



Faculty of Sciences and Technology
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الميكانيكية

N° d'ordre : M.../GM/2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

ÉTUDE DE L'INJECTION D'UN MATÉRIAU À CHANGEMENT DE PHASE DANS UNE
ENVELOPPE DE VERRE

Présenté par :

- ❖ BELHOR Nour Fatma
- ❖ OTSMANE Mohamed Ali

Soutenu le 15/06 / 2026 devant le jury composé de :

Président	Dr. FLITTI Abdelmadjid	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. BELHACHEMI Aida Amina	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. KHALDI Abdelaziz	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Pr. MEDJAHED Bendida	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2025 / 2026

Sommaire

Remerciement	i
Dédicace	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	v
Nomenclatures	vi
Résumé	01
Introduction générale	05
Chapitre 01 :	06
1. Introduction	07
1.1 Généralités sur les matériaux à changement de phase (MCP)	07
1.1.1 Définition et principe de fonctionnement	07
1.1.2 Classification des MCP	07
1.2 Intégration des MCP dans l'enveloppe des bâtiments	08
1.2.1 Méthodes d'intégration	08
1.2.2 Études sur les murs intégrant des MCP	08
1.3 Matériau à changement de phase biosourcés	09
1.3.1 Contexte et motivations	09
1.3.2 Revue des études récentes sur les MCP biosourcés	10
1.3.3 MCP biosourcés issus de déchets et sous-produits	11
1.4. Synthèse et positionnement du présent travail	11
Chapitre 02 :	13
2.1 Stockage d'énergie par matériaux à changement de phase (MCP)	14
2.1.1 Stockage d'énergie thermique : sensible et latente	14

Sommaire

2.1.1.1 Chaleur sensible	14
2.1.1.2 Chaleur latente	15
2.1.1.3 Différence entre stockage sensible et stockage latent	15
2.2 Les matériaux à changement de phase (MCP _s)	17
2.2.1 Matériaux organiques	17
2.2.2 Matériaux inorganiques	17
2.2.3 Matériaux eutectiques	18
2.3 Choix des matériaux à changement de phase	18
2.3.1 La paraffine	19
2.3.2 La cire d'abeille	19
2.3.3 L'huile de soja	20
2.3.4 Le verre	20
Chapitre 03 :	21
3.1 Première partie : Protocole de préparation des échantillons à base de mélange de MCP et d'huile de soja	22
3.1.1 Objectif	22
3.1.2 Procédure expérimentale	22
3.1.3 Préparation des échantillons de MCP	23
3.1.4 Préparation des différents matériaux	24
3.1.5 Mélange d'une quantité précise de plâtre avec du MCP	25
3.1.6 Coulage et conditionnement des échantillons	25
3.2 Deuxième partie : Description du dispositif expérimental	26
3.2.1. Préparation du box froid	29
3.2.2. Préparation du box chaud	29

Sommaire

3.2.3 Préparation l'enveloppe en verre	30
3.2.4 Description du dispositif expérimental	30
3.2.4.1 Section d'essai	31
3.2.4.1.1 Cas de référence du dispositif expérimental	31
3.2.4.1.2 Injection du MCP dans l'enveloppe de verre	31
3.2.4.2 Acquisition des données	31
3.2.4.3 Micro-ordinateur et logiciel	32
3.2.4.4 Mise en marche	32
Chapitre 04 :	34
4.1 Première partie	35
4.1.1 Méthodologie de calcul des propriétés thermo-physiques des mélanges de MCP	35
4.1.2 Propriétés thermo-physiques de MCP1, MCP2 et comparaison	36
4.2 Deuxième partie	37
4.2.1 Modélisation du transfert thermique par conduction	38
4.2.1.1 Loi de Fourier (Flux de chaleur unidirectionnel)	38
4.2.1.2 Résistance thermique de conduction (Mur multicouche)	38
4.2.1.3 Flux de chaleur entrant et sortant du MCP	38
4.2.1.4 Énergie thermique stockée dans le MCP	38
4.2.1.5 Énergie totale stockée à l'instant t	39
4.2.1.6 Énergie cumulative entrante $Q_{in}(t)$	39
4.2.1.7 Efficacité énergétique du système de stockage	39
4.2.2 Résultats et discussion	40
4.2.2.1 L'analyse de la figure 4.1	40
4.2.2.2 L'analyse de la figure 4.2	41

Sommaire

4.2.2.3 Évolution des températures la surface du verre (T_2 , T_4) et du MCP au centre (T_3) sur 24 heures (trois cycles)	43
4.2.2.4 Variation individuelle des températures T_1 à T_5 sur 24 heures (trois cycles)	44
4.2.2.5 Evolution de la température au centre du box chaud (T_1) pour les deux configurations (avec et sans MCP)	48
4.2.2.6 Gradients thermiques locaux entre chaque paire de capteurs consécutifs le long de l'axe horizontal du système	53
4.2.2.7 Evolution temporelle du flux de chaleur	57
4.2.2.8 Energie stockée	58
4.2.2.9 Efficacité énergétique	59
Conclusion Générale et Perspectives	61
Conclusion Générale	62
Référence bibliographie	64

Remerciement

Nous remercions le bon Dieu pour le courage qu'il nous a donné pour surmonter toutes les difficultés durant nos années d'études.

*Nous tenons à remercier notre encadreur le **Pr. MEDJAHED Bendida** pour ses conseils et son suivi continu durant toute la période de la réalisation de ce travail.*

*Nous adressons nos remerciements à Monsieur le Président de jury **Dr.FLITTI Abdelmadjid** et les deux membres de jury **Dr. BELHACHEMI Aida Amina** et **Dr. KHALDI Abdelaziz** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail de l'enrichir par leurs propositions.*

Enfin, nous adressons nos vives reconnaissances à toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Ce travail est dédié à ma mère et mon père et ma sœur

Otsmane Mohamed Ali

Dédicace

*Ce travail est dédié à toute ma famille
Surtout à mon père, ma mère, mes sœurs : Manel, Belkis, Razika,
Safaa*

*Mes oiseaux :Aya , Achref ,Abd Aziz , Akrem , Kawtar
,Yousef ,Amira ,Mehdi ,Assil,Ibrahim El Aid
Dédicace aussi à mes amis et à tous les gens qui m'ont aidé*

Belhor Nour Fatma

Liste des figures

Liste des figures :

Chapitre 02 :

Figure 2.1 : Schéma de stockage d'énergie thermique.	16
Figure 2.2 : Variation de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée.	16
Figure 2.3 : Classification des MCP.	18

Chapitre 03 :

Figure 3.1 : Schéma du processus de préparation des échantillons.	23
Figure 3.2 : Matériels et équipements.	24
Figure 3.3 : Procédure expérimentale.	25
Figure 3.4 : Les échantillons réalisés pour la mesure des propriétés thermo-physiques.	25
Figure 3.5 : (a) Système expérimental et emplacements de mesure et (b) photo expérimentale.	27
Figure 3.6 : Matériels et équipements de banc essais didactique.	28
Figure 3.7 : Préparation du box froid	29
Figure 3.8 : Préparation du box chaud	29
Figure 3.9 : Montage du système à double vitrage avec MCP	30
Figure 3.10 : Schématisation du dispositif expérimental.	30
Figure 3.11 : Montage expérimental avec position des capteurs de température (cas de référence)	31
Figure 3.12 : les composants de section d'essais.	31
Figure 3.13 : Raccordement des thermocouples (RTD) avec Data d'acquisition NI.	32
Figure 3.14 : Schéma de principe	32
Figure 3.15 : Préparation de section d'essai (Mise en marche).	33

Chapitre 04 :

Figure 4.1 : Respectabilité des résultats expérimentaux de la variation de la température au centre de MCP pendant huit heures (un seul cycle).	41
Figure 4.2 : Variation de la température de l'air dans les box chauds et froids pendant 24 heures (trois cycle).	42
Figure 4.3 : Variation de la température de surface extérieure de verre (côté box chaud), MCP au centre et surface extérieure de verre (côté box froid) pendant 24 heures (trois cycle).	44
Figure 4.4 : Variation de la température en fonction du temps au cours de la période expérimentale pendant 24 heures (trois cycle).	45
Figure 4.5 : Variation de la température en fonction du temps au cours de la période expérimentale.	51
Figure 4.6 : Différence de la température en fonction du temps au cours de la période expérimentale pendant 8 heures (un seul cycle).	56
Figure 4.7 : Flux de chaleur en fonction du temps.	58
Figure 4.8 : Énergie stockée en fonction du temps.	59
Figure 4.9 : Efficacité énergétique η en fonction du temps.	60

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

Chapitre 02 :

Tableau 2.1 : propriétés thermiques de la paraffine étudiée.	19
Tableau 2.2 : propriétés thermiques de la cire d'abeille étudiée.	19
Tableau 2.3 : Propriétés thermo physiques de l'huile de soja.	20
Tableau 2.4 : Propriétés thermo physiques du verre.	20

Chapitre 04 :

Tableau 4.1 : Propriétés thermo-physiques de MCP 1.	36
Tableau 4.2 : Propriétés thermo-physiques de MCP 2	36
Tableau 4.3 : comparaison entre les propriétés thermo-physiques de MCP 1 et MCP2	37

NOMENCLATURE :

SYMBOLES	UNITES	DESIGNATION
T	[°C]	Température
Q	[W]	Flux de chaleur
S	[m ²]	Surface d'échange
V	[m ³]	Volume
m	[kg]	Masse
t	[s]	Temps
C_p	[J/kg °C]	Chaleur Spécifique du fluide
λ	[W/m °C]	Conductivité thermique
ρ	[kg/m ³]	Masse Volumique
μ	[Pa. S]	Viscosité Dynamique du fluide
L	[J/kg]	Chaleur latente

INDICES

en	Fluide d'entrée
sort	Fluide sortie
c	Chaude
f	Froide
i	Interne
ex	Externe
moy	Moyenne
1, 2, 3,4 et 5	Position du capteur de MCP

ABREVIATIONS

MCP	Matériau à changement de phase
DSC	Calorimétrie différentielle à balayage

Résumé :

Ce travail constitue une première contribution solide à la recherche sur les MCP biosourcés pour l'enveloppe du bâtiment en Algérie. Il ouvre la voie à un programme de recherche structuré alliant formulation de matériaux verts, modélisation multi-physique et validation en conditions climatiques réelles, contribuant ainsi aux objectifs nationaux de transition énergétique et d'efficacité dans le secteur du bâtiment. Ce travail de fin d'études porte sur l'intégration d'un matériau à changement de phase (MCP) biosourcé dans des briques de verre, dans le but d'améliorer les performances thermiques des parois de bâtiment par stockage d'énergie latente. Le MCP étudié est élaboré à partir d'un mélange d'huile végétale locale (huile de soja), de cire d'abeille et de paraffine RT50, offrant ainsi un caractère écologique, renouvelable et à faible impact environnemental.

