

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB – BLIDA1
INSTITUT D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME
Laboratoire : Environnement et Technologie pour l'Architecture et le Patrimoine



THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT D/LMD

Filière : **Architecture**

Spécialité : Patrimoine architectural, urbain et paysager

Présentée par :
DAHMANI Kamelia

**Amélioration du confort thermique dans l'habitat saharien par
introduction de matériaux à changement de phase**

Thèse soutenue le 19 mai 2025 devant un jury d'examen composé de :

Nom et Prénom	Qualité	Grade	Institution
HAMID Abdelkader	Président	Professeur	U. Blida1
MAKHLOUF Said	Rapporteur	Professeur	UMMTO
BOUTOUDJ Mohammed Said	Examineur	Professeur	UMMTO
BOUKARTA Soufiane	Examineur	MCA	U. Blida1
KAOULA Dalel	Examineur	MCA	U. Blida1
MOHAMMEDI Kamel	Invité	Professeur	UMBB

Année universitaire : 2024/2025

« L'architecture, c'est formuler les problèmes avec clarté »

Le Corbusier, architecte du 20^{ème} siècle

Remerciements :

Louanges à DIEU le Tout-Puissant, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Avant d'entamer ce manuscrit, je voudrais remercier les nombreuses personnes qui ont contribué à rendre ce travail possible.

En tout premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, Monsieur Said MAKHLOUF, professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, sans qui rien de tout cela n'aurait pu être possible. Son savoir, sa passion pour la recherche, son sens du professionnalisme, ses critiques constructives, sa patience dans les nombreux moments d'égards et sa disponibilité m'ont propulsé chaque jour vers l'avant. Je ne le remercierai jamais assez ; il a été un deuxième père pour moi...

Je souhaite remercier chaleureusement la directrice de notre école doctorale et directrice du laboratoire ETAP, Madame Amina FOUFA, pour sa disponibilité, son soutien, ses encouragements et son suivi tout au long de mon cursus.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers tous les directeurs des laboratoires ayant répondu favorablement à mes demandes de caractérisations physico-chimiques, thermiques et mécaniques sollicitées sur tout le territoire national, sans oublier les techniciens de laboratoires avec lesquels j'ai travaillé.

Je souhaite remercier Monsieur Madjid NECHICHE, maître de conférences à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et le partage de ses connaissances dans la caractérisation des matériaux.

Je tiens à remercier Madame Dihia DJEFAL et Madame Souad KHEDACHE, maîtres assistantes à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, postdoctorante du professeur Said MAKHLOUF, pour leurs précieux conseils, leurs encouragements et le partage de leurs connaissances dans le domaine des MCPs.

Je souhaite également remercier Monsieur Rachid DJEBNOUNE, maître de conférences à l'université Mohamed Khider de Biskra, pour m'avoir accueilli au sein de leur département d'architecture et de m'avoir servi de guide et de correspondant local.

Je tiens également à remercier les doctorants et postdoctorants des laboratoires LMSE, ETAP et autres laboratoires que j'ai pu rencontrer au cours de cette thèse, pour m'avoir fait partager leurs expériences et connaissances de la recherche.

Résumé :

L'habitat saharien traditionnel, témoin d'un savoir-faire authentique, respectueux de l'environnement et utilisant des matériaux locaux, a subi le phénomène de standardisation, introduisant des procédés et des matériaux de construction inadéquats au climat aride, négligeant ainsi le confort thermique. En conséquence de cette architecture, dite moderne, le recours au système de chauffage et de climatisation devient une nécessité primordiale.

Dans le cadre du développement durable et de la revalorisation de l'architecture saharienne, la recherche de solutions innovantes permettant de faire des économies d'énergie avec l'amélioration du confort thermique et en utilisant des ressources locales devient une nécessité. Aujourd'hui, il est impératif pour l'architecte et l'ingénieur génie civil d'avoir un autre regard sur l'enveloppe du bâtiment. Celle-ci doit être pensée et conçue pour assurer sa fonction primaire de structure résistante, mais également pour remplir sa fonction de zone tampon entre le milieu extérieur, souvent à des températures élevées en période estivale et basses en période hivernale, et un milieu intérieur où les exigences en termes de confort sont importantes. Le recours à de nouveaux matériaux capables d'assurer cette fonction de stockage d'énergie dans un intervalle de température réduit, appelés matériaux à changement de phase (MCPs), s'avère être une solution très prometteuse.

En effet, l'utilisation de ces MCPs dans les parois du bâtiment permet d'assurer le confort thermique avec le concept de stockage d'énergie thermique par chaleur latente. Contrairement au stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente présente l'avantage de stocker une plus grande quantité d'énergie pour un même volume de matière.

Notre approche consiste à élaborer alors de nouveaux matériaux composites, utilisant les matériaux locaux comme matrice, support du matériau à changement de phase adéquat préalable sélectionné pour ses performances thermiques. Ce composite à forte chaleur latente, sélectionné pour ses performances thermo-physiques, respectueux de l'environnement, va permettre d'écarter les pics de températures et permettre ainsi de réduire la consommation d'énergie. L'intégration de ces matériaux à changement de phase dans les parois des bâtiments va permettre d'emmagasinier la chaleur excédentaire en période de surchauffe et ainsi éviter sa propagation à l'intérieur du bâtiment. Cette chaleur sera évacuée ultérieurement pendant la période de température plus basse, où une simple ventilation naturelle suffit pour dissiper la chaleur vers l'extérieur. Ce dispositif utilisant l'inertie thermique du matériau aura une influence positive sur les variations des températures journalières, en diminuant les températures intérieures, on diminue le recours au système de climatisation.

Mots clés : Confort thermique, bâtiment, l'inertie thermique, matériaux à changement de phase, matériaux locaux, climat aride, économies d'énergie.

Abstract :

Traditional Saharan dwellings, which bear witness to authentic know-how, respect for the environment, and the use of local materials, have been subjected to the phenomenon of standardization, with the introduction of building processes and materials that are unsuited to the arid climate, thus neglecting thermal comfort. As a result of this so-called modern architecture, the use of heating and air-conditioning systems has become an essential necessity. In the context of sustainable development and the revival of Saharan architecture, the search for innovative solutions that save energy while improving thermal comfort and using local resources is becoming a necessity. Today, it is imperative for architects and civil engineers to take a fresh look at the building envelope. It must be designed to fulfill its primary function as a resistant structure, but also to act as a buffer zone between the outside environment, which often experiences high temperatures in summer and low temperatures in winter, and the inside environment, where comfort requirements are high. The use of new materials capable of providing this energy storage function in a reduced temperature range, known as phase change materials (PCMs), is proving to be a very promising solution.

The use of these MCPs in building walls makes it possible to ensure thermal comfort using the concept of storing thermal energy using latent heat. Unlike storage by sensible heat, storage by latent heat has the advantage of storing a greater quantity of energy for the same volume of material.

Our approach is to develop new composite materials using local materials as a matrix, supporting the appropriate phase change material previously selected for its thermal performance. This high latent heat composite, selected for its thermo-physical performance and environmental friendliness, will enable temperature spikes to be capped, thereby reducing energy consumption. By incorporating these phase-change materials into building walls, excess heat can be stored during periods of overheating, preventing it from spreading inside the building. This heat will be evacuated later during periods of lower temperature, when simple natural ventilation is all that is needed to dissipate the heat to the outside. This system, which makes use of the thermal inertia of the material, will have a positive influence on daily temperature variations by reducing indoor temperatures and thus reducing the need for air conditioning.

Key words: Thermal comfort, buildings, thermal inertia, phase change materials, local materials, arid climate, energy savings.

ملخص:

خضع المسكن الصحراوي التقليدي، الشاهد على الدراية الأصيلة واحترام البيئة واستخدام المواد المحلية، لظاهرة التوحيد القياسي وإدخال عمليات ومواد بناء غير ملائمة للمناخ الجاف، وبالتالي إهمال الراحة الحرارية. ونتيجة لما يسمى بالعمارة الحديثة، أصبح استخدام أنظمة التدفئة وتكييف الهواء ضرورة أساسية.

في سياق التنمية المستدامة وإحياء العمارة الصحراوية، أصبح البحث عن حلول مبتكرة موفرة للطاقة تعمل على تحسين الراحة الحرارية واستخدام الموارد المحلية ضرورة. اليوم، من الضروري للمهندسين المعماريين والمهندسين المدنيين إلقاء نظرة جديدة على غلاف المبنى. يجب أن يتم تصميمه ليؤدي وظيفته الأساسية كهيكل مقاوم، ولكن أيضاً ليعمل كم منطقة عازلة بين البيئة الخارجية التي غالباً ما تشهد درجات حرارة عالية في الصيف ودرجات حرارة منخفضة في الشتاء، والبيئة الداخلية حيث تكون متطلبات الراحة عالية. وقد ثبت أن استخدام مواد جديدة قادرة على توفير وظيفة تخزين الطاقة في نطاق درجات حرارة ثابتة، والمعروفة باسم المواد المتغيرة الطور (MCPS)، هو حل واعد للغاية.

ويتيح استخدام هذه المواد المتغيرة الطور (MCPS) في جدران المباني ضمان الراحة الحرارية باستخدام مفهوم تخزين الطاقة الحرارية باستخدام الحرارة الكامنة. وعلى عكس التخزين بالحرارة المحسوسة، يتميز التخزين بالحرارة الكامنة بميزة تخزين كمية أكبر من الطاقة لنفس الحجم من المواد.

ويتمثل نهجنا في تطوير مواد مركبة جديدة، باستخدام مواد محلية كمصفوفة، تدعم المواد المتغيرة الطور (MCP) المناسبة التي تم اختيارها مسبقاً لأدائها الحراري. سيساعد هذا المركب ذو الحرارة الكامنة العالية، الذي تم اختياره لأدائه الحراري الفيزيائي وملاءمته للبيئة، إمكانية الحد من ارتفاع درجات الحرارة، وبالتالي تقليل استهلاك الطاقة. ومن خلال دمج هذه المواد المتغيرة الطور (MCPS) في جدران المباني، يمكن تخزين الحرارة الزائدة خلال فترات ارتفاع درجة الحرارة، مما يمنعها من الانتشار داخل المبنى. وسيتم إخلاء هذه الحرارة لاحقاً خلال فترات انخفاض درجة الحرارة، عندما تكون التهوية الطبيعية البسيطة كافية لتبديد الحرارة إلى الخارج. هذا النظام، الذي يستفيد من القصور الحراري للمادة، سيكون له تأثير إيجابي على التغيرات اليومية في درجات الحرارة، من خلال تقليل درجات الحرارة داخل المباني وبالتالي تقليل الحاجة إلى تكييف الهواء.

الكلمات المفتاحية: الراحة الحرارية، المباني، القصور الحراري، المواد المتغيرة الطور، المواد المحلية، المناخ الجاف، توفير الطاقة.

Plan de travail

Introduction	22
Chapitre 1 : Notion de confort thermique	25
1. Introduction	26
I. Notions de thermique	26
1. Température.....	26
2. La chaleur	26
2.1. Chaleur sensible	26
2.2. Chaleur latente.....	27
3. Les échanges thermiques	27
II. Confort thermique	28
1. Définition du confort thermique	28
2. Développement du concept de confort thermique humain	28
2.1. Transferts thermiques entre le corps et l'environnement ; L'aspect physique... 29	
2.1.1. Bilan thermique du corps humain	30
2.2. La thermorégulation: l'aspect physiologique	31
2.2.1. Réactions au froid et à la chaleur	31
2.3. Sensation de confort : Aspect psychologique	32
3. Paramètres du confort thermique.....	33
3.1. Paramètres environnementaux	33
3.1.1. Température de l'air.....	33
3.1.2. Humidité relative	33
3.1.3. Vitesse de l'air	33
3.1.4. Température moyenne radiante (rayonnement)	34
3.2. Paramètres individuels	34
3.2.1. Niveau d'activité.....	34
3.2.2. Isolement thermique des vêtements	34
4. L'inconfort thermique.....	35
5. Mesure du confort thermique	35
5.1. Vote Moyen Prévisible (PMV)	36
5.2. Pourcentage Prévisible D'insatisfaits (PPD)	36
5.3. Température opérative (Top).....	37
6. Normes internationales sur le confort thermique	38

6.1.	Norme internationale ISO 7730	38
6.2.	Standard ASHRAE 55.....	38
6.3.	Réglementation Algérienne	39
7.	Confort thermique dans l'habitat	39
III.	Techniques de rafraîchissement bioclimatiques dans le bâtiment.....	40
1.	Protection des gains thermiques	41
1.1.	Microclimat	41
1.1.1.	Végétation et landscaping	42
1.1.2.	Surfaces d'eau	42
1.2.	Protection solaire.....	43
1.2.1.	Protection solaire des ouvertures	43
1.2.2.	Protection des toitures et des façades.....	46
2.	Dissipation de la chaleur.....	47
2.1.	Rafrâichissement géothermique	47
2.1.1.	Habitat troglodyte	47
2.1.2.	Puits provençal.....	48
2.2.	Rafrâichissement par ventilation.....	48
2.2.1.	Ventilation nocturne.....	49
2.2.2.	Ventilation de confort	49
2.3.	Rafrâichissement par évaporation	52
2.4.	Rafrâichissement radiatif.....	53
3.	Modulation de la chaleur avec l'inertie thermique	55
3.1.	Modulation de la chaleur avec le stockage d'énergie thermique	55
3.1.1.	Stockage par chaleur sensible	56
3.1.2.	Stockage par chaleur latente	58
4.	Conclusion.....	60
	Chapitre 2 : Matériaux à changement de phase.....	61
1.	Introduction	62
2.	Définition des matériaux à changement de phase	62
3.	Principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase.....	63
3.1.	Processus de changement de phases.....	63
4.	Critères de sélection des matériaux à changement de phase	64
5.	Classification des matériaux à changement de phase.....	65

5.1.	Les MCPs organiques.....	65
5.1.1.	Les paraffines.....	65
5.1.2.	Les non-paraffines	66
5.2.	Les MCPs inorganiques	66
5.3.	Les eutectiques	66
6.	Comparaison entre les différents groupes de MCPs.....	67
6.1.	Avantages des différentes catégories de MCPs.....	67
6.2.	Inconvénients des différentes catégories de MCPs	68
6.3.	Liste des MCPs trouvés dans la littérature	68
6.4.	Liste des MCPs commerciales	69
7.	Méthodes d'incorporation des MCPs	70
7.1.	Incorporation directe	70
7.2.	Immersion.....	70
7.3.	Encapsulation	70
7.3.1.	Macro-encapsulation.....	70
7.3.2.	Micro-encapsulation	70
7.4.	MCP à forme stabilisée	71
7.5.	Imprégnation sous vide	71
8.	Méthodes d'intégration des MCPs dans les murs.....	73
8.1.	Méthode d'immersion	73
8.2.	Méthode d'attachement	73
9.	Problèmes d'application des MCPs	73
9.1.	Surfusion	73
9.2.	Ségrégation de phase	74
9.3.	Stabilité à long terme.....	74
9.4.	Résistance au feu	74
9.5.	Faible conductivité thermique	75
10.	Etat de l'art sur l'utilisation des MCPs dans le bâtiment	76
11.	Conclusion.....	80

Chapitre 3 : Matériels et méthodes d'élaboration des nouveaux matériaux composites

MCPs	81
1. Introduction	82
I. Choix du cas d'étude	82
1. Présentation de la ville de Biskra	82

2.	Données climatiques de la ville de Biskra entre (2009-2018).....	83
2.1.	Températures de l'air	83
2.2.	Humidité relative	84
2.3.	Vents.....	84
2.4.	Précipitations	85
3.	Situation de de la ville Biskra dans les zones climatiques d'Algérie	85
3.1.	Zones climatiques d'été.....	86
3.2.	Zones climatiques d'hiver	86
4.	Détermination de l'indice d'aridité.....	87
II.	Matériaux et méthodes	88
1.	Matériaux utilisés	88
1.1.	Choix des MCPs.....	89
1.2.	Préparation des matières premières constituant la matrice	90
2.	Elaboration des composites MCPs	91
2.1.	Composites BC/AR + SB + GR (CBC)	91
2.2.	Composites HP/AR + SB + GR (CHP).....	93
2.3.	Composites HC/AR + SB + GR (CHC).....	93
2.4.	Composites RT 28 HC/AR + SB + GR (CRT28 HC).....	94
2.5.	Composites AL/AR + SB + GR (CAL)	95
3.	Techniques de caractérisation des composites MCPs	95
3.1.	Granulométrie Laser.....	95
3.2.	Masse volumique Absolue	96
3.3.	Traitement thermique	96
3.4.	Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier (FTIR).....	97
3.5.	Microscopie Electronique à Balayage (MEB).....	97
3.6.	Analyse Thermogravimétrique (ATG).....	98
3.7.	Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC)	99
3.8.	Diffraction des Rayons X (DRX).....	99
3.9.	Résistance mécanique à la compression.....	100
3.10.	Conductivité thermique	100
4.	Conclusion	102
	Chapitre 4 : Résultats et discussions	103
1.	Introduction	104

2.	Résultat des analyses par granulométrie laser	104
2.1.	Résultat des analyses par granulométrie laser de l'argile	104
2.2.	Résultat des analyses par granulométrie laser de la sciure de bois	105
2.3.	Résultat des analyses par granulométrie laser du graphite.....	105
3.	Résultats de la masse volumique absolue	106
4.	Résultats du traitement thermique des composites MCPs.....	106
4.1.	Résultats du traitement thermique des CBC	106
4.2.	Résultats du traitement thermique des CHP.....	107
4.3.	Résultats du traitement thermique des CHC	108
4.4.	Résultats du traitement thermique des CRT28 HC	109
4.5.	Résultats du traitement thermique des CAL	110
5.	Résultats de l'analyse par spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier (FTIR)	111
5.1.	Résultats de l'analyse FTIR de l'argile (AG).....	111
5.2.	Résultats de l'analyse FTIR de la sciure de bois (SB)	111
5.3.	Résultats de l'analyse FTIR du BC	112
5.4.	Résultats de l'analyse FTIR de l'HC.....	113
5.5.	Résultats de l'analyse FTIR de l'HP	113
5.6.	Résultats de l'analyse FTIR de la RT28 HC	114
5.7.	Résultats de l'analyse FTIR de l'AL	114
5.8.	Résultats de l'analyse FTIR du CBC	115
5.9.	Résultats de l'analyse FTIR du CRT28 HC	116
5.10.	Résultats de l'analyse FTIR du CHP	116
5.11.	Résultats de l'analyse FTIR du CHC	117
5.12.	Résultats de l'analyse FTIR du CAL.....	117
6.	Résultats des analyses par Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC).....	118
6.1.	Résultat de l'analyse DSC de l'AL	118
6.2.	Résultat de l'analyse DSC de l'HC	119
6.3.	Résultats de l'analyse DSC du BC	119
6.4.	Résultat de l'analyse DSC de la paraffine RT28 HC	120
6.5.	Résultats de l'analyse DSC du CAL	120
6.6.	Résultats de l'analyse DSC du CRT28 HC	121
6.7.	Résultats de l'analyse DSC du CHC	122
6.8.	Résultat de l'analyse DSC du CHP	123

6.9.	Résultats de l'analyse DSC du CBC	124
7.	Résultats des analyses Thermogravimétriques	124
7.1.	Résultats ATG du BC.....	124
7.2.	Résultats ATG de la sciure de bois	125
7.3.	Résultats ATG du CBC	126
7.4.	Résultats ATG du CHP :	126
7.5.	Résultats ATG de l'HC	127
7.6.	Résultats ATG du CHC.....	127
7.7.	Résultats ATG du CRT 28 HC.....	128
7.8.	Résultats ATG de l'AL	129
7.9.	Résultats ATG du CAL	129
8.	Résultats de l'analyse par DRX.....	130
8.1.	Résultats DRX de l'argile	130
8.2.	Résultats DRX de la sciure de bois	130
8.3.	Résultats DRX du CHC.....	131
8.4.	Résultats DRX du CBC.....	131
8.5.	Résultats DRX du CHP	132
8.6.	Résultats DRX du CAL.....	132
8.7.	Résultats DRX de la RT28 HC	133
8.8.	Résultats DRX du CRT28 HC	133
9.	Résultats des observations par Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	134
9.1.	Résultats des observations par MEB de la sciure de bois	134
9.2.	Résultats des observations par MEB du CRT28 HC.....	135
9.3.	Résultats des observations par MEB du CHP	137
9.4.	Résultats des observations par MEB du CAL	138
9.5.	Résultats des observations par MEB du CHC.....	139
10.	Résultats des essais d'écrasements	141
10.1.	Résultats des essais d'écrasements du CBC	141
10.2.	Résultats des essais d'écrasements du CHP	142
10.3.	Résultats des essais d'écrasements du CHC	143
10.4.	Résultats des essais d'écrasements du CAL	144
10.5.	Résultats des essais d'écrasements du CRT28 HC.....	145
11.	Résultats des mesures de conductivité thermique	146

11.1.	Résultats de la conductivité thermique du CRT28 HC.....	146
11.2.	Résultats de la conductivité thermique du CAL.....	147
12.	Conclusion.....	148
Chapitre 5 : Etude du protocole d'application des nouveaux matériaux composites élaborés dans une paroi de bâtiment		150
1.	Introduction	151
2.	Description du dispositif expérimental.....	151
2.1.	Réalisation de la structure isolante.....	152
2.2.	Réalisation du mur Trombe.....	152
2.3.	Elaboration des plaques de composites MCPs.....	154
3.	Instruments de mesure utilisés.....	155
3.1.	Répartition des thermocouples	155
3.1.1.	Répartition des thermocouples avant l'intégration des composites MCPs.....	155
3.1.2.	Répartition des thermocouples après l'intégration des CRT28 HC.....	156
3.1.3.	Répartition des thermocouples après l'intégration des CRT28 HC et CAL	157
4.	Mesures de températures journalières	157
5.	Résultats des mesures de température effectuées	159
5.1.	Résultats des mesures de températures des parois sans les composites MCPs	159
5.2.	Résultats des mesures de températures des parois avec l'intégration du CRT28 HC.....	160
5.3.	Résultats des mesures de températures des parois avec l'intégration des CRT28 HC et CAL	161
6.	Conclusion.....	162
Conclusion générale et perspectives		163
Bibliographie.....		165

Liste des figures

Figure 1. 1. Notion de chaleur sensible	27
Figure 1. 2. Transfert de chaleur par convection, conduction et radiation	28
Figure 1. 3. Représentation des échanges de chaleur entre l'être humain et l'environnement	30
Figure 1. 4. Diagramme de la régulation autonome et comportementale de la température chez l'être humain	32
Figure 1. 5. Paramètres du confort thermique.....	33
Figure 1. 6. Taux métabolique en fonction de l'activité	34
Figure 1. 7. Isolement thermique dû aux vêtements.....	35
Figure 1. 8. Degrés de confort de l'indice PMV	36
Figure 1. 9. Relation entre le PPD et le PMV	37
Figure 1. 10. Température ressentie idéale en fonction de l'habillement et du métabolisme	38
Figure 1. 11. Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année	40
Figure 1. 12. Classification des techniques passives de rafraichissement	41
Figure 1. 13. Image d'un microclimat composé d'eau et végétations	42
Figure 1. 14. Influence d'une fontaine sur le microclimat	43
Figure 1. 15. Dispositifs de protections fixes.....	44
Figure 1. 16. Image du moucharabieh traditionnel et moderne	44
Figure 1. 17. Dispositifs de protections mobiles des surfaces vitrées	45
Figure 1. 18. Impact d'un arbre à feuille caduque sur le rayonnement solaire en été et en hiver.....	45
Figure 1. 19. Images d'une façade et d'une toiture végétales	46
Figure 1. 20. Illustration d'une façade et toiture double peau	47
Figure 1. 21. Schémas de l'habitat enterré et semi enterré	48
Figure 1. 22. Schéma de principe du puits provençal	48
Figure 1. 23. Configurations de la ventilation naturelle	49
Figure 1. 24. Ventilation naturel dans la tour à vent	50
Figure 1. 25. Principe de fonctionnement d'une tour à vent	50
Figure 1. 26. Ventilation naturelle par l'effet cheminée	51
Figure 1. 27. Ventilation naturelle dans un atrium	52
Figure 1. 28. Procédés d'humidification de l'air dans le moucharabieh et la tour à vent	52
Figure 1. 29. Croquis schématique du rafraichissement par un plan d'eau	53
Figure 1. 30. Image des maisons blanches en méditerranéen	54
Figure 1. 31. Schéma du refroidissement radiatif	55
Figure 1. 32. Influence de l'inertie thermique des matériaux de l'enveloppe du bâtiment sur la température intérieure	56
Figure 1. 33. Energie stockée en fonction de la température par chaleur sensible et latente.	59
 Figure 2. 1. Principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase	63
Figure 2. 2. Nomenclature des changements d'état.....	64
Figure 2. 3. Stockage d'énergie thermique et classification des MCPs	66
Figure 2. 4. Quelques techniques d'encapsulation des MCPs	71

Figure 2. 5. Imprégnation sous vide	72
Figure 2. 6. Image des cabanes de test	76
Figure 2. 7. Configuration du murs prototype	77
Figure 2. 8. (a) Dalle de référence, (b) Dalle avec MCPs	77
Figure 2. 9. Image des cabines	78
Figure 2. 10. (a): Apparence de la cellule, (b) : MCP à forme stabilisée dans le planché	78
Figure 2. 11. Dispositif expérimental, cabane sud sans MCP, cabane nord avec MCP	79
Figure 2. 12. Détails du modèle 2D	79
Figure 2. 13. (a) Schéma de la pièce simulée, (b) Coupe schématique du mur extérieur	80
Figure 3. 1. Situation géographique de la ville de Biskra	82
Figure 3. 2. Moyennes mensuelles des données climatiques de la ville de Biskra (2009-2018)	83
Figure 3. 3. Températures moyennes mensuelles	84
Figure 3. 4. Humidités moyennes mensuelles	84
Figure 3. 5. Vitesses moyennes mensuelles du vent	85
Figure 3. 6. Répartition mensuelle des précipitations	85
Figure 3. 7. Situation de Biskra dans les zones climatiques d'Algérie	86
Figure 3. 8. Images de A : Argile, B : Sciure de bois, C : Graphite	89
Figure 3. 9. Images des matériaux à changement de phase sélectionnés : A ; Beurre de Cacao, B : Huile de Coprah, C ; Huile Palmiste, D ; RT28 HC, E ; Acide Laurique	90
Figure 3. 10. Etapes de préparation des matières premières	90
Figure 3. 11. Image de la presse hydraulique Oehlgass.....	91
Figure 3. 12. Images des CBC	92
Figure 3. 13. Images des CHP	93
Figure 3. 14. Images des CHC	93
Figure 3. 15. Images des CRT28 HC	94
Figure 3. 16. Images des CAL	95
Figure 3. 17. Image du LA-960 de HORIBA.....	95
Figure 3. 18. Images du pycnomètre (A) et la balance de précision (B)	96
Figure 3. 19. Image du traitement thermique a l'étuve des composites MCPs	97
Figure 3. 20. Image de l'Iraffinity1-S de SHIMADZU	97
Figure 3. 21. Image du Microscope Électronique à Balayage FEI QUANTA 650.....	98
Figure 3. 22. Image des appareils d'analyse TG, (A) STA 409 PC/PG, (B) SDT Q600.....	98
Figure 3. 23. Image du DSC131 Evo de SETARAM	99
Figure 3. 24. Image du D2 PHASER de BRUKER	100
Figure 3. 25. Images de ; a : l'éprouvette, b : Machine de compression, c : Essai d'écrasement	100
Figure 3. 26. Images de ; a : Appareil CT-mètre HI 12N, b : l'éprouvette	101
Figure 4. 1. Distribution granulométrique des particules d'argile	104
Figure 4. 2. Distribution granulométrique des particules de la sciure de bois	105
Figure 4. 3. Distribution granulométrique des particules de la poudre de graphite.....	106

Figure 4. 4. Résultat du traitement thermique des CBC	107
Figure 4. 5. Résultat du traitement thermique des CHP	108
Figure 4. 6. Résultat du traitement thermique des CHC.....	109
Figure 4. 7. Résultat du traitement thermique des CRT28 HC	109
Figure 4. 8. Résultat du traitement thermique des CAL.....	110
Figure 4. 9. Spectre IR de l'Argile	111
Figure 4. 10. Spectre IR de la Sciure de Bois	112
Figure 4. 11. Spectre IR du BC	112
Figure 4. 12. Spectre IR de l'HC.....	113
Figure 4. 13. Spectre IR de l'HP.....	114
Figure 4. 14. Spectre IR de la RT28 HC	114
Figure 4. 15. Spectre IR de l'AL	115
Figure 4. 16. Spectre IR du CBC	115
Figure 4. 17. Spectre IR du composite CRT28 HC	116
Figure 4. 18. Spectre IR du composite CHP	117
Figure 4. 19. Spectre IR du composite CHC.....	117
Figure 4. 20. Spectre IR du composite CAL.....	118
Figure 4. 21. Courbe DSC de l'AL.....	118
Figure 4. 22. Courbe DSC de l'HC.....	119
Figure 4. 23. Courbe DSC du BC	120
Figure 4. 24. Courbe DSC de la RT28 HC	120
Figure 4. 25. Courbe DSC du CAL	121
Figure 4. 26. Courbe DSC du CRT28 HC.....	122
Figure 4. 27. Courbe DSC du CHC	123
Figure 4. 28. Courbe DSC du CHP	123
Figure 4. 29. Courbe DSC du composite CBC	124
Figure 4. 30. Courbe ATG du BC	125
Figure 4. 36. Courbe ATG du CRT28 HC.....	128
Figure 4. 37. Courbe ATG de l'AL.....	129
Figure 4. 38. Courbe ATG du CAL	130
Figure 4. 39. Analyse DRX de l'argile.....	130
Figure 4. 40. Analyse DRX de la sciure de bois	131
Figure 4. 41. Analyse DRX du CHC	131
Figure 4. 42. Analyse DRX du CBC.....	132
Figure 4. 43. Analyse DRX du CHP.....	132
Figure 4. 44. Analyse DRX du CAL	133
Figure 4. 45. Analyse DRX de la RT28 HC	133
Figure 4. 46. Analyse DRX du composite CRT28 HC	134
Figure 4. 47. Images MEB de la sciure de bois sous différents grossissements ; a ; x 80, b ; x 200, c ; x 400, et d ; x 1000	135
Figure 4. 48. Images MEB de la matrice (a, b, c) et du CRT28 HC (d, e, f) sous différents grossissements (x1000, x500, x250).....	136
Figure 4. 49. Images MEB de la matrice (a, b, c) et du CHP (d, e, f) sous différents grossissements (x1000, x500, x250).....	14038

Figure 4.50. Images MEB de la matrice (a, b, c) et du CAL (d, e, f) sous différents grossissements (x1000, x500, x250).....	139
Figure 4.51. Images MEB de la matrice (a, b, c) et du CHC (d, e, f) sous différents grossissements (x1000, x500, x250).....	140
Figure 4. 52. Etapes de l'essai de résistance du CBC à la compression simple	141
Figure 4. 53. Courbe pression /déplacement du CBC en compression simple.....	142
Figure 4. 54. Etapes de l'essai de résistance du CHP à la compression simple	142
Figure 4. 55. Courbe pression /déplacement du CHP en compression simple.....	143
Figure 4. 56. Courbe pression /déplacement du CHC en compression simple	143
Figure 4. 57. Etapes de l'essai de résistance du CAL à la compression simple.....	144
Figure 4. 58. Courbe pression /déplacement du CAL en compression simple	145
Figure 4. 59. Etapes de l'essai de résistance du CRT28 HC à la compression simple	145
Figure 4. 60. Courbe pression /déplacement du CRT28 HC en compression simple.....	146
Figure 4. 61. Amélioration de la conductivité thermique du CRT28 HC	147
Figure 4. 62. Amélioration de la conductivité thermique du CAL	147

Figure 5. 1. Image du prototype d'essai	151
Figure 5. 2. Réalisation du prototype d'essai	152
Figure 5. 3. Etapes de l'élaboration du mur Trombe	153
Figure 5. 4. (a), image de la cellule d'essai, (b) vue en plan sur la cellule d'essai	154
Figure 5. 5. Encapsulation des composites MCPS	154
Figure 5. 6. Images des ; A : thermocouples de type K, B : PICOLOG TC-08.....	155

Liste des tableaux :

Tableau 1. 1. Caractéristiques thermophysiques de quelques matériaux de construction	57
Tableau 1. 2. Comparaison entre le stockage par chaleur sensible et par chaleur latente....	59
Tableau 2. 1. Comparaison entre les différents groupes de MCPs.....	67
Tableau 2. 2. Avantages des différentes catégories de MCPs.....	67
Tableau 2. 3. Inconvénients des différentes catégories de MCPs.....	68
Tableau 2. 4. Liste des MCPs trouvés dans la littérature	68
Tableau 2. 5. Liste des MCPs commerciales	69
Tableau 2. 6. Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'incorporation des MCPs	72
Tableau 3. 1. Zones climatiques d'été.....	86
Tableau 3. 2. Zones climatiques d'hiver	87
Tableau 3. 3. Détails des fractions massiques des CBC élaborés.	92
Tableau 3. 4. Détails des fractions massiques des CHP	93
Tableau 3. 5. Détails des fractions massiques des CHC.....	94
Tableau 3. 6. Détails des fractions massiques des RT28 HC.....	94

<i>Tableau 3. 7. Détails des fractions massiques des CAL.....</i>	<i>95</i>
<i>Tableau 4. 1. Fractions cumulées des particules d'argile en fonction du diamètre</i>	<i>104</i>
<i>Tableau 4. 2. Fractions cumulées des particules de la sciure de bois en fonction du diamètre équivalent</i>	<i>105</i>
<i>Tableau 4. 3. Fractions cumulées des particules du graphite en fonction du diamètre équivalent</i>	<i>106</i>
<i>Tableau 4. 4. Masse volumique absolue des matériaux utilisés.....</i>	<i>106</i>
<i>Tableau 4. 5. Comparaison des masses des CBC avant et après le traitement thermique</i>	<i>107</i>
<i>Tableau 4. 6. Comparaison des masses des composites CHP avant et après le traitement thermique.....</i>	<i>108</i>
<i>Tableau 4. 7. Comparaison des masses des CHC avant et après le traitement thermique....</i>	<i>109</i>
<i>Tableau 4. 8. Comparaison des masses des CRT28 HC avant et après le traitement thermique</i>	<i>110</i>
<i>Tableau 4. 9. Comparaison des masses des CAL avant et après le traitement thermique.....</i>	<i>110</i>
<i>Tableau 4. 10. Comparaison des résultats DSC de la RT28 HC et du composite RT28 HC avec d'autres études dans la littérature.....</i>	<i>122</i>
<i>Tableau 4. 11. Comparaison de la conductivité thermique du CRT28 HC et du CAL avec d'autres études.....</i>	<i>148</i>
<i>Tableau 5. 1. Caractéristiques des différentes composantes de la cellule.....</i>	<i>152</i>
<i>Tableau 5. 2. Répartition des thermocouples sur le prototype avant l'intégration des composites MCPs</i>	<i>156</i>
<i>Tableau 5. 3. Répartition des thermocouples sur le prototype après l'intégration des composites CRT28 HC</i>	<i>156</i>
<i>Tableau 5. 4. Répartition des thermocouples sur le prototype après l'intégration des composites CRT28 HC et CAL</i>	<i>157</i>
<i>Tableau 5. 5. Températures journalières pour la journée du 14 juin 2022</i>	<i>158</i>

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
C	Flux de chaleur par convection	W/m ²
C _p	Chaleur spécifique	J/ kg.K
D	Diamètre	m
E	Echange de chaleur par évaporation	W/m ²
HR	Humidité relative	%
<i>Ia</i>	Indice d'aridité	-
I _{cl}	Isolement thermique des vêtements	Clo
Is	Epaisseur du matériau	m
K	Echange de chaleur par conduction	W/m ²
L	Chaleur latente	J/ kg
M	Chaleur métabolique	W/m ²
MET	Activité métabolique	Met
m	Masse	kg
P	Précipitations	mm
P	Pression	MPa
Q	Chaleur	J
R	Flux de chaleur par rayonnement	W/m ²
RES	Echange de chaleur par voie respiratoire	W/m ²
S	Energie stockée	W/m ²
T	Température	°C
v	Vitesse de l'air	m/s
W	Travail extérieur	W/m ²
Φ	Débit de chaleur	mV
λ	Conductivité thermique	W/mK
θ	Température	°C
ρ	Densité	kg/m ³

Abréviations

AG	Argile
AL	Acide Laurique
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
ATG	Analyse Thermogravimétrique
BC	Beurre de Cacao
CAL	Composite Acide Laurique
CBR	Composite Beurre de Cacao
CHC	Composite Huile de Coprah
CHP	Composite Huile Palmiste
CL	Chaleur latente
CS	Chaleur Sensible
CRT28 HC	Composite RT28 HC
DRX	Diffraction des Rayons X
DSC	Calorimétrie Différentielle à Balayage
DTR	Document Technique Réglementaire
FTIR	Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier
HC	Huile de Coprah
HP	Huile Palmiste
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
GL	Granulométrie Laser
GR	Graphite
MVA	Masse volumique Absolue
MEB	Microscopie Electronique à Balayage
MCP	Matériaux à Changement de Phase
SB	Sciure de Bois
SET	Stockage d'Energie Thermique
Ta	Température de l'air
Top	Température opérative
Tr	Température radiante
PMV	Vote Moyen Prévisible
PPD	Pourcentage Prévisible D'insatisfaits

Introduction

Près de cinquante ans après les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979, les perspectives d'une nouvelle crise énergétique se profilent à l'horizon : en cause, une demande sans cesse croissante en énergie et la raréfaction des gisements d'énergies fossiles non renouvelables. Les économies d'énergie deviennent alors une nécessité pour, d'une part, la prise de conscience des risques engendrés par le réchauffement climatique liés à l'augmentation des rejets des gaz à effet de serre et, d'autre part, pour des raisons économiques avec l'augmentation des coûts de l'énergie. Le secteur du bâtiment est au cœur de cette problématique énergétique, avec un taux de consommation autour de 40 %; il représente le premier secteur énergivore à l'échelle mondiale, et ce taux risque d'atteindre 50 % d'ici 2050 [1–4]. Cette énergie fossile est la principale source qui permet d'assurer le confort thermique à l'intérieur du bâtiment. En Algérie, au cours de ces dernières années, la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment a augmenté de manière significative ; elle représente 47 % de la consommation global [5, 6].

Après l'indépendance en 1962, l'Algérie a fait face à une demande sans cesse galopante en matière de logements, démographie oblige. Ce besoin pressant de logements a donné naissance à la standardisation de l'habitat, une décision ponctuelle, loin des données locales, négligeant souvent les spécificités de chaque région. La société saharienne, comme toutes les sociétés locales, a subi le phénomène de standardisation de l'habitat en introduisant des procédés et des matériaux de construction inadéquats au climat aride, en ignorant complètement une exigence primordiale, qui est le confort thermique, et ce en dépit du climat aride. Comme résultat de cette politique, toutes les structures sont inhabitables, surtout en période estivale, et on est arrivé à des installations de systèmes de conditionnement d'air, devenus indispensables dans toutes les structures.

Avec la montée en puissance d'une conscience écologique sur le secteur du bâtiment, ce dernier est confronté à la création d'édifices respectueux de l'environnement et moins consommateurs d'énergie. Pour cela, le confort thermique doit être une exigence lors de la conception architecturale et ce, en dépit de toutes les modifications apportées en termes de structures et de matériaux [7, 8]. Les matériaux de construction utilisés pour l'enveloppe du bâtiment jouent un rôle important dans l'amélioration du confort thermique. Dans les habitats traditionnels, le confort thermique est assuré par le choix des matériaux à forte inertie thermique pour l'enveloppe du bâtiment. Ces derniers sont caractérisés par leurs capacités à emmagasiner la chaleur et à la restituer ultérieurement avec un temps de déphasage, c'est-à-dire qu'au lieu d'avoir un pic de température à l'intérieur du bâtiment en début d'après-midi, la chaleur est stockée dans le matériau pour être restituée vers la fin de l'après-midi, où le recours à la ventilation naturelle permet à elle seule d'évacuer le surplus de chaleur.

Suivant la problématique soulevée par rapport au confort thermique dans l'habitat saharien, nous avons fixé comme objectif principal l'amélioration du confort thermique par l'augmentation de l'inertie thermique des matériaux de construction tout en contribuant au développement durable dans le bâtiment.

Pour répondre à notre problématique de départ et afin d'atteindre l'objectif fixé, nous avons émis les deux hypothèses comme réponses anticipées ; L'intégration de matériaux à changement dans les parois de bâtiment va permettre l'augmentation de l'inertie thermique et améliorer le confort thermique. L'élaboration de matériaux composites, constitués d'une

matrice à base de matériaux bio-sourcés, combinée à des matériaux à changement de phase adéquats, va permettre d'améliorer le confort thermique et de contribuer au développement durable dans le bâtiment.

Dans le cadre de cette recherche, nous avons adopté une méthodologie explicative pour étudier un problème technique, celui du confort thermique dans l'habitat saharien. Afin d'obtenir des résultats concrets, le processus choisi est la méthode expérimentale. Pour cela, ce travail de thèse s'articule autour de deux parties :

Partie théorique : La partie théorique est structurée en deux chapitres : Le premier chapitre est consacré à la compréhension de la notion de confort thermique. La recherche sur le confort thermique intègre plusieurs disciplines telles que la physique du bâtiment, la physiologie et la psychologie ; l'aspect physique nous permet de comprendre les transferts thermiques qui ont lieu entre l'homme et son environnement, l'aspect physiologique nous informe sur le principe de la thermorégulation et les réactions du corps humain au froid et à la chaleur. Le confort thermique est un état subjectif ; l'aspect psychologique nous permet de comprendre la sensation de confort thermique. Le confort thermique dans l'habitat a également été abordé dans ce premier chapitre, avec une revue des différentes techniques de rafraîchissement passif. Le deuxième chapitre présente une revue bibliographique sur les MCPs, leur principe de fonctionnement et leurs critères de sélection. Une comparaison de différentes catégories de MCPs a également été faite avec une présentation des avantages et des inconvénients de chaque catégorie. Ce chapitre présente les méthodes d'incorporation des MCPs ainsi que leurs méthodes d'intégration dans la structure du bâtiment, et un état de l'art sur l'utilisation des MCPs dans le secteur du bâtiment a également été établi.

Partie expérimentale : La partie expérimentale est structurée en trois chapitres ; le troisième chapitre présente le cas d'étude choisi, à savoir la ville de Biskra, avec une interprétation des données climatiques, ces dernières constituent un point essentiel dans le choix du MCP. Les matériaux et les méthodes d'élaboration des nouveaux matériaux composites MCPs ont été présentés. Ensuite, les nouveaux matériaux composites MCPs élaborés ont été soumis à une multitude de caractérisations physico-chimiques, thermiques et mécaniques afin d'identifier leurs propriétés ; les matériaux composites ont d'abord subi un traitement thermique permettant de voir leur comportement à l'état fusion du MCP. Par la suite, ces derniers ont été caractérisés chimiquement avec la FTIR afin de voir la compatibilité chimique entre leurs différents composants, et la DRX a été effectuée afin d'identifier la structure cristallographique des différents matériaux composites MCPs. Les composites MCPs élaborés ont également été caractérisés physiquement par la MEB afin d'observer leurs microstructures et de vérifier l'imprégnation du MCP dans la matrice. Des analyses thermiques ont également été effectuées avec l'analyse thermo- gravimétrique ainsi que par la DSC afin de déterminer les performances thermiques et de vérifier la fiabilité thermique des matériaux composites MCPs élaborés. Enfin, des essais de conductivité thermique sur les composites MCPs ont été effectués afin de mesurer l'impact de l'ajout du graphite sur l'amélioration de la conductivité thermique, et des essais de détermination de la résistance mécanique à la compression des composites MCPs ont été faits. Le quatrième chapitre présente les résultats et les discussions des différentes caractérisations physico-chimiques, thermiques et mécaniques. Le cinquième chapitre est consacré à l'étude du protocole d'application des composites MCPs élaborés dans une paroi de bâtiment. Ce présent chapitre concerne la présentation des résultats expérimentaux effectués au laboratoire de

recherche sur une cellule test dans laquelle sont intégrées des plaques des nouveaux matériaux composites élaborés.

Chapitre 1 : Notion de confort thermique

1. Introduction

Depuis toujours, l'homme a développé des stratégies et des techniques de protection contre les agressions extérieures, et l'habitat a été l'une de ses premières préoccupations.

L'architecture moderne est confrontée à la problématique énergétique avec l'épuisement des ressources fossiles, mais aussi à l'exigence d'un confort thermique devenu indispensable ; ce dernier constitue un véritable enjeu socio-économique.

La consommation d'énergie n'a eu de cesse de progresser dans le secteur du bâtiment, ce qui le classe en tête des secteurs énergivores. Aujourd'hui, la société mondiale a pris conscience des risques liés au réchauffement climatique, de la nécessité de la protection de l'environnement ainsi que de l'intérêt pour un développement durable.

La réduction de la consommation énergétique dans le bâtiment passe par l'amélioration du confort thermique et la réduction des besoins de chauffage et de climatisation. Le confort thermique est considéré comme un aspect d'un bâtiment durable [9].

La notion de confort est très complexe, d'une part par les multiples interactions entre l'être humain et son environnement, elle est liée à la qualité environnementale qui inclut le confort thermique, visuel, acoustique, olfactif et la qualité de l'air. D'autre part, le confort est lié à la subjectivité de chaque individu par les facteurs psychologiques et culturels [10].

Pour la caractérisation du confort, seul l'aspect thermique est considéré avec ses aspects physiologiques qui sont quantifiables par la physique.

I. Notions de thermique

1. Température

La notion de température est une notion subjective ; on constate qu'un corps est plus ou moins chaud par le toucher. La température mesure le niveau d'agitation moléculaire ; plus l'agitation augmente, plus la température est élevée. Pour chauffer un corps, il faut lui fournir de la chaleur.

2. La chaleur

La chaleur est le processus de transfert thermique. C'est un paramètre qui décrit les interactions entre les systèmes ; c'est la différence de températures entre deux systèmes qui détermine s'il y a transfert de chaleur [11]. La chaleur est l'énergie ressentie par le corps ; les sensations de chaud et de froid résultent de la présence ou de l'absence de la chaleur. Il existe deux types de chaleur : la chaleur sensible et la chaleur latente [12].

2.1. Chaleur sensible

La chaleur sensible est la chaleur qui modifie la température sans modification de l'état de la matière. La figure 1.1 montre la notion de chaleur sensible. Quand on chauffe l'eau de 25 à 70 °C, on observe que la température augmente avec l'apport de chaleur, sans que l'état de l'eau ne change. Dans ce cas, la chaleur fournie à l'eau pour monter sa température est une chaleur sensible.

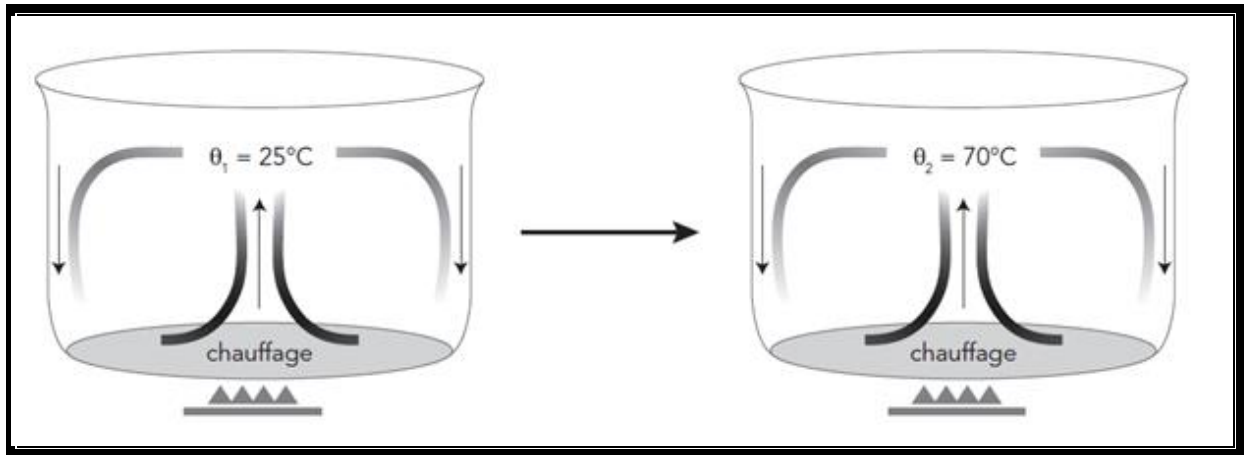


Figure 1. 1. Notion de chaleur sensible [12]

2.2. Chaleur latente

La chaleur latente est la chaleur du changement d'état de la matière sans modifier sa température. Tous les matériaux sont capables de modifier leurs états, mais tout changement d'état nécessite l'ajout de la chaleur ou son retrait.

3. Les échanges thermiques

La chaleur se propage naturellement d'un milieu chaud vers un milieu plus froid en utilisant ces quatre modes de transfert [13] :



La conduction : une transmission de proche en proche, résultat d'une agitation moléculaire.



La convection : un transport de chaleur entre une zone chaude et une zone plus froide.



Le rayonnement : une émission et une absorption d'un rayonnement électromagnétique par la surface d'un corps.



L'évaporation / Condensation : un transfert de chaleur vers un matériau pour son évaporation ; cette chaleur est restituée à la surface de condensation.

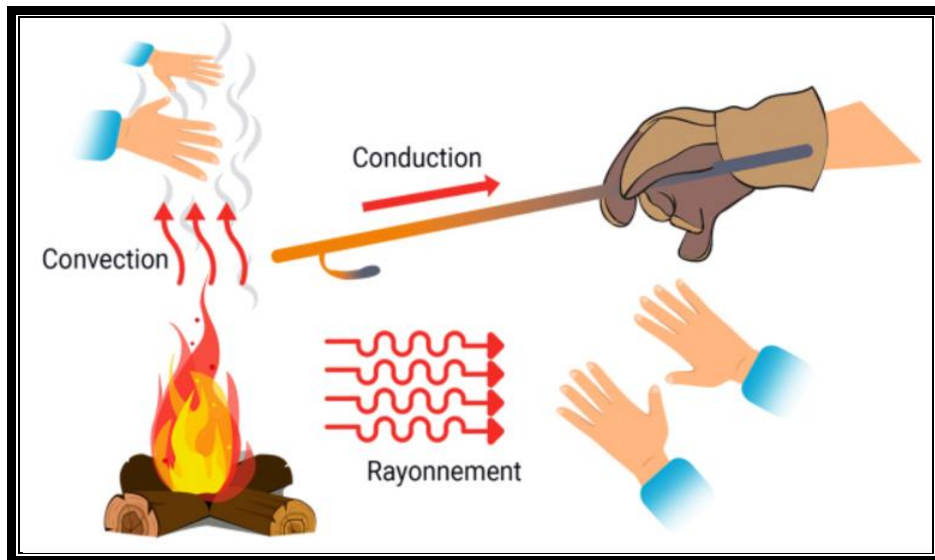


Figure 1. 2. Transfert de chaleur par convection, conduction et radiation [14]

II. Confort thermique

La notion de confort se définit en fonction de l'application, cependant, elle est liée à la sensation dans un environnement donné [15]. La notion de confort thermique est complexe, puisqu'elle est subjective, elle se situe à l'intersection des disciplines physiologiques, psychologiques, d'ingénierie et d'architecture, mais ce sont les deux dernières qui ont probablement le plus contribué au sujet depuis que le terme « confort thermique » a été inventé au début du siècle dernier [16].

1. Définition du confort thermique

Le confort thermique est utilisé pour indiquer si une personne n'a pas trop chaud ou trop froid dans un environnement thermique donné [17]. L'objectif est de fournir un environnement confortable qui ne nuit ni à la santé ni aux performances de ses occupants [18].

Plusieurs définitions du confort thermique ont été trouvées dans la littérature ; Givoni a défini le confort comme les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation sont à un niveau d'activité minimale [19]. Olgyay a défini le confort comme une zone dans laquelle l'être humain dépense le minimum d'énergie pour s'adapter à l'environnement [20]. D'après Roulé [13], le confort thermique est une notion essentiellement subjective et peut être défini comme la sensation de bien-être générale. Hensen [21] a défini le confort thermique comme un état dans lequel il n'y a pas d'impulsions motrices pour corriger l'environnement par le comportement. Selon lui, le confort ou l'inconfort thermique reflète un état général du système de thermorégulation. D'après Rohles, le confort est un état d'esprit [22]. L'ISO 7730 et L'ASHRAE définissent le confort thermique comme l'état d'esprit dans lequel s'exprime la satisfaction à l'égard de l'environnement thermique [23, 24].

2. Développement du concept de confort thermique humain

La recherche sur le confort thermique intègre plusieurs disciplines telles que l'architecture, la physique du bâtiment, la psychologie ainsi que la physiologie. L'importance de la

compréhension du confort thermique consiste à assurer des conditions satisfaisantes aux individus et à contrôler la consommation énergétique [25].

D'après Fanger, trois conditions doivent être réunies pour se sentir confortable [26] :

- La première condition : le maintien d'une température interne stable.
- La deuxième condition : l'absence d'inconfort local d'une partie du corps.
- La troisième condition : une température de la peau confortable et une non-abondance de la production de sueur.

Le confort thermique dépend de la complexité des différents mécanismes dont il dépend. Il se considère sous deux axes [27] ; le premier se base sur les facteurs physiques, la compréhension des échanges thermiques qui ont lieu entre le corps humain et son environnement, à savoir les échanges par convection, conduction, rayonnement et évaporation. Le deuxième axe se base sur la perception de l'occupant ; cette sensation de confort thermique dépend de plusieurs facteurs :

Facteurs physiologiques : le corps humain s'efforce de maintenir sa température interne autour de 37 °C, et ce, en dépit des variations internes, telles que l'activité métabolique, et des variations externes (température de l'air, vitesse de l'air, taux d'humidité, etc.).

Facteurs psychologiques : l'aspect psychologique a une grande influence sur la sensation de confort.

La température interne d'un être humain est pratiquement constante à 37 °C et n'est pas influencée par les variations importantes de la température ambiante. La température interne ne peut être maintenue constante que s'il existe un équilibre entre la production et la déperdition de la chaleur.

2.1. Transferts thermiques entre le corps et l'environnement ; L'aspect physique

La thermolyse entre le corps humain et l'environnement se fait par différents mécanismes de transferts au niveau de la peau et des voies respiratoires. Cela inclut des transferts par rayonnement, convection, conduction, évaporation et respiration [28, 29]. La figure 1.3 représente les différents transferts de chaleur entre l'être humain et l'environnement ;

Transferts par conduction

Le transfert de chaleur par conduction se fait au contact de la peau avec des objets. Lorsque l'objet est froid, nous aurons un sentiment de froid, lorsque l'objet est chaud ou isolant thermique, nous aurons une sensation de chaud ;

Transferts par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lors d'une différence de température entre la peau et les surfaces environnantes. Lorsque ces surfaces sont froides, elles nous rafraîchissent, et lorsqu'elles sont chaudes, elles nous réchauffent ;

Transferts par convection

Le transfert de chaleur par convection a lieu entre notre peau et l'air ambiant. Ces échanges par convection augmentent avec l'activité et à une vitesse de l'air élevée ;

Transferts par évapotranspiration

Le transfert de chaleur par évapotranspiration nous permet d'évacuer de la chaleur, même si les surfaces environnantes sont plus chaudes que notre peau ; l'eau s'évapore au niveau de la peau et de l'appareil respiratoire à condition que l'air ne soit pas trop humide, car l'évaporation devient alors impossible.

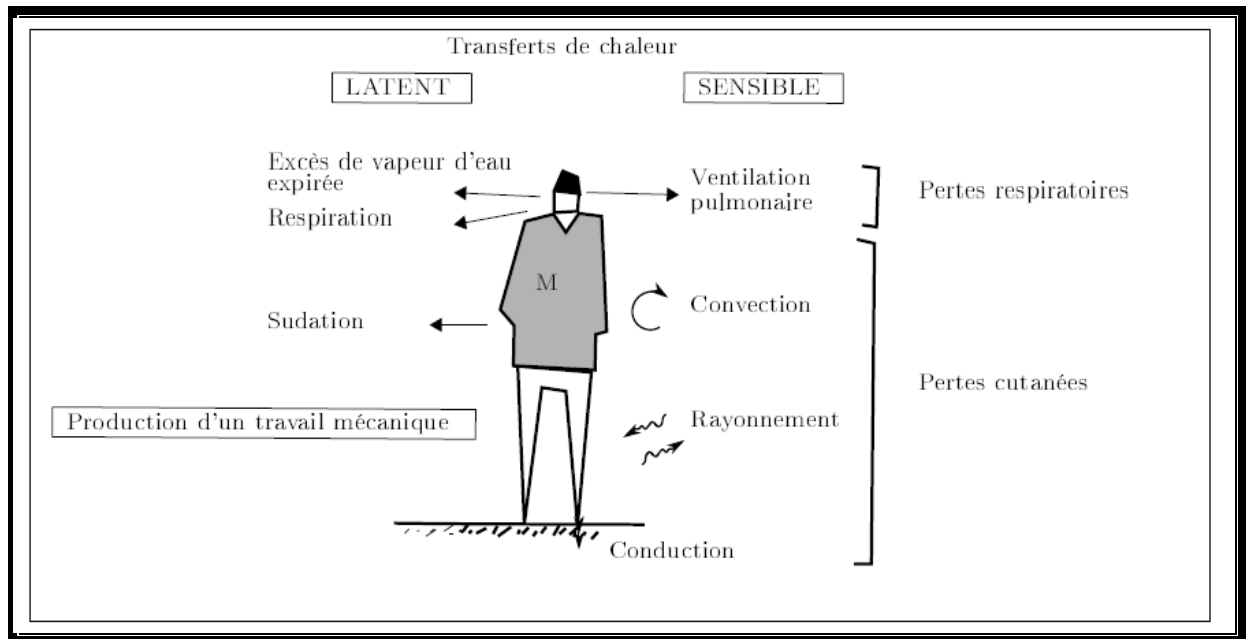


Figure 1. 3. Représentation des échanges de chaleur entre l'être humain et l'environnement [10]

2.1.1. Bilan thermique du corps humain

Le confort thermique découle du bilan thermique corporel d'un individu. La température interne ne peut être maintenue constante que s'il existe un équilibre entre la chaleur produite et celle dissipée dans l'environnement [30]. Le mécanisme de régulation interne humain vise constamment à conserver une température corporelle proche de 37 °C.

Thellier définit la thermo-physiologie « comme étant l'ensemble des échanges de chaleur entre l'homme et son environnement thermique et la façon dont les phénomènes de thermorégulation interviennent dans la modulation de ces échanges » [31].

Fanger a développé des théories sur les échanges thermiques du corps humain, ce dernier s'efforce de maintenir l'équilibre thermique afin d'avoir une température interne constante [32].

$$S = M - W - C - K - R - E - RES \dots (1)$$

Avec :

- S : Energie stockée (W/m^2)
- M : Métabolisme (W/m^2)
- W : Travail extérieur (W/m^2)
- C : Flux par convection (W/m^2)
- K : Echange par conduction (W/m^2)
- R : Flux par rayonnement (W/m^2)
- E : Echange de chaleur par évaporation (W/m^2)
- RES : Echange de chaleur par voie respiratoire (W/m^2)

Un bilan > 0 est une situation d'hyperthermie, avec un organisme qui emmagasine la chaleur.
Un bilan < 0 est une situation d'hypothermie, avec un organisme qui perd plus de chaleur qu'il n'en produit.

Un bilan $= 0$ est une situation d'équilibre thermique, avec une température corporelle stable.

2.2. La thermorégulation: l'aspect physiologique

La thermorégulation désigne un terme général regroupant les différentes réactions physiologiques inconscientes mises en jeu afin de maintenir l'homéothermie.

D'après Candas, l'être humain est homéotherme ; il maintient une température interne autour de 37°C afin de protéger ses organes sous toutes conditions climatiques, quel que soit son environnement et son activité [26, 33].

Le métabolisme (oxydation des aliments) produit de la chaleur. Le corps échange cette chaleur avec l'environnement essentiellement par convection et radiation et perd de la chaleur par évaporation des fluides corporels.

Le corps humain fait face aux contraintes thermiques internes qui représentent les variations de l'activité et externes qui représentent les variations climatiques par son système de régulation qui repose sur trois mécanismes [33] :

Les frissons : ce sont des contractions musculaires qui permettent l'augmentation de la production de chaleur métabolique.

La sudation : qui favorise les pertes thermiques par évaporation avec une augmentation de la production d'eau.

La vasomotricité : qui apporte des modifications du débit sanguin en agissant sur les échanges internes de chaleur.

Les frissons et la sudation sont des actions de contrôle autonome par ajustement de la production de la chaleur, et la vasomotricité est une action de contrôle autonome par résistance thermique interne.

2.2.1. Réactions au froid et à la chaleur

Plusieurs mécanismes sont déployés par l'hypothalamus afin de rééquilibrer le corps en situation de froid ou de chaleur (figure 1.4). Cette autorégulation du corps humain répond afin de varier l'environnement thermique. Les réactions au froid sont la vasoconstriction et les frissons, et les réactions au chaud sont la vasodilatation et la sudation [32, 33].

Réactions au froid

En premier lieu, le corps humain réagit au froid par la vasoconstriction, qui consiste à diminuer le diamètre des vaisseaux sanguins pour une réduction de l'irrigation de la peau. La vasoconstriction a pour but l'abaissement de la température et la réduction des pertes thermiques. En deuxième lieu, interviennent les frissons, qui sont des contractions musculaires permettant l'augmentation de la puissance métabolique.

Réactions au chaud

La première réaction est la vasodilatation ; le mécanisme inverse de la vasoconstriction. Dans ce cas, on assiste à une augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins afin d'élever la température de la peau et de favoriser les pertes de chaleur. La deuxième réaction au chaud est la sudation ; l'augmentation des sécrétions de transpiration augmente les pertes par évaporation.

