



N° d'ordre : M...../GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

ÉTUDE EXPERIMENTALE DU TRANSFERT THERMIQUE D'UNE PAROI MULTICOUCHE EN
PRESENCE DE MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE (MCP)

Présenté par :

❖ ARABI Chahrazed

❖ BENABDALLAH Amina

Soutenu le 13/07/2022 devant le jury composé de :

Président	Pr. HOUAT Samir	Université de Mostaganem UMB
Examineur	Dr. SAHRAOUI Nassim Mahfoud	Université de Mostaganem UMB
Encadreur	Dr. MEDJAHED Bendida	Université de Mostaganem UMB

Année Universitaire : 2021 / 2022

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 **Dr. MEDJAHED Bendida** pour ces 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 **Pr. HOUAT Samir** et le membre de jury **Dr. SAHRAOUI Nassim Mahfoud** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et 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

Je dédie ce travail aux personnes

Les plus chères pour moi :

Ma Mère, que Dieu la protège.

A mon père mon modèle

A mes frères

Surtout ma sœur aïcha

Et toute ma famille,

A mon binôme Arabi Chahrazed,

BENABDALLAH Amina

Je dédie ce travail aux personnes

Les plus chères pour moi :

Ma Mère, que Dieu la protège.

A mes frères

Et toute ma famille,

A mon binôme Benabdallah Amina,

ARABI Chahrazed

Dédicace aussi à mes amis et tout les gens qui sont proche de moi

La liste des figures :

La liste des figures :

Figure	Description	Page
Chapitre 02 :		
Figure.2.1	Le phénomène de conduction sur une paroi.	11
Figure.2.2	Le phénomène de convection sur une paroi.	12
Figure.2.3	Le phénomène de rayonnement sur une paroi.	12
Figure.2.4.	Résistance thermique d'une paroi multicouche.	13
Chapitre 03 :		
Figure 3.1	Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible.	17
Figure 3.2	Classification des MCP proposée par Abhat.	19
Figure 3.3	La cire d'abeille (MCP).	20
Chapitre 04 :		
Figure 4.1	Schématisation du dispositif expérimental.	23
Figure 4.2	Photo du dispositif expérimental.	23
Figure 4.3	les composants de Section d'essais.	24
Figure 4.4	La résistance chauffante.	25
Figure 4.5	Raccordement des thermocouples (RTD) avec Data d'acquisition NI.	26
Figure 4.6	Interface LABVIEW développée dans le cadre de cette étude.	26
Figure 4.7	Schéma utilisés dans le cadre de cette étude par logiciel LabVIEW	27
Chapitre 05 :		
Figure 5.1	Emplacements des thermocouples sur le mur, (a) Surface du côté les couches de mur et (b) Surface du côté de l'entrefer.	32
Figure 5.2	Configuration 01 pour le cas référence ; a) avec lame d'air, b) Avec polystyrène.	33
Figure 5.3	Configuration 2 pour une épaisseur $e_{MCP} = 5, 10 \text{ et } 15 \text{ mm}$; a) avec lame d'air, b) Avec polystyrène.	34
Figure 5.4	Configuration 3 pour une épaisseur $e_{MCP} = 5, 10 \text{ et } 15 \text{ mm}$; a) avec lame d'air, b) Avec polystyrène.	34

La liste des figures :