La préparation des échantillons a suivi un protocole rigoureux de fusion-mélange à 80 °C sous agitation magnétique à 1000 tr/min, assurant l'homogénéité et la stabilité thermique du composite. Les propriétés thermo-physiques du MCP ont été déterminées par voie analytique en raison de l'indisponibilité d'appareillage spécialisé (DSC).

Le dispositif expérimental consiste en deux enceintes — une chaude (régulée à 50 °C) et une froide (température ambiante stable) — séparées par un mur composite verre/MCP/verre. Cinq capteurs de température (T_1 à T_5) positionnés stratégiquement permettent de suivre l'évolution du champ thermique à travers la paroi multicouche.

Les résultats expérimentaux mettent en évidence l'efficacité remarquable du système composite. Un gradient thermique total de ~26 °C est généré entre la source et le puits, avec une atténuation de l'excursion thermique côté froid supérieure à 75 % et une réduction globale de l'amplitude de 69 % entre T_1 et T_5 . Un déphasage thermique de 40 à 90 minutes est observé, traduisant la capacité d'inertie thermique du système. Le plateau de fusion du MCP, identifié dans la plage 28–43 °C et d'une durée de ~120 minutes, confirme le stockage latent actif. Le MCP a emmagasiné 69,3 kJ, dont 73,6 % sous forme latente, avec un taux de restitution de 95,4 % sur 420 minutes. La résistance thermique totale du mur composite atteint 1,43 K/W, réduisant sensiblement le flux thermique transmis vers la zone froide. La répétabilité des mesures sur trois cycles consécutifs (écarts < ±1 °C) confirme la stabilité thermomécanique du système.

Ces résultats positionnent le système verre/MCP biosourcé comme une solution prometteuse et durable pour la gestion passive de l'énergie thermique dans les bâtiments bioclimatiques et les applications de stockage d'énergie solaire.

Mots-clés : Matériau à changement de phase (MCP) biosourcé ; Brique de verre ; Stockage thermique latent, Energie stockée ; Efficacité ; Cire d'abeille ; Huile de soja ; Paraffine RT50.

Abstract:

This research offers the first substantial contribution to studying bio-based phase change materials (PCMs) for Algeria's building envelopes. It sets the stage for a systematic research initiative that will blend the creation of green materials, multiphysics modeling, and real-world climate validation. Such an approach supports Algeria's energy transition and building efficiency goals. Honestly, this graduation project zeros in on embedding a bio-based PCM into glass bricks to boost wall thermal performance by storing latent heat energy.

The phase change material (PCM) we looked at came from mixing local soybean oil, beeswax, and RT50 paraffin. It is an eco-friendly option, made from renewable stuff, and should not harm the environment much. Getting the samples ready involved a strict melt-and-mix process. We heated it all to 80 °C, stirring at 1000 rpm with a magnetic stirrer. That way, we made sure the composite was uniform and held up thermally. We figured out the PCM's physical properties using calculations 'cause we did not have access to specialized gear like DSC.

The setup has two chambers. One is hot, kept at 50 °C, and the other is cold, sitting at a steady ambient temperature. A wall made of glass, PCM, and more glass divides them. Five temperature sensors— T_1 through T_5 —are placed carefully to track how the heat moves through that layered wall. The results from our tests really point to how well this composite system works. They got a temperature difference of roughly 26 degrees Celsius between the heat source and the sink. Turns out, the cold side's thermal fluctuations dropped by over 75 percent. Overall, the amplitude between T_1 and T_5 was cut by 69 percent. They also saw a thermal phase shift, moving from 40 minutes to 90 minutes.

That kind of shift really points to how much thermal inertia the system is got. The PCM hit its melting plateau somewhere between 28 and 43 degrees Celsius, sticking there for about two hours. This pretty much confirms it is actively storing latent heat. They figured the PCM tucked away 69.3 kilojoules of energy, and that figure includes 73 units.

This system shows about 6% existing in a latent state. It takes 420 minutes to reach a 95.4% recovery rate. The composite wall's overall thermal resistance hits 1.43 K/W. Those figures really help cut down the heat flux heading into the cold zone. We have run it through three cycles, and the measurements' repeatability signals strong thermo mechanical stability for the system. We are seeing deviations under ± 1 °C, which is tight. Honestly, these results make this bio-based glass/PCM system look like a promising, sustainable bet for passive thermal management in bioclimatic buildings, not to mention solar energy storage.

Keywords: Bio-based phase change material (PCM); Glass brick; Latent thermal storage; Stored energy; Efficiency; Beeswax; Soybean oil; RT50 paraffin.

الملخص:

يُعد هذا العمل مساهمة أولية مهمة في مجال البحث حول المواد متغيرة الطور (MCP) ذات المصدر الحيوي المخصصة لأغلفة المباني في الجزائر. كما يفتح المجال أمام برنامج بحثي منظم يجمع بين تطوير المواد البيئية، ونماذج متعددة الفيزياء، والتحقق التجريبي تحت ظروف مناخية حقيقية، مما يساهم في تحقيق الأهداف الوطنية المتعلقة بالانتقال الطاقوي ورفع كفاءة الطاقة في قطاع البناء. يركز مشروع التخرج هذا على دمج مادة متغيرة الطور (MCP) ذات مصدر حيوي داخل الطوب الزجاجي بهدف تحسين الأداء الحراري لجدران المباني من خلال تخزين الطاقة الحرارية الكامنة. وقد تم تطوير المادة المدروسة انطلاقًا من مزيج من الزيت النباتي المحلي (زيت الصويا)، وشمع العسل، وبارافين RT50، مما يمنحها طابعًا بيئيًا ومتجددًا ذا تأثير منخفض على البيئة.

تم تحضير العينات وفق بروتوكول دقيق يعتمد على الانصهار والخلط عند درجة حرارة 80 °م تحت تحريك مغناطيسي بسرعة 1000 دورة/دقيقة، بما يضمن تجانس واستقرار المركب حراريًا. وتم تحديد الخصائص الحرارية الفيزيائية للمادة بطريقة تحليلية نظرًا لعدم توفر أجهزة متخصصة مثل جهاز DSC.

يتكون الجهاز التجريبي من حجرتين: حجرة ساخنة يتم ضبطها عند 50 °م، وحجرة باردة بدرجة حرارة محيط مستقرة، يفصل بينهما جدار مركب من زجاج/مادة متغيرة الطور/زجاج. كما تم تثبيت خمسة مجسات حرارية (T_1) إلى (T_5) في مواقع استراتيجية لمتابعة تطور المجال الحراري عبر الجدار متعدد الطبقات.

أظهرت النتائج التجريبية الكفاءة العالية للنظام المركب، حيث تم توليد تدرج حراري إجمالي يقارب 26 °م بين المصدر الحراري والمصب الحراري، مع تخفيض في التذبذبات الحرارية على الجانب البارد تجاوز 75 %، وانخفاض إجمالي في السعة الحرارية بنسبة 69 % بين T_1 و T_5 . كما لوحظ تأخر حراري يتراوح بين 40 و 90 دقيقة، ما يعكس قدرة النظام على تحقيق العطالة الحرارية. وأكدت مرحلة انصهار المادة، المحددة ضمن المجال الحراري 28–43 °م ولمدة تقارب 120 دقيقة، وجود تخزين حراري كامن فعال. وقد خزنت المادة 69.3 كيلوجول من الطاقة، منها 73.6 % على شكل طاقة كامنة، مع معدل استرجاع بلغ 95.4 % خلال 420 دقيقة. كما بلغت المقاومة الحرارية الكلية للجدار المركب 1.43 كلفن/واط، مما ساهم في تقليل انتقال التدفق الحراري نحو المنطقة الباردة بشكل ملحوظ. وأثبتت قابلية تكرار القياسات خلال ثلاث دورات متتالية (بانحراف أقل من ± 1 °م) الاستقرار الحراري والميكانيكي للنظام.

تُبرز هذه النتائج نظام الزجاج/المادة متغيرة الطور ذات المصدر الحيوي كحل واعد ومستدام للإدارة السلبية للطاقة الحرارية في المباني البيومناخية، وكذلك في تطبيقات تخزين الطاقة الشمسية.

الكلمات المفتاحية:

المواد متغيرة الطور ذات المصدر الحيوي؛ الطوب الزجاجي؛ التخزين الحراري الكامن؛ الطاقة المخزنة؛ الكفاءة؛ شمع العسل؛ زيت الصويا؛ بارافين RT50.

Introduction générale :

Dans le cadre de ce travail de recherche, une approche innovante est proposée afin d'améliorer l'efficacité énergétique dans le secteur industriel, en s'appuyant sur l'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) pour la réduction de la consommation d'énergie. Ces matériaux présentent un fort potentiel pour l'augmentation de la capacité de stockage thermique des échangeurs de chaleur industriels.

Les MCP se caractérisent par leur aptitude à emmagasiner et à restituer d'importantes quantités d'énergie thermique de manière quasi isotherme lors des transitions de phase. L'objectif principal de cette étude consiste est de développer un MCP biosourcé à base de cire d'abeille, d'huile de soja et de paraffine RT50, puis d'évaluer expérimentalement son efficacité pour améliorer l'énergie thermique d'une paroi vitrée.

En exploitant leur capacité de stockage de chaleur latente, les MCP contribuent à l'amélioration de l'isolation thermique des installations industrielles et à l'atténuation des effets des fluctuations de la température ambiante. À cet effet, une étude expérimentale approfondie du transfert thermique associé aux phénomènes de changement de phase a été menée au sein d'un système de stockage de chaleur latente.

La préparation des échantillons a été réalisée selon un protocole de fusion-mélange contrôlé à une température de 80 °C sous agitation magnétique à une vitesse de 1000 tr/min, garantissant une dispersion homogène et une bonne stabilité thermique du matériau composite. En raison de l'absence d'un appareil de calorimétrie différentielle à balayage (DSC), les propriétés thermophysiques du matériau à changement de phase (MCP) ont été déterminées par une approche analytique. L'évaluation expérimentale des performances thermiques a été effectuée à l'aide d'un dispositif composé de deux enceintes thermiques, l'une chaude maintenue à 50 °C et l'autre froide à température ambiante constante, séparées par une paroi multicouche verre/MCP/verre. Cinq capteurs de température (T_1 à T_5), répartis à des positions stratégiques, ont permis de suivre l'évolution du profil de température et d'analyser les transferts thermiques à travers la paroi.