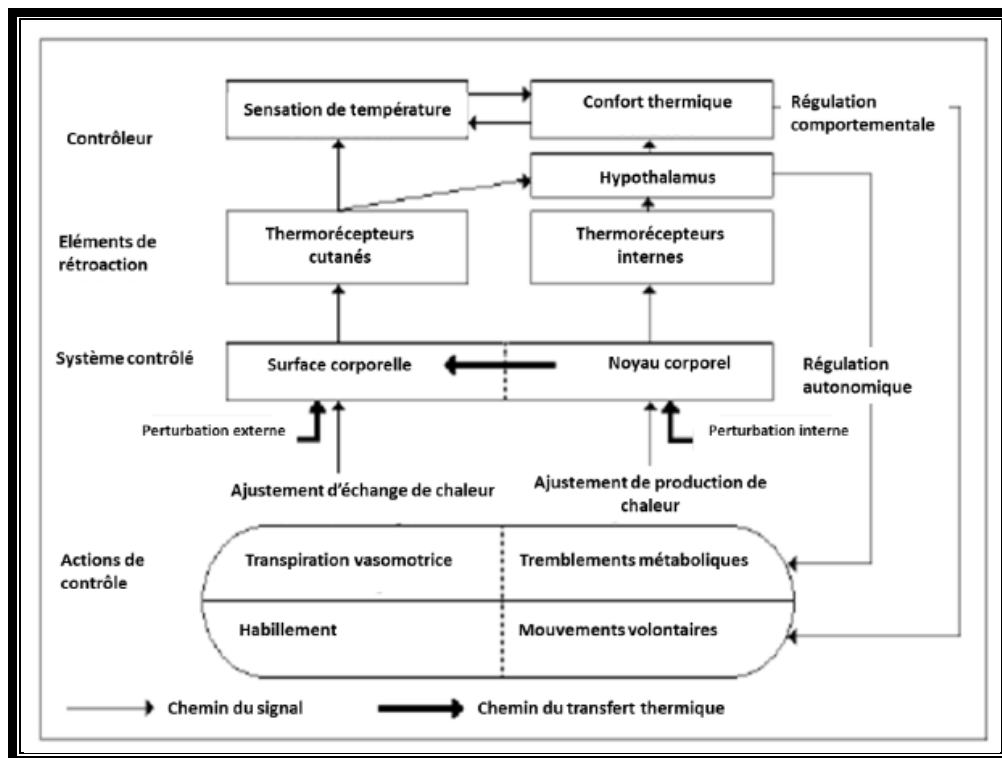


Figure 1. 4. Diagramme de la régulation autonome et comportementale de la température chez l'être humain [34]

La figure 1.4 montre quelques caractéristiques de la thermorégulation : Le système contrôlé est influencé par des perturbations internes, telles qu'une chaleur interne générée par de l'exercice, et par des perturbations externes, telles qu'une chaleur environnementale. Ces perturbations sont détectées par des thermorécepteurs cutanés ou internes, ce qui va inciter la thermorégulation et la régulation comportementale à agir. La thermorégulation agit suivant trois mécanismes : frissons, sudation et vasomotricité, quant à la régulation comportementale, elle agit suivant des mouvements involontaires et par l'habillement.

2.3. Sensation de confort : Aspect psychologique

Le confort thermique est un état subjectif, les sensations thermiques varient d'une personne à l'autre, même dans le même environnement. En effet, des personnes séjournant dans des espaces très similaires, soumises au même climat, émettent des avis très différents sur le confort thermique en raison de la combinaison d'un grand nombre de facteurs qui affectent la perception de l'être humain [35].

Pour définir la sensation de confort, il convient de se demander si l'on souhaite avoir plus chaud ou plus froid. Si on ne souhaite rien, c'est un signe de confort local. Dans le cas contraire, si on souhaite changer de climat, c'est le signe d'un inconfort.

La sensation de confort se caractérise suivant différentes échelles. La plus utilisée est l'échelle ASHRAE 55, qui se réfère à une échelle subjective de sensation thermique comportant 7 niveaux allant du "très chaud" au "très froid".

3. Paramètres du confort thermique

Le confort thermique est fortement lié à l'équilibre thermique du corps. Cet équilibre est influencé par des paramètres environnementaux et des paramètres individuels [34]. La figure 1.5 présente les différents paramètres du confort thermique.

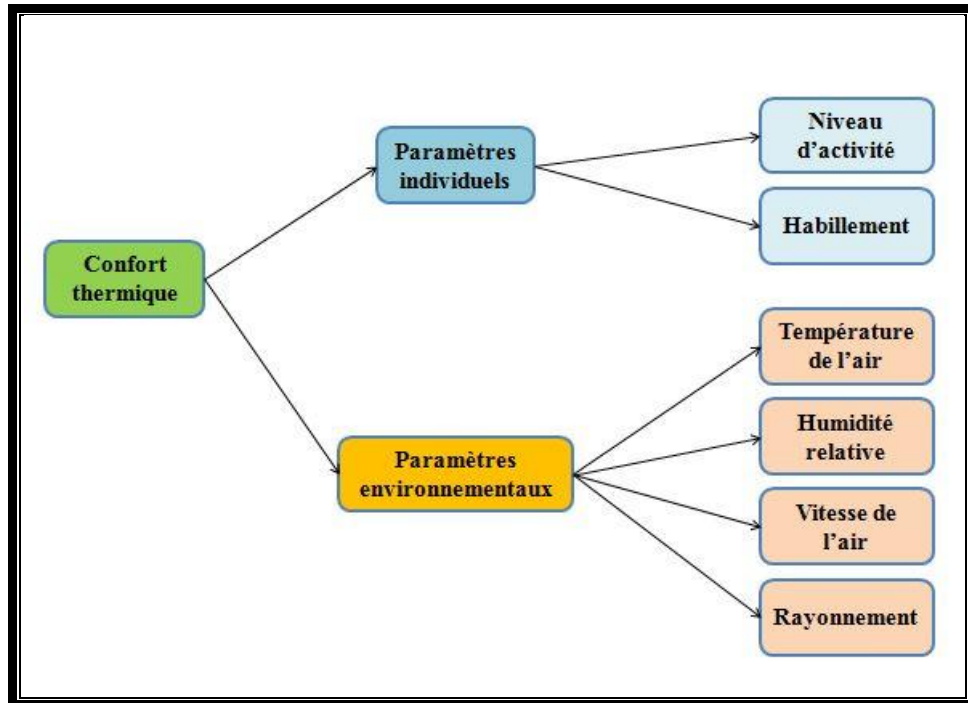


Figure 1. 5. Paramètres du confort thermique

3.1. Paramètres environnementaux

L'état du corps est fortement lié aux conditions thermiques de l'espace, la sensation de confort est affectée par des paramètres environnementaux, ces derniers ont un impact sur l'équilibre thermique du corps [36, 37].

Il y a quatre principaux paramètres physiques qui caractérisent l'environnement thermique et déterminent la sensation de confort thermique :

3.1.1. Température de l'air

Appelée aussi la température ambiante (T_a), la température de l'air est un paramètre environnemental essentiel, car c'est le plus influent sur la sensation de confort thermique.

Dans les espaces intérieurs, la température ambiante caractérise l'environnement immédiat de l'individu et la notion de confort thermique est liée à la valeur de la température de l'air.

3.1.2. Humidité relative

Elle représente la quantité de vapeur d'eau dans l'air et s'exprime en %. Lorsque le taux d'humidité est à 0 %, l'air est parfaitement sec, et lorsque ce taux est à 100 %, l'air est saturé en eau. Il est recommandé de maintenir l'humidité relative entre 40 et 60 %.

3.1.3. Vitesse de l'air

Exprimée en m/s, ce paramètre influence les échanges par convection et joue un rôle dans la sensation de confort. Une vitesse dépassant 0,2 m/s représente une source d'inconfort, car elle

augmentera les pertes de chaleur par convection. Néanmoins, dans le bâtiment, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas 0,2 m/s.

3.1.4. Température moyenne radiante (rayonnement)

Le rayonnement représente la température des parois environnantes, c'est un indicateur important dans la sensation du confort, car il influence les échanges thermiques avec le corps humain.

3.2. Paramètres individuels

Lors du calcul des conditions de confort, des paramètres liés à l'individu doivent être pris en considération : Le niveau d'activité et la résistance thermique des vêtements [34, 38].

3.2.1. Niveau d'activité

L'activité définit le métabolisme d'un individu. Dans une activité physique intense, elle peut être source d'inconfort. La figure 1.6 donne des valeurs caractéristiques du métabolisme en fonction de l'activité. Le métabolisme se mesure en « met », qui est l'abréviation de métabolisme. 1 met = 58,2 W/m² de surface corporelle. Un individu assis inactif présente un taux métabolique de 1 met, tandis qu'un individu qui marche à 5 km/h présente un taux métabolique de 3 met.

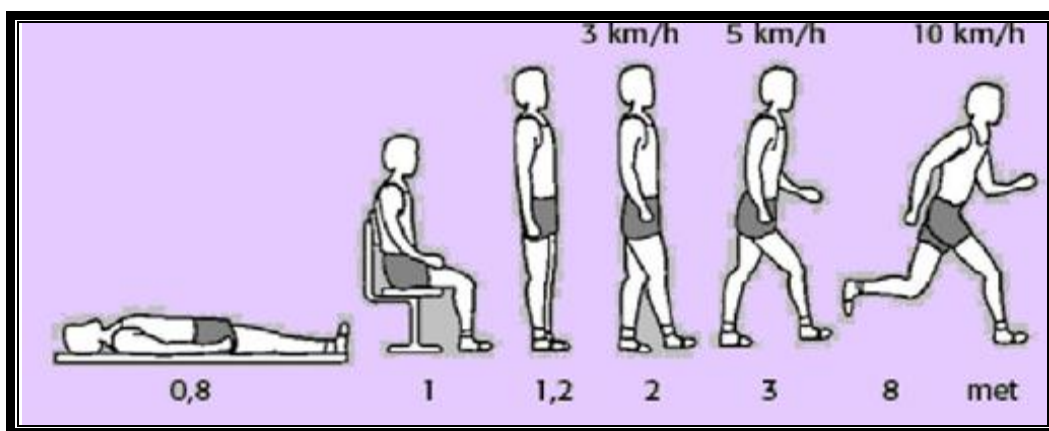


Figure 1. 6. Taux métabolique en fonction de l'activité

3.2.2. Isolement thermique des vêtements

Les vêtements constituent une protection contre l'environnement extérieur. Celui-ci est donc différent selon les zones climatiques. L'habillement isole la peau et présente une résistance thermique aux échanges par convection et rayonnement entre la surface de la peau et l'environnement.

Le degré de résistance des vêtements se mesure en « clo », qui est l'abréviation du mot clothing : 1 clo = 0,15 m²K/W. La figure 1.7 donne des valeurs caractéristiques de l'isolement thermique des vêtements. Un short présente un isolement thermique de 0,1 clo, tandis qu'un habit léger de travail présente un isolement thermique de 0,8 clo.

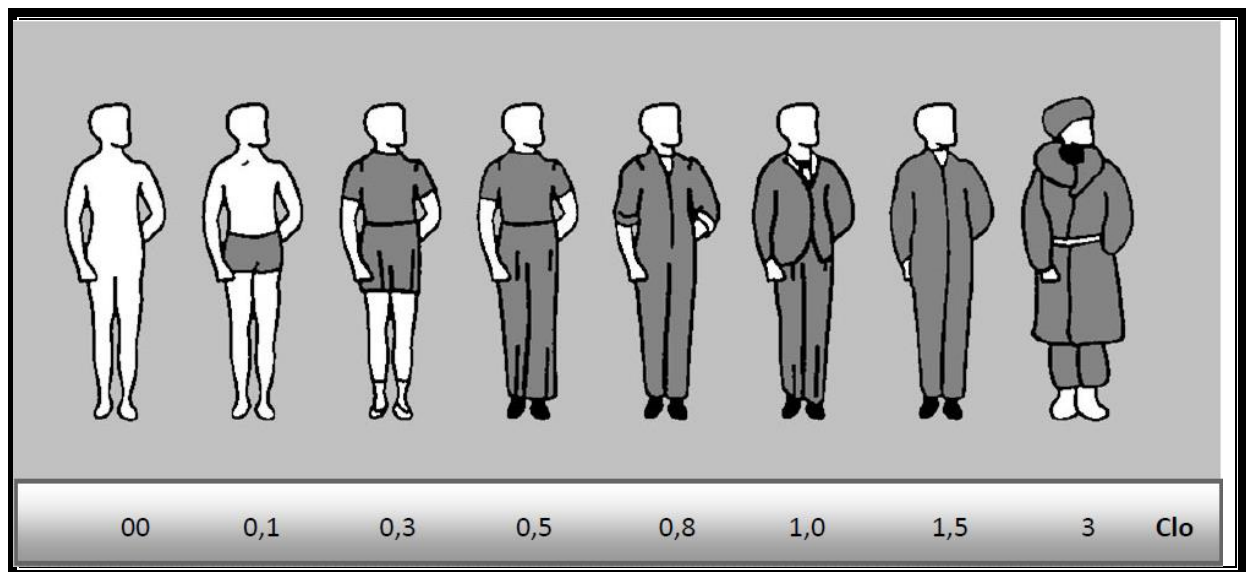


Figure 1. 7. Isolement thermique dû aux vêtements

4. L'inconfort thermique

L'inconfort thermique peut être dû au réchauffement ou au refroidissement du corps tout entier, tout comme il peut être partiel ; c'est-à-dire qu'une partie est trop chaude ou trop froide. L'inconfort est généralement considéré dans les cas suivants[39, 40] :

- Différence verticale de la température : l'écart entre la température au niveau des pieds et celle au niveau de la tête ne doit pas dépasser 3 °C.
- Sol chaud ou froid : un inconfort au niveau des pieds est ressenti dans le cas d'un sol trop chaud ou trop froid, la température du sol doit se situer entre 17 et 26 °C.
- Asymétries de la température radiante : une sensation d'inconfort peut être causée par des parois chaudes ou froides, ce qui influence les échanges thermiques avec le corps humain. Lorsque nous sommes à 1 m d'une paroi, l'écart entre la température radiante de cette paroi et celle de la paroi opposée ne dépasse pas 8 °C.
- Présence de courant d'air : c'est la principale source d'inconfort local. La vitesse de l'air à l'intérieur d'un habitat doit être inférieure à 0,35 m/s.

5. Mesure du confort thermique

La mesure du confort thermique dépend des conditions environnementales et individuelles. De nombreux travaux sur le confort thermique ont permis d'établir de multiples modèles. Le plus couramment utilisé dans les normes de confort est le modèle de Fanger.

Fanger a identifié au cours des années 1970 une approche analytique qui utilise des données provenant d'études en chambre climatique pour évaluer le confort thermique.

Cette technique offre la possibilité d'établir de manière analytique le confort thermique et de présenter les conditions climatiques jugées adéquates. Pour cela, Fanger a développé deux indices d'évaluation des conditions du confort thermique, notamment le PMV qui prédit la

sensation de température moyenne d'un vaste échantillon d'individus et le PPD qui indique le pourcentage d'habitants insatisfaits de l'environnement thermique.

5.1. Vote Moyen Prévisible (PMV)

L'indice PMV est utilisé pour quantifier le degré d'inconfort [41]. Il représente le vote moyen de la sensation thermique sur une échelle de sept niveaux allant du chaud (+3) au froid (-3) avec un confort qui correspond à un PMV nul, comme l'indique la figure 1.8.

Le PMV repose sur le bilan thermique du corps et dépend des paramètres environnementaux et individuels. Pour se situer dans la zone de confort, le PMV doit être compris entre (-0,5) et (0,5).

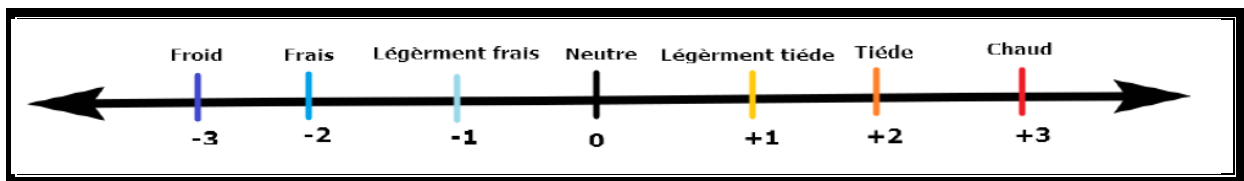


Figure 1. 8. Degrés de confort de l'indice PMV

5.2. Pourcentage Prévisible D'insatisfaits (PPD)

Étant donné que la sensation thermique n'est pas suffisante pour exprimer le confort, Fanger a mis en place l'indice PPD qui estime le pourcentage des insatisfaits vis-à-vis d'une ambiance thermique.

Le PPD prédit le pourcentage de personnes qui ont tendance à se plaindre de l'environnement, c'est-à-dire le pourcentage de personnes qui se sentent plus que légèrement chaudes ou légèrement froides. La distribution PPD est présentée dans la figure 1.9. Une situation de confort est considérée lorsque le pourcentage est inférieur à 10 %. Le PPD se calcule grâce à l'équation suivante :

$$PPD = 100 - 95 \exp [-(0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2)] \dots (2)$$

Avec :

PPD : Pourcentage prévisible d'insatisfaits

PMV : Vote moyen prévisible

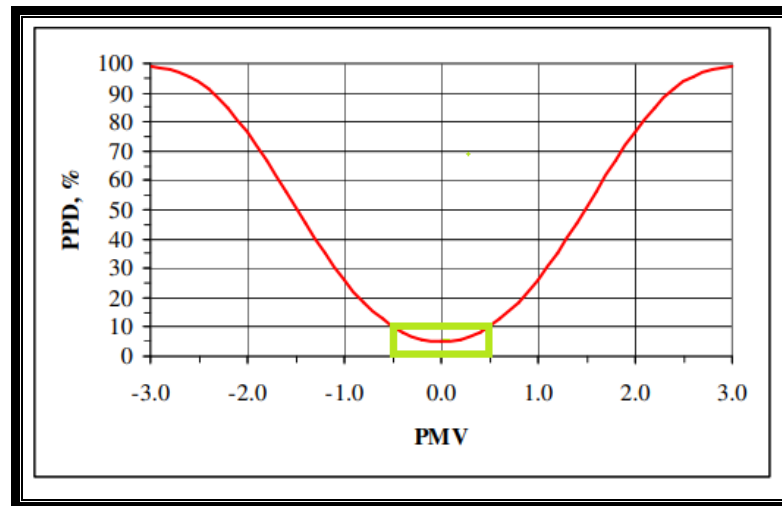


Figure 1. 9. Relation entre le PPD et le PMV [42]

Dans la pratique, un indice de température opérative a été calculé.

5.3. Température opérative (Top)

La Top est la température ressentie, c'est un indice d'appréciation de confort qui intègre deux paramètres physiques qui sont la température radiante et la température de l'air.

La température opérative est une moyenne pondérée de la température de l'air (Ta) et de la température radiante (Tr) [13]:

$$Top = \alpha Ta + (1 - \alpha) Tr \dots (3)$$

Où

$$\alpha = 0,5 + 0,25v \dots (4)$$

Avec :

- Top : Température ressentie [°C]
- Ta : Température de l'air [°C]
- Tr : Température des parois [°C]
- α : Coefficient
- v: Vitesse de l'air (m/s)

Lorsque la vitesse de l'air est nulle ou négligeable, alors :

$$Top = (Ta + Tr) / 2 \dots (5)$$

La figure 1.10 représente les températures opératives idéales en fonction de l'activité et de l'habillement, c'est-à-dire celles qui donnent un PMV nul. Plus on est habillé et plus l'activité est importante, plus la température opérative doit être basse. Les parties grises donnent l'écart acceptable de la température idéale. L'écart acceptable s'élargit au fur et à mesure que l'activité s'intensifie et que l'habillement est plus chaud.

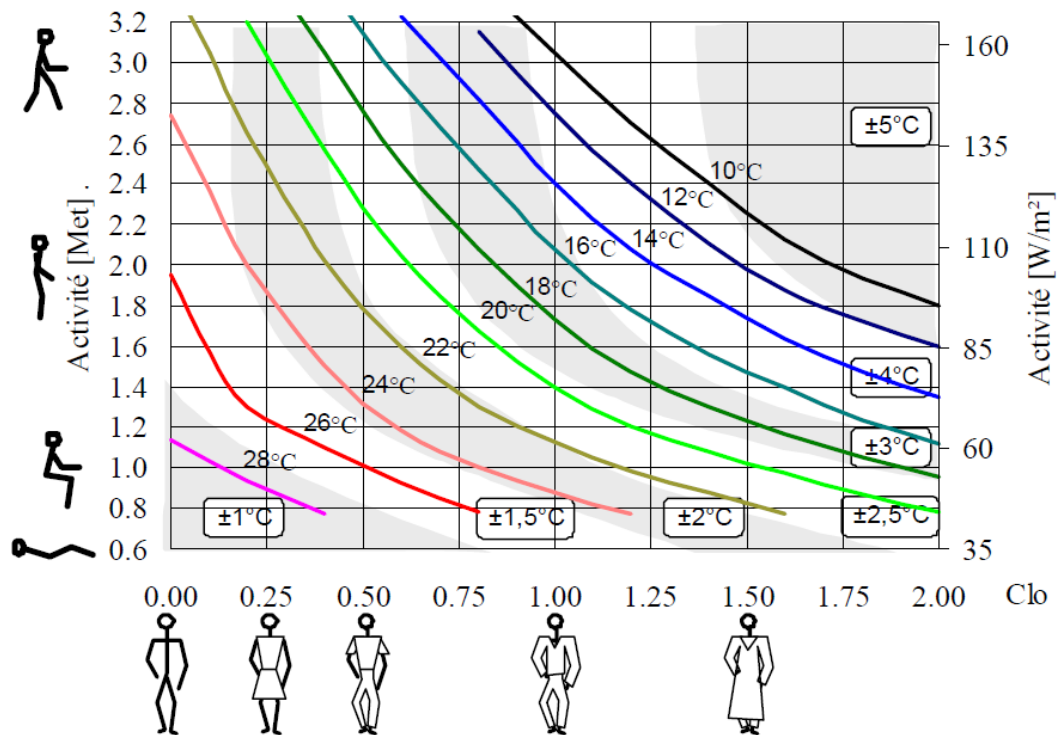


Figure 1. 10. Température ressentie idéale en fonction de l'habillement et du métabolisme [13]

6. Normes internationales sur le confort thermique

6.1. Norme internationale ISO 7730

L'ISO est une fédération mondiale qui propose des normes d'ergonomie des ambiances thermiques. Elle donne les méthodes d'évaluation et de mesure des environnements thermiques [43].

La norme ISO 7730 [32] reprend la méthode de Fanger (indices *PMV* et *PPD*) pour prédire la sensation thermique dans des environnements thermiques modérés, ainsi que pour spécifier les conditions d'environnement thermique acceptables pour le confort. L'ISO 7730 considère les environnements thermiques dans lesquels les occupants ont de nombreuses possibilités de s'adapter ou d'adapter l'environnement pour obtenir une sensation thermique plus agréable.

La norme ISO 7730 recommande les valeurs optimales suivantes [44] :

- Une température entre 20 et 24 °C en période hivernale avec un vêtement de 1 clo et entre 23 et 26 °C en période estivale avec un vêtement de 0,5 clo ;
- Une vitesse de l'air inférieure à 0,5 m/s dans la zone d'occupation ;
- Une humidité entre 30 et 60 %.

6.2. Standard ASHRAE 55

L'ASHRAE est une organisation internationale spécialisée dans le domaine du génie thermique dans le bâtiment.

Tout comme la norme ISO 7730, le standard ASHRAE 55 [23] s'appuie sur les indices PPD et PMV. Cependant, ce dernier augmente le pourcentage de personnes insatisfaites afin d'intégrer

l'effet de l'inconfort thermique local, par exemple les courants d'air et l'asymétrie de la température [7]. L'ASHRAE 55 recommande les valeurs optimales suivantes :

- Une température comprise entre 20 et 24 °C ;
- Un PPD inférieur à 10 %, un PMV entre – 0,5 et + 0,5 ;
- Une vitesse de l'air inférieure à 0,5 m/s ;
- Une humidité entre 30 et 60 % ;
- Une différence de température verticale entre les pieds et la tête inférieure à 3 °C.

L'ASHRAE 55 et la norme ISO 7730 ont été développés en parallèle et définissent les critères de confort en se basant sur le *PMV/PPD* pour une appréciation objective des conditions de travail dans un environnement donné. Ces normes évaluent le confort thermique suivant six facteurs, deux facteurs propres à l'individu (activité, habillement) et quatre autres liés à l'environnement (température, vitesse de l'air, rayonnement et humidité relative).

6.3. Réglementation Algérienne

L'Algérie mène une politique de gestion des ressources énergétiques. Cette politique se décline par le biais des textes relatifs à la maîtrise de l'énergie suivants :

- La loi N° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie, considérée comme une loi-cadre, a pour rôle d'assurer la gestion rationnelle de la demande d'énergie dans le domaine de la construction.
- Le décret exécutif N° 2000- 90 du 24 avril 2000 portant sur la réglementation thermique dans les bâtiments neufs.
- La loi 04-09 du 14 août 2004 [45], relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.

Le ministère du Logement et de l'Urbanisme élabore le premier code énergétique algérien du bâtiment en 1999 [46]. Ce document technique réglementaire (DTR) vise à renforcer la performance énergétique globale des bâtiments à usage d'habitation. Il se manifeste sous forme de deux fascicules [47]:

- Le DTR.C 3-2, qui vise la réduction de la consommation énergétique utilisée pour le chauffage, est établi sur la base du calcul des déperditions thermiques d'hiver.
- Le DTR.C 3-4, qui vise la limitation de la consommation énergétique utilisée pour la climatisation, est établi sur la base du calcul des apports calorifiques d'été.

Une nouvelle version de la réglementation thermique algérienne est éditée par le ministère de l'Habitat en 2016 ;

- DTR C3.2/4, qui préconise que la vérification de la conformité d'un bâtiment doit se faire pour les périodes d'hiver et d'été séparément.

7. Confort thermique dans l'habitat

Le rôle d'un habitat est avant tout de protéger l'homme des effets néfastes du climat et de fournir un climat intérieur confortable [48]. Le confort thermique est une exigence essentielle à prendre en considération en phase de conception d'un bâtiment.

Les conceptions bioclimatiques présentent un confort naturel, tandis que d'autres conceptions requièrent des installations techniques considérables pour assurer des conditions adéquates.

L'objectif du développement des connaissances sur le confort thermique est de contrôler l'environnement intérieur et d'améliorer la qualité de l'air.

La figure 1.11 montre l'évolution de la température dans différents bâtiments au cours de l'année. La bande verte représente la plage de température de confort, qui varie en fonction de la saison. La courbe bleue représente l'évolution de la température extérieure au cours de l'année. La courbe verte représente l'évolution de la température d'un bâtiment bioclimatique et la courbe rouge représente l'évolution de la température d'un bâtiment inadapté à son climat. Une conception bioclimatique permet d'avoir un confort naturel ; dans les pays froids, elle permet la réduction des besoins en chauffage, et dans les pays chauds, elle permet la réduction des besoins en refroidissement.

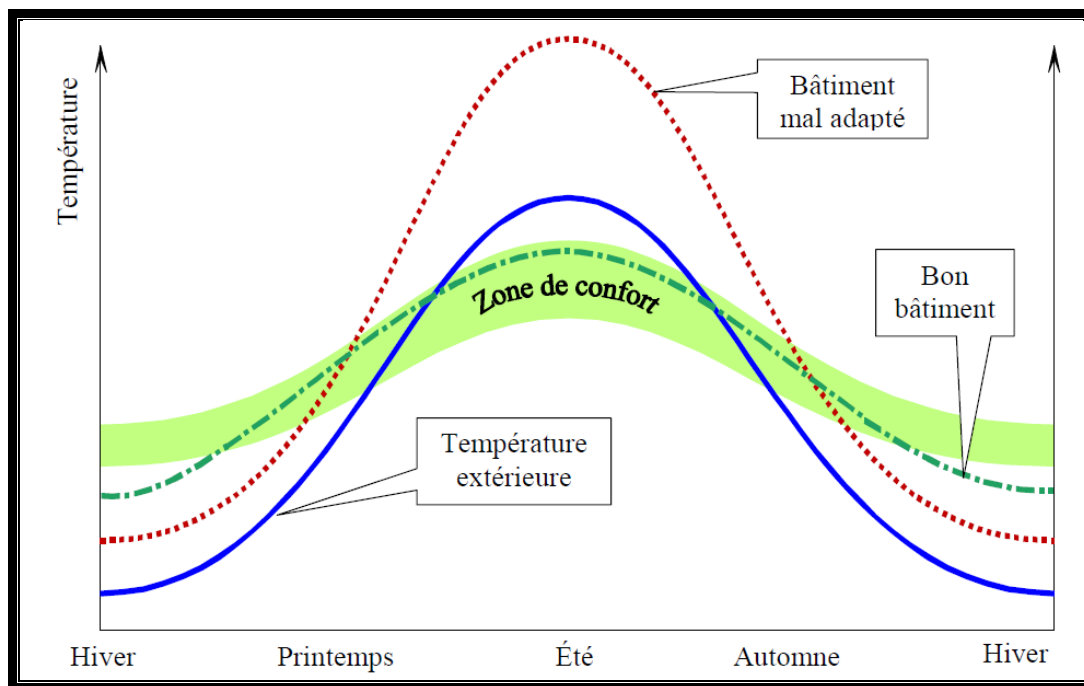


Figure 1. 11. Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année [13]

Pour garantir un environnement intérieur de qualité, il est possible d'utiliser des techniques passives et des techniques actives.

Les techniques actives utilisent des dispositifs technologiques qui visent à atteindre le but fixé par des procédures mécaniques, en utilisant de l'énergie pour pallier les défaillances du bâtiment. Les techniques passives se réfèrent à des dispositifs architecturaux et constructifs visant à atteindre le but visé de manière naturelle, sans ou faible en consommation d'énergie.

III. Techniques de rafraîchissement bioclimatiques dans le bâtiment

Le rafraîchissement bioclimatique constitue l'ensemble des techniques de réduction des sur-échauffements dans le bâtiment en période estivale. Ces techniques aident à maintenir les conditions de confort thermique intérieur, ainsi l'utilisateur aura moins recours au système de refroidissement actif (climatisation), ce qui permet de faire des économies d'énergie. Le rafraîchissement passif dans le bâtiment s'est avéré extrêmement efficace et peut grandement contribuer à la réduction des charges liées au refroidissement [49, 50].

La figure 1.12 donne une classification des techniques passives de rafraîchissement. Le rafraîchissement bioclimatique est un processus multidisciplinaire qui repose sur trois méthodes [51–53] :

- Protection des gains thermiques
- Dissipation de l'excès de chaleur
- Modulation de la chaleur

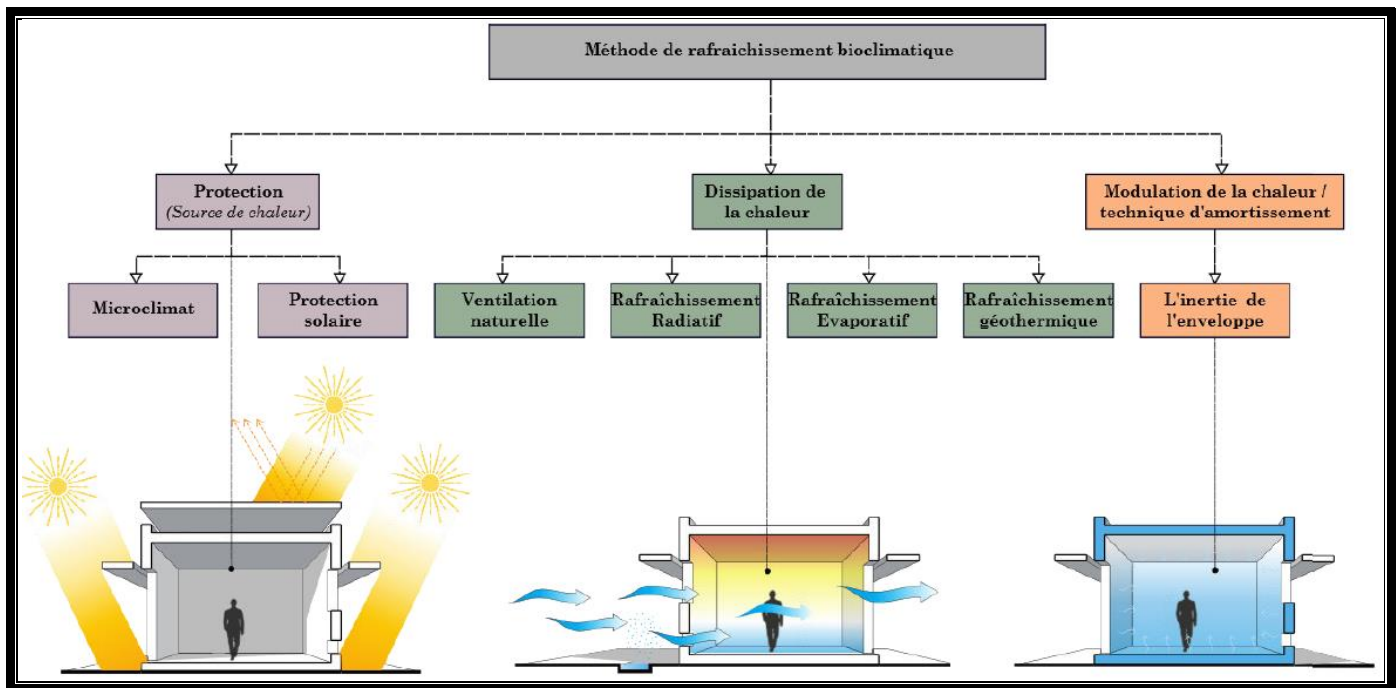


Figure 1. 12. Classification des techniques passives de rafraîchissement [54]

Le refroidissement passif présente d'importants avantages : avantages énergétiques avec une faible consommation d'énergie, avantages économiques avec les faibles coûts d'investissement, avantage écologique étant donné que ce sont des techniques passives [55].

1. Protection des gains thermiques

Cette technique s'appuie sur la réduction des gains de chaleur directs, cela consiste à empêcher la chaleur de pénétrer dans le bâtiment. La protection des gains thermiques est la première mesure qui permet d'obtenir des conditions de confort intérieur ; elle doit être réfléchie au cours de la phase de conception du bâtiment, et ce, en se référant aux principes de l'architecture bioclimatique.

La protection contre les gains de chaleur externes peut se faire par l'amélioration des conditions microclimatiques d'un bâtiment ou par un contrôle solaire.

1.1. Microclimat

Le climat représente les conditions atmosphériques d'une grande région et le microclimat (figure 1.13) est un modèle climatique à petite échelle résultant de la topographie et de la structure du site, ainsi que de l'urbanisation. Le microclimat constitue la variation des

conditions atmosphériques autour d'un bâtiment. Le climat local est défini par les quatre paramètres suivants : la température, l'humidité, les vents et le rayonnement solaire [49, 56]. Le microclimat est influencé par la présence de la végétation et des surfaces d'eau, il est donc possible de le modifier avec des aménagements paysagers appropriés [57].



Figure 1. 14. Image d'un microclimat composé d'eau et végétations [58]

1.1.1. Végétation et landscaping

La plantation d'arbres et de végétations autour d'une habitation pour une protection du soleil avec l'effet d'ombre est une technique vieille comme le monde. La végétation contribue au refroidissement local de la zone, et ce, grâce au processus d'évapotranspiration, dans lequel la chaleur du microclimat est absorbée. La présence de végétation aide à abaisser la température de l'air et à augmenter son humidité [49, 57].

1.1.2. Surfaces d'eau

La présence d'eau modifie le microclimat local en abaissant la température ambiante par évaporation et par le contact de l'air chaud avec la surface d'eau fraîche (figure 1.14). Les fontaines sont couramment utilisées comme sources de fraîcheur dans les maisons du climat chaud et sec.

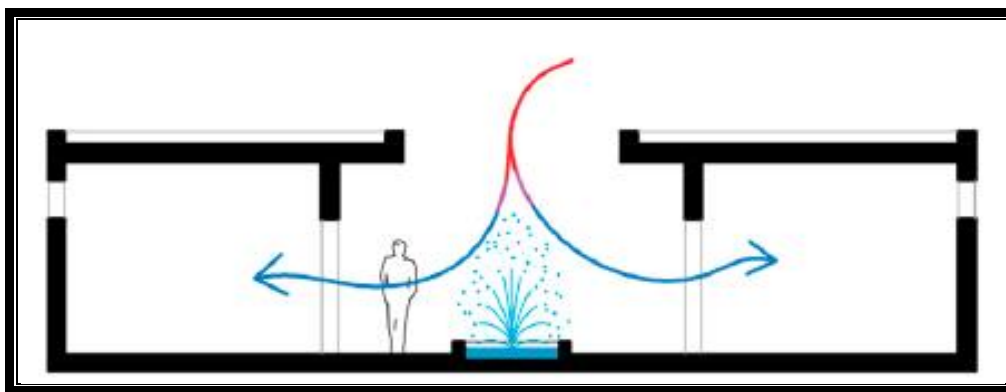


Figure 1. 15. Influence d'une fontaine sur le microclimat [59]

1.2. Protection solaire

Les techniques de protection solaire agissent sur la réduction du rayonnement solaire qui touche l'habitation. Ces techniques interviennent sur la protection des surfaces vitrées, qui sont les ouvertures, et la protection des surfaces opaques, qui sont la toiture et les façades.

1.2.1. Protection solaire des ouvertures

La pénétration à l'intérieur du bâtiment des rayons solaires cause une augmentation de la température et un inconfort thermique, il est donc important de les contrôler.

Cette technique de contrôle du rayonnement solaire qui pénètre à l'intérieur du bâtiment consiste à prévoir de petites ouvertures, à jouer sur leur orientation ou à prévoir des dispositifs de contrôle solaire tels que les dispositifs d'ombrage.

Les dispositifs d'ombrage font partie des solutions passives de protection du bâtiment contre les gains solaires ; l'effet d'ombre peut être assuré par des éléments fixes ou mobiles.

a. Dispositifs de protection fixes

Les dispositifs de protection fixes sont des dispositifs architecturaux utilisés pour créer un effet d'ombre et ainsi réduire le rayonnement solaire.

Une bonne interception du rayonnement solaire peut entraîner une réduction significative des gains de chaleur. L'interception du rayonnement solaire par l'ombrage peut être réalisée par de larges avant-toits (figure 1.15.a), des surplombs (figure 1.15.b) ou des brise-soleil fixes (figure 1.15.c), entre autres éléments de construction ombrageant, ainsi que par des structures hautes autour du bâtiment et la présence d'arbres (figure 1.15.d) [59].

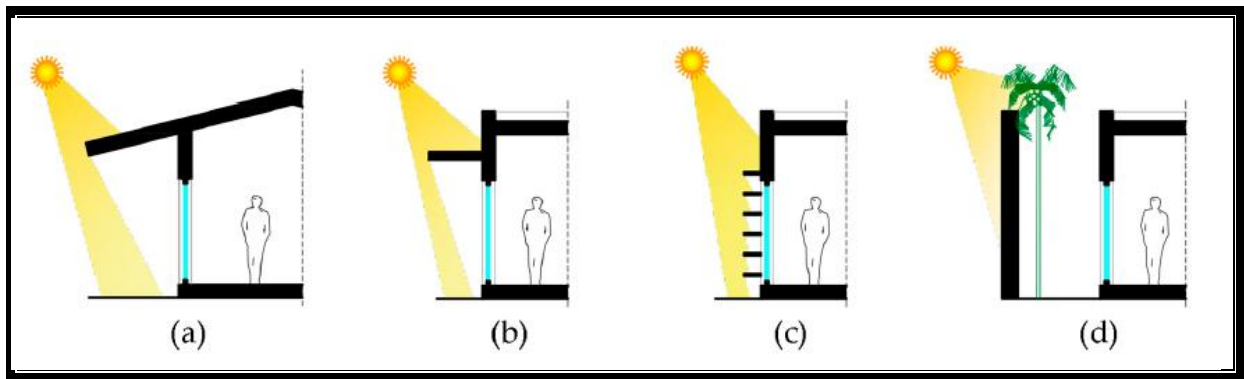


Figure 1. 16. Dispositifs de protections fixes : avant-toits (a), surplombs (b) , brise-soleil (c), végétation et structures hautes (d) [59]

a.1. Moucharabieh

Le moucharabieh (figure 1. 17) est un élément de l'architecture traditionnelle arabe utilisé pour des besoins de ventilation. Ce sont des écrans/fenêtres en bois qui fournissent de l'ombre, protègent du soleil et permettent à la brise de pénétrer dans le bâtiment pour le rafraîchir. Le moucharabieh est repris dans l'architecture moderne des climats chauds [60, 61].

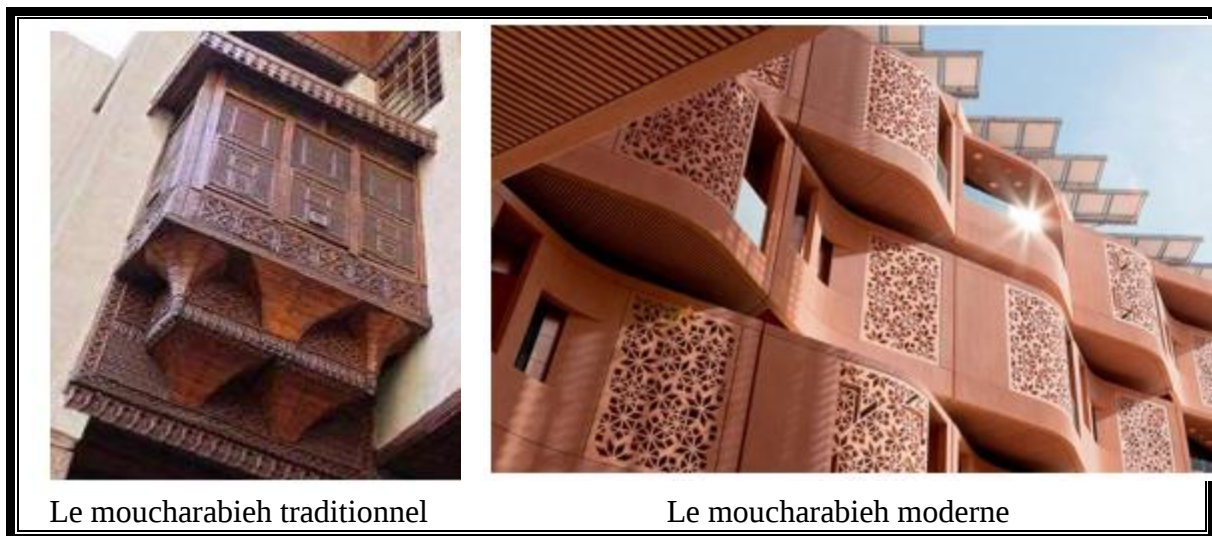


Figure 1. 18. Image du moucharabieh traditionnel et moderne [60]

b. Dispositifs de protection mobiles

Ce sont des dispositifs temporaires de protection du rayonnement solaire direct. L'effet d'ombre peut être assuré par des dispositifs de protections mobiles, tels que les stores, les persiennes et les volets, ainsi que par des plantations à feuilles caduques.

Les dispositifs de protection mobiles sont fabriqués par divers matériaux, tels que l'acier, le bois et l'aluminium, et se présentent sous diverses formes et configurations.

La figure 1.17 illustre les différents dispositifs de protections mobiles des surfaces vitrées : (a) casquettes, (b) persienne horizontale, (c) persienne, (d) stores mobiles, (e) panneaux, (f) brises-soleil, (g) auvent et (h) volets.

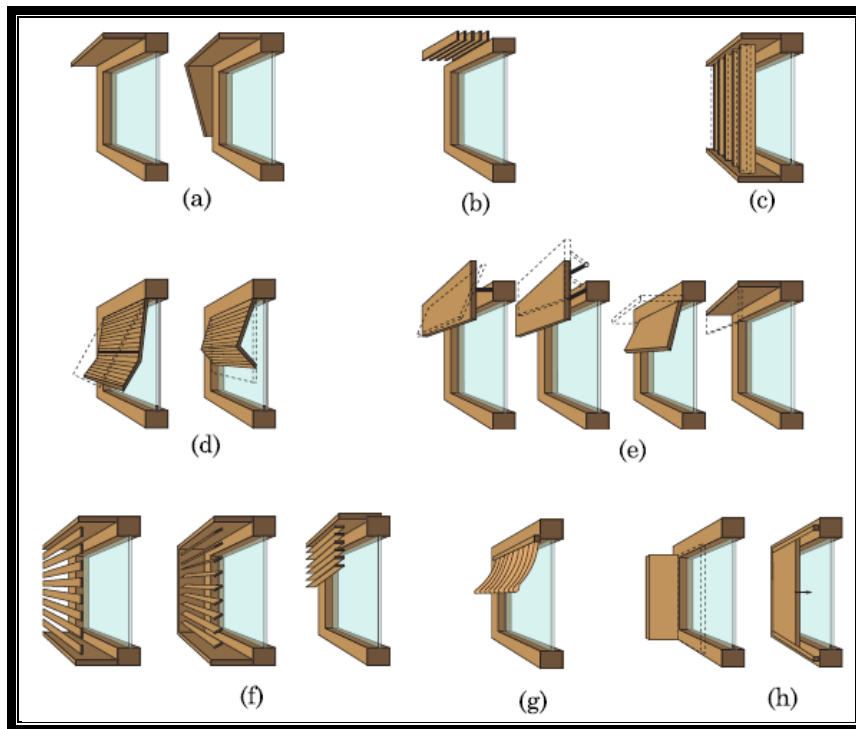


Figure 1. 19. Dispositifs de protection mobiles des surfaces vitrées [54]

b.1. Plantations à feuilles caduques

La végétation réduit efficacement le rayonnement solaire. La plantation d'arbres à feuilles caduques y contribue l'été grâce à l'ombre qu'elle projette sur le bâtiment, tout en ne gênant pas l'ensoleillement pendant la période hivernale.

La figure 1.18 montre l'impact d'un arbre à feuilles caduques sur le rayonnement solaire direct. En été, l'arbre assure un effet d'ombre sur la surface vitrée et constitue un écran de protection contre le rayonnement solaire ; en hiver, ce dernier peut facilement atteindre l'intérieur du bâtiment.

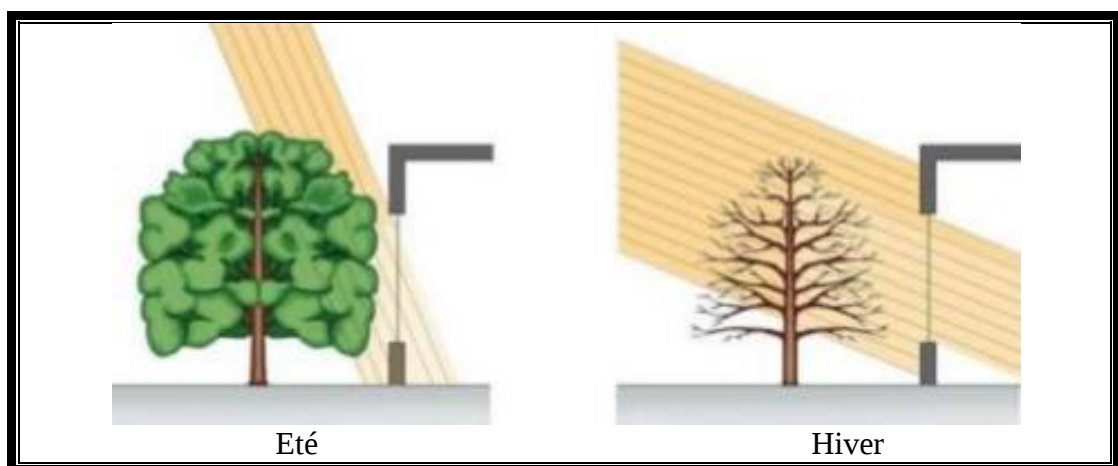


Figure 1. 20. Impact d'un arbre à feuille caduque sur le rayonnement solaire en été et en hiver

1.2.2. Protection des toitures et des façades

En plus de la protection solaire des surfaces vitrées d'un bâtiment, la protection des toitures et des façades est aussi essentielle. En été, la toiture est la surface qui reçoit le plus de rayonnement solaire, il est alors primordial de protéger ces surfaces. La protection des toitures et des façades contre les gains de chaleur externes peut se faire grâce à des techniques passives telles que les toitures et les façades végétales et l'utilisation des toitures et des façades double peau.

a. Toitures et façades végétales

L'aménagement dans le bâtiment d'une toiture et d'une façade végétales est un dispositif de protection solaire utilisant la végétation (figure 1.19). Une toiture végétale est une toiture plate ou à faible pente accueillant de la végétation à sa surface. Un mur végétal est une paroi parallèle au mur à protéger, il sert d'écran protecteur des gains de chaleur.

Le concept de toitures et de murs végétales consiste à les couvrir d'un substrat végétal. Cette végétation permet de protéger ses surfaces du rayonnement solaire, tout comme elle contribue au rafraîchissement du microclimat local par l'évapotranspiration.



Figure 1. 21. Images d'une façade et d'une toiture végétales

b. Toitures et façades double peau

La réduction des gains de chaleur solaire directe par le biais de l'utilisation de la toiture et de la façade double peau est une technique très prometteuse. En effet, cette technique repose sur l'effet de la première peau qui sert de protection pour la deuxième peau, ainsi que sur l'effet de la ventilation de l'air entre elles, comme illustré dans la figure 1.20.

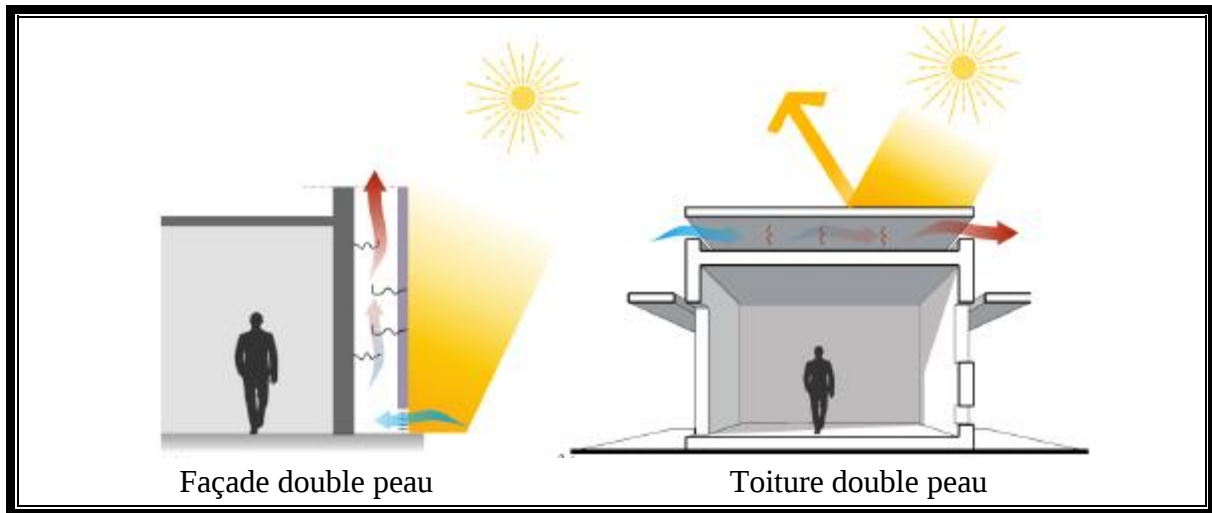


Figure 1. 22. Illustration d'une façade et toiture double peau [54]

2. Dissipation de la chaleur

La dissipation consiste à évacuer l'excès de chaleur d'un bâtiment vers un milieu environnant dont la température est plus basse, tels que l'air ambiant, l'eau et le sol [52].

Une dissipation efficace de l'excès de chaleur dépend de deux conditions :

- La possibilité d'un puits de fraîcheur environnant approprié avec un écart de température suffisant pour le transfert de chaleur.
- Mise en place d'un système efficace entre le bâtiment et le puits de fraîcheur.

Le rafraîchissement passif d'un bâtiment inclut toutes les techniques utilisant des phénomènes naturels permettant d'améliorer le confort thermique [62]. Les techniques de dissipation de la chaleur sont classées en trois catégories : le rafraîchissement géothermique, évaporatif ainsi que la ventilation.

2.1. Rafraîchissement géothermique

L'idée de dissiper l'excès de chaleur d'un bâtiment vers un milieu naturel comme le sol est connue depuis l'Antiquité. Cette technique repose sur la masse thermique du sol ; la température du sol à une certaine profondeur reste assez constante toute l'année.

La température d'un sol est influencée par plusieurs paramètres : la profondeur, l'hygrométrie et la conductivité thermique [52, 63].

2.1.1. Habitat troglodyte

Le rafraîchissement géothermique peut se faire suivant une méthode directe, où le bâtiment est directement en contact avec le sol, cas de l'habitat troglodyte (figure 1. 23)

Dans l'habitat enterré ou semi-enterré, la masse thermique du sol (terre) agit comme écran de protection contre les gains de chaleur. L'habitat enterré offre plusieurs avantages tels que le confort thermique et phonique et une sécurité élevée [64].

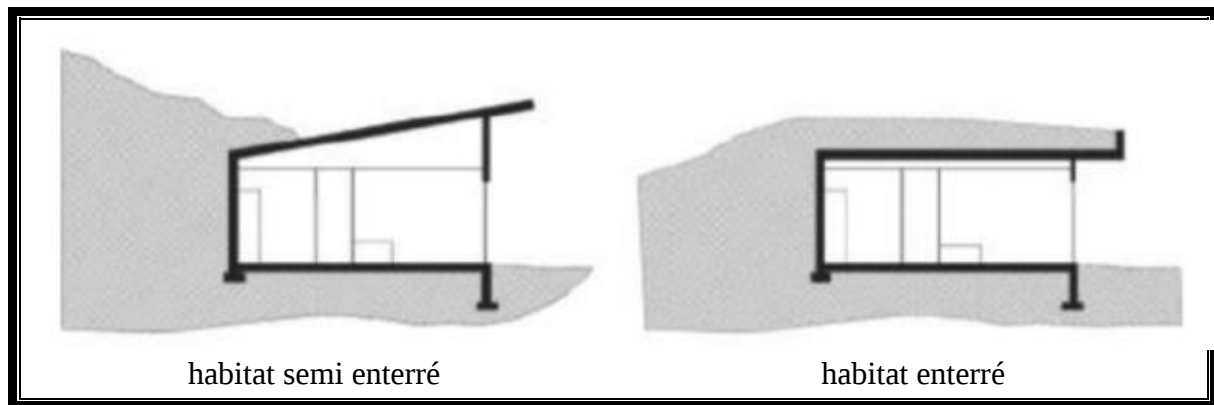


Figure 1. 24. Schémas de l'habitat enterré et semi enterré [65]

2.1.2. Puits provençal

Le rafraîchissement géothermique peut se faire suivant une méthode indirecte par la création de tunnels d'air souterrains (puits provençaux) afin d'avoir un air frais à l'intérieur du bâtiment. Les performances d'un puits provençal varient en fonction de ses caractéristiques telles que le débit d'air, le diamètre du tuyau, la profondeur à laquelle est enterré le système et les caractéristiques thermiques du sol. La figure 1.22 montre le principe de fonctionnement d'un puits provençal en maison individuelle.

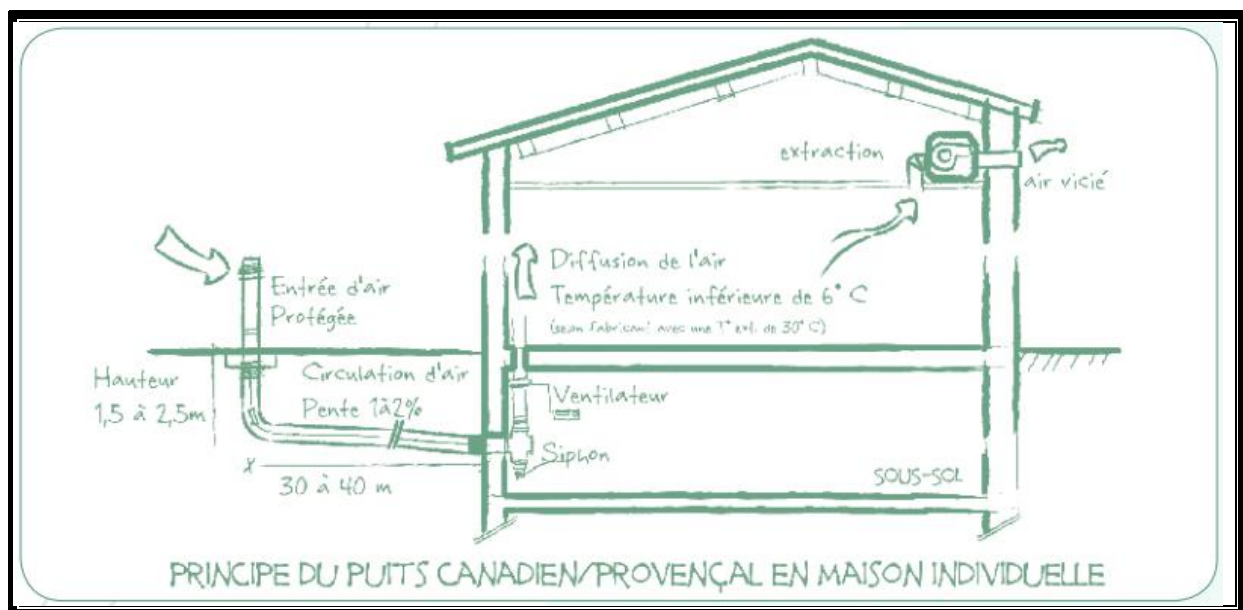


Figure 1. 25. Schéma de principe du puits provençal [55]

2.2. Rafraîchissement par ventilation

La ventilation naturelle est définie par l'ASHRAE comme l'introduction d'air extérieur dans un bâtiment sous l'effet de la différence de pression produite naturellement [66].

La ventilation naturelle constitue une alternative efficace sur le plan énergétique. Sa principale fonction repose sur deux principes :

- La fourniture d'un air intérieur sain.

- L'amélioration du confort thermique chez l'utilisateur directement avec une sensation de fraîcheur, ou bien indirectement après une ventilation nocturne.

2.2.1. Ventilation nocturne

La ventilation nocturne exploite la fraîcheur nocturne afin d'évacuer la chaleur intérieure ; en effet, elle permet de dissiper toute la chaleur accumulée au cours de la journée. Cette technique repose sur une différence de température entre un intérieur chaud et un extérieur froid. La ventilation nocturne est une méthode très efficace pour réduire la demande de climatisation dans le bâtiment [67, 68].

La figure 1.23 montre deux possibilités de ventilation nocturne naturelle. La ventilation unilatérale exploite la différence de densité de l'air intérieur, ce qui va créer un effet cheminée, alors que la ventilation transversale utilise la variation de pression induite par le mouvement de l'air.

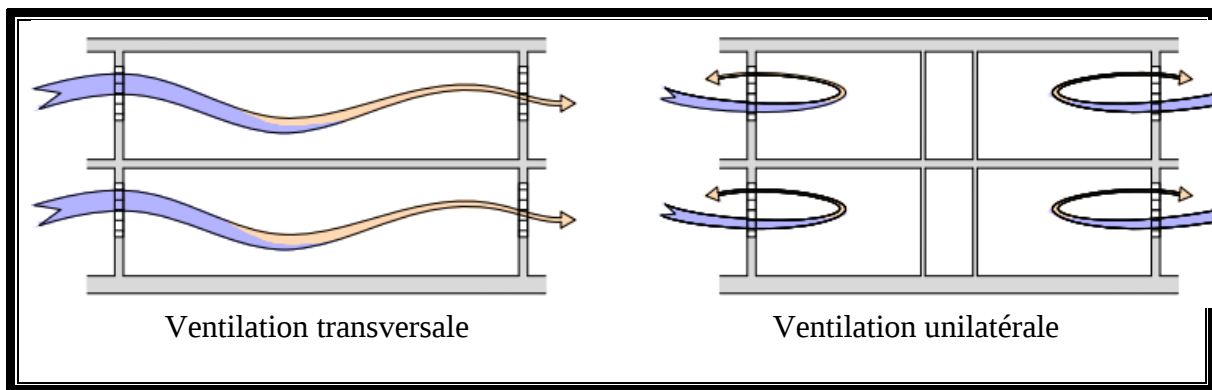


Figure 1. 26. Configurations de la ventilation naturelle [69]

2.2.2. Ventilation de confort

La ventilation de confort est essentielle pour assurer la qualité de l'air intérieur dans un bâtiment. La ventilation de confort utilise des systèmes qui permettent un rafraîchissement naturel de l'air. Parmi ces systèmes, on retrouve :

a. Tour à vent

La tour à vent (figure 1.24) est un dispositif architectural de captation des vents en hauteur dans le but de les diriger vers l'intérieur du bâtiment et de permettre une ventilation naturelle.

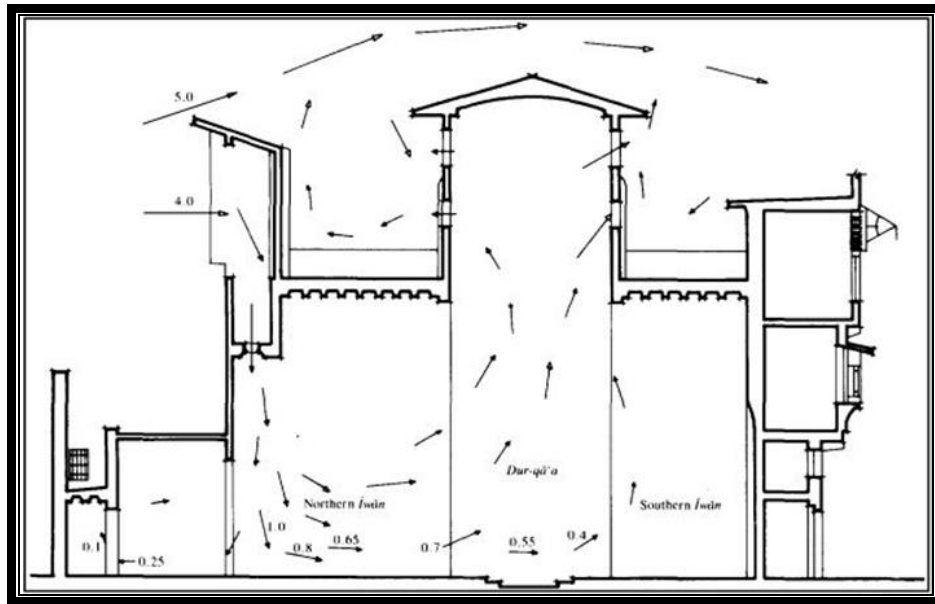


Figure 1. 27. Ventilation naturel dans la tour à vent [70]

Le principe de fonctionnement d'une tour à vent est illustré dans la figure 1.25. L'air frais entre par le capteur de la tour à vent et pénètre à l'intérieur de la pièce, l'air frais étant plus dense descend vers le bas, et l'air ambiant plus chaud et donc plus léger va remonter et sortir par l'échappement d'air par un effet cheminée.

