

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique



Faculté des sciences et de la technologie

Département de génie mécanique

N°:

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Master Académique

Titre:

Caractérisation thermique des matériaux de construction

Proposé et dirigé par :
Pr. Nabila Ihaddadène
Noureddine Hebiche.

Présenté par:
CHARIF OMAR

Soutenu devant le jury composé de :

Bouaouina	Prof /MCA	Université Mohamed Boudiaf-M'Sila	Président
Benabbas	MCA /MCB	Université Mohamed Boudiaf-M'Sila	Examineur

Academic year: 2024 /2025

Remerciements

Louange à Dieu Tout-Puissant qui m'a accordé la foi, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à ma directrice de mémoire, **Madame Dr Nabila Ihaddadène** de l'Université de M'sila, pour la confiance qu'elle m'a accordée, sa présence constante à mes côtés, ses orientations, son humilité, ses conseils et ses remarques constructives qui ont grandement contribué à l'avancement de ce travail.

Je remercie également **Monsieur le Dr. Habiche Nour Eddine** de l'Université de M'sila, pour ses orientations, sa disponibilité, son écoute et sa patience tout au long de la réalisation de ce projet.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à améliorer ce travail et qui m'ont fait part de remarques ayant permis d'en parfaire le contenu.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes parents, mes frères, mes sœurs, ainsi qu'à toute ma famille pour leurs encouragements et leurs prières qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours. Je leur suis infiniment reconnaissant pour la confiance qu'ils m'ont témoignée.

Enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Ô Seigneur, répands Tes bénédictions sur Ton noble messager, sur sa famille et ses compagnons, et bénis-nous dans notre vie.

*** Dédicace ***

Je dédie ce travail à mes parents :

*Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude et de
ma reconnaissance.*

*À mes frères et sœurs, mes grands-parents et toute ma famille, qui
m'apportent amour et vitalité.*

*À toutes les personnes qui m'ont aidé – directement ou
indirectement – et à celles qui ont partagé avec moi les moments
d'émotion durant l'accomplissement de ce travail, en m'apportant
leur soutien et leurs encouragements chaleureux tout au long de
mon parcours.*

*À tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite
encore plus de succès.*

Merci !

CHARIF OMAR

المخلص

يُعد قطاع البناء من بين أكثر القطاعات استهلاكًا للطاقة في الجزائر، مما يؤدي إلى تأثيرات بيئية كبيرة خاصة من حيث انبعاث الغازات الدفينة. لتحسين الأداء الطاقوي للمباني، من الضروري تحسين العزل الحراري واختيار مواد بناء ذات كفاءة عالية

تركز هذه الدراسة على الطوب الأحمر باعتباره أحد أكثر مواد البناء استخدامًا في الجزائر، وتمت دراسة خصائصه الحرارية من خلال تجارب مخبرية تعتمد على أجهزة مثل المصباح الهالوجيني وجهاز DMST 1.0

تم اختبار عدة أنواع من الطوب، منها الطوب الصناعي والطوب التقليدي المحلي

أظهرت النتائج أن خصائص الطوب تتأثر بشكل كبير بنوعية المواد الأولية وطريقة التصنيع، حيث أظهرت بعض أنواع الطوب أداءً حراريًا أفضل مقارنة بأخرى. توصي هذه الدراسة باختيار مواد بناء ذات كفاءة حرارية محسنة بهدف تقليل استهلاك الطاقة وتحسين راحة المستخدم داخل المباني

Résumé

Le secteur du bâtiment en Algérie est l'un des plus grands consommateurs d'énergie, ce qui contribue significativement aux émissions de gaz à effet de serre. Pour améliorer la performance énergétique des bâtiments, il est essentiel de renforcer l'isolation thermique et de bien sélectionner les matériaux de construction.

Cette étude se concentre sur la brique rouge, largement utilisée dans la construction en Algérie. Les propriétés thermiques de différentes briques ont été analysées à l'aide d'essais expérimentaux en laboratoire, utilisant notamment une lampe halogène et l'appareil DMST 1.0. Les briques industrielles et les briques traditionnelles locales ont été évaluées.

Les résultats obtenus montrent que les performances thermiques des briques dépendent fortement de la nature des matières premières et des procédés de fabrication. Certaines briques ont montré de meilleures performances thermiques que d'autres. Cette étude recommande l'utilisation de matériaux de construction thermiquement efficaces afin de réduire la consommation énergétique et d'améliorer le confort thermique des bâtiments.

Abstract

The building sector in Algeria is among the largest energy consumers, significantly contributing to greenhouse gas emissions. To enhance the energy efficiency of buildings, it is essential to improve thermal insulation and carefully select efficient construction materials.

This study focuses on red bricks, which are widely used in Algerian construction. The thermal properties of various types of bricks were experimentally analyzed in the laboratory using equipment such as a halogen lamp and the DMST 1.0 device. Both industrial and locally produced traditional bricks were evaluated.

The results showed that the thermal performance of bricks is highly influenced by the nature of raw materials and the manufacturing process. Some bricks demonstrated better thermal performance than others. The study recommends the use of construction materials with improved thermal efficiency to reduce energy consumption and enhance indoor thermal comfort.

Table des Matières

Liste des Figures

Liste des tableaux

Introduction Générale	1
I Généralités sur les matériaux de construction	3
I.1 Introduction	4
I.1.1 Définition des matériaux de construction	4
I.1.2 Importance dans le domaine du bâtiment et des infrastructures	5
I.1.3 Critères de choix des matériaux (résistance, durabilité, coût, impact environnemental)	7
I.2 Classification des matériaux de construction	8
I.2.1 Matériaux naturels	9
I-2-2 Matériaux artificiels	11
I-2-3 Matériaux métalliques	15
I-2-4 Matériaux polymères	15
I-2-5 Matériaux isolants	17
I-3- Propriétés des matériaux de construction	19
I-3-1 Propriétés physiques des matériaux de construction	19
I-3-2 Propriétés mécaniques des matériaux de construction	21
I-3-3 Propriétés thermiques des matériaux de construction	24
I-3-4 Propriétés acoustiques des matériaux de construction	25
I-3-5 Propriétés chimiques et de durabilité des matériaux de construction	27
I-4-Techniques de fabrication et mise en œuvre des matériaux de construction	29
I-5- Impact environnemental et durabilité des matériaux	31
I-5-1 Émissions de CO ₂ et empreinte carbone des matériaux	31

I-5-2 Matériaux recyclables et éco-conçus	32
I-5-3 Innovations dans les matériaux durables (bétons verts, biocomposites)	32
I-6- Applications et exemples d'utilisation	33
I-6-1 Exemples d'utilisation selon les types de bâtiments (maisons, infrastructures, bâtiments industriels)	33
I-6-2 Études de cas sur des matériaux spécifiques utilisés dans des projets innovants	34
I-7- Conclusion	38
II Matériels et méthodes	39
II.1 Introduction	40
II.2 Description du dispositif expérimental	40
II.2.1 Lampe halogène	40
II.2.2 Appareil DMST 1.0	41
II.3 Matériaux utilisés	42
II.3.1 La brique rouge de 10 cm	42
II.3.2 Brique traditionnelle de "Ouled Saïd" – Commune de Magra	43
II.4 Procédure expérimentale	44
III Résultats et discussion	47
III.1 Introduction	48
III.2 Analyse du comportement thermique de la face exposée au rayonnement	48
III.3 Analyse du comportement thermique de la face non exposée au rayonnement	53
III.4 Analyse de l'écart de température en régime permanent des différentes briques	57
III.5 Analyse comparative des briques selon les propriétés étudiées	59
III.6 Analyse du comportement thermique de la brique traditionnelle	60
Conclusion	62

Bibliography

Liste des Figures

I.1	Différents granulats légers naturels [2]	9
I.2	Construction en pierre [3]	10
I.3	toiture en bois (maison ancien).[3]	10
I.4	construction en terre [3]	11
I.5	Représentation schématique des différents types de béton léger [2].	13
I.6	Construction en brique cutie [3].	13
I.7	Produits en Céramiques [4]	14
I.8	Pièces céramiques en AlO et SiC [4]	15
I.9	Schématisation d'un polymère [7]	16
I.10	Constituants d'un matériaux composites [9]	17
I.11	Photos de quelques isolants synthétiques : polyuréthane (a), polystyrène expansé(b) et extrudé (c).[10]	17
I.12	Photos de quelques isolants minéraux : laine de roche (a), verre cellulaire (b) et perlite expansée (c)[10]	18
I.13	Photos de quelques isolants végétaux : laine de lin (a), laine de chanvre (b) et bois feutré (c).[10]	18
I.14	Représentation des phases physiques (solide, liquide, gaz) dans un matériau [12]	19
I.15	la compression [12]	22
I.16	différentes éprouvettes pour l'essai de traction [12]	22
I.17	Essais de flexion [12]	23
I.18	comparaison entre les propriétés thermiques de matériaux de construction courants	25
I.19	Consommation d'énergie et émission de CO2 en Algérie en 2005 [16]	31
I.20	Utilisation du bois dans les maisons individuelles pour ses qualités écologiques et isolantes [17]	33
I.21	Exemple de bâtiment industriel avec structure métallique en acier [18]	34

I.22	Le Centre Bullitt à Seattle construit en bois lamellé-croisé (CLT) fonctionnant à l'énergie solaire [19]	34
I.23	Maison construite en béton de chanvre, un matériau écologique et respirant [20]	35
I.24	Structure en bois lamellé-collé au siège social de Swatch à Bienne, Suisse [21]	35
I.25	Utilisation de briques recyclées dans le Circular Pavilion à Paris [22]	36
I.26	Panneaux isolants en chanvre utilisés dans la Maison Éco-Logis, France [23] .	36
I.27	Mur végétal à fonction isolante et décorative [24]	37
II.1	Bon d'essai ET200 (gunt).	41
II.2	Appareil DMST 1.0	42
II.3	Un échantillon de Brique rouge de 10cm.	43
II.4	Brique traditionnelle	44
II.5	Un échantillon avec du polystyrène.	44
II.6	Un échantillon avec du polystyrène et des capteurs de température.	45
II.7	Dispositif et procédure expérimentale	46
III.1	(a) à (d) : Évolution de la température moyenne de la face exposée au rayonnement pour les différentes briques testées (partie 1).	50
III.2	(e) à (g) : Évolution de la température moyenne de la face exposée au rayonnement pour les différentes briques testées (partie 2).	51
III.3	(a) à (d) : Évolution de la température moyenne de la face non exposée au rayonnement pour les différentes briques testées (partie 1).	54
III.4	(e) à (g) : Évolution de la température moyenne de la face non exposée au rayonnement pour les différentes briques testées (partie 2).	55
III.5	Écart de température (ΔT) en régime permanent pour chaque type de brique (ordre croissant)	58
III.6	Réponse thermique de la brique traditionnelle	61

Liste des tableaux

III.1 Modèles mathématiques de l'évolution de la température de la face exposée au rayonnement pour les briques testées.	52
III.2 Modèles mathématiques de l'évolution de la température de la face non exposée au rayonnement pour les briques testées.	56

Introduction Générale

Le secteur du bâtiment représente une part importante de la consommation énergétique mondiale, principalement en raison des besoins liés au chauffage, à la climatisation et à la ventilation. Dans un contexte marqué par la transition énergétique et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments constitue un enjeu majeur.

Les matériaux de construction jouent un rôle fondamental dans cette dynamique, notamment à travers leurs propriétés thermiques. En effet, la conductivité thermique, la capacité thermique et l'inertie des matériaux influencent directement les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. L'optimisation de ces propriétés permet de limiter les déperditions de chaleur en hiver et de réduire les surchauffes en été, contribuant ainsi à une meilleure performance énergétique globale.

Par ailleurs, l'utilisation de matériaux thermiquement performants participe à la diminution de la consommation énergétique des bâtiments et, par conséquent, à la réduction de la pollution environnementale liée à la production d'énergie. Cette approche s'inscrit dans une démarche de développement durable visant à concilier confort, économies d'énergie et respect de l'environnement.

Ce mémoire intitulé « **Caractérisation thermique des matériaux de construction** » s'intéresse donc à l'étude du comportement thermique des briques couramment utilisées en construction, à savoir la brique de Biskra, la brique de BBA, la brique de Ouargla, la brique de M'Sila, la brique de Soueyeh, la brique de Sétif, et la brique de Ouled Derradj. Ces briques portent le nom des régions d'où elles proviennent. Ce travail de fin d'étude vise à comprendre s'il y a des différences entre ces briques et à déterminer la meilleure brique qui assure le confort thermique en minimisant les échanges thermiques, surtout en été, en soumettant ces briques au même flux thermique et en analysant leurs réponses.

Ce mémoire a été abordé à travers trois chapitres. Le premier, intitulé **Généralités sur les matériaux de construction**, rassemble toutes les informations sur les différents matériaux de construction et leurs propriétés thermo-physiques.

Le deuxième chapitre, quant à lui, décrit le matériel et la procédure expérimentale adoptés pour évaluer le comportement thermique des briques testées.

Enfin, le dernier chapitre regroupe et discute les résultats obtenus.

Une conclusion générale vient à la fin de ce mémoire, dans laquelle est présentée l'essentiel des résultats obtenus.

Chapter I

Généralités sur les matériaux de construction

I.1 Introduction

Les matériaux de construction occupent une place centrale dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. Depuis les premières constructions humaines jusqu'aux édifices modernes à haute performance énergétique, le choix des matériaux constitue une étape cruciale qui conditionne la durabilité, la résistance, le confort et l'empreinte écologique des ouvrages réalisés.

Un matériau de construction peut être défini comme toute substance naturelle ou transformée utilisée pour édifier une structure. Ces matériaux varient grandement en nature, en propriétés physiques, mécaniques et chimiques, ce qui détermine leur adéquation à des usages spécifiques.

L'importance de ces matériaux ne se limite pas à leur simple fonction structurelle ; ils participent également à l'efficacité énergétique, à l'acoustique, à l'esthétique et à la sécurité des bâtiments. Ainsi, leur sélection repose sur plusieurs critères essentiels tels que la résistance mécanique, la durabilité dans le temps, le coût économique, et de plus en plus, l'impact environnemental.

Ce chapitre vise à offrir un panorama général sur les matériaux de construction en abordant leur classification (naturels, artificiels, métalliques, polymères, isolants), leurs propriétés fondamentales (physiques, mécaniques, thermiques, acoustiques, chimiques), ainsi que leurs procédés de fabrication, leur mise en œuvre, leur impact environnemental, et leurs domaines d'application. Cette vision globale est indispensable pour comprendre les enjeux actuels de la construction durable et orienter les choix vers des solutions innovantes et respectueuses de l'environnement.

I.1.1 Définition des matériaux de construction

Les matériaux de construction sont des matériaux utilisés dans les secteurs de la construction : bâtiment et travaux publics (souvent désignés par le sigle BTP). La gamme des matériaux utilisés dans la construction est relativement vaste. Elle inclut principalement le bois, le verre, l'acier, les matières plastiques (isolants notamment) et les matériaux issus de la transformation de produits de carrières, qui peuvent être plus ou moins élaborés. On a ainsi les dérivés de l'argile, les briques, les tuiles, les carrelages, les éléments sanitaires.

Liste de matériaux de construction

Matériaux modernes : acier, aluminium, béton, bitume, éléments préfabriqués en béton, carrelage, carreau de plâtre, ciment, granulats, laine de roche, laine de verre, liant papier,

pavé, plaque de plâtre, PVC, carreau de terre cuite.

Matériaux ayant des applications modernes et traditionnelles : bois, chaux, mortier, mortier adhésif, terre cuite, tuile, brique, verre, plâtre, plomb, zinc.

Matériaux traditionnels : ardoise, bambou, lauze, osier, paille, pierre, granite, calcaire, grès, pierre meulière, marne, marbre, schiste, terre crue, pisé, bauge, torchis.

I.1.2 Importance dans le domaine du bâtiment et des infrastructures

Les matériaux de construction de haute qualité constituent un élément fondamental dans le succès de tout projet de construction, influençant directement la sécurité, la durabilité, l'efficacité économique et la conformité aux normes en vigueur. Dans l'industrie du bâtiment, ces matériaux jouent un rôle central dans la détermination de la qualité et de la sécurité des ouvrages. Avec l'évolution technologique et les défis environnementaux croissants, leur utilisation est devenue une nécessité incontournable pour assurer l'intégrité et la durabilité des constructions.

