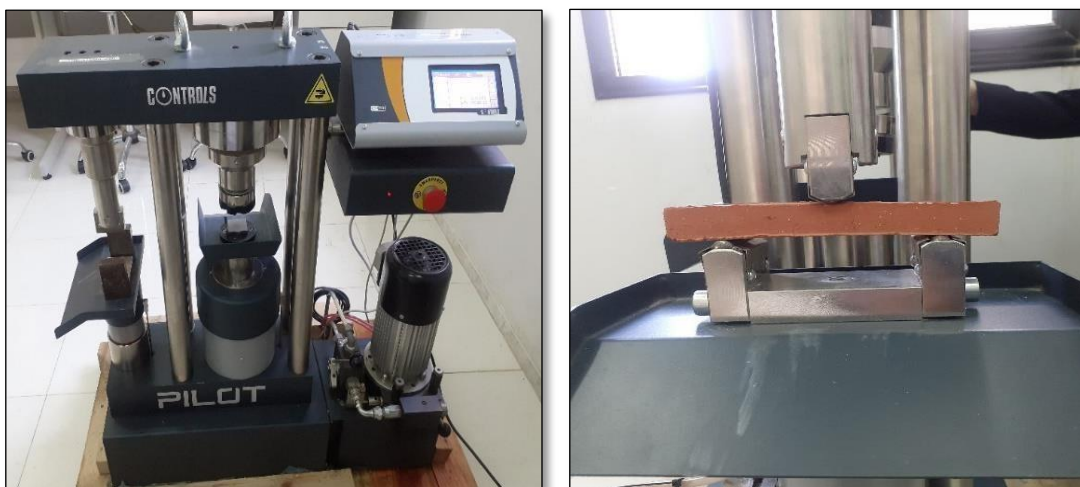


Figure II.46 : Appareil de la résistance à la flexion (laboratoire génie civil université de Bejaia)

II.7.3.2. Résistance à la compression :

L'essai de compression consiste à soumettre les demi-échantillons obtenus après la rupture à la flexion, placés entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées, l'un de ces plateaux est fixe l'autre est mobile, à vitesse constante le plateau mobile vient comprimer l'échantillon, l'effort et la contrainte augmentent jusqu'à la rupture ; l'ordinateur enregistre la valeur et on a la résistance à la compression de l'échantillon (31).

Pour un seul prisme de brique, on obtient deux valeurs de résistance à la compression, donc on fait la moyenne des deux demi-échantillons.

Nous appliquons une charge de compression F progressivement sur une section de $S=40 \times 40$ mm jusqu'à la rupture tout en prenant soin de noter la valeur mesurée pour calculer la résistance à la compression à partir de la formule (32) :

$$R_c = \frac{F_c}{S}$$

Avec :

RC : Résistance à la compression exprimée en MPa.

FC : Charge maximale supportée par l'échantillon en N

S : la section transversale de l'échantillon en mm².

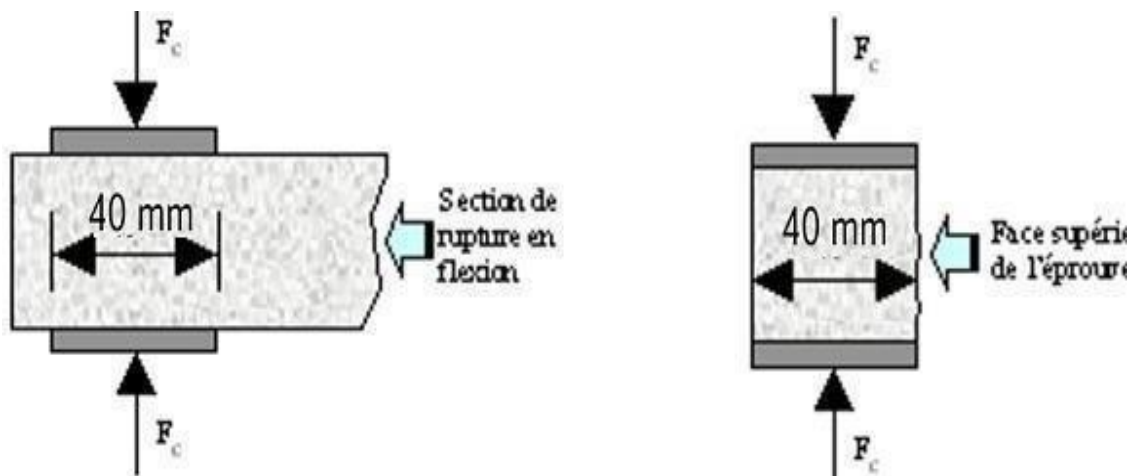


Figure II.47 : Essai de compression [2]



Figure II.48 : Appareil de la résistance à la compression (laboratoire génie civil université Bejaia)

II.7.4. Analyses chimique et minéralogique :

II.7.4.1. Spectroscopie infrarouge : (NF XP X43-243)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une technique d'analyse physico-chimique qui permet de donner des informations sur les liaisons entre les noyaux atomiques et leurs arrangements. Cette méthode permet d'accéder directement à l'information moléculaire, à la nature chimique et à l'organisation structurale des matériaux analysés (33).

- **Principe :**

L'échantillon est d'abord broyé en une fine poudre à l'aide d'un pilon pour assurer une bonne dispersion dans le KBr (bromure de potassium). Ensuite, 80 mg de KBr sont mélangés avec 20Mg de l'échantillon. Le mélange est réparti uniformément dans un moule à pastilles p. Une pression de 70 kilo newtons est appliquée pendant deux minutes. La pastille formée est ensuite retirée du moule et analysée avec un spectrophotomètre IRAffinity-1.



Figure II.49 : Pastille



Figure II.50 : Spectrophotomètre
IRAffinity -1

II.7.4.2 Analyse par diffraction aux rayons X (DRX) (NF EN 15305) :

La diffraction des rayons X est une technique d'analyse idéale pour l'étude d'échantillons solides cristallisés, elle permet d'avoir la composition minéralogique d'un assemblage argileux ou toute autre manière finement broyée. Elle fournit un diffractogramme représentant un ensemble de raies qui manifestent les réflexions de rayons X sur les plans d'organisation des éléments Al, Si, O, OH dans le réseau cristallin. L'état cristallin est une répartition tridimensionnelle dans l'espace d'un motif atomique.

- **Principe et méthode :**

L'analyse permet d'identifier la composition minéralogique d'une matière. Elle consiste à appliquer un rayonnement sur un échantillon. Le rayonnement pénètre le cristal et il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émission des radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phase s'exprime par la loi de Bragg suivante

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Avec :

n : nombre de diffractions

λ : Longueur d'ondes des rayons X

d : épaisseur de la couche (espace basal en Å °)

θ : angle de diffraction

- **Procédure :**

On doit préparer les échantillons préalablement séchés, broyés et tamisés. Le matériau sous forme de poudre est introduit dans un petit réceptacle PVC prévu à cet effet. On compresse la poudre sans tourner pour éviter une orientation préférentielle, on enfonce une bague sur la pastille PVC et on préserve la surface de poudre qui sera utilisée pour l'analyse (MOORE et REYNOLDS, 1989).

Ensuite, la pastille est introduite dans la machine où la poudre va recevoir un faisceau de rayons X monochromatique. Le rayon provient d'une anode métallique et est orienté selon un angle Θ .

Les cristaux contenus dans l'échantillon engendrent des diffractions en fonction des distances Inter planaires propres à chaque minéral. En faisant varier les angles de 2 à $70^{\circ}2\theta$ pendant 20 Minutes, on obtient un diffractogramme, où le phénomène de diffraction est traduit en pics D'intensité variable en fonction des angles (34).



Figure II.51 : Diffractogramme

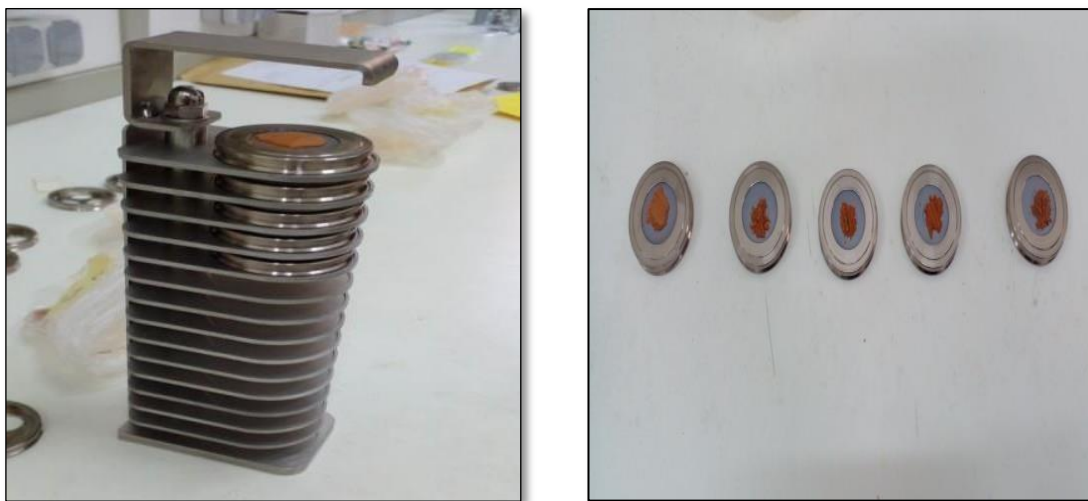


Figure II.52 : Forme de pastille préparée

II.7.4.3. Analyse chimique par la spectrométrie de fluorescence X (XRF) (ISO 13196):

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres... sous forme solide ou liquide. Elle permet l'analyse de tous les éléments chimiques dans des gammes de concentration, avec des résultats précis. Les éléments concernés sont : SiO_2 , FeO_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O ... etc.

❖ Procédure :

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayon X. Sous l'effet de ces rayons X, les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, les atomes tendent alors de revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie sous forme de photons X. Chaque atome ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propre. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayon X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique.



Figure II.53 : Spectroscope

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents matériaux utilisés et les essais de caractérisations de la matière première et des éléments de briques ainsi que la méthode de confection et de cuisson de ces derniers.

Tous les résultats obtenus seront présentés dans le chapitre suivant et seront discutés pour mettre en évidence l'intérêt de notre recherche.



CHAPITRE III

Résultats et Discussions

III.1. Introduction :

Notre recherche a mis en évidence les avantages de l'incorporation des déchets dans la fabrication de briques.

Le but de cette étude est de développer deux nouveaux matériaux qui sont à base d'argile, de marc du café, ainsi que de sugar scum

Il est nécessaire de connaître les caractéristiques des matériaux utilisés afin de comprendre le comportement mécanique des briques de terre cuite élaboré que ce soit celle à base de marc du café ou de sugar scum.

III.2. Caractérisation géotechnique des sols :

III.2.1. Limites d'Atterberg :

Les limites d'Atterberg rendent compte du degré de plasticité d'un sol et de son argilosité (35).

Tableau III.3 : Estimation de la plasticité d'un sol

I_p	Degré de plasticité du sol
0 à 5	Sol non plastique
5 à 15	Sol peu plastique
15 à 40	Sol plastique
> 40	Sol très plastique

Le tableau suivant présente les résultats des limites d'Atterberg, l'indice de plasticité de l'argile :

Tableau III.4 : Limite d'Atterberg de l'argile

Limite d'Atterberg			
	Limite liquidité (WL %)	Limite de plasticité (Wp %)	Indice de plasticité (Ip %)
Argile	34.27	23.37	10,9

Chapitre III : Résultats et discussions

D'après les résultats obtenus, l'argile a une valeur d'indice de plasticité de 10,9 ceci permet de le classer parmi les sols peu plastiques. Par ailleurs, la limite de plasticité obtenue $W_p=23,37$ donne une valeur approximative sur la quantité d'eau nécessaire lors du façonnage des briques.