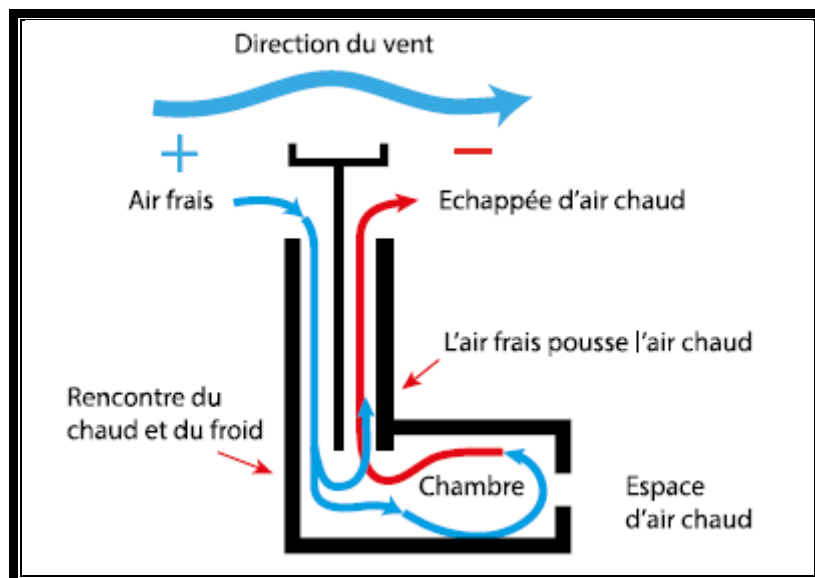


Figure 1. 28. Principe de fonctionnement d'une tour à vent [71]

b. Tirage thermique

Appelé aussi "effet cheminée", ce phénomène est engendré par la différence de densité entre deux zones d'un volume d'air favorisant un écoulement d'air, entraînant ainsi une ventilation ascendante (figure 1. 26). La densité de l'air dépend de sa température et de son taux d'humidité. L'air extérieur plus froid rentre par les ouvertures basses, alors que l'air intérieur plus chaud et

plus léger va sortir par les ouvertures situées en partie supérieure, ce qui permet une ventilation naturelle [72].

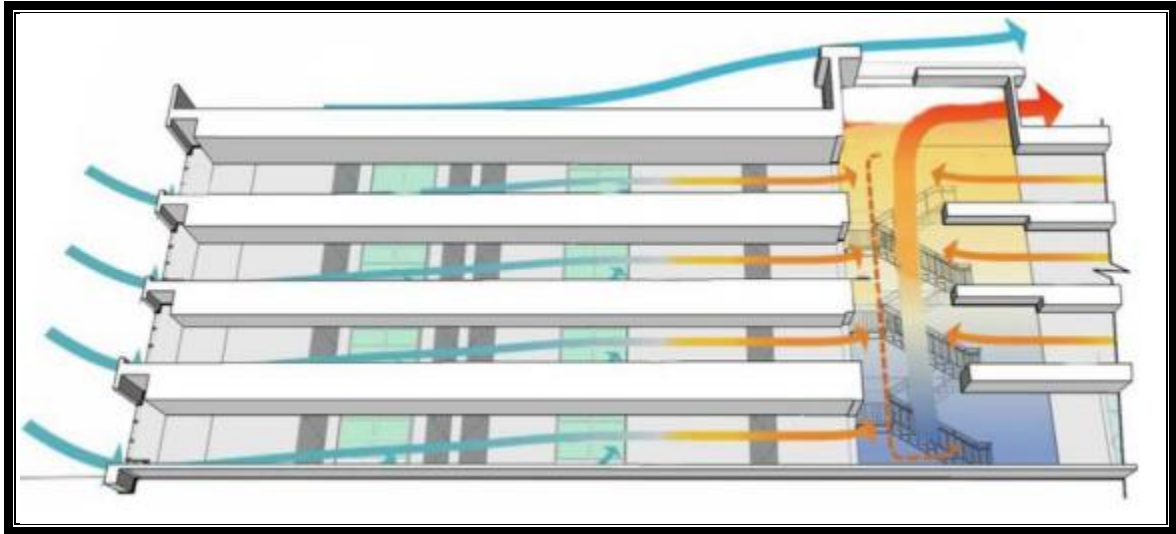


Figure 1. 29. Ventilation naturelle par l'effet cheminée [73]

c. Atrium

On retrouve notamment le système d'effet cheminée dans les atriums. Le désir d'exploiter le principe physique de l'effet de cheminée a conduit au développement d'une typologie spécifique de bâtiments qui utilise des systèmes d'atriums pour créer des flux de masses d'air afin d'obtenir le confort thermique par ventilation naturelle [74].

L'atrium est un élément de ventilation naturelle utilisé dans de nombreuses régions, notamment en Méditerranée, pour améliorer la circulation de l'air dans le bâtiment [75].

La figure 1.27 montre la ventilation naturelle dans un atrium, qui est une zone de transition qui améliore les conditions de confort en modifiant le microclimat à l'intérieur du bâtiment par la ventilation naturelle due à l'effet cheminée.

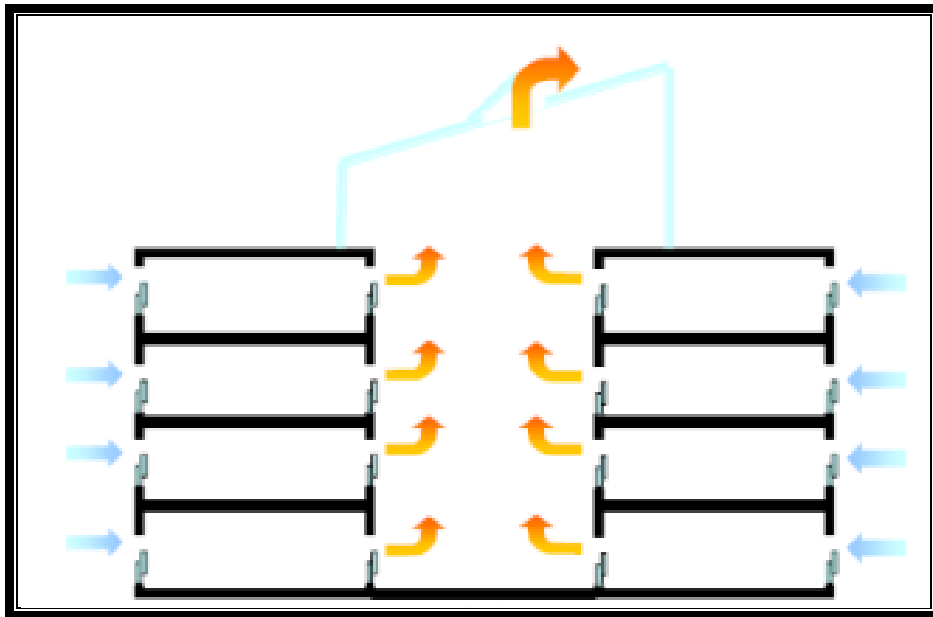


Figure 1. 30. Ventilation naturelle dans un atrium [76]

2.3. Rafrachissement par évaporation

Cette stratégie est une technique ancestrale. Dans l'architecture traditionnelle, l'évaporation de l'eau apporte une sensation de fraîcheur, abaisse la température en augmentant le taux d'humidité de l'air. L'air entre directement en contact avec l'eau, et la température de l'air diminue car l'eau absorbe sa chaleur. En conséquence, l'air est humidifié et rafraîchit l'intérieur de l'habitation [77].

La figure 1.28 (a) montre un système de moucharabieh couplé à des jarres remplies d'eau pour avoir un effet de refroidissement par évaporation à l'intérieur d'une habitation. La figure 1.28 (b) montre l'intégration de jarres remplies d'eau dans la tour à vent pour rafraîchir l'air intérieur [61, 78].

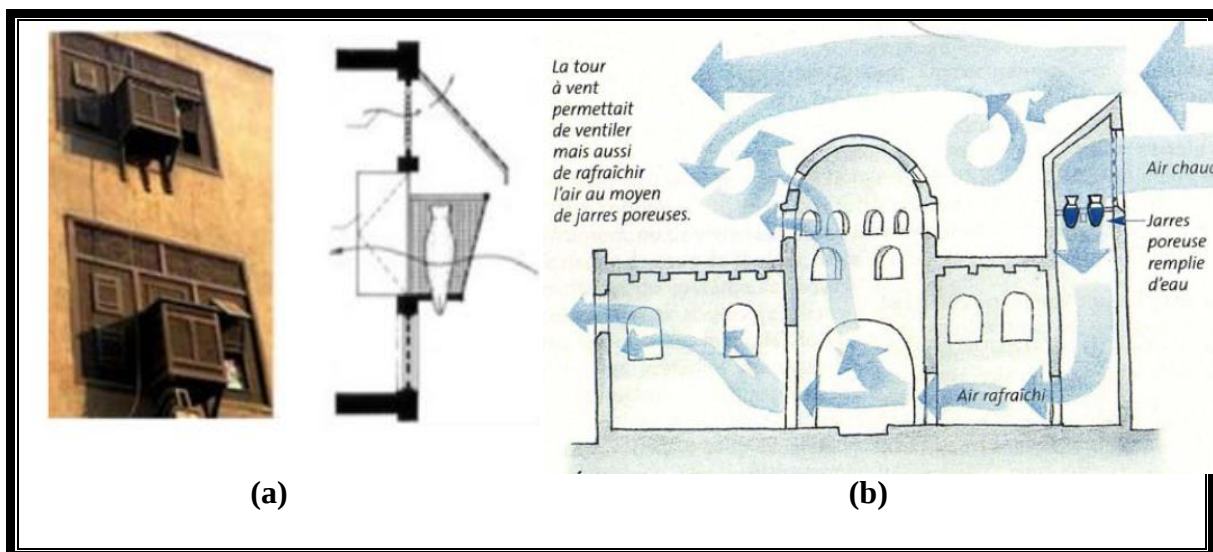


Figure 1. 31. Procédés d'humidification de l'air dans le moucharabieh et la tour à vent [79, 80]

Le rafraîchissement par évaporation est une solution très efficace pour les climats arides ; cependant, il n'est pas efficace pour le climat tropical, étant donné qu'il augmente le taux d'humidité. Le rafraîchissement par évaporation est dû au changement de phase de l'eau : son passage de l'état liquide à l'état gazeux va absorber une grande quantité de chaleur, ce qui va permettre un abaissement de la température et une modification du microclimat. La figure 1.29. Montre l'impact de la présence d'un plan d'eau sur le rafraîchissement de l'air. L'air chaud se rafraîchit par le contact avec la surface d'eau, et par conséquent, un air plus frais va pénétrer à l'intérieur du bâtiment.

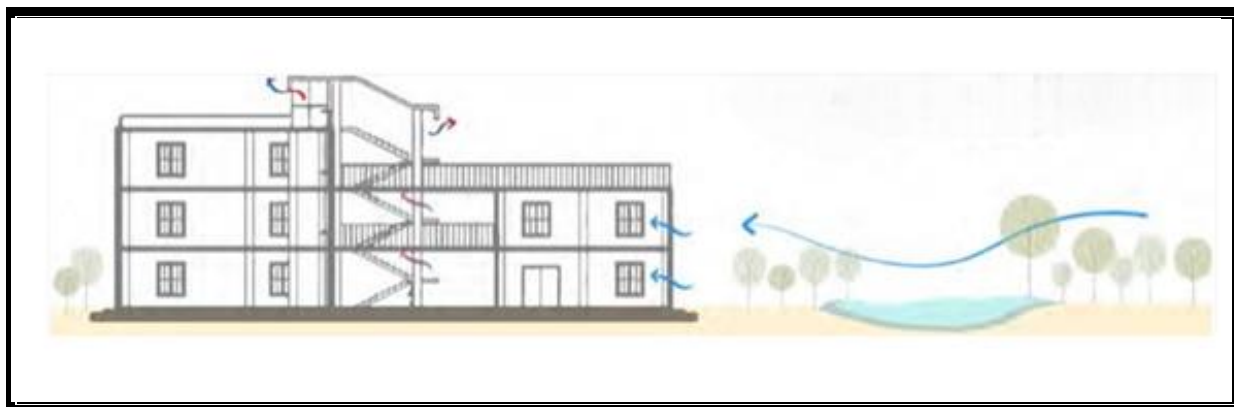


Figure 1. 32. Croquis schématique du rafraîchissement par un plan d'eau [81]

2.4. Rafraîchissement radiatif

Le réfléchissement est une technique de protection des gains du rayonnement solaire dans l'architecture traditionnelle méditerranéenne : les surfaces aux couleurs claires présentent des températures de surface réduites lors d'une exposition au rayonnement solaire, en raison de leur coefficient de réflexion élevé (albédo), réduisant ainsi l'absorption du rayonnement solaire [59]. La couleur extérieure d'un bâtiment influence son absorption du rayonnement : plus la couleur est claire, plus son facteur d'absorption est faible, plus le rayonnement est réfléchi. Ceci induit un abaissement des températures des surfaces du bâtiment. La figure 1.30. Montre les maisons traditionnelles méditerranéennes badigeonnées à la chaux afin de réfléchir le rayonnement solaire, ce qui contribue au rafraîchissement intérieur pendant la journée.



Figure 1. 33. Image des maisons blanches en méditerranéen

Dans les applications modernes de refroidissement radiatif, des peintures et des revêtements hautement réfléchissants et à forte émissivité sont développés. La réflectivité d'une surface est sa capacité de réflexion du rayonnement solaire qui varie de 0 à 1. Par exemple, un corps noir présente une réflectivité de 0. La réflectivité des revêtements hautement réfléchissants disponibles varie entre 0,8 et 0,9. L'émissivité est la capacité d'un corps à émettre un rayonnement vers l'environnement extérieur [55].

La figure 1.31 schématise le principe du refroidissement radiatif : pendant la journée, les matériaux de couverture à forte réflectivité vont minimiser l'absorption de la chaleur du soleil et maximiser le rayonnement de la chaleur vers le ciel. Pendant la nuit, l'utilisation de films à haute émissivité favorise la libération de la chaleur pendant la nuit vers la voûte céleste.

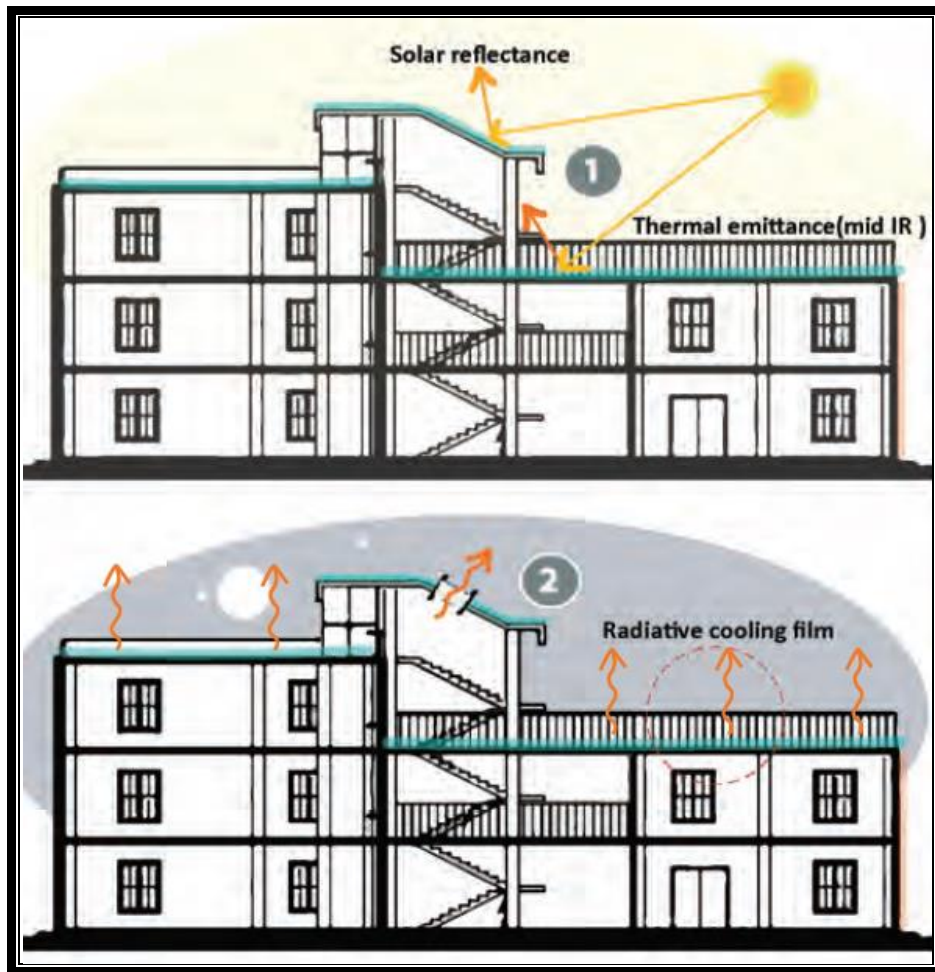


Figure 1. 34. Schéma du refroidissement radiatif [81]

3. Modulation de la chaleur avec l'inertie thermique

L'inertie thermique d'un matériau est liée à sa capacité thermique. Le terme « masse thermique » est couramment utilisé dans le secteur des matériaux, car la capacité thermique des matériaux de construction dépend souvent fortement de leur masse.

3.1. Modulation de la chaleur avec le stockage d'énergie thermique

Cette méthode repose sur le stockage des gains thermiques dans la structure du bâtiment ; en effet, l'énergie consommée pour le chauffage et le refroidissement ne cesse d'accroître. Le stockage d'énergie thermique peut jouer un rôle important dans l'équilibre de cette demande. Le stockage d'énergie thermique représente une technique prometteuse pour l'amélioration de l'efficacité des énergies renouvelables [82, 83]. En ce qui concerne l'impact sur l'environnement, l'utilisation de ces SET permet de réduire les émissions de CO₂ de 5,5 % [84]. Les avantages de l'utilisation du SET sont : l'augmentation de l'efficacité, la réduction des coûts d'investissement, une fiabilité globale, ainsi qu'une moindre pollution de l'environnement (diminution des émissions de CO₂).

Il existe plusieurs méthodes de stockage d'énergie sous forme de chaleur. L'énergie peut être stockée sous deux formes : la chaleur sensible et la chaleur latente. Ces méthodes sont utilisées dans de nombreuses applications pour l'exploitation du stockage d'énergie thermique dans les bâtiments [85–88].

3.1.1. Stockage par chaleur sensible

De multiples études ont montré que l'ajout de masse thermique peut réduire les fluctuations de température [89]. Les matériaux de construction traditionnels à forte inertie thermique réduisent le taux de transfert de chaleur et atténuent les fluctuations de la température intérieure. La figure 1.32 montre l'influence de l'inertie thermique des matériaux de l'enveloppe sur la température intérieure. Lors de l'utilisation d'une enveloppe à faible inertie thermique, la température intérieure avoisine la température extérieure. Lors de l'utilisation d'une enveloppe à forte inertie thermique, la température intérieure est écrêtée, avec un déphasage important.

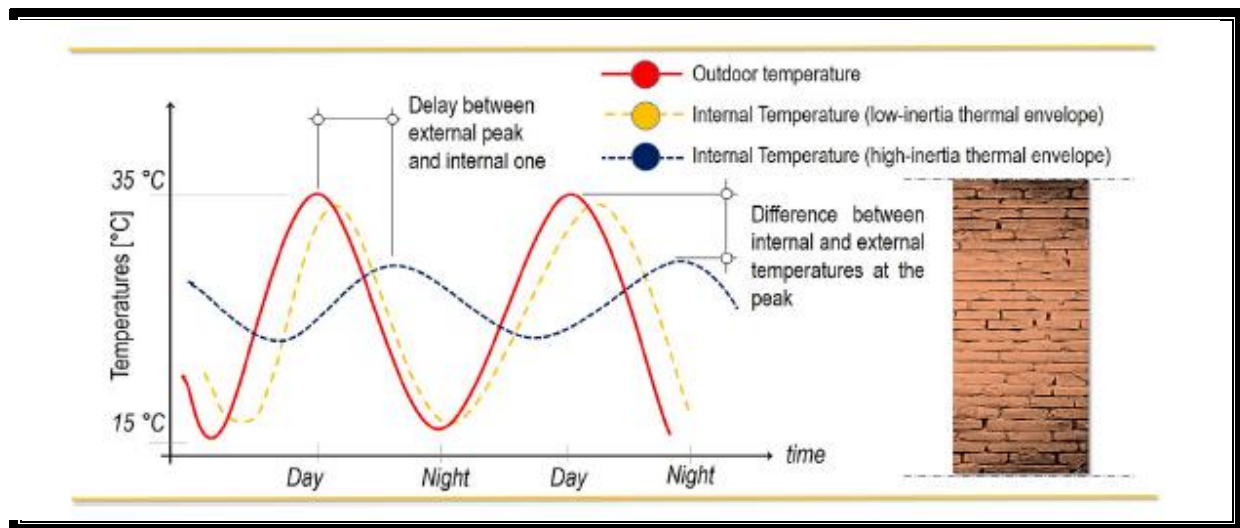


Figure 1. 35. Influence de l'inertie thermique des matériaux de l'enveloppe du bâtiment sur la température intérieure [90]

Le SET par chaleur sensible se fait par augmentation ou diminution de la température d'un milieu de stockage : la chaleur est stockée/restituée par modification de la température. La chaleur emmagasinée dépend de la chaleur spécifique du matériau [91, 92]. Le SET par chaleur sensible utilise un stockage passif de l'énergie thermique ; cependant, cette technique nécessite un grand volume de matière [93].

Le stockage par chaleur sensible est un moyen direct de stockage d'énergie, du fait qu'il ne nécessite pas la conversion de la forme d'énergie. Les techniques de stockage par chaleur sensible dans les matériaux de construction sont basées sur l'exposition directe à un environnement interne ou externe [92, 94]. Le tableau 1.1 donne les caractéristiques thermophysiques de quelques matériaux de construction.

L'énergie emmagasinée correspond à l'augmentation de l'enthalpie qui dépend de :

- L'élévation de la température,
- La chaleur spécifique du matériau,
- La masse du matériau.

$$Q_{\text{sensible}} = m \cdot Cp \cdot \Delta T \dots (6)$$

Avec :

m : Masse (kg)

C_p : Chaleur spécifique (J/ kg.K)

ΔT : Température (°C)

Tableau 1. 1. Caractéristiques thermophysiques de quelques matériaux de construction

matériau	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Conductivité thermique (W/m.K)	source
Plaque de plâtre	800	1090	0.17	[95]
	950	840	0.16	[96]
	700	1000	0.21	[97]
	2800	896	0.25	[98]
	1200	837	0.32	[99]
Brique	1800	837	/	[100]
	1698	840	0.69	[101]
	1820	/	0.697	[102]
	1800	880	0.81	[103]
	1976	835	0.77	[104]
	1600	840	1.2	[105]
Verre	2500	837	0.76	[106]
	2300	836.8	1.046	[107]
	2500	840	0.76	[108]
	2000	950	1.25	[109]
Béton	2500	1000	2.5	[110]
	2240	900	1.95	[111]
	2200	850	1.6	[112]
	2300	1000	1.25	[113]
	2450	920	1.750	[114]
Gypse	1050	1050	0.33	[106]
	1000	1000	0.4	[98]
	1500	800	0.3	[115]
Granite	2530-2620	600-1200	2.8	[116]
Marbre	2610-2670	1470	3.1	[115]
	1500-2800	1000	0.85-3.5	[117]
Argile	1458	879	/	[100]
	1600	1000	0.8	[118]
	1900	837	0.85	[105]
Bois	700	2390	/	[100]
	800	2093	0.04- 0.17	[87]
	700	1600	0.18	[117]
Air	1.13	1006	0.027	[119]

	1.18	1005	0.026	[120]
Plâtre	500	1880	0.1	[121, 122]
	1800	840	1	[123]
Plâtre léger	600	1000	0.16	[124]
Plâtre dense	1300	1000	0.5	[124]
Plaque de gypse	950	1000	0.2	[125]
	640	1150	0.16	[121, 122]
	800	1090	0.16	[126]
	1441	1.088	0.46	[127]
Mortier	2800	896	0.88	[128]
ciment	1800	1000	1	[87]
	1762	840	0.721	[129]
Béton armé	1650	920	0.72	[128]
	2200	850	1.5	[130]
Terre	1460	880	1.28	[124, 128]
Plaque PVC	1379	1004	0.16	[105]
Plaque polyuréthane	30	837	0.03	[105]
Sable	1555	800	/	[129]
	1600	800	0.25	[131]
Polystyrène	25	1380	0.04	[99]
Laine minérale	30	1030	0.04	[132]
Adobe	1600	920	0.95	[118]
Brique d'argile	1500	879	0.64	[133]
Brique Cuite	1820	880	0.811	[129]

3.1.2. Stockage par chaleur latente

Le stockage par chaleur latente est une alternative pour le SET, du fait de sa capacité élevée de stockage d'énergie par unité de masse, et une des approches les plus efficaces pour faire des économies énergétiques [134–136]. Lors du stockage par chaleur latente, l'énergie est emmagasinée ou restituée par le matériau pendant le changement d'état. Le stockage latent implique un transfert de chaleur dû au changement de phase dans un matériau approprié et à une température spécifique. Pendant cette transition solide/liquide, liquide/gaz et solide/solide, l'énergie emmagasinée correspond à l'augmentation de l'enthalpie qui dépend de :

- La masse du matériau.
- Sa chaleur latente.

$$\Delta Q_{\text{latent}} = m.L \dots (7)$$

Avec :

m : Masse (kg)

L : Chaleur latente (J/g)

Une comparaison entre le stockage par chaleur sensible et par chaleur latente est donnée dans le tableau 1.2.

Tableau 1. 2. Comparaison entre le stockage par chaleur sensible et par chaleur latente [82, 92, 93, 137]

Chaleur sensible	Chaleur latente
• Capacité de stockage entre 10 et 50 kWh/t, avec un rendement entre 50 et 90 %. • Densité énergétique moyenne du stockage sensible des matériaux est d'environ 100 MJ/m³. • Réduction des pertes de conversion • Masse de stockage relative d'environ 15. • Volume de stockage relatif d'environ 11.	• Capacité de stockage entre 50 et 150 kWh/t, avec un rendement entre 75 et 90 %. • Densité énergétique moyenne du stockage latent des matériaux est d'environ 300-500 MJ/m³ sur une plage de température réduite. • Stockage d'une grande quantité de chaleur sans élévation de la température. • Masse de stockage relative d'environ 1. • Volume de stockage relatif d'environ 1,7.

La figure 1.36 compare l'énergie stockée par chaleur sensible et par chaleur latente en fonction de la température. Le stockage latent stocke une grande quantité de chaleur par rapport au stockage sensible et sans élévation de la température.

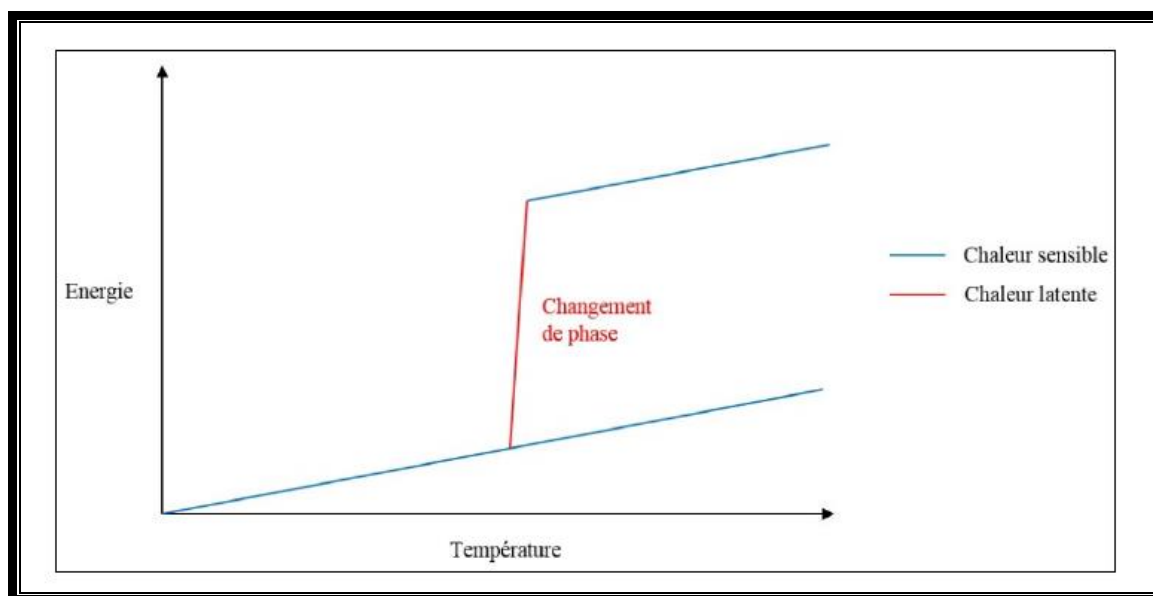


Figure 1. 37. Energie stockée en fonction de la température par chaleur sensible et latente [49]

4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la compréhension de la notion de confort thermique. La recherche sur le confort thermique intègre plusieurs disciplines telles que la physique du bâtiment, la physiologie et la psychologie ; l'aspect physique nous a permis de comprendre les transferts thermiques qui ont lieu entre l'homme et son environnement. L'aspect physiologique nous a informé sur le principe de la thermorégulation et les réactions du corps au froid et à la chaleur. Le confort thermique est un état subjectif, l'aspect psychologique nous a permis de comprendre la sensation de confort thermique. Le confort thermique dans l'habitat a également été abordé dans ce premier chapitre, et une revue des différentes techniques de rafraîchissement passif a été faite. Le rafraîchissement bioclimatique est un processus multidisciplinaire qui repose sur trois méthodes, à savoir la protection des gains thermiques, la dissipation de l'excès de chaleur et la modulation de la chaleur. Cette dernière méthode nous intéresse particulièrement, car on s'intéresse à l'augmentation de l'inertie thermique par l'introduction des MCPs.

Chapitre 2 : Matériaux à changement de phase

1. Introduction

Pour éviter une crise énergétique majeure et réduire la pollution de l'environnement, des efforts importants sont nécessaires pour développer des sources d'énergie renouvelables et réduire les émissions de carbone.

Sachant que le secteur du bâtiment est celui qui consomme le plus d'énergie, les économies d'énergie dans les bâtiments sont devenues l'une des questions les plus importantes aujourd'hui. L'environnement bâti durable dépend de la capacité des architectes à concevoir des bâtiments à faible consommation d'énergie.

Ces dernières années, de nombreux travaux sur les systèmes de stockage de l'énergie thermique (SET) ont été menés pour réduire la consommation d'énergie [125, 138–140]. La mise en œuvre d'un système de stockage de l'énergie thermique dans l'enveloppe du bâtiment réduit la nécessité de recourir à des systèmes énergétiques actifs pour assurer le confort thermique [141].

Le SET à l'aide des MCPs a fait l'objet d'une grande attention de la part des chercheurs au cours de la dernière décennie [142, 143]. Le SET avec des MCPs est basé sur le principe du stockage de l'énergie thermique en utilisant la chaleur latente [144–146], ce qui constitue un moyen alternatif d'économiser de l'énergie et d'augmenter l'efficacité globale et la fiabilité des bâtiments [147, 148]. L'utilisation des MCPs dans les bâtiments pour le stockage de l'énergie est une technologie prometteuse pour améliorer le confort thermique intérieur [149–152]. L'intégration des MCPs dans l'enveloppe du bâtiment va améliorer son inertie thermique sans augmentation significative des épaisseurs des murs [153]. Les MCPs sont des matériaux énergétiques qui changent d'état en fonction de la température afin de stocker et de libérer de la chaleur [154, 155]. Ils ont la particularité de stocker une grande quantité de chaleur sur une plage de température réduite [97, 156–158]. L'utilisation des MCPs pour des applications de free cooling permet de réduire la demande de refroidissement des bâtiments. Pendant la journée, le MCP fond et absorbe la chaleur, ce qui permet à la température de l'air dans les espaces intérieurs d'augmenter, contribuant ainsi à maintenir le confort thermique [159].

Le choix du MCP est crucial pour le succès du rafraîchissement passif, qui est influencé par les propriétés thermophysiques du MCP [160, 161]. Parmi tous les types de MCPs, les MCPs organiques ont été recommandés car ils présentent une température de fusion appropriée, une chaleur latente élevée et des caractéristiques physico-chimiques stables [162].

2. Définition des matériaux à changement de phase

Les MCPs sont définis comme des matériaux avec un changement d'état solide/liquide, approprié aux applications de stockage d'énergie thermique. Ils ont la capacité d'absorber et de libérer une grande quantité d'énergie pendant le processus de changement de phase. Les MCPs constituent une solution prometteuse pour la thermorégulation dans les bâtiments étant donné leur grande capacité à emmagasiner l'énergie sous forme de chaleur latente, comparés aux matériaux de construction qui stockent l'énergie sous forme de chaleur sensible [163–166].

Ces dernières décennies, les MCPs sont testés comme matériaux à inertie thermique pour réduire les fluctuations de température intérieures et pour l'amélioration de la performance énergétique dans le bâtiment [89, 167].

3. Principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase

L'intégration des MCPs dans l'enveloppe du bâtiment est une technique de régulation de la température intérieure [168]. La figure 2.1 schématise le principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase, qui repose sur le changement d'état solide/liquide ; lorsque la température du matériau atteint sa température de fusion, ce dernier passe à l'état liquide et absorbe une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur latente. En revanche, lorsque la température descend au-dessous de celle de fusion du matériau, ce dernier se solidifie et restitue la chaleur préalablement emmagasinée.

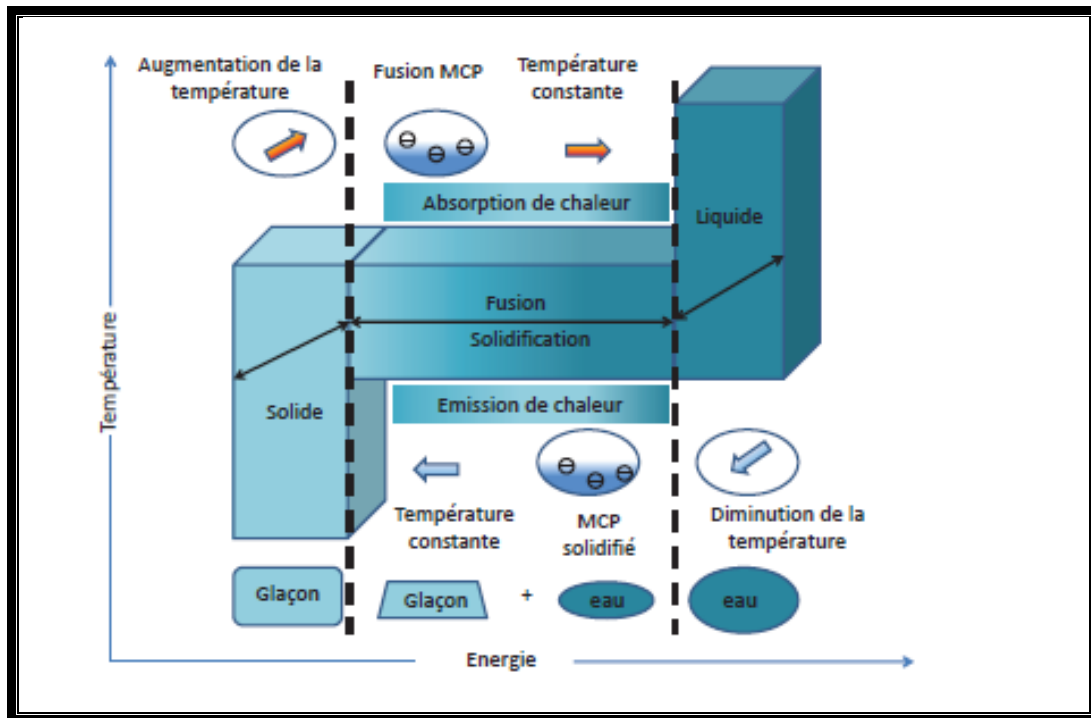


Figure 2. 1. Principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase [169]

3.1. Processus de changement de phases

Le changement de phase se présente sous différents processus : les MCPs peuvent passer de l'état solide à l'état liquide, de l'état solide à l'état solide, de l'état liquide à l'état gazeux et enfin de l'état solide à l'état gazeux (figure 2.2). Les limites entre les différentes phases représentent les changements d'état ; fusion pour le passage de l'état solide à l'état liquide, solidification pour le passage de l'état liquide à l'état solide, vaporisation pour le passage de l'état liquide à l'état gazeux, liquéfaction pour le passage de l'état gazeux à l'état liquide, sublimation pour le passage de l'état solide à l'état gazeux et condensation pour le passage de l'état gazeux à l'état solide [99, 170].

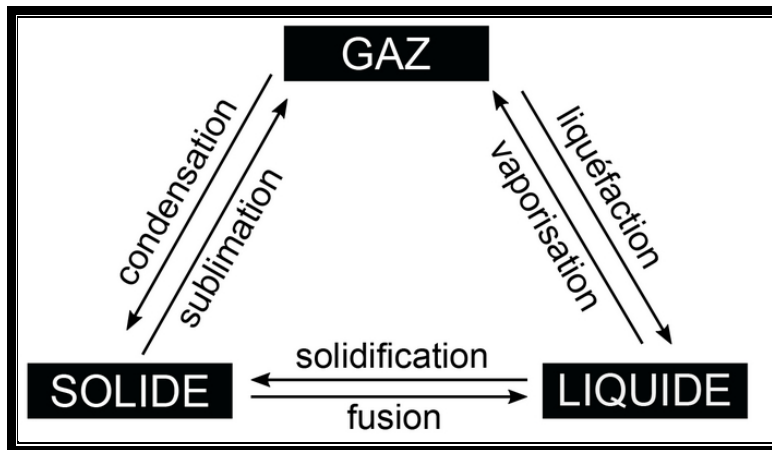


Figure 2. 2. Nomenclature des changements d'état

Ces différents changements d'état présentent des avantages et des inconvénients [170, 171]:

- **Changement d'état solide/gaz** : ce changement de phase s'effectue par évaporation, avec une grande enthalpie ; cependant, il présente des problèmes d'application liés au grand changement de volume et à la variation de pression.
- **Changement d'état solide/liquide** : ce changement de phase s'effectue par fusion, avec une enthalpie moyenne. Néanmoins, il présente un faible changement de volume, d'où son intérêt pour le stockage d'énergie thermique.
- **Changement d'état solide/solide** : ce changement de phase présente les mêmes avantages que le changement de phase solide/liquide, mais présente une faible chaleur latente.
- **Changement d'état liquide/gaz** : ce changement de phase présente une grande enthalpie, mais pose un problème d'application et de stockage.

4. Critères de sélection des matériaux à changement de phase

Les MCPs utilisés pour le stockage d'énergie thermique doivent présenter les propriétés thermo-physiques, cinétiques et chimiques suivantes [172–177] :

- **Propriétés thermo-physiques** :
 - Température de changement de phase appropriée. C'est le paramètre le plus important qui permet la sélection du MCP adéquat pour l'application dans le bâtiment.
 - Chaleur latente élevée par unité de volume, afin de stocker une grande quantité d'énergie dans un volume réduit.
 - Densité élevée, de sorte qu'un petit volume du matériau support contienne le MCP.
 - Faible changement de volume pendant le changement de phase afin qu'un simple conteneur puisse être utilisé.
 - Faible pression de vapeur.
 - Stabilité à long terme.

- Pas de ségrégation de phase ; le matériau doit être complètement fondu afin que la phase solide et liquide aient la même composition chimique. Tout changement dans cette composition entraîne une différence de densité solide/liquide et cause une ségrégation.
 - conductivité thermique élevée afin d'améliorer le taux de stockage d'énergie sur une courte période.
 - Chaleur spécifique élevée pour un meilleur stockage par chaleur sensible.
- **Propriétés cinétiques :**
- Peu ou pas de surfusion pendant la solidification. Lors d'une surfusion, le passage du MCP de l'état liquide à l'état solide ne se produit pas au point de solidification.
- **Propriétés chimiques :**
- Stabilité chimique à long terme.
 - Compatibilité chimique avec les matériaux de construction.
 - Non inflammable, non toxique et non explosif.
 - Résistance à la corrosion.
- **Propriétés environnementales :**
- Non polluant durant le cycle de vie.
 - Faible impact sur l'environnement.
 - Possibilité de recyclage.
- **Propriétés économiques :**
- Faible coûts d'investissement.
 - disponibilité.

5. Classification des matériaux à changement de phase

Il existe une grande variété de MCPs, avec des plages de température de fusion différentes. En 1983, la première classification des substances utilisées pour le SET est apparue (figure 2.3). Elle distingue les MCPs en les divisant en différentes catégories : organiques, inorganiques et eutectiques [150, 166, 169, 178, 179].

5.1. Les MCPs organiques

Les matériaux organiques sont des matières naturelles classées en deux catégories, qui sont les paraffines et les non-paraffines. Ils ont attiré l'attention en raison de leurs caractéristiques physico-chimiques stables et de leur chaleur latente.

5.1.1. Les paraffines

Les paraffines sont des hydrocarbures saturés de type C_nH_{2n+2} . Ils sont composés d'un mélange d'alcanes à chaîne droite $CH_3-(CH_2)-CH_3$. L'augmentation de la longueur de la chaîne permet d'augmenter la chaleur latente de fusion et le point de fusion. Les paraffines sont des matériaux sûrs, fiables, non corrosifs, peu coûteux, chimiquement inertes, stables jusqu'à 500 °C et présentent de légères variations volumiques.

5.1.2. Les non-paraffines

Les non-paraffines incluent les acides gras, les esters, les alcools et les glycols. Contrairement aux paraffines présentant les mêmes caractéristiques, les non-paraffines ont une large gamme de propriétés différentes et sont considérées comme les plus appropriées pour des applications de stockage thermique. Parmi les MCPs non-paraffinées, les acides gras ont reçu la plus grande attention pour l'utilisation comme MCPs dans les bâtiments.

5.2. Les MCPs inorganiques

Dans les matériaux inorganiques sont compris les sels hydratés et les métaux. Pour une application dans le bâtiment, les métaux ne disposent pas de plages de températures appropriées. Les sels hydratés solides cristallins sont formés par l'alliage de sels inorganiques et d'eau.

5.3. Les eutectiques

Les eutectiques sont constitués par la combinaison d'au moins deux MCPs. Lors du processus de solidification, les MCPs mélangés vont former un mélange cristallin. Les eutectiques sont obtenus par un mélange organiques/organiques, inorganiques/inorganiques et organiques/inorganiques. Ces multiples différentes combinaisons peuvent être adaptées pour des applications spécifiques.

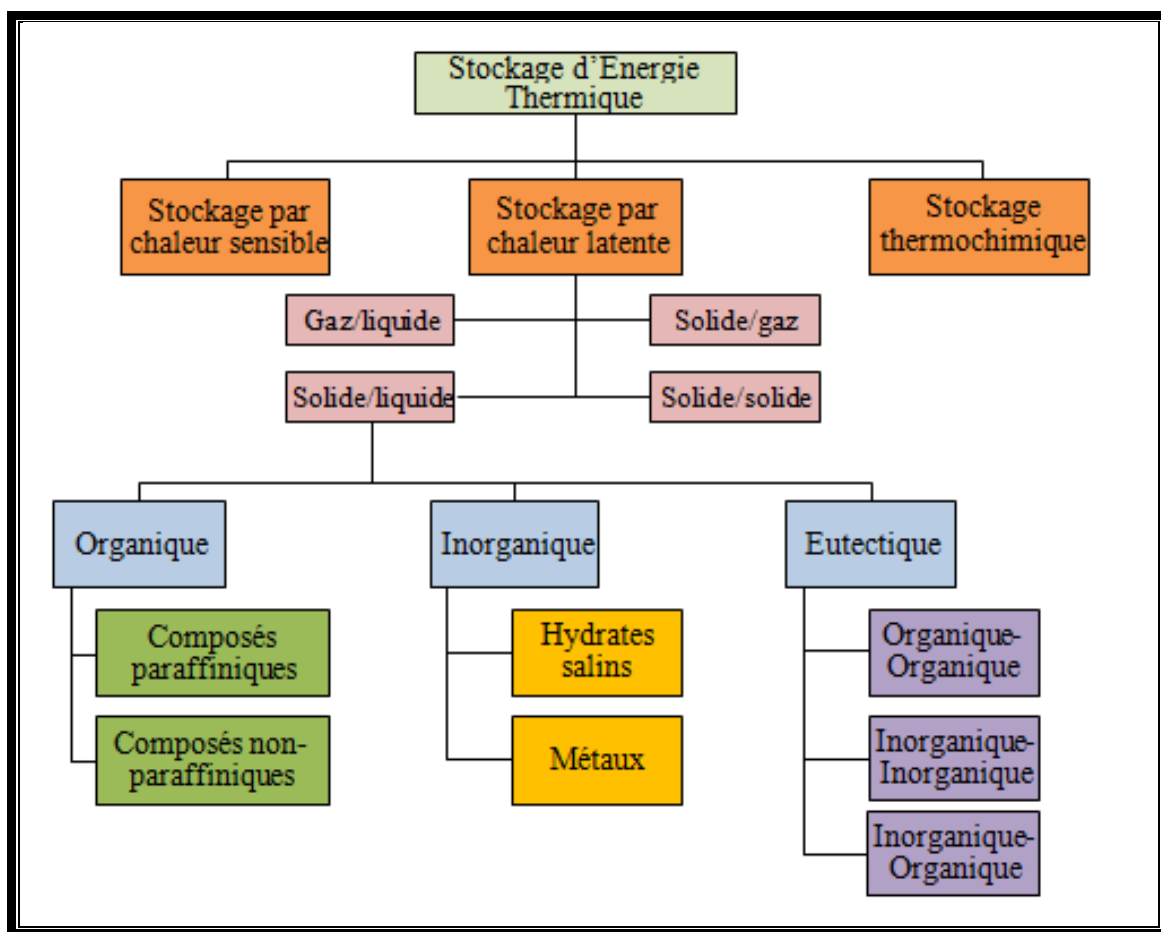


Figure 2. 3. Stockage d'énergie thermique et classification des MCPs

6. Comparaison entre les différents groupes de MCPs

Les MCPs sont disponibles dans une large gamme de températures de fusion et de chaleurs latentes. Chaque groupe de MCPs a ses propriétés thermophysiques. La comparaison entre les caractéristiques thermophysiques des différents groupes de MCPs est donnée dans le tableau 2.1 [180].

Tableau 2. 1. Comparaison entre les différents groupes de MCPs

MCPs	Classification	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/ kg)	Conductivité thermique (W/m K)	Densité (kg/m ³)
Organiques	Paraffines	-12 à 135	60-269	0.2	760 Liquide 900 Solide
	Acides gras	-07 à 187	125-250	0.2	878 Liquide 1004 Solide
Inorganiques	Sels hydratés	-33 à 120	86-328	0.7	1937 Liquide 2180 Solide
	Métaux (avec point de fusion bas)	-29.8 à 125	25-90.9	40.6	5910 Solide
Eutectiques	Org/Org Inorg/Inorg Org/Inorg	-30.6 à 93	100-267	0.68	1530 Liquide 1640 Solide

6.1. Avantages des différentes catégories de MCPs

Les différentes catégories de MCPs présentent de multiples avantages. Le tableau 2.2 donne les avantages de chaque catégorie de MCPs. [170, 181–183].

Tableau 2. 2. Avantages des différentes catégories de MCPs

Avantages des MCPs		
Organiques	Inorganiques	Eutectiques
• Inerte chimiquement. • Pas de ségrégation de phase. • Fiabilité thermique à long terme. • Faible pression de vapeur à la fusion. • Bonne chaleur latente de fusion.	• Chaleur latente élevée • Conductivité thermique élevée • Disponible à prix bas • Non inflammable • Compatibles avec des conteneurs en plastique	• Point de fusion net • Densité de stockage thermique élevée

• Chaleur spécifique élevée. • Non corrosifs. • Compatibles avec les matériaux de construction. • Faible changement de volume. • Peu ou pas surfusion • Stable au-dessous de 500°C. • Recyclables.	• Point de fusion net. • Faible impact sur l'environnement. • Possibilités de recyclage.	
--	--	--

6.2. Inconvénients des différentes catégories de MCPs

Les différentes catégories de MCPs présentent de multiples inconvénients. Le tableau 2.3. donne les inconvénients de chaque catégorie de MCPs [182].

Tableau 2. 3. Inconvénients des différentes catégories de MCPs

Inconvénients des MCPs		
Organiques	Inorganiques	Eutectiques
• Faible conductivité thermique. • Moyennement Inflammables. • Non compatibles avec des conteneurs en plastique.	• Surfusion. • Ségrégation de phase. • Irritants. • Pression de vapeur élevée. • Changement de volume.	• Données limitées sur les propriétés thermiques et physiques.

6.3. Liste des MCPs trouvés dans la littérature

Une liste des MCPs trouvés dans la littérature est donnée dans le tableau 2.4.

Tableau 2. 4. Liste des MCPs trouvés dans la littérature

MCP	Densité (kg/l)	Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/mK)	source
Eau	1	0	334	0.6	[184]
Polyéthylène glycol E600	/	20-25	146	/	[185]
	1.128	21-25	148	/	[186]
	1.126	22	127.2	/	[160, 182]

C13-C24	/	22-24	189	/	[185, 187]
Dodecanol	/	26	200	/	[188, 189]
C18	0.81	28	244	0.15	[190]
Acide caprique	0.88	32	152.7	0.15	[190]
Bio MCP Q23	0.235	23	/	0.2	[191]
Huile de coco	0.92	24	103	0.16-0.22	[192]
RT25	/	24	164	/	[193, 194]
RT27	0.75-0.87	26-28	179	0.2	[195]
Bio PCM-Q 27	0.235	27	251.3	0.19-0.21	[147]
Bio PCM-Q 29	0.235	29	260.7	0.19-0.21	[147]
Diméthyle sebacate	/	21	135	0.29	[196]

6.4. Liste des MCPs commerciales

Une liste des MCPs commerciales est donnée dans le tableau 2.5.

Tableau 2. 5. Liste des MCPs commerciales

	MCP	classification	Densité (kg/l)	Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/mK)	source
Rubitherm	RT20	Paraffine	0.87	20-22	172	/	[187]
	RT21	Paraffine	0.77-0.88	21	155	0.2	[185]
	RT24	Paraffin	0.77-0.88	24	160	0.2	[171]
	RT25	Paraffine	0.76-0.88	25	170	0.2	[185]
	RT26	Paraffine	0.88	25	131	/	[197]
	RT27	Paraffine	/	28	206	/	[198]
	RT28HC	Paraffine	0.77-0.88	27-29	250	0.2	[199]
			0.88	28	245	/	[160]
	SP29		1.38	28-29	180	0.6	[200]
BASF	DS5000	organique	/	26	45	/	[178]
	DS5001		/	26	110	/	[178, 201]
	DS5008		/	23	100	/	[178, 201]
	DS5007	organique	/	23	41	/	[178]
Microtek laboratoires	MPCM28	/	/	28	180-195	/	[201]
	MPCM28D	/	/	25-32	160-180	/	[201]
	Pur Temp 25	Base végétale	/	25	185	/	[178]

Entropy solutions Inc	Pur Temp 27	Base végétale	/	27	200	/	[178]
	Pur Temp 28	Base végétale	/	28	205	/	[178]

7. Méthodes d'incorporation des MCPs

Les MCPs peuvent être incorporés dans les matériaux de construction par différentes méthodes, telles que l'incorporation directe, l'immersion, l'encapsulation, la stabilisation et l'imprégnation sous vide.

7.1. Incorporation directe

L'incorporation directe est la méthode la plus facile et économique. Cette technique repose sur le mélange du MCP liquide ou en poudre avec le matériau de construction tel que le béton, le plâtre et le gypse, afin d'augmenter le stockage thermique de l'enveloppe du bâtiment.

7.2. Immersion

Les matériaux de construction tels que la brique, le plâtre et les panneaux muraux présentant une porosité sont plongés directement dans le MCP liquide. Le matériau support du MCP absorbe ce dernier par capillarité et l'encapsule dans ses pores internes.

7.3. Encapsulation

L'encapsulation est la technique d'incorporation des MCPs la plus couramment utilisée. Afin d'éviter les effets indésirables des MCPs ; à savoir les problèmes de fuites, les MCPs peuvent être encapsulés avant leur incorporation dans les matériaux de construction. Les moyens d'encapsulation sont la macro-encapsulation et la micro-encapsulation. La figure 2. 4 donne quelques techniques d'encapsulation des MCPs.

7.3.1. Macro-encapsulation

La macro-encapsulation est une technologie qui consiste à encapsuler le MCP dans des conteneurs tels que des tubes, des sphères et des panneaux de plus de 1 cm de diamètre. Les dimensions du conteneur ont un effet sur le taux de transfert de chaleur avec le MCP.

7.3.2. Micro-encapsulation

La micro-encapsulation est une technologie qui consiste à enfermer les particules de MCP dans un mince film polymère du poids moléculaire élevé, qui conserve la forme et empêche les fuites du MCP pendant le processus de changement de phase. Deux facteurs peuvent influencer le MCP micro-encapsulé avant son introduction dans les matériaux de constructions ;

- Maintien de la capsule de MCP micro encapsulé après plusieurs cycles.
- Pas d'interaction chimique entre les matériaux de construction et le MCP micro-encapsulé.

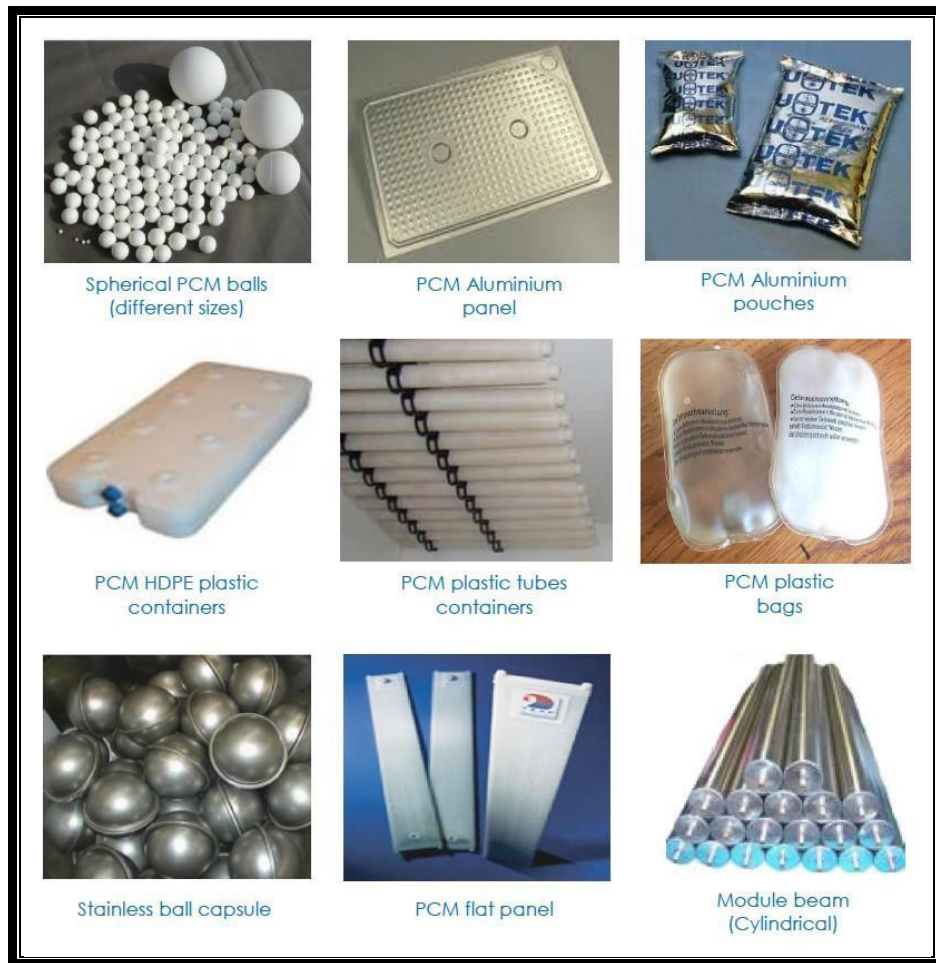


Figure 2. 5. Quelques techniques d'encapsulation des MCPs [185]

7.4. MCP à forme stabilisée

Le MCP à forme stabilisée est une technique qui consiste à mélanger le MCP liquide avec le matériau support dense afin de former un matériau composite stable pendant le changement de phase. Le MCP à forme stabilisée rend le système de stockage thermique plus simple étant donné qu'il ne nécessite aucun dispositif ou conteneurs spéciaux pour l'encapsulation du MCP [198, 202, 203].

7.5. Imprégnation sous vide

L'imprégnation sous vide (figure 2.5) implique l'évacuation de l'air d'un matériau poreux à l'aide d'une pompe à vide, ensuite le matériau est imbibé de MCP liquide [204].

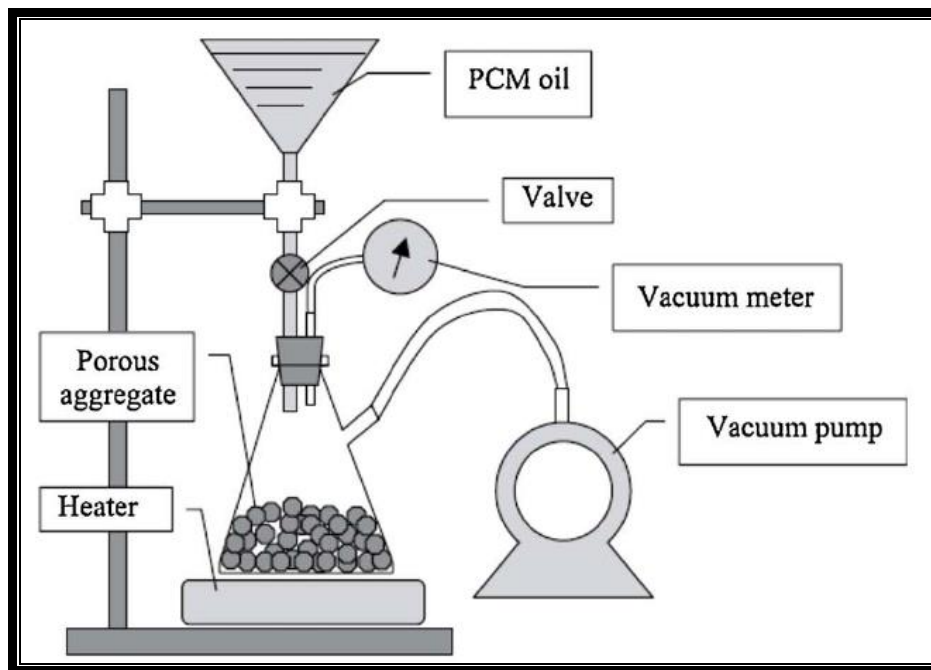


Figure 2. 6. Imprégnation sous vide [189, 204]

Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes d'incorporation des MCPs sont présentés dans le tableau 2.6.

Tableau 2. 6. Avantages et inconvénients des différentes méthodes d'incorporation des MCPs

Méthode	Avantages	Inconvénients
Incorporation directe	• Economique • Bon marché • Facilité de mise en œuvre	• Fuites du MCP • Interaction du MCP avec le processus d'hydratation • Altération des propriétés mécaniques et structurales
Immersion	• Possibilité de conversion de simples panneaux muraux en panneaux chargés en MCP • Facilité de mise en œuvre	• Fuites du MCP
Macro-encapsulation	• Pas de fuites du MCP • une quantité importante de MPC peut être déployée pour le stockage de la chaleur • moins sujets aux variations de volume	• Besoin de protection contre l'endommagement • coût d'installation élevé • complexité d'intégration dans la structure d'un bâtiment

		• faible transfert de chaleur pendant la phase de solide
Micro-encapsulation	• Application facile • Bon transfert de chaleur • Pas de protection contre l'endommagement	• peut affecter la résistance mécanique de la structure • nécessite une technologie
MCP à forme stabilisée	• Pas de fuites du MCP • Chaleur spécifique élevée • Conductivité thermique appropriée • Forme stable lors du changement de phase • Application facile	

8. Méthodes d'intégration des MCPs dans les murs

L'intégration d'un MCP dans le mur se fait suivant deux procédés : l'immersion et l'attachement [205].

8.1. Méthode d'immersion

L'intégration d'un MCP dans le mur suivant la méthode d'immersion consiste en l'incorporation du MCP dans les matériaux de construction conventionnels tels que le béton et la brique. Cette intégration du MCP dans le matériau se fait suivant différentes techniques, à savoir l'incorporation directe, l'immersion et l'encapsulation.

8.2. Méthode d'attachement

La méthode d'attachement consiste à joindre un panneau mural chargé en MCP au mur de construction. Dans ce cas présent, le MCP n'est pas intégré directement dans le matériau de construction, mais constitue une deuxième couche de panneau MCP attachée au mur. Cette méthode d'attachement est la plus utilisée en raison de la facilité de mise en œuvre.

9. Problèmes d'application des MCPs

En dépit d'une sélection rigoureuse des MCPs suivant les critères désirables, des problèmes peuvent survenir lors de leur application. Les plus fréquents sont la surfusion, la ségrégation de phase et la résistance au feu [170, 206].

9.1. Surfusion

Le problème de surfusion consiste en la solidification du MCP à une température en-dessous de la température de changement de phase. C'est un phénomène beaucoup plus fréquent chez les matériaux inorganiques (sels minéraux), comparés aux matériaux organiques. Lors d'une surfusion, le MCP qui présente un bon comportement lors de la phase de fusion, nécessite une descente significative de la température afin qu'il termine sa phase de solidification. Plusieurs solutions sont envisagées pour l'élimination de la surfusion, parmi elles :

- La favorisation de la solidification en introduisant des produits chimiques tensio-actifs (solvants et sels minéraux).
- L'ajout d'agents nucléiques afin d'amorcer la solidification par des cristaux isomorphes.
- Le maintien d'un point froid dans le matériau. L'excellent résultat de cette technique reste un investissement coûteux.

9.2. Ségrégation de phase

La ségrégation de phase constitue un problème de fonctionnement du matériau qui n'intervient que pour un matériau composé de deux molécules différentes. Dans le cas normal, un matériau qui passe de l'état solide à l'état liquide et vice versa garde sa composition homogène, présentant la même chaleur latente et la même température de fusion durant tout le cycle de vie du composite. La ségrégation de phase se produit lorsque l'un des constituants du composite passe à l'état liquide et l'autre est toujours à l'état solide.

Ce phénomène reste prévisible avec l'étude des diagrammes de phases qui représentent les différentes compositions des phases solide et liquide en fonction de la température. Plusieurs solutions peuvent être envisagées afin d'éviter ce problème de ségrégation :

- L'application de matériaux épaississants augmente la viscosité du composite et maintient les différents éléments ensemble.
- Mise en place d'un réseau poreux et inerte qui va empêcher la décantation du solide. Ce dernier sera entouré de liquide, ce qui va accélérer sa dissolution.