- **Sécurité et durabilité :** Les matériaux de haute qualité garantissent une stabilité structurelle et une durabilité accrues, offrant une meilleure résistance aux catastrophes naturelles telles que les séismes ou les tempêtes. L'acier inoxydable et le béton armé enrichi de composants avancés illustrent bien cette performance supérieure.
- **Efficacité économique à long terme :** Malgré un coût initial plus élevé, ces matériaux permettent de réduire considérablement les besoins en maintenance et en réparations à long terme, générant ainsi des économies substantielles.
- **Conformité aux normes et réglementations :** En se conformant aux standards nationaux et internationaux, les matériaux de qualité limitent les risques juridiques et les retards liés à la non-conformité, tout en valorisant la réputation du projet.
- **Résistance aux conditions environnementales :** Ils présentent une grande résistance face aux agressions climatiques comme l'humidité, les températures extrêmes ou la corrosion, assurant ainsi une meilleure pérennité des structures.
- **Amélioration de l'efficacité de la construction :** Leur maniabilité et leur facilité de mise en œuvre optimisent les délais de construction et réduisent les coûts opérationnels.

- **Attrait esthétique et valeur immobilière** : Les matériaux de qualité offrent une finition esthétique supérieure, ce qui augmente la valeur marchande des bâtiments, notamment dans les projets haut de gamme.
- **Durabilité environnementale** : En réduisant la consommation des ressources naturelles et en générant moins de déchets, ces matériaux s'inscrivent pleinement dans une logique de construction durable et respectueuse de l'environnement.
- **Renforcement de la confiance** : Enfin, leur usage accroît la confiance des clients, des investisseurs et des partenaires, ce qui favorise des collaborations durables et des opportunités futures.

Ainsi, le recours à des matériaux de construction de haute qualité représente bien plus qu'un simple choix technique : il s'agit d'un investissement stratégique essentiel au succès global, à la performance et à la durabilité des projets de construction.

I.1.3 Critères de choix des matériaux (résistance, durabilité, coût, impact environnemental)

Le choix des matériaux de construction est un aspect crucial lors de la rénovation ou de la construction d'une maison. Les matériaux sont variés — métaux, polymères, composites ou alliages — et leurs propriétés mécaniques, thermiques et environnementales doivent être analysées pour faire un choix éclairé.

Critères de sélection

- **Propriétés mécaniques** : résistance à la corrosion, à la déformation, à la traction et aux chocs.
- **Propriétés thermiques** : conductivité et résistance thermique (pouvoir isolant).
- **Impact environnemental** : recyclabilité, empreinte carbone et respect du cycle de vie écologique.
- **Coût** : prix d'achat, coûts de maintenance et de recyclage.
- **Esthétisme** : aspect visuel et design, important pour les projets architecturaux soignés.

Chaque type de matériau — qu'il soit métallique, céramique, bois ou plastique — présente des qualités propres qui déterminent son usage optimal. L'esthétique, bien que secondaire par rapport à la performance technique, ne doit pas être négligée lorsque l'on vise un rendu architectural soigné. De même, la solidité à long terme face aux intempéries, à l'usure ou aux incendies est déterminante pour garantir la pérennité des ouvrages.

L'isolation thermique et acoustique joue un rôle clé dans les économies d'énergie et le confort des occupants : plus un matériau est épais et poreux, plus son pouvoir isolant est élevé. Ainsi, même si son coût initial est supérieur, un matériau à fort pouvoir isolant peut s'avérer rentable sur le long terme (réduction des factures de chauffage et climatisation, meilleure efficacité énergétique).

I.2 Classification des matériaux de construction

On distingue trois types de classification les plus couramment connus :

Classification scientifique :

Dans la science des matériaux, selon la composition et la structure, les matériaux sont classés comme suit :

- Métaux et alliages
- Polymères
- Céramiques

Matériaux de base et produits :

- Matériaux de base ou matière première (argiles, pierres, bois, calcaire, métaux).
- Matériaux produits et composites (ciment (calcaire + argile), alliages, béton, ...)

Classification pratique :

Dans la construction, les matériaux sont classés selon le domaine d'emploi et selon leurs propriétés principales (résistance, compacité, ...) :

- **Les matériaux de résistance :** sont les matériaux qui ont la propriété de résister contre des sollicitations (poids propre, surcharge, séisme, ...). Parmi les matériaux les plus fréquemment utilisés, on trouve : pierres, terres cuites, bois, béton, métaux, etc.
- **Les matériaux de protection :** sont les matériaux qui ont la propriété d'enrober et de protéger les matériaux de construction principaux contre les actions extérieures, tels que : enduits, peintures, bitumes, etc.[1]

I.2.1 Matériaux naturels

I.2.1.1 granulats

Les granulats légers naturels comprennent principalement les diatomées, la pierre ponce, les scories, les cendres volcaniques et le tuf. À l'exception des diatomées, ces matériaux sont tous d'origine volcanique voir la figure I.1 , et leur concassage permet d'obtenir des granulats à faible densité. Bien que leur utilisation permette la fabrication de bétons de résistance moyenne, ces granulats restent peu employés dans la pratique.

Il s'agit de matériaux minéraux naturels, non transformés chimiquement, qui n'ont subi que des traitements mécaniques simples tels que le lavage, le broyage et le tamisage.

La figure I.1: présente quelques exemples de granulats naturels, notamment l'OPS (Oil Palm Shell), la diatomite et le laitier volcanique. [2]



Figure I.1: Différents granulats légers naturels [2]

I.2.1.2 Pierre

La pierre représentait l'un des matériaux de construction les plus répandus dans l'Algérie ancienne. Divers types étaient exploités localement, notamment le calcaire, le grès, le marbre et le granit. Ce matériau naturel était utilisé pour l'édification des murs, des temples, des habitations, ainsi que pour la construction des routes et des ponts voir la figure I.2.[3]



Figure 1: construction en pierre

Figure I.2: Construction en pierre [3]

I-2-1-3 Bois

Le bois servait à la construction des toitures, des portes, des fenêtres et du mobilier. Il était également employé dans la fabrication d'outils et d'armes voir la figure I.3.[3]



Figure I.3: toiture en bois (maison ancien).[3]

I-2-1-4 Terre crue

dans l'Antiquité en Méditerranée occidentale, l'utilisation de l'architecture en terre crue est bien attestée, constituant une méthode de construction courante aux côtés de la pierre et de la brique cuite. La terre crue représentait un matériau de construction important dans l'Algérie ancienne, employée pour édifier des maisons, des clôtures et des fortifications. Ce matériau se distingue par sa durabilité et son caractère écologique Voir la figure I.4.

Briques crues : Fabriquées à partir d'argile et simplement séchées au soleil, ces briques étaient économiques et largement utilisées.

Pisé : Technique utilisant de la terre damée pour créer des murs épais et résistants.[3]



Figure I.4: construction en terre [3]

I-2-2 Matériaux artificiels

I-2-2-1 Granulats légers

Des granulats légers peuvent également être produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles telles que l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spécifiques propres à certaines régions, comme la vase à Taïwan et le NYT (Neapolitan Yellow Tuff) en Italie ; soit à partir de sous-produits industriels tels que les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore le polystyrène expansé (PSE) ; soit enfin à partir de matières d'origine végétale comme les copeaux de bois ou les fibres cellulosiques (cas de l'Alfa). [2]

Ces granulats sont souvent désignés sous divers noms commerciaux, mais une classification plus pertinente se fait selon les matières premières utilisées et le procédé de fabrication conduisant à leur expansion et, par conséquent, à une diminution de la densité apparente. On distingue ainsi :

Matériaux naturels ayant subi un traitement thermique : Ce sont des minéraux naturels préparés, classés selon les matières premières et les procédés de fabrication provoquant leur expansion et donc la réduction de la densité apparente. Cette catégorie comprend principalement l'argile, le schiste et l'ardoise expansés ou frittés, la perlite expansée ainsi que la vermiculite exfoliée. [2]

Matériaux artificiels ne subissant pas de traitement thermique : Par exemple, le mâchefer.

Matériaux artificiels obtenus par divers traitements spéciaux : Tels que le laitier expansé et les cendres volantes frittées. [2]

I-2-2-2 Béton

“Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux développés par des ingénieurs. Ses caractéristiques particulières ouvrent la voie à de nouvelles applications architecturales. Ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet, la masse volumique d’un béton de densité normale varie entre 2200 et 2600 kg/m³, tandis que celle du béton léger se situe entre 300 et 1850 kg/m³. La technologie associée à ces bétons innovants peut être particulièrement bénéfique pour la construction, notamment dans les pays en développement. Son poids réduit, sa résistance et ses autres propriétés spécifiques en font un matériau adapté à des conditions de mise en œuvre particulières. De plus, l’utilisation d’un béton de faible masse volumique permet la construction sur des sols de faible capacité portante.

Ces bétons sont composés de granulats de faible densité tels que l’argile, le schiste, les billes de polystyrène ou les particules de bois, obtenus par substitution aux granulats traditionnels. Ils se caractérisent par une masse volumique inférieure à 1800 kg/m³, tout en conservant une résistance comparable à celle des bétons à granulats rigides, tout en étant 25% à 35% plus légers. On définit ces bétons à haute porosité par une masse volumique inférieure à 1800 kg/m³. La commission ACI limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 kg/m³ après un séchage à l’air de 28 jours. En Allemagne, la norme DIN 1045-2 (1972) fixe cette limite à 2000 kg/m³.

En faisant varier la densité des granulats, il est possible de fabriquer différents types de bétons spéciaux, adaptés à diverses exigences techniques selon les propriétés souhaitées .

On distingue ainsi trois dénominations pour ces bétons Voir la figure I.5

Béton cellulaire : lorsque l’air est incorporé dans la pâte du liant.

Béton caverneux ou béton sans fines : lorsque les granulats fins sont remplacés dans le mélange entre les gros granulats.

Béton à granulats légers : lorsque les granulats eux-mêmes sont légers et contiennent de l’air dans leur structure.[2] ‘

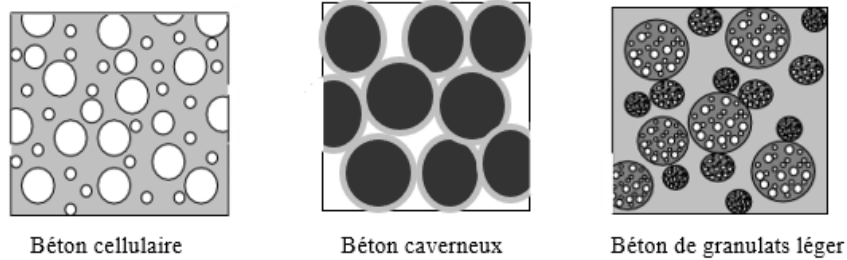


Figure I.5: Représentation schématique des différents types de béton léger [2].

I-2-2-3 Briques

La brique en terre cuite Voir la figure I.6, fruit d'un savoir-faire ancestral, se compose essentiellement d'un mélange d'argile et de sable, façonné puis cuit à des températures élevées, environ 1200°C. Sa teinte, qu'elle soit jaune ou rouge, trouve son origine dans la nature même de l'argile utilisée dans sa fabrication. [3]

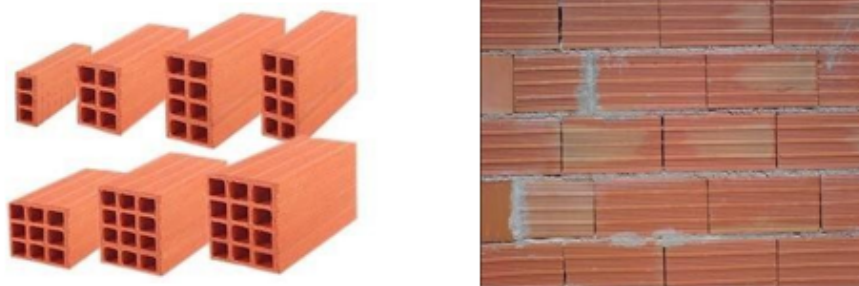


Figure I.6: Construction en brique cuite [3].

— A) Avantages

- **Durabilité** : Matériau résistant et durable avec une longue durée de vie.
- **Isolation phonique** : Offre une bonne isolation phonique, réduisant le bruit extérieur.
- **Résistance au feu** : Matériau incombustible offrant une meilleure résistance au feu.
- **Esthétique** : Large choix de couleurs et de textures pour une variété d'aspects esthétiques.[3]

— B) Inconvénients

- **Coût** : Plus cher que le parpaing, surtout pour les briques de haute qualité.

- **Consommation énergétique** : La production de briques cuites nécessite beaucoup d'énergie, contribuant aux émissions de CO₂.
- **Fragilité** : Les briques peuvent être fragiles et se fissurer si elles ne sont pas correctement installées.
- **Impact environnemental** : L'extraction de l'argile et la cuisson des briques peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement.[3]

I-2-2-4 Céramiques

Ni métalliques, ni polymères, ce sont les matières premières les plus abondantes de la croûte terrestre et les matériaux les plus anciens utilisés par l'homme. Elles sont très dures, très rigides, résistent à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion. Leur principal inconvénient est la fragilité.[4]

Fabrication : elle comprend en général une mise en forme (pressage, moulage, extrusion...) suivie par un traitement thermique (cuisson ou frittage).[4]

Céramiques traditionnelles : Elles regroupent les ciments, les plâtres, les produits à base d'argile (terres cuites, faïence, porcelaine...) et les produits à base de silice (verre, cristal...) Voir la figure I.7.



Figure I.7: Produits en Céramiques [4]

Céramiques techniques : Plus récentes, elles sont soit fonctionnelles, à « usage électrique », soit structurales, à usage mécanique ou thermomécanique. [4]

Exemples : oxydes d'alumine (Al₂O₃), zircone (ZrO₂), nitrures de bore (BN) ou de silicium (Si₃N₄), carbures de silicium (SiC) ou de tungstène (WC) Voir la figure I.8.[4]

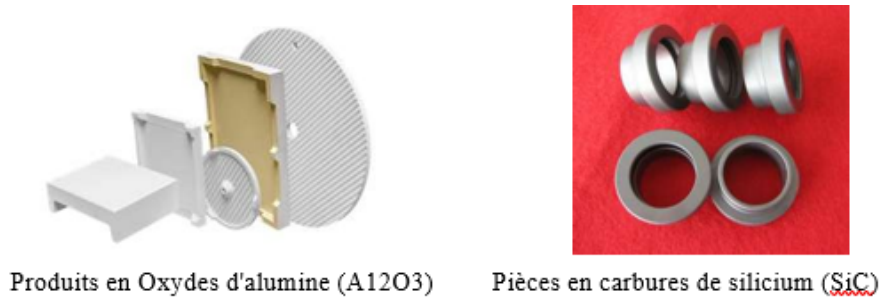


Figure I.8: Pièces céramiques en AlO et SiC [4]

Utilisations : fibres optiques (silicium), outils de coupe (carbures), abrasifs, isolants, écrans thermiques, joints d'étanchéité, laser, prothèses osseuses... [4]

I-2-3 Matériaux métalliques

Les matériaux métalliques, faisant intervenir une liaison métallique : matériaux durs, rigides et déformables plastiquement. Ce sont des métaux ou des alliages métalliques (fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte...). Les métaux et leurs alliages sont ordinairement des bons conducteurs de la chaleur, de l'électricité.[5]

I-2-3-1 Aluminium

Dans le domaine industriel, l'aluminium est le deuxième métal le plus utilisé après le fer et les aciers. Sa production à l'échelle industrielle n'a véritablement débuté qu'au début du XX^e siècle, marquant le point de départ d'une production à grande échelle.[6]

I-2-4 Matériaux polymères

Un polymère est une grande molécule organique constituée d'unités fondamentales appelées *monomères*, ou d'un motif monomère, tous reliés entre eux par des liaisons dites "covalentes". Il peut être d'origine naturelle, issu d'une modification chimique d'un polymère naturel, ou entièrement synthétisé par voie chimique à travers une réaction appelée *polymérisation*.[7]

Les polymères peuvent présenter différentes structures : ils peuvent être linéaires, ramifiés ou encore réticulés. Le plus souvent, leur structure est amorphe, bien qu'ils puissent parfois présenter une certaine cristallinité.[7]

Un polymère peut être représenté de manière schématique par un enchaînement covalent régulier, appelé **chaîne macromoléculaire** Voir la figure I.9.[7]



Figure I.9: Schématisation d'un polymère [7]

I-2-4-1 Plastiques

Le terme « plastique » décrit une grande variété de composés organiques obtenus par synthèse chimique. Produites essentiellement à partir du pétrole, les matières plastiques sont l'un des symboles du XX^e siècle. La bakélite (1909) est le plus ancien plastique entièrement synthétique.[8]

Il existe également des plastiques naturels : poix, latex, bitume, brai, résines, laques, ambre, écaille, corne, ainsi que des plastiques d'origine animale généralement extraits du lait et utilisés dans la fabrication des produits médicaux.