Figure 5.5	Position les capteurs de température concernant : 1) la première configuration et 2) les autres configurations.	36
Figure 5.6	Variation des températures dans le temps de quatre positions; a) avec lame d'air, b) Avec polystyrène.	36
Figure 5.7	Variation des flux de chaleur par unité de surface dans le temps; a) avec lame d'air, b) Avec polystyrène.	37
Figure 5.8	Variation de la température en fonction d'épaisseur de cinq température ; a) avec lame d'air, b) Avec polystyrène.	37
Figure 5.9	Comparaison la variation de la température en fonction d'épaisseur de lame d'air avec polystyrène de quatre températures maximale à l'extérieure.	38
Figure 5.10	Variation des températures dans le temps de cinq positions pour le cas de l'épaisseur $e = 10$ mm; a) avec lame d'air, b) Avec polystyrène.	41
Figure 5.11	Variation le flux de chaleur par unité de surface dans le temps pour le cas de l'épaisseur $e = 10$ mm; a) avec lame d'air, b) Avec polystyrène.	42
Figure 5.12	Configuration 2 ; la variation de la température en fonction de l'épaisseur de mur à $T_{p-outlet}$ égale : 35, 40 et 45 °C ; a) avec lame d'air, b) Avec polystyrène.	44
Figure 5.13	Configuration 3 ; la variation de la température en fonction de l'épaisseur de mur à $T_{p-outlet}$ égale : 35, 40 et 45 °C ; a) avec lame d'air, b) Avec polystyrène.	45
Figure 5.14	Variation de la température en fonction du temps dans chaque remplacement des thermocouples dans le mur (voir la figure 5.5), avec lame d'air	48
Figure 5.15	Variation le flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps avec lame d'air.	48
Figure 5.16	Variation de la température en fonction du temps dans chaque remplacement des thermocouples dans le mur (voir la figure 5.5), avec polystyrène.	50
Figure 5.17	Variation le flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps avec polystyrène.	50
Figure 5.18	Variation de la température en fonction du temps dans la période de charge et décharge, 2) configuration 2, 3) configuration 3, a) avec lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 10 mm.	52
Figure 5.19	Variation de flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps dans la période de charge et décharge, a) avec lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 10 mm. d'air.	53

La liste des figures :

		54
Figure 5.20	Variation de la température en fonction du temps dans la période de charge et décharge, 2) configuration 2, 3) configuration 3, a) avec lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 15 mm	
Figure 5.21	Variation de flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps dans la période de charge et décharge, a) avec lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 15 mm.	55
Figure 5.22	Variation de la température de la couche de MCP en fonction du temps dans la période de charge et décharge, 2) configuration 2, 3) configuration 3, a) avec lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 10 mm.	57
Figure 5.23	Variation de la température de la couche de MCP en fonction du temps dans la période de charge et décharge, 2) configuration 2, 3) configuration 3, a) avec lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 10 mm.	57

La liste des tableaux :

La liste des tableaux :

Tableau	Description	Page
	Chapitre 05 :	
Tableau 5.1	Les propriétés thermiques de la les matériaux des murs en maçonnerie	31

NOMENCLATURE

Nomenclature :

SYMBOLES	UNITES	SIGNIFICATION
A	m^2	Surface
Cp	J/Kg.K	Chaleur spécifique
e	m	Epaisseur
$E_{sensible}$	J	Stockage sensible
$E_{latente}$	J	Stockage latente
Hr	J/mol	Chaleur de réaction
m	Kg	La masse
Q	J	Quantité de chaleur
R	$m^2.K/W$	Resistance thermique
T	$^{\circ}C$	Température
Tpo	$^{\circ}C$	Température de la paroi extérieure
Tpi	$^{\circ}C$	Température de la paroi interne
V	m/s	Vitesse
U	$W/m^2.K$	Coefficient de transfert thermique
ϕ	W/m^2	Flux de chaleur par unités se surface
λ	$W/m.K$	Conductivité thermique
P	Kg/m^3	Volume massique
Δh	J/kg	La variation d'enthalpie
ΔT	$^{\circ}C$	La variation de température

SOMMAIRE

Sommaire

Remerciement	i
Dédicace	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	vi
Nomenclatures	vii
Résumé	01
Introduction générale	04

Chapitre 01 : Etude bibliographie

1. Étude bibliographie	05
------------------------	----

Chapitre 02 : Le transfert de chaleur

2.1 Qu'est-ce que le transfert de chaleur	11
2.1.1 Transfert de chaleur par conduction	11
2.1.2 Transfert de chaleur par convection	11
2.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement	12
2.2 Le flux chaleur	13

Chapitre 03 : Stockage thermique et le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

3.1 Stockage thermique	15
3.1.1. Stockage sensible	15
3.1.2. Stockage latent	16
3.1.3. Stockage thermochimique	18
3.2. Le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)	19
3.2.1. Matériaux à Changement de Phase (MCP)	19
3.2.2. Types de MCP	19
3.2.3. Propriétés chimiques et physiques particulières de la cire d'abeille	20
3.2.4. Propriétés de la cire d'abeille	20
3.2.4. Mur de stockage avec MCP	20