9.3. Stabilité à long terme

La durée de vie utile des systèmes de conteneurs de MCPs et le nombre de cycles effectués sans aucune dégradation de leurs propriétés, constitue un des plus importants problèmes qui limite l'utilisation du stockage par chaleur latente. Ce problème de stabilité à long terme des matériaux de stockage dépend de deux facteurs : la faible stabilité des propriétés des matériaux conteneurs de MCPs et la corrosion entre le MCP et le conteneur. Les problèmes de compatibilité des matériaux conteneurs avec le MCP sont les suivants [207] :

- Corrosion des métaux en contact avec les MCPs inorganiques,
- Perte de stabilité des conteneurs plastiques en contact de MCPs organiques,
- Possibilité de migration de liquide ou de gaz à travers un conteneur en plastique.

Pour remédier à ces problèmes de stabilité à long terme, il est recommandé de :

- Stabiliser le conteneur MCP : lors du développement des conteneurs MCPs, des essais de stabilité thermo-physiques doivent être effectués par cycles répétitifs de fusion/solidification. L'objectif du cyclage thermique est la détermination d'éventuelles fuites du MCP et la possibilité d'altération de ses propriétés thermiques.
- Pour la corrosion des matériaux : la compatibilité entre le MCP et le conteneur est possible avec le respect de la durée de vie de ce dernier, ainsi que la prise en compte des dommages éventuels de fuite du MCP encapsulé.

9.4. Résistance au feu

La résistance au feu est un paramètre essentiel dans l'utilisation des MCPs dans le bâtiment. Les matériaux organiques et les cires paraffinées en particulier présentent une certaine inflammabilité qui suscite l'inquiétude quant à leur application dans le bâtiment. Une des solutions étudiées consiste en l'introduction de matériau stabilisateur avec des propriétés de

retardement de flamme. Parmi ces stabilisateurs, on retrouve la silice et l'hydroxyde de magnésium.

9.5. Faible conductivité thermique

La majorité des matériaux à changement de phase ont une mauvaise conductivité thermique, ce qui peut affecter le taux de stockage d'énergie. Il existe deux méthodes pour l'amélioration de la conductivité thermique : l'encapsulation des matériaux à changement de phase et l'ajout de substances avec une conductivité thermique élevée [208, 209].

a. Encapsulation des MCPs

L'encapsulation des MCPs présente une remarquable capacité d'amélioration de la conductivité thermique. Il est observé que le taux de transfert de chaleur entre la MCP et la source de chaleur augmente avec l'utilisation des MCPs micro-encapsulés.

b. Ajout de substances avec une conductivité thermique élevée

Les MCPs sont connus pour avoir une faible conductivité thermique. De multiples recherches ont proposé des ajouts tels que des matériaux à base de carbone et d'autres à base de métaux permettant de booster la conductivité thermique.

b.1. Les matériaux à base de carbone

Les matériaux à base de carbone font partie des additifs les plus couramment utilisés, en raison de leur bonne conductivité thermique. Ils ont de multiples structures morphologiques, telles que :

- graphite expansé,
- fibre de carbone,
- graphène,
- nanotubes de carbone.

Les matériaux à base de carbone présentent les caractéristiques suivantes :

- Faible densité.
- Stabilité chimique.
- Facilité d'utilisation.

b.2. Les matériaux à base de métaux

La conductivité thermique et la forte capacité de mélange constituent quelques caractéristiques des métaux. Plusieurs types de métaux sont utilisés pour l'amélioration de la conductivité thermique, parmi eux :

- La mousse métallique, à structure poreuse, est composée d'un métal qui comprend une fraction volumique importante de pores chargés de gaz.
- Particules de métaux.
- Oxyde de métal.

10. Etat de l'art sur l'utilisation des MCPs dans le bâtiment

Lee et al. 2018 [210] ont évalué les performances thermiques des murs d'une cabane dotés d'une isolation en cellulose renforcée avec un MCP intégré par mélange direct. Le MCP utilisé est une paraffine avec une température de fusion de 26-28 °C et une chaleur latente de 147 kJ/kg.

Deux cabanes (figure 2. 6) avec les dimensions 1,83 x 1,83 x 1,52 m sont construites dans la partie centrale des États-Unis, avec une température moyenne du mois d'août de 25 °C. Des thermocouples et des fluxmètres ont été installés sur la surface des murs extérieurs et intérieurs afin de mesurer les températures sur les surfaces de ces murs, ainsi que le taux de transfert de chaleur. Les résultats de cette étude ont montré que le pic du flux de chaleur a été retardé d'une heure et demie dans la cabane avec MCP et que la réduction du flux moyen de tous les murs est de 26,6 %.



Figure 2. 7. Image des cabanes de test [210]

Silva et al. 2012 [104] présentent une étude expérimentale et une simulation numérique évaluant les effets de l'intégration d'un MCP macro-encapsulé dans un mur de maçonnerie en briques d'argile portugaises (figure 2. 7). L'objectif de l'étude est de tester la paraffine RT 18, avec une température de fusion de 19 °C et une chaleur latente de 134 kJ/kg.

Deux murs prototypes avec les dimensions 0,94 x 0,94 x 0,15 m ont été construits, un avec MCP et l'autre sans MCP. L'étude expérimentale révèle que l'utilisation du MCP présente une potentialité pour le stockage d'énergie thermique avec un retardement du pic de température de 3 heures et une réduction de l'amplitude thermique de 50 % en passant de 10 °C pour le mur sans MCP à 5 °C pour le mur avec MCP.

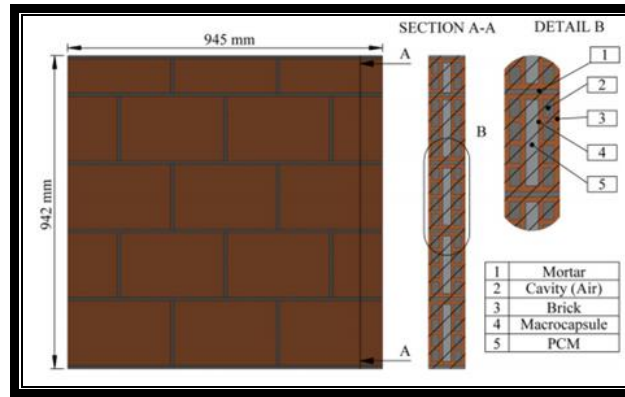


Figure 2. 8. Configuration du murs prototype [104]

Hanchi et al. 2017 [211] ont travaillé sur la simulation du comportement thermique de deux toitures situées dans les villes de Casablanca et de Ouarzazate. La dalle de référence est constituée de matériaux de construction conventionnels et la deuxième dalle comprend deux couches de MCPs de 3 cm, disposées de chaque côté du béton pour une épaisseur totale égale à la dalle sans MCP dont l'épaisseur est de 30 cm (figure 2.8). Plusieurs MCPs ont été utilisés dans la simulation avec des températures de fusion situées entre 19 et 34 °C. L'utilisation des MCPs dans la toiture permet de réduire le flux de chaleur entrant par le toit. L'utilisation d'un seul MCP dans la dalle ne permet pas d'assurer le confort intérieur pendant toute l'année ; l'utilisation d'un deuxième MCP est nécessaire.

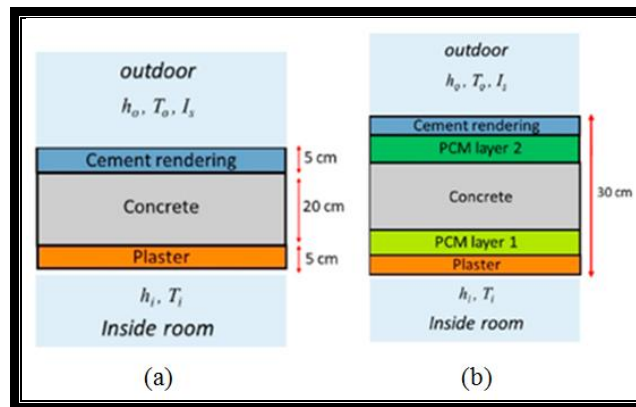


Figure 2. 9. (a) Dalle de référence, (b) Dalle avec MCPs [211]

Cabeza et al. 2007 [212] ont fait une étude sur le développement d'un béton chargé en MCP pour le stockage d'énergie thermique dans le bâtiment. Le MCP utilisé est Micronal de la société BASF avec une température de fusion de 26 °C et une enthalpie de 110 kJ/kg. L'étude consiste en la construction de deux cellules identiques dans la localité de Piugverd of Lied en Espagne. La première cellule est construite en béton incorporant 5 % de MCP micro-encapsulé, intégré dans la toiture et les murs sud et ouest. La deuxième cabine témoin est construite en béton classique (figure 2.9).

Cette étude expérimentale révèle que le pic de température dans les murs avec MCP est retardé de deux heures, et que lorsque la température extérieure est de 32 °C, la température du mur

ouest sans MCP atteint 39 °C et la température du mur ouest avec MCP atteint 36 °C, ce qui fait une différence de température de 3 °C.



Figure 2. 10. Image des cabines [212]

YAO et al. [213] ont travaillé sur la préparation d'un matériau à changement de phase à forme stabilisée, constituée de perlite et de paraffine. Ils ont fait ensuite le test de ces propriétés thermo-physiques.

Le MCP utilisé est de la paraffine, avec une température de fusion autour de 24 °C et une chaleur latente de 68 J/g. Ce dernier est intégré dans les murs et le plancher d'un prototype d'une cellule : 1,7 x 1,7 x 2,2 m (figure 2.10), testé pendant la période estivale en Chine.

Les résultats de cette étude ont montré que les panneaux muraux présentent une grande inertie thermique, avec un décalage du pic de température de 4 h 30. L'analyse du cycle de vie montre la fiabilité du composite après 3000 cycles.



Figure 2. 11. (a): Apparence de la cellule, (b) : MCP à forme stabilisée dans le planché [213]

Muruganantham et al. 2010 [184] ont fait l'évaluation expérimentale d'un bio-MCP avec une température de fusion de 29 °C et une chaleur latente de 219 kJ/kg organique dans l'enveloppe du bâtiment. Les bio MCPs sont des dérivés de la paraffine, avec des propriétés moins inflammables. Les mesures expérimentales ont été effectuées en conditions réelles du climat

aride de la ville de Phoenix en Arizona. Deux cabanes avec les dimensions 4,87 x 3,65 x 2,43 m ont été construites. La cabane nord intègre le bio-MCP dans les murs, le plancher et le toit, et la cabane sud est construite en matériaux conventionnels (figure 2.11).

Les résultats de cette étude ont montré que l'intégration du bio-MCP a permis d'avoir un décalage du pic de température d'une heure pour le mois de juin.

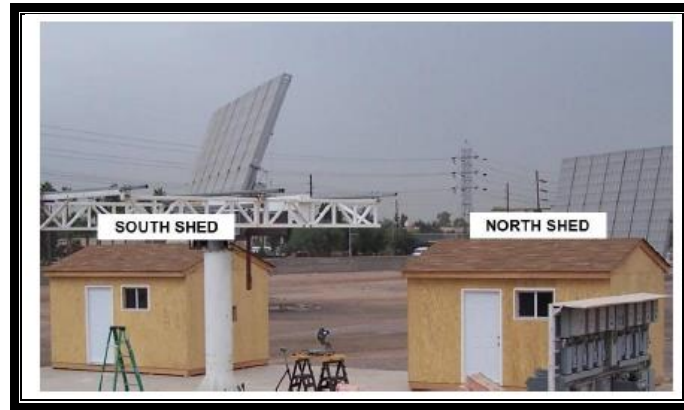


Figure 2. 12. Dispositif expérimental, cabane sud sans MCP, cabane nord avec MCP [184]

Zeinelabdein et al. (2017) [199] ont évalué la faisabilité du refroidissement passif avec l'utilisation de MCPs pour le climat aride de Khartoum. Cette étude de simulation faite avec le logiciel ANSYS est réalisée sur une villa d'une surface de 463 m², située dans le climat aride de Khartoum qui est caractérisé par des températures maximales comprises entre 37,9-41,3 °C. Le MCP utilisé dans cette étude de simulation est la RT28 HC, avec une température de fusion de 27-29 °C et une chaleur latente de 250 kJ/kg.

Un système de refroidissement est proposé avec une modélisation de plaques de MCPs modules de dimensions 1,80 x 0,60 x 0,01 m encapsulées dans de l'aluminium. Ces modules de plaques sont empilés les uns sur les autres avec 15 mm de vide d'air (figure 2.12).

Les résultats de la simulation montrent un potentiel de refroidissement passif opérationnel durant les mois de chaleur modérée ; par contre, le potentiel de refroidissement n'est pas très opérationnel durant les mois les plus chauds, en raison de la faible différence de température entre la température ambiante et la température de solidification du MCP (problème de solidification du MCP).

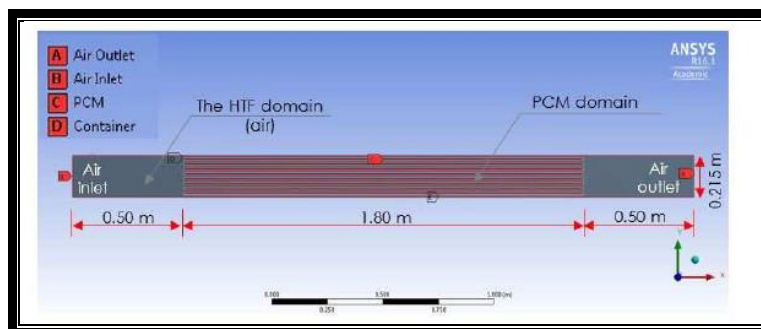


Figure 2. 13. Détails du modèle 2D [199]

Chapitre 3 : Matériels et méthodes d'élaboration des nouveaux matériaux composites MCPs

1. Introduction

Ce travail consiste en l'élaboration de matériaux composites intégrant des MCPs, préparés suivant la méthode de la forme stabilisée, qui consiste à disperser le MCP dans un autre matériau afin de former un matériau composite stable. Cette technique présente l'avantage de la facilité de mise en œuvre et permet d'avoir la conductivité thermique souhaitée.

Les matériaux composites élaborés ont été soumis à une multitude de caractérisations physico-chimiques, thermiques et mécaniques afin d'identifier leurs propriétés ; les matériaux composites ont d'abord subi un traitement thermique permettant de voir leur comportement à l'état de fusion du MCP. Par la suite, ces derniers ont été caractérisés chimiquement avec la FTIR afin de voir la compatibilité chimique entre leurs différents composants et la DRX a été effectuée afin d'identifier la structure cristallographique des différents matériaux composites MCPs. Les composites MCPs élaborés ont également été caractérisés physiquement par la microscopie électronique à balayage (MEB) afin d'observer leurs microstructures et de vérifier l'imprégnation du MCP dans la matrice. Des analyses thermiques ont également été effectuées avec l'analyse thermo-gravimétrique ainsi que par la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) afin de déterminer les performances thermiques et de vérifier la fiabilité thermique des matériaux composites MCPs élaborés. Enfin, des essais de conductivité thermique sur les composites MCPs ont été effectués afin de mesurer l'impact de l'ajout du graphite sur l'amélioration de la conductivité thermique, et des essais de détermination de la résistance mécanique à la compression des composites MCPs ont été faits.

I. Choix du cas d'étude

Suivant la problématique de l'amélioration du confort thermique dans l'habitat saharien par le stockage d'énergie thermique par chaleur latente. Le cas d'étude choisi est la ville de Biskra, dont les données climatiques constituent le point essentiel dans le choix du matériau à changement de phase.

1. Présentation de la ville de Biskra

La ville de Biskra se situe au sud-est de l'Algérie, à 430 km d'Alger, à une latitude de $34^{\circ} 48'$ nord et une longitude de $5^{\circ} 44'$ est. Elle s'élève à une altitude de 81 m.

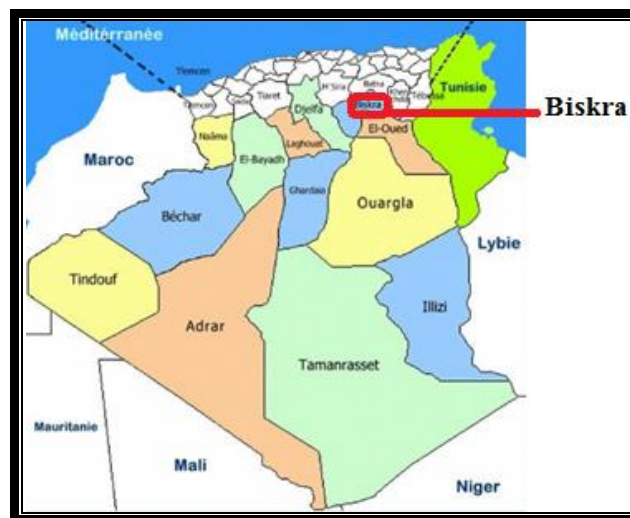


Figure 3. 1. Situation géographique de la ville de Biskra

2. Données climatiques de la ville de Biskra entre (2009-2018)

Les données climatiques de la ville de Biskra entre (2009-2018) sont données dans la figure 3.2.

Mois	Moyennes Mensuelles					
	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmoy (°C)	Hum(%)	Précipitations (mm)	Vitesse moy du vent (m/s)
Janvier	18,00	7,25	12,75	57,30	10,10	3,89
Février	18,70	7,86	13,21	51,77	14,10	4,76
Mars	23,19	11,49	17,37	46,07	15,60	4,86
Avril	27,71	15,30	20,88	41,98	19,10	4,54
Mai	32,54	19,74	26,12	35,77	15,30	4,36
Juin	37,65	24,52	31,10	31,13	5,20	3,96
Juillet	41,65	28,37	35,03	27,43	0,70	3,33
Août	39,99	27,58	33,80	33,51	2,50	3,10
Septembre	35,23	23,71	29,16	41,10	20,30	3,08
Octobre	29,79	18,29	24,06	47,12	28,80	3,33
Novembre	22,87	12,24	17,53	54,12	10,10	3,65
Décembre	18,66	7,73	13,15	58,80	4,20	2,90
Moyenne	28,83	17,01	22,85	43,84	146,00	3,81

Figure 3. 2. Moyennes mensuelles des données climatiques de la ville de Biskra (2009-2018)

Source : Station Météorologique de Biskra

2.1. Températures de l'air

Les températures moyennes mensuelles sont illustrées dans la figure 3.3. La température moyenne annuelle est de 22,8 °C, avec 35 °C en juillet pour le mois le plus chaud et 12,7 °C en janvier pour le mois le plus froid. On distingue deux périodes majeures au cours de l'année : une période très chaude et sèche, qui s'étale du mois de juin au mois de septembre, avec des températures dépassant les 40 °C pour les mois les plus chauds, et une autre période, caractérisée par le froid, qui s'étale du mois de novembre au mois d'avril, avec des températures minimales de 7 °C pour les mois les plus froids. Les mois d'octobre et de mai représentent une période où le temps est clément avec des températures entre 19 et 30 °C.

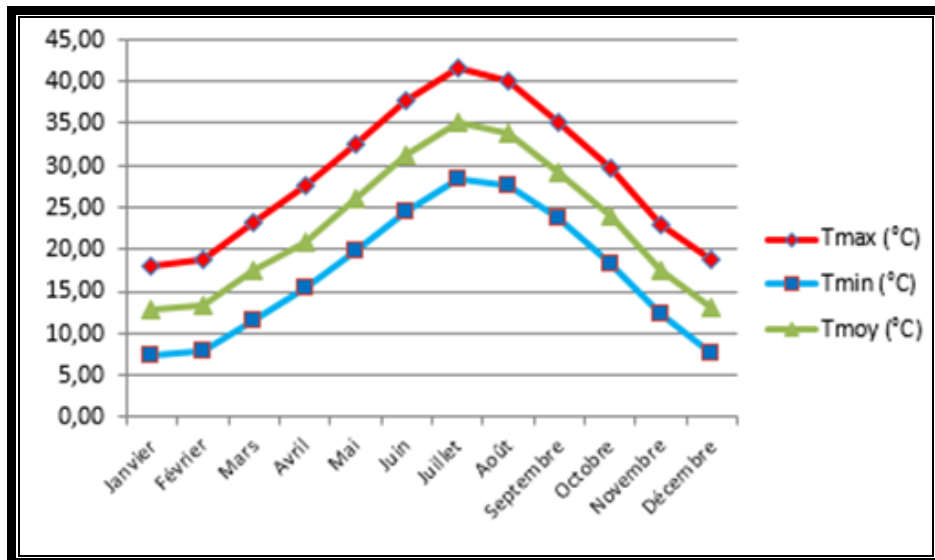


Figure 3. 3. Températures moyennes mensuelles

2.2. Humidité relative

Les taux d'humidités mensuels sont illustrés dans la figure 3.4. Les moyennes mensuelles ne dépassent pas 60 % pour la période hivernale, ce qui laisse penser à un climat hivernal froid et sec. Les moyennes mensuelles ne dépassent pas 40 % pour la période estivale, ce qui laisse penser à un climat chaud et sec.

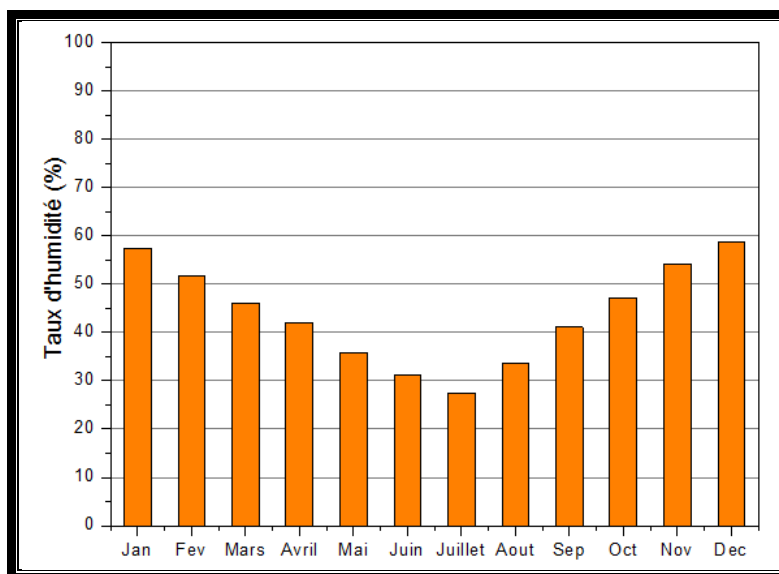


Figure 3. 4. Humidités moyennes mensuelles

2.3. Vents

Les vitesses moyennes mensuelles des vents sont illustrées dans la figure 3.5. Les vents dominants sur la ville de Biskra sont de direction nord et nord-ouest et sont très faibles, avec des vitesses moyennes qui varient entre 2,9 m/s et 4,86 m/s, pour une moyenne annuelle de 3,8 m/s.

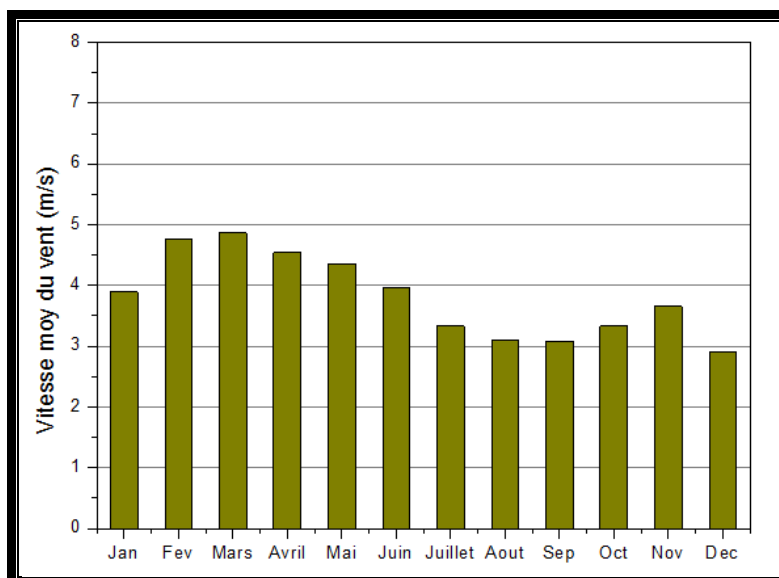


Figure 3. 5. Vitesses moyennes mensuelles du vent

2.4. Précipitations

La répartition mensuelle des précipitations sur la ville de Biskra pour la période (2009-2018) est illustrée dans la figure 3. 6. D'après le diagramme des précipitations, la ville de Biskra présente une grande sécheresse tout au long de l'année, le taux de précipitation ne dépasse pas les 20 mm qu'au cours du mois d'octobre. La moyenne annuelle des précipitations est de 146 mm.

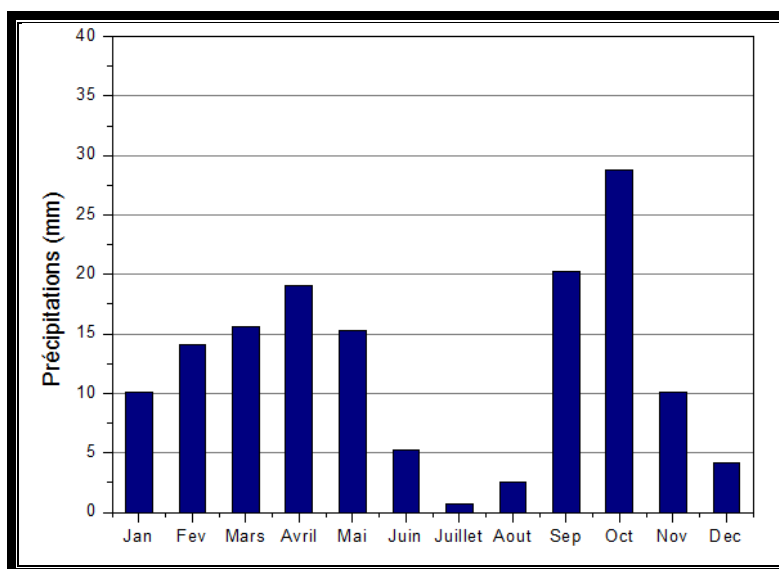


Figure 3. 6. Répartition mensuelle des précipitations

3. Situation de de la ville Biskra dans les zones climatiques d'Algérie

L'Algérie dispose de plusieurs zones climatiques qu'on peut classer en deux catégories : les zones climatiques d'été et les zones climatiques d'hiver (figure 3.7).

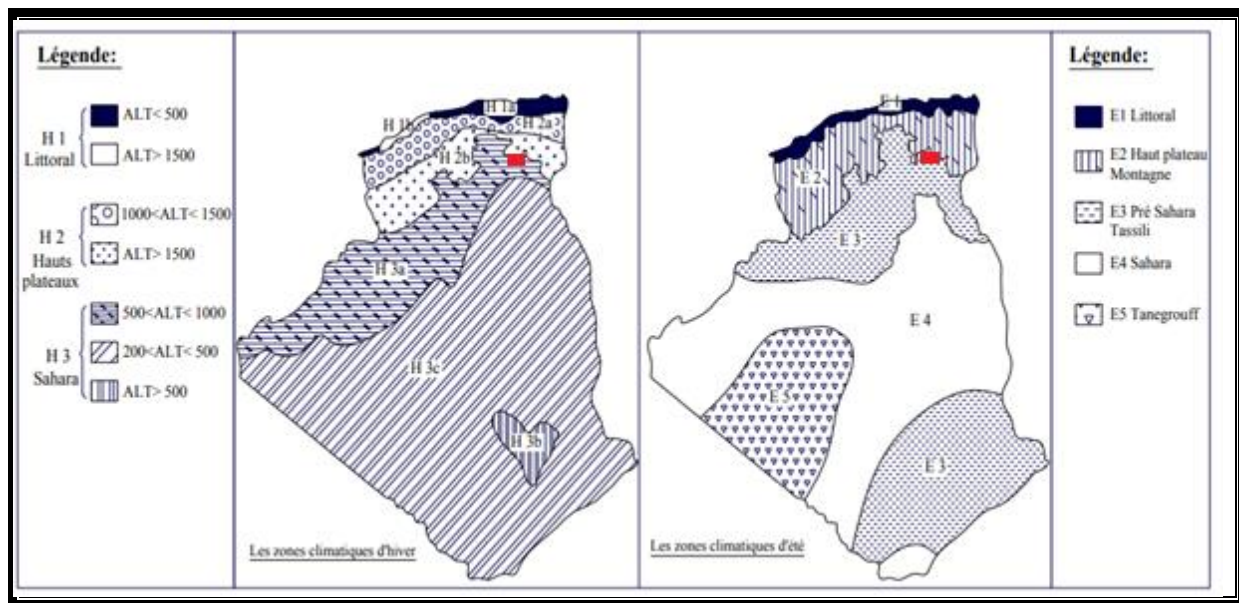


Figure 3. 7. Situation de Biskra dans les zones climatiques d'Algérie [215]

3.1. Zones climatiques d'été

L'Algérie dispose de cinq zones climatiques d'été. Les caractéristiques de ces différentes zones climatiques d'été sont données dans le tableau 3.1.

Tableau 3. 1. Zones climatiques d'été

Zone	Désignation	Caractéristiques
E1	Littoral	Des étés chauds et humides et un écart de température diurne faible.
E2	Hauts plateaux Montagne	Des étés plus chauds et moins humides avec des écarts de température diurne importants.
E3	Pré Sahara Tassili	Des étés très chauds et secs
E4	Sahara	Des étés très chauds et secs, plus pénible que la zone (E3)
E5	Tanegrouft	Des étés très chauds et secs et extrêmement pénible par rapport aux zones (E3) et (E4)

3.2. Zones climatiques d'hiver

L'Algérie dispose de trois grandes zones climatiques d'hiver, divisées en sept sous-zones. Les caractéristiques de ces différentes zones climatiques d'hiver sont données dans le tableau 3.2.

Tableau 3. 2. Zones climatiques d'hiver

Zone	Sous zone	Désignation	Altitude	Caractéristiques
H1 Littoral	H1a	Littoral mer	< 500m	Des hivers doux avec des amplitudes faibles
	H1b	Arrière littoral montagne	>500m	Des hivers plus froids et plus longs
H2 Hauts plateaux	H2a	Atlas tellien-montagne	Entre 1000 et 1500m	Des hivers froids et un écart de température diurne important
	H2b	Atlas saharien-montagne	> 1 500m	Des hivers encore plus froids
H3 Sahara	H3a	Pré-Sahara	Entre 500 et 1000m	Des hivers très froids la nuit par rapport au jour
	H3b	Sahara	Entre 200 et 500m	Des hivers moins froids que la zone H3a avec des écarts de température diurne;
	H3c	Hoggar	>500m	Des hivers très froids analogues à la zone H3a, mais qui persistent même durant la journée

D'après la classification zonale, la ville de Biskra se situe dans la zone climatique d'été E3 et la zone climatique d'hiver H3a, avec comme caractéristiques :

- Des étés très chauds et secs.
- Des hivers très froids la nuit par rapport au jour.

4. Détermination de l'indice d'aridité

L'indice d'aridité de De Martonne (1926) est utilisé pour déterminer le degré d'aridité du climat. Il est calculé sur la base des précipitations annuelles et de la température moyenne annuelle, suivant la formule ci-dessous [216] :

$$Ia = P / T + 10 \dots (8)$$

Avec :

Ia : Indice d'aridité ;

P : Précipitations annuelles ;

T : Température moyenne annuelle.

La lecture de l'indice d'aridité se fait comme suit :

Si $0 < Ia < 5$, le climat est hyper aride.

Si $5 < Ia < 10$, le climat est aride.

Si $10 < Ia < 20$, le climat est semi-aride.

Si $20 < Ia < 30$, le climat est tempéré.

Si $30 < Ia < 55$, le climat est humide.

Calcul de l'indice d'aridité de la ville de Biskra

Suivant les données météorologiques de la ville de Biskra (figure 3.2) :

$$Ia = 146 / 22,85 + 10 = 4,44$$

L'indice d'aridité de la ville de Biskra est de 4,44, ce qui correspond à un climat hyper aride.

En conclusion de cette analyse climatique, la ville de Biskra dispose d'un climat hyper aride, avec des étés très chauds et secs et des hivers très froids la nuit par rapport au jour.

II. Matériaux et méthodes

1. Matériaux utilisés

Parmi les divers matériaux de support poreux, le bois est largement utilisé pour l'élaboration de composites PCM à forme stabilisée ; Yang et al. [217] ont étudié des échantillons de bois carbonisés délignifiés et poreux, imprégnés d'acide laurique. Les matériaux composites ont été préparés par la méthode d'imprégnation sous vide. Le matériau composite présentait une température de fusion de 41,0 °C et une chaleur latente de 178 J/g. Barreneche et al. [218] ont étudié un nouveau matériau hybride composé de bois, d'un revêtement polymère imprégné de cires de paraffine RT21 et RT27 préparées par imprégnation sous vide. Cette étude montre que l'enrobage de polystyrène est nécessaire pour retenir la MCP pendant la transition de phase. Yang et al. [219] ont étudié un nouveau composite à base de bois carbonisé imprégné de tétradécanol préparé par imprégnation sous vide. Le matériau composite présente une chaleur latente élevée de 165,8 J/g. La conductivité thermique du matériau composite est 114 % plus élevée que celle du tétradécanol pur. Cheng et al. [220] ont étudié des composites préparés avec de la farine de bois et imprégnés d'alcool myristylique préparé par infusion. Le matériau composite présente une bonne stabilité de forme en raison de la force capillaire existant entre la farine de bois et l'alcool myristylique fondu. Le matériau composite présente des températures de fusion/congélation de 43,5 et 35 °C, respectivement, et une enthalpie de changement de phase de 166,5 J/g. Hekimoğlu et al. [221] ont étudié des composites à forme stabilisée utilisant de la cellulose microcristalline et une matrice de graphène supportant du stéarate de méthyle comme nouveaux matériaux de stockage de la chaleur produits par imprégnation sous vide. Un taux de charge de stéarate de méthyle de 65 % en poids a été imprégné dans le matériau composite. Le matériau composite présente une température de fusion de 35,32 °C et une enthalpie de 147,97 J/g. Sari et al. [222] ont développé des fibres de bois avec un mélange eutectique d'acide caprique et d'acide stéarique (CA-SA) comprenant 52 % en poids de MCP. Le matériau composite présente une température de fusion de 23 °C et une chaleur latente de 92 J/g. Le mélange eutectique (CA/SA : 83/17 % en poids) présente une température de fusion de 24,73 °C et une chaleur latente de 179 J/g. Les tests de performance thermique ont montré que la différence de température au centre de la cellule composite PCM et de la cellule en fibre de bois était de 2,67 °C pendant une période de chauffage et de 1,18 °C pendant une période de refroidissement. Oztürk et al. [223] ont étudié le matériau à changement de phase micro-encapsulé en utilisant le Micro-PCM imprégné dans une fibre de bois-amidon. Les composites PCM ont été élaborés par un mélange homogène à un rapport de masse de 1:1 de Micro-PCM avec des fibres de bois. Le point de fusion du Micro-PCM se situe à 20 °C et sa

chaleur latente est de 199 J/g. Le matériau composite Micro-PCM développé présente une température de fusion de 18,7 °C et une chaleur latente de 51 J/g. Li et al. [224] ont développé un nouveau matériau composite à changement de phase élaboré par la méthode d'adsorption sous vide pour minimiser le transfert de chaleur dans l'enveloppe du bâtiment. De l'huile de coco a été incorporée dans des fibres de bois acétylées, et du nitrure de bore hexagonal a été ajouté pour améliorer la conductivité thermique. Le composite PCM développé a une chaleur latente de 46,5 J/g. Li et al. [225] ont incorporé du polyéthylène glycol dans du bois carbonisé et l'ont chargé de points de carbone pour empêcher les fuites de MCP. Le matériau composite a été préparé par imprégnation sous vide et a une chaleur latente de 112 J/g et une température de fusion de 51,8 °C. Le composite est un matériau potentiel pour la construction de systèmes de chauffage solaire de l'eau. Les fibres naturelles sont très utilisées dans les composites en raison de leur faible coût, de leur durabilité, de leur biodégradabilité et de leur légèreté [226].

Dans ce travail, l'argile de Biskra (figure 3.8.A) et la sciure de bois (figure 3.8.B) recyclée sont sélectionnées comme matrices poreuses support du MCP. L'utilisation de la sciure de bois et de l'argile comme matériaux de construction contribue au développement durable dans le secteur du bâtiment. Le graphite issu du recyclage (figure 3.8.C) est ajouté afin d'améliorer la conductivité thermique.



Figure 3. 8. Images de A : Argile, B : Sciure de bois, C : Graphite

1.1. Choix des MCPs

Cinq matériaux à changement de phase sont sélectionnés pour le SET par chaleur latente (figure 3.9). Ils sont sélectionnés par rapport à leur disponibilité, leurs caractéristiques thermiques ; à savoir, la température de fusion et la chaleur latente.

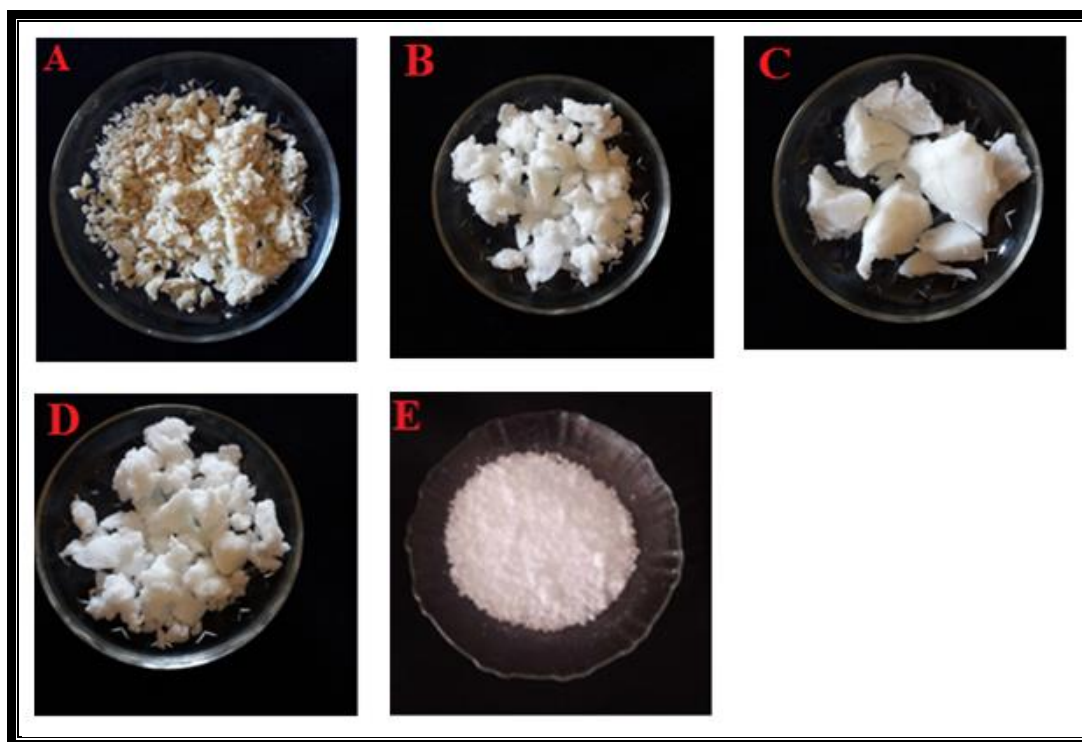


Figure 3. 10. Images des matériaux à changement de phase sélectionnés : A ; Beurre de Cacao, B : Huile de Coprah, C ; Huile Palmiste, D ; RT28 HC, E ; Acide Laurique

1.2. Préparation des matières premières constituant la matrice

Dans un premier temps, chaque matière première est rincée abondamment à l'eau afin d'éliminer les impuretés, elle est ensuite séchée dans une étuve puis conservée dans des boîtes stérilisées.

Dans un second lieu, nous avons procédé au broyage, puis au tamisage des matières premières. Le tamisage est effectué à l'aide d'un tamis de 80 μm afin d'optimiser la surface de contact entre la matrice et le MCP. C'est une opération qui a demandé beaucoup d'efforts physiques, vu la précision exigée. La figure 3.10 montre les différentes étapes de la préparation des matières premières.



Figure 3. 11. Etapes de préparation des matières premières

2. Elaboration des composites MCPs

Les composites MCPs sont élaborés par la méthode de la forme stabilisée, où le MCP est dispersé dans un autre matériau poreux afin de former un matériau stable [154, 227, 228]. Cette technique présente l'avantage de la facilité de mise en œuvre.

La première étape de l'élaboration d'un composite est la préparation de la matrice support du MCP : l'argile, la sciure de bois et le graphite sont mélangés afin d'avoir une matrice homogène avec une bonne distribution des différents éléments de la matrice. Cette dernière est alors chauffée à l'étuve. Le MCP est fondu dans un bain thermostaté, ensuite on rajoute la matrice et on mélange bien afin d'avoir un composite homogène. Après refroidissement du composite MCP, ce dernier est versé dans un moule rectangulaire et compressé à 50 KN avec une presse hydraulique de la marque Oehlgass (figure 3. 12).

Plusieurs composites, avec différentes fractions massiques du MCP et des composants de la matrice, sont élaborés afin de déterminer la forme stable du composite MCP.



Figure 3. 13. Image de la presse hydraulique Oehlgass

2.1. Composites BC/AR + SB + GR (CBC)

Plusieurs composites, avec différentes fractions massiques du MCP (beurre de cacao) et des composants de la matrice (argile, sciure de bois et graphite), sont élaborés afin de déterminer la forme stable du composite MCP. La figure 3.14 montre les différents CBC élaborés.

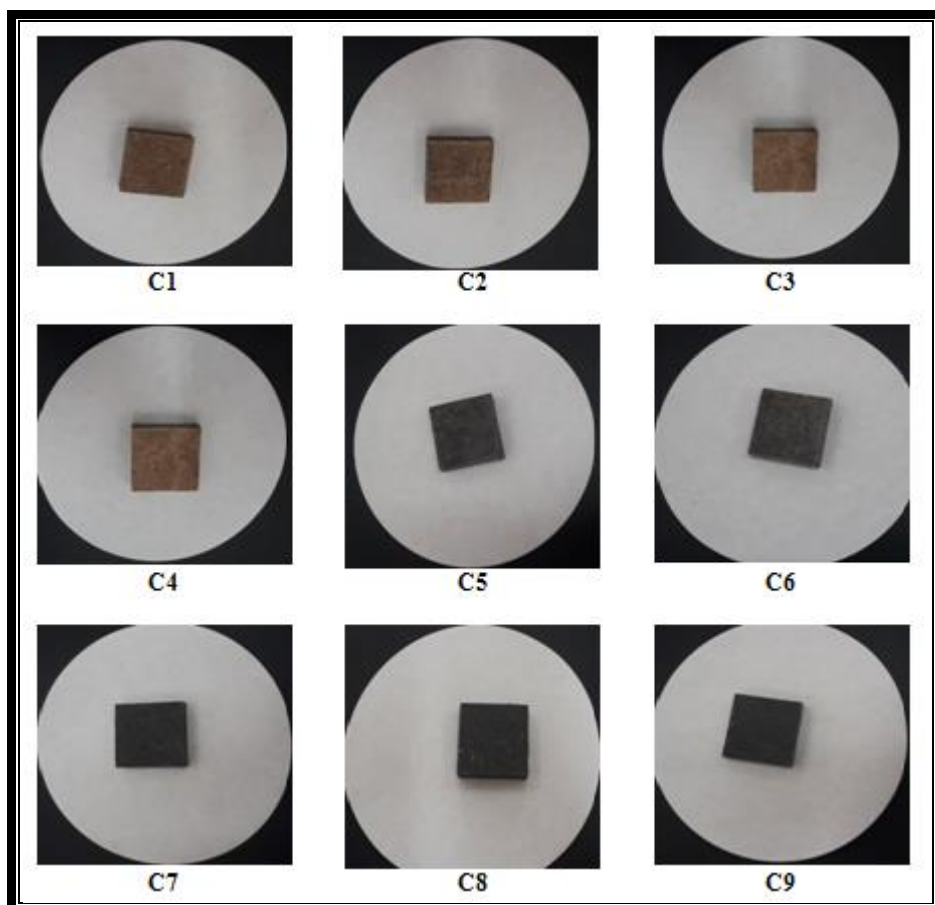


Figure 3. 15. Images des CBC

Les détails des fractions massiques des composites sont donnés dans le tableau 3.3.

Tableau 3. 3. Détails des fractions massiques des CBC élaborés.

composite	BC %	Argile %	Sciure de bois %	Graphite %
C1	40	35	25	-
C2	40	30	30	-
C3	40	40	20	-
C4	45	25	30	-
C5	40	30	25	05
C6	45	25	26.5	3.5
C7	45	20	25	10
C8	45	20	20	15
C9	45	25	20	10

2.2. Composites HP/AR + SB + GR (CHP)

Plusieurs CHP sont élaborés (figure 3.13), afin de déterminer la forme stable du composite.

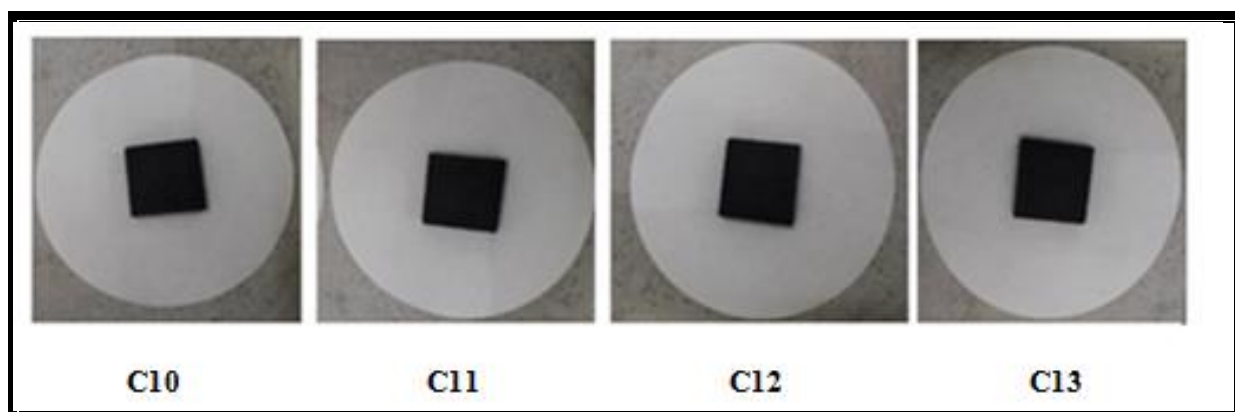


Figure 3. 16. Images des CHP

Les détails des fractions massiques des composites sont donnés dans le tableau 3.4.

Tableau 3. 4. Détails des fractions massiques des CHP

composite	HP %	Argile %	Sciure de bois %	Graphite %
C10	45	20	25	10
C11	45	15	25	15
C12	50	15	25	10
C13	55	15	20	10

2.3. Composites HC/AR + SB + GR (CHC)

Plusieurs CHC (figure 3.14) sont élaborés afin de déterminer la forme stable du composite.

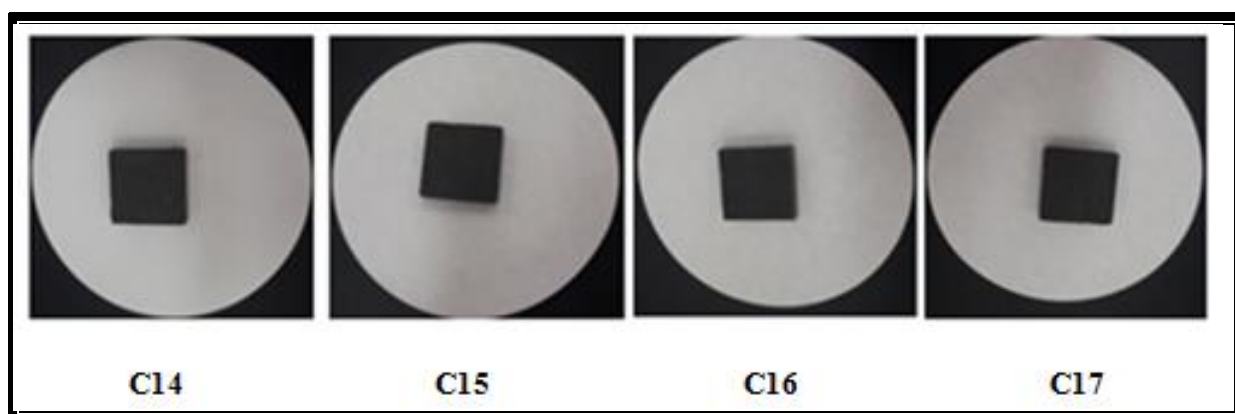


Figure 3. 17. Images des CHC

Les détails des fractions massiques des composites sont donnés dans le tableau 3.5.

Tableau 3. 5. Détails des fractions massiques des CHC

composite	HC %	Argile %	Sciure de bois %	Graphite %
C14	60	05	25	10
C15	55	05	30	10
C16	50	10	30	10
C17	45	15	30	10

2.4. Composites RT 28 HC/AR + SB + GR (CRT28 HC)

Plusieurs composites sont élaborés afin de déterminer la forme stable du composite CRT28 HC (figure 3.15).

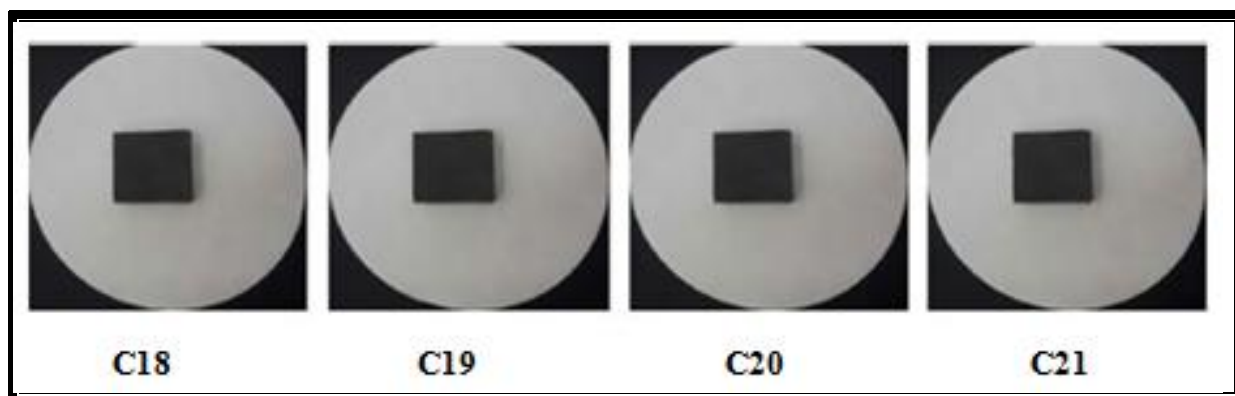


Figure 3. 18. Images des CRT28 HC

Les détails des fractions massiques des composites sont donnés dans le tableau 3.6.

Tableau 3. 6. Détails des fractions massiques des RT28 HC

composite	RT 28 HC %	Argile %	Sciure de bois %	Graphite %
C18	65	05	20	10
C19	60	05	25	10
C20	55	05	30	10
C21	50	10	30	10

2.5. Composites AL/AR + SB + GR (CAL)

Plusieurs composites sont élaborés afin de déterminer la forme stable du composite CAL (figure 3.16).

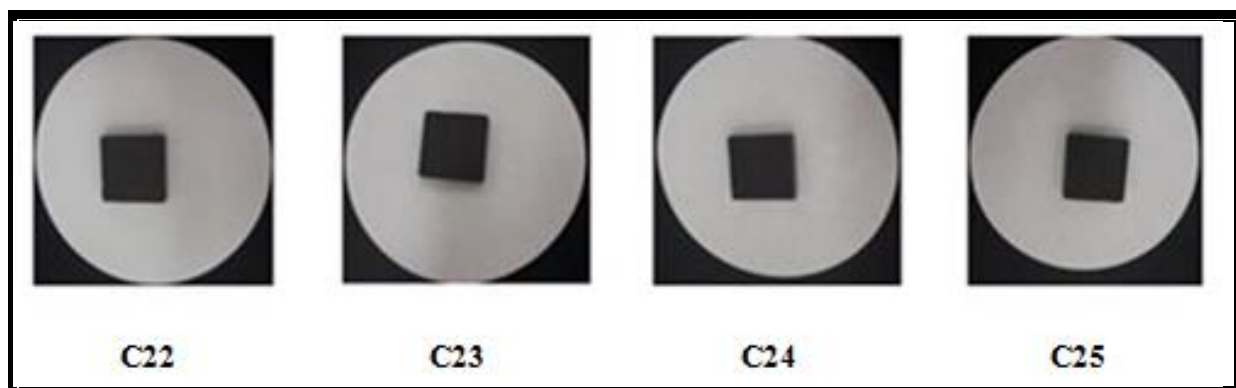


Figure 3. 19. Images des CAL

Les détails des fractions massiques des composites sont donnés dans le tableau 3.7.

Tableau 3. 7. Détails des fractions massiques des CAL

composite	AL %	Argile %	Sciure de bois %	Graphite %
C22	60	05	25	10
C23	55	05	30	10
C24	50	10	30	10
C25	50	15	25	10

3. Techniques de caractérisation des composites MCPs

3.1. Granulométrie Laser

La granulométrie laser est une technique de caractérisation physique qui mesure la taille des particules des différentes poudres utilisées dans l'élaboration des composites MCPs. L'appareil utilisé pour l'analyse granulométrique est le LA-960 de HORIBA (figure 3.20).



Figure 3. 21. Image du LA-960 de HORIBA

3.2. Masse volumique Absolue

La masse volumique absolue des différents MCPs, ainsi que des matériaux supports des MCPs étudiés dans ce travail, a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre. Une balance de précision est utilisée afin de mesurer la masse. La formule utilisée pour la détermination de la masse volumique de chaque matériau est la suivante :

$$\rho = (m_3 - m_1 / m_2 + m_3 - (m_4 - m_1)) * \rho_{\text{eau}} \dots (9)$$

Avec :

m_1 : Masse du pycnomètre vide.

m_2 : Masse du pycnomètre rempli d'eau.

m_3 : Masse du pycnomètre avec l'échantillon.

m_4 : Masse du pycnomètre avec échantillon et eau.

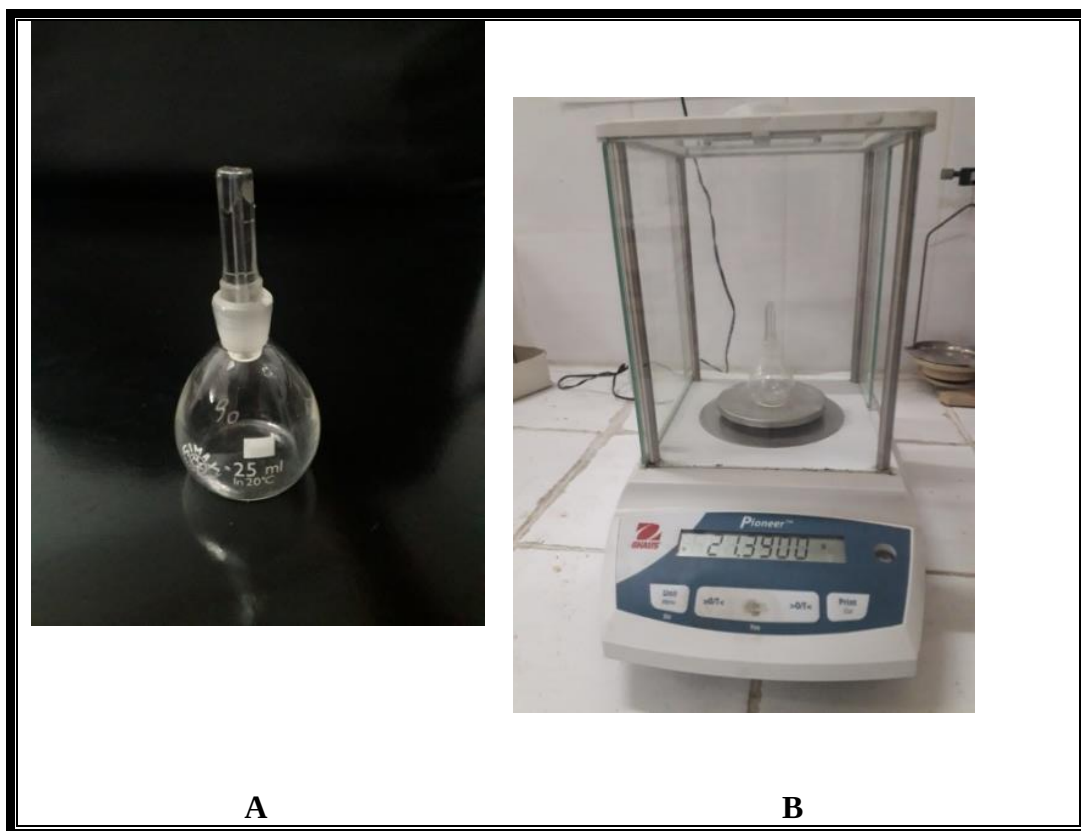


Figure 3. 22. Images du pycnomètre (A) et la balance de précision (B)

3.3. Traitement thermique

Les composites élaborés avec différentes fractions massiques des MCPs et de la matrice sont placés sur des papiers filtres et mis à l'étuve (figure 3. 23) pendant 90 mn à une température de 50 °C, qui est une température supérieure à la température de fusion des MCPs. Le but du traitement thermique des composites MCPs est d'identifier leurs capacités à retenir le MCP à l'état liquide.



Figure 3. 24. Image du traitement thermique a l'étuve des composites MCPs

3.4. Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier (FTIR)

L'analyse par FTIR est une technique de caractérisation chimique qui s'effectue afin de vérifier la stabilité chimique des matériaux composites élaborés ainsi que la compatibilité chimique entre ses différents composants. L'appareil utilisé pour l'analyse FTIR est l'Iraffinity1-S de SHIMADZU (figure 3.20). L'analyse consiste à placer l'échantillon de quelques milligrammes à l'intérieur du spectrophotomètre, qui est ensuite exposé à des faisceaux de lumière infrarouge. Les échantillons sont balayés par 43 scans sur une plage de fréquence allant de 400 cm^{-1} à 4000 cm^{-1} avec une résolution de 4 cm^{-1} . L'absorption du rayonnement infrarouge par les molécules de l'échantillon permet d'avoir des bandes d'absorption à des fréquences précises.



Figure 3. 25. Image de l'Iraffinity1-S de SHIMADZU

3.5. Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

La MEB est une technique de caractérisation physique des matériaux composites élaborés. L'objectif de cette caractérisation est d'observer la microstructure du matériau composite avec et sans MCP. L'analyse est effectuée avec l'appareil FEI QUANTA 650. La MEB consiste à placer l'échantillon de quelques milligrammes à l'intérieur de l'appareil, qui est ensuite exposé à des faisceaux d'électrons qui frappent la surface de l'échantillon. Des particules de

l'échantillon sont captées par des détecteurs et sont réinterprétées en images suivant les grossissements souhaités.



Figure 3. 26. Image du Microscope Électronique à Balayage FEI QUANTA 650

3.6. Analyse Thermogravimétrique (ATG)

L'ATG est une technique de caractérisation thermique dont l'objectif est de vérifier la stabilité et la fiabilité thermique des composites MCPs. C'est un paramètre indispensable à l'identification des performances thermiques d'un matériau. L'analyse permet de suivre la perte de masse du matériau étudié, ce qui indique la température de début de dégradation de ce dernier [229].

Les mesures ATG sont effectuées avec les appareils SDT Q600 de TA Instrument et STA 409PC/PG de NETZSCH. Environ 10 mg d'un échantillon est placé dans des creusets de l'appareil. L'analyse se fait sur la plage de température allant de la température ambiante (25 °C) jusqu'à 600 °C avec une vitesse de chauffe de 10 °C/mn.

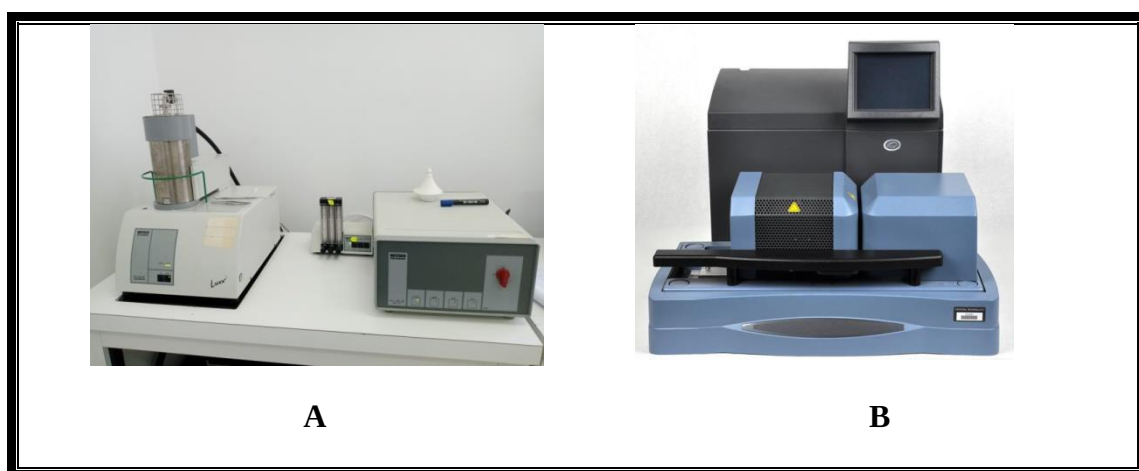


Figure 3. 27. Image des appareils d'analyse TG, (A) STA 409 PC/PG, (B) SDT Q600

3.7. Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC)

La DSC est une technique d'identification des caractéristiques thermiques des MCPs et des composites MCPs élaborés. L'appareil mesure le flux de chaleur absorbé puis dégagé par le matériau pour spécifier sa chaleur latente de fusion/cristallisation. L'appareil utilisé pour l'analyse DSC est le DSC131 Evo de SETARAM. Environ 10 mg d'un échantillon est placé dans des creusets, puis placé dans l'appareil. L'analyse se fait sur la plage de température allant de 0 à 55 °C avec une vitesse de chauffe de 1 °C/mn.



Figure 3. 28. Image du DSC131 Evo de SETARAM

3.8. Diffraction des Rayons X (DRX)

La DRX est une technique de caractérisation permettant d'étudier la nature et la structure cristallographique des matériaux. Le diffractomètre utilisé pour l'analyse DRX est le D2 PHASER de BRUKER.



Figure 3. 29. Image du D2 PHASER de BRUKER

3.9. Résistance mécanique à la compression

La résistance mécanique à la compression d'un matériau correspond à la charge de rupture lors de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale.

Les éprouvettes réalisées pour cet essai de résistance à la compression sont cubiques avec les dimensions ($40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) (fig. 3.25.a). Les essais d'écrasement ont été effectués avec la machine d'essai de compression IBERTEST (fig. 3.25.b) d'une capacité maximale de 200 kN. L'essai d'écrasement des éprouvettes cubiques est montré dans la figure 3.25.c.