La matière plastique est composée principalement de polymères, qui ont la propriété de se mettre en forme facilement par moulage, extrusion, ou coulage après un chauffage modéré (100–300 °C).[8]

I-2-4-2 Composites

L'expression “matériau composite” désigne un matériau solide et hétérogène, constitué de plusieurs composants distincts dont l'association confère un ensemble de propriétés spécifiques.

La fabrication des matériaux composites repose sur la combinaison d'au moins deux composants principaux : le *renfort* et la *matrice*. Ces éléments doivent être compatibles et capables de se solidariser. Pour assurer cette cohésion, un agent de liaison, appelé *interface*, est généralement utilisé (voir Figure I.10). Des charges et des additifs peuvent également être incorporés sous forme de particules, de poudres ou de liquides, dans le but de modifier certaines propriétés du matériau obtenu, telles que la résistance aux chocs, aux rayons UV, ou encore au feu.

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels, notamment dans le domaine du génie civil. Leur emploi se généralise aujourd'hui dans presque tous les domaines technologiques, et ils sont à l'origine de nombreux défis techniques dans les réalisations de pointe. Ces matériaux permettent de mieux répondre aux exigences croissantes des utilisateurs.[9]

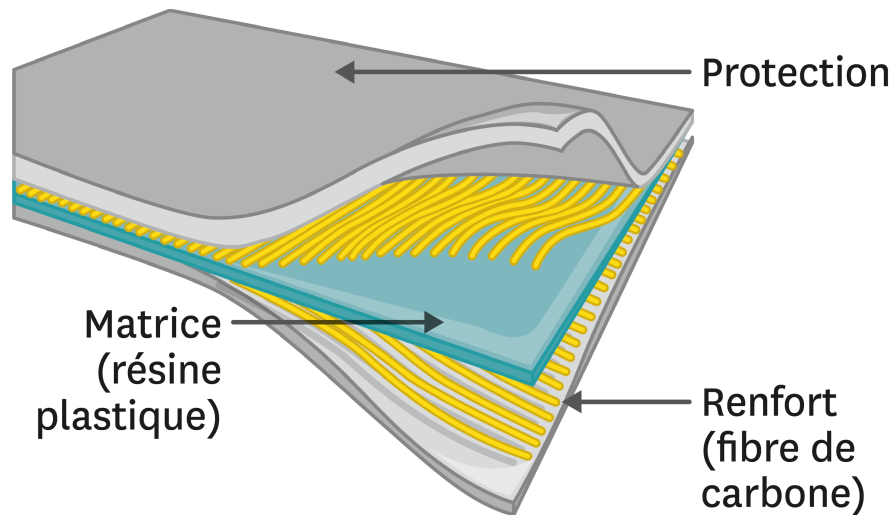


Figure I.10: Constituants d'un matériaux composites [9]

I-2-5 Matériaux isolants

Les matériaux isolants thermiques se présentent sous diverses formes et proviennent de différentes sources [10]. On distingue notamment Voir la figure I.11:

- Les isolants synthétiques : polystyrènes, polyuréthanes, mousse urée-formol, polyesters

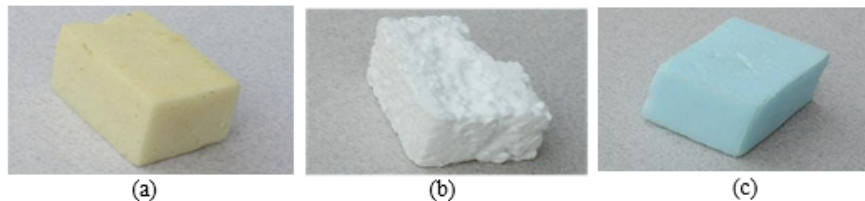


Figure I.11: Photos de quelques isolants synthétiques : polyuréthane (a), polystyrène expansé(b) et extrudé (c).[10]

- Les isolants minéraux : laines minérales, verre cellulaire, perlite et vermiculite Voir la figure I.12, argile expansée ;
- Laine de verre :Les fibres de verre présentent un excellent rapport performance/prix, ce qui les place largement au premier rang des renforts actuellement utilisés dans la construction des structures composites.[9]
- Les « isolants » réflecteurs minces ;

- Les isolants végétaux : bois feutré, fibragglos, granulats de bois minéralisé, laine de cellulose, liège expansé, chanvre, lin, « laine » de coco, « laine de coton » Voir la figure I.13, roseaux ;

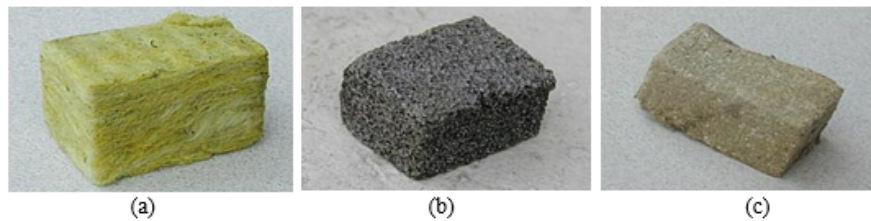


Figure I.12: Photos de quelques isolants minéraux : laine de roche (a), verre cellulaire (b) et perlite expansée (c)[10]

- Les isolants d'origine animale : laine de mouton, plumes de canard ;
- Les isolants locaux non commercialisés : copeaux et sous-productions des industries du bois, pailles diverses et résidus de récolte, « laines » potentielles, « polystyrènes verts ».[10]

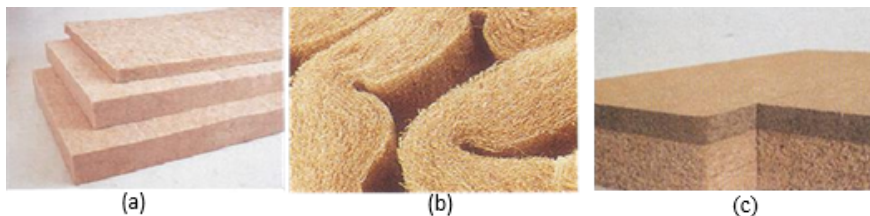


Figure I.13: Photos de quelques isolants végétaux : laine de lin (a), laine de chanvre (b) et bois feutré (c).[10]

I-2-5-2 Mousses expansées

Les mousses expansées sont des matériaux légers constitués de polymères qui sont expansés par des gaz ou des agents gonflants, créant ainsi une structure cellulaire (mousse) avec de nombreuses cavités remplies d'air. Cette structure réduit la densité du matériau et lui confère de bonnes propriétés isolantes thermiques et acoustiques.

Types de mousses expansées :

- **Polystyrène expansé (EPS)** : mousse de polystyrène utilisée principalement pour l'emballage et l'isolation.

- **Polyéthylène expansé (PEE)** : mousse de polyéthylène, flexible et résistante à l'humidité, utilisée pour le conditionnement et l'isolation.
- **Polyuréthane expansé** : mousse de polyuréthane, excellente isolation thermique et acoustique.
- **Polypropylène expansé (EPP)** : mousse de polypropylène, résistante aux chocs, utilisée dans l'ingénierie et l'industrie automobile.

I-3- Propriétés des matériaux de construction

Pour pouvoir utiliser judicieusement les matériaux de construction il est indispensable de connaître leurs propriétés. Les propriétés principales des matériaux peuvent être scindées comme suit :

I-3-1 Propriétés physiques des matériaux de construction

Les propriétés physiques sont les propriétés intrinsèques du matériau. Un matériau est constitué d'une, deux ou de trois phases de la matière. On peut trouver du solide, du liquide ou du gaz ou une combinaison des trois matières. Les matériaux courants de génie civil sont en majorité solides. Des vides peuvent exister et sont remplis soit d'un liquide (eau en général) ou d'un gaz (air en général).[12]

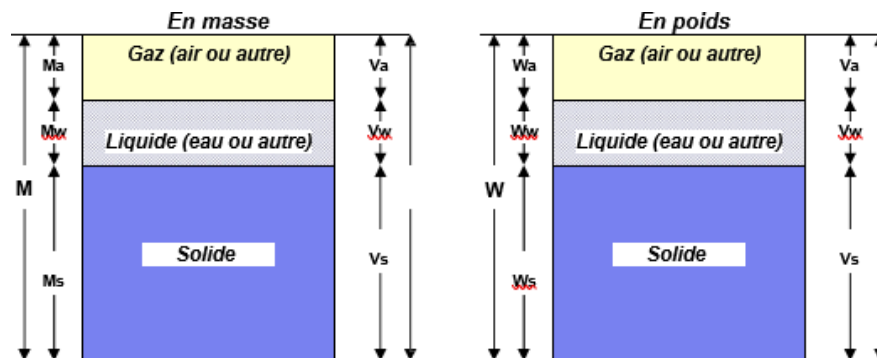


Figure I.14: Représentation des phases physiques (solide, liquide, gaz) dans un matériau [12]

I-3-1-1 Densité

La densité est le degré de remplissage de la masse d'un corps par la matière solide. Elle

est calculée par le rapport de la masse volumique de ce matériau à celle de l'eau à une température de 20°C. Elle est exprimée sans unité.

La densité relative (D) est donnée par la relation suivante :

$$D = \frac{\rho_{\text{matière}}}{\rho_{\text{eau}}}$$

où :

D : la densité relative (sans unité)

$\rho_{\text{matière}}$: la densité de la matière, donnée par :

$$\rho_{\text{matière}} = \frac{m}{V}$$

ρ_{eau} : la densité de l'eau, généralement 1000 kg/m³

I-3-1-2 Porosité

La porosité est le rapport du volume vide au volume total [12]. On peut aussi définir la porosité n comme le volume de vide par unité de volume apparent :

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (\text{I.1})$$

La compacité c est le rapport du volume des pleins au volume total :

$$c = \frac{V_s}{V} \quad (\text{I.2})$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation suivante :

$$n + c = 1 \quad (\text{ou } 100\%) \quad (\text{I.3})$$

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

$$c = \frac{V_s}{V} = \frac{V_s \cdot M_s}{M_s} = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (\text{I.4})$$

$$n = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \quad (\text{I.5})$$

ρ_s : Masse volumique des solides (masse volumique absolue ou réelle) en kg/m³

ρ : Masse volumique apparente du matériau sec en kg/m³

I-3-2 Propriétés mécaniques des matériaux de construction

Le comportement mécanique peut être considéré comme la caractéristique essentielle de la majorité des matériaux du Génie Civil. Ces matériaux sont soumis à des efforts de traction, compression, cisaillement, torsion, fatigue, [12]

Tout ensemble de forces extérieures sur un corps engendre des contraintes (normales σ ou cisaillement τ), qui provoquent des déformations.

Toute contrainte provoque la déformation puis la rupture du corps. Les lois de la mécanique des milieux continus donnent les différentes relations entre la contrainte et la déformation.[12]

3-2-1 Résistance à la compression

La résistance à la compression d'un matériau est définie comme étant la résistance maximale atteinte par le matériau durant un essai de compression selon un processus d'essai normalisé (Figure I.15).[12]

Si l'échantillon a une section S et la force maximale supportée par le matériau avant rupture étant F , alors la résistance à la compression est :

$$\sigma_c = \frac{F}{S}$$

(en MPa)

L'essai consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique à deux forces axiales opposées.

La forme de l'éprouvette, son élancement, les forces de frottement matériau/plateau influent considérablement sur le résultat.

L'essai de compression ne permet pas d'atteindre la rupture si le matériau est ductile. Cet essai est surtout utilisé pour les matériaux fragiles tels que le béton et la céramique.[12]

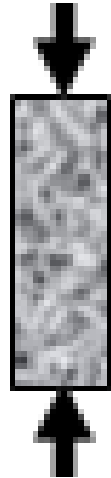


Figure I.15: la compression [12]

I-3-2-2 Traction

La résistance à la traction d'un matériau est définie comme étant la résistance maximale atteinte par le matériau durant un essai de traction selon un processus d'essai normalisé.[12]

Si l'échantillon a une section S et que la force maximale supportée par le matériau avant rupture est F , alors la résistance à la traction est donnée par :

$$\sigma_t = \frac{F}{S}$$

(en MPa)

L'essai se réalise sur des éprouvettes de différentes formes suivant la nature du matériau (Figure I.16).[12]

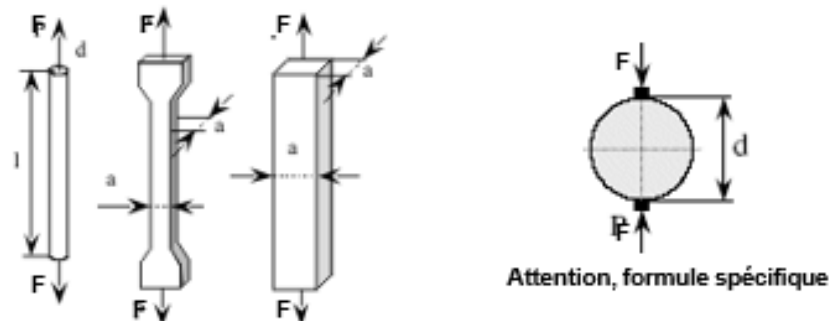


Figure I.16: différentes éprouvettes pour l'essai de traction [12]

I-3-2-3 Flexion

La résistance à la flexion est définie comme étant la résistance maximale atteinte sur la face inférieure d'une éprouvette, en général, prismatique de section (bxh) soumise à un essai de flexion trois points ou quatre points (Figure I.17:).[12]

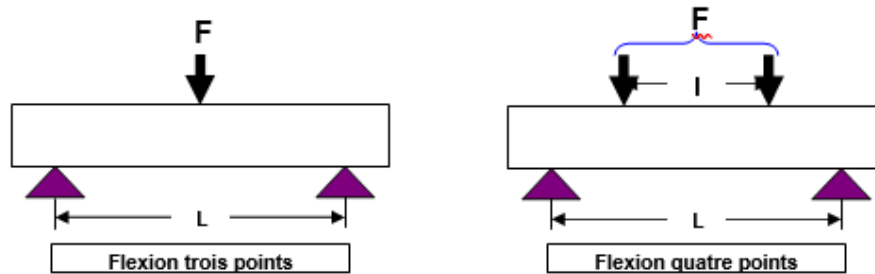


Figure I.17: Essais de flexion [12]

Pour la flexion trois points :

$$R_f = \frac{3F \cdot L}{2bh^2}$$

Pour la flexion quatre points :

$$R_f = \frac{3F \cdot (L - l)}{2bh^2}$$

Signification des symboles :

- R_f : Résistance en flexion (MPa)
- F : Charge appliquée (N)
- L : Distance entre les appuis (mm)
- l : Distance entre les deux points de chargement (mm)
- b : Largeur de l'éprouvette (mm)
- h : Hauteur (ou épaisseur) de l'éprouvette (mm)

La résistance à la traction sur certains matériaux (comme le béton) est difficile à réaliser. On réalise alors l'essai indirect de traction par flexion.

Cet essai est généralement réalisé sur des éprouvettes prismatiques en mortier ou en béton. Il est également utilisé pour les bordures de trottoir, les carreaux en céramique, les carrelages, les dalles, etc.[12]

I-3-3 Propriétés thermiques des matériaux de construction

Les propriétés thermiques des matériaux de construction jouent un rôle fondamental dans la performance énergétique des bâtiments. Elles déterminent la capacité d'un matériau à transmettre, stocker ou résister au flux de chaleur, influençant ainsi le confort thermique des occupants, la consommation énergétique et la durabilité des structures.

I-3-3-1 Conductivité thermique

La conductivité thermique, notée λ (lambda), exprime la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Elle se mesure en watts par mètre-kelvin ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$). Plus la valeur de λ est faible, plus le matériau est isolant. Par exemple :

- La laine de verre : $\lambda \approx 0,035 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$
- Le béton : $\lambda \approx 1,4 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$
- L'aluminium : $\lambda \approx 235 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$

Les matériaux isolants sont caractérisés par une très faible conductivité thermique, ce qui les rend particulièrement efficaces pour limiter les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été.

I-3-3-2 Capacité thermique massique (c)

La capacité thermique massique, exprimée en $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$, indique la quantité de chaleur qu'un kilogramme de matériau peut stocker pour augmenter sa température d'un kelvin. Les matériaux avec une grande capacité thermique, comme la terre crue ou le béton, participent à la régulation thermique des espaces en absorbant la chaleur en journée pour la restituer la nuit.

I-3-3-3 Inertie thermique

L'inertie thermique d'un bâtiment dépend fortement des propriétés thermiques des matériaux utilisés dans son enveloppe. Une forte inertie permet d'amortir les variations de température extérieure, contribuant à une meilleure stabilité thermique intérieure. Cela est particulièrement utile dans les climats à forte amplitude thermique journalière.