La figure ci-dessous (figure.III.54) présente le diagramme de plasticité et classification du sol :

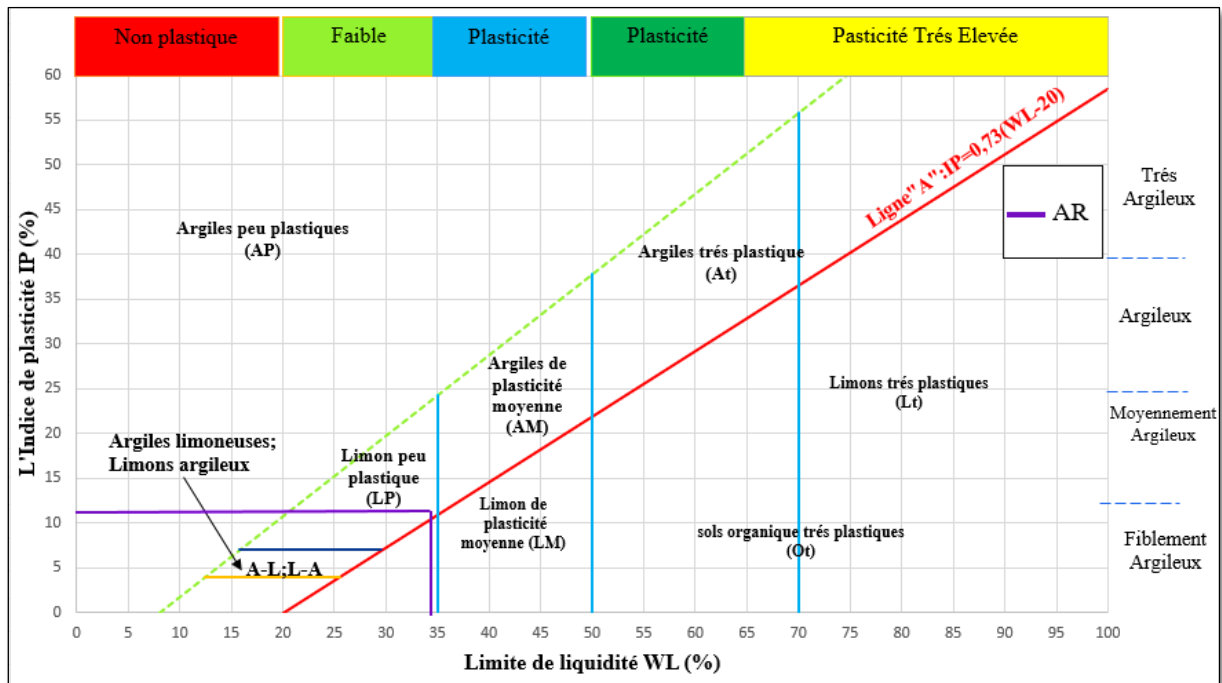


Figure III.54 : Classification du sol sur le diagramme de Casagrande des sols fins

Ce diagramme permet une classification des types des sols, en se basant sur les critères liés à la plasticité des sols : l'indice de plasticité I_p et la limite de liquidité W_L (35).

Le diagramme de plasticité des sols fins est divisé en section par une droite A d'équation $I_p=0,73(W_L-20)$ et d'une ligne verticale de façon que $W_L=50\%$, chaque section correspond à un groupe des sols aux propriétés mécaniques bien définies. La plasticité augmente avec la limite de liquidité. La (figure III.54) montre la classification de notre échantillon, ainsi que les différentes sections présentées dans le diagramme de plasticité.

Au-dessus de la droite A, les sections sont celles des argiles de faible et forte plasticité, les sections au-dessous de la droite A représentent celles des sols organiques et des limons de forte plasticité.

Cette classification montre que notre argile est considérée comme argile peu plastique.

Chapitre III : Résultats et discussions

III.2.2. La courbe granulométrie :

Le tableau III.5 et la figure III.55 présentent les résultats de l'analyse granulométrique et la courbe granulométrique de l'argile obtenues par tamisage par voie sec :

Tableau III.5 : Résultats de l'analyse granulométrique de l'argile

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé	% Refus cumulé	% Tamisât cumulé
1,25	1	1	0,1	99,9
0,63	398	399	39,9	60,1
0,5	82	481	48,1	51,9
0,315	161	642	64,2	35,8
0,16	169	811	81,1	18,9
0,08	138	949	94,9	5,1
0	51	1000	100	0

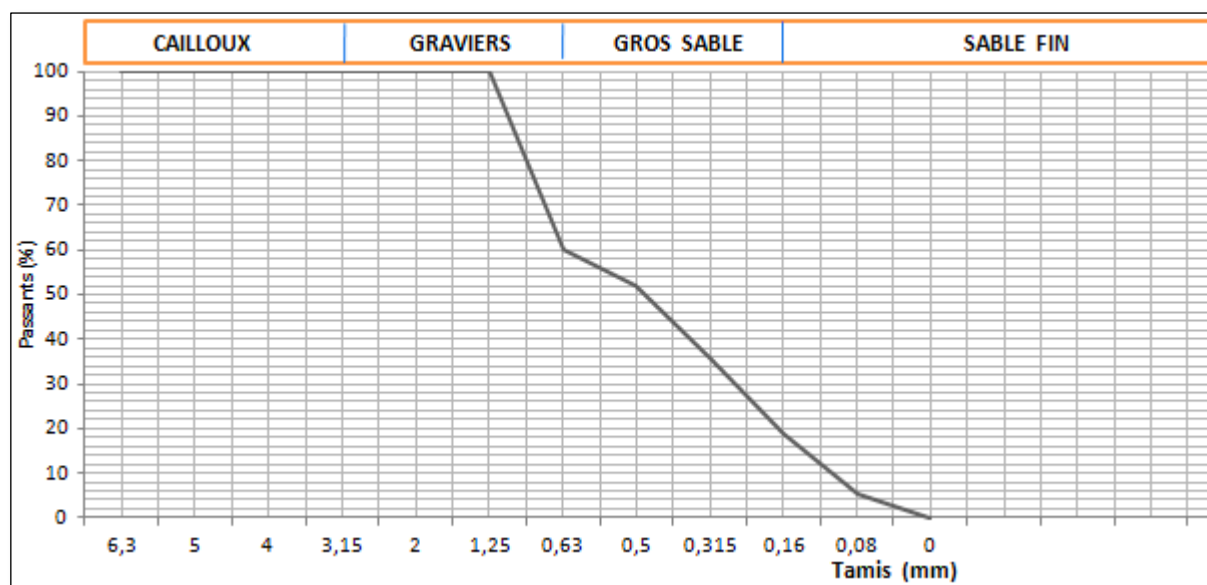


Figure III.55 : Courbe granulométrique de l'Argile

La courbe granulométrique montre que l'argile est un sol fin. Il contient une quantité assez importante de particules fines (particules passant au travers du tamis de 0,08 mm), à peu près 80 % de la masse totale (figure III.55), les résultats obtenus indiquent que l'échantillon est constitué principalement d'une fraction argileuse.

III.3. Les résultats d'analyse chimique par la spectrométrie de Fluorescence X:

- Les résultats de la composition chimique de l'argile suivait de celle de sugar scum sont présentés dans les Tableau III.6.et Tableau III.7 respectivement :

Tableau III.6 : Composition chimique de l'argile

Composition chimique	EL (élément léger)	Si (silicon)	Al (Aluminium)	Fe (Iron)	Ca (Calcium)	Mg (Magnesium)	K (potassium)
Argile	41 ,37%	29,82%	13,70%	6,03 %	2,29%	2,62 %	3,03%

Tableau III.7 : Composition chimique du sugar scum

Composition chimique	EL (élément léger)	Si (silicon)	Al (Aluminium)	Fe (Iron)	Ca (Calcium)	Mg (Magnesium)	S (sulfur)
Sugar scum	37 ,02%	0,337%	1,90%	0,082%	58,51%	1,84%	0,278 %

La squelette de l'argile se compose majoritairement de la silice (Si) et un pourcentage moyen pour l'oxyde d'alumine (Al).on remarque aussi un pourcentage moyen pour le magnésium (Mg) et les autres matériaux de flux sont considérés comme composants mineurs (Fe, Ca, K)

Pour sugar scum il se compose essentiellement de calcium (Ca), suivi par un pourcentage du magnésium (Mg), les autres sont considérés comme composants mineurs (Si, Fe, S, Al).

- Les résultats de la composition chimique des échantillons des briques avec ajout de sugar scum suivait de celles du marc du café sont présentés dans les Tableau.III.8 et Tablelleau.III.9 respectivement :

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III.8 : Composition chimique des échantillons des briques de sugar scum

Composition chimique	Témoin (C=900°C) (W = 8%)	(CH=7,5%) (C =850°C) (W = 8%)	(CH=7,5%) (C =900°C) (W = 8%)	(CH=15%) (C =900°C) (W = 6%)	(CH=7,5) (C=900°C) (W = 8%)
EL (élément léger)	41 ,62 %	33 ,8 %	45,02 %	23,76 %	33,07 %
Si (silicon)	28 ,17 %	31,94 %	25,78 %	35,62 %	31,80 %
Al (Aluminum)	12,44 %	13,93 %	10,83 %	15,01 %	13,79 %
Fe (Iron)	6,33 %	7,16 %	6,73 %	8,58 %	7,07 %
Ca (Calcium)	4,99 %	5,78 %	5,51 %	7,78 %	6,34 %
Mg (Magnesium)	2,81 %	2,98 %	2,27 %	3,52 %	3,18 %
K (potassium)	2,42 %	2,88 %	2,43 %	3,23 %	2,77 %

Tableau III.9 : Composition chimique des échantillons des briques du marc de café

Composition chimique	Témoin (C=900°C) (W = 8%)	(MC=3%) (C = 850°C) (W = 8%)	(MC=3%) (C = 900°C) (W = 8%)	(MC=6%) (C = 900°C) (W = 6%)	(MC=3%) (C= 950°C) (W = 8%)
EL (élément léger)	45 ,55%	34,05%	29,80 %	32,32 %	34,07 %
Si (silicon)	26 ,42%	31,87 %	34,04 %	32,73 %	31,35%
Al (Aluminum)	11,37%	13,42%	14,60%	13,93%	14,11 %
Fe (Iron)	6,13 %	7,27 %	7,786%	7,34%	7,43 %
Ca (Calcium)	4,35 %	5,79%	5,45 %	5,74%	5,59 %
Mg (Magnesium)	2,71 %	3,23%	3,56 %	3,38 %	3,24 %
K (potassium)	2,29 %	2,95%	3,11%	2,98 %	2,97%

Les échantillons de briques se compose essentiellement de Si et Al .L'analyse chimique des échantillons de briques avec ajout de sugar scum et ceux du marc du café ont montré une augmentation du calcium.