Les résultats issus de cette étude expérimentale devraient apporter une contribution significative à la compréhension du comportement thermique des MCP et à l'identification des conditions optimales pour leur intégration dans les systèmes industriels de stockage de chaleur

Introduction Générale

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres permettant de présenter de manière progressive le contexte, la méthodologie et les résultats de cette étude. Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique portant sur les travaux antérieurs relatifs au stockage d'énergie thermique et aux matériaux à changement de phase (MCP). Le deuxième chapitre présente les concepts fondamentaux liés au stockage de l'énergie ainsi qu'aux propriétés et aux caractéristiques des MCP. Le troisième chapitre décrit la méthodologie expérimentale adoptée, notamment la conception et la réalisation du banc d'essai ainsi que les protocoles expérimentaux mis en œuvre. Le quatrième chapitre est dédié à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus. Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats de l'étude et présente les perspectives de travaux futurs.

Chapitre 01 : Etude bibliographique

1. Introduction :

Face à la consommation énergétique qui grimpe dans le bâtiment, les enjeux environnementaux mondiaux sont devenus majeurs. Le développement de stratégies passives innovantes visant à améliorer la performance énergétique et thermique des bâtiments constitue un domaine de recherche en constante évolution. Parmi les solutions les plus prometteuses, l'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans l'enveloppe du bâtiment permet d'accroître la capacité de stockage thermique des parois grâce à leur aptitude à absorber et restituer une quantité importante de chaleur lors des transitions de phase. Cette technologie contribue ainsi à l'atténuation des fluctuations de température intérieure et à l'amélioration du confort thermique des occupants.

Cette revue de la littérature fait le point sur les recherches existantes concernant les matériaux à changement de phase (MCP). On y trouve leur classification. L'étude aborde aussi les techniques d'intégration de ces matériaux dans l'enveloppe des bâtiments. Les travaux récents sur les MCP biosourcés sont d'ailleurs couverts.

L'objectif est de situer cette recherche dans un contexte scientifique précis. On cherche à repérer les manques, les questions laissées sans réponse. Ce travail, en somme, ambitionne de combler ces lacunes.

1.1 Généralités sur les matériaux à changement de phase (MCP) :

1.1.1 Définition et principe de fonctionnement :

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux capables de stocker et de restituer une quantité importante d'énergie thermique lors de leur transition de phase, généralement entre l'état solide et l'état liquide, selon le principe du stockage par chaleur latente. Ce mécanisme permet l'absorption ou la libération d'une grande quantité de chaleur à une température presque constante correspondant à la température de changement de phase du matériau. Comparé au stockage thermique sensible conventionnel, le stockage par chaleur latente présente une densité énergétique supérieure, permettant de stocker davantage d'énergie pour un même volume ou une même masse de matériau.

1.1.2 Classification des MCP :

Les matériaux à changement de phase (MCP) se divisent en trois grandes familles, selon leur composition : les MCP organiques, les inorganiques, et les eutectiques.

Dans les MCP organiques, comme les paraffines ou les acides gras, plusieurs avantages sautent aux yeux. Ils sont assez stables à chaud et aux mélanges, peu corrosifs et fondent à une large gamme de températures. De plus, leur solidification est rapide, ne nécessitant pas de refroidissement excessif. Leur principal inconvénient réside dans leur faible conductivité thermique et leur capacité de stockage d'énergie volumique moyenne. Certains peuvent également présenter un risque d'inflammabilité.

Les sels inorganiques hydratés affichent une bonne capacité de stockage de chaleur latente et une meilleure conductivité thermique. Cependant, leur utilisation répétée de cycles de fusion-solidification entraîne une séparation de phases qui les désorganise, et leur stabilité thermique peut se dégrader sur le long terme. Les mélanges eutectiques, quant à eux, permettent un réglage très précis de la température de changement de phase, adapté à des applications spécifiques.

1.2. Intégration des MCP dans l'enveloppe des bâtiments :

1.2.1 Méthodes d'intégration :

Pour intégrer les MCP aux enveloppes de bâtiments, plusieurs approches existent. Le choix s'affine selon les caractéristiques du matériau, les contraintes liées à la construction et les performances thermiques ciblées.

Une méthode courante est l'intégration directe. Ici, les MCP sont incorporés directement, souvent sous forme de plaques ou de couches, au cœur des murs, des planchers ou des toitures. C'est une approche assez simple, mais qui demande une attention certaine, surtout pour éviter les soucis de fuite si le matériau venait à se liquéfier.

Mélanger les MCP dans des micro- ou macro-capsules, c'est une astuce bien rodée pour réduire ce risque. On peut d'ailleurs les incorporer directement dans des matériaux de construction courants, comme le ciment, le gypse ou la perlite expansée. Est créé des composites qui accumulent vraiment bien la chaleur [1,2]. Il y a aussi l'approche où on les intègre comme composant mixte, en les combinant directement aux matériaux de base, ce qui booste leur capacité thermique dans l'ensemble.

1.2.2 Études sur les murs intégrant des MCP :

De nombreuses études expérimentales et numériques ont été menées afin d'évaluer l'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les parois des bâtiments, en analysant leur influence sur la réduction de la consommation énergétique et l'amélioration du confort thermique intérieur. Dans ce contexte, Kuznik et al. [3] ont réalisé une revue bibliographique

approfondie portant sur l'application des MCP dans les enveloppes des bâtiments, constituant une référence essentielle dans ce domaine. Par la suite, Lamrani et al. [4] ont actualisé ces travaux en intégrant les avancées récentes relatives aux types de matériaux utilisés ainsi qu'aux différentes techniques d'intégration des MCP. D'autres chercheurs, tels qu'Izquierdo-Barrientos et al., ont également contribué au développement de cette thématique à travers des études visant à analyser les performances thermiques et énergétiques des systèmes intégrant des MCP dans les parois de bâtiments.

Une analyse numérique poussée des façades de bâtiments incluant des MCP vient d'être réalisée. Les résultats révèlent qu'une couche de MCP diminue nettement l'amplitude des transferts thermiques sur les parements internes. L'enveloppe voit ainsi sa performance globale s'améliorer. Les chercheurs ont comparé ce phénomène à une "isolation dynamique", capable de modifier ses caractéristiques thermiques au gré de l'environnement.

Dans leurs travaux, Evola et al. [5] ont développé une méthodologie d'évaluation visant à analyser l'efficacité des panneaux intégrant des matériaux à changement de phase (MCP) pour l'amélioration du confort thermique en période estivale. Les résultats de leur étude ont mis en évidence l'importance de deux paramètres fondamentaux : la température de fusion du MCP, qui doit être sélectionnée en fonction des conditions climatiques locales et des températures intérieures souhaitées, ainsi que la position du MCP au sein de la paroi, qui influence directement ses performances thermiques. Les auteurs ont également souligné le rôle déterminant des conditions météorologiques sur le comportement thermique des MCP, mettant en évidence la nécessité d'une adaptation du système aux spécificités climatiques de chaque région.

Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont étudié l'intégration des MCP dans la fabrication de briques afin d'améliorer la performance énergétique des bâtiments, notamment dans les climats mixtes. Cette approche s'inscrit dans une perspective de construction durable visant à réduire les besoins énergétiques liés au chauffage et à la climatisation. À ce titre, Saxena et ses collaborateurs ont également contribué à l'étude de l'incorporation des MCP dans les matériaux de construction en évaluant leur impact sur le stockage thermique et la régulation des températures intérieures.

1.3 Matériau à changement de phase biosourcés :

1.3.1 Contexte et motivations :

Jusqu'ici, la plupart des recherches sur les MCP dans le bâti se sont surtout concentrées sur les paraffines et les composés de synthèse. Mais voilà, ces dix dernières années ont vu naître un intérêt marqué pour les MCP biosourcés. Ces matériaux viennent de ressources naturelles renouvelables et sont plus respectueux de l'environnement. Cet engouement s'explique par nos inquiétudes environnementales croissantes, qui touchent directement au cycle de vie des

matériaux de construction. Il devient urgent de trouver des solutions durables qui polluent moins.

Ces MCP biosourcés ont plusieurs avantages. Premièrement, ils sont d'origine naturelle et se dégradent facilement. Leur fabrication pollue moins que celle des produits pétrochimiques. Et dans certains cas, leur coût peut même être avantageux. On exploite plein de sources naturelles pour les fabriquer, allant des graisses animales aux huiles végétales, sans oublier les cires et les acides gras issus du vivant.

1.3.2 Revue des études récentes sur les MCP biosourcés :

Boussaba et al. [6] ont proposé le développement d'un matériau composite intégrant un matériau à changement de phase (MCP) biosourcé destiné à l'application dans les enveloppes des bâtiments. Leur étude a consisté à incorporer de la graisse de coco comme MCP au sein d'une matrice composite, conduisant à l'élaboration d'un matériau innovant présentant une chaleur latente de 59,10 J/g et une température de fusion de 23,79 °C. Ces propriétés thermophysiques démontrent le potentiel de ce composite pour l'amélioration du confort thermique des bâtiments, en particulier dans les régions caractérisées par des climats tempérés et semi-arides.

Par ailleurs, Fabiani et ses collaborateurs ont également contribué aux recherches sur l'intégration des MCP dans les matériaux de construction en étudiant leur influence sur les performances thermiques et la capacité de stockage énergétique des enveloppes de bâtiments. Dix recherches ont porté sur la graisse animale, le considérant comme un matériau à changement de phase (MCP) potentiel. L'idée était de l'employer pour des applications de gaines passives. Leur approche multidisciplinaire a révélé le potentiel de ce matériau. Sa chaleur latente de fusion s'établit autour de 28,67 J/g. En gros, le matériau peut emmagasiner puis restituer de l'énergie thermique. Ça, ça ouvre la voie à plein d'applications. Celles-ci sont particulièrement pertinentes là où les sous-produits animaux foisonnent et où leur valeur est faible.

Eller et al. [7] ont mené une analyse climatique poussée, cherchant à évaluer le potentiel de l'huile de coco en tant que MCP pour les bâtiments. Ils ont étudié divers types de climats. Leurs conclusions révèlent que ce MCP biosourcé peut bel et bien améliorer la performance thermique des bâtiments, et ce, dans plusieurs contextes climatiques distincts. Son efficacité peut cependant varier selon les conditions météorologiques locales.

Trisnadewi et al. [8] ont, de leur côté, effectué une analyse expérimentale comparative. Ils se sont penchés sur différentes cires naturelles : cire de soja, cire de palme et paraffine, considérées comme des MCP potentiels pour le stockage d'énergie.

Ils ont employé un système thermoélectrique à cyclage thermique. Ce dispositif a révélé les propriétés thermiques des matériaux étudiés. Ils ont aussi mesuré leur résilience sur plusieurs cycles de fusion-recristallisation. Les résultats de ces tests ont offert des informations précieuses pour identifier les MCP les plus appropriés, qui conviendront à un éventail d'applications.