I-3-3-4 Effusivité et diffusivité thermiques

Effusivité thermique : Capacité d'un matériau à échanger de la chaleur avec son environnement. Elle est importante pour le confort au toucher (ex. : le carrelage paraît plus froid que le bois à température égale).

Diffusivité thermique (α) : Rapport entre la conductivité thermique et la capacité thermique volumique, donnée par la relation :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

Elle indique la vitesse à laquelle un matériau réagit aux variations de température.

I-3-3-5 Résistance thermique (R)

La résistance thermique est liée à l'épaisseur du matériau (e) et à sa conductivité thermique (λ), selon la relation :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{en } \text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$$

Elle mesure l'aptitude d'un élément de construction à s'opposer au passage de la chaleur. Plus R est élevée, meilleure est la performance thermique.

Ce tableau compare les propriétés thermiques des matériaux de construction courants.

Matériau	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Capacité thermique massique c (J/kg.K)	Densité ρ (kg/m ³)	Inertie thermique	Remarques / Applications
Laine de verre	0,030 - 0,040	≈ 840	≈ 20 - 80	Faible	Excellent isolant thermique, faible masse
Laine de roche	0,035 - 0,045	≈ 1000	≈ 100	Faible	Bonne tenue au feu, isolation acoustique
Polystyrène expansé	0,030 - 0,040	≈ 1400	≈ 15 - 30	Très faible	Léger, facile à poser, usage en ITE/ITI
Béton	1,2 - 1,8	≈ 880	≈ 2200	Élevée	Bon stockage thermique, structure
Brique pleine	0,6 - 0,9	≈ 840	≈ 1800	Élevée	Bonne inertie thermique, murs porteurs
Bois (résineux)	0,12 - 0,16	≈ 1600	≈ 500	Moyenne	Isolant naturel, structure légère
Terre crue (pisé)	0,6 - 1,0	≈ 1000	≈ 1800 - 2000	Très élevée	Construction écologique, régulation thermique
Verre	0,8 - 1,0	≈ 840	≈ 2500	Faible à moyenne	Faible isolation sauf triple vitrage

Figure I.18: comparaison entre les propriétés thermiques de matériaux de construction courants

I-3-4 Propriétés acoustiques des matériaux de construction

L'ensemble des propriétés acoustiques des matériaux de construction désigne leur aptitude à interagir avec les ondes sonores, notamment en termes d'**absorption**, de **réflexion**, d'**atténuation**

et de **diffusion**. L'isolation phonique vise à empêcher la transmission des sons d'un espace à un autre. Elle dépend principalement de la **surface**, de l'**épaisseur** et de la **masse volumique** du matériau. Selon le type de bruit – *aérien* (comme la voix) ou *d'impact* (comme les pas) – différentes solutions constructives peuvent être mises en œuvre.

L'**absorption acoustique** permet de réduire la réverbération dans les espaces clos. Elle est assurée par des matériaux poreux ou fibreux tels que la *laine de roche*, les *panneaux acoustiques* ou encore les *revêtements textiles* comme la moquette. À l'inverse, les **surfaces dures** comme le béton ou le verre provoquent une forte réflexion sonore, ce qui peut entraîner un écho ou altérer la clarté de la parole.

La **diffusion acoustique**, quant à elle, favorise une répartition homogène du son dans l'espace, évitant ainsi les concentrations d'ondes en un point précis. Elle est particulièrement importante dans les *auditoriums*, les *salles de concert* et autres *lieux publics*.

La **performance acoustique globale** dépend de plusieurs facteurs, notamment la *nature des matériaux utilisés*, leur *composition*, ainsi que leur *épaisseur* et leur *agencement dans l'espace*.

I-3-4-1 Isolation phonique

L'isolation phonique désigne l'ensemble des techniques permettant de limiter la propagation des sons entre différents espaces, qu'il s'agisse de réduire les nuisances venant de l'extérieur ou d'améliorer le confort acoustique à l'intérieur d'un bâtiment.

Elle vise à traiter deux types de bruits majeurs :

- **Les bruits aériens** : les sons qui voyagent par l'air, comme la musique, les conversations ou les bruits de circulation. Ils pénètrent facilement à travers les fenêtres, les murs mal isolés, ou d'autres interstices.
- **Les bruits d'impact** : ils résultent de chocs sur des surfaces solides, comme des pas sur un plancher, des meubles déplacés ou des objets tombant sur le sol.[13]

Contrairement à l'isolation thermique, qui se concentre sur la gestion de la température, l'isolation phonique cible les ondes sonores, qui se propagent de manière multidirectionnelle. Ces ondes peuvent être réfléchies, absorbées ou transmises selon les matériaux qu'elles rencontrent. Par exemple, une paroi rigide comme le béton reflète les sons, tandis qu'un matériau poreux comme la laine de verre les absorbe.[13]

Une bonne isolation phonique vise donc à atténuer ces phénomènes en utilisant des matériaux et des techniques adaptés, garantissant un confort optimal à la fois entre les espaces et

avec l'extérieur.[13]

I-3-5 Propriétés chimiques et de durabilité des matériaux de construction

Les propriétés chimiques des matériaux de construction jouent un rôle déterminant dans leur comportement à long terme, leur interaction avec l'environnement, ainsi que dans leur résistance à la dégradation. Comprendre ces propriétés est essentiel pour évaluer la durabilité des matériaux, un critère fondamental dans une démarche de construction durable et de cycle de vie des ouvrages.[14]

I-3-5-1 Propriétés chimiques fondamentales

Les propriétés chimiques des matériaux concernent principalement leur composition chimique, leur réactivité, leur stabilité et leur résistance aux agents chimiques (acides, bases, sels, humidité, pollution atmosphérique).[14]

1.1 Composition chimique

Chaque matériau possède une composition chimique spécifique qui conditionne ses performances. Par exemple :

- **Béton fabriqué localement** : En Algérie, le béton est généralement composé de ciments portland issus des cimenteries locales (GICA, Lafarge, etc.), de granulats naturels disponibles régionalement, et d'eau souvent dure (calcaire) dans certaines zones, ce qui peut influencer la prise et la durabilité.
- **Brique en terre cuite** : Très utilisée dans le nord du pays pour la construction traditionnelle ou moderne, cette brique est composée principalement d'argile locale cuite à haute température. Sa résistance chimique dépend du degré de cuisson et de la composition minéralogique.
- **Bloc de béton creux** : Utilisé massivement dans les logements sociaux ou collectifs, il présente une durabilité moyenne, mais peut être sensible à la carbonatation et à la pénétration d'humidité si non protégé.
- **Bois** : Les bois contiennent de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine, ce qui les rend sensibles à la biodégradation (champignons, insectes).[14]

1.2 Réactivité chimique

Certains matériaux sont plus sensibles à des agents chimiques par exemple :

- **Régions côtières (ex. : Oran, Alger) :** Présence d'air salin et d'humidité élevée qui accélèrent la corrosion des armatures métalliques dans le béton armé. Des pathologies fréquentes y sont observées (efflorescences, éclatement du béton). De nombreux bâtiments anciens à Alger, Oran ou Béjaïa présentent des pathologies dues à la carbonatation et à la corrosion (Attar & Belakhdar, 2015).[14]
- **Régions sahariennes (ex. : Ghardaïa, Tamanrasset) :** Faible humidité mais température très élevée ; le vent de sable peut éroder les surfaces exposées et la salinité des sols peut causer la dégradation des fondations si les bétons ne sont pas protégés (CNERIB, 2020).[14]
- **Régions intérieures (ex. : Sétif, Batna) :** Soumises à des cycles gel/dégel en hiver et à la chaleur sèche en été, ce qui peut provoquer la fissuration des matériaux sensibles aux variations thermiques.[14]

I-3-5-2 Durabilité des matériaux

La durabilité désigne la capacité d'un matériau à conserver ses performances dans le temps, malgré les agressions physiques, chimiques et biologiques de son environnement. Elle dépend fortement des propriétés chimiques mentionnées ci-dessus.[15]

2.1 Facteurs affectant la durabilité

Plusieurs facteurs peuvent affecter la durabilité des matériaux :

- **Milieu agressif :** atmosphères industrielles, milieux marins, sols acides ou pollués.[15]
- **Cycles humides/secs ou gel/dégel :** favorisent la fissuration et la pénétration d'agents nocifs.[15]
- **Pollution atmosphérique :** gaz acides (SO_2 , NO_x) qui attaquent les surfaces poreuses.

2.2 Exemples concrets

- **Utilisation du béton résistant aux sulfates dans le sud algérien :**

Dans les régions du Sahara où les sols sont riches en sulfates, les fondations et dallages

sont soumis à une attaque chimique. Les projets d'infrastructure (ex. : logements AADL à Ouargla ou Hassi Messaoud) utilisent des ciments CEM II ou CEM III à haute résistance aux sulfates, associés à des adjuvants pour limiter la perméabilité.[15]

- **Construction en terre crue à Ghardaïa :**

L'architecture traditionnelle mozabite utilise le pisé ou les briques de terre crue stabilisée. Ces matériaux offrent une excellente inertie thermique et une bonne résistance chimique, à condition d'être protégés des pluies (par enduit ou toiture débordante). Ce savoir-faire local est aujourd'hui redécouvert pour des projets durables et bioclimatiques.[15]

- **Bois local dans la construction traditionnelle kabyle :**

Le bois de chêne-liège ou de thuya est utilisé pour les charpentes, parfois traité naturellement (fumage, huile de lin). Toutefois, il est aujourd'hui souvent remplacé par des bois importés traités industriellement (pin traité autoclave), notamment dans les zones côtières à forte humidité.[15]

I-3-5-3 Stratégies d'amélioration de la durabilité

Pour prolonger la durée de vie des matériaux dans des conditions environnementales difficiles, plusieurs approches sont utilisées :

- **Choix judicieux du matériau** en fonction du site (bord de mer, climat humide, environnement pollué...).
- **Protection de surface** : peintures, membranes, hydrofuges.
- **Conception préventive** : limiter les remontées capillaires, faciliter l'évacuation de l'eau, renforcer l'étanchéité.
- **Contrôle qualité des matériaux** : dosages, compatibilité chimique, traitements spécifiques.[15]

I-4-Techniques de fabrication et mise en œuvre des matériaux de construction

La fabrication des matériaux de construction suit généralement un processus industriel bien défini, dépendant de la nature du matériau (minéral, métallique, organique, etc.).

a) Extraction et préparation

- Les matières premières sont extraites de carrières (argile, calcaire, sable, gypse, etc.) ou issues de matériaux recyclés.
- Elles subissent ensuite un traitement initial : concassage, criblage, lavage ou homogénéisation.

b) Formulation et mélange

- Mélange des constituants (ex. : ciment, granulats, eau pour le béton).
- Ajout éventuel d'adjuvants pour améliorer les performances (fluidifiants, retardateurs, etc.).

c) Mise en forme Selon le matériau :

- Moulage (ex. : briques, blocs béton)
- Extrusion (ex. : tuiles, briques longues)
- Laminage (ex. : métaux, plastiques)
- Pulvérisation (revêtements)

d) Traitements thermiques ou chimiques

- Cuisson (argile, céramique)
- Durcissement (béton, plâtre)
- Traitement chimique (bois, aciers galvanisés)

e) Contrôle qualité Chaque lot est testé pour vérifier ses performances mécaniques, thermiques, ou sa conformité aux normes.

I-5- Impact environnemental et durabilité des matériaux

L'impact environnemental des matériaux de construction se mesure à travers l'analyse de leur cycle de vie complet, incluant l'extraction des matières premières, la fabrication, le transport, l'usage et la fin de vie. Cette analyse permet d'évaluer des critères tels que l'empreinte carbone, la consommation d'énergie primaire, la pollution des sols et de l'eau, ainsi que la génération de déchets [11]. La durabilité des matériaux vise à prolonger leur durée de vie utile tout en minimisant leur impact sur l'environnement. Cela inclut : l'utilisation de ressources renouvelables ; la réduction des émissions de gaz à effet de serre ; la réutilisabilité et le recyclage ; une meilleure efficacité énergétique des produits finis.

I-5-1 Émissions de CO₂ et empreinte carbone des matériaux

Le secteur du bâtiment constitue l'un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre (GES), notamment de dioxyde de carbone (CO₂). Les activités quotidiennes liées à l'usage des bâtiments, telles que le chauffage et la climatisation, sont responsables d'environ 25 % des émissions totales de GES. Parmi ces usages, le chauffage demeure le plus énergivore, représentant près des deux tiers de la consommation énergétique du secteur, ce qui entraîne une part importante des émissions de CO₂. Cette situation s'explique principalement par la forte teneur en carbone des combustibles fossiles utilisés ainsi que par le mode de production de l'électricité.[16]

D'après les données fournies par l'APRUE, les émissions de GES liées à la consommation énergétique ont atteint 40 000 tonnes équivalent CO₂, soit une moyenne de 1,22 kg eq CO₂ par habitant (Figure I.19).[16]

	Consommation (ktep)	Emission GES (teq CO ₂)
Agriculture et Hydraulique	1130	1538
Industrie et BTP	3226	3881
Résidentiel et Tertiaire	7047	6312
Transport	5536	9574
Industries Energétiques	5889	18544

Figure I.19: Consommation d'énergie et émission de CO₂ en Algérie en 2005 [16]

I-5-2 Matériaux recyclables et éco-conçus

Les matériaux recyclables sont conçus pour être réutilisés à la fin de leur cycle de vie, réduisant ainsi la consommation de ressources naturelles et la quantité de déchets. Ils jouent un rôle fondamental dans l'économie circulaire. Parmi les exemples les plus courants, on trouve l'acier, l'aluminium, le verre et les granulats issus du béton concassé.

Les matériaux éco-conçus, quant à eux, sont développés selon une approche intégrée qui prend en compte leur impact environnemental dès la phase de conception. Cela inclut :

- l'utilisation de ressources locales ;
- l'emploi de matières premières renouvelables ou recyclées ;
- des procédés de fabrication à faible consommation énergétique.

Ils répondent aux exigences actuelles en matière de performance thermique, d'impact sanitaire et de recyclabilité.

I-5-3 Innovations dans les matériaux durables (bétons verts, biocomposites)

L'innovation dans le domaine des matériaux durables s'oriente vers des solutions à faible impact environnemental, sans compromettre les performances mécaniques ou thermiques.

a) Bétons verts Le béton vert est une alternative au béton traditionnel, intégrant des liants à faible émission de CO₂ comme les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux ou les géopolymères. Ces bétons permettent de réduire significativement l'empreinte carbone tout en conservant une résistance mécanique comparable. Ils sont particulièrement adaptés aux constructions à haute qualité environnementale.

b) Biocomposites Les biocomposites sont des matériaux constitués de fibres naturelles (chanvre, lin, sisal, bambou) associées à des matrices biodégradables ou biosourcées. Légers, isolants et renouvelables, ils trouvent des applications dans les panneaux de cloisonnement, l'isolation, et certains éléments structurels de bâtiments écologiques.

I-6- Applications et exemples d'utilisation

I-6-1 Exemples d'utilisation selon les types de bâtiments (maisons, infrastructures, bâtiments industriels)

a. **Maisons individuelles:** Les maisons individuelles font appel à des matériaux naturels comme le bois pour leurs qualités esthétiques, isolantes et leur impact environnemental réduit Voir la Figure I.20.



Figure I.20: Utilisation du bois dans les maisons individuelles pour ses qualités écologiques et isolantes [17]

b. **Bâtiments industriels:** Les structures métalliques, notamment en acier, sont privilégiées pour les bâtiments industriels, grâce à leur rapidité de montage et leur capacité à couvrir de grandes portées Voir la Figure I.21.



Figure I.21: Exemple de bâtiment industriel avec structure métallique en acier [18]

I-6-2 Études de cas sur des matériaux spécifiques utilisés dans des projets innovants

a. **Centre Bullitt – Seattle, USA:** Ce bâtiment est conçu avec du bois lamellé-croisé (CLT) et fonctionne entièrement à l'énergie solaire. Il illustre l'intégration de matériaux écologiques dans l'architecture moderne. Voir la Figure I.22.