III.4. Les résultats de la perte au feu:

Les résultats de la perte au feu sont donnés dans les figures suivantes :

- ✓ La perte au feu des échantillons de briques avec ajout de sugar scum :

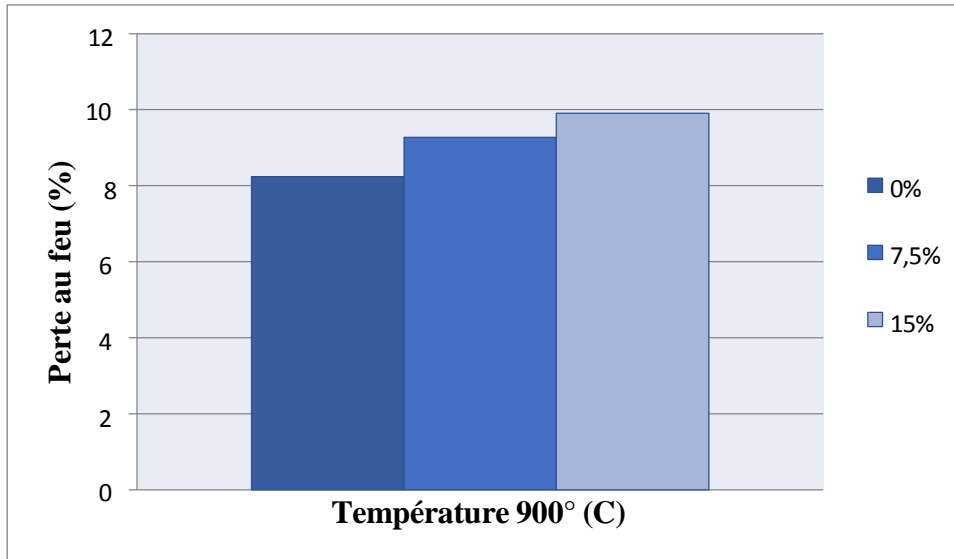


Figure III.56 : Evaluation des pertes au feu des briques avec ajout de sugar scum

- ✓ La perte au feu des échantillons de briques avec ajout du marc du café :

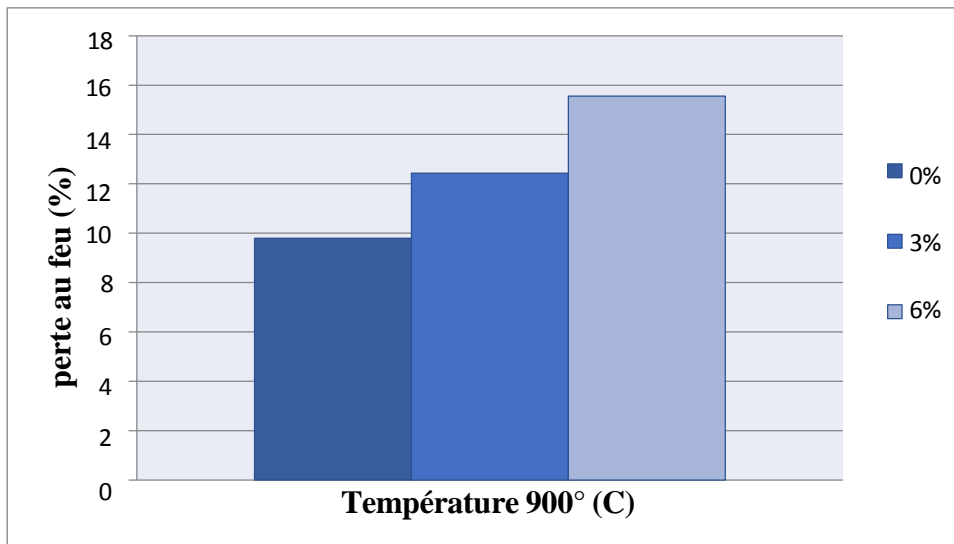


Figure III.57 ; Evaluation des pertes au feu des briques avec ajout de marc de café

On remarque que la perte au feu augmente avec l'augmentation de l'ajout, cela peut être expliquée par la calcination de la matière organique et la décarbonations de sugar scum.

Les pertes au feu des briques sont tolérables pour tous les échantillons avec les différents ajouts car elle reste inférieure à 25% qui est la limite extrême de tolérance exigée pour la fabrication de brique.

III.5 Résultats des briques avec ajout du marc de café :

III.5.1. Les résultats de la compression :

La courbe suivante représente les résultats de la compression (COMP : MPa) de briques en fonction de deux variables : la teneur en marc de café (C %) ajoutée, et la température de cuisson (T °C).

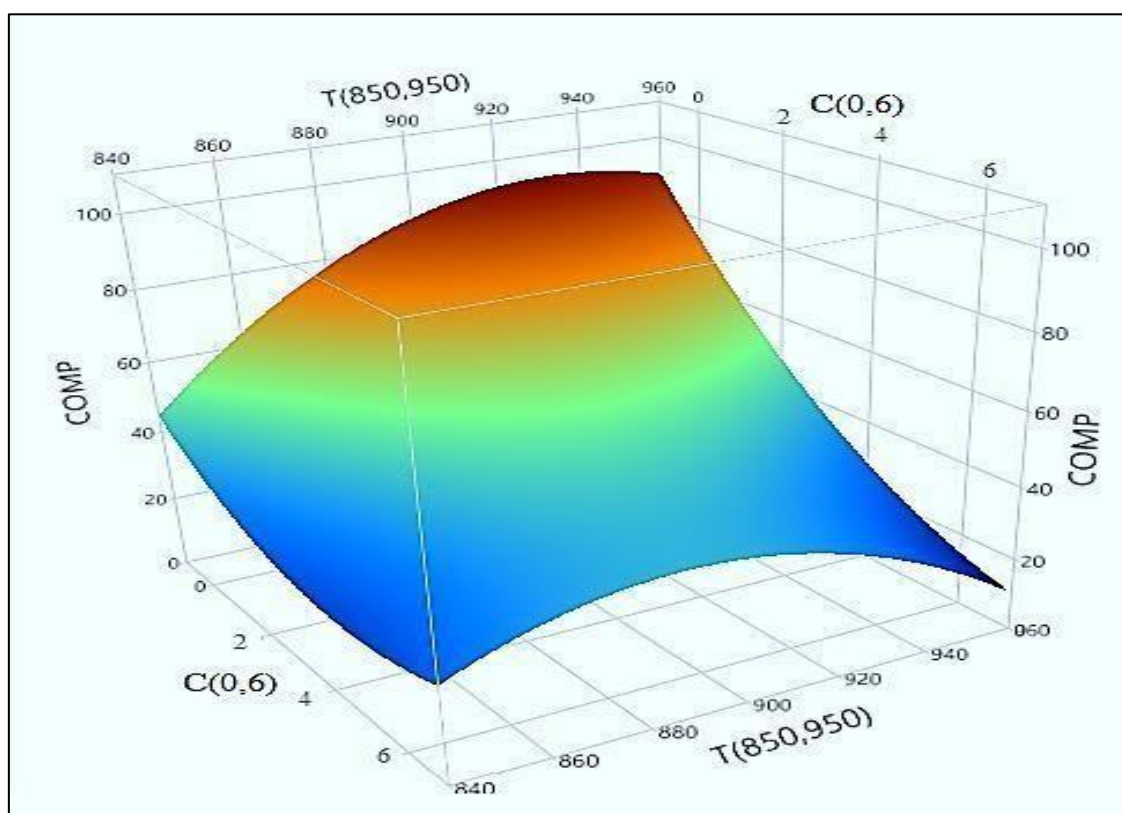


Figure III.58 : Les résultats de la compression de briques avec ajout du marc du café

❖ Observation et interprétation de la courbe :

a- Température de cuisson (T) :

La courbe montre que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la température de cuisson. Les températures plus élevées (950°C) donnent des briques plus résistantes par rapport aux températures plus basses (850°C).

b- Teneur en marc de café (C):

La teneur en marc de café a un effet significatif sur la résistance des briques. La courbe montre une diminution de la résistance à la compression à mesure que la teneur en marc de café augmente.

- À 0% de marc de café, les briques ont la plus grande résistance à la compression.
- À 6% de marc de café, les briques ont la plus faible résistance à la compression.

c- Interaction des deux variables (T et C) :

- La meilleure combinaison pour une résistance maximale à la compression est une température de cuisson élevée (950°C) et une faible teneur en marc de café (0%).
- La combinaison la moins favorable pour la résistance à la compression est une température de cuisson plus basse (850°C) et une teneur élevée en marc de café (6%).

L'ajout de marc de café aux briques et la température de cuisson ont des effets inverses sur la résistance à la compression des briques. Une température de cuisson plus élevée améliore la résistance, tandis qu'une augmentation de la teneur en marc de café diminue la résistance. Pour optimiser la résistance des briques, il est préférable de maintenir une faible teneur en marc de café et d'opter pour une température de cuisson plus élevée.

III.5.2. Les résultats de la conductivité thermique :

la courbe suivante représente les résultats de la conductivité thermique (COND : W/ m.°C) de briques en fonction de deux variables : la teneur en marc de café (C %) ajoutée et la température de cuisson (T °C).

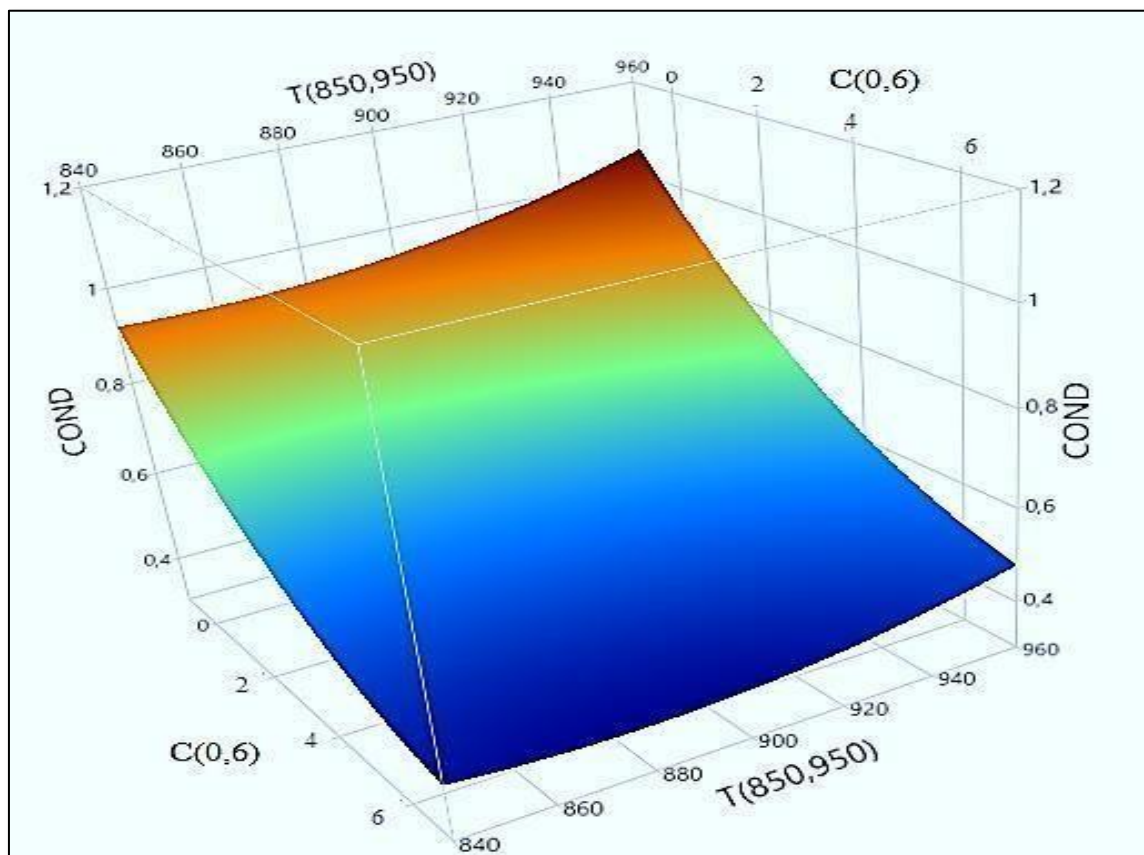


Figure III.59 : Les résultats de la conductivité thermique de briques avec ajout du marc de café

❖ Observation et interprétation de la courbe :

a- Température de cuisson (T) :

La courbe montre que la conductivité thermique tend à diminuer légèrement à mesure que la température de cuisson augmente jusqu'à (880°) puis la conductivité thermique augmente . Les températures plus basses (850°C) montrent une conductivité thermique plus élevée comparée aux températures plus élevées (950°C).

b- Teneur en marc de café (C) :

La conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la teneur en marc de café. Les briques avec 0% de marc de café ont la conductivité thermique la plus élevée, tandis que celles avec 6% de marc de café ont la conductivité thermique la plus faible.

c- Interaction des deux variables (T et C):

- La combinaison d'une température de cuisson plus basse (850°C) et d'une faible teneur en marc de café (0%) donne la conductivité thermique la plus élevée.
- La combinaison d'une température de cuisson plus élevée (950°C) et d'une teneur élevée en marc de café (6%) donne la conductivité thermique la plus faible.
- La conductivité thermique des briques diminue avec l'augmentation de la teneur en marc de café. Cela est dû à la formation de vides dans la structure de la brique à cause du brûlage du marc de café,

III.5.3. Les résultats de la porosité:

La courbe suivante représente les résultats de la porosité (%) de briques en fonction de deux variables : la teneur en marc de café (C %) ajoutée et la température de cuisson (T °C).