1.3.3 MCP biosourcés issus de déchets et sous-produits :

Une piste particulièrement intéressante pour les MCP biosourcés, c'est de piocher dans les déchets et sous-produits, qu'ils viennent de l'industrie ou de l'agriculture. Ces résidus deviennent de véritables sources pour fabriquer ces matériaux à changement de phase. D'ailleurs, Abdulmunem et ses collègues [9] ont mis au point un bio-composite isolant assez bluffant. Ils ont eu l'idée de recycler des plumes de poulet. Imaginez un peu, un déchet de l'industrie avicole, et en plus, disponible à foison ! Ils ont mélangé ces plumes à un MCP, et ça n'a pas seulement boosté les performances thermiques du matériau, ça a aussi donné une seconde vie à un déchet industriel. Cette approche présente à la fois un intérêt environnemental et énergétique.

Des essais menés à Bagdad révèlent des résultats intéressants. On y voit qu'un composite, constitué à 75 % de plumes de poulet, a permis une amélioration de l'isolation acoustique de 9 %. De plus, un MCP intégré dans des panneaux de PVC a réussi à réduire la charge de refroidissement de 20,3 %. Cette méthode semble ainsi offrir un potentiel polyvalent.

Dans un domaine similaire, Abdulmunem et ses collègues [10] se sont penchés sur le distillat d'acide gras de palme (DAGP). Il s'agit d'un sous-produit du raffinage de l'huile de palme. Ils l'ont employé comme MCP biosourcé, spécifiquement pour la gestion thermique des batteries lithium-ion.

Cette application, ce n'est pas la même chose que l'enveloppe du bâtiment, mais ses résultats sont carrément instructifs. En gros, le DAGP a fait baisser la température des cellules et a étiré leur durée de vie. Le rendement électrique, lui, s'est amélioré. Ce qu'on voit là, ça montre bien à quel point les MCP biosourcés issus de la filière palme sont polyvalents. Et ça met en lumière l'intérêt du DAGP. Faut dire que c'est un matériau à changement de phase qui ne coûte pas cher et qui est en plus écolo.

1.4. Synthèse et positionnement du présent travail :

Les recherches sur les MCP conventionnels à base de paraffines [4-11] révèlent clairement leur efficacité. Elles permettent d'améliorer les performances thermiques des enveloppes de bâtiments. Pielichowska et Pielichowski [12] ont dressé un panorama complet des propriétés des matériaux de stockage thermique. Ce travail constitue un socle essentiel et s'avère précieux pour toute nouvelle investigation dans ce secteur.

Le développement croissant des matériaux à changement de phase (MCP) biosourcés témoigne d'un intérêt grandissant pour des solutions de stockage thermique plus durables et respectueuses de l'environnement. Toutefois, malgré les avancées réalisées dans ce domaine, l'optimisation de leur formulation, de leurs propriétés thermo-physiques et de leur stabilité thermique demeure un enjeu majeur pour assurer leur intégration efficace dans les enveloppes des bâtiments sous différentes conditions climatiques.

Dans ce contexte, le présent travail s'inscrit dans cette dynamique de recherche en proposant le développement et la caractérisation d'un nouveau matériau composite à changement de phase (MCP) biosourcé, élaboré à partir de matériaux à faible coût et à faible impact environnemental. L'objectif principal est d'améliorer l'inertie thermique des parois et de réduire les échanges thermiques entre l'environnement extérieur et l'espace intérieur, afin de maintenir une température intérieure plus stable et d'optimiser le confort thermique des occupants. L'intégration du MCP sous forme de couche mince dans les parois constitue une approche prometteuse, déjà étudiée et validée dans plusieurs travaux antérieurs [3, 4, 5, 11].

Dans le cadre de cette étude bibliographique, notre travail vise à développer et évaluer un matériau à changement de phase biosourcé intégré dans des briques de verre afin d'améliorer les performances thermiques des bâtiments. L'objectif principal est de valoriser des matériaux locaux et renouvelables pour assurer un stockage passif de l'énergie thermique par chaleur latente. Cette étude cherche également à analyser le comportement thermo-physique du composite verre/MCP ainsi que sa capacité d'inertie thermique dans des conditions proches du fonctionnement réel. Le travail expérimental permettra de quantifier l'atténuation du flux thermique, le déphasage thermique et l'efficacité du stockage énergétique du système proposé. À travers cette approche, nous visons à proposer une solution durable, écologique et adaptée au climat algérien pour réduire les besoins énergétiques des bâtiments. Ce projet contribue ainsi au développement des technologies de construction bioclimatique et à la promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment en Algérie.

Chapitre 02 : Généralités sur le Stockage d'énergie thermique et Le choix de matériau à changement de phase MCP

2.1 Stockage d'énergie par matériaux à changement de phase (MCP) :

Le stockage de l'énergie dans les bâtiments constitue un élément clé pour la gestion et l'optimisation de l'énergie thermique produite par les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC), ainsi que par les sources d'énergie renouvelable telles que les panneaux solaires et les éoliennes. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont largement utilisés dans ce contexte en raison de leur capacité à stocker et à restituer d'importantes quantités d'énergie thermique, tout en maintenant une température quasi constante lors des processus de transition de phase. Le choix d'un système de stockage d'énergie thermique dépend de plusieurs facteurs, notamment les besoins énergétiques du bâtiment, sa localisation géographique, les conditions climatiques, les contraintes économiques, ainsi que la disponibilité des matériaux et des technologies.

Ainsi, l'intégration du stockage d'énergie dans les bâtiments permet d'améliorer l'efficacité énergétique, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de contribuer à l'atteinte des objectifs de durabilité environnementale [13].

2.1.1 Stockage d'énergie thermique :(sensible et latente)

Le stockage d'énergie thermique dans les bâtiments peut être optimisé grâce à l'utilisation de deux modes principaux de stockage : le stockage sensible et le stockage latent [13].

2.1.1.1 Chaleur sensible :

La chaleur sensible correspond à la quantité d'énergie thermique échangée entre deux corps sans qu'il y ait de changement de phase. Elle traduit la capacité d'un matériau à absorber ou à libérer de la chaleur tout en conservant son état physique.

À titre d'exemple, lorsqu'un objet métallique est chauffé, son élévation de température résulte d'un échange de chaleur sensible.

La quantité de chaleur échangée peut être exprimée par la relation suivante :

$$Q = m C_p \Delta T \quad (2.1)$$

Où Q désigne la quantité de chaleur échangée, m la masse du matériau, c sa capacité thermique massique et ΔT la variation de température.

2.1.1.2 Chaleur latente :

La chaleur latente correspond à la quantité d'énergie thermique nécessaire pour provoquer un changement d'état d'une substance (fusion, vaporisation, etc.) sans variation de température. Cette énergie est absorbée ou libérée lors des transitions de phase, notamment du solide au liquide ou du liquide au gaz.

La quantité de chaleur latente peut être déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$Q = m l_h \quad (2.2)$$

Où Q représente la quantité de chaleur échangée, m la masse de la substance et L la chaleur latente massique de celle-ci [13]

2.1.1.3 Différence entre stockage sensible et stockage latent :

Le stockage d'énergie sensible et le stockage d'énergie latent constituent deux approches distinctes du stockage thermique.

Le stockage sensible repose sur la variation de température d'un matériau (tel que l'eau, le béton ou la terre cuite), tandis que le stockage latent exploite l'énergie associée aux changements de phase dans des matériaux spécifiques, tels que les paraffines, les sels ou certains métaux.

Le stockage latent présente l'avantage d'offrir une densité de stockage énergétique plus élevée et une température de fonctionnement quasi constante, contrairement au stockage sensible où la température varie continuellement.

Ces deux méthodes contribuent à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, à condition de sélectionner des matériaux adaptés aux conditions d'utilisation [14].

Chapitre 02 : Généralités sur le Stockage d'énergie thermique et le choix de matériau à changement de phase MCP

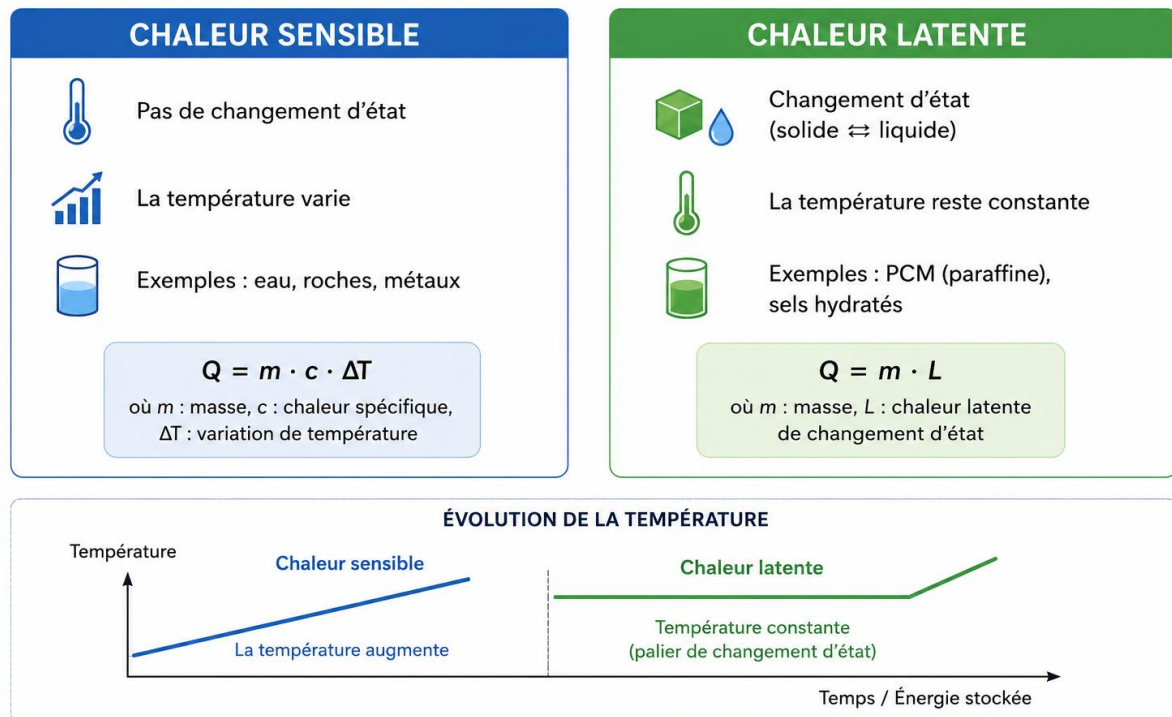


Figure 2.1 : Schéma de stockage d'énergie thermique.