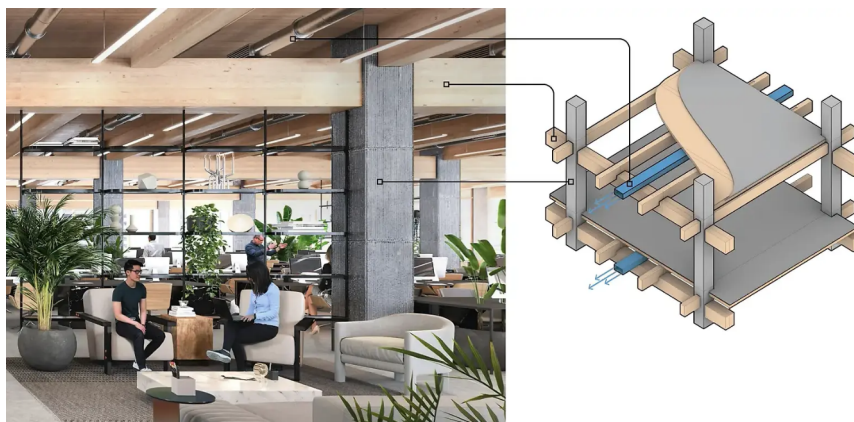


Figure I.22: Le Centre Bullitt à Seattle construit en bois lamellé-croisé (CLT) fonctionnant à l'énergie solaire [19]

b. **Maison en béton de chanvre (Hempcrete):** Le béton de chanvre est un matériau biosourcé, respirant, résistant au feu et écologique. Il est de plus en plus

utilisé dans les maisons passives et durables Voir la Figure I.23.



Figure I.23: Maison construite en béton de chanvre, un matériau écologique et respirant [20]

c. Le bois lamellé-collé dans le siège social de Swatch, Suisse: Le siège de Swatch à Bienne est un exemple emblématique d'utilisation du bois lamellé-collé à grande échelle dans une architecture moderne et durable. La structure utilise un treillis en bois très innovant, assurant à la fois robustesse et esthétique naturelle Voir la Figure I.24.



Figure I.24: Structure en bois lamellé-collé au siège social de Swatch à Bienne, Suisse [21]

d. Les briques recyclées dans le pavillon Circular Pavilion, Paris: Le Circular Pavilion, construit temporairement à Paris, a été entièrement réalisé à partir de matériaux recyclés, notamment des briques issues de démolitions. Ce projet met en avant le potentiel de l'économie circulaire dans le secteur de la construction Voir la Figure I.25.



Figure I.25: Utilisation de briques recyclées dans le Circular Pavilion à Paris [22]

e. Les panneaux isolants en chanvre dans la Maison Éco-Logis, France: Cette maison expérimentale utilise des panneaux isolants en chanvre, un matériau biosourcé aux excellentes propriétés thermiques et écologiques. Cela illustre une application pratique des matériaux naturels dans les logements basse consommation Voir la Figure I.26



Figure I.26: Panneaux isolants en chanvre utilisés dans la Maison Éco-Logis, France [23]

f. Murs végétaux (Green Walls): Les murs végétaux sont des murs recouverts de plantes vivantes, utilisés pour l'isolation thermique et acoustique et pour améliorer la qualité de l'air Voir la Figure I.27.



Figure I.27: Mur végétal à fonction isolante et décorative [24]

I-7- Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exploré les bases fondamentales relatives aux matériaux de construction, en soulignant leur rôle essentiel dans le domaine du bâtiment et des infrastructures. La compréhension de la nature et des caractéristiques de ces matériaux est indispensable pour répondre aux exigences techniques, économiques et environnementales de la construction moderne.

Nous avons tout d'abord défini les matériaux de construction et mis en évidence les critères principaux guidant leur choix, tels que la résistance, la durabilité, le coût et l'impact écologique. Ensuite, une classification détaillée a été présentée, distinguant les matériaux naturels, artificiels, métalliques, polymères et isolants, chacun ayant des applications spécifiques selon ses propriétés.

L'analyse des propriétés physiques, mécaniques, thermiques, acoustiques et chimiques a permis de mieux cerner le comportement des matériaux dans des conditions réelles d'utilisation. Par ailleurs, les techniques de fabrication et de mise en œuvre ont été abordées, mettant en lumière l'importance du processus de transformation sur les performances finales des matériaux.

Enfin, une attention particulière a été portée sur l'impact environnemental des matériaux, un enjeu majeur dans le contexte actuel de développement durable. L'émergence de matériaux éco-conçus et l'innovation dans le domaine des composites et bétons verts ouvrent de nouvelles perspectives pour une construction plus respectueuse de l'environnement.

Ce socle théorique nous prépare à aborder dans le chapitre suivant un aspect plus ciblé : la caractérisation thermique des matériaux, essentielle pour évaluer leur performance énergétique dans le bâtiment.

Chapter II

Materiels et méthodes

II.1 Introduction

Ce chapitre présente de manière détaillée les équipements et les matériaux utilisés, ainsi que les méthodologies adoptées au cours de cette étude, dans le but d'assurer la clarté et la rigueur scientifique. Une documentation précise des appareils et des techniques est essentielle pour garantir la reproductibilité de l'expérience et la vérification des résultats. La présentation systématique des procédures expérimentales et analytiques contribue à fournir un cadre scientifique solide sur lequel s'appuiera l'analyse des résultats qui seront discutés dans le chapitre III. Ainsi, ce chapitre constitue une base fondamentale de l'approche expérimentale de l'étude et participe à renforcer la transparence et la crédibilité du processus de recherche.

II.2 Description du dispositif expérimental

II.2.1 Lampe halogène

Le dispositif expérimental mis en œuvre comprend une lampe halogène de puissance 1000 W, intégrée au banc d'essai ET200 (GUNT), utilisée pour simuler le rayonnement solaire Voir la Figure II.1 , comme illustré ci-dessous :



Figure II.1: Bon d'essai ET200 (gunt).

II.2.2 Appareil DMST 1.0

On a utilisé un système d'acquisition numérique appelé DMST 1.0 (voir Figure II.2). Ce système a été développé par Dr. Mohamed Chouidira dans le cadre de sa thèse de doctorat. Il permet la mesure et le stockage des valeurs de température.

Son fonctionnement est relativement simple : les capteurs sont placés sur les briques, puis le système d'acquisition est activé pour mesurer et enregistrer automatiquement les températures toutes les minutes sur une carte mémoire microSD, sous forme de fichier Excel, ce qui facilite leur analyse ultérieure.

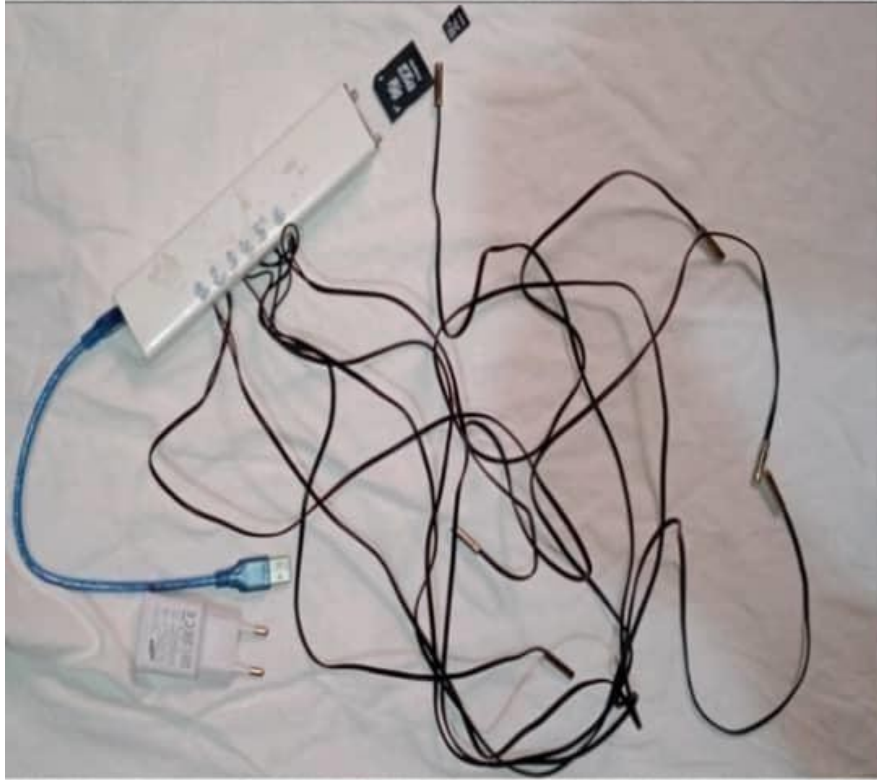


Figure II.2: Appareil DMST 1.0

II.3 Matériaux utilisés

Dans cette étude, sept briques ont été choisies arbitrairement, issues de différentes usines situées en Algérie, à savoir la brique de Biskra, la brique de BBA, la brique de Ouargla, la brique de M'Sila, la brique de Soueyeh, la brique de Sétif, et la brique de Ouled Derradj. Il est à noter que ces briques sont commercialisées sur le marché sans que leurs propriétés thermiques ne soient connues. Une brique à base d'argile et de paille, provenant d'une ancienne maison, a également été étudiée à titre comparatif.

II.3.1 La brique rouge de 10 cm

La brique rouge creuse constitue l'un des matériaux de construction les plus couramment utilisés en Algérie, notamment dans le secteur résidentiel. Elle est principalement fabriquée à partir d'argile locale, moulée et cuite à haute température, ce qui lui confère une bonne durabilité et une résistance mécanique adaptée aux exigences des constructions courantes.

Cette brique est caractérisée par sa structure creuse, composée de cavités internes ou

de perforations verticales qui réduisent sa masse volumique. Cette particularité présente plusieurs avantages, notamment une diminution du poids unitaire de la brique, une amélioration de l'isolation thermique et phonique, ainsi qu'une économie de matière première. Dans le cadre de cette étude, des briques ont été collectées dans plusieurs wilayas et régions afin de refléter la diversité de la production locale. Les briques utilisées sont illustrées à la figure II.3.



Figure II.3: Un échantillon de Brique rouge de 10cm.

II.3.2 Brique traditionnelle de Ouled Saïd Commune de Magra

La brique extraite du village de “Ouled Saïd”, situé dans la commune de Magra, wilaya de M'Sila, est un matériau traditionnellement utilisé dans la construction depuis longtemps. Il s'agit d'une brique préparée en mélangeant l'argile avec de l'eau, accompagnée de l'ajout de paille afin d'améliorer sa cohésion et ses propriétés mécaniques. Le mélange est ensuite exposé au soleil pour sécher, ce qui le rend solide et adapté à la construction rurale voir Figure II.4.

Nous avons prélevé une brique traditionnelle, qui a été soumise au même essai que les briques creuses d'usage courant.



Figure II.4: Brique traditionnelle

II.4 Procédure expérimentale

L'expérience a été réalisée en suivant les étapes suivantes :

1. Les briques ont été placées sous la lampe et isolées sur leur pourtour à l'aide de polystyrène afin d'assurer un transfert de chaleur unidirectionnel , comme illustré ci-dessous :

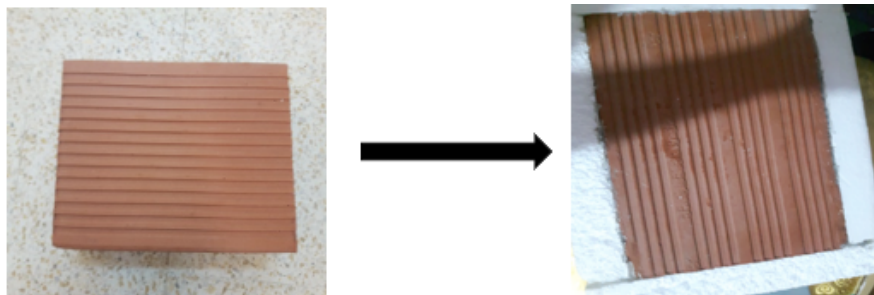


Figure II.5: Un échantillon avec du polystyrène.

2. Trois capteurs de température ont été installés sur la surface exposée aux rayons lumineux, et trois autres capteurs sur le côté opposé, comme illustré ci-dessous :

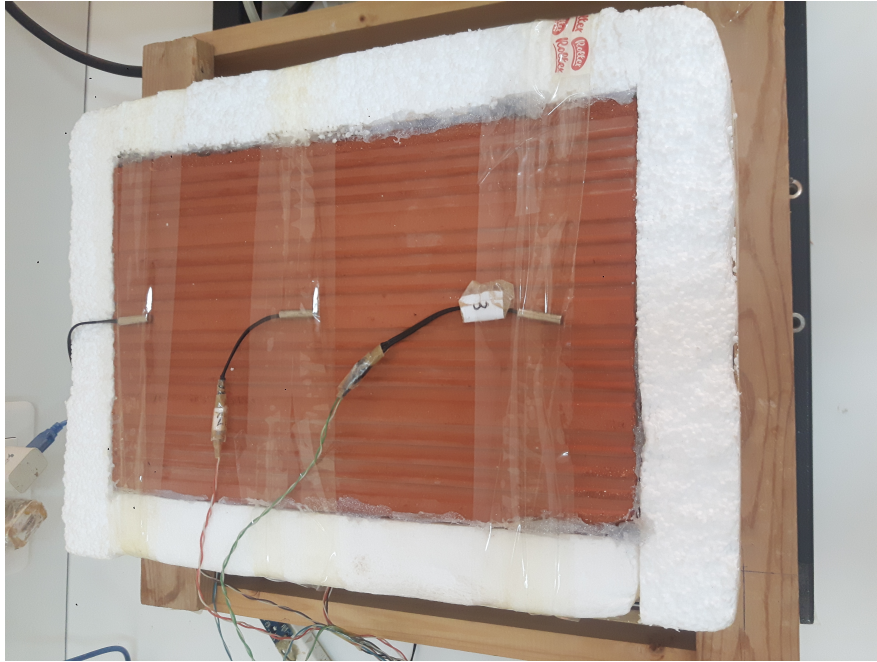


Figure II.6: Un échantillon avec du polystyrène et des capteurs de température.

3. L'échantillon a été placé sous la lampe pendant une durée totale de sept heures, divisée en trois étapes comme suit :
- **Première étape** : Le dispositif DMST1.0 est d'abord allumé pour mesurer et enregistrer les températures pendant 15 minutes, sans activer la lampe, afin d'obtenir une température ambiante stable.
 - **Deuxième étape** : La lampe est allumée pendant 5 heures pour atteindre la stabilité thermique (saturation de l'échantillon).
 - **Troisième étape** : La lampe est éteinte, tandis que le dispositif d'acquisition reste allumé tout au long de la phase de refroidissement de la brique, pendant deux (02) heures après l'extinction de la lampe. Cette étape n'a pas été analysée dans le cadre de ce mémoire.

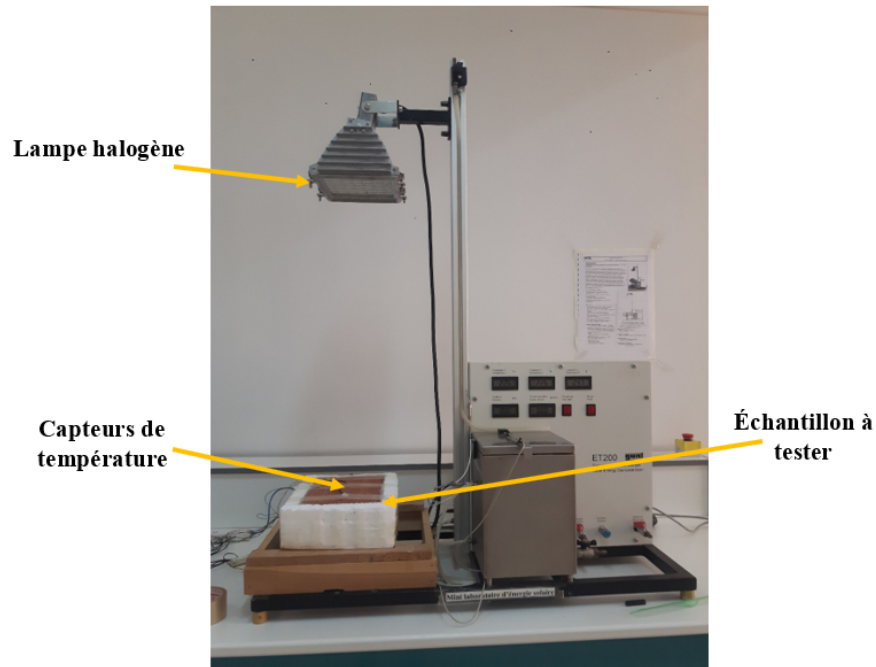


Figure II.7: Dispositif et procédure expérimentale

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les outils et les méthodes utilisés pour mener notre étude, en présentant les équipements nécessaires à la collecte et à l'analyse des données relatives au comportement thermique. Par ailleurs, le protocole expérimental adopté au cours de cette étude a également été présenté.