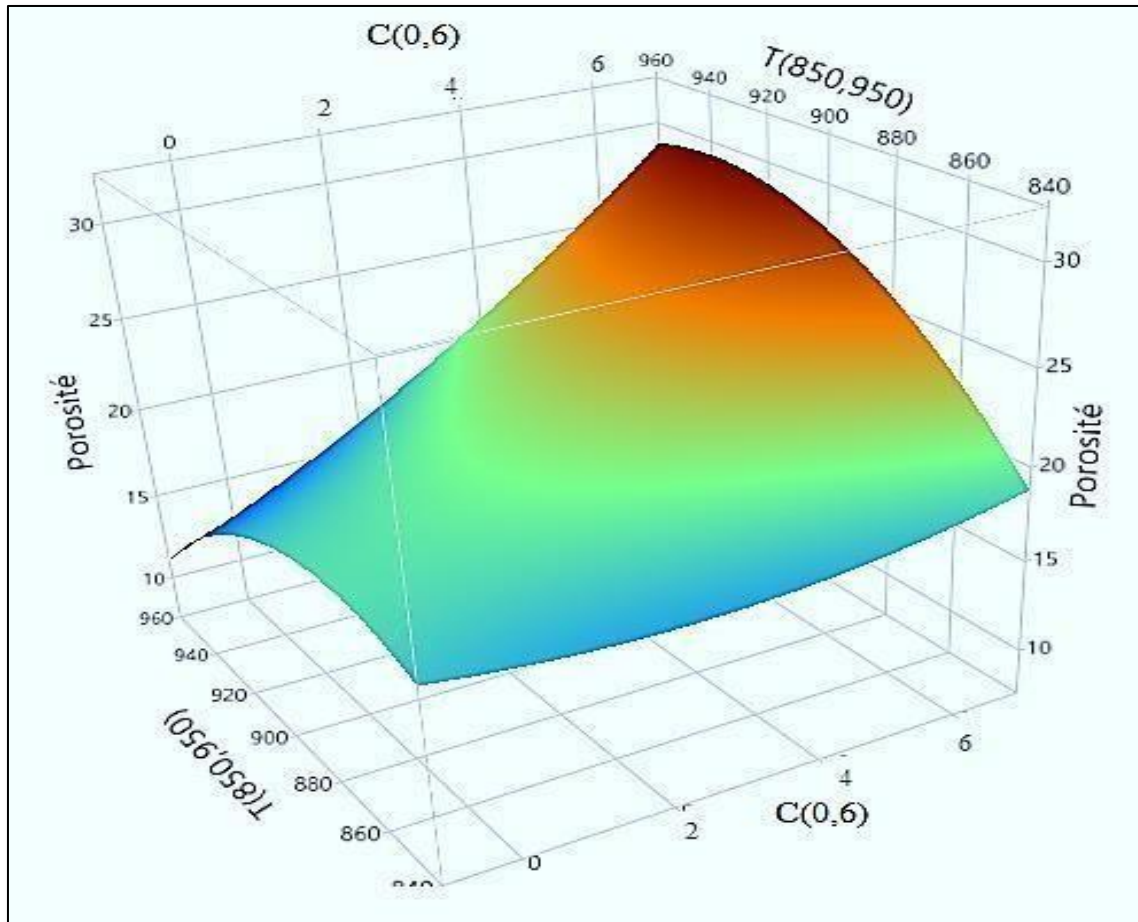


Figure III.60es résultats de la porosité (%) de briques avec ajout du marc du café

❖ Observation et interprétation de la courbe :

a- Température de cuisson (T):

On observe que la porosité tend à augmenter avec l'augmentation de la température de cuisson, la température (890°) donne la valeur maximale de la porosité, ensuite en augmentant plus la température la porosité diminue.

Les températures plus basses (850°C) montrent une porosité plus élevée comparée aux températures plus élevées (950°C).

b- Teneur en marc de café (C) :

la porosité augmente significativement avec l'augmentation de la teneur en marc de café. Les briques avec 0% de marc de café ont la porosité la plus faible, tandis que celles avec 6% de marc de café ont la porosité la plus élevée.

c- Interaction des deux variables (T et C) :

- La combinaison d'une température de cuisson plus basse (850°C) et d'une teneur élevée en marc de café (6%) donne la porosité la plus élevée.
- La combinaison d'une température de cuisson plus élevée (950°C) et d'une faible teneur en marc de café (0%) donne la porosité la plus faible.
- La porosité des briques augmente avec l'augmentation de la teneur en marc de café. Cela est dû au fait que le marc de café brûle pendant la cuisson, créant des vides dans la structure de la brique.
- La porosité des briques diminue avec l'augmentation de la température de cuisson. Des températures plus élevées favorisent une fusion plus complète des composants de la brique, réduisant ainsi les vides.

Pour obtenir des briques avec une porosité minimale il est préférable de :

- Utiliser une faible teneur en marc de café (0%).
- Cuire à une température plus élevée (950°C).

Si une porosité plus élevée est souhaitée alors :

- Augmenter la teneur en marc de café (jusqu'à 6%).
- Utiliser des températures de cuisson plus basses (880°C).

III.6. Résultats des briques avec ajout de sugar scum :

III.6.1. Les résultats de la compression de briques avec ajout sugar scum :

La courbe suivante représente les résultats de la compression (COMP : MPa) de briques en fonction de deux variables : sugar scum (R %) ajoutée, et la température de cuisson (T °C).

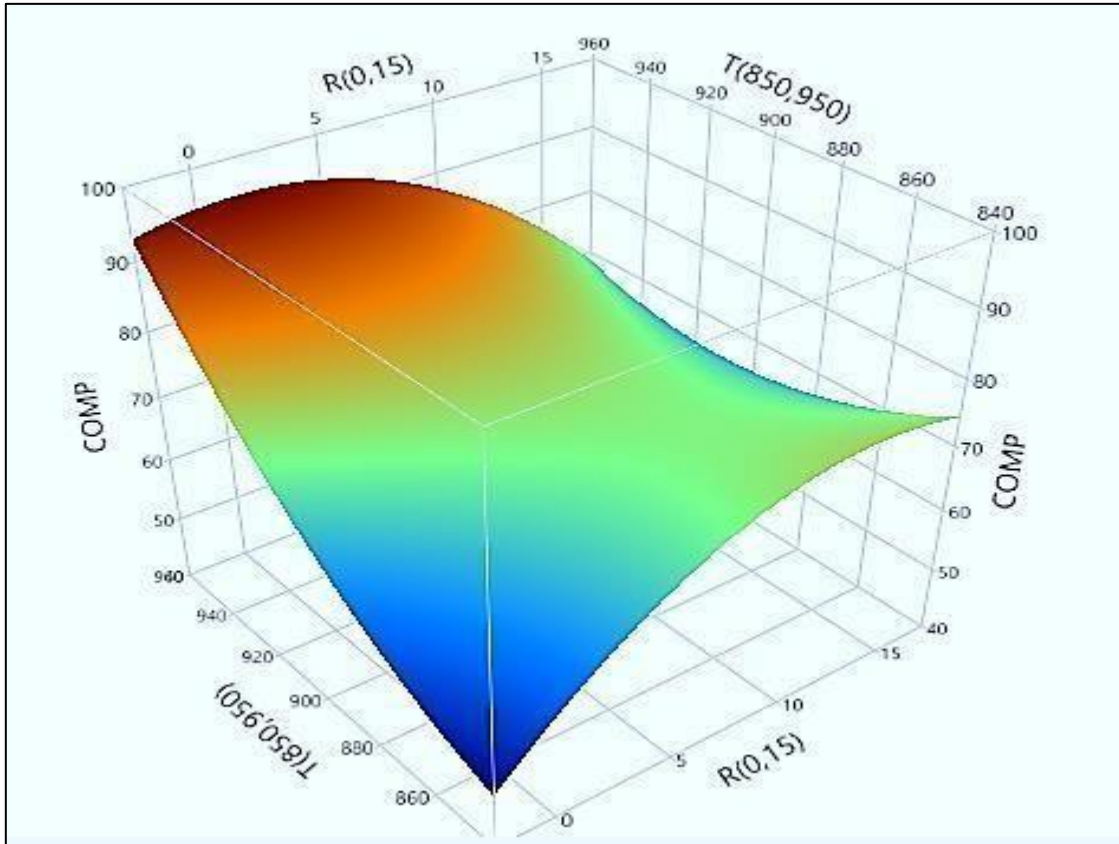


Figure III.61 : Les résultats de la compression de briques avec ajout sugar scum

❖ Observation et interprétation de la courbe :

a- Influence de l'ajout de sugar scum (R)

Lorsque la quantité de remplacement de la sugar scum augmente jusqu'à 7,5 % la résistance s'améliore significativement par rapport à un remplacement de 15 % et au témoin, dont la courbe présente une pente qui indique une amélioration ou une dégradation de la résistance selon la quantité de sugar scum ajoutée jusqu'à 15% par rapport à 7,5 %,

b- Influence de la température de cuisson :

La cuisson a des températures plus élevée a un effet significatif sur la résistance à la compression de sorte que de 850° à 950° la résistance a été augmentée significativement, d'où les températures plus élevées entraînent une meilleure résistance par rapport aux températures plus basses avec le même échantillon,

c- Interaction entre l'ajout de sugar scum et la température de cuisson :

La courbe indique qu'il existe une interaction entre l'ajout de sugar scum et la température de cuisson. Les points élevés sur la surface montrent les combinaisons optimales de pourcentage de sugar scum et de température pour obtenir la meilleure résistance à la compression, ou on remarque que la température peut maximiser les effets positifs de sugar scum, tandis qu'une autre combinaison peut être moins efficace.

En conclusion, cette courbe est utile pour identifier les conditions optimales de fabrication des briques, en ajustant à la fois la quantité de sugar scum et la température de cuisson pour obtenir la meilleure résistance à la compression.

III.6.2 : Les résultats de la flexion :

La courbe suivante représente les résultats de la flexion (FLEX: MPa) de briques en fonction de deux variables : sugar scum (R%) ajoutée, et la température de cuisson (T °C).

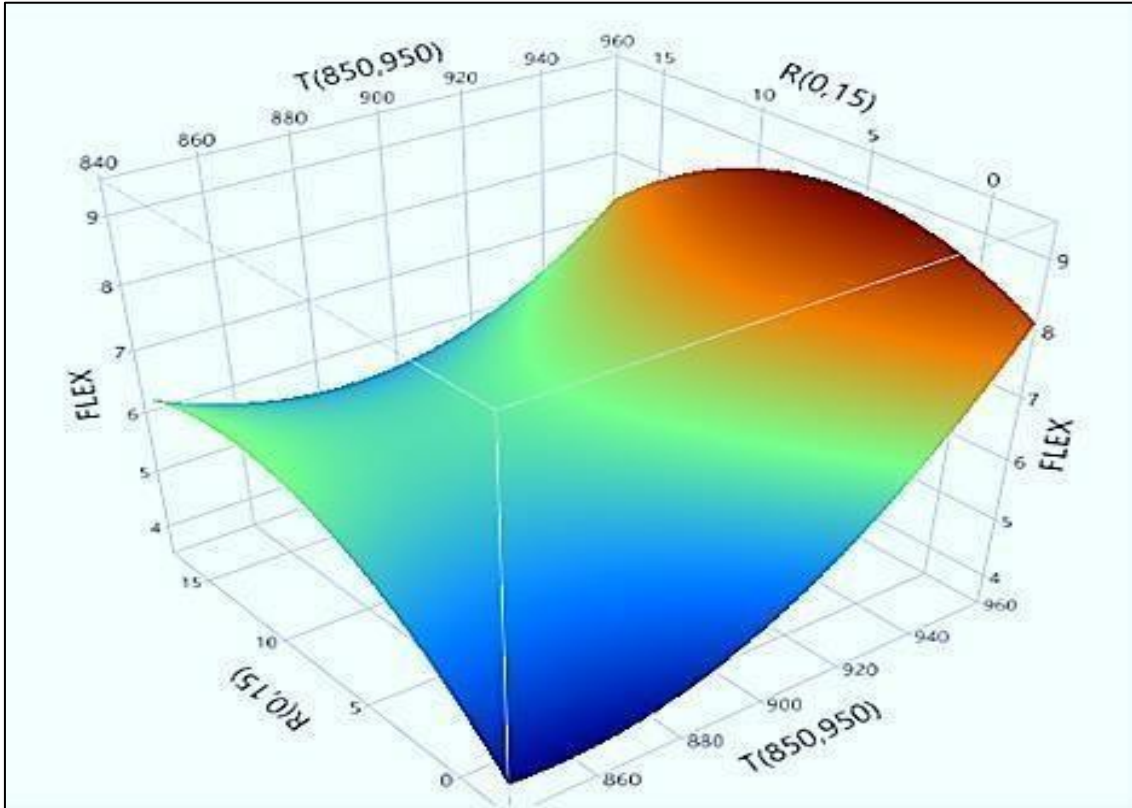


Figure III.62 : Les résultats de la flexion de briques avec ajout sugar scum

❖ Observation et interprétation de la courbe :

a-Influence de l'ajout sugar scum :