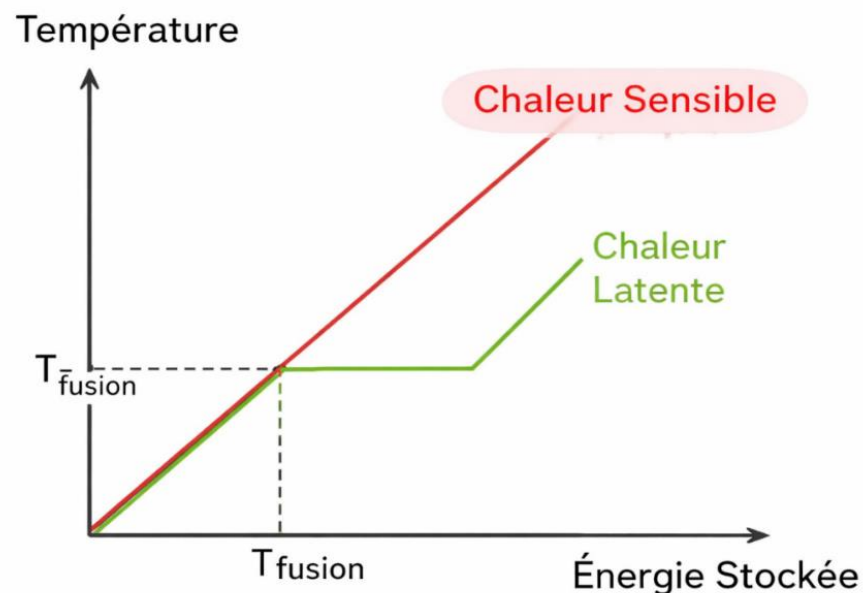


Figure 2.2 : Variation de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée [15].

2.2 Les matériaux à changement de phase (MCP_s) :

Un matériau à changement de phase (PCM) est un matériau capable de stocker et de restituer de l'énergie thermique lors de sa transition entre deux états physiques (solide/liquide).

Ces matériaux présentent un large éventail d'applications, notamment dans la réduction de la consommation énergétique des bâtiments, les systèmes solaires thermiques et les dispositifs de refroidissement.

Dans le domaine du bâtiment, ils permettent de décaler les charges thermiques vers les périodes creuses, améliorant ainsi le confort thermique, en particulier dans les structures à faible inertie thermique [16].

2.2.1 Matériaux organiques :

Les matériaux à changement de phase organiques sont constitués de composés contenant du carbone. Ils possèdent la capacité d'absorber et de libérer de la chaleur lors des transitions de phase.

Ils sont largement utilisés en raison de leur stabilité chimique, de leur compatibilité avec de nombreuses applications et de leur facilité d'intégration.

Exemples : paraffines, composés organiques non paraffinés [17].

2.2.2 Matériaux inorganiques :

Les matériaux à changement de phase inorganiques sont composés d'éléments ne contenant pas de carbone. Ils présentent généralement une capacité de stockage thermique élevée et une bonne conductivité thermique.

Ils sont utilisés dans diverses applications énergétiques et industrielles.

Exemples : hydrates de sels, sels inorganiques [17].

2.2.3 Matériaux eutectiques :

Les matériaux eutectiques sont des mélanges caractérisés par une température de changement de phase constante.

Ils permettent de stocker et de restituer une quantité importante d'énergie thermique à température constante, ce qui les rend particulièrement adaptés aux systèmes de stockage thermique [17].

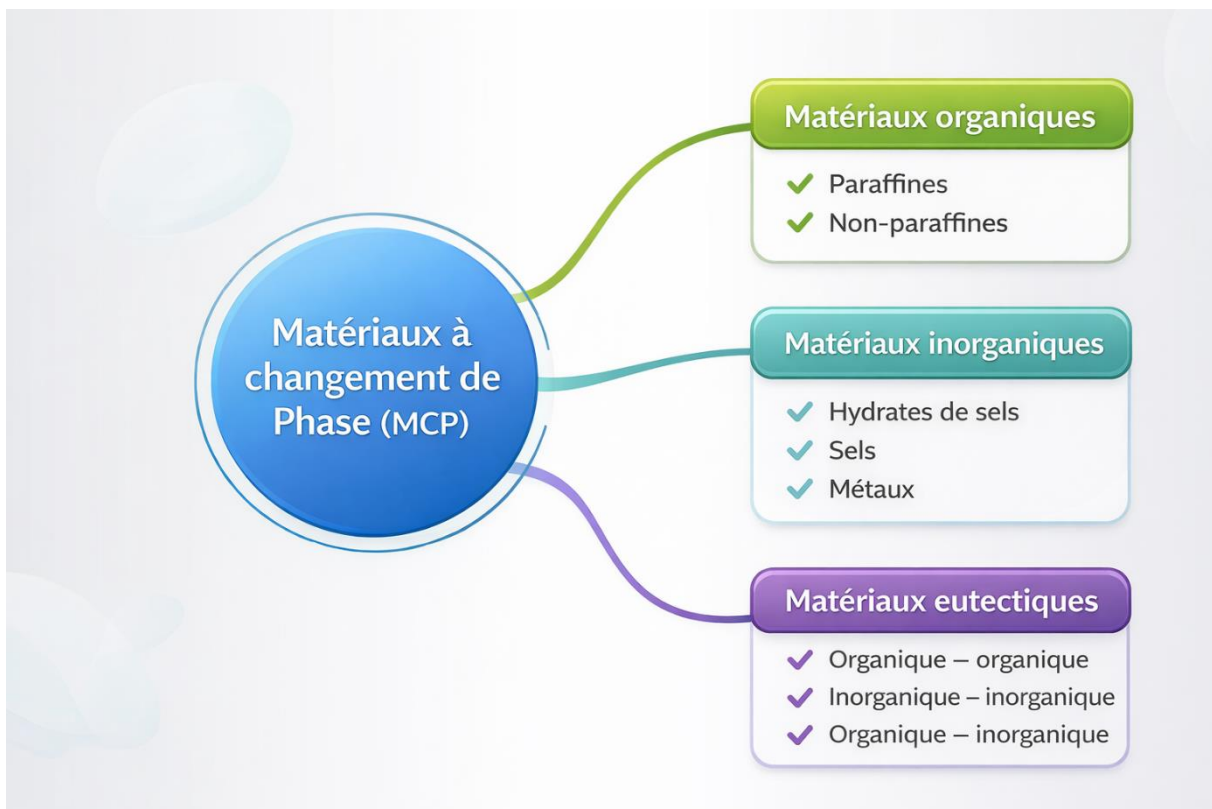


Figure 2.3 : Classification des MCP [17].

2.3 Choix des matériaux à changement de phase :

Le choix des matériaux à changement de phase pour leur intégration dans les parois dépend de plusieurs critères :

- **Température de transition** : doit correspondre à la plage de température souhaitée pour le confort thermique.
- **Capacité de stockage thermique** : détermine la quantité d'énergie stockée.

Chapitre 02 : Généralités sur le Stockage d'énergie thermique et le choix de matériau à changement de phase MCP

- **Stabilité et durabilité** : aptitude à supporter des cycles répétés sans dégradation.
- **Conductivité thermique** : influence la vitesse de transfert de chaleur.
- **Compatibilité structurelle** : adéquation avec les matériaux de construction existants.
- **Coût** : incluant l'achat, l'installation et la maintenance.

Dans cette étude, la paraffine et la cire d'abeille naturelle ont été sélectionnées en raison de leur disponibilité sur le marché.

2.3.1 La paraffine :

La paraffine est un hydrocarbure saturé, solide, blanc et inodore, obtenu à partir du pétrole brut par distillation sous vide.

Elle est largement utilisée dans diverses industries (cosmétique, pharmaceutique, alimentaire et fabrication de bougies) en raison de sa stabilité chimique et de son inertie. Elle constitue également un matériau efficace pour le stockage d'énergie thermique [18].

Tableau 2.1 : propriétés thermiques de la paraffine étudiée [18].

Température de fusion (°C)	L_h (kJ/kg)	C_p (KJ/Kg.K)	λ (W/m.°C)	ρ (Kg/m ³)
45-51	189	2	0.2	744

2.3.2 La cire d'abeille :

La cire d'abeille est une substance naturelle produite par les abeilles pour la construction des rayons des ruches.

Elle est utilisée dans de nombreux domaines (cosmétique, alimentaire, artisanat) en raison de ses propriétés protectrices, hydratantes et écologiques. Elle représente une alternative naturelle intéressante aux matériaux synthétiques, bien que son coût puisse être relativement élevé [19].

Tableau 2.2 : propriétés thermiques de la cire d'abeille étudiée [19].

Température de fusion (°C)	L_h (kJ/kg)	C_p (KJ/Kg.K)	λ (W/m.°C)	ρ (Kg/m ³)
62.95	242.8191	0.476	0.41	970

2.3.3 L'huile de soja :

L'huile de soja est une huile végétale renouvelable et biodégradable présentant des propriétés thermo physiques intéressantes pour les applications de stockage et de transfert de chaleur. Grâce à sa capacité calorifique relativement élevée et à sa disponibilité sur le marché, elle constitue une alternative prometteuse aux fluides conventionnels dans les systèmes thermiques. Son utilisation contribue également à la réduction de l'impact environnemental des installations énergétiques [20] .

Tableau 2.3 : Propriétés thermophysiques de l'huile de soja [21]

Température de fusion (°C)	Cp (KJ/Kg. K)	λ (W/m.°C)	ρ (Kg/m ³)
-16 à -12	1.97	0.17	920

2.3.4 Le verre :

Le verre est largement utilisé dans les systèmes solaires et les dispositifs expérimentaux en raison de sa forte transparence au rayonnement solaire et de sa bonne stabilité thermique. Il permet le passage du rayonnement incident tout en contribuant à l'effet de serre à l'intérieur des enceintes, ce qui favorise l'accumulation de chaleur et améliore les performances thermiques du système.[21]

Tableau 2.4 : Propriétés thermo physiques du verre [21]

Cp (kJ/kg .K)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	Émissivité (ϵ)	Transmittance solaire (τ)
0.84	0.96	2500	0,84	0,85 – 0,90

Chapitre 03 : Méthodologie expérimentale

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale adoptée dans le cadre de cette étude, structurée en deux parties principales. La première partie est consacrée à la description détaillée du protocole de préparation des échantillons de matériau à changement de phase (MCP), en mettant l'accent sur les étapes de formulation, de mélange et de conditionnement, ainsi que sur les précautions nécessaires pour garantir l'homogénéité et la reproductibilité des échantillons. La seconde partie décrit les différentes étapes de conception et de réalisation du dispositif expérimental, incluant l'assemblage des composants, l'instrumentation, ainsi que les procédures de mise en œuvre des essais. Cette organisation vise à assurer une compréhension claire et rigoureuse des conditions expérimentales, permettant ainsi de garantir la fiabilité et la validité des résultats obtenus.