Chapitre 04 : Procédure expérimentale

4.1. Procédure expérimentale	22
4.1.1 But	22
4.1.2. Equipement nécessaire	22
4.1.3. Mode opératoire	22
4.2. Fonctionnement théorique	23
4.2.1. Description du dispositif expérimentale	23
4.2.2 Schéma de principe	27
4.2.3 Mise en marche	27

Chapitre 05 : Résultats et discussion

5. Introduction	31
5.1 Méthodologie	31
5.2 Objectifs	32
5.3 Les hypothèses du travail	35
5.4 Résultats et discussions	35

Conclusion générale

Conclusion	58
------------	----

Étude expérimentale du transfert thermique d'une paroi multicouche en présence de matériau à changement de phase (MCP)

Résumé :

En fait, dans l'Union européenne, les bâtiments représentent environ 40 % et plus de ça en Algérie de la consommation d'énergie finale totale et sont à l'origine d'une grande partie des émissions globales de carbone. Cependant, le secteur du bâtiment peut également être une source considérable d'économies d'énergie. Dans ce travail nous avons fait une étude expérimentale du transfert thermique d'une paroi multicouche en présence du matériau à changement de phase (MCP). Le présent travail porte sur le développement d'éléments de façade pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. La solution proposée consiste en de nouveaux murs comprenant des matériaux à changement de phase (MCP), nous avons choisis un modèle géométrique avec différentes épaisseurs et positions de la couche MCP du mur pour l'étude expérimentale. Des expériences seront réalisées sur le comportement thermique d'un système collecteur mûr de stockage utilisant du MCP. Des plaques de MCP seront fixées à l'intérieur du mur pour augmenter le stockage de la chaleur. Les tests seront effectués pendant une période de charge de trois heures et une période de décharge de quatre heures, respectivement. Les dimensions du MCP du système de mur de stockage d'essai sont de 0.5, 1.0 et 1.5 cm (épaisseur) 20 cm (largeur) 30 cm (hauteur). Les objectifs de ce travail est de connaître leurs effets sur la répartition de la température ainsi que l'effet de la position des matériaux à changement de phase (MCP) dans le mur sur la répartition de la température.

L'analyse montre que les résultats expérimentaux pour le cas que nous avons étudié est conforme par rapport à la réalité physique.

Mots clés : Stockage thermique, Matériaux à changement de phase (MCP), Mur du bâtiment, Matériaux à changement de phase (MCP), Température, flux de chaleur par unité de surface.

Experimental study of the heat transfer of a multilayer wall in the presence of phase change material (PCM)

Abstract:

In fact, in the European Union, buildings represent around 40% and more of that in Algeria of total final energy consumption and are the source of a large part of global carbon emissions. However, the building sector can also be a considerable source of energy savings. In this work we have made an experimental study of the heat transfer of a multilayer wall in the presence of phase change material (PCM). This work focuses on the development of facade elements for improving the energy efficiency of buildings. The proposed solution consists of new walls comprising phase change materials (PCM), we have chosen model geometry with different thicknesses and the positions of the wall PCM layer for the experimental study. Experiments will be carried out on the thermal behavior of a collector-disposal wall system using PCM. PCM plates will be fixed inside the wall to increase heat storage. The tests will be carried out during a charging period of three hours and a discharging period of four hours, respectively. The MCP dimensions of the test storage wall system are 0.5, 1.0 and 1.5 cm (thickness) 20 cm (width) 30 cm (height). The work objectives are to know their effect on the temperature distribution and then the effect of the position of the phase change materials (PCM) in the wall on the temperature distribution. The analysis shows that the experimental results for the case that we studied well compare to the physical reality.

Keywords: Thermal storage, Phase Change Materials (PCM), Building wall, Phase Change Materials (MCP), Temperature, heat flux per unit area.