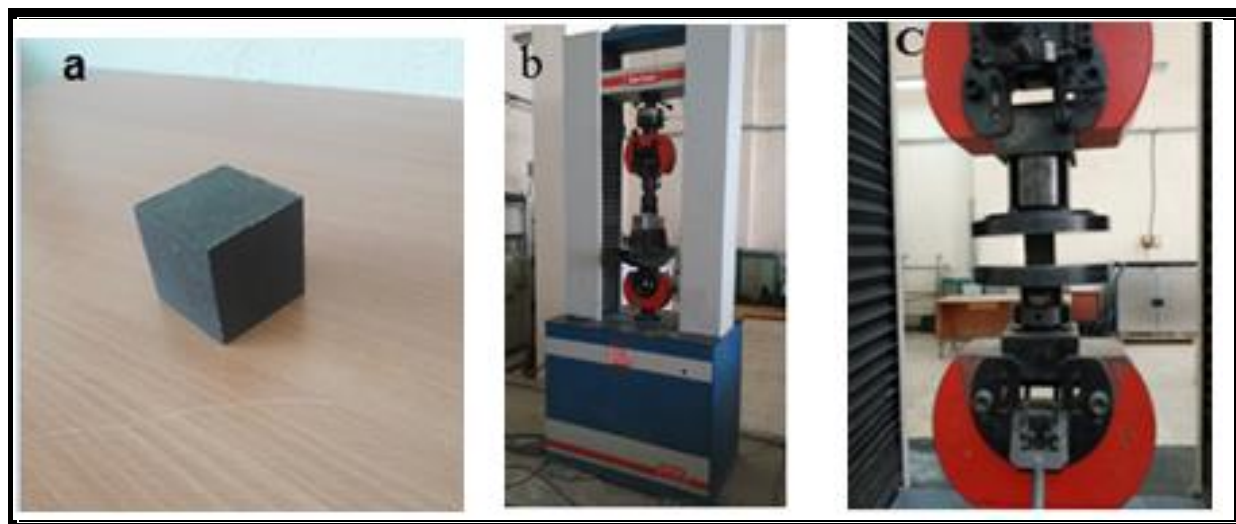


Figure 3. 30. Images de ; a : l'éprouvette, b : Machine de compression, c : Essai d'écrasement

3.10. Conductivité thermique

Les mesures de la conductivité thermique ont été réalisées par le CT-mètre H112N. Le principe est de placer une plaque de dimension ($30 \times 30 \text{ cm}$) de surface entre les deux plaques du CT-

mètre dont l'une est froide et l'autre est chaude, dans lequel on envoie une puissance de chauffe. Une sonde destinée à recueillir la température dans le matériau testé est placée à la surface de celui-ci.



Figure 3. 31. Images de ; a : Appareil CT-mètre H112N, b : l'éprouvette

Le calcul de la conductivité thermique se fait suivant la formule suivante :

$$\lambda = \frac{Is \left[(K1 + (K2 * T)) + ((k3 + (k4 * T)) * HFM) + ((k5 + (k6 * T))HFM^2) \right]}{dT} \quad \dots (10)$$

Avec :

- Is : Epaisseur du matériau (m).
- T : $T1+T2 / 2$
- dT : $T1-T2$
- HFM : Lecture du débitmètre de chaleur (mV).
- K1= 88.1389.
- K2= -2.7829.
- K3= -21.3064
- K4= 0.8037.
- K5= 0.7954.
- K6= -0.0189.

4. Conclusion

Ce présent chapitre a été consacré à l'élaboration des nouveaux matériaux composites MCPs. La matrice support du MCP a été élaborée avec l'argile locale, la sciure de bois et le graphite issus du recyclage. L'utilisation de ces matériaux locaux dans l'élaboration des nouveaux matériaux composites contribue au développement durable dans le secteur du bâtiment.

Cinq MCPs ont été sélectionnés pour l'élaboration des nouveaux matériaux composites. Ils ont été sélectionnés par rapport à leur disponibilité, à leurs températures de fusion et à leurs chaleurs latentes.

Les matériaux composites élaborés sont soumis à une multitude de caractérisations afin d'identifier leurs propriétés physico-chimiques, thermiques et mécaniques ; les matériaux composites ont d'abord subi un traitement thermique permettant de voir leur comportement à l'état fusion du MCP. Par la suite, ces derniers sont caractérisés chimiquement avec la DRX et la FTIR pour voir la compatibilité chimique entre les différents composants du matériau composite MCP. La MEB des composites MCPs a été effectuée afin d'observer leur microstructure. Des analyses TG ainsi que par DSC des composites MCPs sont effectuées afin de vérifier les performances thermiques ainsi que la fiabilité thermique des matériaux composites MCPs élaborés. Des mesures de conductivité thermique des composites MCPs ont été effectuées afin de voir l'impact de l'ajout du graphite sur l'amélioration de la conductivité thermique. Enfin, des essais de compression simple sur les nouveaux matériaux composites MCPs ont été conduits afin de vérifier leur résistance mécanique. Le but de cet ensemble de caractérisations physico-chimiques, thermiques et mécaniques est de vérifier la fiabilité de ces nouveaux matériaux composites MCPs avant qu'ils ne soient intégrés dans l'enveloppe du bâtiment.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

1. Introduction

Ce présent chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus par les différentes caractérisations thermiques, physico-chimiques et mécaniques des nouveaux matériaux composites MCPs élaborés. Cette étape de caractérisation est cruciale afin de vérifier la stabilité chimique, la fiabilité thermique et la résistance mécanique des nouveaux matériaux composites MCPs élaborés pour une intégration dans l'enveloppe du bâtiment pour des applications de stockage de l'énergie thermique.

2. Résultat des analyses par granulométrie laser

Les matériaux utilisés dans la matrice (argile, sciure de bois et graphite) ont été analysés par granulométrie laser.

2.1. Résultat des analyses par granulométrie laser de l'argile

La poudre d'argile utilisée a été analysée par granulométrie laser afin de connaître la répartition et la taille de ces particules.

La figure 4.1 présente les fractions cumulées en volume des particules d'argile et ce, en fonction du diamètre équivalent. Les diamètres caractéristiques, calculés à partir de la courbe des pourcentages cumulés de l'argile, sont donnés dans le tableau 4.1.

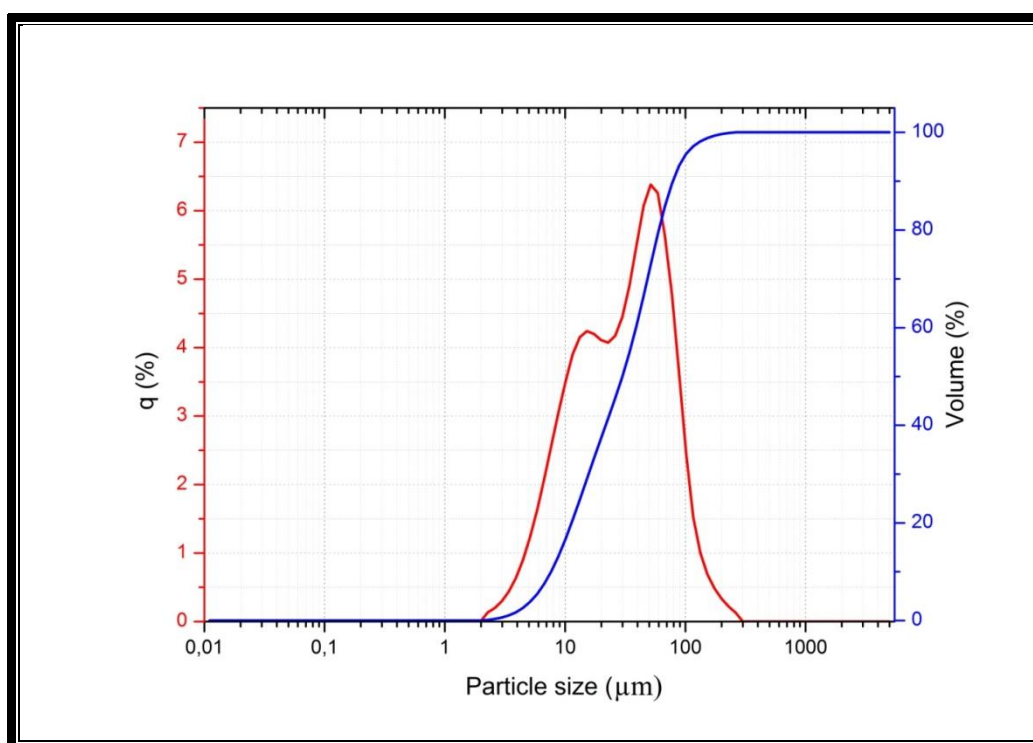


Figure 4. 1. Distribution granulométrique des particules d'argile

Tableau 4. 1. Fractions cumulées des particules d'argile en fonction du diamètre

Pourcentage cumulé (%)	Diamètre (μm)
D10	7.639
D50	29.894
D90	78.693

2.2. Résultat des analyses par granulométrie laser de la sciure de bois

La poudre de sciure de bois utilisée a été analysée par granulométrie laser afin de connaître la répartition et la taille de ses particules.

La figure 4.2 présente les fractions cumulées en volume des particules de poudre de sciure de bois et ce, en fonction du diamètre équivalent. Les diamètres caractéristiques, calculés à partir de la courbe des pourcentages cumulés de la sciure de bois, sont donnés dans le tableau 4.2.

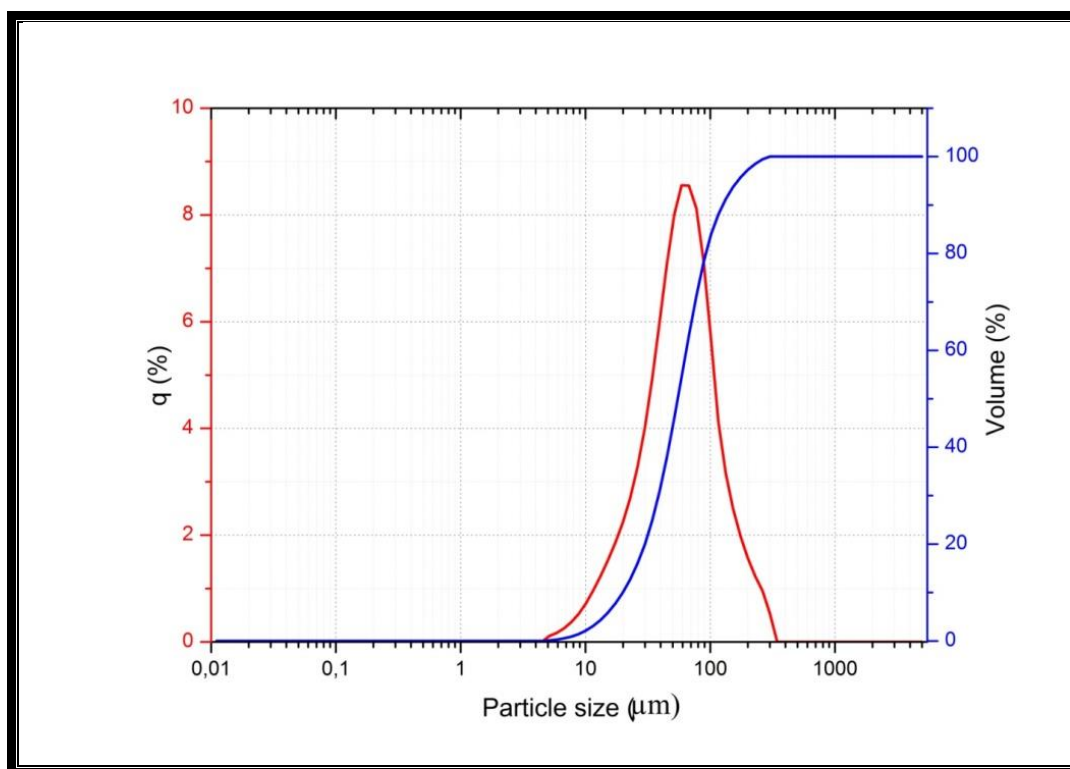


Figure 4. 2. Distribution granulométrique des particules de la sciure de bois

Tableau 4. 2. Fractions cumulées des particules de la sciure de bois en fonction du diamètre équivalent

Pourcentage cumulé (%)	Diamètre (μm)
D10	19.926
D50	54.882
D90	126.117

2.3. Résultat des analyses par granulométrie laser du graphite

La poudre de graphite utilisée a été analysée par granulométrie laser afin de connaître la répartition et la taille de ces particules.

La figure 4.3 présente les fractions cumulées en volume des particules de poudre de graphite et ce, en fonction du diamètre équivalent. Les diamètres caractéristiques, calculés à partir de la courbe des pourcentages cumulés du graphite, sont donnés dans le tableau 4.3.

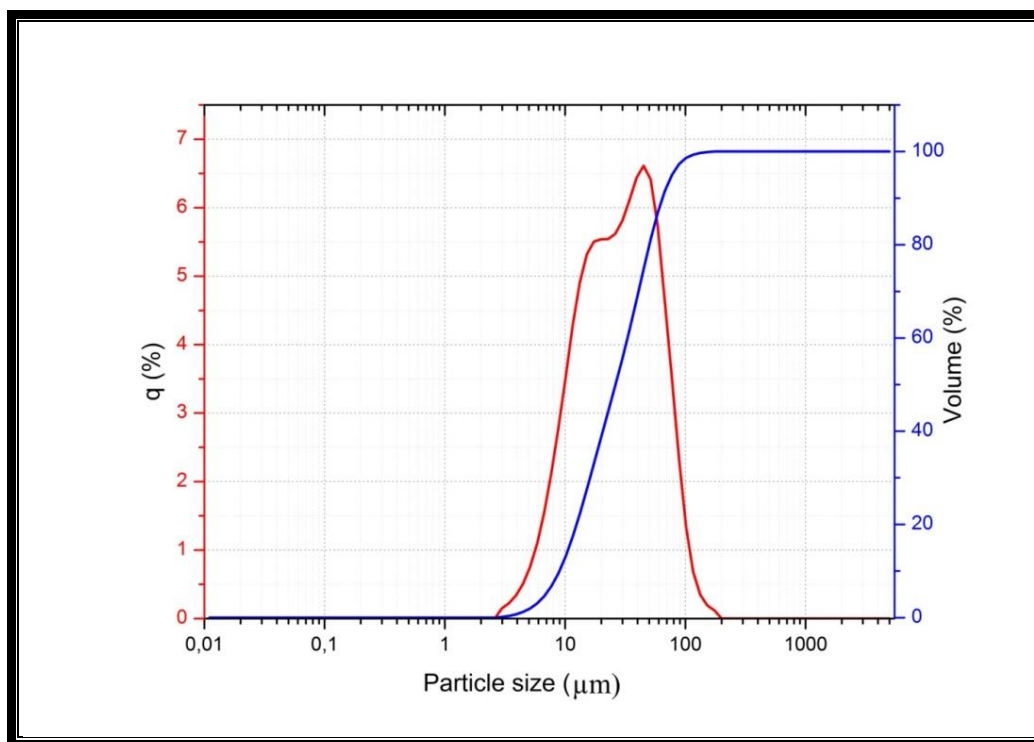


Figure 4. 3. Distribution granulométrique des particules de la poudre de graphite

Tableau 4. 3. Fractions cumulées des particules du graphite en fonction du diamètre équivalent

Pourcentage cumulé (%)	Diamètre (μm)
D10	8.970
D50	26.252
D90	64.598

3. Résultats de la masse volumique absolue

Les masses volumiques absolues des différents MCPs et des différents matériaux utilisés dans les matrices support des MCPs sont données dans le tableau 4.4.

Tableau 4. 4. Masse volumique absolue des matériaux utilisés

Matériau	Masse volumique absolue (kg/m ³)
Argile	2260
Sciure de bois	230
Graphite	550
Beurre de Cacao	710
Huile Palmiste	930
Huile de Coprah	830

4. Résultats du traitement thermique des composites MCPs

4.1. Résultats du traitement thermique des CBC

La figure 4.4 montre les taches de graisse issues des CBC, après traitement thermique. Ces fuites du MCP (BC) montrent la capacité de rétention du BC de chaque composite. En

comparant les taches de graisse sur chaque papier filtre, on observe que la tache de graisse laissée par le composite C7 est la moins importante, ce qui signifie que le composite C7 présente la plus grande capacité de rétention du BC en comparaison aux autres composites.

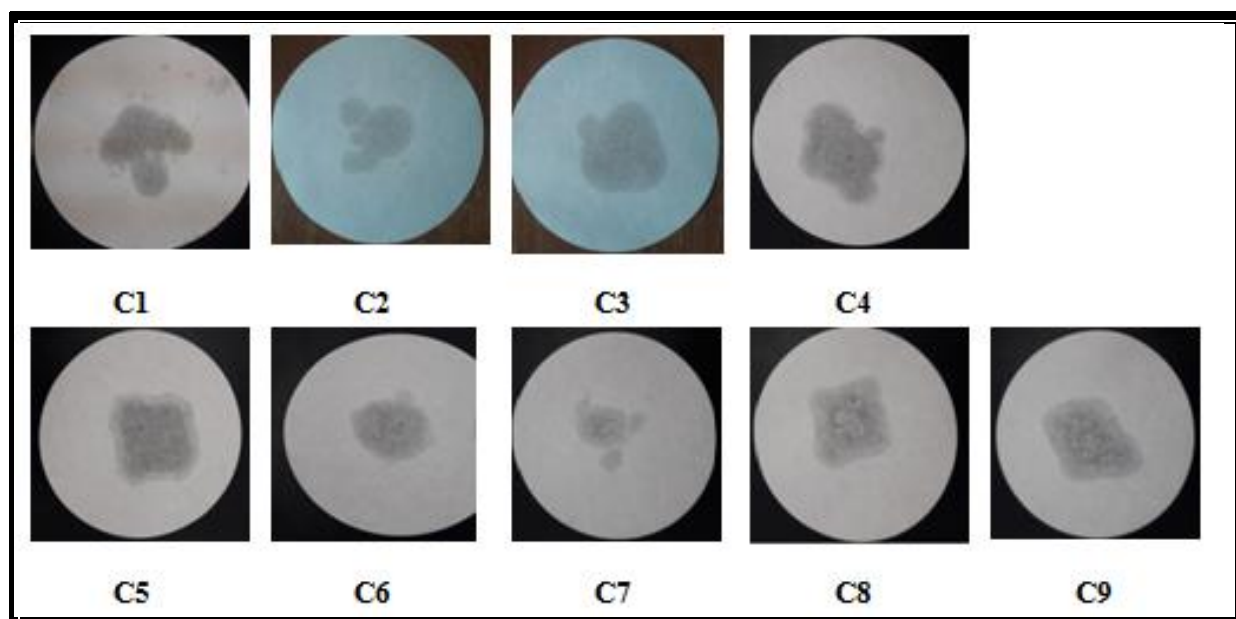


Figure 4. 4. Résultat du traitement thermique des CBC

Ce résultat est confirmé avec la comparaison des masses des composites avant et après le traitement thermique donnée dans le tableau 4.5. Le composite C7 présente la plus faible perte de masse. Cette perte de masse représente la fuite du MCP (BC) à l'état de fusion. En conclusion, le composite C7 est le composite qui retient le plus le BC à l'état de fusion, il représente la forme stabilisée du CBC.

Tableau 4. 5. Comparaison des masses des CBC avant et après le traitement thermique

Composite	Masse avant le traitement thermique (g)	Masse après le traitement thermique (g)	Perte de masse (g)
C1	19.40	19.19	0.21
C2	19.52	19.34	0.18
C3	19.07	18.81	0.26
C4	19.10	18.86	0.24
C5	19.45	19.20	0.25
C6	19.99	19.77	0.22
C7	18.70	18.53	0.17
C8	19.65	19.4	0.25
C9	19.76	19.49	0.27

4.2. Résultats du traitement thermique des CHP

La figure 4.5 montre les taches de graisse issues des CHP après traitement thermique. Ces fuites du MCP (HP) montrent les capacités de rétention du MCP de chaque composite. En comparant les taches de graisse sur chaque papier filtre. On observe que la tache de graisse laissée par le

composite C10 est moins importante que celles laissées par les autres composites, ce qui signifie que le composite C10 présente la plus grande capacité de rétention du MCP (HP) ; il représente alors la forme stabilisée du CHP.

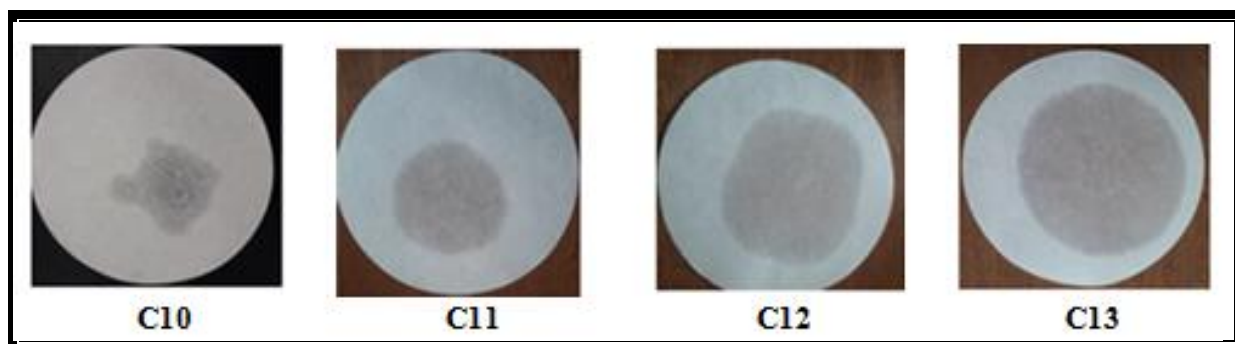


Figure 4. 5. Résultat du traitement thermique des CHP

Ce résultat est confirmé avec la comparaison des masses des CHP avant et après le traitement thermique donné dans le tableau 4.6. Le composite C10 présente la plus faible perte de masse, ce qui signifie que c'est le composite qui retient le plus le MCP (HP) à l'état de fusion.

Tableau 4. 6. Comparaison des masses des composites CHP avant et après le traitement thermique

Composite	Masse avant le traitement thermique (g)	Masse après le traitement thermique (g)	Perte de masse (g)
C10	18.10	17.89	0.21
C11	18.34	18.09	0.25
C12	18.31	18.02	0.29
C13	18.29	17.92	0.37

4.3. Résultats du traitement thermique des CHC

La figure 4.6 montre les taches de graisse issues des CHC. Après traitement thermique, ces fuites du MCP (HC) montrent les capacités de rétention du MCP de chaque composite. En comparant les taches de graisse sur chaque papier filtre. On observe que la tache de graisse laissée par le composite C17 est moins importante que celles laissées par les autres composites, ce qui signifie que le composite C17 présente la plus grande capacité de rétention du MCP (HC) ; il représente alors la forme stabilisée du CHC.

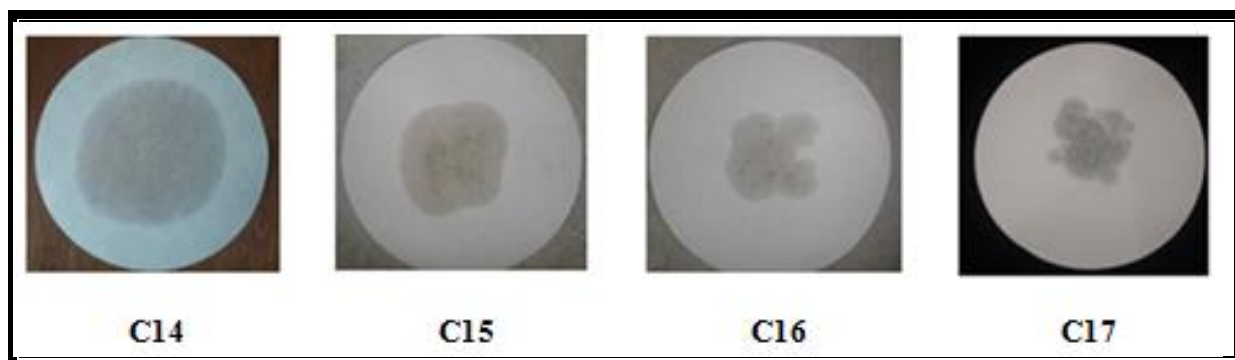


Figure 4. 6. Résultat du traitement thermique des CHC

Ce résultat est confirmé avec la comparaison des masses des composites avant et après le traitement thermique donné dans le tableau 4.7. Le composite C17 présente la plus faible perte de masse, ce qui signifie que c'est le composite qui retient le plus le MCP à l'état de fusion.

Tableau 4. 7. Comparaison des masses des CHC avant et après le traitement thermique

Composite	Masse avant le traitement thermique (g)	Masse après le traitement thermique (g)	Perte de masse (g)
C14	18.19	17.82	0.37
C15	18.54	18.28	0.26
C16	18.37	18.13	0.24
C17	18.41	18.19	0.22

4.4. Résultats du traitement thermique des CRT28 HC

La figure 4.7 montre les taches de graisse issues des CRT28 HC. Après traitement thermique, ces fuites de la RT28 HC montrent les capacités de rétention du MCP de chaque composite. En comparant les taches de graisse sur chaque papier filtre. On observe que la tache de graisse laissée par le composite C21 est moins importante que celle laissée par les autres composites, ce qui signifie que le composite C21 présente la plus grande capacité de rétention de la RT28 HC ; il représente alors la forme stabilisée du CRT28 HC.

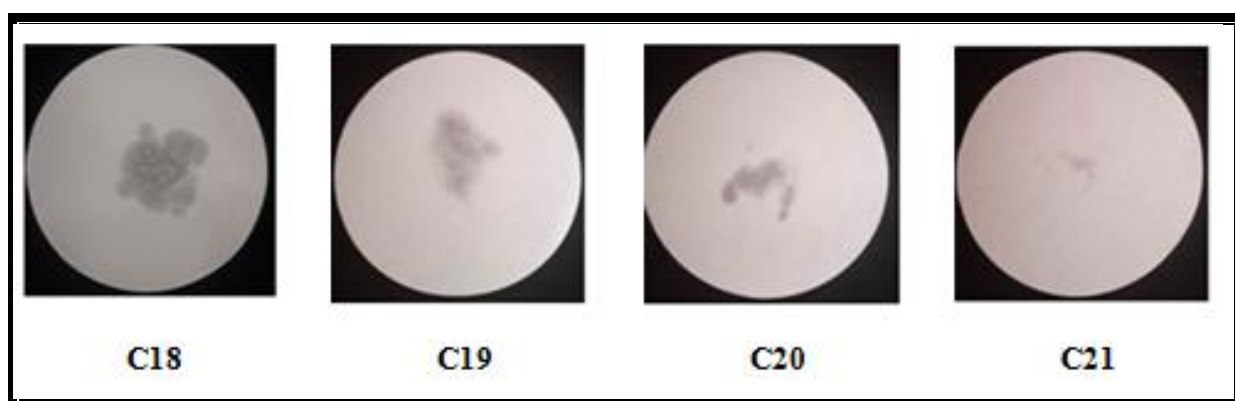


Figure 4. 7. Résultat du traitement thermique des CRT28 HC

Ce résultat est confirmé avec la comparaison des masses des CRT28 HC avant et après le traitement thermique donnée dans le tableau 4.8. Le composite C21 présente la plus faible perte de masse, ce qui signifie que c'est le composite qui retient le plus le MCP à l'état de fusion.

Tableau 4. 8. Comparaison des masses des CRT28 HC avant et après le traitement thermique

Composite	Masse avant le traitement thermique (g)	Masse après le traitement thermique (g)	Perte de masse (g)
C18	18.26	18.00	0.26
C19	18.42	18.25	0.17
C20	18.57	18.46	0.11
C21	18.33	18.28	0.05

4.5. Résultats du traitement thermique des CAL

La figure 4.8 montre les taches de graisse issues des CAL après traitement thermique. Ces fuites du MCP (AL) montrent les capacités de rétention du MCP de chaque composite. En comparant les taches de graisse sur chaque papier filtre. On observe que la tache de graisse laissée par le composite C25 est moins importante que celle laissée par les autres composites, ce qui signifie que le composite C25 présente la plus grande capacité de rétention du MCP (AL) ; il représente alors la forme stabilisée du composite CAL.

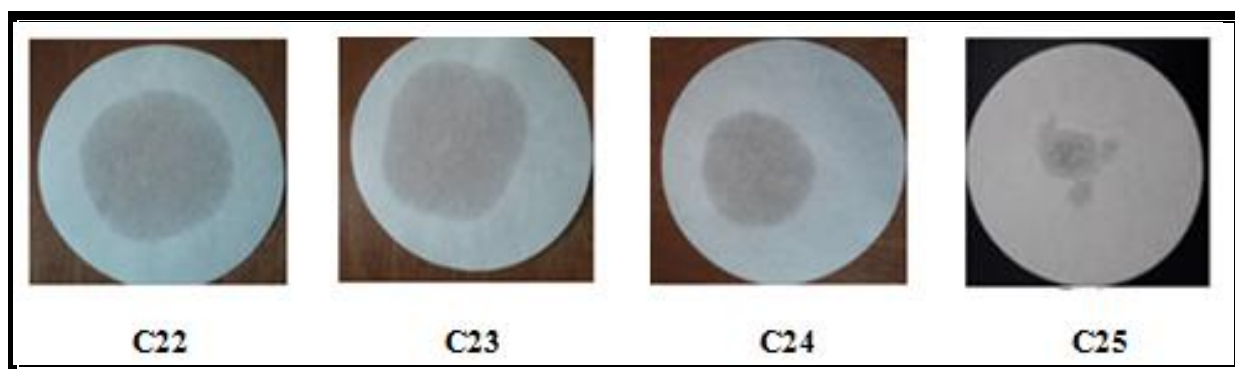


Figure 4. 8. Résultat du traitement thermique des CAL

Ce résultat est confirmé avec la comparaison des masses des composites avant et après le traitement thermique donné dans le Tableau 4.9. Le composite C25 présente la plus faible perte de masse, ce qui signifie que c'est le composite qui retient le plus le MCP (AL) à l'état de fusion.

Tableau 4. 9. Comparaison des masses des CAL avant et après le traitement thermique

Composite	Masse avant le traitement thermique (g)	Masse après le traitement thermique (g)	Perte de masse (g)
C22	18.24	17.88	0.36
C23	18.59	18.25	0.34
C24	18.74	18.48	0.26
C25	18.81	18.61	0.20

5. Résultats de l'analyse par spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier (FTIR)

5.1. Résultats de l'analyse FTIR de l'argile (AG)

La figure 4.9 montre le spectre infrarouge de l'argile. Le spectre IR de l'argile présente deux pics à 1633 cm^{-1} et 1424 cm^{-1} dus aux vibrations de flexion O-H de l'eau [230, 231]. Les pics spécifiques enregistrés à 1009 cm^{-1} , 517 cm^{-1} et 466 cm^{-1} sont associés à la flexion Si-O [232–234]. Le pic à 912 cm^{-1} implique la présence d'une vibration de flexion des AL-O [235, 236] et le pic à 712 cm^{-1} est dû aux vibrations C-O [237].

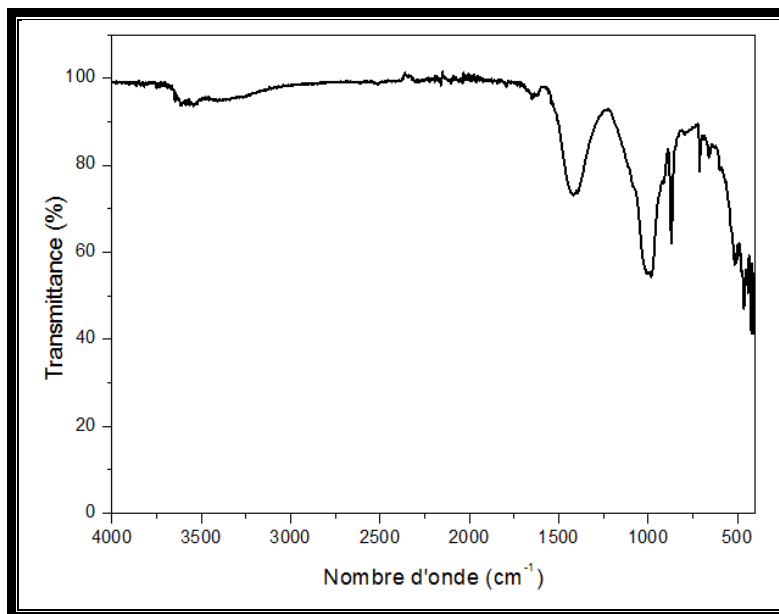


Figure 4. 9. Spectre IR de l'Argile

5.2. Résultats de l'analyse FTIR de la sciure de bois (SB)

La figure 4.10 montre le spectre infrarouge de la sciure de bois. Le spectre IR de la sciure de bois présente un pic à 1269 cm^{-1} dû aux vibrations de flexion des groupes C-H dans la lignine [222], et le pic à 1024 cm^{-1} est dû à des étirements C-O-C dans la cellulose et les hémicelluloses [222, 238].

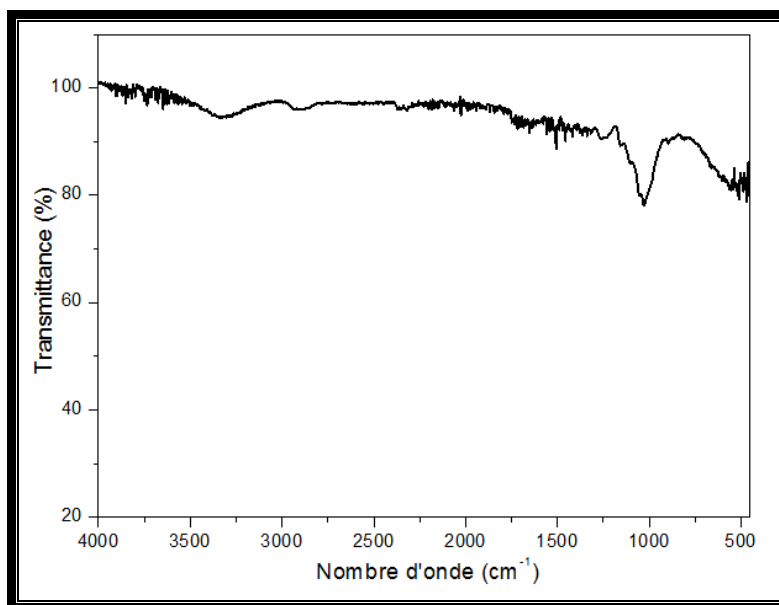


Figure 4. 10. Spectre IR de la Sciure de Bois

5.3. Résultats de l'analyse FTIR du BC

La figure 4.11 montre le spectre infrarouge du beurre de cacao. Le spectre du BC montre des pics d'absorption à 2913 cm^{-1} et 2847 cm^{-1} qui sont dus à des vibrations d'étirement C-H [239–241]. Le pic observé à 1734 cm^{-1} est causé par des vibrations d'étirement C=O [242]. Le pic observé à 1470 cm^{-1} est dû à des vibrations de déformation C-H [240]. Les pics observés à 1248 cm^{-1} et 1175 cm^{-1} sont dus aux vibrations d'étirement C-O-C et aux vibrations de déformation C-H [239]. Le pic observé à 718 cm^{-1} est causé par des vibrations de déformation C-H [240].

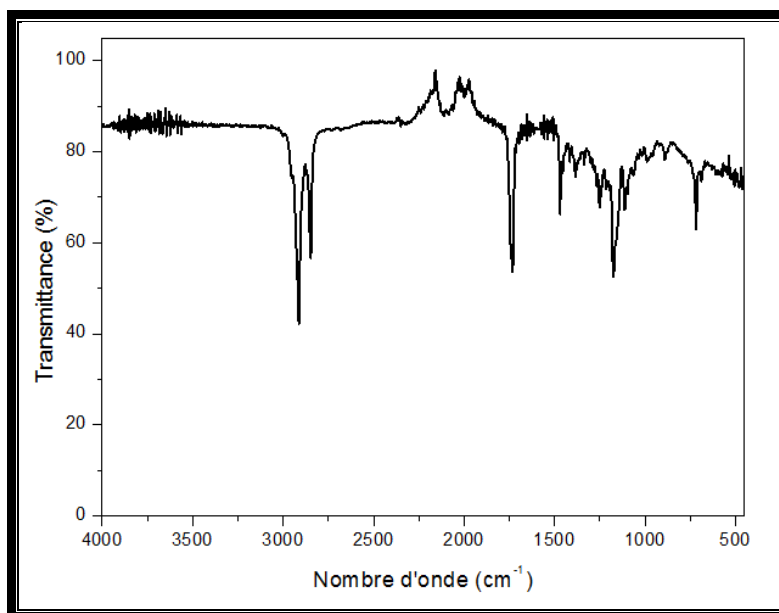


Figure 4. 11. Spectre IR du BC

5.4. Résultats de l'analyse FTIR de l'HC

La figure 4.12 montre le spectre infrarouge de l'huile de coprah. Le spectre IR de l'HC présente deux pics à 2918 cm^{-1} et 2851 cm^{-1} dus aux vibrations d'étirement C-H [222]. Le pic à 1740 cm^{-1} implique la présence d'une vibration d'étirement de la bande C=O [242]. Le pic observé à 1458 cm^{-1} est dû à des vibrations de flexion C-H [239]. Des pics spécifiques, enregistrés à 1153 cm^{-1} et 1003 cm^{-1} , sont associés à l'étirement C-O-C et à la flexion C-H [241].

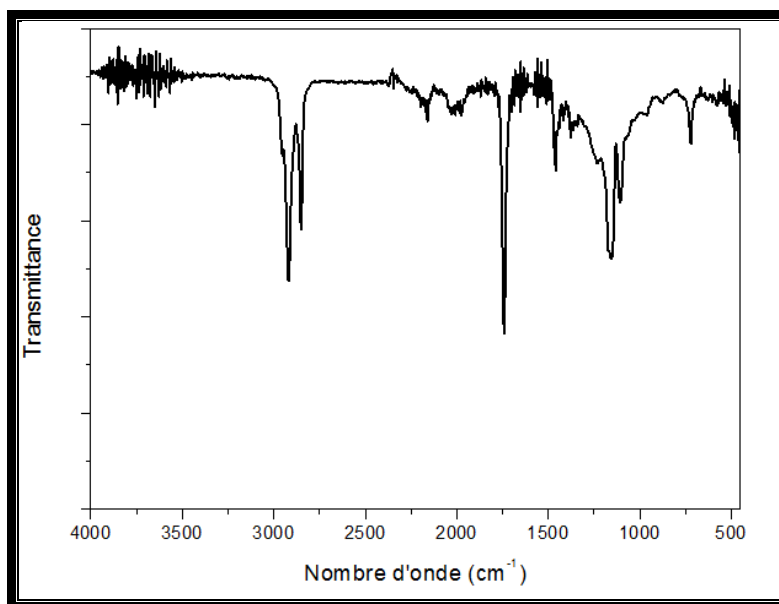


Figure 4. 12. Spectre IR de l'HC

5.5. Résultats de l'analyse FTIR de l'HP

La figure 4.13 montre le spectre infrarouge de l'huile palmiste. Le spectre de l'HP montre des pics d'absorption à 2914 cm^{-1} et 2848 cm^{-1} qui sont dus à des vibrations d'étirement C-H [239–241]. Le pic observé à 1739 cm^{-1} est causé par des vibrations d'étirement C=O [242]. Le pic observé à 1463 cm^{-1} est dû à des vibrations de déformation C-H [239]. Les pics observés à 1172 cm^{-1} et 1105 cm^{-1} sont dus aux vibrations d'étirement C-O-C et aux vibrations de déformation C-H [241].

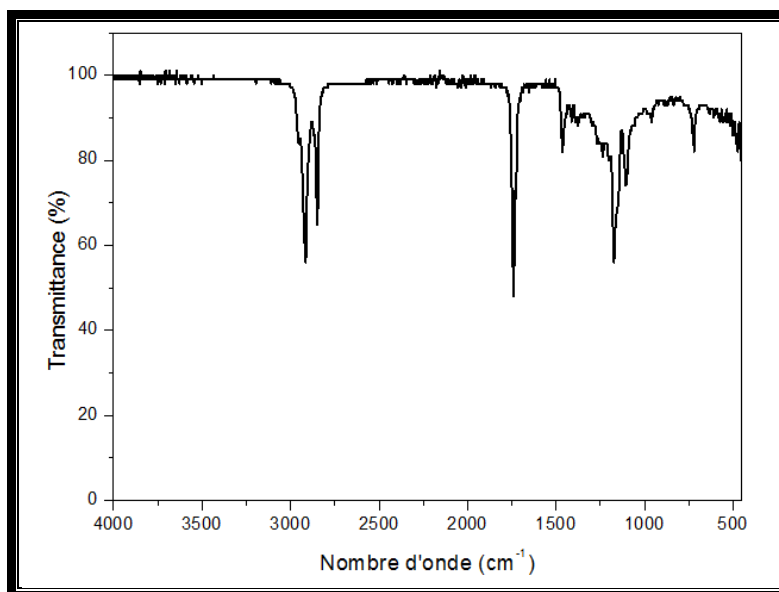


Figure 4. 13. Spectre IR de l'HP

5.6. Résultats de l'analyse FTIR de la RT28 HC

La figure 4.14 montre le spectre infrarouge de la RT28 HC. Le spectre IR de la RT28 HC présente un pic à 2951 cm^{-1} dû aux vibrations d'étirement du CH_3 [243]. Les bandes d'étirement C-H sont présentées à 2908 cm^{-1} et 2845 cm^{-1} [244–246]. Le pic à 1469 cm^{-1} est dû aux déformations CH_2 [247–250], et le pic à 715 cm^{-1} est dû aux vibrations CH_2 [251].

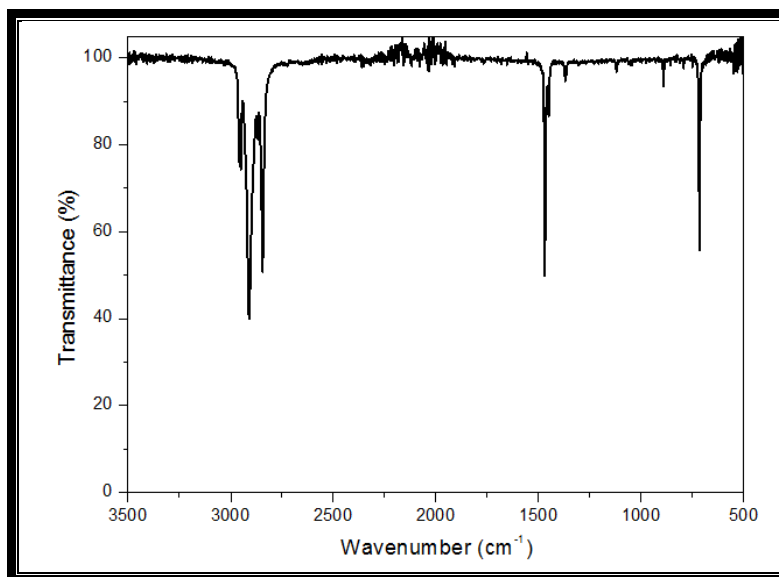


Figure 4. 14. Spectre IR de la RT28 HC

5.7. Résultats de l'analyse FTIR de l'AL

La figure 4.15 montre le spectre infrarouge de l'acide laurique. Le spectre IR de l'AL présente deux pics à 2910 cm^{-1} et 2846 cm^{-1} dus aux vibrations d'étirement C-H [240, 252]. Le pic à 1695 cm^{-1} implique la présence d'une vibration d'étirement de la bande $\text{C}=\text{O}$ [242, 253]. Le pic du carbonyle de l'acide laurique est observé à 1469 cm^{-1} [254]. Le pic à 918 cm^{-1} est dû aux

déformations d'étirement O-H [253] et le pic à 715 cm^{-1} est dû aux vibrations de flexion C-H [255].

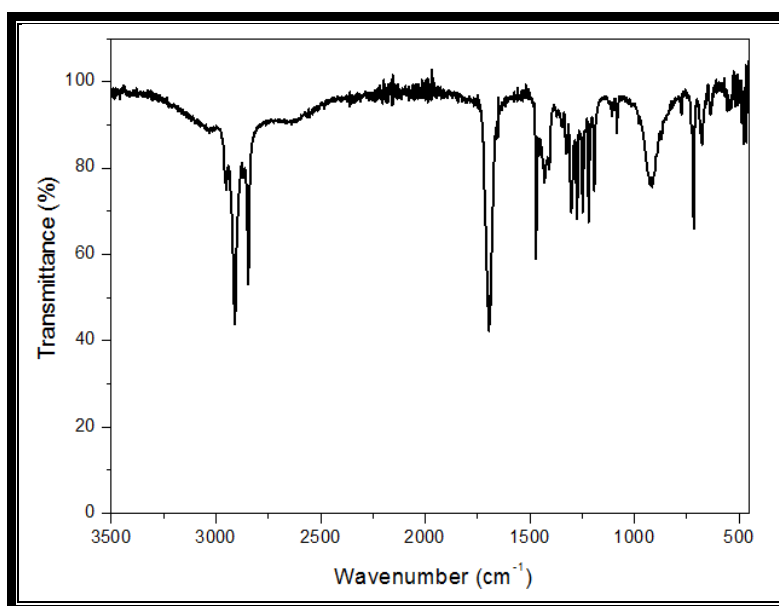


Figure 4. 15. Spectre IR de l'AL

5.8. Résultats de l'analyse FTIR du CBC

La figure 4.16 montre le spectre infrarouge du CBC. Cette analyse FTIR montre la stabilité chimique du CBC et l'absence d'interactions chimiques entre le MCP (BC) et la matrice (argile, sciure de bois et graphite), ce qui démontre la possibilité d'application de ce composite dans le bâtiment.

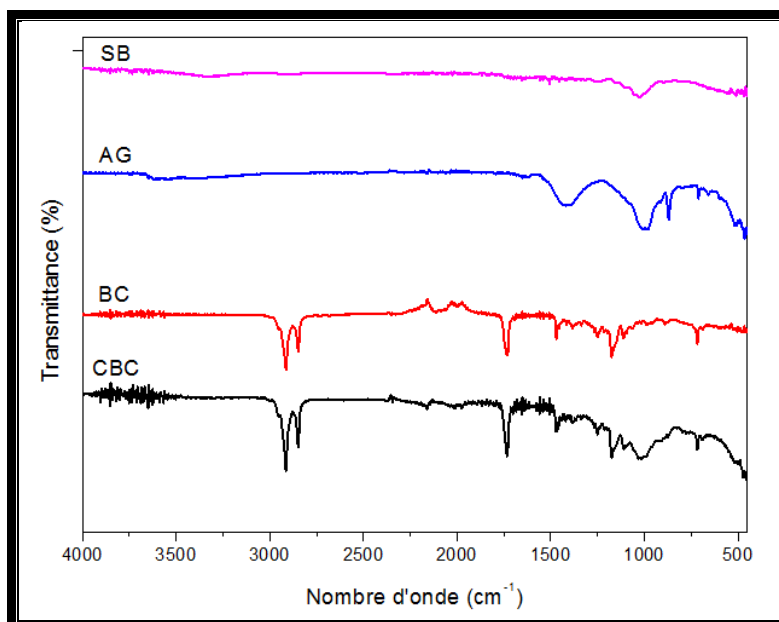


Figure 4. 16. Spectre IR du CBC

5.9. Résultats de l'analyse FTIR du CRT28 HC

La figure 4.17 montre le spectre infrarouge du CRT28 HC. Le spectre infrarouge du CRT28 HC présente les mêmes pics que ceux de la RT28 HC, de l'argile et de la sciure de bois, et aucun nouveau pic n'a été généré, ce qui signifie que leurs pics infrarouges ne se sont pas déplacés après l'élaboration du matériau composite MCP. Le présent résultat confirme l'absence de réactions chimiques entre les composants du CRT28 HC et que l'interaction est uniquement physique.

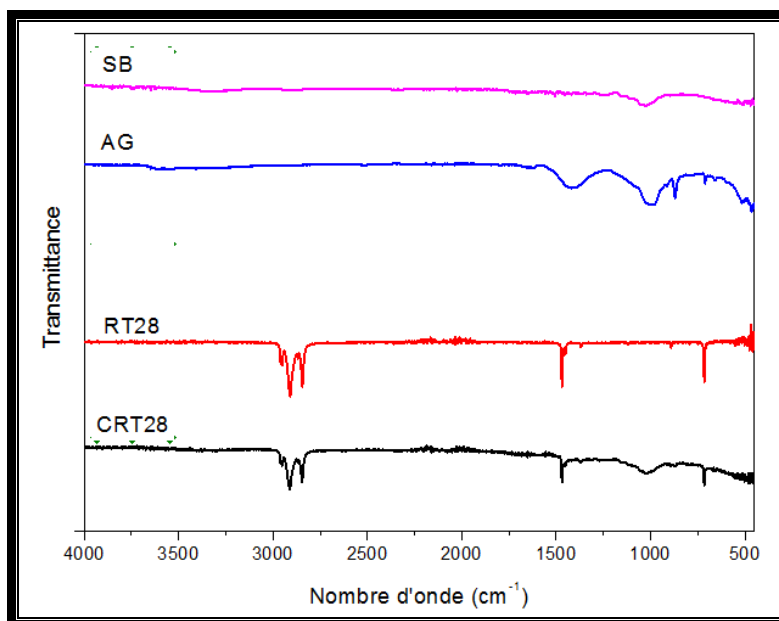


Figure 4. 17. Spectre IR du composite CRT28 HC

5.10. Résultats de l'analyse FTIR du CHP

La figure 4.18 montre le spectre infrarouge du CHP. Le spectre IR du CHP présente les mêmes pics que ceux de l'HP, de l'argile et de la sciure de bois, et aucun nouveau pic n'a été généré. Cette analyse FTIR montre la stabilité chimique du composite CHP et l'absence d'interactions chimiques entre le MCP (HP) et la matrice, ce qui démontre la possibilité d'application de ce composite dans le bâtiment.

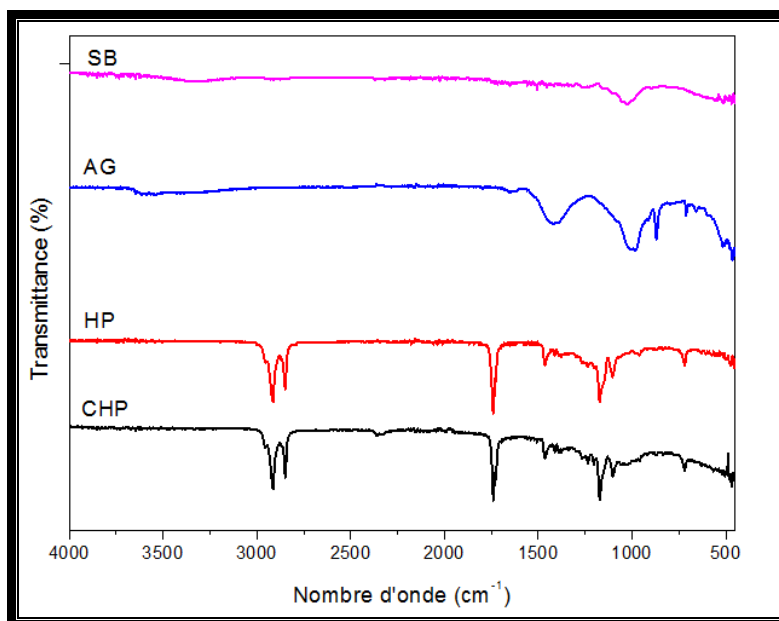


Figure 4. 18. Spectre IR du composite CHP

5.11. Résultats de l'analyse FTIR du CHC

La figure 4.19 montre le spectre infrarouge du CHC. Le spectre infrarouge du composite CHC présente les mêmes pics que ceux du MCP (HC), de l'argile et de la sciure de bois, et aucun nouveau pic n'a été généré. Ce résultat confirme la stabilité chimique du composite CHC, avec l'absence de réactions chimiques entre ses composants.

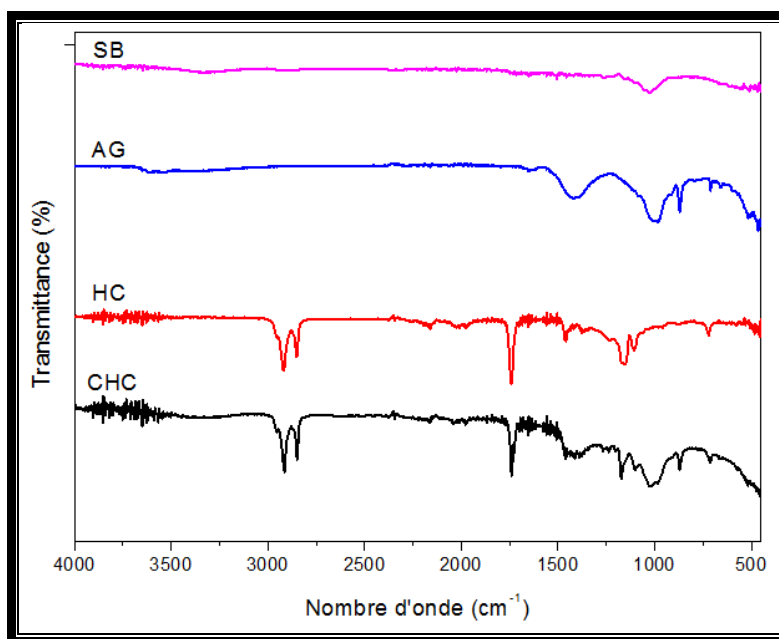


Figure 4. 19. Spectre IR du composite CHC

5.12. Résultats de l'analyse FTIR du CAL

La figure 4.20 montre le spectre infrarouge du CAL. Le spectre infrarouge du CAL présente les mêmes pics que ceux de l'AL et de la matrice, et aucun nouveau pic n'est généré. Cela signifie que les pics infrarouges de l'acide laurique, de l'argile et de la sciure de bois n'ont pas changé

après l'élaboration du CAL. Ce résultat confirme l'absence de réaction chimique entre les composants du CAL et que leur interaction est uniquement physique.

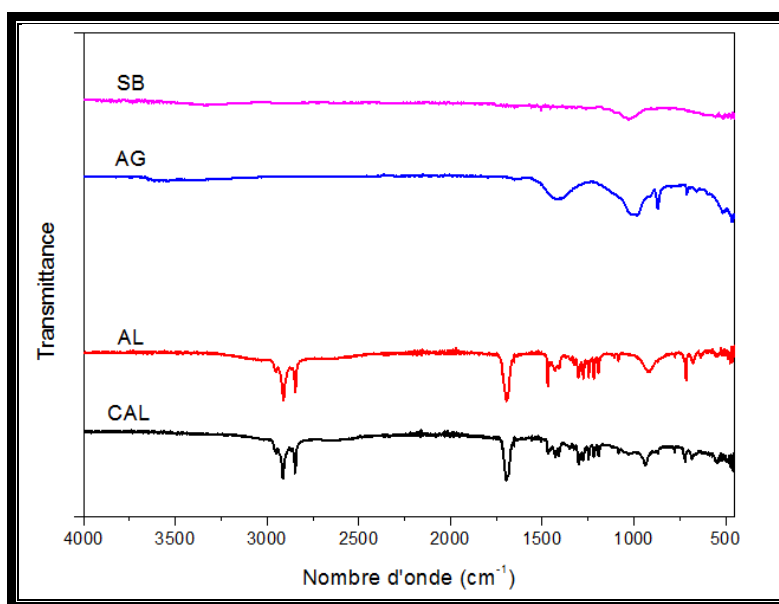


Figure 4. 20. Spectre IR du composite CAL

6. Résultats des analyses par Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC)

6.1. Résultat de l'analyse DSC de l'AL

La figure 4.21 montre la courbe DSC de l'acide laurique. La courbe DSC de l'AL présente un pic pendant le processus de fusion ; ce pic est observé à 45 °C. Pendant le processus de solidification de l'AL, un pic à 41 °C est observé. La chaleur latente de fusion de l'AL a été calculée numériquement et a été trouvée à 286 J/g.

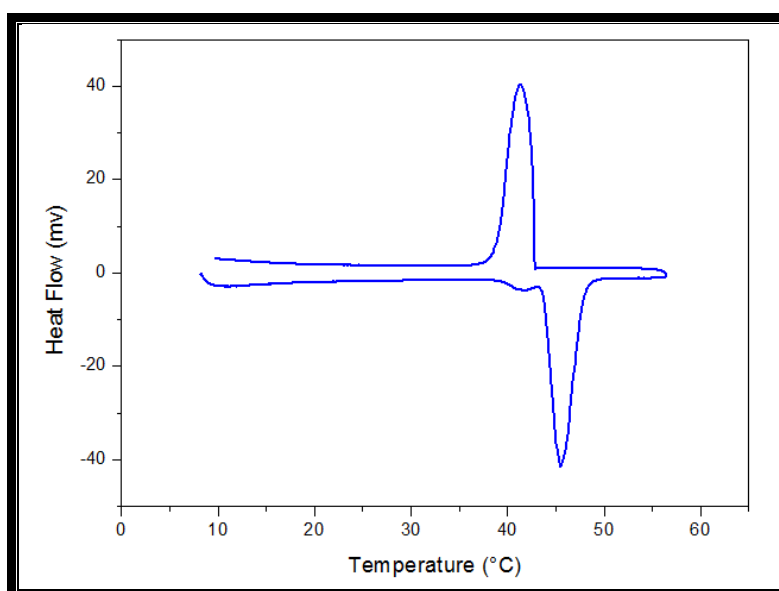


Figure 4. 21. Courbe DSC de l'AL

6.2. Résultat de l'analyse DSC de l'HC

La figure 4.22 montre la courbe DSC de l'huile de coprah. La courbe DSC de l'HC présente trois pics pendant le processus de fusion ; ce qui est dû aux substances non pures contenues dans l'HC. Le premier pic est observé à 24 °C, le deuxième pic est observé à 28 °C et le troisième pic est observé à 32,7 °C. Pendant le processus de solidification de l'HC, un pic à 15 °C est observé. La chaleur latente de fusion de l'HC a été calculée numériquement et a été trouvée à 244 J/g.

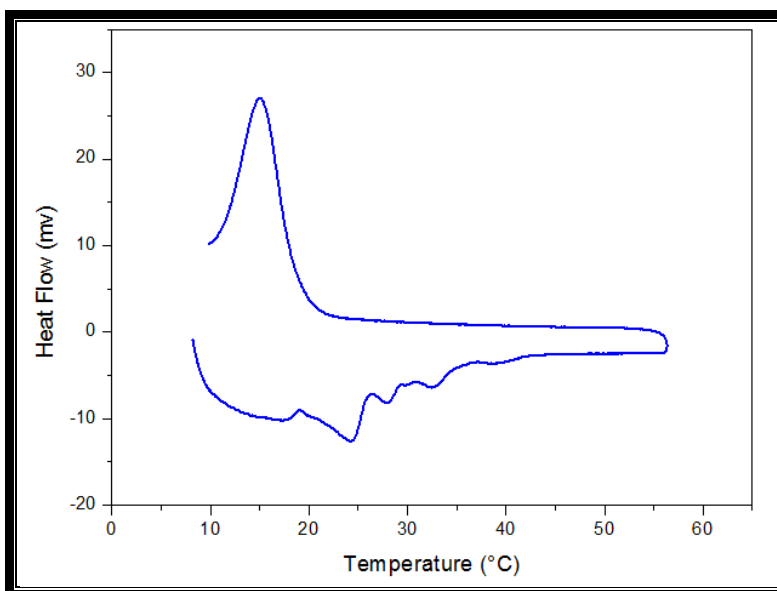


Figure 4. 22. Courbe DSC de l'HC

6.3. Résultats de l'analyse DSC du BC

La figure 4.23 montre la courbe DSC du beurre de cacao. La courbe DSC du BC présente un pic pendant le processus de fusion ; ce pic est observé à 35,5 °C. Pendant le processus de solidification du BC, un pic à 13,4 °C est observé. La chaleur latente de fusion du BC a été calculée numériquement et a été trouvée à 184 J/g. Ce MCP (BC) présente une importante surfusion (plus de 20 °C), ce qui présente un inconvénient majeur pour son utilisation dans le bâtiment.

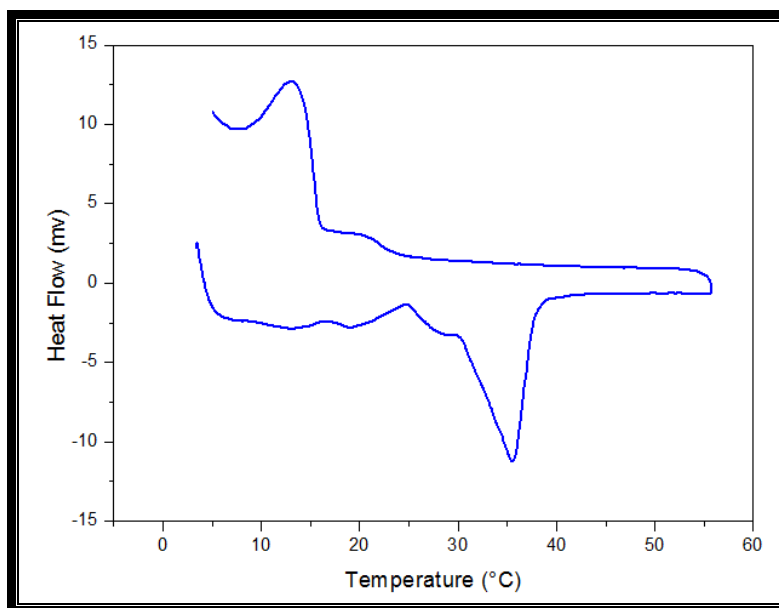


Figure 4. 23. Courbe DSC du BC

6.4. Résultat de l'analyse DSC de la paraffine RT28 HC

La figure 4.24 montre la courbe DSC de la RT28 HC. La courbe DSC de la RT28 HC présente un pic pendant le processus de fusion ; ce pic est observé à 29,6 °C. Pendant le processus de solidification de la RT 28 HC, un pic à 25 °C est observé. La chaleur latente de fusion du MCP (RT28 HC) a été calculée numériquement et a été trouvée à 270 J/g.