Chapter III

Résultats et discussion

III.1 Introduction

À travers ce chapitre, on va analyser le comportement thermique des deux faces – exposée et non exposée – au rayonnement d’une lampe de 1000 W, pour différentes briques utilisées dans la construction, sans connaissance préalable de leurs propriétés thermiques. Ces propriétés jouent un rôle important dans l’efficacité énergétique des bâtiments, souvent pointés du doigt comme étant de grands consommateurs d’énergie. L’étude vise également à comparer ces briques en termes de réponse thermique afin d’identifier ceux offrant les meilleures performances dans un contexte de construction durable.

III.2 Analyse du comportement thermique de la face exposée au rayonnement

Rappelons que les briques creuses testées ont toutes les mêmes dimensions ($10 \times 20 \times 30$ cm³) et comportent 8 trous. Elles sont vendues au même prix, mais proviennent de différentes usines de fabrication de briques, à savoir : la brique de Biskra, la brique de BBA, la brique de Ouargla, la brique de M’Sila, la brique de Soueyeh, la brique de Sétif, et la brique de Ouled Derradj.

La Figure III.1 présente la réponse thermique, correspondant à l’évolution de la température moyenne de la face exposée au rayonnement pendant 5 heures, pour les différentes briques testées. D’après cette figure, les faces supérieures des sept (07) briques ont un comportement thermique identique sous l’effet du rayonnement de la lampe, montrant des mécanismes de transfert de chaleur comparables. L’évolution de la température se déroule en trois phases distinctes, liées à l’équilibre dynamique entre l’énergie absorbée et les différentes formes de pertes thermiques.

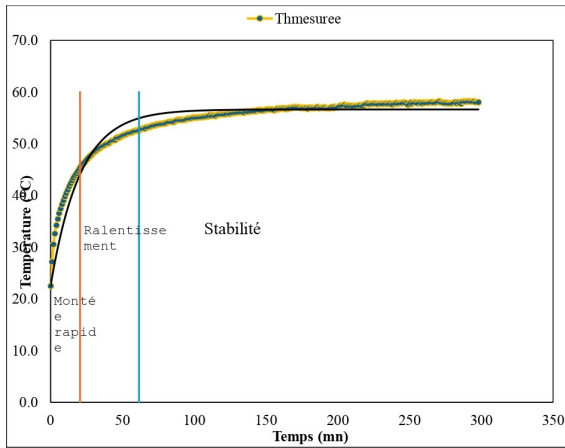
Dans une première phase, immédiatement après le début de l’exposition, la température de la face exposée augmente rapidement. Cette montée rapide s’explique par une absorption nette de chaleur : la puissance radiative incidente est largement supérieure aux pertes thermiques (conductive, convective et radiative), qui sont alors négligeables. Le flux thermique absorbé par la surface est utilisé principalement pour élever sa température.

Dans une deuxième phase, à mesure que la température de la face supérieure augmente, les pertes thermiques par convection naturelle vers l’air ambiant et par rayonnement thermique deviennent importantes. Simultanément, une partie de la chaleur est transférée par conduction à l’intérieur de la brique, ce qui freine la montée de température à sa surface.

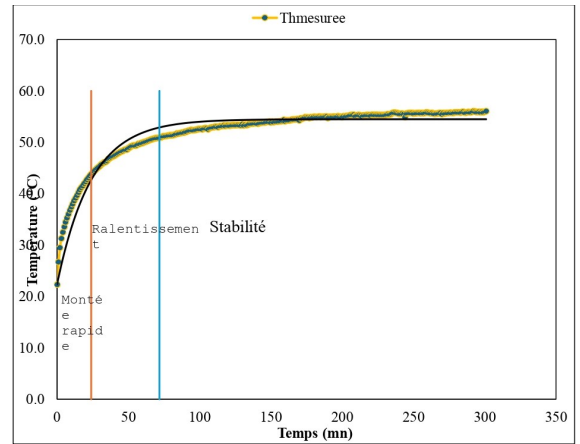
Le bilan thermique se réduit alors progressivement : la différence entre l'apport énergétique et les pertes diminue, ce qui se traduit par une atténuation de la pente de la courbe de température.

Enfin, dans la troisième phase, un état quasi stationnaire est atteint : les flux sortants (convection, rayonnement, conduction interne) deviennent équivalents au flux incident absorbé. À ce stade, la température de la face exposée se stabilise, car le système atteint un équilibre thermique dynamique. La brique ne continue plus à s'échauffer, car toute l'énergie reçue est immédiatement dissipée.

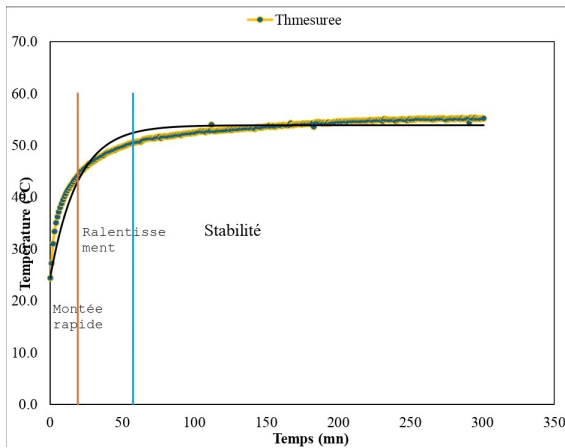
Ce comportement, observé de manière similaire pour toutes les briques, montre que les matériaux étudiés ont une réponse thermique comparable dans les conditions d'irradiation imposées. Toutefois, la durée des différentes phases (montée rapide, ralentissement et stabilisation) varie d'une brique à l'autre, ce qui peut s'expliquer par des différences de propriétés thermo-physiques telles que la conductivité thermique, la capacité thermique, etc.



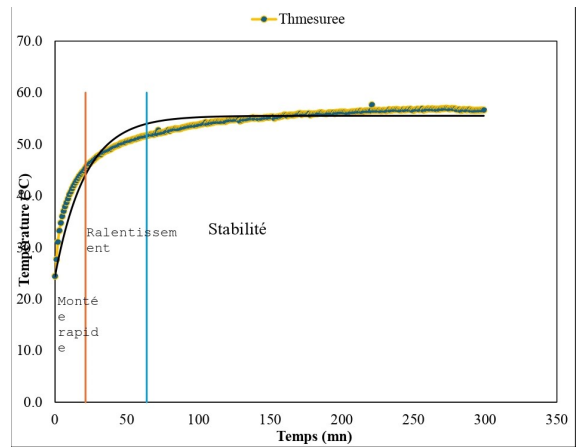
(a) Brique BBA



(b) Brique Sétif

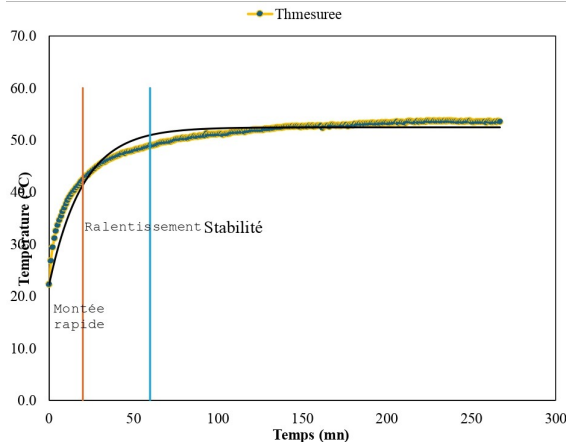


(c) Brique Soueyeh

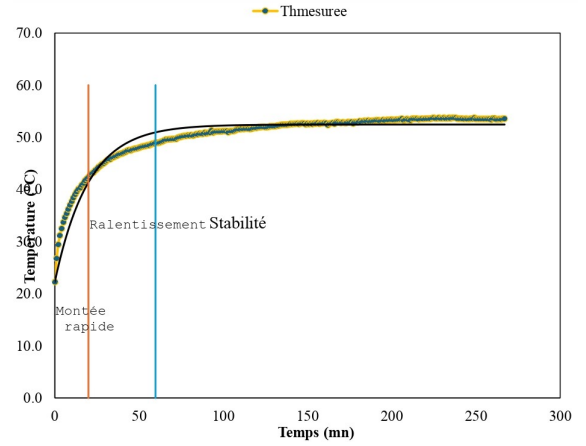


(d) Brique Ouargla

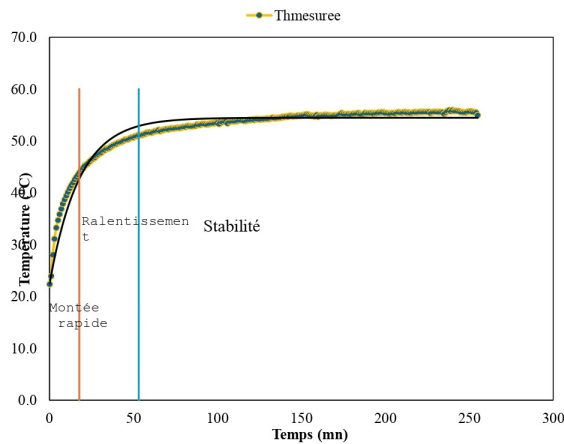
Figure III.1: (a) à (d) : Évolution de la température moyenne de la face exposée au rayonnement pour les différentes briques testées (partie 1).



(e) Brique M'Sila



(f) Brique Ouled Derradj



(g) Brique Biskra

Figure III.2: (e) à (g) : Évolution de la température moyenne de la face exposée au rayonnement pour les différentes briques testées (partie 2).

En outre, la modélisation du comportement thermique des faces supérieures des briques testées montre que leur température suit une évolution exponentielle de la forme :

$$T(t) = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_0)e^{-t/\tau} \quad (\text{III.1})$$

Où :

- $T(t)$ est la température à l'instant t ,
- T_{∞} est la température à l'équilibre thermique ou maximale,
- T_0 est la température à l'instant initial,

- τ est la constante de temps liée à la diffusivité thermique et aux propriétés thermo-physiques du matériau.

De plus, la constante de temps τ caractérise la vitesse de réponse thermique de la brique, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle la température de sa surface s'approche de sa valeur d'équilibre T_∞ . Plus précisément, un faible τ montre que la brique réagit rapidement à l'apport de chaleur, atteignant son régime stationnaire en peu de temps. À l'inverse, un τ élevé indique une réponse thermique plus lente, la brique nécessitant plus de temps pour se réchauffer et parvenir à l'équilibre thermique. Ainsi, la constante τ permet de comparer la capacité des briques à absorber et diffuser la chaleur dans le temps.

Le Tableau III-1 regroupe les valeurs des paramètres clés relatifs à la modélisation de la réponse des surfaces supérieures des sept (07) briques au rayonnement de la lampe.

D'après la Figure III.1 et le Tableau III-1, le modèle exponentiel s'ajuste bien aux données expérimentales puisque les coefficients de détermination R^2 pour toutes les briques sont supérieurs à 0,92. En outre, les valeurs de la constante de temps τ varient entre 17,71 min (brique de Biskra) et 23,99 min (brique de Sétif), indiquant une variabilité dans la vitesse de réponse thermique entre les différentes briques testées. Ces différences peuvent être attribuées à des variations dans les propriétés thermo-physiques des sept briques qui influencent la manière dont chaque brique réagit au même flux thermique incident.

Type de brique	Modèle mathématique ajusté
Brique Soueyeh	$T(t) = 53,87 - 29,47 e^{-t/19,19} \quad R^2 = 0,924$
Brique M'Sila	$T(t) = 56,69 - 33,39 e^{-t/20,33} \quad R^2 = 0,933$
Brique Ouargla	$T(t) = 55,51 - 31,11 e^{-t/21,30} \quad R^2 = 0,928$
Brique BBA	$T(t) = 56,64 - 34,14 e^{-t/20,52} \quad R^2 = 0,938$
Brique Biskra	$T(t) = 54,48 - 32,08 e^{-t/17,71} \quad R^2 = 0,951$
Brique Ouled Derradj	$T(t) = 52,45 - 31,45 e^{-t/19,87} \quad R^2 = 0,946$
Brique Sétif	$T(t) = 54,51 - 32,21 e^{-t/23,99} \quad R^2 = 0,924$

Table III.1: Modèles mathématiques de l'évolution de la température de la face exposée au rayonnement pour les briques testées.

Par ailleurs, on constate que la brique de Sétif met le plus de temps pour s'échauffer (23,99 min) à l'inverse de celle de Biskra qui s'échauffe en temps record (17,71 min).

En analysant l'écart de température enregistré sur la surface exposée au rayonnement de la lampe — représenté par le coefficient de la fonction exponentielle — on constate que

la brique de BBA présente l'écart le plus élevé (34,14 °C), tandis que la brique de Soueyeh affiche l'écart le plus faible (29,47 °C). Cette différence témoigne de la capacité variable des matériaux à stocker la chaleur au niveau des surfaces. On peut en déduire que la brique de Soueyeh permet à la chaleur de se diffuser plus facilement vers l'intérieur, alors que la brique de BBA tend à la retenir en surface.

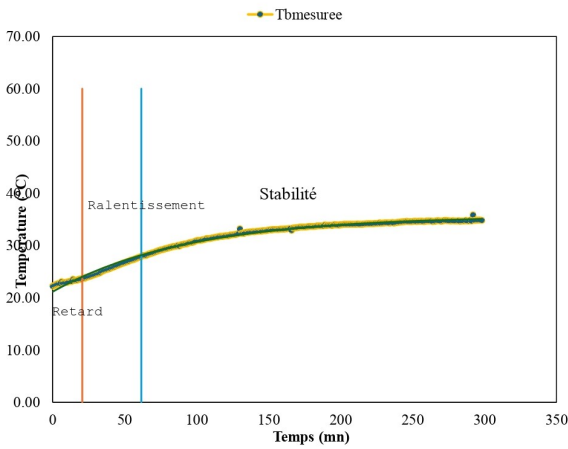
III.3 Analyse du comportement thermique de la face non exposée au rayonnement

La Figure III.2 illustre l'évolution de la température moyenne de la face inférieure (non exposée au rayonnement) de la brique creuse durant une période d'essai de cinq (05) heures. On observe que le changement de température sur cette face s'effectue de manière progressive et nettement plus lente que sur la face exposée, suivant une courbe croissante de forme exponentielle. Ce comportement indique que le transfert thermique s'opère principalement par conduction à travers la masse argileuse de la brique.

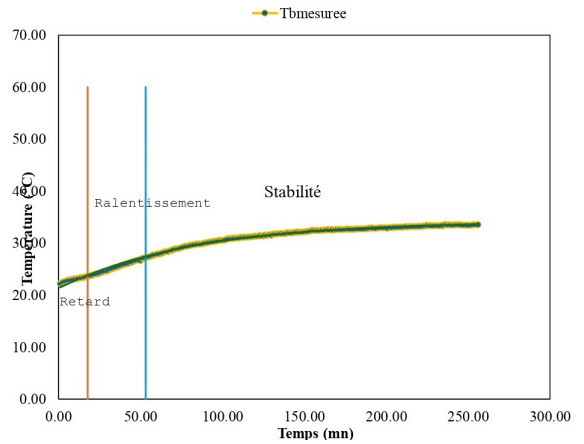
L'analyse de cette évolution révèle à nouveau trois phases thermiques distinctes, à savoir :

- **La phase initiale (retard thermique) :** Au début de l'exposition, la température de la face inférieure reste relativement basse, alors que la face supérieure se réchauffe rapidement. Cela s'explique par l'inertie thermique du matériau : la chaleur absorbée met du temps à traverser la brique, en raison de sa capacité à stocker temporairement l'énergie thermique sans la transmettre immédiatement. Cette phase est déterminante pour évaluer l'efficacité thermique des matériaux isolants.
- **La phase de montée régulière :** Une fois un certain seuil thermique dépassé, la température de la face non exposée commence à augmenter de façon plus continue. Ce phénomène reflète l'activation du transfert thermique interne par conduction. Les propriétés thermo-physiques du matériau — telles que la conductivité thermique, la densité et la capacité thermique spécifique — déterminent la vitesse de cette montée. Une conductivité plus faible signifie un transfert plus lent, ce qui est souhaitable pour les performances isolantes.
- **La phase d'équilibre thermique (quasi-stationnaire) :** Vers la fin de l'essai, la température atteint une valeur presque constante, traduisant un état de quasi-équilibre

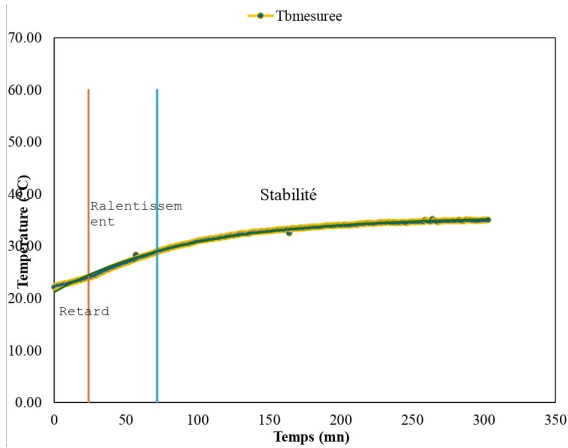
thermique. À ce stade, le flux de chaleur entrant dans le matériau devient quasiment égal à celui sortant, et le gradient thermique se stabilise.