Lorsque la quantité de sugar scum augmente, la résistance à la flexion montre une variation significative ou la courbe montre une montée de résistance jusqu'à une quantité de 7,5 % de sugar scum et au-delà de cette quantité de remplacement on remarque une légère diminution jusqu'à 15 % de quantité de remplacement.

b. Influence de la température de cuisson :

La température de cuisson joue un rôle important dans la résistance à la flexion de sorte que l'augmentation de la température de cuisson tend à améliorer la résistance à la flexion jusqu'à atteindre une température optimale.

c. Interaction entre l'ajout de sugar scum et la température de cuisson :

La courbe montre une interaction complexe entre la quantité de sugar scum ajoutée et la température de cuisson. Les points les plus élevés sur la surface indiquent les combinaisons optimales de pourcentage de sugar scum et de température pour obtenir la meilleure résistance à la flexion, d'où la température élevée combinée avec un pourcentage optimal de sugar scum peut maximiser et améliorer la résistance à la flexion.

En conclusion, cette courbe est utile pour identifier les conditions optimales de fabrication des briques, en ajustant à la fois la quantité de sugar scum et la température de cuisson pour obtenir la meilleure résistance à la flexion.

III.6.3. Les résultats de la conductivité thermique :

La courbe suivante représente les résultats de la conductivité thermique (COND : W/ m.°C) de briques en fonction de deux variables : sugar scum (R%) ajoutée, et la température de cuisson (T °C).

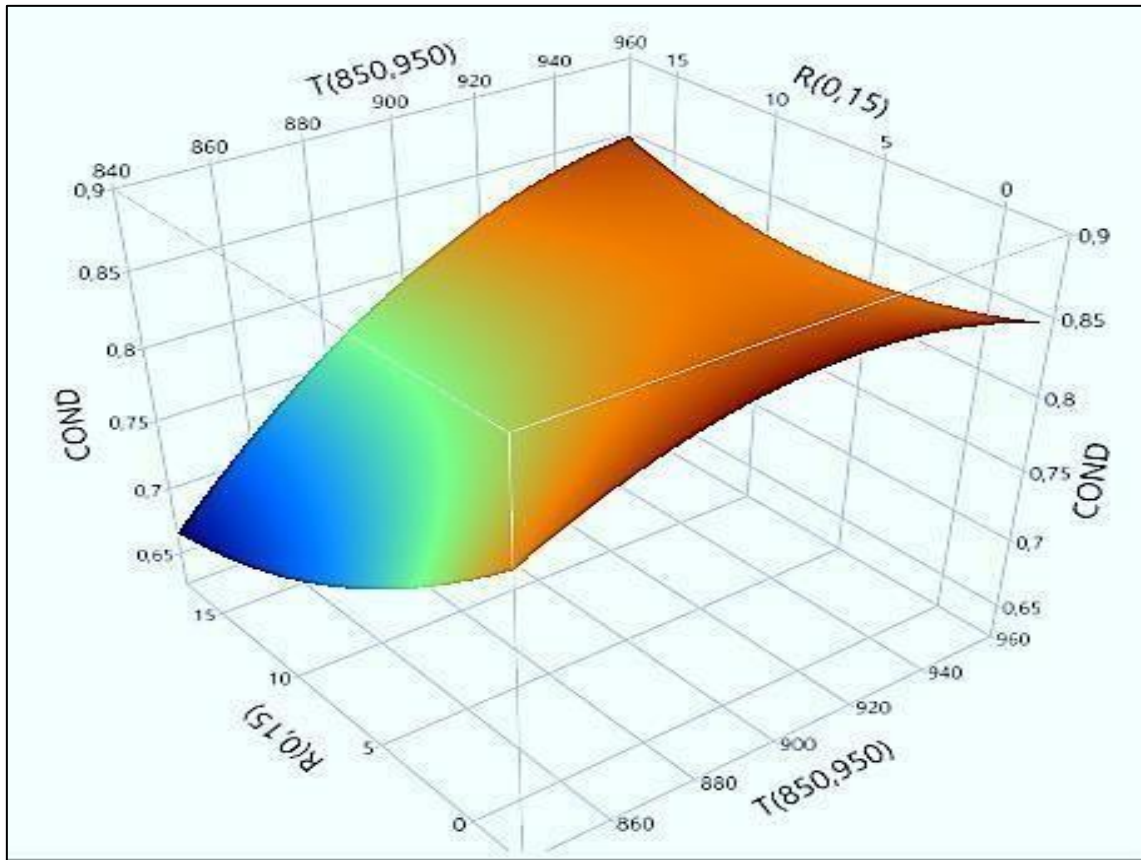


Figure III.63 : Les résultats de la conductivité de briques avec ajout sugar scum

❖ Observation et interprétation de la courbe :

a- Influence de l'ajout de sugar scum (sugar scum) :

La conductivité thermique des briques diminue en fonction de l'ajout de sugar scum. La courbe montre une diminution de la conductivité thermique à mesure que le pourcentage de sugar scum augmente.

b- Influence de la température de cuisson :

La température de cuisson diminue significativement la conductivité thermique jusqu'à l'attente d'une valeur de 880°C augmente approximativement la conductivité thermique et au-delà de cette valeur de cuisson la conductivité thermique diminue à nouveau.

c- Interaction entre l'ajout de sugar scum et la température de cuisson

La courbe montre une interaction entre la quantité de sugar scum ajoutée et la température de cuisson. Les combinaisons optimales de ces deux paramètres peuvent être identifiées par les points les plus élevés sur la surface de réponse, indiquant une conductivité thermique optimale.

- une température élevée combinée avec un pourcentage élevé de sugar scum tend à améliorer la conductivité thermique.

En résumé, cette courbe permet de déterminer les conditions optimales pour obtenir une conductivité thermique élevée des briques en ajustant la quantité de sugar scum et la température de cuisson. Plus le sugar scum et la température sont élevées, plus la conductivité thermique tend à diminuer, ce qui peut être utile pour certaines applications nécessitant des propriétés thermiques spécifiques.

III.6.4. Les résultats de la porosité :

La courbe suivante représente les résultats de la porosité (%) de briques en fonction de deux variables : sugar scum (R%) ajoutée, et la température de cuisson (T °C).

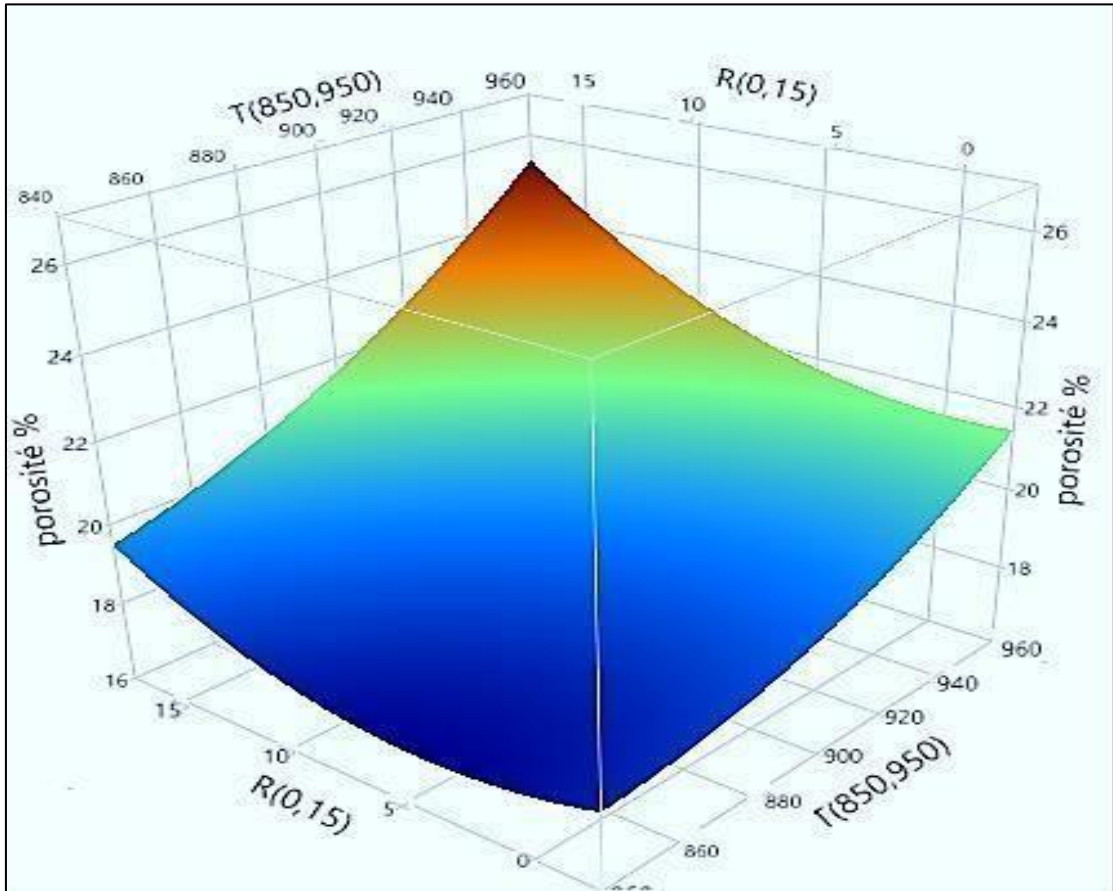


Figure III.64 : les résultats de la porosité des briques avec ajout sugar scum

➤ Observation et interprétation de la courbe :

a- Température de cuisson (T):

On observe que la porosité tend à augmenter avec l'augmentation de la température de cuisson. Les températures plus élevées (950°C) montrent une porosité plus élevée comparée aux températures plus basses (850°C).

b- Sugar scum(R) :

la porosité augmente significativement avec l'augmentation de Sugar scum. Les briques avec 0% sugar scum ont la porosité la plus faible, tandis que celles avec 15% sugar scum ont la porosité la plus élevée.

c- Interaction des deux variables (T et R) :

- La combinaison d'une température de cuisson plus Haute (950°C) et d'un pourcentage sugar scum de (15%) donne la porosité la plus élevée.
- La combinaison d'une température de cuisson plus basse (850°C) et d'un faible pourcentage en sugar scum (0%) donne la porosité la plus faible.
- La porosité des briques augmente avec l'augmentation du pourcentage de sugar scum. Cela est dû au fait que le sugar scum brûle pendant la cuisson, créant des vides dans la structure de la brique.

Pour obtenir des briques avec une porosité minimale il est préférable de :

- Utiliser un faible pourcentage de sugar scum (0%).
- Cuire à une température plus basse (880°C).

Si une porosité plus élevée est souhaitée alors :

- Augmenter le pourcentage (jusqu'à 15%).
- Utiliser des températures de cuisson plus élevée (950°C).