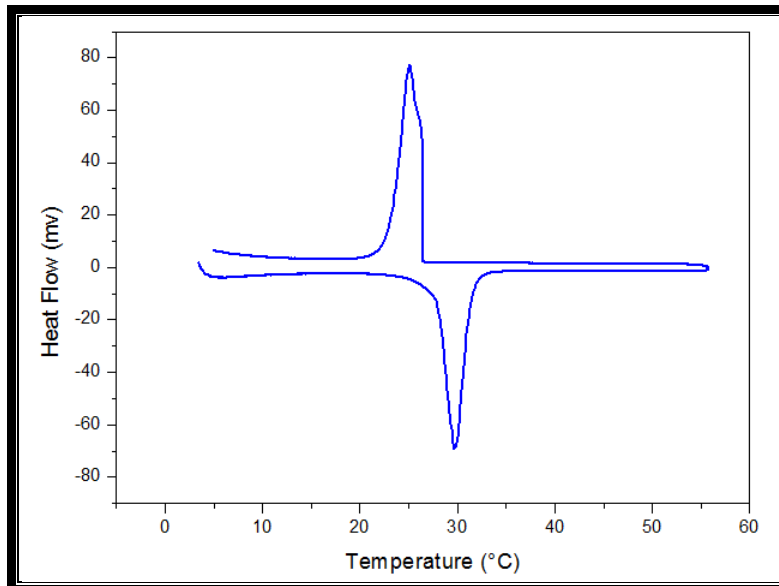


Figure 4. 24. Courbe DSC de la RT28 HC

6.5. Résultats de l'analyse DSC du CAL

La figure 4.25 montre la courbe DSC du CAL. La courbe DSC du CAL présente un pic pendant le processus de fusion ; ce pic est observé à 44 °C. Pendant le processus de solidification du CAL, un pic à 40,5 °C est observé. La chaleur latente de fusion du CAL a été calculée numériquement et a été trouvée à 136 J/g.

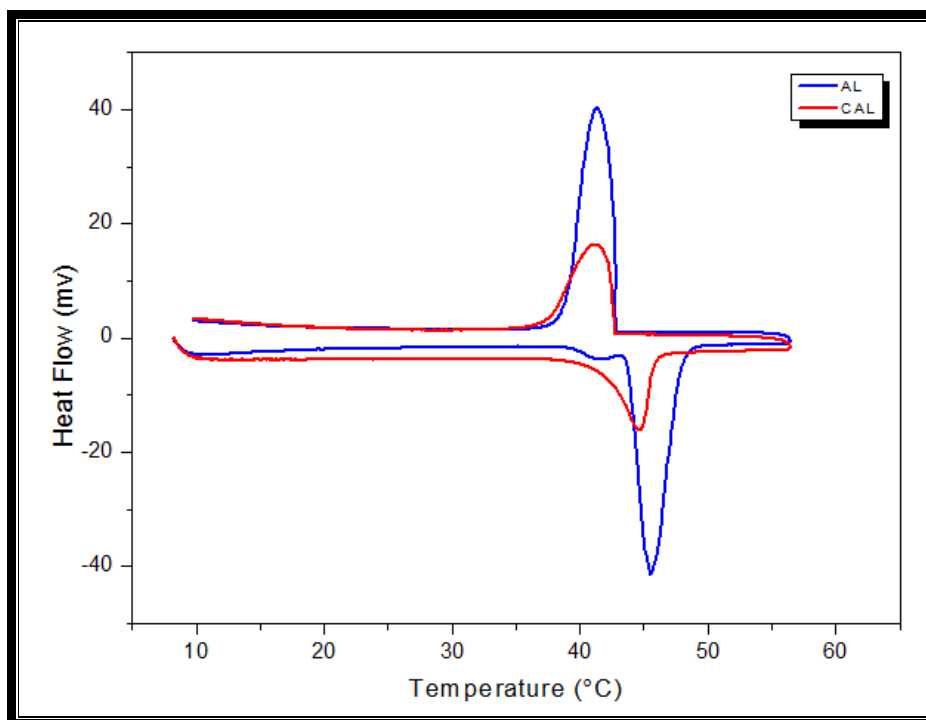


Figure 4. 25. Courbe DSC du CAL

6.6. Résultats de l'analyse DSC du CRT28 HC

La figure 4.26 montre la courbe DSC du CRT28 HC. La courbe DSC du CRT28 HC présente une plage de température de fusion entre 27 et 33 °C et le pic est observé à 31,5 °C. Pendant le processus de solidification, le CRT28 HC présente une solidification entre 26,5 et 22 °C, et le pic est observé à 23,6 °C. La chaleur latente de fusion du CRT28 HC a été calculée numériquement et a été trouvée à 128 J/g.

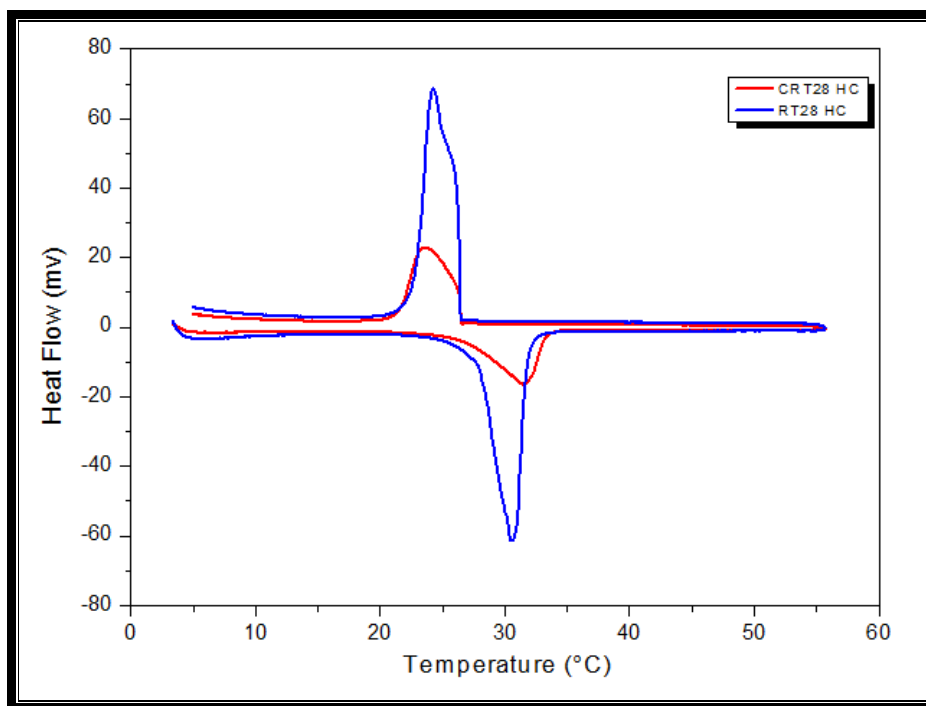


Figure 4. 26. Courbe DSC du CRT28 HC

Les résultats DSC de la RT28 HC et du composite RT28 HC sont comparés avec d'autres études dans le tableau 4.10. Les caractéristiques thermiques de la RT28 HC sont confirmées par les autres études, elles sont donc à peu près identiques.

Tableau 4. 10. Comparaison des résultats DSC de la RT28 HC et du composite RT28 HC avec d'autres études dans la littérature

MCP/ MCP	Points de fusion (°C)	Points de solidification (°C)	Chaleur latente (J/g)	Reference
composite				
RT28 HC	28	-	250	[256]
RT28 HC	28	-	245	[257]
RT28 HC	27.5	25.7	258	[258]
RT28 HC	29	27	244	[259]
RT28 HC	29.6	25	269.2	Cette etude...
RT27/EP/SL	26.3	25.8	51.6	[260]
PW/GR	41	33	196.6	[261]
Paraffine/Cellulose	28.1	25.3	60	[195]
RT28HC/AG/SB/GR	31.5	23.6	128.3	Cette etude...

6.7. Résultats de l'analyse DSC du CHC

La figure 4.21 montre la courbe DSC du CHC. La courbe DSC du CHC présente deux pics pendant le processus de fusion : le premier pic est observé à 24 °C et le second pic est observé à 34 °C. Pendant le processus de solidification, le CHC présente un pic à 18 °C. La chaleur latente de fusion du CHC a été trouvée à 69 J/g.

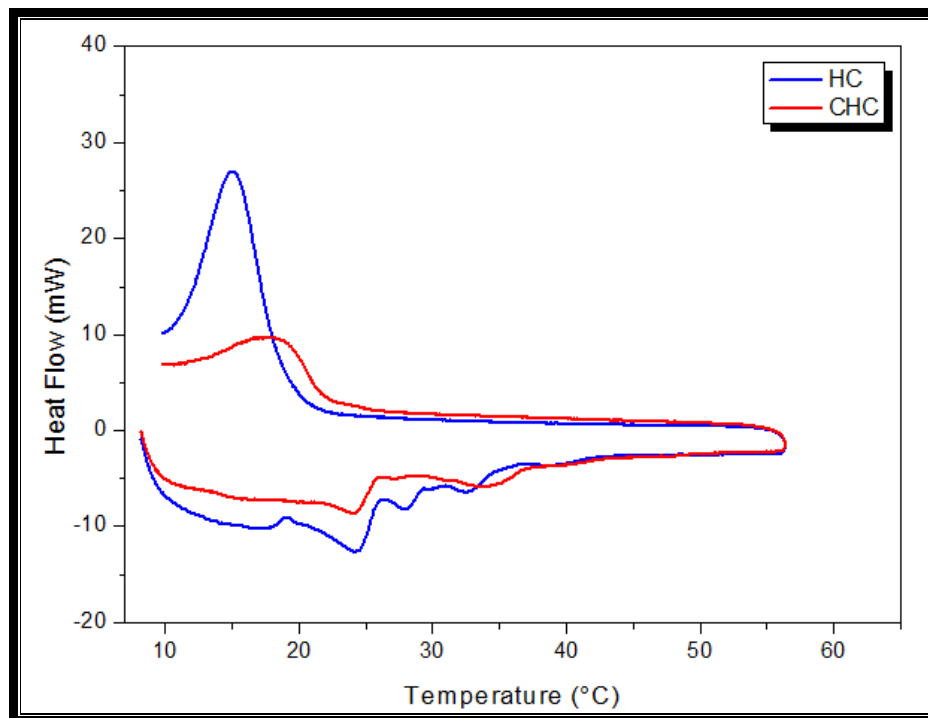


Figure 4. 27. Courbe DSC du CHC

6.8. Résultat de l'analyse DSC du CHP

La figure 4.21 montre la courbe DSC du CHP. La courbe DSC du CHP présente deux pics pendant le processus de fusion : le premier pic est observé à 29 °C et le second pic est observé à 36,2 °C. Pendant le processus de solidification, le CHP présente un pic à 18 °C. La chaleur latente de fusion du CHP a été trouvée à 40,5 J/g.

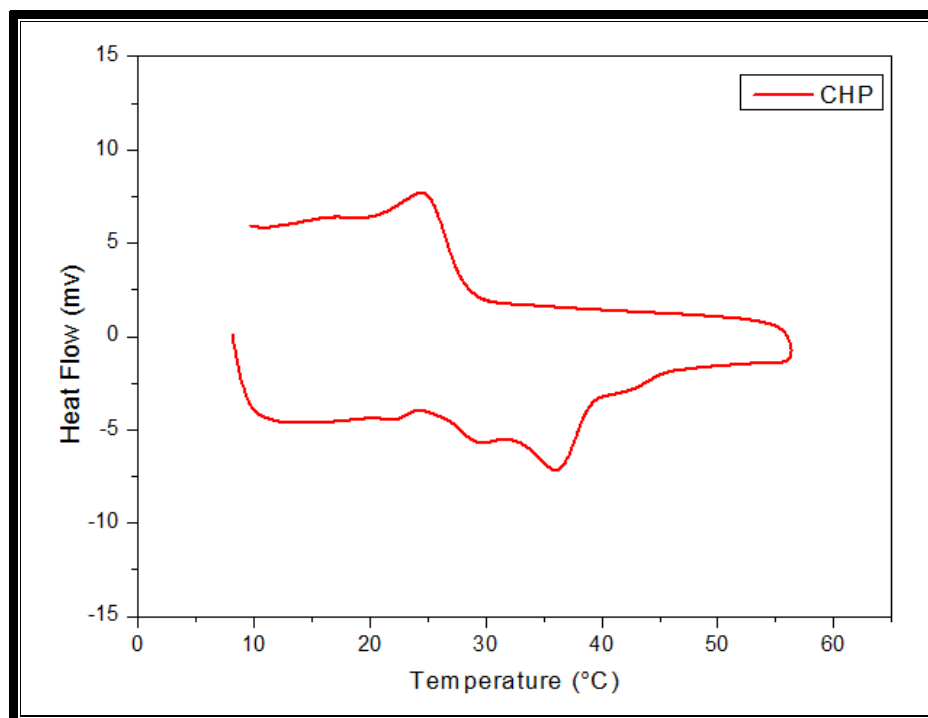


Figure 4. 28. Courbe DSC du CHP

6.9. Résultats de l'analyse DSC du CBC

La figure 4.21 montre la courbe DSC du CBC. La courbe DSC du CBC présente un pic pendant le processus de fusion ; ce pic est observé à 33 °C. Pendant le processus de solidification du CBC, un pic à 12,5 °C est observé. La chaleur latente de fusion du CBC a été calculée numériquement et a été trouvée à 99,5 J/g.

Ce composite CBC présente une importante surfusion de plus de 20 °C. Cette surfusion du CBC est due à la surfusion du MCP (BC), ce qui présente un inconvénient majeur pour son utilisation dans le bâtiment.

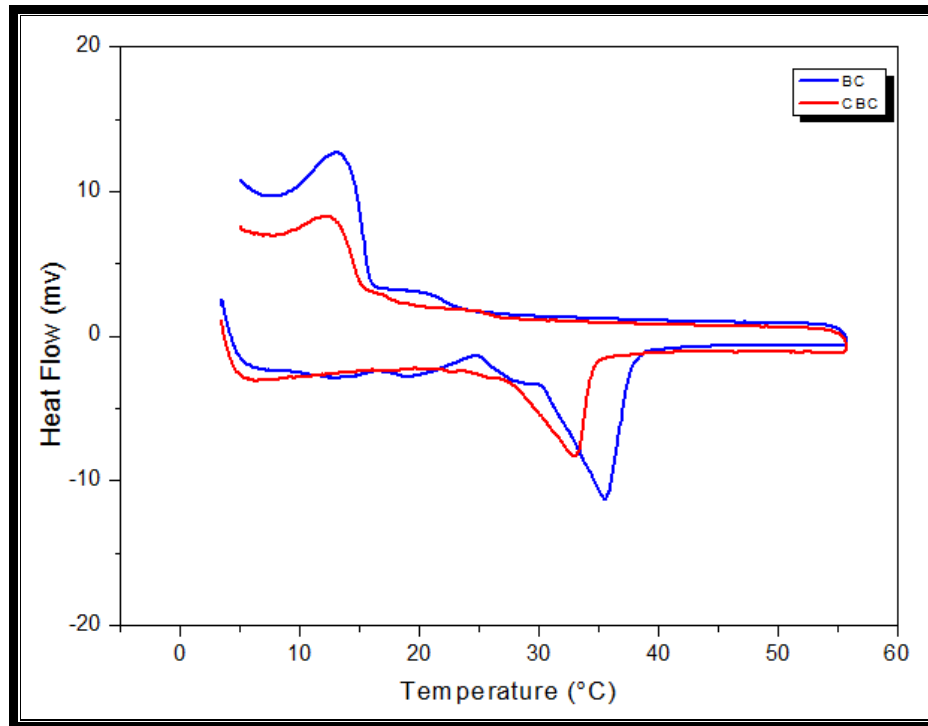


Figure 4. 29. Courbe DSC du composite CBC

7. Résultats des analyses Thermogravimétriques

7.1. Résultats ATG du BC

La figure 4.30 montre la courbe de dégradation du BC. La courbe de masse (TAG) du BC indique une perte de masse à partir de 250 °C. Cela correspond à sa température de début de dégradation. La courbe de la dérivée de masse (DTG) indique un pic de dégradation thermique à 380 °C.

Cette analyse thermogravimétrique montre la stabilité thermique du MCP (BC) et sa fiabilité thermique dans la plage de température utilisée dans le bâtiment.

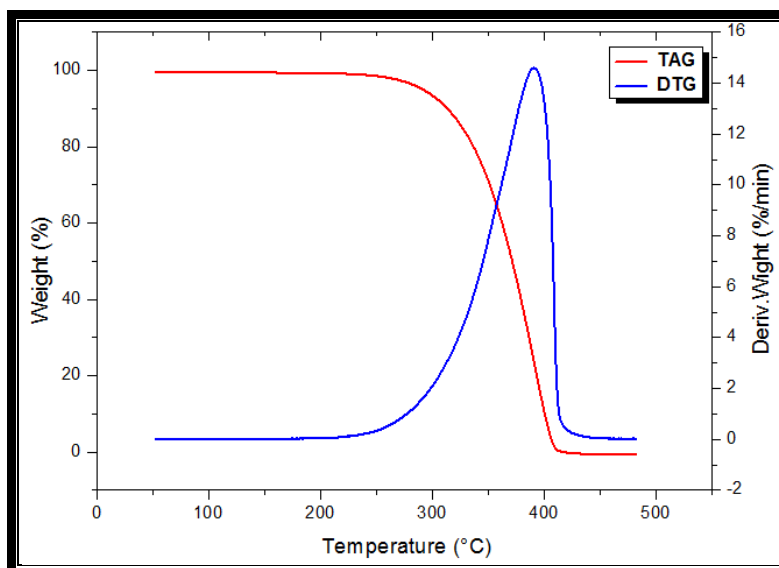


Figure 4. 30. Courbe ATG du BC

7.2. Résultats ATG de la sciure de bois

La figure 4.31 montre la courbe de dégradation de la sciure de bois. La courbe ATG de la sciure de bois présente trois plages de température. La plage de température (200 et 315 °C) est associée à la pyrolyse de l'hémicellulose [262] avec un pic à 245 °C [263]. La plage de températures entre (300 et 400 °C) est associée à la pyrolyse de la cellulose [262, 263] avec un pic à 375 °C [223]. La plage de température supérieure à 400 °C est associée à la pyrolyse de la lignine [262].

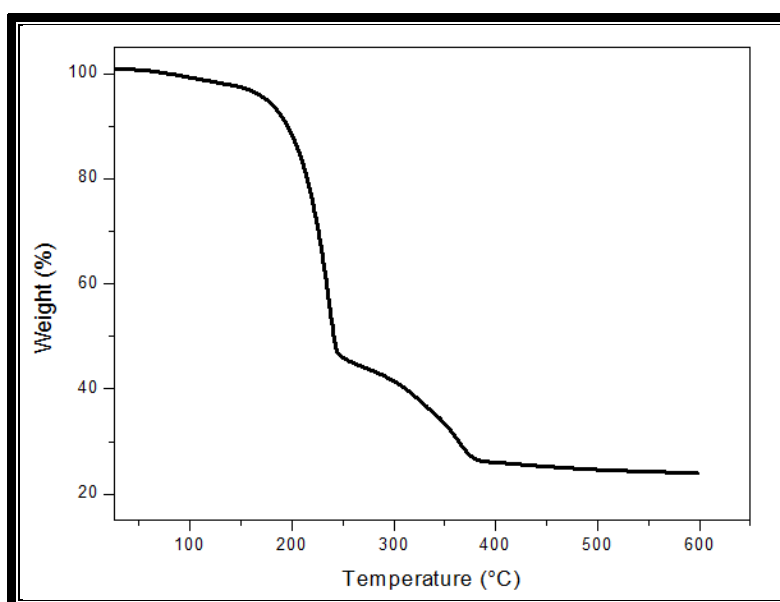


Figure 4. 31. Courbe ATG de la sciure de bois

7.3. Résultats ATG du CBC

La figure 4.32 montre la courbe de dégradation du CBC.

La courbe de masse (TAG) du CBC indique une perte de masse à partir de 220 °C, cela correspond à la température de début de dégradation de la sciure de bois. La courbe de la dérivée de masse (DTG) indique un pic de dégradation thermique à 350 °C et un autre à 400 °C. La température de dégradation du CBC est inférieure à celle de dégradation du MCP (BC) ; cela est dû à la présence de la sciure de bois ainsi qu'à la conductivité thermique améliorée du CBC comportant du graphite. Cette analyse thermogravimétrique montre la fiabilité thermique du CBC pour une utilisation dans l'enveloppe du bâtiment.

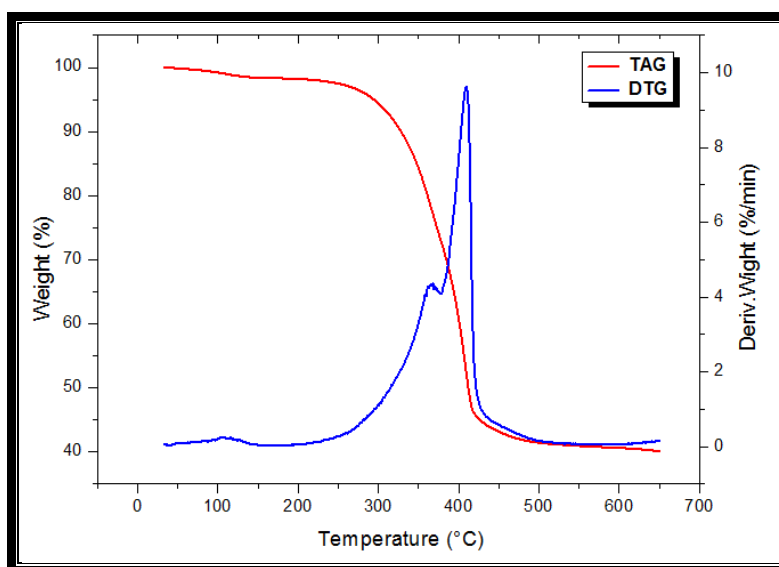


Figure 4.32. Courbe ATG du CBC

7.4. Résultats ATG du CHP :

La figure 4.33 montre les résultats de l'analyse thermogravimétrique du composite CHP.

La courbe de masse (TAG) du CHP indique une perte de masse à partir de 200 °C, cela correspond à la température de début de dégradation de la sciure de bois. La courbe de la dérivée de masse (DTG) indique un pic de dégradation thermique à 400 °C.

Cette analyse thermogravimétrique montre la stabilité thermique du composite CHP et sa fiabilité thermique, pour une éventuelle utilisation dans le bâtiment.

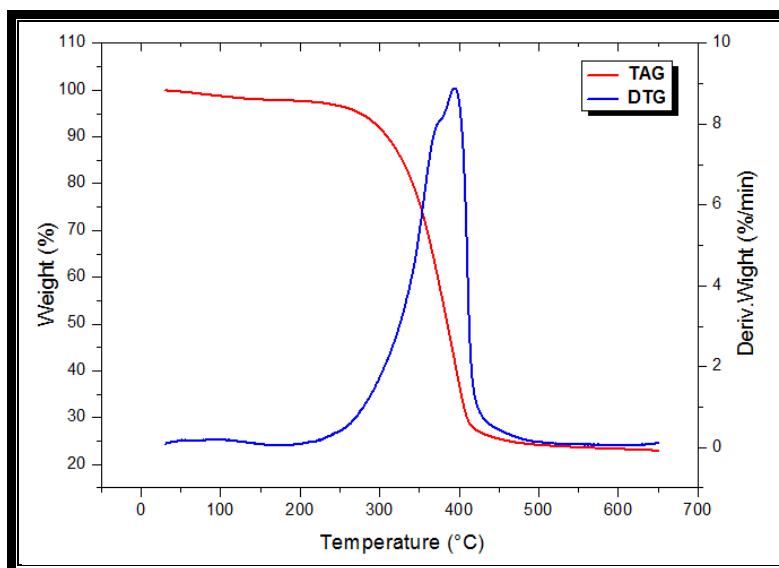


Figure 4. 33. Courbe ATG du CHP

7.5. Résultats ATG de l'HC

La figure 4.34 montre la courbe de dégradation du MCP (HC).

La courbe de masse (TAG) de l'HC indique une perte de masse à partir de 350 °C, cela correspond à sa température de début de dégradation. La courbe de la dérivée de masse (TAG) indique un pic de dégradation thermique à 430 °C.

Cette analyse thermogravimétrique montre la stabilité thermique de l'huile de coprah pour une intégration dans l'enveloppe du bâtiment.

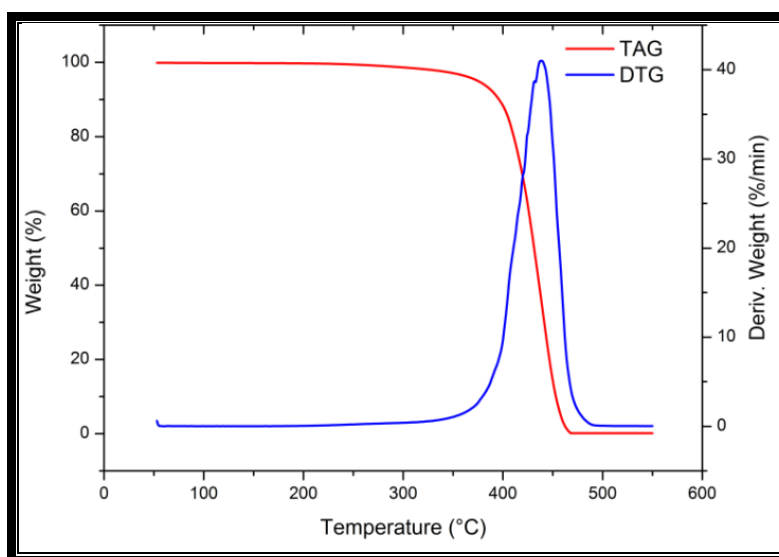


Figure 4. 34. Courbe ATG de l'HC

7.6. Résultats ATG du CHC

La figure 4.35 montre la courbe de dégradation du CHC.

La courbe de masse (TAG) du CHC indique une perte de masse à partir de 250 °C. La courbe de la dérivée de masse (DTG) indique un pic de dégradation thermique à 370 °C.

Cette analyse thermogravimétrique montre la fiabilité thermique du CHC dans la plage de température utilisée dans le bâtiment.

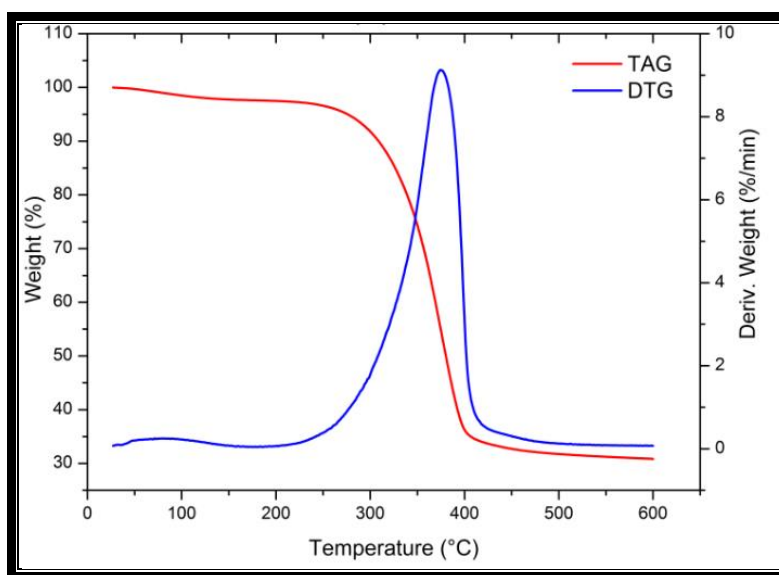


Figure 4. 35. Courbe ATG du CHC

7.7. Résultats ATG du CRT 28 HC

La figure 4.36 montre la courbe de dégradation du CRT28 HC. La courbe ATG du CRT28 HC montre que la perte de masse initiale commence à partir de 145 °C, ce qui correspond à la température du début de dégradation du MCP (RT28 HC) [264]. La perte de masse maximale du CRT28 HC apparaît aux alentours de 400 °C, et la perte de masse totale est de ~80 % jusqu'à 600 °C. L'analyse thermogravimétrique du CRT28 HC confirme sa fiabilité et sa stabilité thermiques et représente un matériau de construction potentiel à intégrer dans les bâtiments.

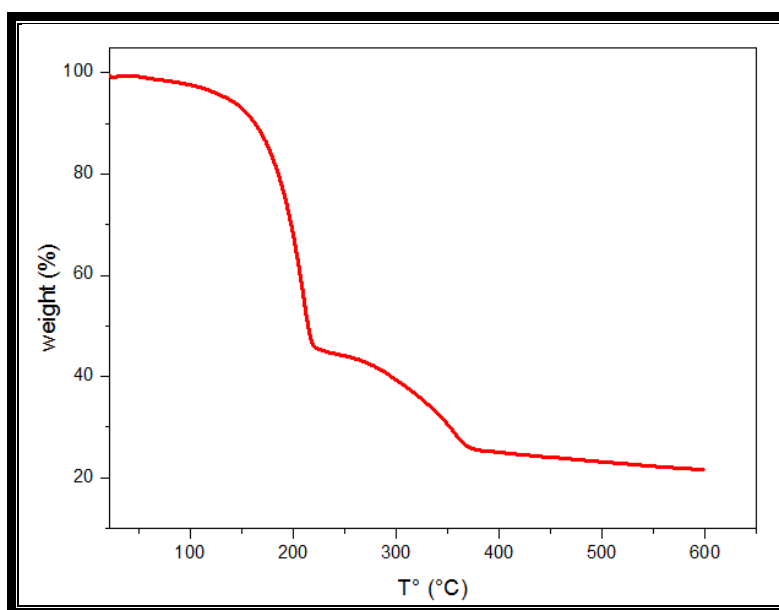


Figure 4. 31. Courbe ATG du CRT28 HC

7.8. Résultats ATG de l'AL

La figure 4.37 montre la courbe de dégradation de l'acide laurique.

La courbe de masse de l'AL indique une perte de masse à partir de 180 °C, cela correspond à sa température de début de dégradation. Cette analyse thermogravimétrique montre la possibilité d'utilisation de l'acide laurique dans le bâtiment.

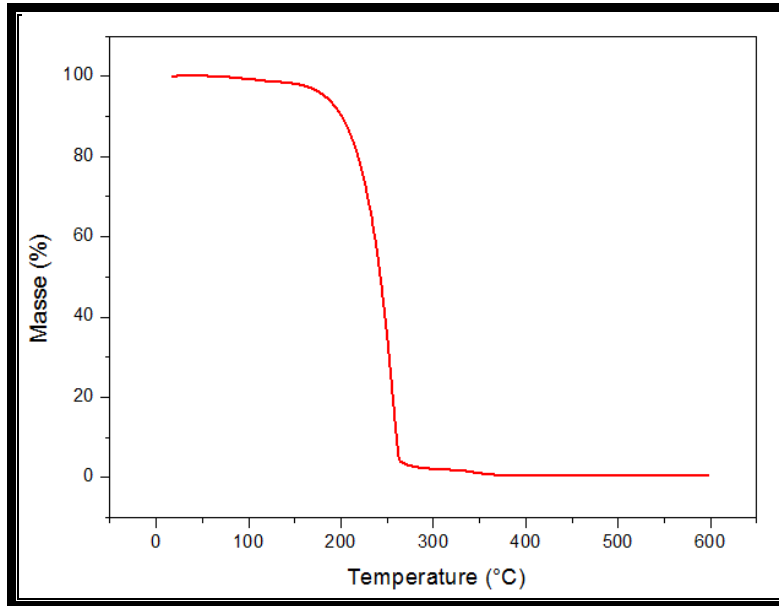


Figure 4. 32. Courbe ATG de l'AL

7.9. Résultats ATG du CAL

La figure 4.38 montre la courbe de dégradation du CAL.

La courbe de masse du CAL indique une perte de masse à partir de 170 °C, cela correspond à la température de début de dégradation du MCP (AL). La courbe de dégradation du CAL suit la courbe de dégradation de la sciure de bois, qui est un de ses composants. Cette analyse thermogravimétrique montre la stabilité thermique du composite CAL et sa fiabilité thermique pour une intégration dans l'enveloppe du bâtiment.

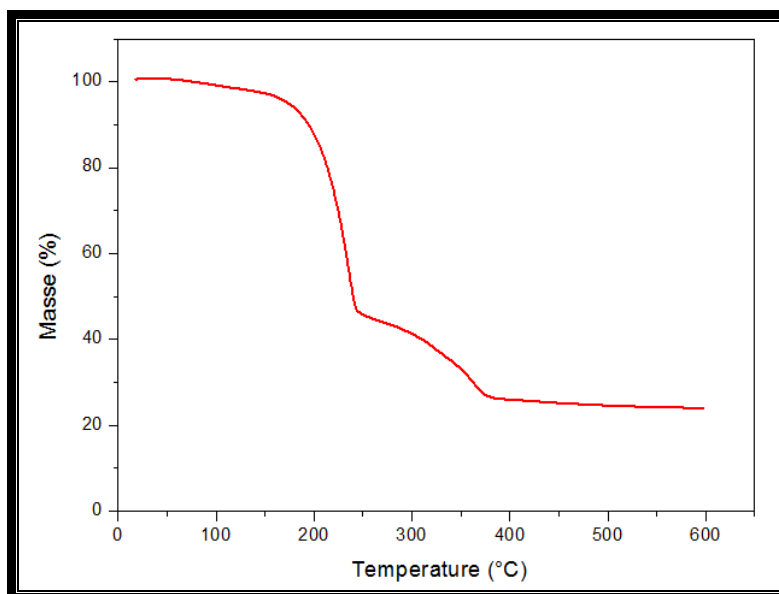


Figure 4. 33. Courbe ATG du CAL

8. Résultats de l'analyse par DRX

8.1. Résultats DRX de l'argile

La figure 4.39 montre les résultats de l'analyse par DRX de l'argile. L'analyse par Diffraction aux Rayons X de l'argile montre la présence de Calcite, Quartz, Illite et Gypse.

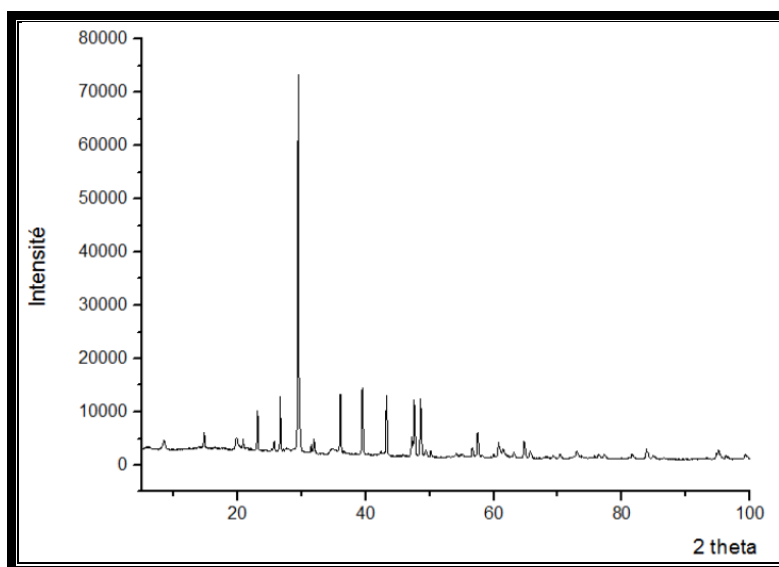


Figure 4. 34. Analyse DRX de l'argile

8.2. Résultats DRX de la sciure de bois

La figure 4.39 montre les résultats de l'analyse par Diffraction des Rayons X de la sciure de bois. Les pics de diffraction à 22°, 43° et 51° sont associés à la cellulose cristalline [222].

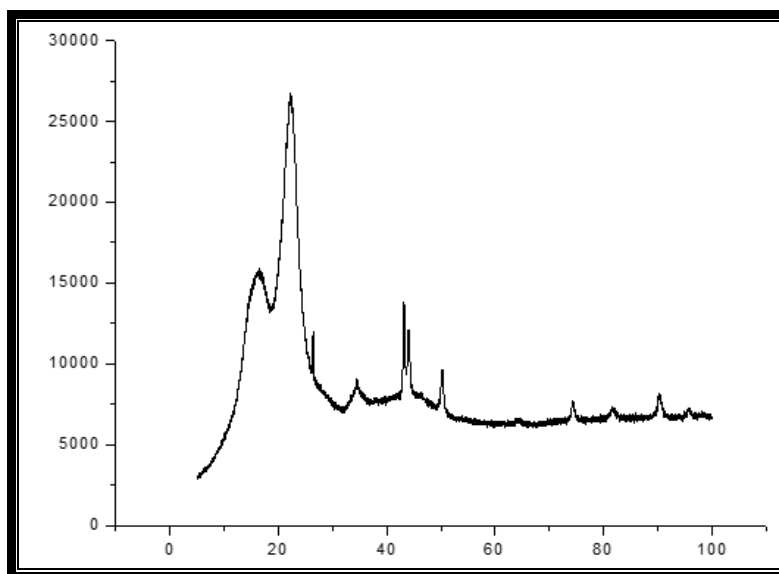


Figure 4. 35. Analyse DRX de la sciure de bois

8.3. Résultats DRX du CHC

La figure 4.41 montre le spectre DRX du CHC. L'analyse de la structure cristallographique du CHC indique les mêmes pics spécifiques observés chez l'argile et la sciure. Ce résultat confirme que la structure cristalline de l'argile et de la sciure de bois n'ont pas changé après leur incorporation dans le composite. Ces résultats d'analyse DRX permettent de confirmer la stabilité chimique du composite CHC.

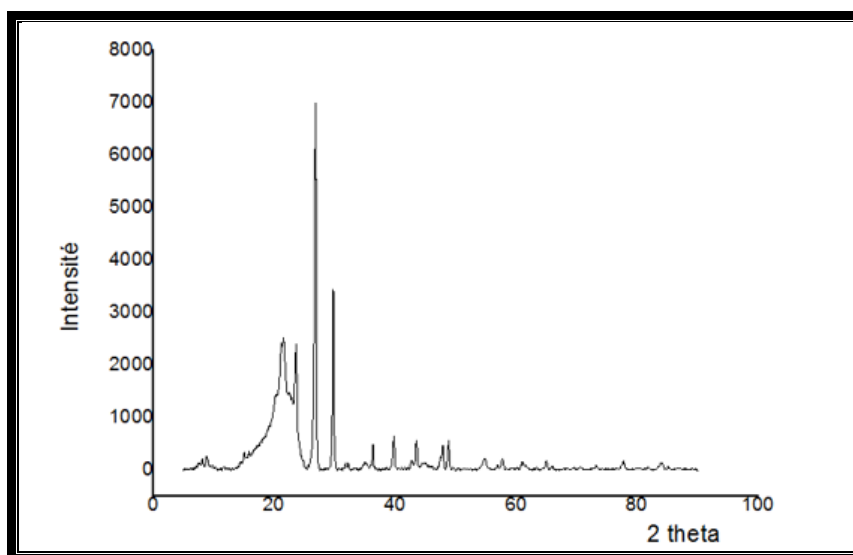


Figure 4. 36. Analyse DRX du CHC

8.4. Résultats DRX du CBC

La figure 4.42 montre le spectre DRX du CBC. L'analyse de la structure cristallographique du CBC indique les mêmes pics spécifiques observés chez l'argile et la sciure de bois utilisés dans l'élaboration du composite MCP. Ces résultats d'analyse DRX permettent de confirmer la stabilité chimique du composite CBC.

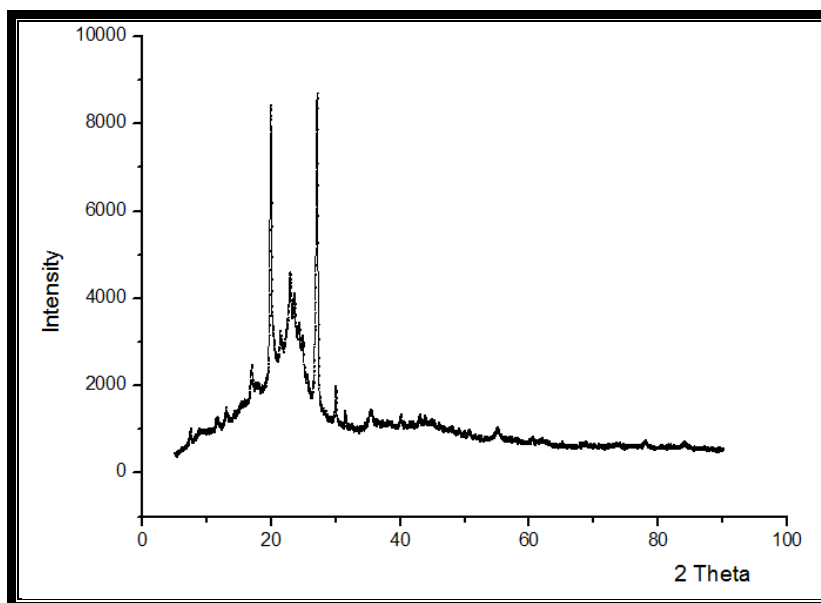


Figure 4. 37. Analyse DRX du CBC

8.5. Résultats DRX du CHP

La figure 4.43 montre le spectre DRX du CHP. L'analyse de la structure cristallographique du composite CHP indique les mêmes pics spécifiques observés chez l'argile et la sciure de bois. Ce résultat confirme que la structure cristalline de l'argile et de la sciure de bois n'ont pas changé après leur incorporation dans le composite. Ces résultats d'analyse DRX permettent de confirmer la stabilité chimique du composite CHP.

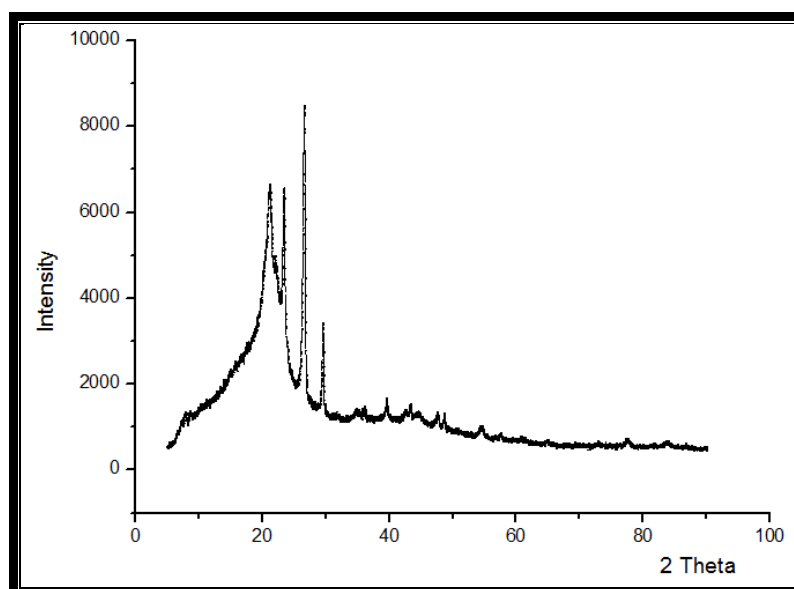


Figure 4. 38. Analyse DRX du CHP

8.6. Résultats DRX du CAL

La figure 4.44 montre le spectre DRX du CAL. L'analyse de la structure cristallographique du CAL indique les mêmes pics spécifiques observés chez l'argile et la sciure de bois utilisés dans l'élaboration du composite. Ces résultats d'analyse DRX permettent de confirmer la stabilité chimique du composite CAL.

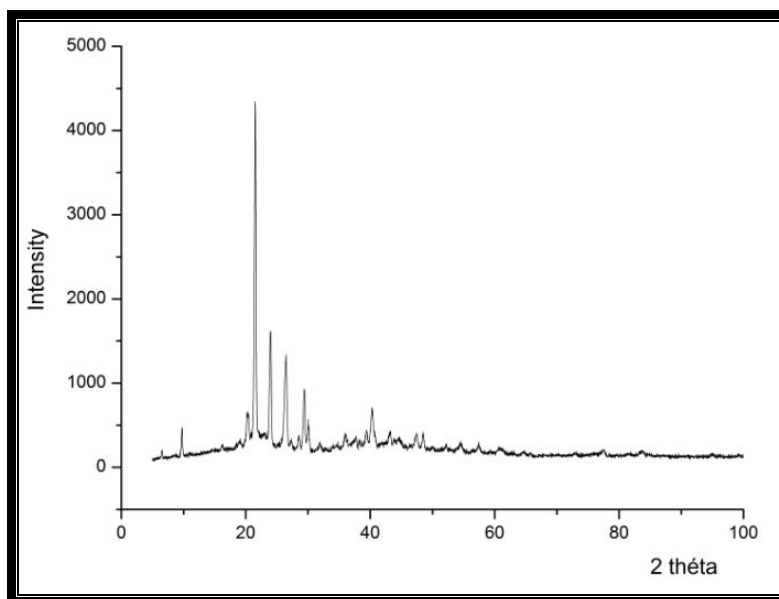


Figure 4. 39. Analyse DRX du CAL

8.7. Résultats DRX de la RT28 HC

La figure 4.45 montre les résultats de l'analyse par Diffraction des Rayons X de la RT28 HC. Des pics de diffraction à 7°, 11°, 19°, 23°, 24°, 39° et 43° sont observés.

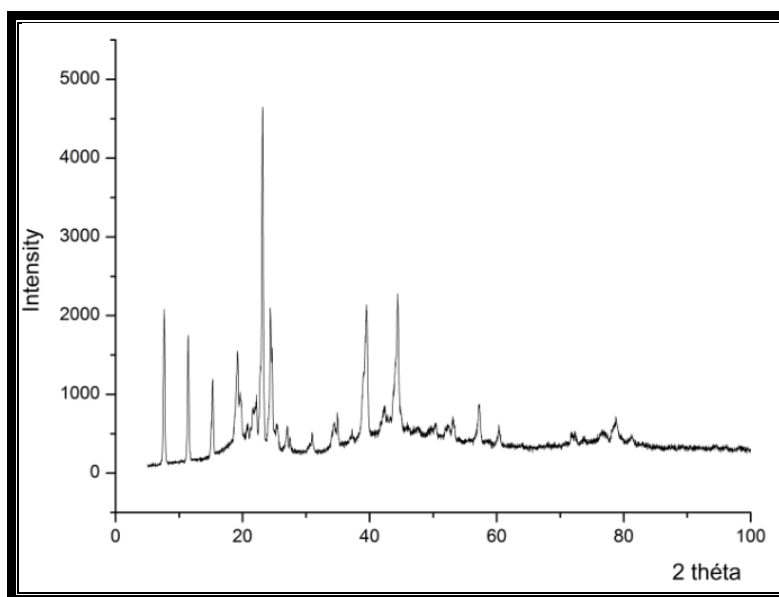


Figure 4. 40. Analyse DRX de la RT28 HC

8.8. Résultats DRX du CRT28 HC

La figure 4.46 montre les résultats de l'analyse par DRX du CRT28 HC. Le diffractogramme des rayons X du CRT28 HC présente tous les pics spécifiques de l'argile, de la sciure de bois et de la RT28 HC. Ce résultat confirme que la structure cristalline de l'argile, de la sciure de bois et du RT28 HC n'a pas changé après leur incorporation dans le composite. Cette analyse XRD confirme la stabilité chimique du CRT28 HC.

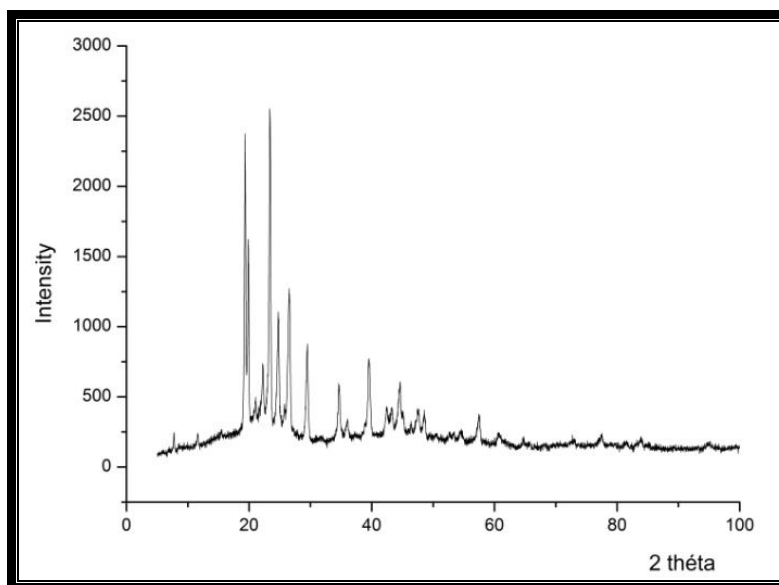
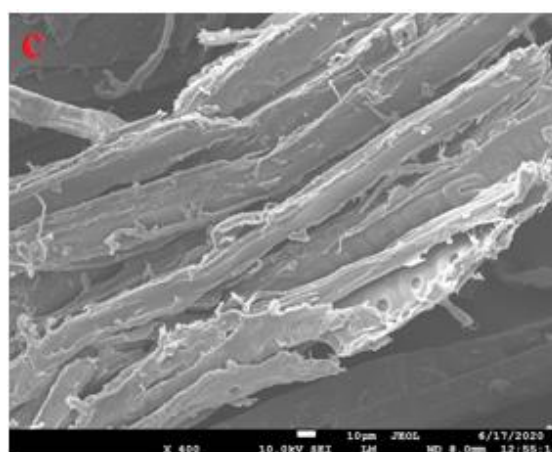
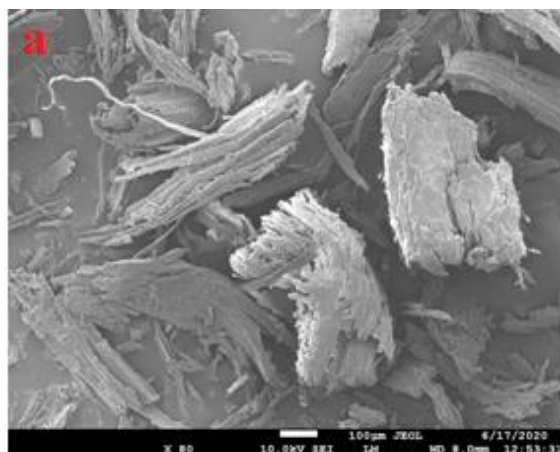


Figure 4. 41. Analyse DRX du composite CRT28 HC

9. Résultats des observations par Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

9.1. Résultats des observations par MEB de la sciure de bois

La sciure de bois est observée sous différents grossissements (x80, x200, x400, x1000) respectivement (figs. 4.47, a, b, c et d). Les images MEB montrent la structure en fibres linéaires de la sciure de bois, ce qui constitue un élément intéressant pour la rétention du MCP.



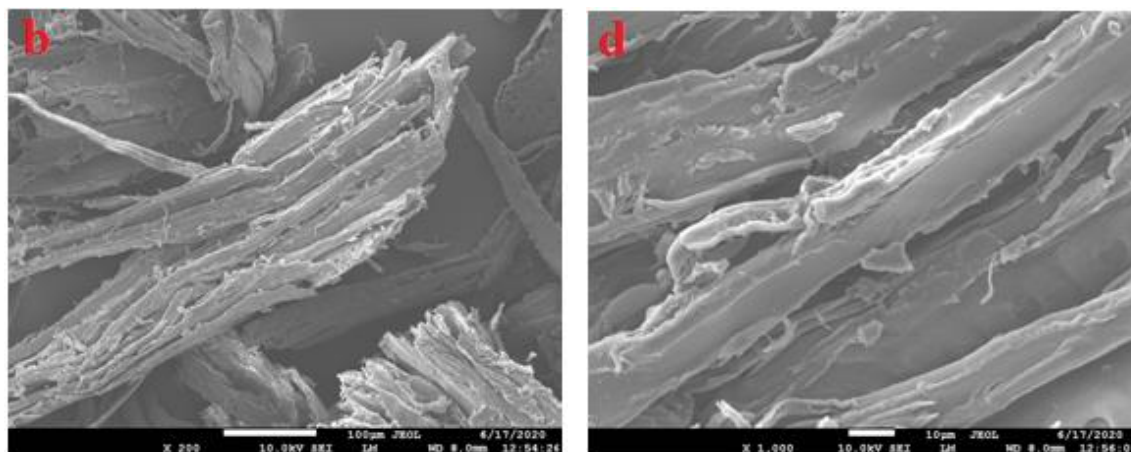


Figure 4. 42. Images MEB de la sciure de bois sous différents grossissements ; a ; x 80, b ; x 200, c ; x 400, et d ; x 1000

9.2. Résultats des observations par MEB du CRT28 HC

La microstructure du CRT28 HC a été examinée afin de vérifier si la RT28 HC est bien incorporée dans la matrice. Les figures 4.48, a, b et c, montrent les images de la microstructure de la matrice, et les figures 4.48, d, e et f, celles du CRT28 HC. Les différents échantillons sont observés sous des grossissements de (x1000, x500, x250) respectivement.

Les images de la microstructure de la matrice (figs. 4.48, a, b, c) montrent la présence de fibres entrelacées avec des surfaces irrégulièrement rugueuses.

Les images MEB du CRT28 HC (figs. 4.48, d, e, f) montrent une dispersion uniforme et homogène de la RT28 HC dans la matrice. Ceci est dû aux interactions de tension de surface entre la RT28 HC et la microstructure rugueuse de la matrice. Ces observations sont confirmées par la figure 9 (d), qui montre clairement la fixation du RT28 HC sur les fibres entrelacées.

Ce résultat révèle une bonne compatibilité entre le RT28 HC et la matrice. En conclusion, ces images obtenues au microscope électronique à balayage montrent que le RT28 HC est intégré avec succès dans la microstructure de la matrice.

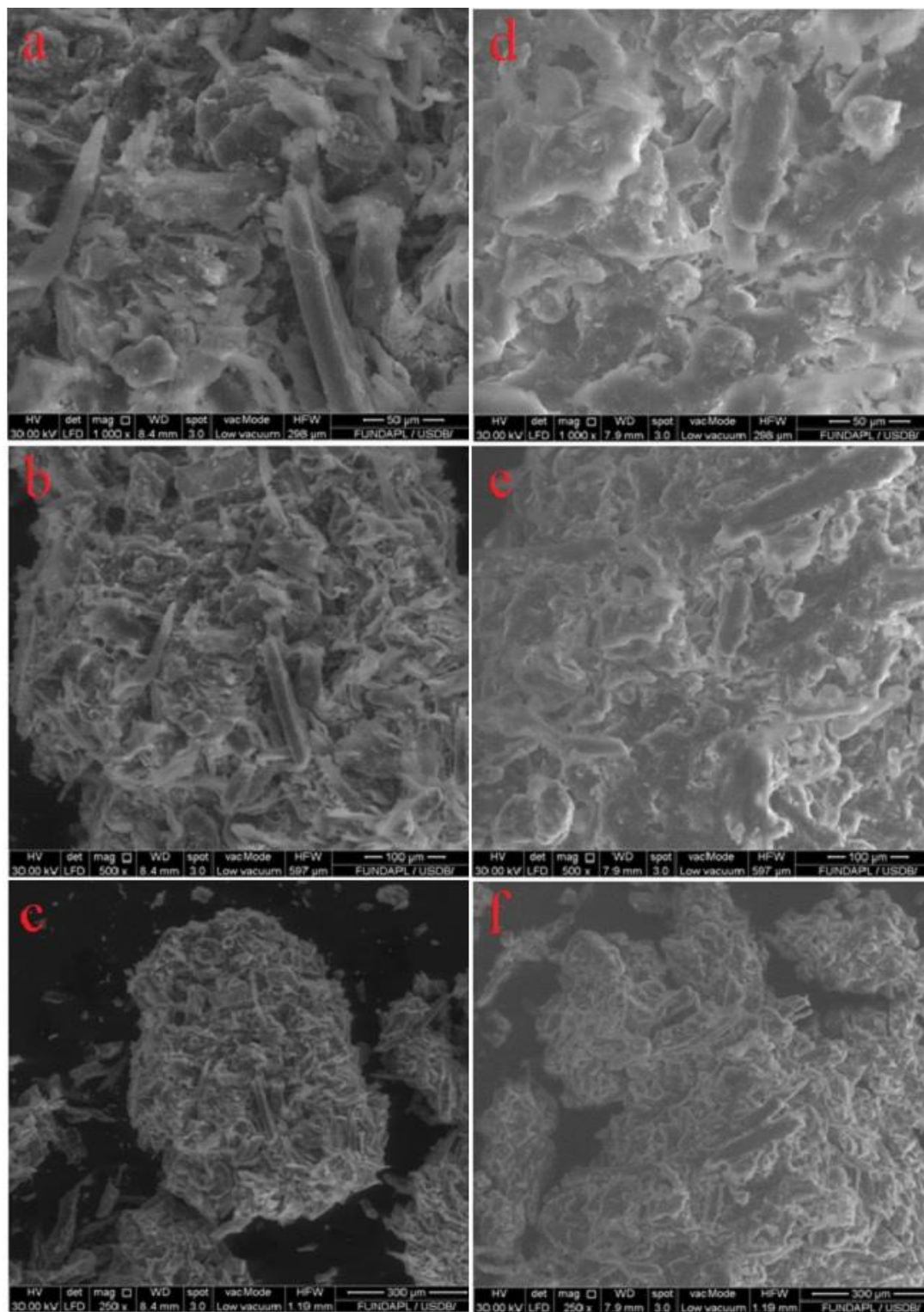


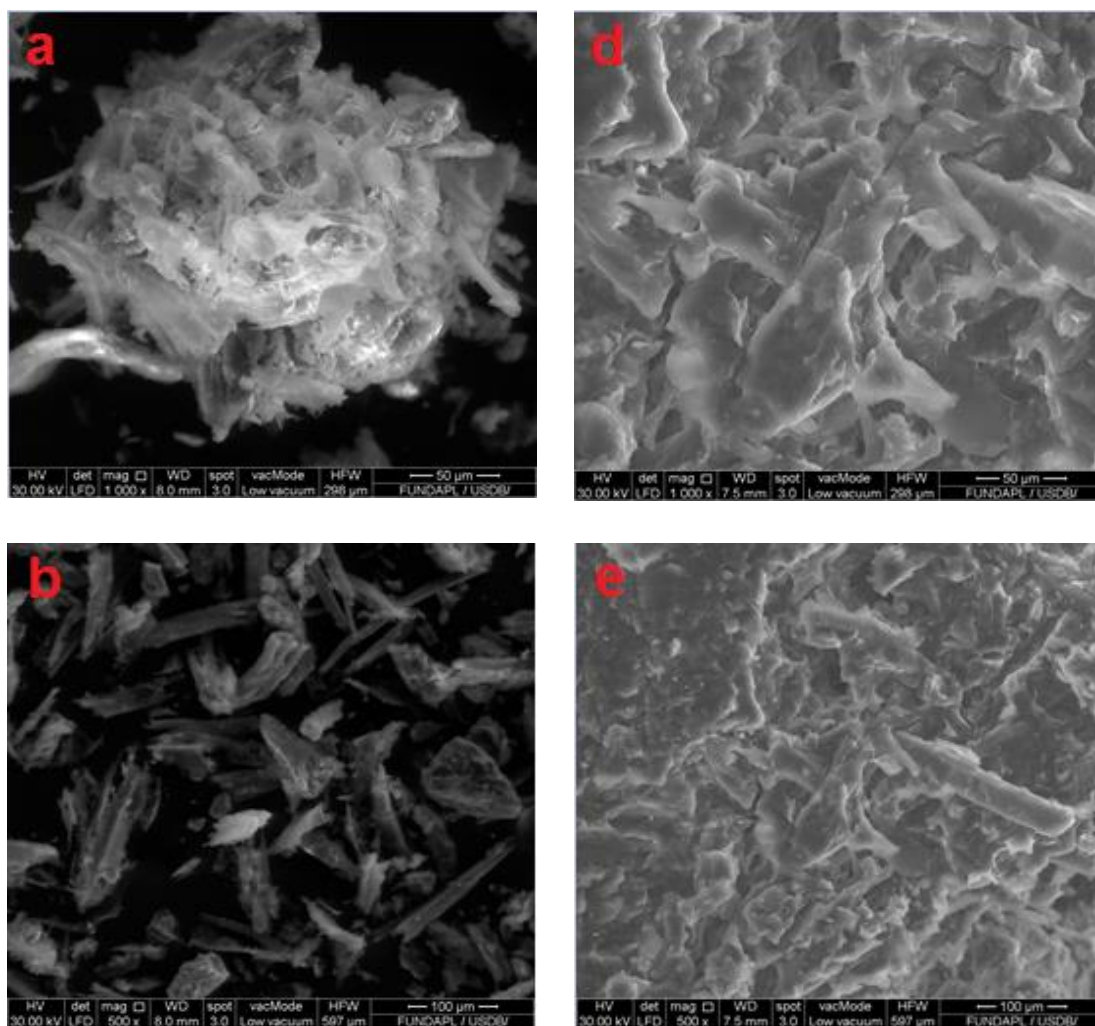
Figure 4. 43. Images MEB de la matrice (a, b, c) et du CRT28 HC (d, e, f) sous différents grossissements (x1000, x500, x250)

9.3. Résultats des observations par MEB du CHP

La microstructure de la matrice support de l'HP (figs. 4.49, a, b, c) et celle du CHP (figs. 4.49, d, e, f) sont observées au microscope électronique à balayage sous différents grossissements (x1000, x500, x250), respectivement.

Les images MEB (figs. 4.50, a, b, c) montrent la morphologie de la matrice support de l'HP. Ces images nous permettent de constater que la microstructure de la sciure de bois se présente en fibres linéaires, ce qui constitue un élément intéressant pour la rétention de l'HP.

Les images MEB du CHP (figs. 4.49, d, e, f) montrent une bonne rétention de l'HP dans la matrice, avec une distribution uniforme de l'HP dans cette dernière.