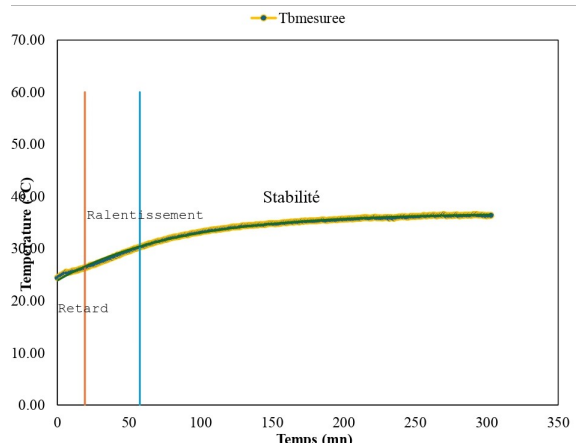
(a) Brique BBA



(b) Brique Biskra

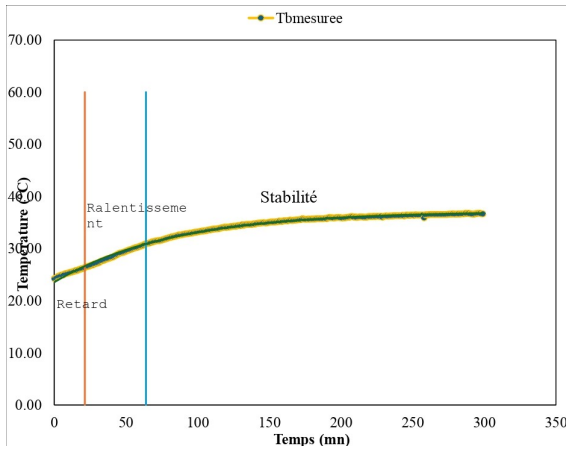


(c) Brique Sétif

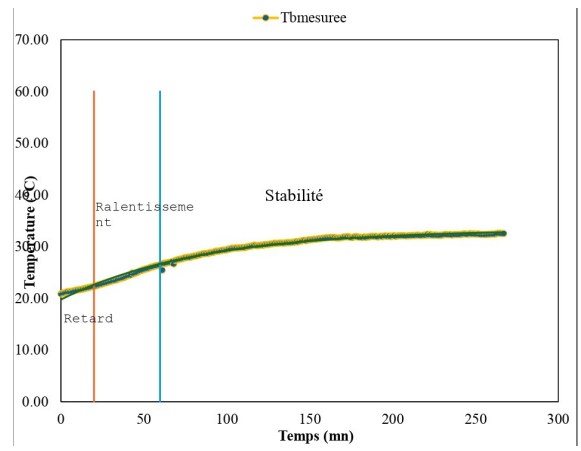


(d) Brique Soueyeh

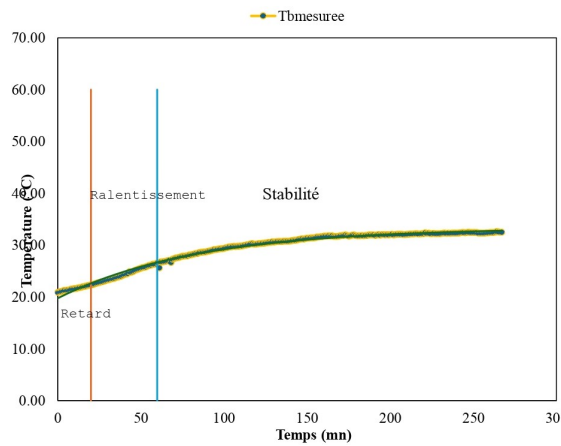
Figure III.3: (a) à (d) : Évolution de la température moyenne de la face non exposée au rayonnement pour les différentes briques testées (partie 1).



(e) Brique Ouargla



(f) Brique Ouled Derradj



(g) Brique M'Sila

Figure III.4: (e) à (g) : Évolution de la température moyenne de la face non exposée au rayonnement pour les différentes briques testées (partie 2).

Cela marque la fin du processus dynamique de propagation de chaleur à travers le matériau, soulignant sa capacité à atteindre une stabilité thermique après une longue exposition.

De ce qui précède, il est à retenir que l'évolution de la température au niveau de la face non exposée des briques testées suit une tendance similaire pour l'ensemble des échantillons. On observe une montée progressive de la température avec le temps, traduisant un transfert de chaleur depuis la face exposée vers l'intérieur de la brique, puis vers la face opposée. La forme générale des courbes indique une réponse thermique de type exponentiel croissant, jusqu'à l'atteinte d'un régime quasi-stationnaire après environ 246 à 280 minutes, selon le type de brique. Cette tendance confirme la nature conducto-diffusive du transfert thermique

dans les briques.

Comme mentionné précédemment, l'évolution de la température de la face non exposée au rayonnement a été modélisée par un modèle exponentiel de la forme :

$$T(t) = T_{\infty} - Ae^{\frac{-t}{\tau'}} \quad (\text{III.2})$$

Où :

- $T(t)$ est la température à l'instant t ,
- T_{∞} est la température à l'équilibre thermique ou maximale,
- A est une constante liée à l'amplitude de la variation thermique,
- τ' est la constante de temps ou temps de réponse thermique, exprimant la rapidité du transfert thermique interne.

De plus, une valeur élevée de τ' signifie une meilleure résistance thermique et un retard plus important dans la propagation de la chaleur. Donc, ce paramètre est un indicateur direct de l'inertie thermique du matériau, essentiel pour évaluer sa qualité isolante.

Le Tableau III-2 regroupe les valeurs des paramètres clés relatifs à la modélisation de la réponse des surfaces non exposées au rayonnement de la lampe des sept (07) briques étudiées.

Type de brique	Modèle mathématique ajusté
Brique Soueyeh	$T(t) = 36,84 - 12,97 e^{-t/81,99} \quad R^2 = 0,997$
Brique M'Sila	$T(t) = 36,27 - 14,04 e^{-t/86,48} \quad R^2 = 0,995$
Brique Ouargla	$T(t) = 37,15 - 13,61 e^{-t/82,56} \quad R^2 = 0,997$
Brique BBA	$T(t) = 35,64 - 14,51 e^{-t/93,20} \quad R^2 = 0,994$
Brique Biskra	$T(t) = 34,24 - 12,76 e^{-t/82,69} \quad R^2 = 0,995$
Brique Ouled Derradj	$T(t) = 33,33 - 13,68 e^{-t/84,20} \quad R^2 = 0,993$
Brique Sétif	$T(t) = 35,74 - 14,57 e^{-t/93,26} \quad R^2 = 0,996$

Table III.2: Modèles mathématiques de l'évolution de la température de la face non exposée au rayonnement pour les briques testées.

D'après la Figure III.2 et le Tableau III-2, le modèle exponentiel s'ajuste bien aux données expérimentales puisque les coefficients de détermination R^2 pour toutes les briques sont supérieurs à 0,99. En outre, les valeurs de la constante de temps τ' varient entre 81,99 min (brique de Soueyeh) et 93,26 min (brique de Sétif), indiquant une variabilité dans la

vitesse de réponse thermique entre les différentes briques testées. Ces différences peuvent être attribuées à des variations dans les propriétés thermo-physiques des sept briques qui influencent la manière dont chaque brique diffuse la chaleur.

De plus, on constate d'après le Tableau III-2 que les briques de Sétif et BBA se démarquent par les valeurs les plus élevées de τ' , ce qui indique une diffusion plus lente de la chaleur. Elles présentent donc un comportement plus isolant, adapté aux environnements nécessitant un bon contrôle thermique. En revanche, la brique de Soueyeh affiche la valeur la plus faible de τ' , ce qui suggère qu'elle transmet la chaleur plus rapidement. Cela peut être dû à une conductivité thermique plus élevée, une porosité plus faible ou une densité plus élevée.

Quant au reste des briques (M'Sila, Ouargla, Biskra, Ouled Derradj), elles montrent des performances intermédiaires. Les différences enregistrées entre les briques peuvent provenir de la nature des matières premières utilisées, des méthodes de fabrication ou des traitements thermiques subis.

III.4 Analyse de l'écart de température en régime permanent des différentes briques

À la fin de la phase de chauffage (après 5 heures), on a analysé l'écart moyen entre la température de la face exposée au rayonnement (T_{sup}) et celle de la face non exposée (T_{inf}), pendant la dernière heure de l'expérience. Cet écart de température (ΔT) permet d'évaluer la manière dont la chaleur se propage à travers chaque type de brique, dans un régime thermique permanent. En effet, sous l'effet du rayonnement émis par la lampe, les faces supérieures des briques s'échauffent, et une partie de cette chaleur absorbée est transmise à la face opposée par conduction. Celle-ci voit alors sa température augmenter à son tour, avec un certain retard temporel dû à l'inertie thermique du matériau.

L'écart ΔT ainsi observé traduit la réponse thermique globale de la brique. Il dépend de plusieurs propriétés physiques intrinsèques de celle-ci, notamment :

- la conductivité thermique (λ), qui mesure la capacité de la brique à conduire la chaleur ;
- la capacité thermique massique (c), qui reflète la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température d'un kilogramme de la brique d'un degré Celsius ;
- la masse volumique (ρ), qui influence l'inertie thermique ;

- et l'épaisseur de la brique (e), qui détermine la distance de propagation de la chaleur.

Sur la Figure III.3, on a porté les résultats obtenus relatifs à l'écart de température.

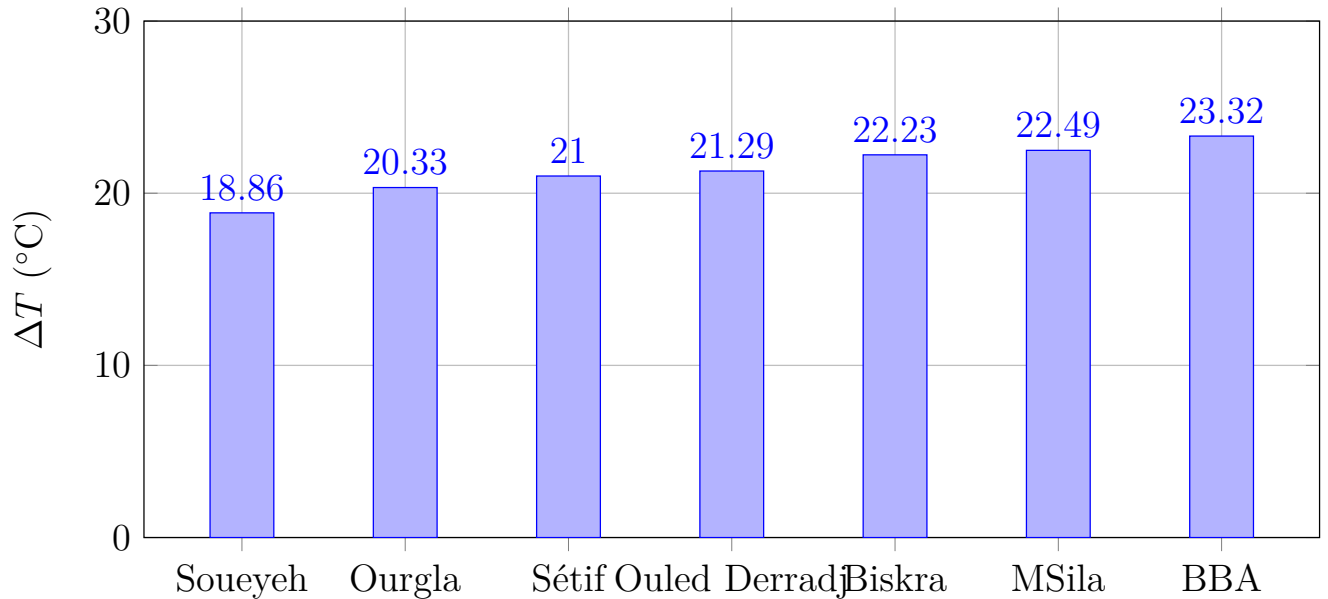


Figure III.5: **Écart de température (ΔT) en régime permanent pour chaque type de brique (ordre croissant)**

Cependant, la seule mesure de l'écart de température ne permet pas, à elle seule, de tirer des conclusions précises sur les propriétés thermiques du matériau. En l'absence de données sur la masse volumique, la capacité thermique, la quantité de chaleur absorbée ou transmise, et sans modélisation plus approfondie, l'écart ΔT ne constitue qu'un indicateur qualitatif. Il peut néanmoins être utilisé pour une comparaison relative entre différents types de briques testées dans des conditions strictement identiques, afin d'identifier celles qui présentent un comportement thermique plus ou moins favorable.

Il ressort des résultats présentés dans la Figure III.3 que la brique de Soueyeh présente l'écart de température le plus faible, avec une valeur de 18,86 °C. Cela signifie que la chaleur a rapidement traversé la brique pour atteindre la face opposée, traduisant ainsi une faible performance isolante par rapport aux autres briques testées. À l'inverse, la brique de BBA présente l'écart de température le plus élevé, estimé à 23,32 °C, ce qui indique que la chaleur a été moins transmise vers la face non exposée. Cela traduit une meilleure capacité isolante par rapport aux autres briques testées, le flux thermique ayant été partiellement atténué ou retardé lors de sa traversée du matériau.

De plus, les briques de M'Sila (22,49 °C) et de Biskra (22,23 °C) présentent également des écarts relativement élevés, traduisant des performances isolantes satisfaisantes, quoique légèrement inférieures à celle de la brique de BBA. Les briques de Ouled Derradj (21,29 °C) et de Sétif (21,00 °C) affichent des valeurs très proches, indiquant des comportements thermiques similaires et une capacité isolante intermédiaire. Ces deux briques montrent un certain potentiel en matière d'isolation, bien qu'elles soient un peu moins performantes que M'Sila et Biskra. Enfin, la brique d'Ouargla, avec un écart de 20,33 °C, affiche une performance thermique inférieure à celles des briques précédemment citées, mais reste plus isolante que celle de Soueyeh.

L'analyse de l'écart de température en régime permanent permet d'évaluer les performances thermiques des briques étudiées. Elle met en évidence des différences significatives entre les briques testées. Les briques de BBA, M'Sila et Biskra présentent une résistance élevée au transfert thermique par conduction, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications nécessitant une bonne isolation. À l'inverse, la brique de Soueyeh, qui affiche la valeur de ΔT la plus faible, se distingue par une capacité isolante moins efficace.

III.5 Analyse comparative des briques selon les propriétés étudiées

Toutes les briques, dont le pourtour a été isolé, ont été exposées au même flux thermique sous forme de rayonnement émis par une lampe de 1000 W. L'analyse du temps de réponse de la face supérieure révèle que la brique de Biskra chauffe plus rapidement que les autres, suivie des briques de Soueyeh et Ouled Derradj. À l'inverse, la brique de Sétif présente la montée en température la plus lente. Les briques de BBA et M'Sila affichent un comportement thermique modéré, avec une vitesse de chauffe légèrement inférieure à celle de la brique d'Ouargla.

Les résultats montrent que la brique de BBA présente le plus grand écart de température entre les deux faces ($\Delta T = 23,32^\circ\text{C}$) et un temps de réponse de la face non exposée de 93,20 min. Cette combinaison traduit une excellente performance isolante : la chaleur met du temps à traverser la brique et la face opposée reste relativement froide pendant toute la durée de l'essai. Des performances similaires sont observées pour les briques de M'Sila ($\Delta T = 22,49^\circ\text{C}$; $\tau' = 86,48$ min) et de Biskra ($\Delta T = 22,23^\circ\text{C}$; $\tau' = 82,69$ min), bien que légèrement inférieures à celles de BBA.

La brique de Sétif constitue un cas particulier. Elle présente le temps de réponse le

plus long pour la face non exposée (93,26 minutes), ce qui indique une inertie thermique importante. Toutefois, l'écart de température ($\Delta T = 21,00\text{ }^{\circ}\text{C}$) reste modéré, suggérant que, bien que la chaleur traverse lentement la brique, elle finit par s'y diffuser plus efficacement qu'avec les briques de BBA ou M'Sila.