III.7. Résultats de l'infrarouge (IR) :

Les résultats de l'infrarouge effectuait sur l'argile sont représenté dans la figure suivante :

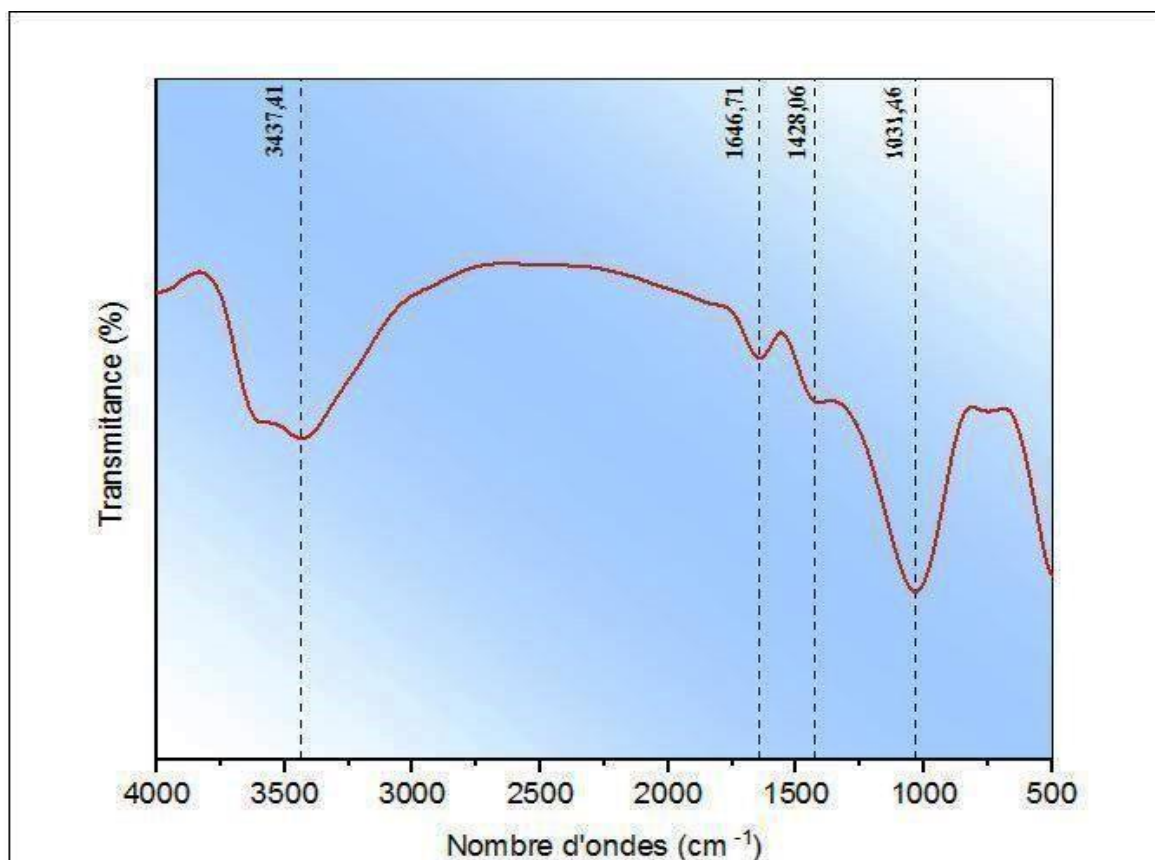


Figure III.65 : Spectre Infrarouge de l'Argile

Tableau III.10 : Résultats du spectre IR d'argile

	Bandes observés	Liaisons
1	3437,41	O-H
2	1646,71	C-O
3	1428,06	C-O
4	1031,46	Si-O-Si

Il est observé d'après la figure III.65 :

- La bande observée à (1) a été attribuée aux vibrations d'étirement d'O-H dans les groupes hydroxyle et au mode de vibration d'élongation de l'eau inter foliaire.
- Les bandes relatives aux liaisons (CO) est repérée à (2) et (3) cela confirme la présence de la calcite.
- La bande (4) observée a été attribuée aux vibrations d'étirement asymétriques de Si-O-Si et Si-O-Al (36).

Chapitre III : Résultats et discussions

- ❖ les résultats de l'infrarouge effectuait sur le café sont représenté dans le tableau et la figure suivante :

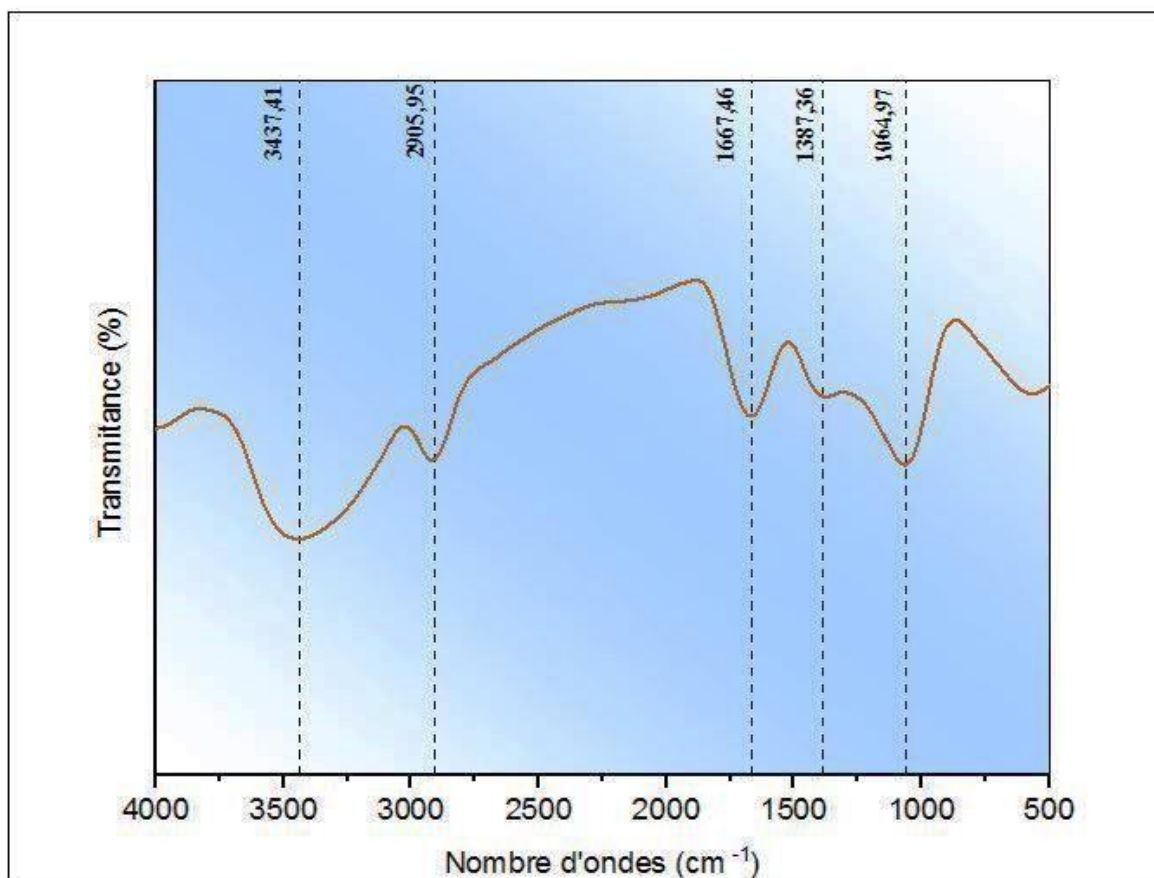


Figure III.66 : Spectre Infrarouge du café

Tableau III.11 : Résultats du spectre IR du marc de café

	Bandes observés	liaison
1	3437,41	O-H
2	2905,95	C-H
3	1667,46	acides chlorogéniques
4	1387,36	C-O
5	1064,97	C-O

- La bande (1) est liée au groupe hydroxyle de la vibration d'étirement O-H.
- La bande (2) est attribuée à la vibration d'étirement C-H.
- La bande (3) est fortement associée aux acides chlorogéniques et à la caféine
- La bande (4) et (5) résulte de la vibration d'étirement de C-O dans les liaisons C-O-H, telles que les liaisons glycosidiques, et est liée aux sucres polysaccharides galactomannanes (37).

Chapitre III : Résultats et discussions

- ❖ les résultats de l'infrarouge effectuait sur sugar scum sont représenté dans le tableau et la figure suivante :

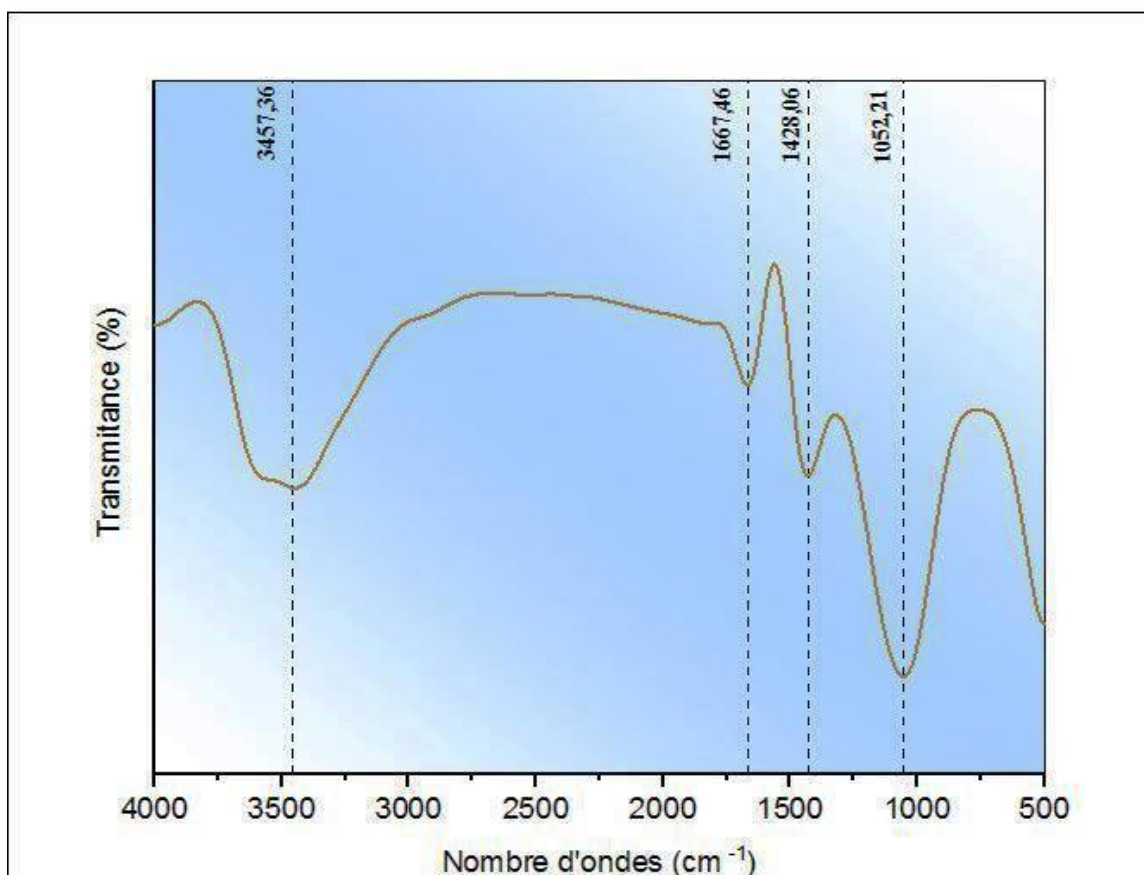


Figure III.67 : Spectre IR de sugar scum

Tableau III.12 : Résultats du spectre IR de sugar scum

	Bandes observés	liaison
1	3457,36	O-H
2	1667,46	O-H
3	1428,06	CaO
4	1052,21	Carbonate de calcium

Il est observé d'après la figure et le tableau précédent du spectre IR de sugar scum:

- La bande observée à (1) a été attribuée aux vibrations d'étirement d'O-H dans les groupes hydroxyle.
- La bande de faible intensité à (2) a été attribuée aux vibrations de flexion des molécules d'eau fortement adsorbées.
- La bande observée à (3) a été attribué au CaO.
- La bande observée à (4) a été attribuée au carbonate de calcium(36).