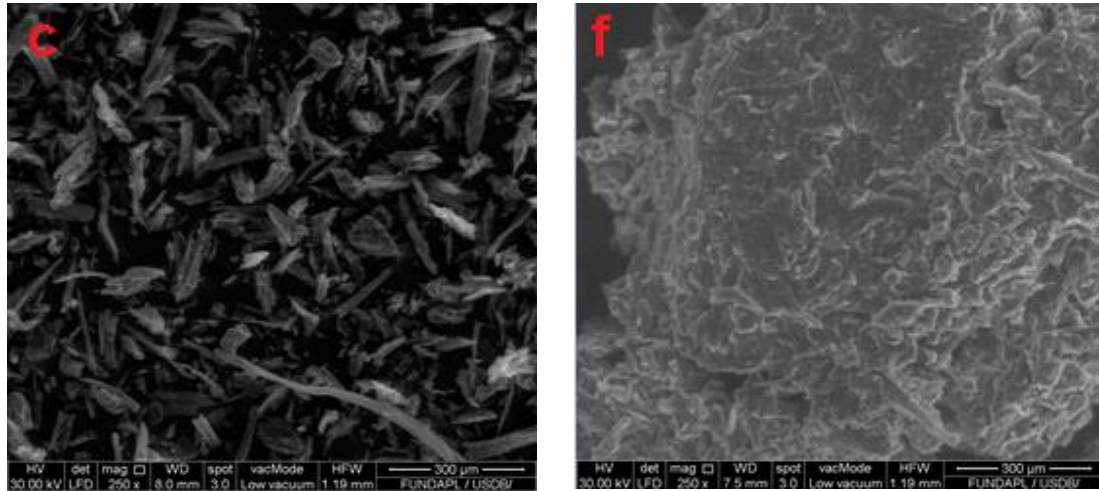


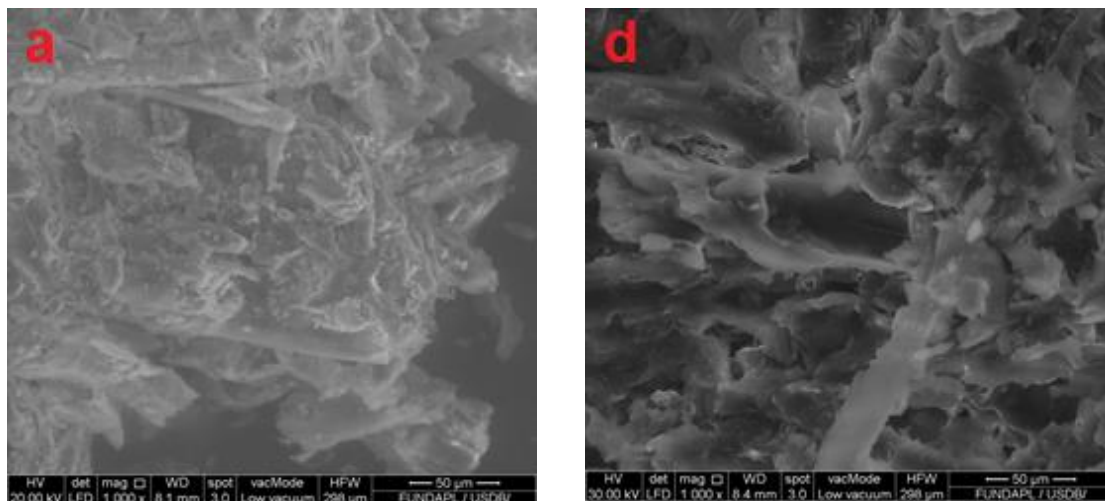
Figure 4. 49. Images MEB de la matrice (a, b, c) et du CHP (d, e, f) sous différents grossissements (x1000, x500, x250)

9.4. Résultats des observations par MEB du CAL

La microstructure de la matrice support du MCP (figs. 4.50, a, b, c) et celle du composite MCP (figs. 4.50, d, e, f) sont observées au microscope électronique à balayage sous différents grossissements (x250, x500, x1000).

Les images de la microstructure de la matrice (figs. 4.50, a, b, c) montrent la présence de surfaces irrégulièrement rugueuses.

Les images MEB du CAL (figs. 4.50, d, e, f) montrent une dispersion uniforme et homogène de l'AL dans la matrice. En conclusion, les images du MEB montrent que l'imprégnation de l'AL dans la microstructure de la matrice est réussie.



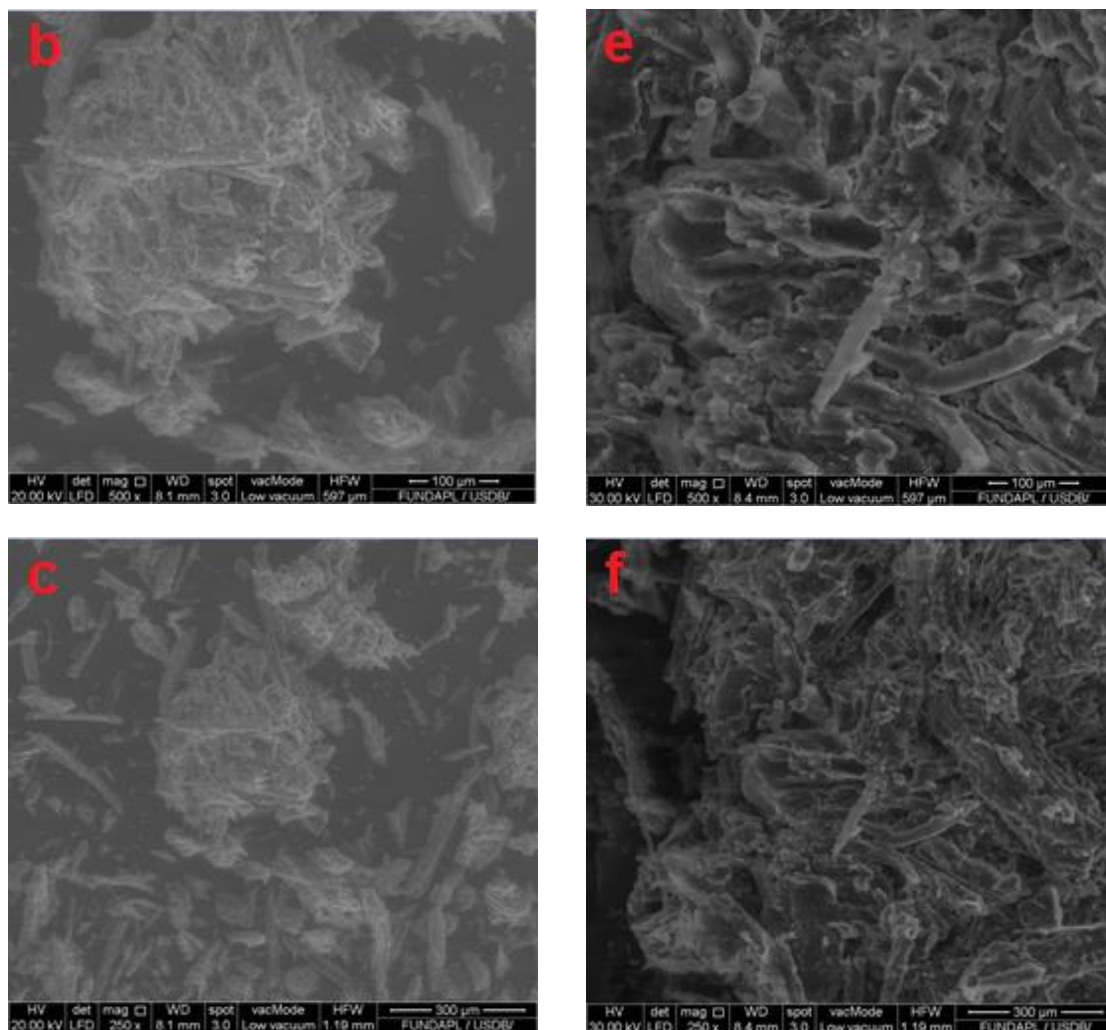


Figure 4.50. Images MEB de la matrice (a, b, c) et du CAL (d, e, f) sous différents grossissements (x1000, x500, x250)

9.5. Résultats des observations par MEB du CHC

La microstructure de la matrice support de l'HC (figs. 4.51, a, b, c) et celle du CHC (figs. 4.51, d, e, f) sont observées au microscope électronique à balayage sous différents grossissements (x1000, x500, x250), respectivement.

Les images MEB (figs. 4.51, a, b, c) montrent la morphologie de la matrice support de l'HC. Ces images nous permettent de constater que la microstructure de cette matrice est rugueuse. Les images MEB du CHC (figs. 4.51, d, e, f) montrent une bonne rétention de l'HC dans la matrice et une distribution uniforme de l'HC dans cette dernière. Ces résultats révèlent une bonne compatibilité entre l'HC et la matrice. En conclusion, ces images obtenues au MEB montrent que l'HC est bien intégré dans la microstructure de la matrice.

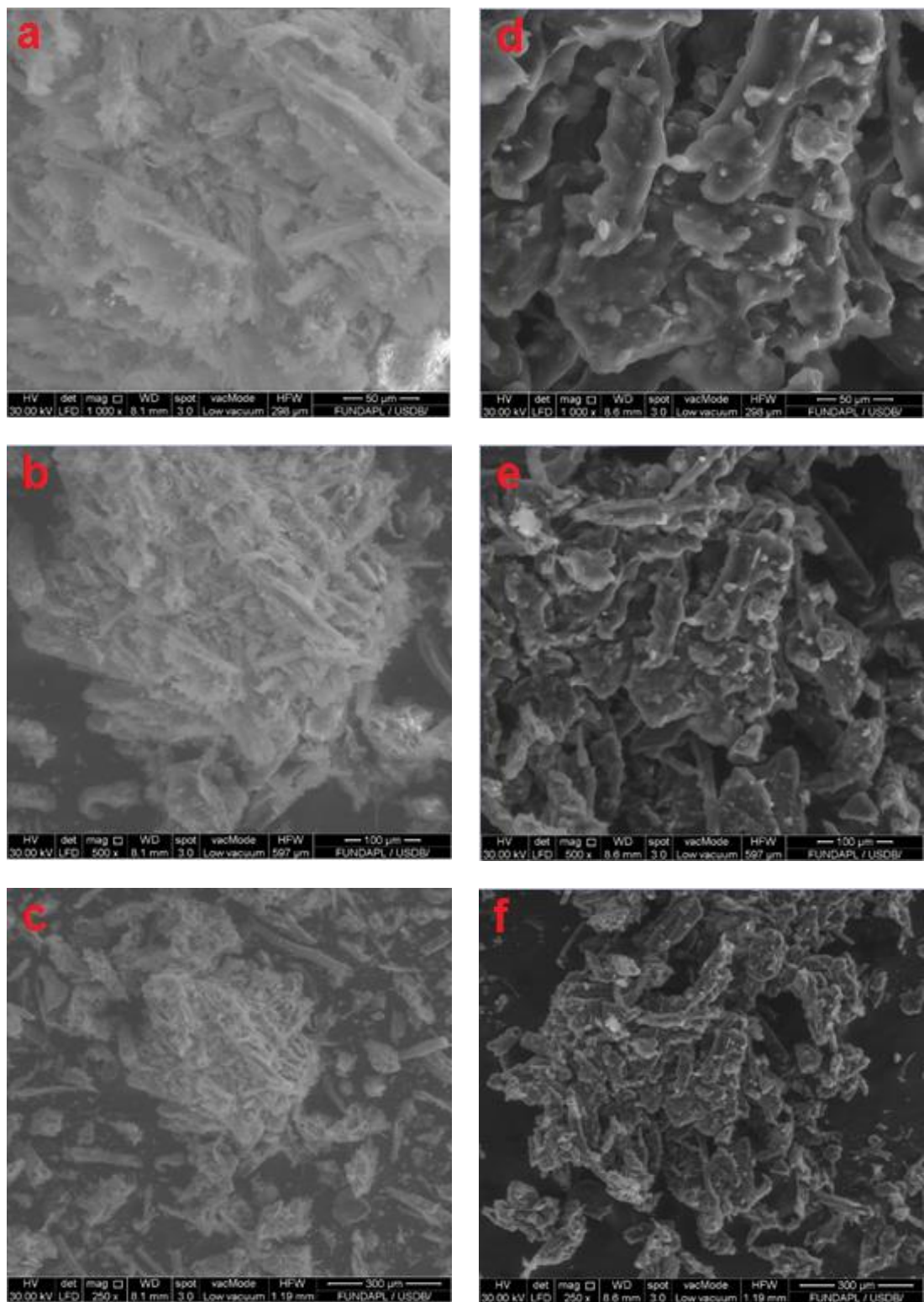


Figure 4.51. Images MEB de la matrice (a, b, c) et du CHC (d, e, f) sous différents grossissements (x1000, x500, x250)

10. Résultats des essais d'écrasements

10.1. Résultats des essais d'écrasements du CBC

Les composites MCPs élaborés sont destinés à une application en revêtement dans les murs du bâtiment et ne sont pas destinés à une application dans les éléments structuraux.

La figure 4.52 montre les étapes de l'essai de résistance du CBC à la compression simple. La figure 4.53 montre l'évolution de la charge appliquée aux éprouvettes de composites MCPs en compression simple.

Lors du processus de compression simple, le CBC ne subit pas de rupture brutale, mais présente un palier ; cela est dû à la présence de sciure de bois.

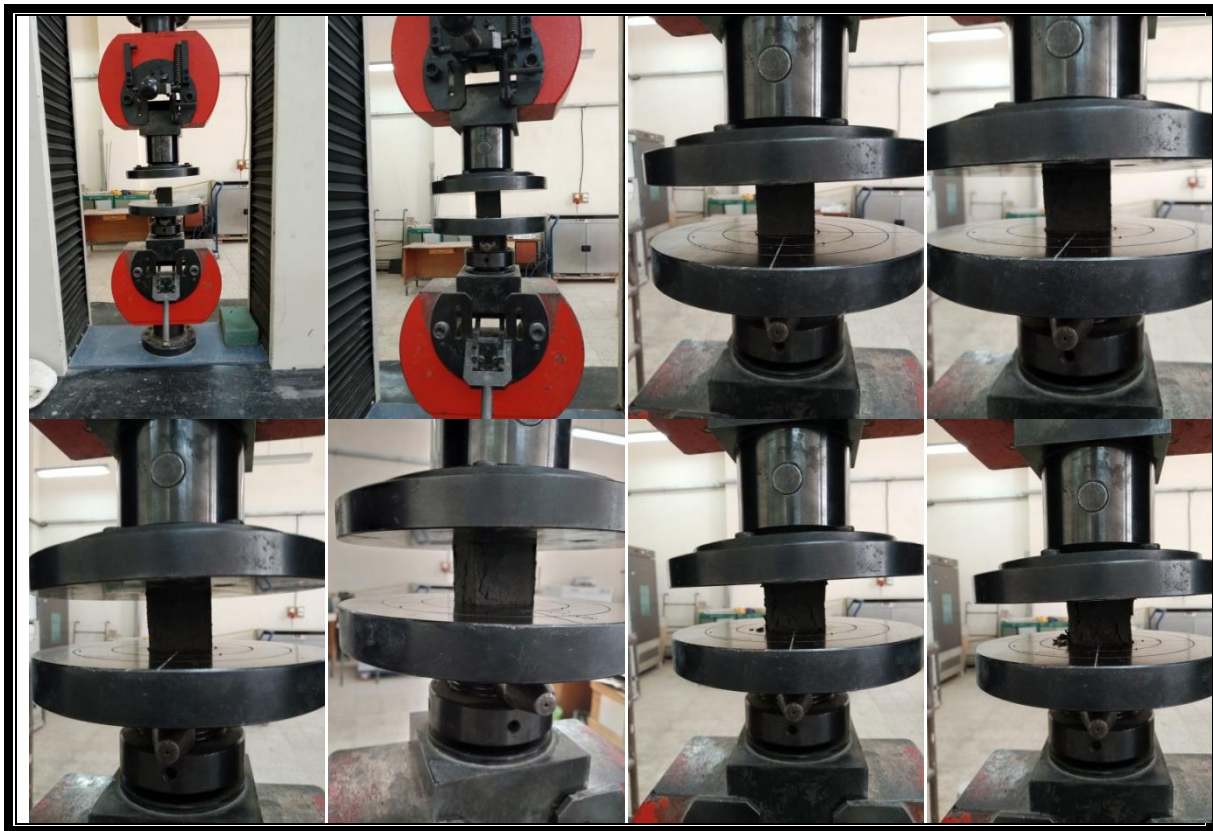


Figure 4. 44. Etapes de l'essai de résistance du CBC à la compression simple

La courbe pression/déplacement du CBC (fig. 4.53) nous permet de lire que la résistance à la compression simple de ce dernier est à 0,95 MPA.

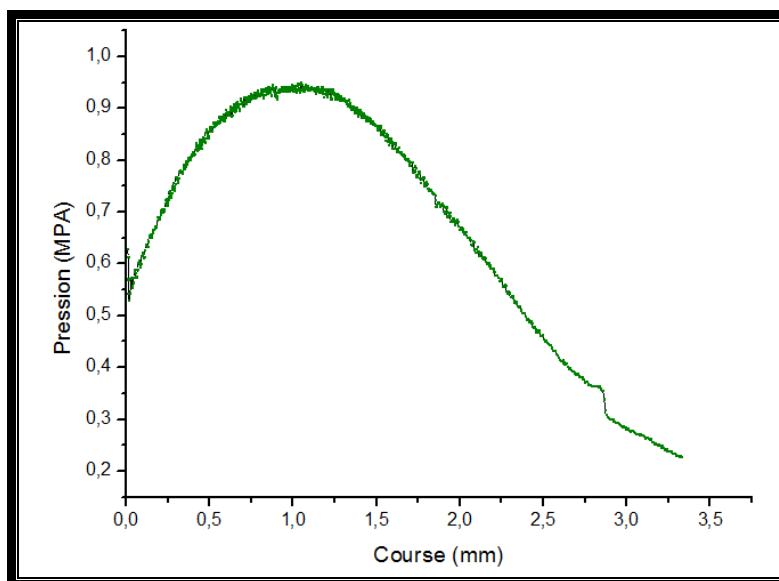


Figure 4. 45. Courbe pression/déplacement du CBC en compression simple

10.2. Résultats des essais d'écrasements du CHP

La figure 4.54 montre les étapes de l'essai de résistance du CHP à la compression simple. La figure 4.55 montre l'évolution de la charge appliquée aux éprouvettes de CHP en compression simple. Lors du processus de compression simple, le CHP ne subit pas de rupture brutale, mais présente un palier.

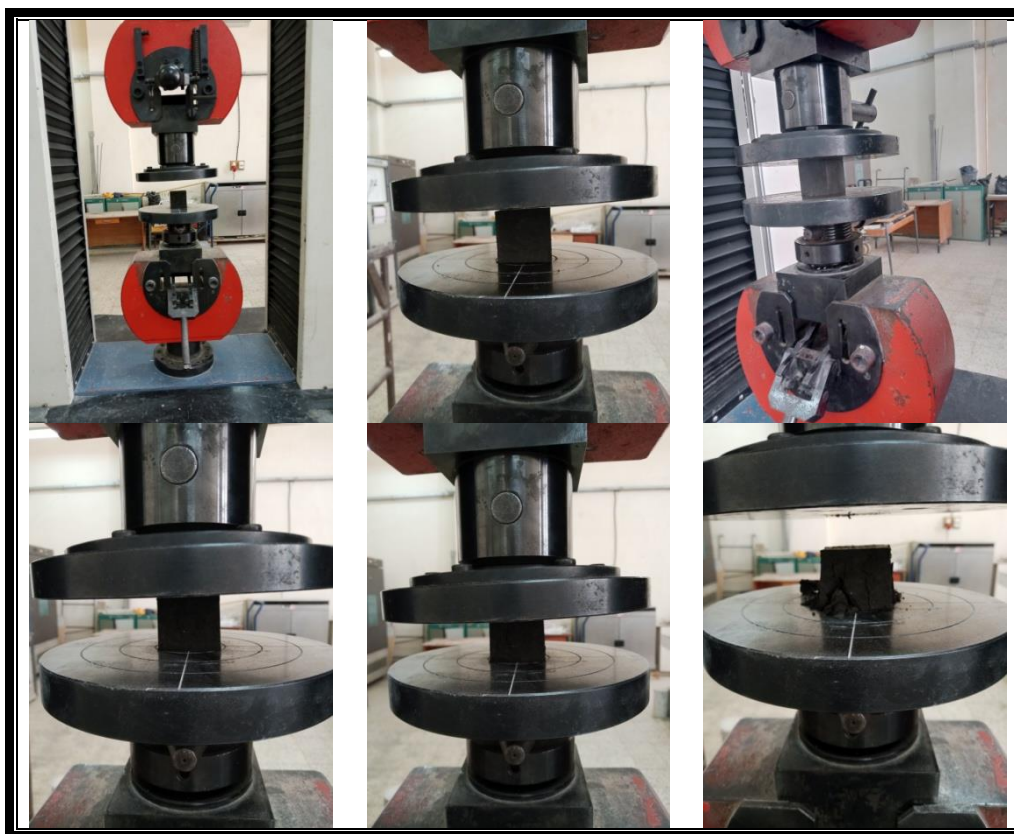


Figure 4. 46. Etapes de l'essai de résistance du CHP à la compression simple

La courbe pression/déplacement du composite CHP (fig. 4.55) nous permet de lire que la résistance à la compression simple de ce dernier est à 0,92 MPA.

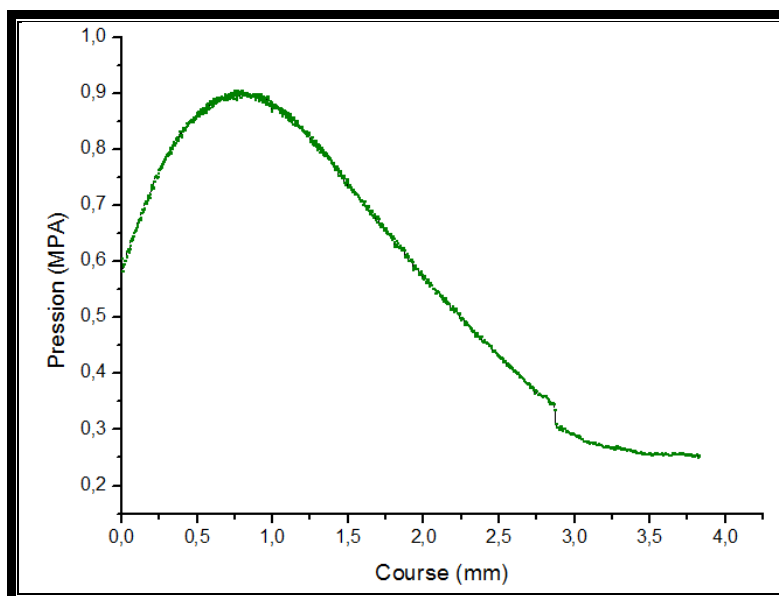


Figure 4. 47. Courbe pression/déplacement du CHP en compression simple

10.3. Résultats des essais d'écrasements du CHC

La figure 4.56 montre le résultat de l'évolution de la charge appliquée aux éprouvettes de CHC en compression simple. Lors du processus de compression simple, le CHC ne subit pas de rupture brutale, mais présente un palier.

La courbe pression/déplacement du CHC (fig. 4.56) nous permet de lire que la résistance à la compression simple de ce dernier est à 0,79 MPA.

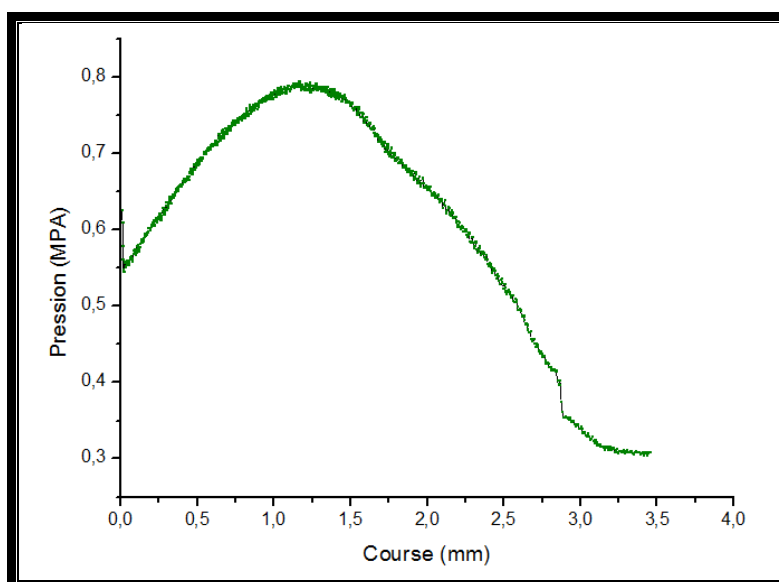


Figure 4. 48. Courbe pression/déplacement du CHC en compression simple

10.4. Résultats des essais d'écrasements du CAL

La figure 4.57 montre les étapes de l'essai de résistance du CAL à la compression simple. La figure 4.58 montre le résultat de l'évolution de la charge appliquée aux éprouvettes de CAL en compression simple.

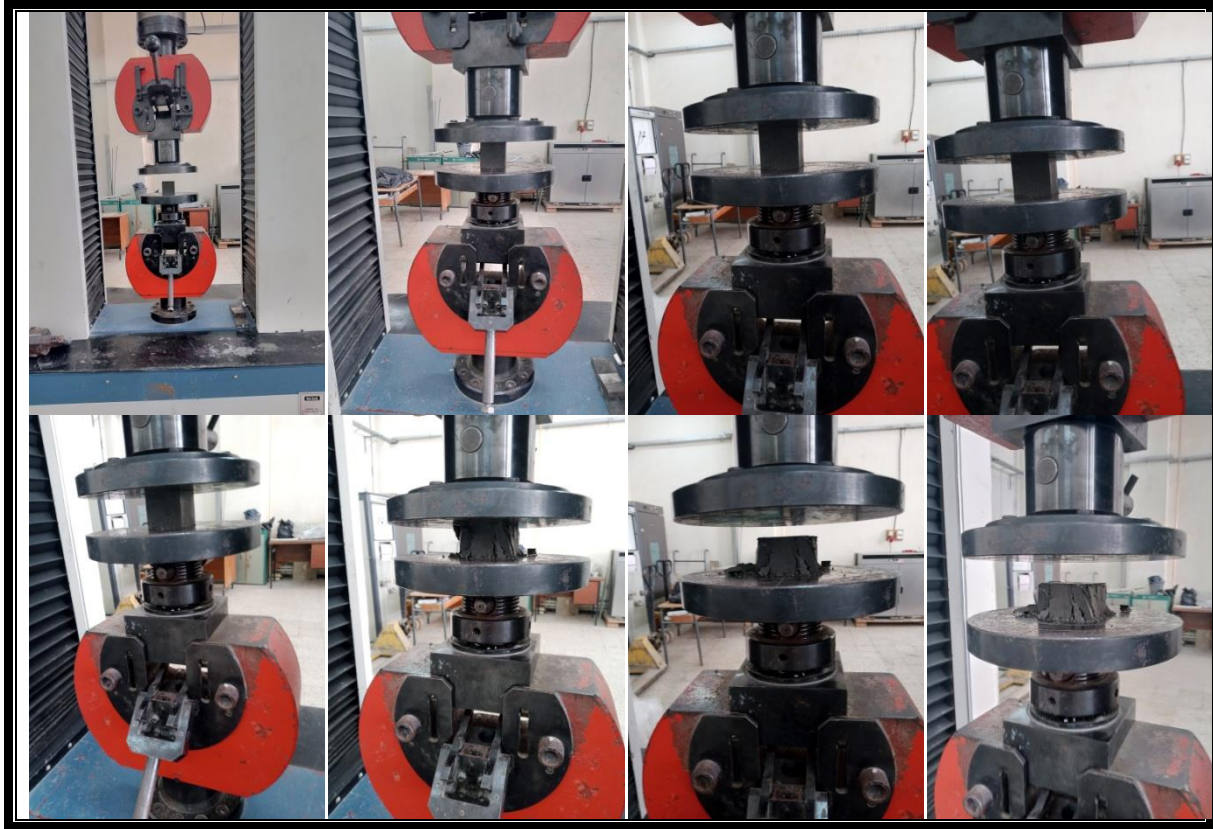


Figure 4. 49. Etapes de l'essai de résistance du CAL à la compression simple

La courbe pression/déplacement du CAL (fig. 4. 58) nous permet de calculer la résistance à la compression simple de ce dernier, qui est trouvée à 6,45 MPA, ce qui représente une bonne résistance à la compression du CAL.

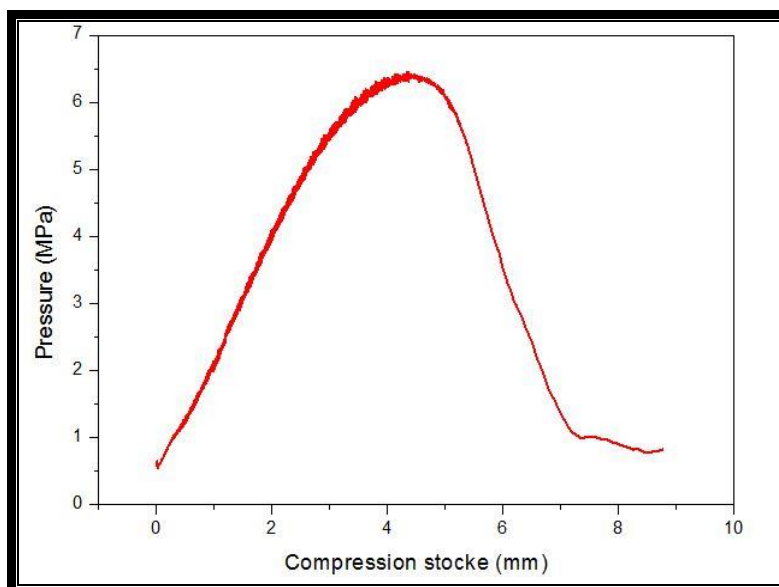


Figure 4. 50. Courbe pression /déplacement du CAL en compression simple

10.5. Résultats des essais d'écrasements du CRT28 HC

La figure 4.59 montre les étapes des essais de résistance du CRT28 HC à la compression simple. La figure 4.60 montre le résultat de l'évolution de la charge appliquée aux éprouvettes de CRT28 HC en compression simple.

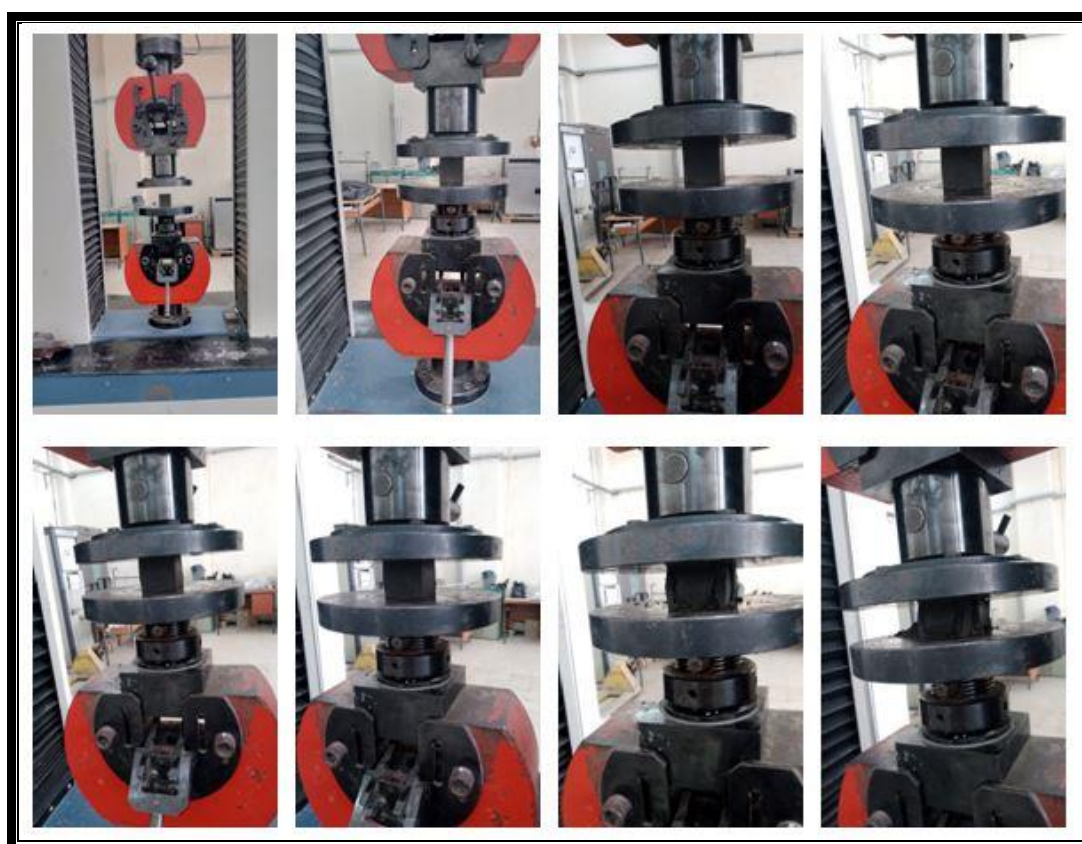


Figure 4. 51. Etapes de l'essai de résistance du CRT28 HC à la compression simple

La courbe pression/déplacement du CRT28 HC (Fig. 4.60) nous permet de calculer la résistance à la compression simple de ce dernier, qui est trouvée à 3,18 MPa.

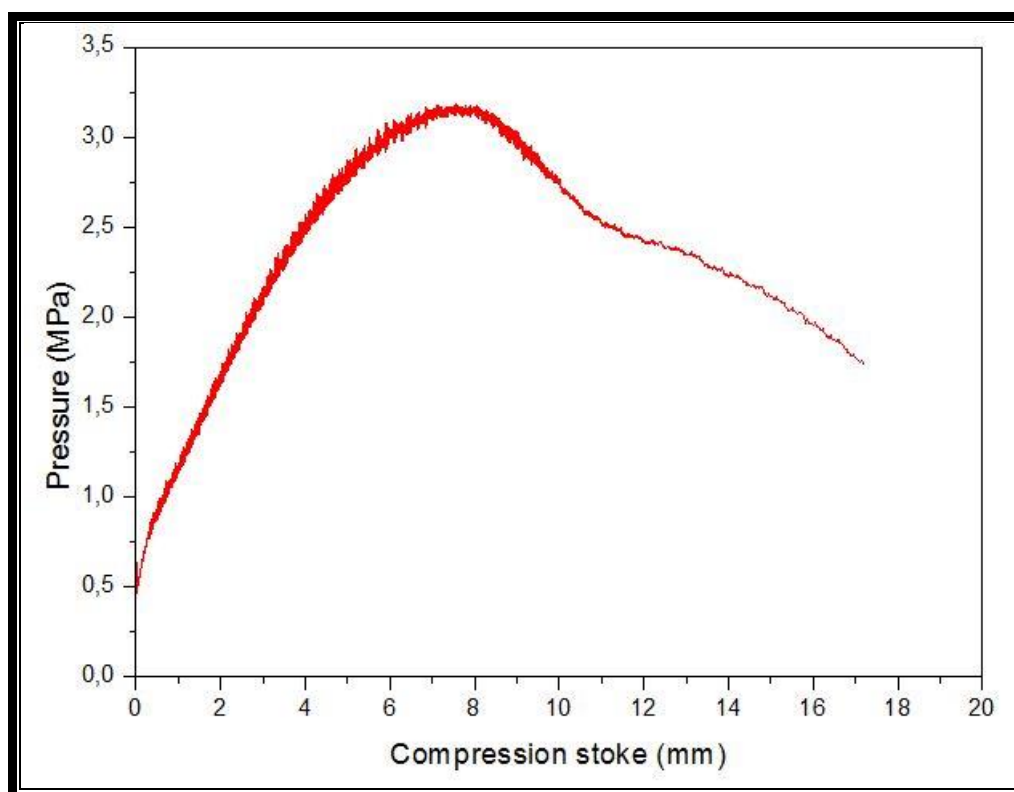


Figure 4. 52. Courbe pression /déplacement du CRT28 HC en compression simple

11. Résultats des mesures de conductivité thermique

La conductivité thermique des matériaux de stockage d'énergie est un paramètre important pour l'efficacité des systèmes de stockage thermique [265].

11.1. Résultats de la conductivité thermique du CRT28 HC

La figure 4.61 montre l'amélioration de la conductivité thermique du CRT28 HC avec l'ajout du graphite. La conductivité thermique de la RT28 HC est de 0,2 W/m.K et le composite CRT28 HC sans graphite présente une conductivité thermique de 0,36 W/m.K. Après l'ajout de 10 % de graphite, la conductivité thermique du composite CRT28 HC atteint 0,61 W/m.K. La conductivité thermique du CRT28 HC a été améliorée de 305 % avec l'ajout du graphite.

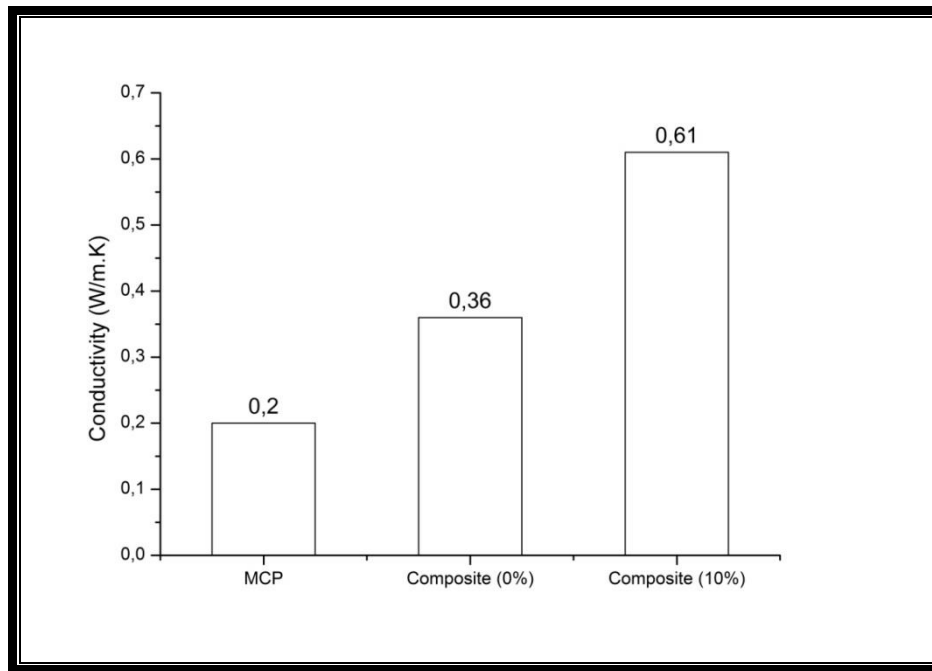


Figure 4. 53. Amélioration de la conductivité thermique du CRT28 HC

11.2. Résultats de la conductivité thermique du CAL

La figure 4.62 montre l'amélioration de la conductivité thermique du CAL avec l'ajout du graphite. La conductivité thermique du MCP est de 0,19 W/m.K et le CAL sans graphite présente une conductivité thermique de 0,44 W/m.K. Après l'ajout de 10 % de graphite, la conductivité thermique du CAL atteint 0,60 W/m.K. La conductivité thermique du CAL a été améliorée de 315 % avec l'ajout du graphite.

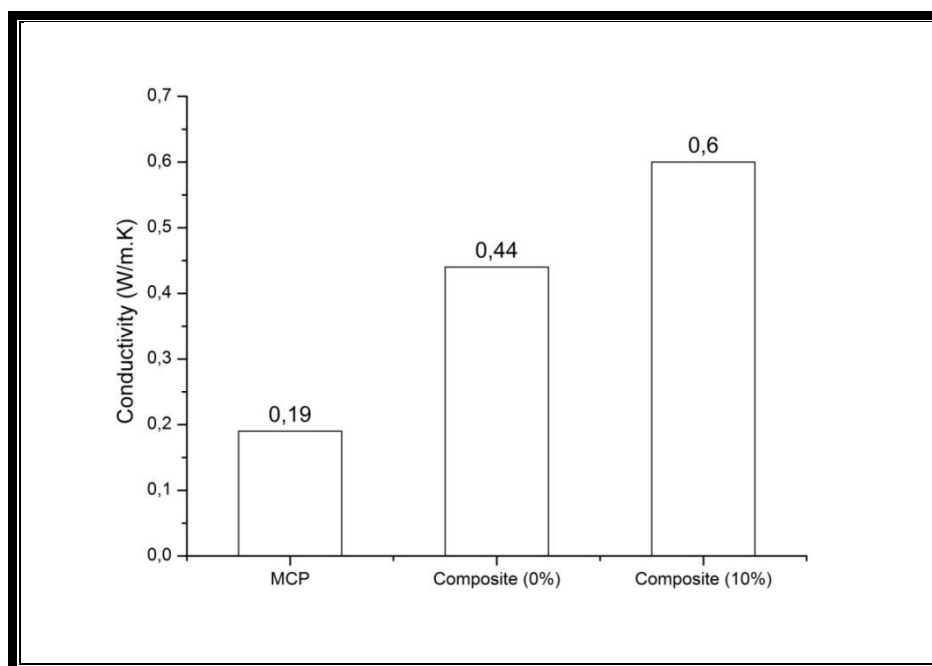


Figure 4. 54. Amélioration de la conductivité thermique du CAL

Une comparaison entre les conductivités thermiques du CRT28 HC et du CAL obtenues grâce à l'ajout du graphite avec diverses études trouvées dans la littérature est donnée dans le tableau 1.11. L'amélioration de la conductivité thermique la plus importante (379 %) par l'ajout de 6 % de graphite est rapportée par Kenisarin et al. [266]. La CT du CAL développé dans ce travail a été améliorée de 305 % par l'ajout de 10 % de graphite, et la conductivité thermique du CRT28 HC a été améliorée de 305 % par l'ajout de 10 % de graphite.

Tableau 4. 11. Comparaison de la conductivité thermique du CRT28 HC et du CAL avec d'autres études

Composite MCP	Graphite (%)	CT (W/m.K)	Amélioration (%)	Reference
RT62 HC/GR	6	0.46	130	[267]
LA-SA/ GR	2.5	0.51	214	[268]
LWM/EG/paraffine	20	0.76	194	[269]
PW/GR	6	0.98	379	[266]
Paraffin/ GR	40	0.68	193	[270]
CA-LA/Diatomite/GR	10	0.46	114	[271]
PA-CA/ Dm/GR	5	0.29	53.7	[272]
RT28HC/AG/SB/GR	10	0.61	305	Cette étude...
AL/AG/SB/GR	10	0.60	315	Cette étude...

12. Conclusion

Afin de choisir les matériaux composites MCPs à intégrer dans la paroi de bâtiment, plusieurs composites avec différents MCPs ont été élaborés. Les différentes caractérisations physiques, chimiques, thermiques et mécaniques ont été effectuées afin de sélectionner les composites adéquats pour une application dans l'enveloppe du bâtiment en zone aride. Ces principaux résultats ont été obtenus par les différentes caractérisations :

- Les analyses FTIR des différents composites MCPs ont montré leurs stabilités chimiques, avec l'absence d'interactions chimiques entre les composants des nouveaux matériaux composites MCPs élaborés. Ces analyses chimiques sont confirmées avec les analyses par DRX, où les composites MCPs élaborés présentent les mêmes pics que ceux des éléments de la matrice.
- Les observations au MEB des différents composites MCPs ont montré la distribution uniforme et homogène des MCPs dans les matrices.
- Les analyses thermogravimétriques des différents composites MCPs ont montré leur stabilité thermique et leur fiabilité pour une utilisation dans le bâtiment.
- Les analyses DSC des différents composites MCPs ont permis de déterminer leurs caractéristiques thermiques. Ces analyses nous ont permis de sélectionner le composite RT28 HC/AG +SB +GR et le composite AL/AG +SB +GR pour une application dans la paroi de bâtiment. Le choix de ses composites s'est basé sur leur température de fusion et leur chaleur latente élevée.
- Les essais de résistance mécanique effectués sur les différents composites MCPs élaborés ont montré que le composite AL/AG +SB +GR présente la plus grande

capacité de résistance à la compression avec un taux de résistance de 6,45 MPA, suivi par le composite RT28 HC/AG +SB +GR avec un taux de résistance de 3,18 MPA. Ces essais ont confirmé la possibilité d'application de ces matériaux composites MCPs dans la structure non porteuse du bâtiment.

- Les mesures de conductivité thermique effectuées sur les différents composites MCPs élaborés ont montré une amélioration de la CT de plus de 300 % avec l'ajout de 10 % de graphite.

Chapitre 5 : Etude du protocole d'application des nouveaux matériaux composites élaborés dans une paroi de bâtiment

1. Introduction

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermique des nouveaux matériaux composites élaborés en étant intégrés dans une enveloppe de bâtiment afin de vérifier leur efficacité d'amélioration de la performance thermique de cette dernière.

Le présent travail concerne la présentation des résultats expérimentaux effectués au laboratoire de recherche sur une cellule test représentant un mur Trombe dans lequel sont intégrées des plaques des nouveaux matériaux composites élaborés.

Le choix de l'application des nouveaux matériaux composites élaborés dans un mur trombe est effectué afin de simuler le climat saharien ; l'effet de serre créé dans le mur trombe permet d'atteindre des températures avoisinantes les 60 ° C à la surface du mur.

Les essais ont été effectués à l'UMMTO, au cours du mois de juin 2022, avec des températures extérieures autour de 42 °C. La cellule d'essai a été placée de façon à avoir le mur trombe en plein sud et ainsi évaluer l'évolution de la température de la paroi exposée au soleil avec et sans les composites MCPs (figure 5.1). Les mesures de température ont été réalisées au moyen de thermocouples de type « K » connectés à un enregistreur de données, couplé à un ordinateur.



Figure 5. 1. Image du prototype d'essai

2. Description du dispositif expérimental

La cellule d'essais est composée d'un mur Trombe, de trois parois isolantes, d'un plancher et d'une toiture ouvrante isolants. Les caractéristiques des différentes composantes de la cellule sont données dans le tableau 5.1.

Tableau 5. 1. Caractéristiques des différentes composantes de la cellule

Paroi	Longueur (m)	Largeur (m)	Epaisseur (m)
Paroi nord (isolant)	0.80	0.80	0.05
Paroi est (isolant)	1.20	0.80	0.05
Paroi sud (mur Trombe)	0.70	0.70	0.15
Paroi ouest (isolant)	1.20	0.80	0.05
Plancher (isolant)	1.20	0.80	0.05
Toiture (isolant)	1.20	0.80	0.05

2.1. Réalisation de la structure isolante

La première étape dans la réalisation du prototype est la fabrication d'une structure en bois de 4 cm d'épaisseur. Par la suite, les parois isolantes ont été mises en place ; les parois isolantes sont composées d'une double paroi en contreplaqué avec, à l'intérieur, du polystyrène. Quant à la toiture, le choix s'est porté sur un toit isolant mobile afin d'avoir accès à l'intérieur de la cellule et de faciliter les mesures de température (figure 5.2).



Figure 5. 2. Réalisation du prototype d'essai

2.2. Réalisation du mur Trombe

Le mur Trombe est constitué d'un composite argile/paille/eau. La première étape consiste à préparer la matière première, entre autres, le tamisage de l'argile et le tri de la paille afin de choisir la plus fine. La deuxième partie consiste en la mise en place d'un coffrage pour

le coulage du mur trombe, tout en insérant deux tuyaux en PVC de 5 cm de diamètre pour obtenir les deux orifices supérieur et inférieur du mur trombe (figure 5.3).



Figure 5. 3. Etapes de l'élaboration du mur Trombe

Le mur Trombe est finalement peint en noir afin d'absorber le maximum de chaleur, ainsi que d'augmenter la température à la surface du mur et d'avoir des températures du climat aride (figure 5.4).

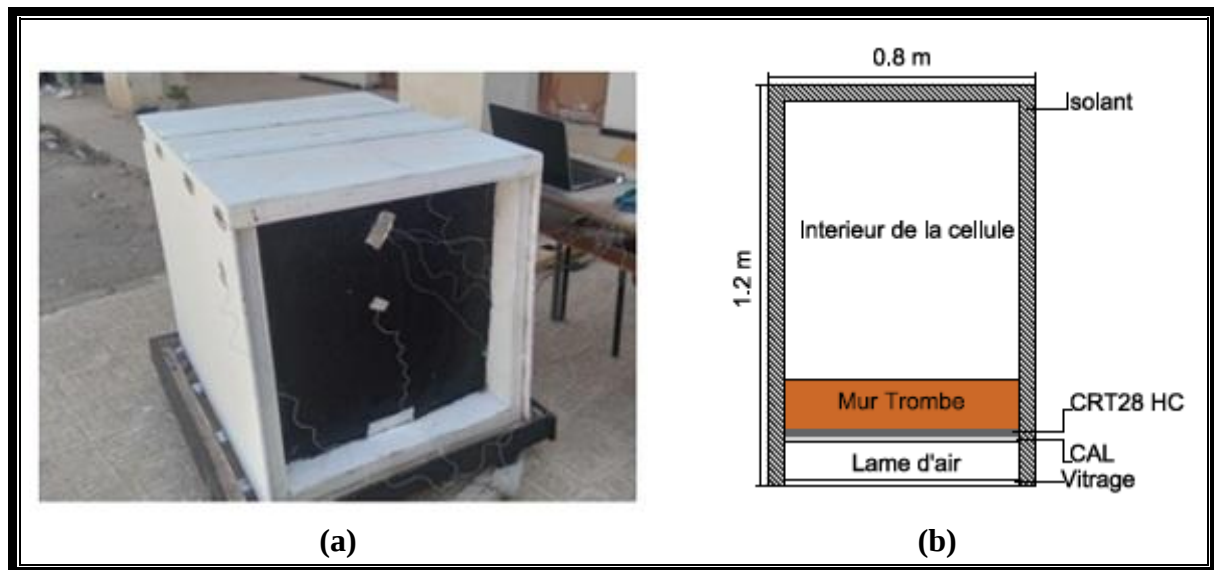


Figure 5. 4. (a), image de la cellule d'essai, (b) vue en plan sur la cellule d'essai

2.3. Elaboration des plaques de composites MCPs

Deux MCPs ont été utilisés afin d'élaborer les composites MCPs : l'acide laurique et la RT28 HC. Plusieurs plaques de ces composites MCPs de dimensions 35 x 35 cm ont été réalisées afin de former deux parois de stockage d'énergie thermique ; une première paroi de composites MCPs contenant l'acide laurique avec une température de fusion autour de 42 °C est utilisée comme première barrière des canicules, une deuxième paroi de composites MCPs contenant la RT28 HC avec une température de fusion autour de 28 °C est utilisée afin de maintenir la température intérieure dans la zone de confort.

Les plaques de composites MCPs sont ensuite encapsulées dans des sacs en aluminium pour éviter d'éventuelles fuites du MCP en fusion. L'aluminium a été choisi afin de mieux conduire le flux de chaleur vers l'intérieur. Cette paroi de stockage est collée à la surface externe du mur trombe (figure 5.5).



Figure 5. 5. Encapsulation des composites MCPs

3. Instruments de mesure utilisés

L'essai consiste à mesurer l'évolution de la température des parois externe et interne du mur Trombe avec des thermocouples de type K, placés dans différentes zones. Ces derniers ont été reliés à l'appareil d'acquisition de données PICO TECHNOLOGY de type PICOLOG TC-08 et reliés à un ordinateur.

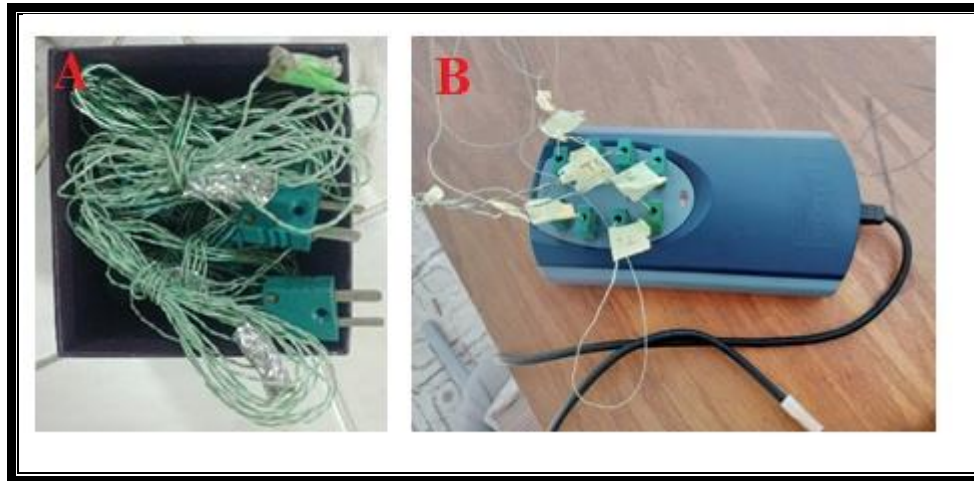


Figure 5. 6. Images des ; A : thermocouples de type K, B : PICOLOG TC-08

3.1. Répartition des thermocouples

3.1.1. Répartition des thermocouples avant l'intégration des composites MCPs

Une coupe schématique du mur Trombe avant l'intégration des composites MCPs est représentée dans la figure 5.7.

La répartition des thermocouples sur le prototype avant l'intégration des composites MCPs est donnée dans le tableau 5.2.

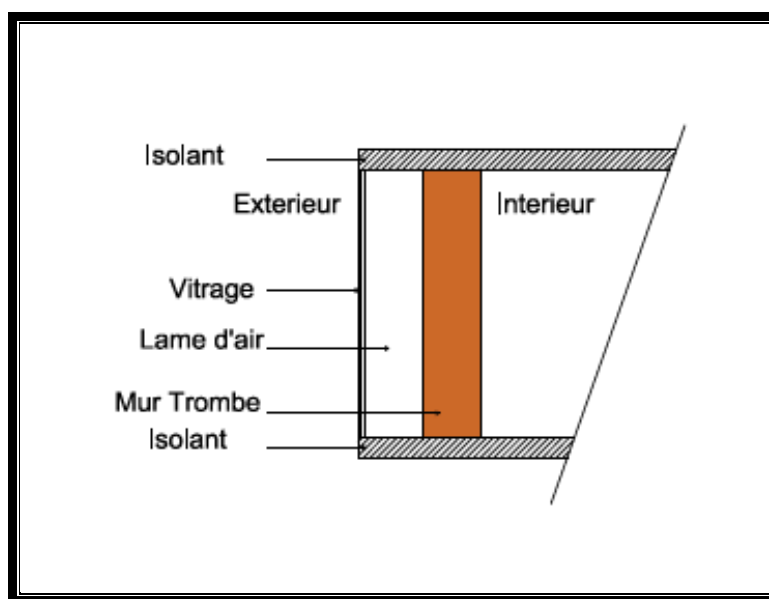


Figure 5. 7. Coupe schématique du mur Trombe avant l'intégration des composites MCPs

Tableau 5. 2. Répartition des thermocouples sur le prototype avant l'intégration des composites MCPs

Thermocouple	Emplacement
T1	Air ambiant intérieur.
T2	Face intérieure du mur trombe.
T3	Face extérieure du mur trombe.
T4	Vitre interne.
T5	Vitre externe.
T6	Face extérieure est de la cellule.
T7	Face extérieure du toit.
T8	Face extérieure ouest de la cellule.

3.1.2. Répartition des thermocouples après l'intégration des CRT28 HC

Une coupe schématique du mur Trombe après l'intégration des CRT28 HC est représentée dans la figure 5.8.

La répartition des thermocouples sur le prototype après l'intégration des CRT28 HC est donnée dans le tableau 5.3.

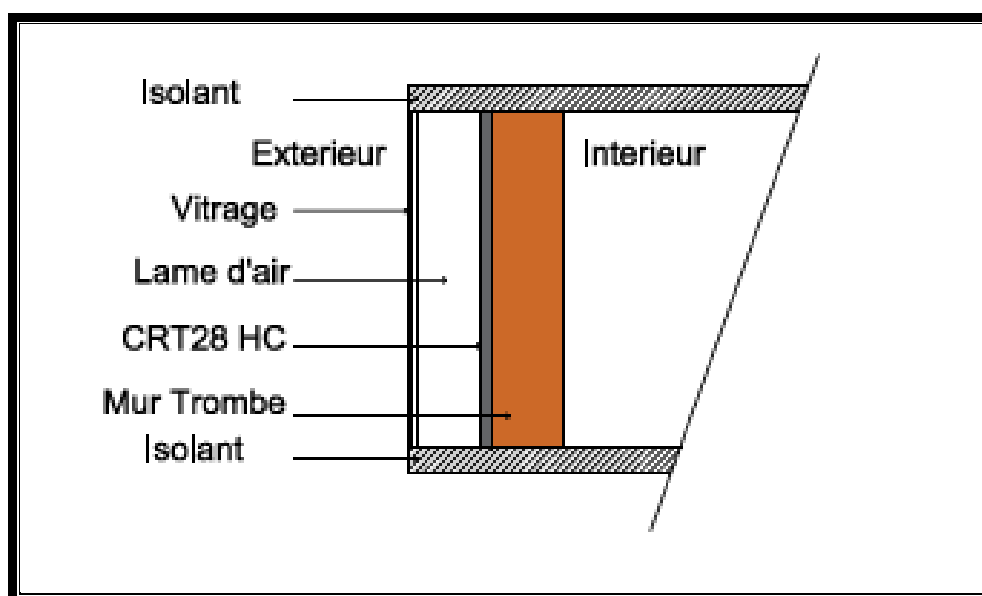


Figure 5. 8. Coupe schématique du mur Trombe après l'intégration des CRT28 HC

Tableau 5. 3. Répartition des thermocouples sur le prototype après l'intégration des composites CRT28 HC

Thermocouple	Emplacement
T1	Air ambiant intérieur.
T2	Face intérieure du mur trombe.
T3	Face extérieure du mur trombe.
T4	Face intérieure du CRT28 HC
T5	Face extérieure du CRT28 HC

T6	Vitre interne.
T7	Vitre externe.
T8	Surface extérieure du toit

3.1.3. Répartition des thermocouples après l'intégration des CRT28 HC et CAL

Une coupe schématique du mur Trombe après l'intégration des CRT28 HC et CAL est représentée dans la figure 5.9.

La répartition des thermocouples sur le prototype après l'intégration des deux composites MCPs est donnée dans le tableau 5.4.

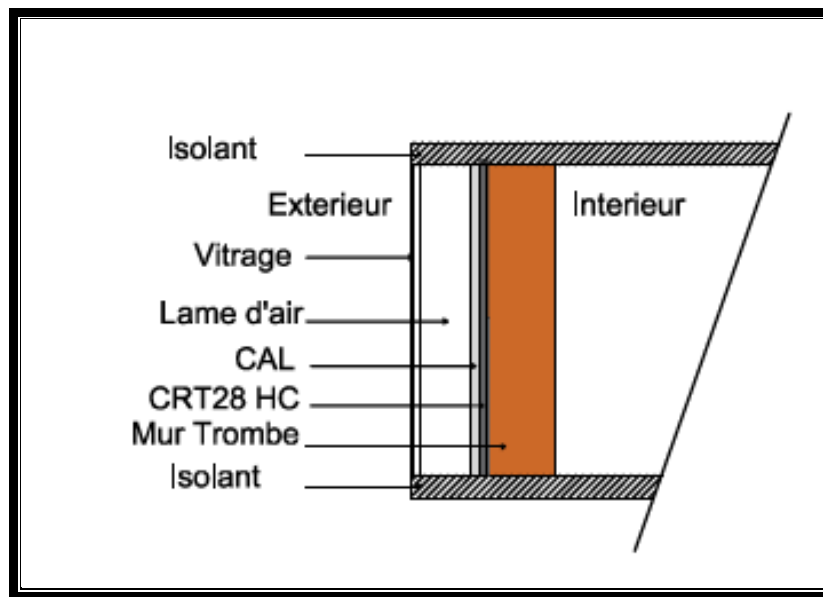


Figure 5. 9. Coupe schématique du mur Trombe après l'intégration des composites CRT28 HC et CAL

Tableau 5. 4. Répartition des thermocouples sur le prototype après l'intégration des composites CRT28 HC et CAL

Thermocouple	Emplacement
T1	Face intérieure du mur trombe.
T2	Face extérieure du mur trombe
T3	Face intérieure du CRT28 HC
T4	Face extérieure du CRT28 HC
T5	Face intérieure du CAL
T6	Face extérieure du CAL
T7	Vitre interne.
T8	Vitre externe.

4. Mesures de températures journalières

Nous avons choisi de tester l'efficacité du prototype élaboré durant le mois de juin 2022, car la météo avait prévu une canicule sur la ville de Tizi Ouzou durant cette période. En effet, cette canicule nous a été bénéfique afin de simuler le climat saharien de la ville de Biskra.

Les températures journalières des villes de Tizi Ouzou et de Biskra durant cette période sont données dans le tableau 5.5 et les courbes d'évolution des températures journalières sont illustrées dans la figure 5.10.

Les mesures de températures ont été faites de 10 h à 17 h.

D'après les mesures de températures journalières de la ville de Tizi Ouzou, la température maximale au cours de la journée est de 40 °C et le pic est enregistré à 14 h. La température la plus basse est enregistrée à 6 h avec une température de 22 °C.

D'après les mesures de températures journalières de la ville de Biskra, la température maximale au cours de la journée est de 40 °C et le pic est enregistré à 16 h. La température la plus basse est enregistrée à 6 h avec une température de 26 °C.

La comparaison de ces mesures de températures journalières des deux villes indique des conditions climatiques assez proches, étant donné que la température maximale au cours de la journée est de 40 °C pour les deux villes.

Tableau 5. 5. Températures journalières pour la journée du 14 juin 2022

Temps (h)	00 :00	02 :00	04 :00	06 :00	08 :00	10 :00	12 :00	14 :00	16 :00	18 :00	20 :00	22 :00
T (°C) TIZI.O	28°	26°	25°	22°	29°	36°	39°	40°	40°	37°	33°	32°
T (°C) Biskra	30°	29°	27°	26°	29°	33°	36°	38°	40°	40°	39°	35°

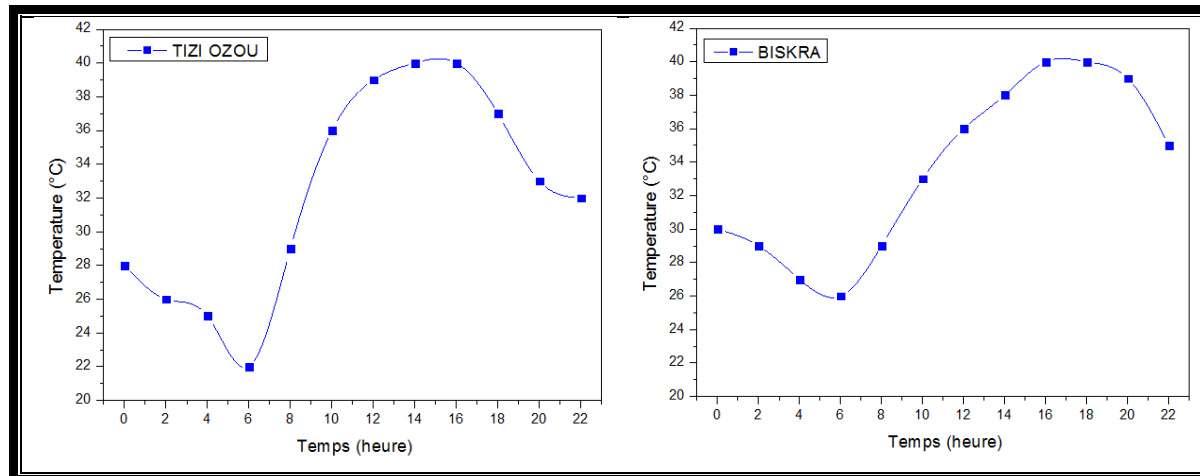


Figure 5. 10. Températures journalières pour la journée du 14 juin 2022

5. Résultats des mesures de température effectuées

5.1. Résultats des mesures de températures des parois sans les composites MCPs

La figure 5. 11 présente l'évolution des températures internes et externes du prototype au cours de la journée.