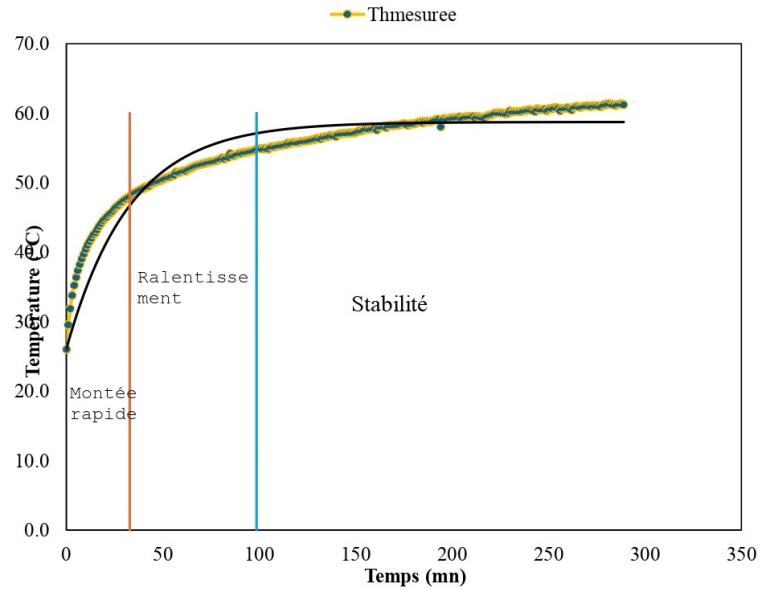
Les briques de Ouled Derradj ($\Delta T = 21,29\text{ }^{\circ}\text{C}$) et d'Ouargla ($\Delta T = 20,33\text{ }^{\circ}\text{C}$) affichent des performances intermédiaires, avec des temps de réponse de 84,20 et 82,56 min respectivement. Enfin, la brique de Soueyeh se distingue par l'écart de température le plus faible ($\Delta T = 18,86\text{ }^{\circ}\text{C}$) et le temps de réponse le plus court (81,99 min), ce qui traduit une faible capacité isolante : la chaleur y traverse rapidement la brique.

Cette étude, portant sur l'analyse de la réponse thermique de briques couramment utilisées en construction et soumises à un même flux thermique, met en évidence des différences notables dans leur comportement. Bien qu'elles soient vendues au même prix, aucune étiquette énergétique ne renseigne sur leurs performances, qui jouent pourtant un rôle crucial dans la consommation énergétique des bâtiments. En outre, l'étude exposée précédemment a permis de comparer les performances des différentes briques, sans toutefois en déterminer les propriétés thermiques ; cette analyse sera conduite ultérieurement.

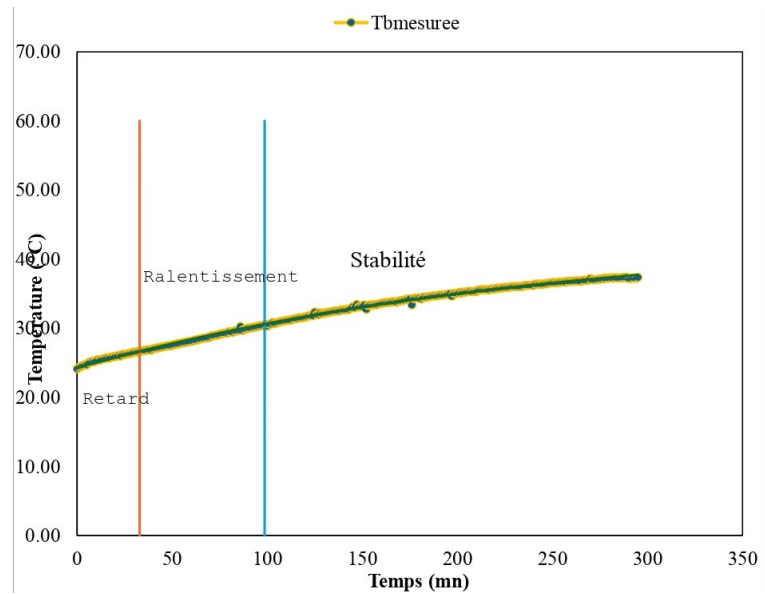
III.6 Analyse du comportement thermique de la brique traditionnelle

La Figure III.4 présente la réponse thermique de la brique traditionnelle, correspondant à l'évolution de la température moyenne des faces exposée et non exposée au rayonnement pendant 5 heures. D'après cette figure, la forme de la réponse thermique est similaire à celle des briques creuses testées, mais avec des temps de réponse plus élevés. Ces temps de réponse élevés signifient que la température met plus de temps à augmenter sur la face exposée au rayonnement, tout comme elle met plus de temps à se transmettre à la face opposée. Ce comportement thermique indique une plus grande inertie thermique de la brique traditionnelle, ainsi qu'une conductivité thermique relativement plus faible. Autrement dit, la brique traditionnelle absorbe et transmet la chaleur plus lentement, ce qui lui permet de jouer le rôle de régulateur thermique.

Comparativement, les briques creuses utilisées couramment atteignent plus rapidement des températures élevées, traduisant une réponse thermique plus rapide, mais une moindre capacité à freiner les transferts de chaleur. Cela peut conduire à des surchauffes plus rapides en été, en particulier dans les zones chaudes. Ainsi, la brique traditionnelle, bien que moins



(a) Face supérieure



(b) Face inférieure

Figure III.6: Réponse thermique de la brique traditionnelle

utilisée aujourd'hui, pourrait offrir un meilleur confort thermique intérieur en période estivale, grâce à sa capacité à retarder et atténuer les variations de température, et ainsi contribuer à la réduction des besoins en climatisation.

Par ailleurs, la brique traditionnelle enregistre un écart de température plus important entre la face exposée et la face non exposée au rayonnement, comparativement aux briques creuses. Cela signifie qu'elle freine plus efficacement la propagation de la chaleur à travers son

épaisseur, qui est de 12.5 cm. Ce phénomène renforce l'idée que la brique traditionnelle constitue une barrière thermique plus performante, capable de limiter les transferts thermiques vers l'intérieur du bâtiment, ce qui est particulièrement avantageux en climat chaud.

Conclusion

Les briques de Biskra, BBA, Ouargla, M'Sila, Soueyeh, Sétif, et la brique de Ouled Derradj, dont le pourtour a été isolé, ont été exposées au même flux thermique sous forme de rayonnement émis par une lampe de 1000 W. Sur la base de toutes les analyses thermiques faites, la brique de BBA apparaît comme le meilleur choix en termes de performance thermique globale. Elle possède la plus grande différence de température en régime permanent, offrant une excellente isolation thermique. De plus, la constante de temps élevée sur la face non exposée indique une bonne capacité à retarder le transfert thermique interne. Par ailleurs, sa réponse thermique sur la face exposée est modérée, ce qui assure un bon équilibre entre absorption et retard thermique.

La brique de M'Sila vient en deuxième position avec des caractéristiques proches, tandis que la brique Soueyeh montre la performance la plus faible, notamment à cause d'un faible écart de température et d'une capacité limitée à retarder le transfert de chaleur. Ainsi, pour une utilisation dans la construction où la performance thermique est cruciale, il est recommandé d'utiliser la brique BBA afin d'assurer un meilleur confort thermique et une efficacité énergétique accrue.

Les résultats expérimentaux mettent en évidence les performances thermiques intéressantes de la brique traditionnelle par rapport aux briques creuses d'usage courant. Son temps de réponse plus élevé et l'écart de température plus important entre ses deux faces témoignent d'une capacité supérieure à retarder et atténuer les transferts de chaleur à travers son épaisseur. Cette inertie thermique plus marquée contribue à limiter les variations de température à l'intérieur des bâtiments, notamment en période estivale, réduisant ainsi les besoins en climatisation.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons mené une étude expérimentale visant à évaluer les performances thermiques de différents matériaux de construction, en particulier des briques couramment utilisées en Algérie. L'objectif principal était d'identifier les matériaux les plus efficaces en termes de confort thermique et de réduction de la consommation énergétique dans le bâtiment.

La méthode expérimentale adoptée repose sur une approche comparative. Un dispositif spécifique (**DMST 1.0**) a été utilisé pour suivre l'évolution de la température surfacique des briques soumises à un flux thermique constant, généré par une lampe de **1000 W**. Ce dispositif a permis d'enregistrer en temps réel l'évolution des températures sur les faces exposée et non exposée des briques testées, sur une durée de cinq heures.

Sept types de briques creuses industrielles ont été sélectionnés, en provenance des régions de **Biskra**, **BBA**, **Ouargla**, **M'Sila**, **Soueyeh**, **Sétif** et **Ouled Derradj**. À ces échantillons s'est ajoutée une brique traditionnelle à base d'argile et de paille, issue d'une ancienne construction, utilisée à des fins comparatives. L'analyse des résultats a permis de conclure que la brique de **BBA** offre les meilleures performances thermiques globales, grâce à un écart de température important entre ses deux faces et une constante de temps élevée, traduisant une excellente inertie thermique. À l'inverse, la brique de **Soueyeh** s'est révélée moins performante. La brique traditionnelle, quant à elle, a montré un potentiel intéressant du point de vue de la régulation thermique naturelle.

Cette étude met en évidence l'importance du choix des matériaux de construction dans l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, en particulier dans les régions chaudes. Pour les perspectives futures, il serait pertinent d'élargir l'étude à d'autres types de matériaux locaux, d'intégrer des conditions climatiques variables (notamment l'humidité), ou encore d'effectuer des simulations dynamiques pour modéliser le comportement thermique des murs complets en conditions réelles. Par ailleurs, une étude du cycle de vie des matériaux pourrait enrichir la réflexion sur la durabilité environnementale des choix constructifs.

En se basant sur les analyses expérimentales menées, il est recommandé d'intégrer priori-

tairement la brique de **BBA** dans les projets de construction ou de rénovation. Ce matériau offre une excellente isolation thermique et une forte inertie thermique, contribuant ainsi à limiter les échanges thermiques et à assurer un meilleur confort intérieur tout en réduisant les besoins en climatisation.

Par ailleurs, la brique traditionnelle à base d'argile et de paille mérite une attention particulière dans le cadre des constructions bioclimatiques ou des projets de réhabilitation. Sa capacité à ralentir la propagation de la chaleur en fait un matériau naturel performant, favorable à une meilleure régulation thermique sans recours intensif aux systèmes énergétiques.

Enfin, pour répondre aux enjeux énergétiques actuels, il est recommandé d'encourager la formation et la sensibilisation des acteurs du bâtiment à l'importance des propriétés thermiques des matériaux, afin de promouvoir des constructions plus durables, économes en énergie, et respectueuses de l'environnement.

Bibliography

- [1] Université Badji Mokhtar - Annaba. *Généralités sur les matériaux de construction* [en ligne]. Disponible sur : https://elearning-facsct.univ-annaba.dz/pluginfile.php/1664/mod_resource/content/3/G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s.pdf.
- [2] BENNACER, Salih et CHEBABHI, Mohamed. *Étude sur les matériaux de construction*. Mémoire de Master Académique, option : Matériaux, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, 2016/2017.
- [3] CHOUIDIRA, Mohamed. *Étude des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux de construction*. Thèse de Doctorat LMD en Génie Mécanique, spécialité : Energétique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, 2024.
- [4] Université Frères Mentouri - Constantine 1. *Chapitre 1 : Classification des matériaux*. Cours en ligne, Institut des Sciences et Techniques Appliquées (ISTA), 2020. Disponible sur : <https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/Chapitre%201%2020Classes%20des%20matériaux%20%202020.pdf>
- [5] ISPM. *Technologie des Métaux – Séance du Mercredi 13 Mai 2020 (14h30 à 18h30)*. Cours de l'année universitaire 2019/2020. Institut Supérieur Privé de Management (ISPM), Maroc. Disponible sur : <https://www.ispm.ac.ma/wp-content/uploads/2020/05/S251-Technologie-des-me%CC%81taux.pdf>
- [6] BADER, Amira. *Étude de l'effet des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques d'un alliage à base d'aluminium Al-Mg-Si*. Mémoire de Master, Spécialité : Physique de la Matière Condensée, Université 8 Mai 1945 Guelma, Faculté des Mathématiques et de l'Informatique et des Sciences de la Matière, Département des Sciences de la Matière. Dirigé par Dr Fares SERRADJ. Septembre 2020.

- [7] HAMMACHE, Daoud et IBBARI, Abdeslam. *Élaboration et caractérisation d'un composite à renfort biodégradable*. Mémoire de Master académique, Spécialité : Génie mécanique, Option : Fabrication mécanique et productique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté du Génie de la Construction, Département de Génie Mécanique, encadré par R. FERHOUM, co-encadré par L. BOUDAUD, Promotion 2017/2018.
- [8] MANSOURI, Naima. *Chapitre 1 : Introduction - Généralités sur matières plastiques*. Cours en ligne. Université Batna 2. Disponible sur : https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/mansouri_naima/files/chapitre-1-introduction-generalites-sur-matieres-plastiques.pdf
- [9] DJAIDJA, Seif el Islam et BOUCHAREB, El Yamine. *Technique d'élaboration et de caractérisation des pavés de résines thermoplastiques*. Mémoire de Master, Option : Techniques de Fabrication et Productique, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, sous la direction de ROKBI Mansour. Année universitaire 2020/2021.
- [10] WATI, Elvis. *Caractérisation thermophysique des matériaux locaux de bâtiments et modélisation énergétique d'un bâtiment à basse consommation d'énergie dans un climat tropical africain*. Thèse de Doctorat/Ph.D en Physique, Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Département de Physique, sous la direction de MEUKAM Pierre, 2018. Disponible sur : https://dicames.online/jspui/bitstream/20.500.12177/7730/1/ENSET_EBO_BC_21_0258.pdf
- [11] Buildwise (ex-CSTC). *L'impact environnemental des matériaux et des bâtiments*. 2023. [PDF en ligne]. Disponible sur : https://www.buildwise.be/media/iyndjp54/lca_f.pdf
- [12] Matériaux de Construction — Chapitre 2 : Propriétés des matériaux de construction, Cours de Génie Civil, Université (ex: Université Chlef, Tissemsilt ou Batna 2). Ce chapitre décrit la classification (physiques, mécaniques, chimiques, physico-chimiques, thermiques, acoustiques) et détaille la masse volumique, porosité, conductibilité thermique, dilatation, etc.
- [13] « Isolation phonique : qu'est-ce que c'est ? » ToutSurLlIsolation, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.toutsurlisolation.com/isolation-phonique-quest-ce-que-cest>

- [14] Attar, A., & Belakhdar, M. (2015). *Évaluation de la durabilité des bétons dans les zones côtières algériennes*. Revue des Sciences et Technologies.
- [15] CNERIB. (2020). *Pathologies et durabilité des ouvrages en béton en Algérie*.
- [16] Boukaf, Ayoub et Belouadah, Walid Charaf Eddine. *Étude du comportement thermique des matériaux de construction*. Mémoire de Master. Université de M'sila, Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, spécialité : Génie Mécanique, option : Énergétique. Dirigé par Pr. Ihaddadene Nabila. Année universitaire : 2023/2024.
- [17] Decorious. *Creative Uses of Wood in Home Decoration* [en ligne]. Disponible sur : <https://decorious.com/ar/blogs/creative-uses-of-wood-in-home-decoration>.
- [18] Shutterstock. *Industrial Building Construction* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.shutterstock.com/search/industrial-building-construction>.
- [19] KPF. *Material Innovation Case Studies – The Carbon Issue* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.kpf.com/story/material-innovation-case-studies-the-carbon-issue>.
- [20] The Guardian. *Beautiful, Eco-Friendly and Fire-Resistant: Why Architects Are Choosing Walls Made of Hemp* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.theguardian.com/artanddesign/2024/nov/10/beautiful-eco-friendly-and-fire-resistant-why-architects-are-choosing-walls-made-of-hemp>.
- [21] Eduardo Perez. *Swatch Headquarters Design* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.eduardoperez.de/architecture/design/swatch-headquarter/>.
- [22] ArchDaily. *Reduce, Reuse and Recycle: The Three Rs Rule Applied to Architecture* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.archdaily.com/945040/reduce-reuse-and-recycle-the-three-rs-rule-applied-to-architecture/5f1ef00bb357653f3b000242-reduce-reuse-and-recycle-the-three-rs-rule-applied-to-architecture>.
- [23] Maison en Chanvre. *Hemp Products – Insulation* [en ligne]. Disponible sur : <https://maisonenchavre.com/en/hemp-products/insulation/>.
- [24] Greenroofs.com. *Green Walls* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.greenroofs.com/green-walls/>.