3.1 Première partie : Protocole de préparation des échantillons à base de mélange de MCP et d'huile de soja

3.1.1 Objectif :

Préparer des échantillons homogènes à base de matériau à changement de phase (MCP) (cire d'abeille) mélangé avec de l'huile de soja, afin d'obtenir des propriétés thermiques optimales, notamment un intervalle de changement de phase adapté pour le stockage d'énergie thermique.

Matériels et équipements :

- Balance de précision
- Agitateur magnétique chauffant
- Bécher en verre
- Thermomètre ou sonde de température
- Le MCP
- Huile de soja

3.1.2 Procédure expérimentale :

Dans un premier temps, les pourcentages massiques des différents composants ont été vérifiés afin de définir la composition optimale des échantillons, garantissant un intervalle de changement de phase adéquat.

Ensuite, les quantités nécessaires de MCP ont été pesées avec précision à l'aide d'une balance analytique. Parallèlement, la quantité requise d'huile de soja a été pesée séparément afin d'assurer le respect des proportions définies.

Le MCP a ensuite été introduit dans un bécher placé sur un agitateur magnétique chauffant. Le système a été réglé à une température de 80 °C avec une vitesse d'agitation de 1000 tr/min, permettant d'assurer une fusion complète du MCP.

Une fois la cire complètement fondue, l'huile de soja a été ajoutée progressivement dans les mêmes conditions de température et d'agitation. Le mélange a été maintenu sous agitation continue jusqu'à l'obtention d'une texture crémeuse, homogène et stable, indiquant une bonne dispersion des composants.

Enfin, le mélange obtenu a été coulé dans des moules adaptés afin d'être utilisé lors des essais thermiques.

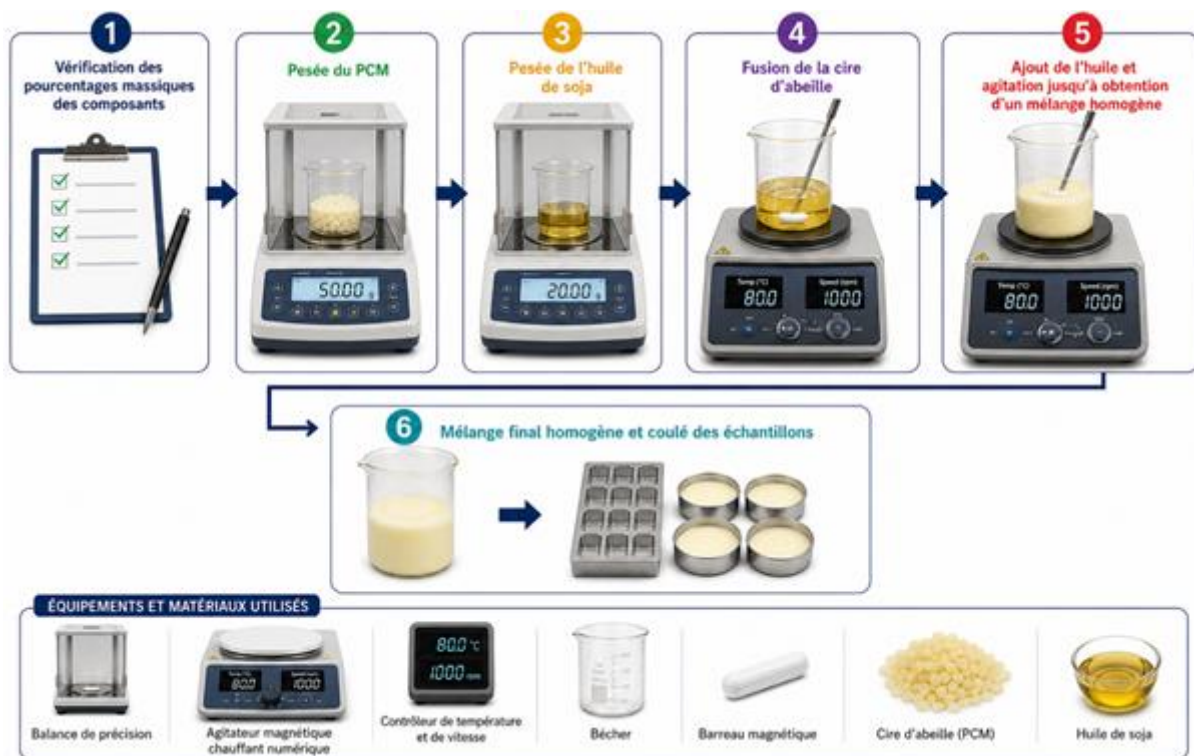


Figure 3.1 : Schéma du processus de préparation des échantillons.

3.1.3 Préparation des échantillons de MCP :

Pour préparer les échantillons contenant le MCP, nous avons utilisé un mélange homogène composé de paraffine RT50, la cire d'abeille et d'huile de soja. Différentes quantités de ce mélange ont été introduites dans une enveloppe en verre, afin d'étudier l'influence de la masse du MCP sur le comportement thermique du système.

Chapitre 3 : Méthodologie expérimentale

Les échantillons ont été préparés en suivant les étapes suivantes :

3.1.4 Préparation des différents matériaux :

Nous avons préparé les constituants du MCP hybride, à savoir la paraffine, la cire d'abeille et l'huile, puis ces constituants ont été introduits dans un récipient approprié afin d'obtenir un mélange homogène avant leur utilisation dans le dispositif expérimental.



MCP



Balance de précision



Agitateur magnétique chauffant



Bécher en verre



Huile de soja



Thermomètre ou sonde de température

Figure 3.2 : Matériels et équipements.

3.1.5 Mélange d'une quantité précise d'huile avec du MCP :

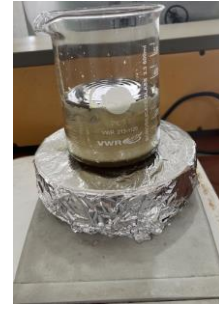
Le MCP hybride a été préparé par agitation continue jusqu'à l'obtention d'un mélange liquide homogène et stable, comme illustré à la Figure 3.3



Pesée du MCP



Pesée de l'huile de soja



Fusion de la cire d'abeille



Ajouter d'huile



**Agitation jusqu'à obtention
un mélange homogène**



**Mélange final homogène et
coulé de l'échantillon**

Figure 3.3 : Procédure expérimentale

3.1.6 Coulage et conditionnement des échantillons :

Après l'élaboration du MCP hybride à l'état liquide, le mélange a été coulé dans des moules adaptés. Les échantillons ainsi obtenus ont été maintenus à température ambiante ($\approx 17^{\circ}\text{C}$) pendant 24 heures, afin de permettre leur stabilisation et leur homogénéisation.

Cette phase de conditionnement est essentielle pour garantir la reproductibilité des résultats expérimentaux et assurer une caractérisation fiable des propriétés thermo-physiques du système.



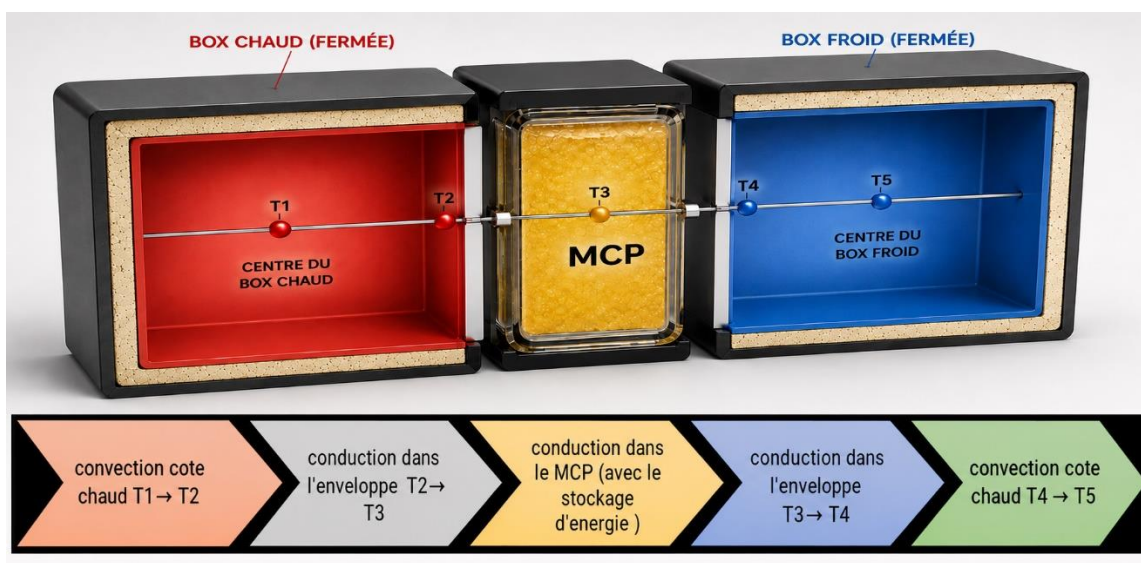
Figure 3.4 : Les échantillons réalisés pour la mesure des propriétés thermo-physiques.

3.2 Deuxième partie : Description du dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental utilisé pour cette étude est constitué de deux enceintes fermées, une enceinte chaude et une enceinte froide, séparées par un mur central composite. Ce mur est formé de deux plaques de brique de verre encadrant une couche de matériau à changement de phase (MCP), permettant d'analyser le stockage et le transfert thermique à travers une structure multicouche.

Le box chaud est chauffé à l'aide d'une ampoule contrôlée par un régulateur de température fixé à 50 °C, ce qui entraîne une variation temporelle de la température de l'air à l'intérieur du compartiment. En revanche, Le box froid est maintenue à une température relativement basse et stable afin de créer un gradient thermique entre les deux milieux. Le transfert thermique s'effectue successivement par convection dans l'air des enceintes, puis par conduction à travers les couches solides (brique de verre et MCP), avec stockage d'énergie au niveau du matériau à changement de phase.

Plusieurs points de mesure de température sont positionnés stratégiquement le long de l'axe horizontal du système : au centre de box chaud (T_1), à la surface interne de la brique côté chaud (T_2), au centre du MCP (T_3), à la surface interne de la brique côté froid (T_4) et au centre de box froide (T_5). Ces mesures permettent de suivre l'évolution du champ thermique et d'analyser les mécanismes de transfert et de stockage de chaleur dans le système.



(a)



(b)

Figure 3.5 : (a) Système expérimental et emplacements de mesure et (b) photo expérimentale.