Chapitre III : Résultats et discussions

- ❖ les résultats de l'infrarouge effectuait sur les briques avec ajout de sugar scum sont représenté dans le tableau et la figure suivantes :

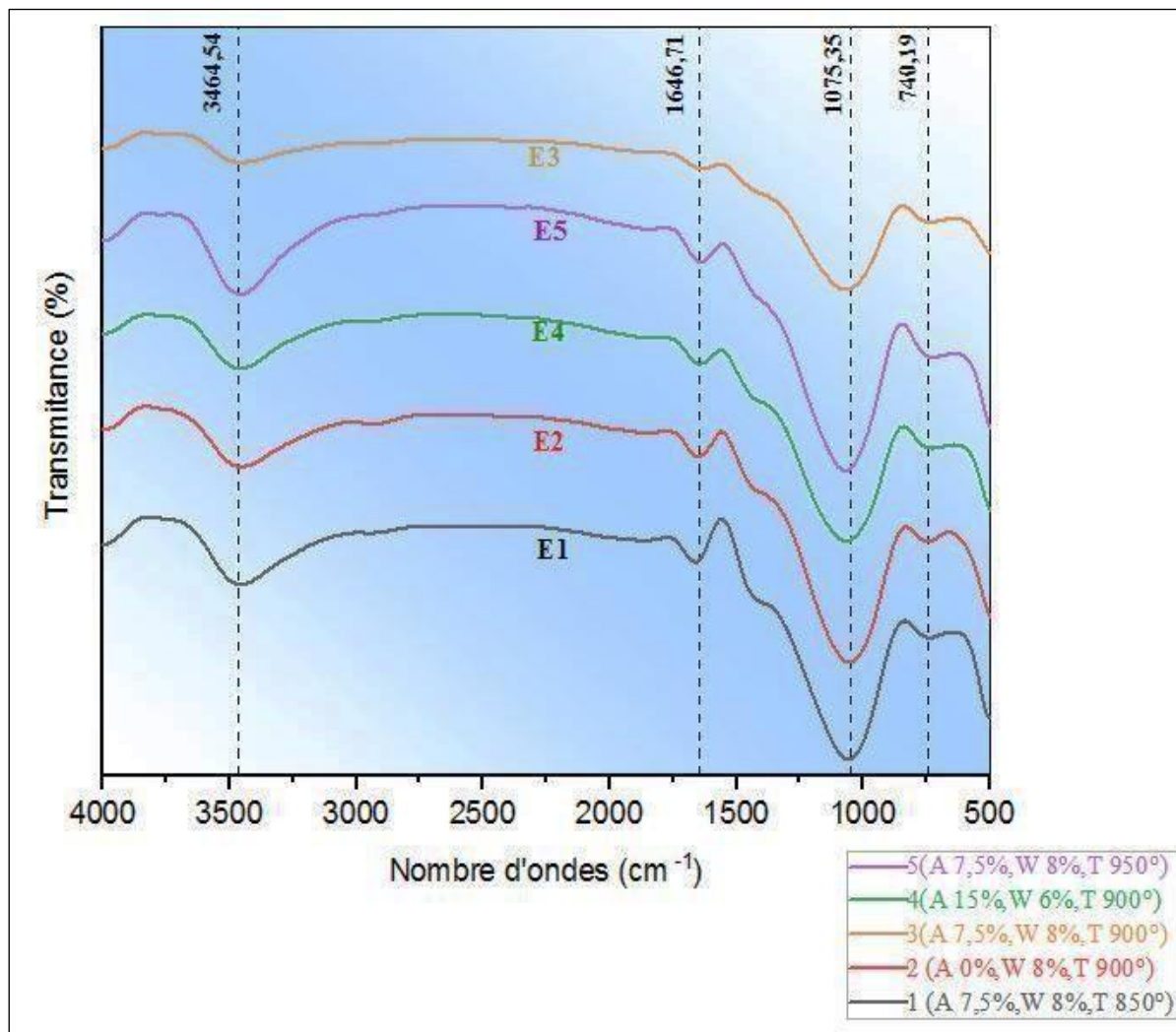


Figure III.68 : Spectre IR des briques avec ajout de sugar scum

Tableau III.13 : Résultats du spectre IR des briques avec ajout du sugar scum

	Bandes observées	Liaisons
1	3464,54	O-H
2	1646,71	C-O
3	1075,35	C-O
4	740,19	Si-O-Si

Chapitre III : Résultats et discussions

- ❖ les résultats de l'infrarouge effectuait sur les briques avec ajout du marc de café sont représenté dans le tableau et la figures suivantes :

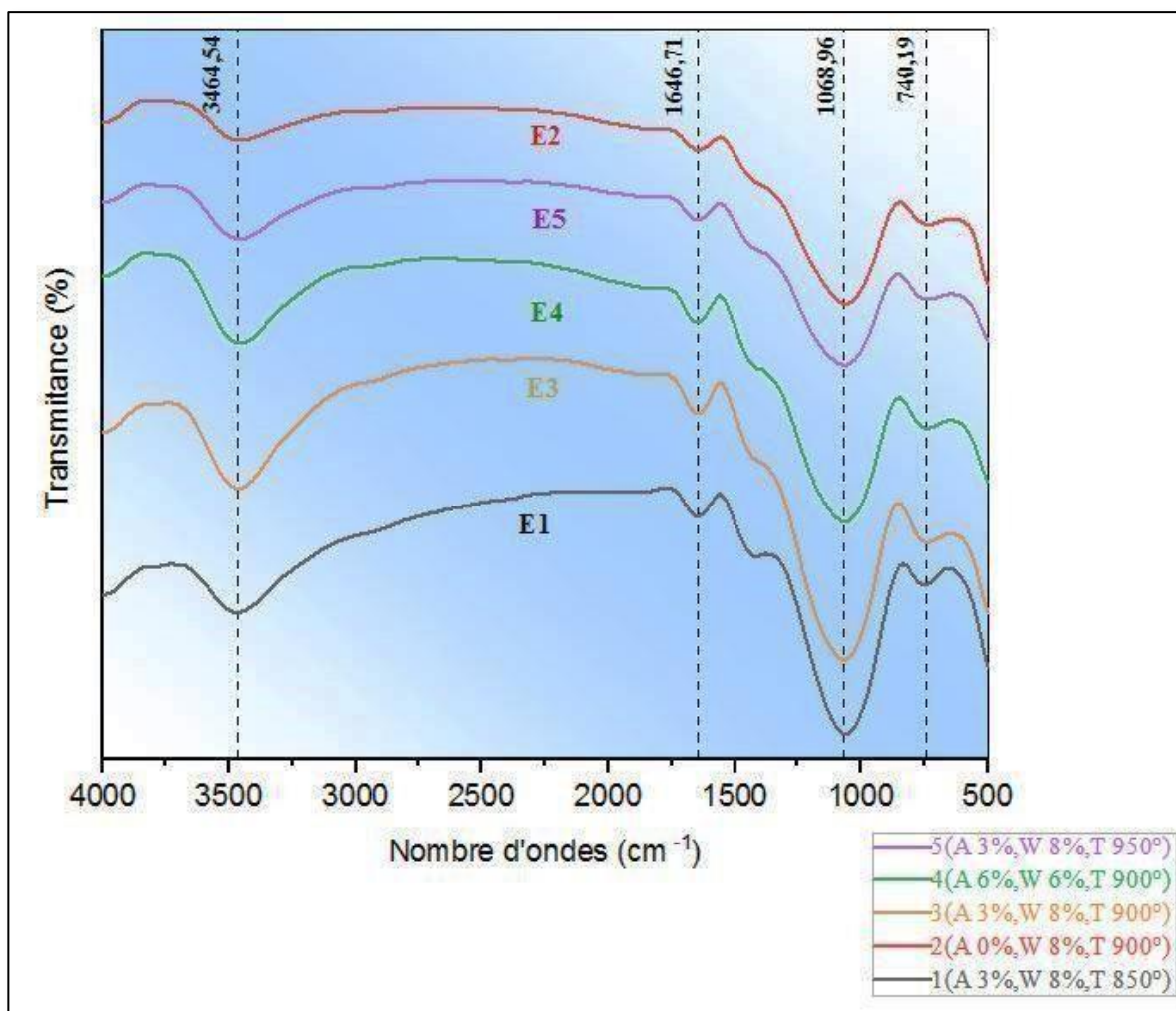


Figure III.69 : Spectre IR des briques avec ajout du marc de café

Tableau III.14 : Résultats du spectre IR des briques avec ajout du marc de café

Bandes observées		Liaisons
1	3464,54	O-H
2	1646,71	C-O
3	1068,96	C-O
4	740,19	Si-O-Si

Il est observé d'après les figures et les tableaux précédents des différents échantillons :

- une bande observée à (1) a été attribuée aux vibrations d'étirement d'O–H dans les groupes hydroxyle et au mode de vibration d'élongation de l'eau inter foliaire.
- Les bandes observées à (2) et (3) relatives aux liaisons (CO), cela confirme la présence de la calcite.
- La bande (4) observée a été attribuée aux vibrations d'étirement asymétriques de Si–O–Si et Si–O–Al.

D'après l'observation des différents spectres IR on remarque la disparition de la matière organique à cause de sa combustion lors de la cuisson.

III.8. Les résultats de la DRX :

Les résultats de la DRX sur les échantillons de sugar scum sont présentés sur la figure suivante :

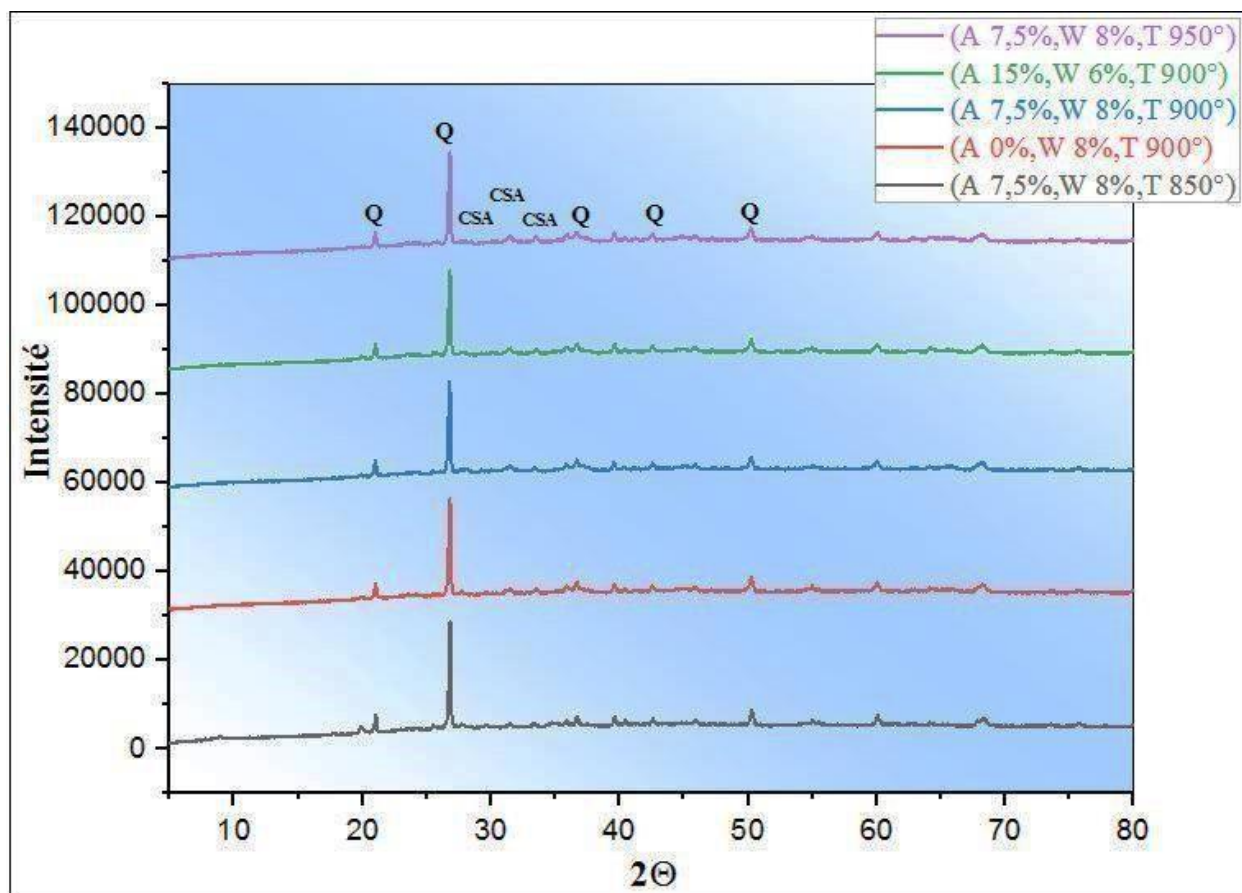


Figure III.70 : Spectre DRX des échantillons avec ajout de sugar scum

Chapitre III : Résultats et discussions

Les diffractogrammes des rayons X représentés sur la figure III.17 correspondant à la composition minéralogique des échantillons de briques avec ajout de sugar scum.