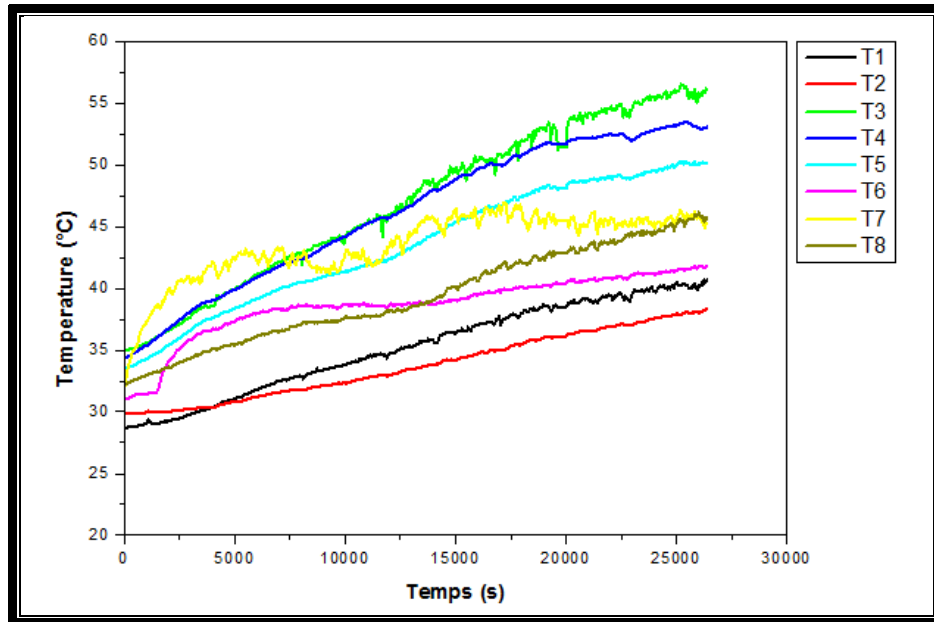


Figure 5. 11. Evolution des températures des parois du prototype sans les composites MCPs

Légende :

- T1 : Air ambiant intérieur.
- T2 : Face intérieure du mur trombe.
- T3 : Face extérieure du mur trombe.
- T4 : Vitre interne.
- T5 : Vitre externe.
- T6 : Façade extérieure est de la cellule.
- T7 : Face extérieure du toit.
- T8 : Façade extérieure ouest de la cellule.

Interprétation des Résultats

La température ambiante à l'intérieur de la cellule (T1) en début de journée est de 28 °C et elle augmente au cours de la journée pour atteindre 40 °C vers 17 h. La température de la face intérieure du mur Trombe (T2) en début de journée est de 29 °C et elle atteint 38 °C vers 17 h. La température de la face extérieure du mur Trombe (T3) en début de journée est de 34 °C et elle évolue pour atteindre 56 °C vers 17 h. La température de la vitre interne (T4) en début de journée est de 34 °C et elle augmente pour atteindre 53 °C vers 17 h. La température de la vitre externe (T5) en début de journée est de 33 °C et elle augmente pour atteindre 50 °C vers 17 h. La température de la façade extérieure de la cellule (T6) en début de journée est de 31 °C et elle augmente pour atteindre 41,7 °C vers 17 h. La température de la vitre externe (T7) en début de journée est de 31,7 °C et elle augmente pour atteindre 45,2 °C vers 17 h. La température de la

façade extérieure ouest de la cellule (T7) en début de journée est de 32 °C et elle augmente pour atteindre 45,7 °C vers 17 h.

5.2. Résultats des mesures de températures des parois avec l'intégration du CRT28 HC

La figure 5. 12 présente l'évolution des températures internes et externes du prototype au cours de la journée.

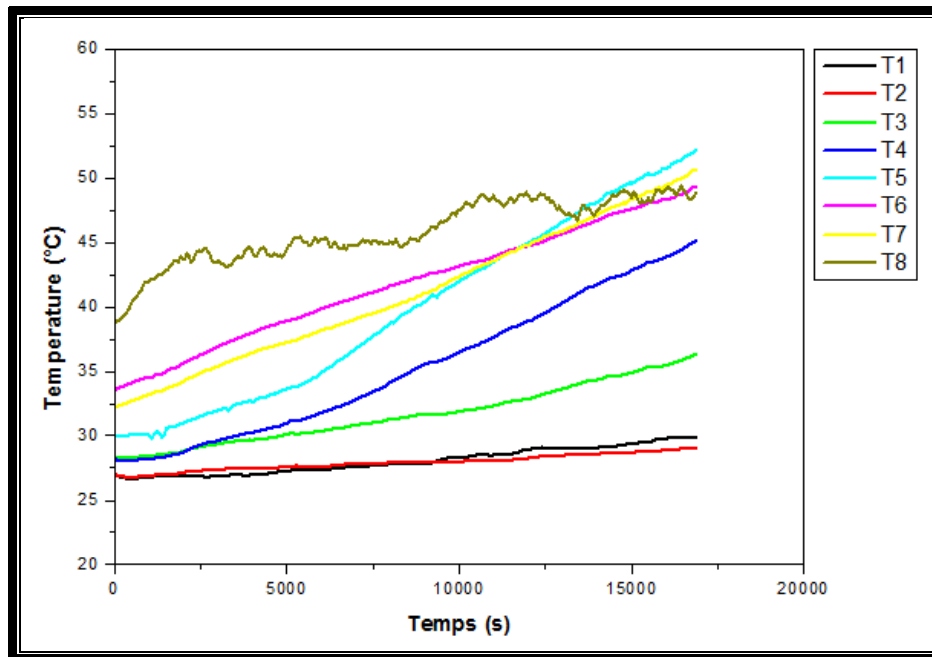


Figure 5. 12. Evolution des températures des parois du prototype avec le CRT 28 HC

Légende :

- T1** : Air ambiant intérieur.
- T2** : Face intérieure du mur trombe.
- T3** : Face extérieure du mur trombe.
- T4** : Face intérieure du CRT28 HC
- T5** : Face extérieure du CRT28 HC
- T6** : Vitre interne.
- T7** : Vitre externe.
- T8** : Face extérieure du toit.

Interprétation des Résultats

La température ambiante à l'intérieur de la cellule (T1) en début de journée est de 26,9 °C et elle augmente au cours de la journée pour atteindre 29,9 °C. La température de la face intérieure du mur Trombe (T2) en début de journée est de 27 °C et elle atteint 29 °C au cours de la journée. La température de la face extérieure du mur Trombe (T3) en début de journée est de 28 °C et elle évolue pour atteindre 36 °C. La température de la face intérieure de la paroi CRT 28 HC (T4) en début de journée est de 28 °C et elle augmente pour atteindre 45 °C. La température de la face extérieure de la paroi CRT 28 HC (T5) en début de journée est de 30 °C et elle augmente

pour atteindre 52 °C. La température de la vitre interne (T6) en début de journée est de 33 °C et elle augmente pour atteindre 49 °C. La température de la vitre externe (T7) en début de journée est de 32 °C et elle augmente pour atteindre 50,6 °C.

La température de la face extérieure du toit (T8) en début de journée est de 38,8 °C et elle augmente au cours de la journée pour atteindre 48,8 °C.

5.3. Résultats des mesures de températures des parois avec l'intégration des CRT28 HC et CAL

La figure 5. 13 présente l'évolution des températures internes et externes du prototype au cours de la journée, avec les deux couches de composites MCPs (CRT28 HC et CAL).

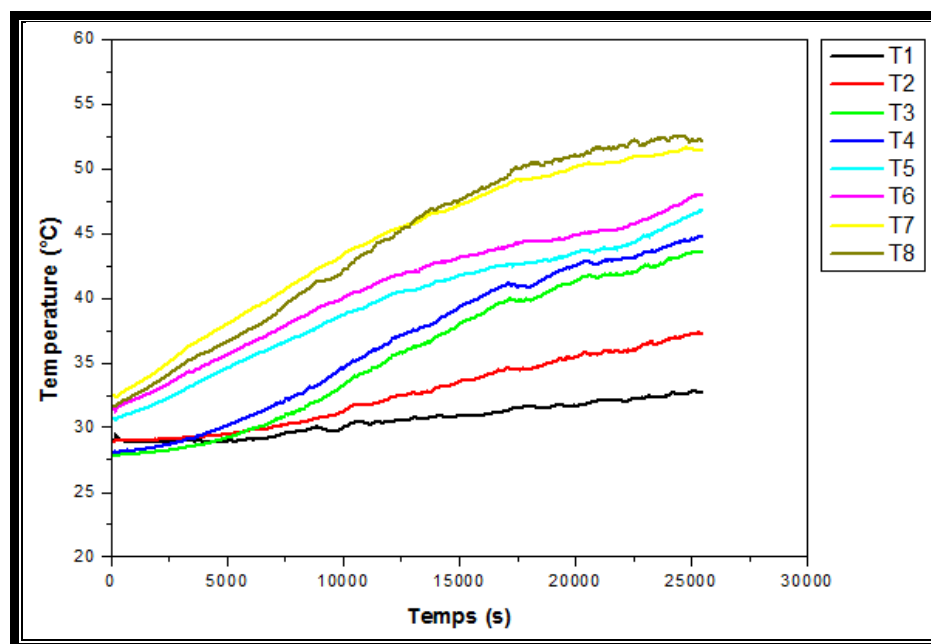


Figure 5. 13. Evolution des températures des parois du prototype avec le CRT 28 HC et CAL

Légende :

- T1** : Façade intérieure du mur trombe.
- T2** : Façade extérieure du mur trombe.
- T3** : Façade intérieure du CRT28 HC
- T4** : Façade extérieure du CRT28 HC
- T5** : Façade intérieure du CAL
- T6** : Façade extérieure du CAL
- T7** : Vitre interne.
- T8** : Vitre externe.

Interprétation des Résultats

La température de la façade intérieure du mur Trombe (T1) en début de journée est de 29 °C et elle reste plus ou moins stable au cours de la journée pour atteindre 32 °C vers 17 h. La température de la façade extérieure du mur Trombe (T2) en début de journée est de 29 °C et elle évolue au cours de la journée pour atteindre 37 °C vers 17 h. La température de la façade

intérieure de la paroi CRT28 HC (T3) en début de journée est de 27 °C et elle augmente pour atteindre 43 °C vers 17 h. La température de la façade extérieure de la paroi CRT28 HC (T4) en début de journée est de 28 °C et elle augmente pour atteindre 44 °C vers 17 h. La température de la façade intérieure de la paroi CAL (T5) en début de journée est de 30 °C et augmente au cours de la journée pour atteindre 46 °C vers 17 h. La température de la façade extérieure de la paroi CAL (T6) en début de journée est de 30 °C et atteint 48 °C vers 17 h. La température de la vitre interne (T7) en début de journée est de 32 °C et elle augmente pour atteindre 51 °C vers 17 h. La température de la vitre externe (T8) en début de journée est de 31 °C et elle augmente pour atteindre 50 °C vers 17 h.

6. Conclusion

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux effectués au laboratoire sur une cellule test représentant un mur Trombe dans lequel sont intégrées des plaques des nouveaux matériaux composites élaborés.

Les résultats de l'évolution des températures dans le prototype avant l'intégration des composites MCPs ont montré que la température ambiante à l'intérieur de la cellule a augmenté de 13 °C au cours de la journée. La température de la façade intérieure du mur trombe a augmenté de 8,5 °C et la température de la façade extérieure du mur trombe a augmenté de 21 °C au cours de la journée.

Les résultats de l'évolution des températures dans le prototype après intégration du CRT28 HC ont montré que la température ambiante à l'intérieur de la cellule a été stable avec une augmentation de 3 °C seulement. La température de la façade intérieure du mur trombe a augmenté de 2 °C seulement et la température de la façade extérieure du mur trombe a augmenté de 8 °C au cours de la journée.

Les résultats de l'évolution des températures dans le prototype après intégration des deux composites MCPs (CAL + CRT28 HC) ont montré que la température de la façade intérieure du mur trombe a été stable au cours de la journée, avec une augmentation de 3 °C seulement, et la température de la façade extérieure du mur trombe a augmenté de 8 °C au cours de la journée.

Les principaux résultats obtenus par comparaison de l'évolution des températures effectuées sur le prototype expérimental avec et sans intégration des composites MCPs sont les suivants :

- L'intégration des composites MCPs a permis de faire baisser la température de la façade externe du mur trombe de 19 °C.
- L'intégration des composites MCPs a permis de faire baisser la température de la façade interne du mur trombe de 6 °C et de la stabiliser toute la journée.
- L'intégration de ces composites MCPs dans les parois de bâtiments a permis d'améliorer le confort thermique intérieur et va contribuer à faire des économies d'énergie.

Conclusion générale et perspectives

La maîtrise de la consommation d'énergie est l'une des préoccupations majeures de ces dernières décennies. En cause : l'amenuisement des ressources fossiles, leur coût de plus en plus croissant et leur effet néfaste sur l'environnement. Aujourd'hui, le bâtiment est le secteur le plus énergivore avec un taux de consommation de 47 % de l'énergie totale à l'échelle nationale. Cette énergie fossile est la principale source d'alimentation des différents dispositifs de chauffage et de climatisation, indispensables afin d'assurer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments.

À ce titre, des alternatives doivent être trouvées afin d'assurer le confort thermique dans le bâtiment tout en réduisant les besoins énergétiques. Les matériaux de construction utilisés pour l'enveloppe du bâtiment jouent un rôle important dans l'amélioration du confort thermique. Suivant la problématique soulevée par rapport au confort thermique dans le bâtiment, nous avons fixé comme objectif l'augmentation de l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment par les MCPs.

Pour répondre à cette problématique de départ, nous avons adopté une méthodologie explicative afin d'étudier un problème technique ; celui du confort thermique. Afin d'obtenir un résultat concret, le processus choisi est la méthode expérimentale. La concrétisation de la méthode expérimentale est passée par plusieurs étapes :

- Etape 1 : La sélection de la matrice support des MCPs; l'argile, qui est un matériau local, et la sciure de bois issue du recyclage ont été sélectionnées comme matrices poreuses support du MCP. Leur utilisation comme matériaux de construction contribue au développement durable dans le secteur du bâtiment.
- Etape 2 : Le choix des MCPs adéquats pour l'intégration dans l'enveloppe du bâtiment ; Plusieurs MCPs ont été sélectionnés pour l'élaboration des matériaux composites pour le SET par chaleur latente. L'huile végétale de coprah, l'huile palmiste, le beurre de cacao, l'acide laurique et la paraffine RT28 HC ont été sélectionnés par rapport à leur disponibilité et à leurs caractéristiques thermiques.
- Etape 3 : L'élaboration des matériaux composites MCPs ; les matériaux composites MCPs ont été préparés suivant la méthode de la forme stabilisée, qui consiste à disperser le MCP dans un autre matériau afin de former un matériau composite stable.
- Etape 4 : Afin de choisir les matériaux composites MCPs à intégrer dans la paroi de bâtiment, plusieurs composites avec différents MCPs ont été élaborés. Les différentes caractérisations physiques, chimiques, thermiques et mécaniques ont été effectuées afin de sélectionner les composites adéquats pour une application dans l'enveloppe du bâtiment en zone aride. Parmi les principaux résultats obtenus par les différentes caractérisations ; L'analyse FTIR des différents composites MCPs a montré leur stabilité chimique, l'analyse TG des différents composites MCPs a montré leur stabilité thermique et leur fiabilité pour une application dans le bâtiment.

Les mesures de conductivité thermique effectuées sur les différents composites MCPs élaborés ont montré une amélioration de la conductivité thermique de plus de 300 % avec l'ajout de 10 % de graphite. L'analyse DSC a permis de sélectionner le composite RT28 HC/AG+SB+GR (CRT28 HC) et le composite AL/AG+SB+GR (CAL) pour une application dans la paroi de bâtiment. Le choix de ces composites s'est basé sur leur température de fusion et leur chaleur latente élevée.

- Etape 5 : Etude du protocole d'application des nouveaux matériaux composites élaborés dans une paroi de bâtiment afin d'étudier le comportement thermique des nouveaux matériaux composites élaborés en étant intégrés dans une enveloppe de bâtiment. Les principaux résultats obtenus par comparaison de l'évolution des températures effectuée sur le prototype expérimental avec et sans intégration des composites MCPs sont ; une baisse de la température de la façade externe et interne du mur trombe de 19 °C et 6 °C respectivement, avec l'intégration des composites CRT28 HC et CAL.

Ce travail a apporté une réponse partielle à la problématique de départ. De nombreuses perspectives s'ouvrent afin de compléter les résultats obtenus dans cette thèse. En premier lieu, effectuer des essais de cyclage thermique des composites MCPs afin de vérifier leur fiabilité sur la durée de vie du bâtiment. En second lieu, étendre l'étude à une échelle réelle et sur une longue durée afin de quantifier les économies d'énergie réalisées. Ensuite, étendre l'étude du protocole expérimental à d'autres régions, particulièrement au sud algérien. Enfin, réaliser des essais de simulations numériques dans le but de les comparer avec les résultats expérimentaux et de pouvoir étendre les recherches à un grand nombre de scénarios.

Bibliographie

- [1] Al-Absi ZA, Hafizal MIM, Ismail M, et al. Peak indoor air temperature reduction for buildings in hot-humid climate using phase change materials. *Case Stud Therm Eng* 2020; 22: 100762.
- [2] Fabiani C, Castaldo VL, Pisello AL. Thermochromic materials for indoor thermal comfort improvement: Finite difference modeling and validation in a real case-study building. *Appl Energy* 2020; 262: 114147.
- [3] Alam M, Sanjayan J, Zou PX, et al. A comparative study on the effectiveness of passive and free cooling application methods of phase change materials for energy efficient retrofitting in residential buildings. *Procedia Eng* 2017; 180: 993–1002.
- [4] Goudarzi H, Mostafaeipour A. Energy saving evaluation of passive systems for residential buildings in hot and dry regions. *Renew Sustain Energy Rev* 2017; 68: 432–446.
- [5] Ministère de l'Énergie, bilan_energetique_2022, <https://www.energy.gov.dz>.
- [6] Imessad K, Derradji L, Messaoudene NA, et al. Impact of passive cooling techniques on energy demand for residential buildings in a Mediterranean climate. *Renew Energy* 2014; 71: 589–597.
- [7] Peeters L, De Dear R, Hensen J, et al. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. *Appl Energy* 2009; 86: 772–780.
- [8] Van Hoof J, Mazej M, Hensen JL. Thermal comfort: research and practice. *Front Biosci* 2010; 15: 765–788.
- [9] Holopainen R, Tuomaala P, Hernandez P, et al. Comfort assessment in the context of sustainable buildings: Comparison of simplified and detailed human thermal sensation methods. *Build Environ* 2014; 71: 60–70.
- [10] Brun A. *Amélioration du confort d'été dans des bâtiments à ossature par ventilation de l'enveloppe et stockage thermique*. PhD Thesis, Université de Grenoble, <https://theses.hal.science/tel-00652449/> (2011).
- [11] Erickson G, Tiberghien A. Heat and temperature. *Child Ideas Sci* 1985; 52–84.
- [12] *La thermique du bâtiment*, <https://www.dunod.com>
- [13] Roulet C-A. Conditions de confort et de logement sain. *Cycle Constr*, [https://www.researchgate.net/\(2008\)](https://www.researchgate.net/(2008)).
- [14] ALORY N. Point sur les modes de transferts thermiques I Blog du Pôle Cristal. *Pôle Cristal*, <https://www.pole-cristal.fr/> (2022).

- [15] Allab Y. *Evaluation expérimentale des performances des systèmes de ventilation dans le bâtiment: efficacité de ventilation et confort thermique*. PhD Thesis, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, <https://pastel.hal.science/tel-01708316/> (2017).
- [16] De Dear R, Xiong J, Kim J, et al. A review of adaptive thermal comfort research since 1998. *Energy Build* 2020; 214: 109893.
- [17] Attia S, Ap L, Hensen JLM. Investigating the Impact of Different Thermal Comfort Models for Zero Energy Buildings in Hot Climates.
- [18] De Dear R. Thermal comfort in practice. *Indoor Air* 2004; 14: 32–39.
- [19] Givoni B, Izard J-L. *L'homme, l'architecture et le climat*. Editions du moniteur Paris, 1978.
- [20] Iturra EEM. *Impact de la configuration des bâtiments scolaires sur leur performance lumineuse, thermique et énergétique*. PhD Thesis, Université Laval, <https://www.collectionscanada.gc.ca/pdf> (2011).
- [21] Hensen JLM. Literature review on thermal comfort in transient conditions. *Build Environ* 1990; 25: 309–316.
- [22] Levin H. Re-constructing Thermal Comfort, <https://www.researchgate.net>.
- [23] Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, <https://www.ashrae.org>.
- [24] ISO 7730:1994. *ISO*, <https://www.iso.org/fr>.
- [25] Taleghani M, Tenpierik M, Kurvers S, et al. A review into thermal comfort in buildings. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 26: 201–215.
- [26] Batier C. *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen*. PhD Thesis, Université de Montpellier, <https://hal.science/tel-01324038/> (2016).
- [27] Gallissot M. *Modéliser le concept de confort dans un habitat intelligent: du multisensoriel au comportement*. PhD Thesis, Université de Grenoble, <https://theses.hal.science/tel-00738342/> (2012).
- [28] Li B, Yang Y, Yao R, et al. A simplified thermoregulation model of the human body in warm conditions. *Appl Ergon* 2017; 59: 387–400.
- [29] Thellier F, Bedrune J, Monchoux F. Le Confort dans le bâtiment: n'oublions pas l'habitant! *Rev 3 E I*, <https://hal.science/hal-02001574/> (2012).
- [30] Olesen BW. *Thermal comfort*. Bruel & Kjaer, <http://aldebaran.feld.cvut.cz/> (1982).
- [31] Thellier F. *L'homme et son environnement Thermique. Modélisation*. PhD Thesis, Université toulouse 3 Paul Sabatier, <https://hal.science/tel-02155432/> (1999).

- [32] Le Bohec M. *Contribution du rayonnement au confort thermique et aux économies d'énergie dans l'habitat*. PhD Thesis, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique-Poitiers, <https://theses.hal.science/tel-01699156/> (2017).
- [33] Thellier F. *Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude du confort*. PhD Thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, <https://theses.hal.science/tel-00993580/> (1989).
- [34] Hensen JJ. On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. Epub ahead of print 1991. DOI: 10.6100/IR353263.
- [35] Djongyang N, Tchinda R, Njomo D. Thermal comfort: A review paper. *Renew Sustain Energy Rev* 2010; 14: 2626–2640.
- [36] Gaitani N, Mihalakakou G, Santamouris M. On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces. *Build Environ* 2007; 42: 317–324.
- [37] Bonte M. *Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment: modélisation par intelligence artificielle et mesures in situ*. PhD Thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, <https://core.ac.uk/> 2014).
- [38] Benzaama MH. *Etude du confort thermique dans l'habitat par des procédés géo-héliothermiques*. PhD Thesis, Reims, <https://theses.fr/> (2017).
- [39] Alfano FR d'Ambrosio, Olesen BW, Palella BI, et al. Thermal comfort: Design and assessment for energy saving. *Energy Build* 2014; 81: 326–336.
- [40] Vinet J. *Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. PhD Thesis, Université de Nantes, <https://theses.hal.science/tel-00490049/> (2000).
- [41] Ho BP. Thermal comfort, http://ibse.hk/MEBS7012/mebs6006_1112_03-comfort.pdf (2011)
- [42] Markov D. Practical evaluation of the thermal comfort parameters. *Annu Int Course Vent Indoor Clim Avangard Sofia 2002 P Stank Ed Pp 158 – 170* ISBN 954-9782-27-1.
- [43] ISO 7730:2005. ISO, <https://www.iso.org/fr>.
- [44] Riaz H, Arif S, Riaz A, et al. Evaluation of thermal comfort in University Classrooms of Pakistan, <https://www.researchgate.net>.
- [45] Loi n° 04-09 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable. | FAOLEX, <https://www.fao.org>.
- [46] Publications Techniques - CNERIB, <https://www.cnerib.edu.dz>.

- [47] Imessad K, Kharchi R, Bouchaib S, et al. Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment. *J Renew Energ* 2017; 20: 591–597.
- [48] Pirasaci T. Investigation of phase state and heat storage form of the phase change material (PCM) layer integrated into the exterior walls of the residential-apartment during heating season. *Energy* 2020; 207: 118176.
- [49] Bhamare DK, Rathod MK, Banerjee J. Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy Build* 2019; 198: 467–490.
- [50] Santamouris M. Passive cooling of buildings. In: *Advances in Solar Energy: Volume 16*. Routledge, pp. 295–344.
- [51] Jomehzadeh F, Nejat P, Calautit JK, et al. A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renew Sustain Energy Rev* 2017; 70: 736–756.
- [52] Santamouris M, Kolokotsa D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy Build* 2013; 57: 74–94.
- [53] Joffroy T, Misse A, Celaire R, et al. Architecture bioclimatique et efficacité énergétique des bâtiments au Sénégal, <https://hal.science/hal-02025559/> (2017).
- [54] Abdou IO. *Études de l'amélioration de la performance énergétique et de stratégies de conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide*. PhD Thesis, Université de Lyon, <https://theses.hal.science/tel-03346755/> (2020).
- [55] Lapisa R. *Étude du rafraîchissement passif de bâtiments commerciaux ou industriels*. <https://theses.hal.science/tel-01373452/file/> (2015).
- [56] Santamouris M. Passive cooling of buildings. In: *Advances in Solar Energy: Volume 16*. Routledge, pp. 295–344.
- [57] Geetha NB, Velraj R. Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage—A review. *Energy Educ Sci Technol Part Energy Sci Res* 2012; 29: 913–946.
- [58] De Herde A, Liébard A. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, 2005.
- [59] Toroxel JL, Silva SM. A Review of Passive Solar Heating and Cooling Technologies Based on Bioclimatic and Vernacular Architecture. *Energies* 2024; 17: 1006.
- [60] Akçay AÖ, Alotman H. A theoretical framework for the evaluation from the traditional Mashrabiya to modern Mashrabiya. *J Hist Cult Art Res* 2017; 6: 107–121.
- [61] ISHAK EF. Achieving thermal comfort in existing building using passive cooling techniques. Case study of retrofitting an existing office building in Milan, Italy, <https://www.politesi.polimi.it>.

- [62] Toe DHC, Kubota T. Comparative assessment of vernacular passive cooling techniques for improving indoor thermal comfort of modern terraced houses in hot-humid climate of Malaysia. *Sol Energy* 2015; 114: 229–258.
- [63] Cadoni G. Les systèmes de rafraîchissement passifs dans l'architecture contemporaine et la conception bioclimatique du bâtiment. Méthodologie d'analyse et évaluation de réalisations à travers le monde. In: *Actes du 2nd Congrès International sur les Ambiances*, <https://hal.science/hal-03596995/> (2012).
- [64] Mukhtar A, Yusoff MZ, Ng KC. The potential influence of building optimization and passive design strategies on natural ventilation systems in underground buildings: The state of the art. *Tunn Undergr Space Technol* 2019; 92: 103065.
- [65] Firfiris VK, Martzopoulou AG, Kotsopoulos TA. Passive cooling systems in livestock buildings towards energy saving: A critical review. *Energy Build* 2019; 202: 109368.
- [66] Oropeza-Perez I, Petzold-Rodriguez AH. Analysis of the energy use in the Mexican residential sector by using two approaches regarding the behavior of the occupants. *Appl Sci* 2018; 8: 2136.
- [67] Rouault F. *Système intégré de rafraîchissement d'air pour le bâtiment à base de matériaux à changement de phase*. PhD Thesis, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, <https://pastel.hal.science/tel-01127381/> (2014).
- [68] Kubota T, Chyee DTH, Ahmad S. The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia. *Energy Build* 2009; 41: 829–839.
- [69] SURVENTILATION ET CONFORT D'ÉTÉ Guide de conception, <https://www.google.com>.
- [70] Fathy H. *Vernacular architecture: principles and examples with reference to hot arid climates*. University of Chicago Press, 1986.
- [71] Kamaragi RD. *Les systèmes de ventilation et refroidissement dans l'architecture traditionnelle du Golfe Persique: histoire des dispositifs, modélisation, évaluation des performances*. PhD Thesis, Université Paris Est, <https://theses.hal.science/tel-03370907/> (2014).
- [72] Shi L, Zhang G, Yang W, et al. Determining the influencing factors on the performance of solar chimney in buildings. *Renew Sustain Energy Rev* 2018; 88: 223–238.
- [73] Aflaki A, Mahyuddin N, Mahmoud ZA-C, et al. A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. *Energy Build* 2015; 101: 153–162.

- [74] Laurini E, Taballione A, Rotilio M, et al. Analysis and exploitation of the stack ventilation in the historic context of high architectural, environmental and landscape value. *Energy Procedia* 2017; 133: 268–280.
- [75] Khan N, Su Y, Riffat SB. A review on wind driven ventilation techniques. *Energy Build* 2008; 40: 1586–1604.
- [76] Caciolo M. *Analyse expérimentale et simulation de la ventilation naturelle mono-façade pour le rafraîchissement des immeubles de bureaux*. PhD Thesis, école nationale supérieure des mines de Paris, <https://pastel.hal.science/pastel-00583247/> (2010).
- [77] Panchabikesan K, Vellaisamy K, Ramalingam V. Passive cooling potential in buildings under various climatic conditions in India. *Renew Sustain Energy Rev* 2017; 78: 1236–1252.
- [78] Fardeheb F. Examination and Review of Passive Solar Cooling Strategies in Middle Eastern and North African Vernacular Architecture. In: Goswami DY, Zhao Y (eds) *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 2511–2515.
- [79] Salomon T. *Fraîcheur sans clim’: Le guide des alternatives écologiques*. TERRE VIVANTE, 2004.
- [80] Amer O, Boukhanouf R, Ibrahim HG. A review of evaporative cooling technologies. *Int J Environ Sci Dev* 2015; 6: 111.
- [81] Cell, O. (2024). Passive Cooling Strategies for Sustainable Buildings: Ministry of Environment, Forest and Climate Change, Government of India. <https://ozonecell.nic.in/wp-content/uploads/2024/09/5.pdf>
- [82] Navarro L, De Gracia A, Colclough S, et al. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems. *Renew Energy* 2016; 88: 526–547.
- [83] Rathore PKS, Shukla SK, Gupta NK. Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: A critical review. *Sustain Cities Soc* 2020; 53: 101884.
- [84] Guelpa E, Verda V. Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. *Appl Energy* 2019; 252: 113474.
- [85] Merlin K. *Caractérisation thermique d’un matériau à changement de phase dans une structure conductrice*. PhD Thesis, Nantes, <https://theses.fr/2016NANT4004> (2016).
- [86] Jeong S-G, Lee J-H, Seo J, et al. Thermal performance evaluation of Bio-based shape stabilized PCM with boron nitride for energy saving. *Int J Heat Mass Transf* 2014; 71: 245–250.
- [87] Rathore PKS, Shukla SK. Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review. *Constr Build Mater* 2019; 225: 723–744.

- [88] Chavan S, Rudrapati R, Manickam S. A comprehensive review on current advances of thermal energy storage and its applications. *Alex Eng J* 2022; 61: 5455–5463.
- [89] Sage-Lauck JS, Sailor DJ. Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building. *Energy Build* 2014; 79: 32–40.
- [90] Ascione F. Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling. *Sol Energy* 2017; 154: 34–100.
- [91] Elias CN, Stathopoulos VN. A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage. *Energy Procedia* 2019; 161: 385–394.
- [92] Lizana J, Chacartegui R, Barrios-Padura A, et al. Advanced low-carbon energy measures based on thermal energy storage in buildings: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018; 82: 3705–3749.
- [93] Whiffen TR, Riffat SB. A review of PCM technology for thermal energy storage in the built environment: Part I. *Int J Low-Carbon Technol* 2013; 8: 147–158.
- [94] Reddy KS, Mudgal V, Mallick TK. Review of latent heat thermal energy storage for improved material stability and effective load management. *J Energy Storage* 2018; 15: 205–227.
- [95] Alam M, Jamil H, Sanjayan J, et al. Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities. *Energy Build* 2014; 78: 192–201.
- [96] Solgi E, Memarian S, Moud GN. Financial viability of PCMs in countries with low energy cost: A case study of different climates in Iran. *Energy Build* 2018; 173: 128–137.
- [97] Lagou A, Kylili A, Šadauskienė J, et al. Numerical investigation of phase change materials (PCM) optimal melting properties and position in building elements under diverse conditions. *Constr Build Mater* 2019; 225: 452–464.
- [98] Markarian E, Fazelpour F. Multi-objective optimization of energy performance of a building considering different configurations and types of PCM. *Sol Energy* 2019; 191: 481–496.
- [99] Borderon J, Virgone J, Cantin R. Modeling and simulation of a phase change material system for improving summer comfort in domestic residence. *Appl Energy* 2015; 140: 288–296.
- [100] Khadiran T, Hussein MZ, Zainal Z, et al. Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016; 57: 916–928.
- [101] Singh H, Saini RP, Saini JS. A review on packed bed solar energy storage systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2010; 14: 1059–1069.

- [102] Saafi K, Daouas N. Energy and cost efficiency of phase change materials integrated in building envelopes under Tunisia Mediterranean climate. *Energy* 2019; 187: 115987.
- [103] Lin K, Zhang Y, Xu X, et al. Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates. *Build Environ* 2004; 39: 1427–1434.
- [104] Silva T, Vicente R, Soares N, et al. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution. *Energy Build* 2012; 49: 235–245.
- [105] Tatsidjodoung P, Le Pierrès N, Luo L. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 18: 327–349.
- [106] Liu Y, Hou L, Yang Y, et al. Effects of external insulation component on thermal performance of a Trombe wall with phase change materials. *Sol Energy* 2020; 204: 115–133.
- [107] Dabaieh M, Wanas O, Hegazy MA, et al. Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings. *Energy Build* 2015; 89: 142–152.
- [108] Ručevskis S, Akishin P, Korjakins A. Parametric analysis and design optimisation of PCM thermal energy storage system for space cooling of buildings. *Energy Build* 2020; 224: 110288.
- [109] Johra H, Heiselberg P. Influence of internal thermal mass on the indoor thermal dynamics and integration of phase change materials in furniture for building energy storage: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017; 69: 19–32.
- [110] Delgado McG, Ramos JS, Domínguez SÁ, et al. Building thermal storage technology: Compensating renewable energy fluctuations. *J Energy Storage* 2020; 27: 101147.
- [111] Wi S, Chang SJ, Kim S. Improvement of thermal inertia effect in buildings using shape stabilized PCM wallboard based on the enthalpy-temperature function. *Sustain Cities Soc* 2020; 56: 102067.
- [112] Nghana B, Tariku F. Phase change material's (PCM) impacts on the energy performance and thermal comfort of buildings in a mild climate. *Build Environ* 2016; 99: 221–238.
- [113] Alqallaf HJ, Alawadhi EM. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain. *Energy Build* 2013; 61: 73–80.
- [114] Benzaama MH, Menhoudj S, Kontoleon KJ, et al. Investigation of the thermal behavior of a combined geothermal system for cooling with regards to Algeria's climate. *Sustain Cities Soc* 2018; 43: 121–133.
- [115] Zhang YP, Lin KP, Yang R, et al. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy Build* 2006; 38: 1262–1269.

- [116] Jegadheeswaran S, Pohekar SD. Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2009; 13: 2225–2244.
- [117] Lizana J, Chacartegui R, Barrios-Padura A, et al. Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review. *Appl Energy* 2017; 203: 219–239.
- [118] Rincón L, Carrobé A, Martorell I, et al. Improving thermal comfort of earthen dwellings in sub-Saharan Africa with passive design. *J Build Eng* 2019; 24: 100732.
- [119] Moldgy A, Parameshwaran R. Study on thermal energy storage properties of organic phase change material for waste heat recovery applications. *Mater Today Proc* 2018; 5: 16840–16848.
- [120] Yu J, Yang Q, Ye H, et al. Thermal performance evaluation and optimal design of building roof with outer-layer shape-stabilized PCM. *Renew Energy* 2020; 145: 2538–2549.
- [121] Solgi E, Fayaz R, Kari BM. Cooling load reduction in office buildings of hot-arid climate, combining phase change materials and night purge ventilation. *Renew Energy* 2016; 85: 725–731.
- [122] Solgi E, Kari BM, Fayaz R, et al. The impact of phase change materials assisted night purge ventilation on the indoor thermal conditions of office buildings in hot-arid climates. *Energy Build* 2017; 150: 488–497.
- [123] Stritih U, Tyagi VV, Stropnik R, et al. Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings. *Sustain Cities Soc* 2018; 41: 286–295.
- [124] Taleb HM, Sharples S. Developing sustainable residential buildings in Saudi Arabia: A case study. *Appl Energy* 2011; 88: 383–391.
- [125] Park JH, Lee J, Wi S, et al. Optimization of phase change materials to improve energy performance within thermal comfort range in the South Korean climate. *Energy Build* 2019; 185: 12–25.
- [126] Saffari M, De Gracia A, Fernández C, et al. Study on the optimum PCM melting temperature for energy savings in residential buildings worldwide. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p. 012113.
- [127] Singh SP, Bhat V. Performance evaluation of dual phase change material gypsum board for the reduction of temperature swings in a building prototype in composite climate. *Energy Build* 2018; 159: 191–200.
- [128] Sovetova M, Memon SA, Kim J. Thermal performance and energy efficiency of building integrated with PCMs in hot desert climate region. *Sol Energy* 2019; 189: 357–371.
- [129] Kumar GK, Saboor S, Babu TA. Investigation of various wall and window glass material buildings in different climatic zones of India for energy efficient building construction. *Mater Today Proc* 2018; 5: 23224–23234.

- [130] Sarbu I, Sebarchievici C. A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability* 2018; 10: 191.
- [131] Khan RJ, Bhuiyan MZH, Ahmed DH. Investigation of heat transfer of a building wall in the presence of phase change material (PCM). *Energy Built Environ* 2020; 1: 199–206.
- [132] Voelker C, Kornadt O, Ostry M. Temperature reduction due to the application of phase change materials. *Energy Build* 2008; 40: 937–944.
- [133] Zhu L, Yang Y. Numerical study on the thermal performance of pipe-embedded PCM building envelope in the heating season. *Energy Procedia* 2019; 158: 2663–2670.
- [134] Borreguero AM, Serrano A, Garrido I, et al. Polymeric-SiO₂-PCMs for improving the thermal properties of gypsum applied in energy efficient buildings. *Energy Convers Manag* 2014; 87: 138–144.
- [135] Yoo J, Chang SJ, Wi S, et al. Spent coffee grounds as supporting materials to produce bio-composite PCM with natural waxes. *Chemosphere* 2019; 235: 626–635.
- [136] Barzin R, Chen JJ, Young BR, et al. Application of PCM energy storage in combination with night ventilation for space cooling. *Appl Energy* 2015; 158: 412–421.
- [137] Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, et al. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Convers Manag* 2004; 45: 1597–1615.
- [138] Beemkumar N, Yuvarajan D, Arulprakasajothi M, et al. Control of room temperature fluctuations in the building by incorporating PCM in the roof. *J Therm Anal Calorim* 2021; 143: 3039–3046.
- [139] Lee J, Wi S, Yun BY, et al. Thermal and characteristic analysis of shape-stabilization phase change materials by advanced vacuum impregnation method using carbon-based materials. *J Ind Eng Chem* 2019; 70: 281–289.
- [140] Safarzadeh S, Yousefi M, Kazemi M, et al. Energy, exergy, and economic (3E) analyses of nanoparticle-enriched phase change material in an air-PCM heat exchanger applied for buildings free cooling. *J Therm Anal Calorim* 2023; 148: 8533–8545.
- [141] de Albuquerque Landi FF, Fabiani C, Pisello AL. Palm oil for seasonal thermal energy storage applications in buildings: The potential of multiple melting ranges in blends of bio-based fatty acids. *J Energy Storage* 2020; 29: 101431.
- [142] Klimeš L, Charvát P, Joybari MM, et al. Computer modelling and experimental investigation of phase change hysteresis of PCMs: The state-of-the-art review. *Appl Energy* 2020; 263: 114572.
- [143] Elias CN, Stathopoulos VN. A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage. *Energy Procedia* 2019; 161: 385–394.

- [144] Du K, Calautit J, Wang Z, et al. A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Appl Energy* 2018; 220: 242–273.
- [145] Abbasov HF. The Effective Thermal Conductivity of Composite Phase Change Materials with Open-Cellular Metal Foams. *Int J Thermophys* 2020; 41: 164.
- [146] Pavlík Z, Trník A, Ondruška J, et al. Apparent Thermal Properties of Phase-Change Materials: An Analysis Using Differential Scanning Calorimetry and Impulse Method. *Int J Thermophys* 2013; 34: 851–864.
- [147] Beltrán RD, Martínez-Gómez J. Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. *J Build Eng* 2019; 24: 100726.
- [148] Yoo J, Chang SJ, Wi S, et al. Spent coffee grounds as supporting materials to produce bio-composite PCM with natural waxes. *Chemosphere* 2019; 235: 626–635.
- [149] Liu Z, Yu ZJ, Yang T, et al. A review on macro-encapsulated phase change material for building envelope applications. *Build Environ* 2018; 144: 281–294.
- [150] Akeiber H, Nejat P, Majid MZA, et al. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renew Sustain Energy Rev* 2016; 60: 1470–1497.
- [151] Meng E, Wang J, Yu H, et al. Experimental study of the thermal protection performance of the high reflectivity-phase change material (PCM) roof in summer. *Build Environ* 2019; 164: 106381.
- [152] Refahi A, Rostami A, Amani M. Energy analysis of the building integrated with a double PCM wallboard system in various climate regions of Iran. *J Therm Anal Calorim* 2023; 148: 7981–7993.
- [153] Kharbouch Y, Mimet A, El Ganaoui M. Thermal impact study of a bio-based wall coupled with an inner PCM layer. *Energy Procedia* 2017; 139: 10–15.
- [154] Yang Y, Wu W, Fu S, et al. Study of a novel ceramsite-based shape-stabilized composite phase change material (PCM) for energy conservation in buildings. *Constr Build Mater* 2020; 246: 118479.
- [155] Zormati S, Mhiri H, Aloulou F, et al. Synthesis and characterization of organoclay and cellulose nanofibers modified with lauric acid eutectic as new phase change material (PCM) used in buildings for thermal energy storage. *J Therm Anal Calorim* 2023; 148: 3955–3964.
- [156] Atinafu DG, Ok YS, Kua HW, et al. Thermal properties of composite organic phase change materials (PCMs): A critical review on their engineering chemistry. *Appl Therm Eng* 2020; 181: 115960.

- [157] Shi T, Zhang X, Qiao J, et al. Preparation and characterization of composite phase change materials based on paraffin and carbon foams derived from starch. *Polymer* 2021; 212: 123143.
- [158] Younsi Z, Zalewski L, Lassue S, et al. A Novel Technique for Experimental Thermophysical Characterization of Phase-Change Materials. *Int J Thermophys* 2011; 32: 674–692.
- [159] Lizana J, de-Borja-Torreon M, Barrios-Padura A, et al. Passive cooling through phase change materials in buildings. A critical study of implementation alternatives. *Appl Energy* 2019; 254: 113658.
- [160] Thambidurai M, Panchabikesan K, Ramalingam V. Review on phase change material based free cooling of buildings—The way toward sustainability. *J Energy Storage* 2015; 4: 74–88.
- [161] Vidi S, Mehling H, Hemberger F, et al. Round-Robin Test of Paraffin Phase-Change Material. *Int J Thermophys* 2015; 36: 2518–2522.
- [162] Song J, He H, Wang Y, et al. Shape-stabilized phase change composites supported by biomass loofah sponge-derived microtubular carbon scaffold toward thermal energy storage and electric-to-thermal conversion. *J Energy Storage* 2022; 56: 105891.
- [163] Das D, Bordoloi U, Muigai HH, et al. A novel form stable PCM based bio composite material for solar thermal energy storage applications. *J Energy Storage* 2020; 30: 101403.
- [164] Amaral C, Vicente R, Marques P, et al. Phase change materials and carbon nanostructures for thermal energy storage: A literature review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017; 79: 1212–1228.
- [165] Pomianowski M, Heiselberg P, Zhang Y. Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. *Energy Build* 2013; 67: 56–69.
- [166] Magendran SS, Khan FSA, Mubarak NM, et al. Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review. *Nano-Struct Nano-Objects* 2019; 20: 100399.
- [167] Lassandro P, Di Turi S. Energy efficiency and resilience against increasing temperatures in summer: the use of PCM and cool materials in buildings. *Int J Heat Technol* 2017; 35: S307–15.
- [168] Ram VV, Singhal R, Parameshwaran R. Energy efficient pumpable cement concrete with nanomaterials embedded PCM for passive cooling application in buildings. *Mater Toda Proc* 2020; 28: 1054–1063.
- [169] Guichard S. *Contribution à l'étude des parois complexes intégrant des matériaux à changements de phase: modélisation, expérimentation, et évaluation de la performance*

énergétique globale. PhD Thesis, Université de la Réunion, <https://theses.hal.science/tel-01186458/> (2013).

[170] da Cunha SRL, de Aguiar JLB. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. *J Energy Storage* 2020; 27: 101083.

[171] Ahmad M. *Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires*. PhD Thesis, Université Joseph Fourier (Grenoble; 1971-2015), <https://theses.fr/2004GRE10167> (2004).

[172] Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2009; 13: 318–345.

[173] Yang L, Huang J, Zhou F. Thermophysical properties and applications of nano-enhanced PCMs: An update review. *Energy Convers Manag* 2020; 214: 112876.

[174] Zeng C, Liu S, Shukla A. Adaptability research on phase change materials based technologies in China. *Renew Sustain Energy Rev* 2017; 73: 145–158.

[175] Waqas A, Din ZU. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 18: 607–625.

[176] Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Sol Energy* 1983; 30: 313–332.

[177] Osterman E, Tyagi VV, Butala V, et al. Review of PCM based cooling technologies for buildings. *Energy Build* 2012; 49: 37–49.

[178] Kalnæs SE, Jelle BP. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy Build* 2015; 94: 150–176.

[179] Soares N, Costa JJ, Gaspar AR, et al. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy Build* 2013; 59: 82–103.

[180] Khan Z, Khan Z, Ghafoor A. A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. *Energy Convers Manag* 2016; 115: 132–158.

[181] Faraj K, Khaled M, Faraj J, et al. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2020; 119: 109579.

[182] Memon SA. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014; 31: 870–906.

[183] Evola G, Marletta L, Sicurella F. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. *Build Environ* 2013; 59: 517–527.

- [184] Muruganantham K, Phelan P, Horwath P, et al. Experimental investigation of a bio-based phase change material to improve building energy performance. In: *Energy Sustainability*, pp. 979–984.
- [185] Zeinelabdein R, Omer S, Gan G. Critical review of latent heat storage systems for free cooling in buildings. *Renew Sustain Energy Rev* 2018; 82: 2843–2868.
- [186] Ahmad M, Bontemps A, Sallée H, et al. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy Build* 2006; 38: 673–681.
- [187] Raj VAA, Velraj R. Review on free cooling of buildings using phase change materials. *Renew Sustain Energy Rev* 2010; 14: 2819–2829.
- [188] Rao VV, Parameshwaran R, Ram VV. PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends. *Energy Build* 2018; 158: 95–122.
- [189] Tyagi VV, Kaushik SC, Tyagi SK, et al. Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011; 15: 1373–1391.
- [190] Sharma RK, Ganesan P, Tyagi VV, et al. Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Convers Manag* 2015; 95: 193–228.
- [191] Vik TA, Madessa HB, Aslaksrud P, et al. Thermal performance of an office cubicle integrated with a bio-based PCM: experimental analyses. *Energy Procedia* 2017; 111: 609–618.
- [192] Alomair M, Alomair Y, Tasnim S, et al. Analyses of bio-based nano-PCM filled concentric cylindrical energy storage system in vertical orientation. *J Energy Storage* 2018; 20: 380–394.
- [193] Nematchoua MK, Noelson JCV, Saadi I, et al. Application of phase change materials, thermal insulation, and external shading for thermal comfort improvement and cooling energy demand reduction in an office building under different coastal tropical climates. *Sol Energy* 2020; 207: 458–470.
- [194] Zalba B, Marín JM, Cabeza LF, et al. Free-cooling of buildings with phase change materials. *Int J Refrig* 2004; 27: 839–849.
- [195] Castell A, Martorell I, Medrano M, et al. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy Build* 2010; 42: 534–540.
- [196] Pruthvi MB, Viswanath G. The efficiency of improvising cooling operation by introducing Phase Changing Material (PCM) as an insulator—A review. *Mater Today Proc* 2020; 33: 559–564.

- [197] Sharma SD, Sagara K. Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review. *Int J Green Energy* 2005; 2: 1–56.
- [198] Pasupathy A, Velraj R, Seeniraj RV. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renew Sustain Energy Rev* 2008; 12: 39–64.
- [199] Zeinelabdein R, Omer S, Mohamed E, et al. Free cooling based phase change material for domestic buildings in hot arid climate, <https://nottingham-repository.worktribe.com/output/873022> (2017).
- [200] Waqas A, Kumar S. Thermal performance of latent heat storage for free cooling of buildings in a dry and hot climate: An experimental study. *Energy Build* 2011; 43: 2621–2630.
- [201] Konuklu Y, Ostry M, Paksoy HO, et al. Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications. *Energy Build* 2015; 106: 134–155.
- [202] Zhu N, Li S, Hu P, et al. A review on applications of shape-stabilized phase change materials embedded in building enclosure in recent ten years. *Sustain Cities Soc* 2018; 43: 251–264.
- [203] Karim L, Barbeon F, Gegout P, et al. New phase-change material components for thermal management of the light weight envelope of buildings. *Energy Build* 2014; 68: 703–706.
- [204] Navarro L, De Gracia A, Niall D, et al. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system. *Renew Energy* 2016; 85: 1334–1356.
- [205] Cao S. *State of the art thermal energy storage solutions for high performance buildings*. Master's Thesis, <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/24448> (2010).
- [206] WETTERWALD M-J, SALAGNAC J-L, CHEVALIER J-L, et al. Application au bâtiment du stockage de chaleur par matériaux à changement de phase. *Cah Cent Sci Tech Bâtim*; 245, <https://pascal-francis.inist.fr>.
- [207] Cabeza LF, Castell A, Barreneche C de, et al. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011; 15: 1675–1695.
- [208] Lin Y, Jia Y, Alva G, et al. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renew Sustain Energy Rev* 2018; 82: 2730–2742.
- [209] Da Cunha JP, Eames P. Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials—a review. *Appl Energy* 2016; 177: 227–238.
- [210] Lee KO, Medina MA, Sun X, et al. Thermal performance of phase change materials (PCM)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls. *Sol Energy* 2018; 163: 113–121.

- [211] Hanchi N, Hamza H, Lahjomri J, et al. Thermal behavior in dynamic regime of a multilayer roof provided with two phase change materials in the case of a local conditioned. *Energy Procedia* 2017; 139: 92–97.
- [212] Cabeza LF, Castellon C, Nogués M, et al. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy Build* 2007; 39: 113–119.
- [213] Yao C, Kong X, Li Y, et al. Numerical and experimental research of cold storage for a novel expanded perlite-based shape-stabilized phase change material wallboard used in building. *Energy Convers Manag* 2018; 155: 20–31.
- [214] Ahangari M, Maerefat M. An innovative PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions. *Sustain Cities Soc* 2019; 44: 120–129.
- [215] BOULFANI W. *Les Ambiances Thermiques d'été dans l'habitat de la période coloniale a patio*. Masters, Université Mohamed Khider - Biskra. Epub ahead of print 2010.pdf.
- [216] Lebourgeois F, Piedallu C. Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Rev For Fr* 2005; 57: 331–356.
- [217] Yang Z, Deng Y, Li J. Preparation of porous carbonized woods impregnated with lauric acid as shape-stable composite phase change materials. *Appl Therm Eng* 2019; 150: 967–976.
- [218] Barreneche C, Vecstaudza J, Bajare D, et al. PCM/wood composite to store thermal energy in passive building envelopes. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p. 012111.
- [219] Yang H, Wang Y, Yu Q, et al. Low-cost, three-dimension, high thermal conductivity, carbonized wood-based composite phase change materials for thermal energy storage. *Energy* 2018; 159: 929–936.
- [220] Cheng L, Feng J. Form-stable phase change materials based on delignified wood flour for thermal management of buildings. *Compos Part Appl Sci Manuf* 2020; 129: 105690.
- [221] Hekimoğlu G, Çakır E, Sarı A, et al. Shape stabilized microcrystalline cellulose/methyl stearate/graphene nanoplatelet composite with enriched thermal conductivity and thermal energy storage/release performance. *Cellulose* 2023; 30: 10199–10214.
- [222] Sarı A, Hekimoğlu G, Tyagi VV. Low cost and eco-friendly wood fiber-based composite phase change material: Development, characterization and lab-scale thermoregulation performance for thermal energy storage. *Energy* 2020; 195: 116983.
- [223] Öztürk G, Temiz A, Hekimoğlu G, et al. Microencapsulated phase change material/wood fiber-starch composite as novel bio-based energy storage material for buildings. *J Energy Storage* 2024; 84: 110911.

- [224] Li A, Yang Y, Ren Y, et al. Bio-based composite phase change material utilizing wood fiber and coconut oil for thermal management in building envelopes. *J Clean Prod* 2024; 469: 143177.
- [225] Li X, Zhu Z, Yang P, et al. Carbonized wood loaded with carbon dots for preparation long-term shape-stabilized composite phase change materials with superior thermal energy conversion capacity. *Renew Energy* 2021; 174: 19–30.
- [226] Cavdar AD, Mengeloğlu F, Karakus K. Effect of boric acid and borax on mechanical, fire and thermal properties of wood flour filled high density polyethylene composites. *Measurement* 2015; 60: 6–12.
- [227] Zhu N, Liu P, Liu F, et al. Energy performance of double shape-stabilized phase change materials wallboards in office building. *Appl Therm Eng* 2016; 105: 180–188.
- [228] Zhou D, Zhao C-Y, Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Appl Energy* 2012; 92: 593–605.
- [229] Zhang W, Zhang X, Huang Z, et al. Preparation and characterization of capric-palmitic-stearic acid ternary eutectic mixture/expanded vermiculite composites as form-stabilized thermal energy storage materials. *J Mater Sci Technol* 2018; 34: 379–386.
- [230] Ahmed A, Chaker Y, Belarbi EH, et al. XRD and ATR/FTIR investigations of various montmorillonite clays modified by monocationic and dicationic imidazolium ionic liquids. *J Mol Struct* 2018; 1173: 653–664.
- [231] Nayak PS, Singh BK. Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. *Bull Mater Sci* 2007; 30: 235–238.
- [232] Eisazadeh A, Kassim KA, Nur H. Solid-state NMR and FTIR studies of lime stabilized montmorillonitic and lateritic clays. *Appl Clay Sci* 2012; 67–68: 5–10.
- [233] Jeong S-G, Jeon J, Lee J-H, et al. Optimal preparation of PCM/diatomite composites for enhancing thermal properties. *Int J Heat Mass Transf* 2013; 62: 711–717.
- [234] Monvisade P, Siriphannon P. Chitosan intercalated montmorillonite: Preparation, characterization and cationic dye adsorption. *Appl Clay Sci* 2009; 42: 427–431.
- [235] Ihekwe GO, Shondo JN, Orisekeh KI, et al. Characterization of certain Nigerian clay minerals for water purification and other industrial applications. *Heliyon* 2020; 6: e03783.
- [236] Fadil-Djenabou S, Ndjigui P-D, Mbey JA. Mineralogical and physicochemical characterization of Ngaye alluvial clays (Northern Cameroon) and assessment of its suitability in ceramic production. *J Asian Ceram Soc* 2015; 3: 50–58.
- [237] Qlihaa A, Dhimni S, Melrhaka F, et al. Caractérisation physico-chimique d'une argile Marocaine [Physico-chemical characterization of a morrocan clay].

- [238] Pandey KK, Pitman AJ. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *Int Biodeterior Biodegrad* 2003; 52: 151–160.
- [239] Lerma-García MJ, Ramis-Ramos G, Herrero-Martínez JM, et al. Authentication of extra virgin olive oils by Fourier-transform infrared spectroscopy. *Food Chem* 2010; 118: 78–83.
- [240] Cellat K, Beyhan B, Güngör C, et al. Thermal enhancement of concrete by adding bio-based fatty acids as phase change materials. *Energy Build* 2015; 106: 156–163.
- [241] Manaf MA, Man YBC, Hamid NSA, et al. Analysis of adulteration of virgin coconut oil by palm kernel olein using Fourier transform infrared spectroscopy. *J Food Lipids* 2007; 14: 111–121.
- [242] Petit T, Puskar L. FTIR spectroscopy of nanodiamonds: Methods and interpretation. *Diam Relat Mater* 2018; 89: 52–66.
- [243] Cui H, Liao W, Mi X, et al. Study on functional and mechanical properties of cement mortar with graphite-modified microencapsulated phase-change materials. *Energy Build* 2015; 105: 273–284.
- [244] Ouikhalfan M, Sarı A, Hekimoğlu G, et al. Thermal energy storage properties, thermal conductivity, chemical/and thermal reliability of three different organic phase change materials doped with hexagonal boron nitride. *Surf Interfaces* 2022; 32: 102176.
- [245] Marani A, Zhang LV, Nehdi ML. Multiphysics study on cement-based composites incorporating green biobased shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage. *J Clean Prod* 2022; 372: 133826.
- [246] Liu S, Wu H, Du Y, et al. Shape-stable composite phase change materials encapsulated by bio-based balsa wood for thermal energy storage. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2021; 230: 111187.
- [247] Chaber R, Łach K, Depciuch J, et al. Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy of paraffin and deparaffinnized bone tissue samples as a diagnostic tool for Ewing sarcoma of bones. *Infrared Phys Technol* 2017; 85: 364–371.
- [248] Kumar K, Sharma K, Verma S, et al. Experimental Investigation of Graphene-Paraffin Wax Nanocomposites for Thermal Energy Storage. *Mater Today Proc* 2019; 18: 5158–5163.
- [249] Luo R, Wang S, Wang T, et al. Fabrication of paraffin@SiO₂ shape-stabilized composite phase change material via chemical precipitation method for building energy conservation. *Energy Build* 2015; 108: 373–380.
- [250] Inés Fernández A, Solé A, Giró-Paloma J, et al. Unconventional experimental technologies used for phase change materials (PCM) characterization: part 2 – morphological and structural characterization, physico-chemical stability and mechanical properties. *Renew Sustain Energy Rev* 2015; 43: 1415–1426.

- [251] Jeong S-G, Chang SJ, Wi S, et al. Development of heat storage gypsum board with paraffin-based mixed SSPCM for application to buildings. *J Adhes Sci Technol* 2017; 31: 297–309.
- [252] Kong W, Fu X, Yuan Y, et al. Preparation and thermal properties of crosslinked polyurethane/lauric acid composites as novel form stable phase change materials with a low degree of supercooling. *RSC Adv* 2017; 7: 29554–29562.
- [253] Tan Q, Liu H, Shi Y, et al. Lauric acid/stearic acid/nano-particles composite phase change materials for energy storage in buildings. *J Energy Storage* 2024; 76: 109664.
- [254] Fu X, Liu Z, Xiao Y, et al. Preparation and properties of lauric acid/diatomite composites as novel form-stable phase change materials for thermal energy storage. *Energy Build* 2015; 104: 244–249.
- [255] Pugalenth S, Chellapandian M, Dharmaraj JJJ, et al. Enhancing the thermal transport property of eutectic lauric-stearic acid based phase change material with silicon carbide nanoparticles for usage in battery thermal management system. *J Energy Storage* 2024; 84: 110890.
- [256] Refahi A, Rostami A, Amani M. Energy analysis of the building integrated with a double PCM wallboard system in various climate regions of Iran. *J Therm Anal Calorim* 2023; 148: 7981–7993.
- [257] Rouault F, Bruneau D, Sebastian P, et al. Numerical modelling of tube bundle thermal energy storage for free-cooling of buildings. *Appl Energy* 2013; 111: 1099–1106.
- [258] Soares NML. *Thermal energy storage with phase change materials (PCMs) for the improvement of the energy performance of buildings*. PhD Thesis, Universidade de Coimbra (Portugal), <https://search.proquest.com/> (2015).
- [259] Rolka P, Przybylinski T, Kwidzinski R, et al. Thermal properties of RT22 HC and RT28 HC phase change materials proposed to reduce energy consumption in heating and cooling systems. *Renew Energy* 2022; 197: 462–471.
- [260] Mekaddem N, Ali SB, Fois M, et al. Paraffin/expanded perlite/plaster as thermal energy storage composite. *Energy Procedia* 2019; 157: 1118–1129.
- [261] Ma F, Liang Y, Tao Z, et al. A novel PCM/expanded graphite composite sphere with high thermal conductivity and excellent shape stability used for a packed-bed thermal energy system. *Diam Relat Mater* 2024; 145: 111102.
- [262] Zhao W, Yan W, Zhang Z, et al. Development and performance evaluation of wood-pulp/glass fibre hybrid composites as core materials for vacuum insulation panels. *J Clean Prod* 2022; 357: 131957.
- [263] Zhou H, Long Y, Meng A, et al. A novel method for kinetics analysis of pyrolysis of hemicellulose, cellulose, and lignin in TGA and macro-TGA. *Rsc Adv* 2015; 5: 26509–26516.

- [264] Valentini F, Dorigato A, Fambri L, et al. Production and characterization of novel EPDM/NBR panels with paraffin for potential thermal energy storage applications. *Therm Sci Eng Prog* 2022; 32: 101309.
- [265] Li Y, Wang S, Tan W, et al. Effect of Graphite Particle Size on the Thermal Properties of EG/Erythritol CPCM. *Int J Thermophys* 2023; 44: 150.
- [266] Kenisarin M, Mahkamov K, Kahwash F, et al. Enhancing thermal conductivity of paraffin wax 53–57° C using expanded graphite. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2019; 200: 110026.
- [267] D'Oliveira EJ, Azimov U, Pereira S-CC, et al. Effect of particle size on the thermal conductivity of organic phase change materials with expanded graphite. *J Energy Storage* 2024; 92: 112090.
- [268] Li C, Wang M, Xie B, et al. Enhanced properties of diatomite-based composite phase change materials for thermal energy storage. *Renew Energy* 2020; 147: 265–274.
- [269] Cheng F, Wen R, Huang Z, et al. Preparation and analysis of lightweight wall material with expanded graphite (EG)/paraffin composites for solar energy storage. *Appl Therm Eng* 2017; 120: 107–114.
- [270] Karkri M, Lachheb M, Gossard D, et al. Improvement of thermal conductivity of paraffin by adding expanded graphite. *J Compos Mater* 2016; 50: 2589–2601.
- [271] Wen R, Zhang X, Huang Z, et al. Preparation and thermal properties of fatty acid/diatomite form-stable composite phase change material for thermal energy storage. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2018; 178: 273–279.
- [272] Tang F, Su D, Tang Y, et al. Synthesis and thermal properties of fatty acid eutectics and diatomite composites as shape-stabilized phase change materials with enhanced thermal conductivity. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2015; 141: 218–224.