- **Equipement nécessaire :**

Banc didactique comprenant :

- ✓ Module d'entrées analogiques 24 bits, 4 voies, RTD 100 Ω .
- ✓ Kit de connexion haute tension avec serre-câble, borné.
- ✓ Compact DAQ châssis (4 Slot ENET).
- ✓ Kit de montage sur bureau pour châssis compact RIO.
- ✓ Les sondes PT 100 : RTD 3 fils.
- ✓ Micro-ordinateur.
- ✓ Logiciel LabVIEW signal Express version 13.0.
- ✓ Enveloppe de verre
- ✓ Polyester
- ✓ Plaque de plâtre
- ✓ Scotch thermique
- ✓ Régulateur de température
- ✓ Source de chaleur (ampoule thermique)

Chapitre 3 : Méthodologie expérimentale



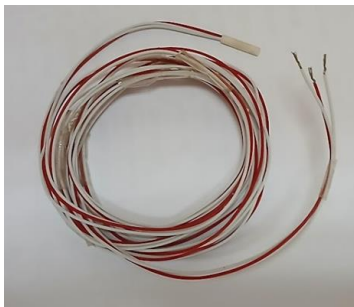
Module d'entrées analogiques



Kit de connexion haute tension avec
serre-câble, borné



Compact DAQ chassis (4
Slot ENET).



Les sondes PT 100 : RTD 3 fils.



Micro-ordinateur.



Logiciel LabVIEW signal
Express version 13.0.



Enveloppe de verre



Régulateur de température



Source de chaleur (ampoule
thermique)



Polyester



Plaque de plâtre



Scotch thermique

Figure 3.6 : Matériels et équipements de banc essais didactique.

3.2.1. Préparation du box froid :

La boîte froide est également un compartiment isolé thermiquement, mais sans aucune source de chauffage. Elle est destinée à recevoir la chaleur transférée depuis la boîte chaude à travers la paroi contenant le MCP. Un capteur de température est placé à l'intérieur pour mesurer les variations de température. La bonne isolation de la boîte permet d'obtenir des résultats expérimentaux plus précis.



Figure 3.7 : Préparation du box froid

3.2.2 Préparation du box chaud :

Le box chaud est un compartiment isolé thermiquement, conçu pour produire une température élevée à l'aide d'une source de chaleur (lampe). Cette source permet de chauffer progressivement l'air à l'intérieur de la boîte. La température de la lampe est contrôlée à l'aide d'un régulateur, de manière à ne pas dépasser 55 °C. Un capteur de température est installé afin de suivre l'évolution thermique durant l'expérience. La boîte est bien fermée pour limiter les pertes de chaleur vers l'extérieur.



Figure 3.8 : Préparation du box chaud

3.2.3 Préparation de l'enveloppe en verre :

Le vitrage a été réalisé en fixant un cadre en bois rigide de dimensions adaptées (15*15*2). Une première plaque de verre a été installée sur le cadre à l'aide de silicone afin d'assurer une bonne adhérence et une étanchéité efficace. Ensuite, des entretoises ont été placées à l'intérieur pour maintenir un espace régulier entre les deux vitres. Le matériau à changement de phase (MCP), préalablement chauffé jusqu'à l'état liquide, a été introduit dans cet espace. Après cela, la deuxième plaque de verre a été posée et fixée également avec de la silicone. Enfin, les bords ont été soigneusement scellés à l'aide de ruban adhésif et de mastic afin d'éviter toute fuite et d'assurer une bonne isolation thermique.

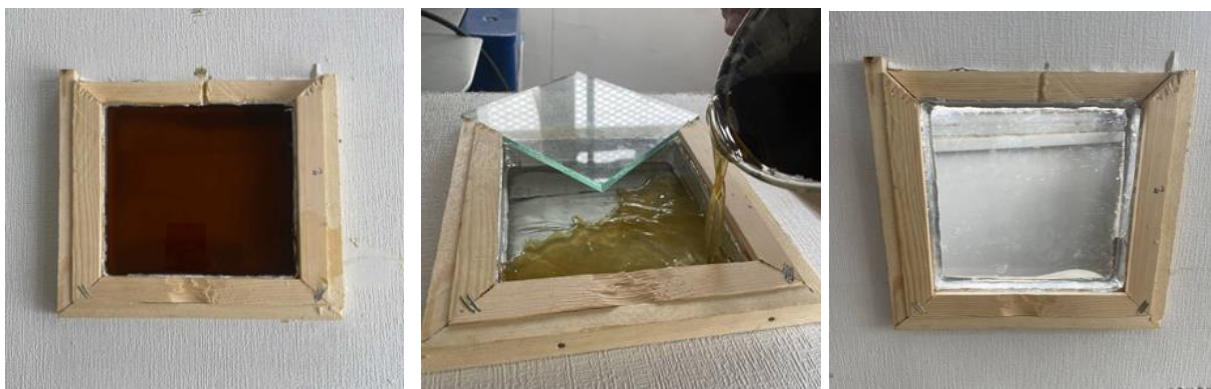


Figure 3.9 : Montage du système à double vitrage avec MCP

3.2.4 Description du dispositif expérimental :



Figure 3.10 : Schématisation du dispositif expérimental.

3.2.4.1 Section d'essai:

3.2.4.1.1 Cas de référence du dispositif expérimental :

Le dispositif de référence, sans MCP, comprend une paroi en verre vide équipée de trois capteurs thermiques pour analyser le transfert de chaleur. Il sert de base de comparaison pour évaluer l'effet du MCP dans les essais suivants (Figure 3.11).



Figure 3.11 : Montage expérimental avec position des capteurs de température (cas de référence)

3.2.4.1.2 L'injection le MCP dans l'enveloppe de verre :

Le dispositif expérimental est composé de deux boîtes séparées par une paroi en verre contenant le matériau étudié (MCP).



Figure 3.12 : les composants de section d'essais

3.2.4.2 Acquisition des données:

Le dispositif expérimental est muni de capteurs de température de type RTD, offrant une plage de mesure comprise entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les données sont collectées à l'aide d'un système CompactDAQ, relié par USB et compatible avec plusieurs modules.

Au cours des essais, six modules de mesure de température ont été employés, chacun comportant six entrées pour les sondes de capteurs.

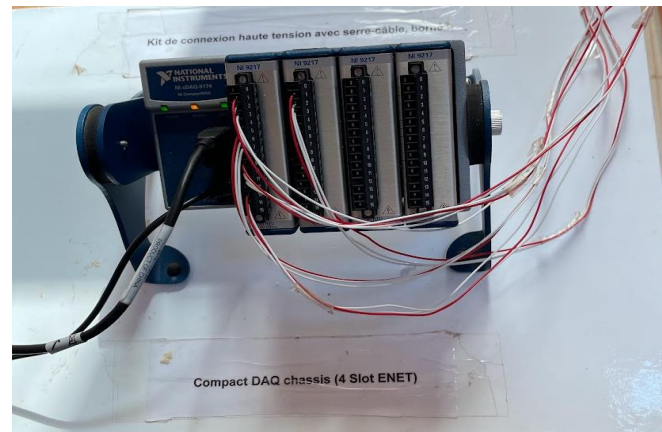
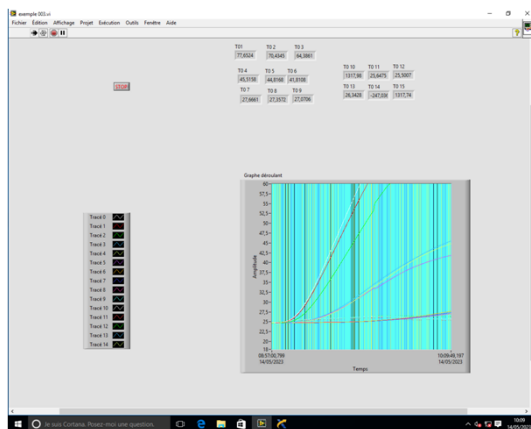


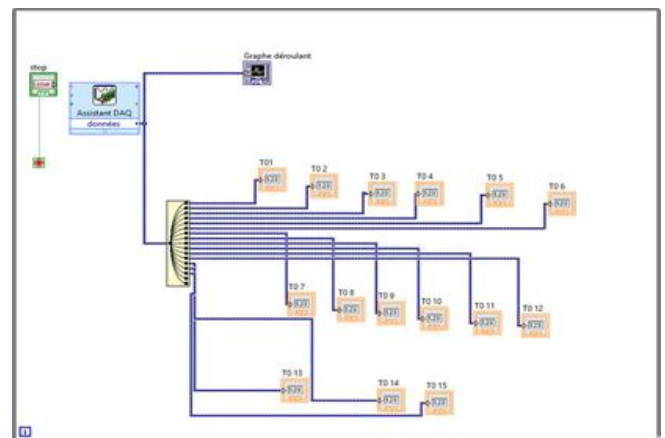
Figure 3.13 : Raccordement des thermocouples (RTD) avec Data d'acquisition NI.

3.2.4.3 Micro-ordinateur et logiciel :

Un micro-ordinateur associé au logiciel LabVIEW est utilisé pour le contrôle de l'instrumentation. L'interface du programme a été spécialement conçue pour assurer la gestion et le pilotage de l'ensemble des instruments utilisés dans cette étude.



(a)



(b)

Figure 3.14 : Schéma de principe, a) Interface LABVIEW développée dans le cadre de cette étude et b) Schéma utilisée dans le cadre de cette étude par logiciel LabVIEW.

3.2.4.4 Mise en marche :

- a) Préparation de section d'essai : Les capteurs de température ont été placés en des points stratégiques du dispositif, notamment au centre de chaque boîte ainsi qu'au niveau du milieu de la paroi vitrée sur ses deux faces. Cette configuration permet de mesurer avec précision l'évolution de la température dans chaque zone et aux interfaces du système.



Figure 3.15 : Préparation de section d'essai (Mise en marche).

- b)** Remplacement des modules d'entrée analogique RTD dans le kit de connexion.
- c)** Connexion du kit de mesure au PC à l'aide de câbles de liaison.
- d)** Réalisation du schéma de l'étude sous le logiciel LABVIEW
- e)** Lancement de NI MAX (Measurement & Automation Explorer) pour la configuration et le test des modules d'acquisition.
- f)** Allumage de la lampe comme source de chauffage.
- g)** Acquisition des résultats lors des phases de charge, lorsque la température atteint la température de fusion du MCP, et de décharge lorsque la température revient à l'état initial
- h)** Traitement des données de température à l'aide du logiciel LABVIEW
- i)** Tracé des courbes et interprétation des résultats obtenus.