Ce diffractogramme met en évidence l'existence de :

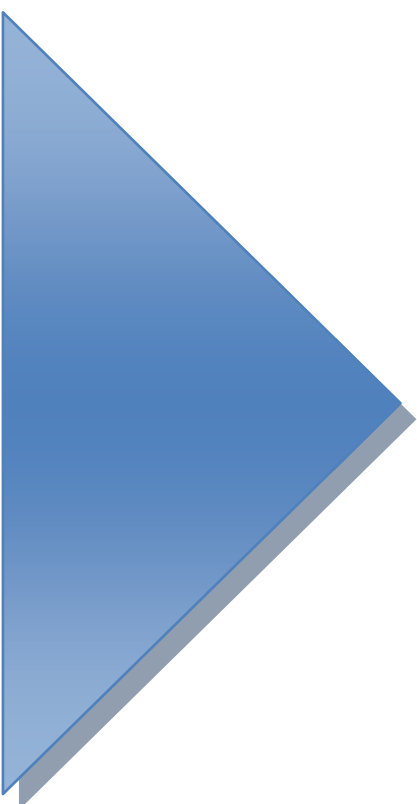
- Une phase minéralogique principale, qui est le quartz (Q) observée à des pics de diffraction : 21° ; 27° ; 37° ; 43° ; 50° .
- Une seconde phase importante est la composé Calcium Alumineux Silicate (CSA) qui a des pics de diffractions : 28° ; 31° ; 33° .

III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, les résultats des caractérisations de l'argile et des briques confectionnées ont été présentés.

Pour les caractéristiques mécaniques et physiques de la brique, l'addition d'une quantité croissante d'ajout diminue la résistance à la compression et améliore les caractéristiques mécaniques, tandis que l'augmentation de la température de cuisson diminue la porosité et augmente la résistance à la compression.

L'utilisation d'ajout améliore la conductivité thermique et augmente la porosité, l'augmentation de la température diminue la porosité et augmente la conductivité thermique.



CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale :

Cette présente étude avait pour objectif, d'évaluer la faisabilité de l'utilisation du marc du café et le sugar scum dans l'élaboration des briques cuites. Dans le but d'améliorer leurs caractéristiques thermiques tout en gardant les caractéristiques mécaniques suffisantes. D'après les résultats obtenus on peut conclure ce qui suit :

- ❖ Les deux ajouts sont compatibles avec la fabrication de brique cuite
- ❖ L'analyse de la marc du café a montré qu'elle est composée de matière organique, le sugar scum composé de carbonate de calcium, l'argile quant à elle composée de silicium et de composés silicium aluminés.
- ❖ Les briques confectionnées sont composées de quartz et de CSA.
- ❖ La perte au feu des échantillons a répondu à l'exigence recommandée pour la fabrication de brique.
- ❖ En ce qui concerne les caractéristiques mécaniques et physiques de la brique, l'ajout d'une quantité croissante de matériau d'addition diminue la résistance à la compression tout en améliorant d'autres propriétés mécaniques. Par ailleurs, l'augmentation de la température de cuisson réduit la porosité et accroît la résistance à la compression.
- ❖ L'utilisation de matériaux d'addition améliore la conductivité thermique et augmente la porosité. En revanche, une élévation de la température de cuisson réduit la porosité et augmente la conductivité thermique.
- ❖ En perspective on prévoit d'étudier la durabilité des briques confectionnées.

Références Bibliographiques ;

- [1]. **P, MEUKAM.** « Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments ». Thèse doctorat, université Yaoundé , Décembre 2004.
- [2]. **Peir, GIOVANNI.** *La brique « Fabrication et traditions constructives »*. s.l. : Groupe Eyrolles, 2005.
- [3]. **Lucien, ALVISET.** Techniques de l'ingénieur. [En ligne] 10 mai 1994. [Citation : 23 avril 2024.] www.techniques-ingenieur.fr.
- [4]. **Aurelie Michot, et al.** *Thermal conductivity and specific heat of kaolinite: Evolution with thermal treatment*. 2008.
- [5]. **G. Vasseur, et al.** *Thermal conductivity estimation in sedimentary basins*. 2000.
- [6]. **M.I. Osendi, et al.** *Mechanical properties of mullite materials*. 1999.
- [7]. **Michel, Kornmann.** *Matériaux de construction en terre cuite, fabrication et propriétés*. Septima (Paris), March 2005.
- [8]. **M, Gautier.** Interactions entre argile ammoniée et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets. Cas de molécules à courtes chaînes. *Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans*. 2008.
- [9]. **Nassima, CHOUGA.** « épuration des eaux usées par un matériau argileux ». *Mémoire de magister , université souk ahras*. [2012/2013].
- [10]. **Pialy, Pierre.** Étude de quelques matériaux argileux du site de Lembo (Cameroun) minéralogie, comportement au frittage et analyse des propriétés d'élasticité. . *Thèse de Doctorat, Université de Limoges*. limooges .2009.
- [11]. **T, Karfa.** "Frittage à basse température d'une argile kaolinitique de Burkina Faso. Transformations thermiques et réorganisations structurales". *Thèse de Doctorat des universités de Limoges et de Ouagadougou*. 2003.
- [12]. **Cailler S, et al.** "Minéralogie des argiles". Paris .Edition Masson,1982. Vol.Tome 1 et 2.

- [13]. **Bentahar, Yassine.** Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse. . *These de doctorat.* 2016.
- [14]. **P.Anatoine, D.Fabre.** "*Géologie appliquée au génie civil*". Paris : Edition Masson, 1984.
- [15]. **Fagel, N.** "*Géologie des argiles*". [Le site : www2.ulg.ac.be/urap/enseignement.htm]. : Extrait des cours en ligne de l'université de liège.
- [16]. **Samia, Arezki.** Etude De L'influence Des Ajouts (grignon D'olive Et Foin) Sur Les Caractéristiques Physico- Mécaniques De La Brique De Terre Cuite. *Mémoire de Magister.Université Abderrahmane Mira.* 2008.
- [17]. **Kumari Neeraj, and Chandra Mohan.** Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties. *Clay and Clay Minerals.* 2021.
- [18]. **Zami, M.S., Lee, A .***Stabilised or unstabilised earth construction for contemporary urban housing, 5th International Conference on Responsive Manufacturing - Green Manufacturing (ICRM 2010), p.227–240, Ningbo, China, 11-13 Jan..* 2010.
- [19]. **Hassane, Meziane.** Influence D'ajout Des Déchets Industriels Sur Les Caractéristiques Physiques, Mécaniques Et Thermiques Des Briques. *Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira - Bejaia.* 2020.
- [20]. **P. Muñoz Velascoe et al.** Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material- . *A review. Construction and Building Materials 63, 97-107.* s.l. : University of La Rioja, Spain, 2014.
- [21]. **Sorout J, et al.** Waste-Based Bricks: Evaluation of Strength Behaviour of Bricks Containing Different Waste Materials as an Additive. *Water Air Soil Pollut 234, 424 .* (2023).
- [22]. **Barthetn, L.** "Contribution de l'évaluation de l'impact sur les écosystèmes de la valorisation de résidus de procédés thermiques en BTP". . *Thèse de doctorat.* INSA de Lyon .2003.
- [23]. **Sekeroglu, N.** «In vitro prospective effects of various traditional herbal coffees consumed in Anatolia» . *Food research international.* 2012. vol. 45, n°11, p. 197.

- [24]. **M. Haddoudi, et al.** «Valorisation du marc du café extraction de l'huile et évaluation de son activité antioxydante,». *les technologies de laboratoires*. 2014.
- [25]. **Cruz, Rebeca.** *Espresso Coffee Residues: A Valuable Source of Unextracted Compounds*. {Journal of agricultural and food chemistry}(2012).
- [26]. **El Maguana, Youssef. et al.** *Adsorption Thermodynamic and Kinetic Studies of Methyl Orange onto Sugar Scum Powder as a Low-Cost Inorganic Adsorbent*. juin 2020, Journal of Chemistry.
- [27]. **Ould amer ahmed.** Effet du sable sur la durabilité du béton de terre stabilisé. *memoire de fin d'étude*. 2019-2020.
- [28]. **kolli, M.** (élaboration et caractérisation thermomécanique réfractaire à base de kaolin DD3). *Thèse de doctorat*. Université de sétif : s.n., 2008.
- [29]. **J, costet.** (cours pratiques des mécaniques des sols) . *plasticité et calcul des tassement*. paris : Edition Dunod. Vol. tome 1 .1-339 p 1981.
- [30]. **Cecil Charles Handisyde, Barry Albert Haseltine.** *Bricks and Brickwork*. london : Brick Development Association, 1976.
- [31]. **Ahmed, Khelifati.** Caractérisations physico-chimiques des briques spéciales. *Mémoire de Master, Département des Mines et Géologie, Université A, Mira de Bejaia*. 2016/2017.
- [32]. **Ahmed, ALIA Abdelkarim et BAKHMED.** « L'effet d'ajout des fibres métalliques sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sable de dunes » . *Mémoire De Magister, Département De Génie Civil, Université Kasdi Merbah – Ouargla*. [2016/2017].

Résumé :

Dans cette étude, nous explorons la possibilité de la valorisation du sugar scum (écume de sucre) provenant du raffinage de sucre et du marc de café pour la fabrication de briques cuites. L'argile, le sugar scum ainsi que le marc de café ont été caractérisés par différentes techniques physiques, chimiques et minéralogiques. Les performances mécaniques et les propriétés physiques et thermiques des briques contenant différentes proportions de ces ajouts ont été testées. Nous avons exploré différentes teneurs en eau et différentes températures de cuisson. Les résultats ont montré un changement de la résistance à la compression en fonction de l'ajout et de sa proportion ; ces résistances respectent les recommandations des normes. L'utilisation du sugar scum ainsi que du marc de café a augmenté la porosité, donnant naissance à des briques plus isolantes en termes de conductivité thermique.

Mots clés :

Brique, Sugar scum, Marc du café, Argile, Porosité, Résistances, Isolantes.

Abstract:

In this study, we explore the potential of valorizing sugar scum from sugar refining and coffee grounds for the production of fired bricks. The clay, sugar scum, and coffee grounds were characterized using various physical, chemical, and mineralogical techniques. The mechanical performance and the physical and thermal properties of the bricks containing different proportions of these additives were tested. We explored different water contents and firing temperatures. The results showed a change in compressive strength depending on the type and proportion of the additive; these strengths comply with the recommended standards. The use of sugar scum and coffee grounds increased the porosity, resulting in bricks with better insulation properties in terms of thermal conductivity.

Keywords:

Brick, Sugar scum, Coffee grounds, Clay, Porosity, Strengths, and Insulating.