Conclusion Générale et Perspectives

1. Conclusion générale :

Ce travail a permis de développer, de caractériser et de valider expérimentalement un système de stockage thermique passif par chaleur latente, basé sur l'intégration d'un MCP biosourcé dans une paroi composite de type verre/MCP/verre. L'approche adoptée se distingue par son caractère à la fois écologique — grâce à l'utilisation de matières premières locales et renouvelables — et performant sur le plan thermique.

Les investigations expérimentales ont démontré que la paroi composite verre/MCP biosourcé se comporte comme un régulateur thermique passif efficace. Les principaux résultats peuvent être synthétisés comme suit :

- Atténuation thermique : réduction de l'excursion thermique côté froid de plus de 75 %, confirmant le rôle tampon du MCP.
- Déphasage thermique : un retard de 40 à 90 minutes entre la source et le puits thermique, paramètre clé de l'inertie thermique en bâtiment.
- Capacité de stockage : 69,3 kJ stockés dont 73,6 % sous forme latente, avec une efficacité de restitution de 95,4 %.
- Stabilité cyclique : répétabilité excellente sur 24 heures d'opération (écarts $< \pm 1$ °C), validant la tenue thermomécanique du composite.

L'ensemble de ces performances confirme l'aptitude du MCP biosourcé à formuler des parois à haute inertie thermique, constituant une alternative viable et durable aux solutions conventionnelles pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, notamment dans les régions à fort ensoleillement comme l'Algérie.

2. Perspectives :

Les résultats encourageants obtenus dans ce travail ouvrent plusieurs axes de recherche et de développement qui mériteront d'être approfondis dans des travaux futurs :

- i. Caractérisation thermo-physique approfondie. L'utilisation d'appareils de mesure spécialisés (DSC, conductivimètre à fil chaud, rhéomètre) permettra de déterminer avec précision la chaleur latente de fusion, la conductivité thermique et la viscosité dynamique du MCP biosourcé formulé, renforçant ainsi la rigueur métrologique de l'étude.
- ii. Optimisation de la formulation. Une étude paramétrique sur les ratios massiques cire d'abeille / huile de soja / paraffine RT50 permettrait d'affiner la température de fusion cible, d'élargir la

plage de changement de phase et d'accroître la densité d'énergie stockée, en vue d'une adaptation aux différentes zones climatiques algériennes.

iii. Modélisation numérique couplée. Le développement d'un modèle numérique de transfert thermique couplé (conduction–convection–changement de phase), validé sur les données expérimentales acquises, constituerait un outil prédictif puissant pour l'optimisation géométrique de la paroi (épaisseur, disposition des couches) et la simulation sous différents scénarios climatiques.

iv. Amélioration de la conductivité thermique. L'incorporation de nano-charges à haute conductivité thermique (nanotubes de carbone, nanoparticules d' Al_2O_3 ou de graphène) dans la matrice MCP constitue une voie prometteuse pour améliorer les cinétiques de charge et de décharge thermique du système.

v. Étude de durabilité à long terme. Une analyse de la stabilité chimique et thermique du MCP biosourcé sur un grand nombre de cycles de fusion/solidification (>1000 cycles) est indispensable pour valider son comportement en conditions réelles d'utilisation et garantir la durée de vie de la paroi composite.

vi. Intégration à l'échelle du bâtiment. Une validation en conditions réelles, à travers la construction d'une cellule test instrumentée à l'échelle 1:1 exposée aux conditions climatiques locales (région d'Oran), permettrait de quantifier les économies d'énergie réelles et de justifier l'intégration de ce système dans les réglementations thermiques nationales (DTR C3-2).

vii. Analyse du cycle de vie (ACV) et étude technico-économique. Une évaluation environnementale (ACV) et une analyse coût-bénéfice complèteront l'étude en quantifiant le bilan carbone du MCP biosourcé par rapport aux PCM fossiles et en estimant le retour sur investissement pour les acteurs du bâtiment.

Référence Bibliographique :

- [1] R. Saxena, D. Rakshit, S.C. Kaushik, Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: a sustainable building solution, *Solar Energy* 183 (2019) 276–284.
- [2] G. Evola, L. Marletta, F. Sicurella, A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings, *Building and Environment* 59 (2013) 517–527 .
- [3] F. Kuznik, D. David, K. Johannes, J.J. Roux, A review on phase change materials integrated in building walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 379–391.
- [4] B. Lamrani, K. Johannes, F. Kuznik, Phase change materials integrated into building walls: an updated review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140 (2021) 110751.
- [5] J. Giro-Paloma, M. Martínez, L.F. Cabeza, A.I. Fernández, Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53 (2016) 1059–1075.
- [6] L. Boussaba, A. Foufa, S. Makhlouf, G. Lefebvre, L. Royon, Elaboration and properties of a composite bio-based PCM for an application in building envelopes, *Construction and Building Materials* 185 (2018) 156–165.
- [7] C. Eller, M. Rida, K. Boudier, C. Otoni, G. Celani, L. Labaki, S. Hoffmann, Climate-based analysis for the potential use of coconut oil as phase change material in buildings, *Sustainability* 13 (2021) 10731
- [8] T. Trisnadewi, E. Kusriani, D.M. Nurjaya, N. Putra, T.M.I. Mahlia, Experimental analysis of natural wax as phase change material by thermal cycling test using thermoelectric system, *Journal of Energy Storage* 40 (2021) 102703.
- [9] A.R. Abdulmunem, P.M. Samin, K. Sopian, S. Hoseinzadeh, H.A. Al-Jaber, D.A. Garcia, Waste chicken feathers integrated with phase change materials as new inner insulation envelope for buildings, *Journal of Energy Storage* 56 (2022) 106130.
- [10] A.R. Abdulmunem, H.M. Hamed, P.M. Samin, I.I. Mazali, K. Sopian, Thermal management of lithium-ion batteries using palm fatty acid distillate as a sustainable bio-phase change material, *Journal of Energy Storage* 73 (2023) 109187.
- [11] M.A. Izquierdo-Barrientos, J.F. Belmonte, D. Rodríguez-Sánchez, A.E. Molina, J.A. Almendros-Ibáñez, A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM), *Applied Thermal Engineering* 47 (2012) 73–85.
- [12] K. Pielichowska, K. Pielichowski, Phase change materials for thermal energy storage, *Progress in Materials Science* 65 (2014) 67–123.

- [13] Zalewski L et al. Caractérisation thermophysique du comportement de matériaux à changement de phase à échelle macro. Congrès Français de Thermique. Touquet, France. 2010. pp : 1-6.
- [14] Jobli, M. Numerical and experimental studies of a capillary-tube embedded PCM component for improving indoor thermal environment. University of reading. 2019. pp : 466-477.
- [15] ARRABI Chahrazed et al. Étude expérimentale du transfert thermique d'une paroi multicouche en présence de matériau à changement de phase (MCP). Mémoire de fin d'étude spécialité énergétique, Université de Mostaganem 2022. pp : 1-63.
- [16] H.Mehling et L.F.Cabeza, Heat and cold storage with PCM, Springer - Verlag Berlin Heidelberg ed 2008.
- [17] Abhat A.. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. Sol. Energy, vol. 30, no. 4, pp. 313-332, 1983.
- [18] Salwa BOUADILA et al. Experimental study of latent heat storage in a vacuum solar collector. Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 101 - 2011 ISSN 1775-335X - ISBN 2-910239-75-6, Ed. SFGP, Paris, France.
- [19] Sekar Sinaringati et al. The utilization of paraffin and beeswax as heat energy storage in infant incubator. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. 11 pp : 800-804.
- [20] F. D Gunstone. Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses. Wiley-Blackwell. ISBN:978-1-4443-3268-1 (2011).
- [21] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (8th Edition). Wiley.
- [22] Sharma, S. D., Kitano, H., & Sagara, K. (2015). Phase change materials for low temperature solar thermal applications. Research Reports of the Faculty of Engineering, Mie University, 29, 31–64.
- [23] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, 23(3), 251–283.
- [24] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy Conversion and Management, 45(9–10), 1597–1615.
- [25] Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(9), 1913–1965.

- [26] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- [27] Barreneche, C., Solé, A., Miró, L., Martorell, I., Fernández, A. I., & Cabeza, L. F. (2013). Study on differential scanning calorimetry analysis with two operation modes and organic and inorganic PCM. *Thermochimica Acta*, 553, 23–26.
- [28] Barreneche, C., Solé, A., Miró, L., Martorell, I., Fernández, A. I., & Cabeza, L. F. (2013). Study on differential scanning calorimetry analysis with two operation modes and organic and inorganic PCM. *Thermochimica Acta*, 553, 23–26.
- [29] Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). *Heat and Cold Storage with PCM*. Springer, Berlin.
- [30] BENGRIRA Hayet, MAATALLAH Abdelhak Zakaria et MEDJAHED Bendida. Étude expérimentale sur l'efficacité d'un échangeur de chaleur compact à tubes spirales à ailettes rempli de matériau à changement de phase pour le stockage d'Énergie thermique. mémoire de fin d'étude Master académique en génie mécanique, spécialité Energétique, Université de Mostaganem, faculté des sciences et de la technologie, Département de génie mécanique (2023 / 2024).
- [31] Cengel, Y.A. & Ghajar, A.J. (2020). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 6th Edition. McGraw-Hill Education, New York. ISBN: 978-1259-86926-3.
- [Chapitre 3 : Conduction en régime permanent — résistances thermiques, murs composites]
- [32] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L. & Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. ISBN: 978-0470-50197-9. [Chapitre 3 : Conduction unidimensionnelle — loi de Fourier, flux de chaleur surfacique]
- [33] Ozisik, M.N. (1993). *Heat Conduction*, second Edition. John Wiley & Sons, New York. ISBN: 978-0471-53256-9. [Chapitres 1–4 : Conduction transitoire, nombres adimensionnels de Biot et Fourier, diffusivité thermique]
- [34] Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack, S.A.K. & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>
- [Modélisation du flux de chaleur dans les systèmes MCP]
- [35] Zalba, B., Marín, J.M., Cabeza, L.F. & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8) [Enthalpie de fusion, modèle enthalpique, propriétés thermophysiques des MCP]
- [36] Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005> [Calcul de l'énergie stockée sensible + latente, intégration numérique]

[37] Lachheb, M., Karkri, M., Albouchi, F., Mzali, F. & Nasrallah, S.B. (2014). Thermophysical properties estimation of paraffin/graphite composite phase change material using an inverse method. *Energy Conversion and Management*, 82, 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.026> [Méthode d'intégration numérique des différences finies pour le bilan enthalpique du MCP]

[38] Dincer, I. & Rosen, M.A. (2011). *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Chichester. ISBN: 978-0470-74706-3.

[39] Mehling, H. & Cabeza, L.F. (2008). *Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction into Basics and Applications*. Springer, Berlin. ISBN: 978-3540-68556-2.