دراسة تجريبية لانتقال الحرارة لجدار متعدد الطبقات في وجود مادة تغيير الطور (PCM)

ملخص:

في الواقع ، في الاتحاد الأوروبي ، تمثل المباني حوالي 40٪ وأكثر من ذلك في الجزائر من إجمالي الاستهلاك النهائي للطاقة وهي مصدر جزء كبير من انبعاث الكربون العالمية. ومع ذلك ، يمكن أن يكون قطاع البناء أيضًا مصدرًا كبيرًا لتوفير الطاقة. في هذا العمل قمنا بإجراء دراسة تجريبية لانتقال الحرارة لجدار متعدد الطبقات في وجود مادة تغيير الطور (PCM). يركز هذا العمل على تطوير عناصر الواجهة لتحسين كفاءة الطاقة في المباني. يتكون الحل المقترح من جدران جديدة تشتمل على مواد تغيير الطور (PCM) ، وقد اخترنا نموذجًا هندسيًا بسماعات مختلفة ومواضع طبقة PCM للجدار للدراسة التجريبية. سيتم إجراء تجارب على السلوك الحراري لنظام جدار التجميع والتخلص باستخدام PCM. سيتم تثبيت لوحات MCP داخل الجدار لزيادة تخزين الحرارة. سيتم إجراء الاختبارات خلال فترة شحن مدتها ثلاث ساعات وفترة تفريغ مدتها أربع ساعات ، على التوالي. أبعاد MCP لنظام جدار تخزين الاختبار هي 0.5 و 1.0 و 1.5 سم (سمك) 20 سم (عرض) 30 سم (ارتفاع). أهداف العمل هي معرفة تأثيرها على توزيع درجة الحرارة ومن ثم تأثير موضع مواد تغيير الطور (PCM) في الجدار على توزيع درجة الحرارة. يظهر التحليل أن النتائج التجريبية للحالة التي درسناها جيدة مقارنة بالواقع المادي.

الكلمات المفتاحية: التخزين الحراري ، مواد تغيير الطور (PCM) ، جدار المبنى ، مواد تغيير الطور (MCP) ، درجة الحرارة ، التدفق الحراري لكل وحدة مساحة.

Introduction générale

Introduction générale

La demande énergétique nationale et mondiale ne cesse d'augmenter et elle continuera à augmenter dans les prochaines décennies. Face à ce constat, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution qui permet de satisfaire les besoins mondiaux croissants tout en respectant les contraintes environnementales. Cependant, l'inconvénient de ces énergies réside dans leur production intermittente et irrégulière. Dans ce cadre, le stockage de l'énergie suscite beaucoup d'intérêt puisqu'il permet de surmonter ces inconvénients. Les matériaux à changement de phase (MCP) solide-liquide sont une réponse possible à ce problème. Ils ont la capacité de stocker et de libérer l'énergie thermique lors du passage d'une phase à une autre.

Pour cela nous cherchons à travailler sur l'amélioration des systèmes de stockage d'énergie thermique, par chaleur latente, afin d'implanter les résultats trouvés, par la suite, surtout dans le domaine de construction des murs du bâtiment (Thermique du bâtiment).

De nombreux travaux sont consacrés au développement de nouveaux systèmes de stockage, dont ils varient selon la taille de la centrale. Cependant, tous ces systèmes doivent faire un compromis entre la qualité de la solution technologique adoptée et le coût de cette dernière.

Le présent travail porte sur l'étude expérimentale du transfert thermique d'une paroi multicouche en présence du matériau à changement de phase (MCP). L'objectif de ce travail est de faire des tests sur un modèle pour différentes positions de la couche MCP dans le mur du bâtiment afin d'identifier la position optimale de la couche MCP à l'intérieur du mur.

Le contexte et les résultats de cette étude sont présentés ici en détails. Le premier chapitre a été réservé à la présentation de l'étude bibliographique sur les travaux scientifiques sur l'application des matériaux à changement de phase sur les murs du bâtiment, dans le deuxième chapitre nous avons présenté une généralité sur le phénomène du transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement. Une notion sur le stockage d'énergie et les matériaux à changement de phase (MCP) dans les murs du bâtiment est présentée dans le troisième chapitre, le quatrième chapitre a été réservé à la présentation des procédures expérimentales. Les discussions des résultats sont présentées dans le cinquième chapitre. Une conclusion générale est donnée à la fin de ce document.

Chapitre 01

Étude bibliographique

Étude bibliographique :

Cette étude concerne les modes de stockage de l'énergie thermique par la chaleur latente en utilisant des matériaux à changements de phase (MCP). Plusieurs méthodes ont été proposées pour améliorer les performances et la fiabilité de ce stockage. Dans ce chapitre, on présentera la synthèse de quelques travaux de recherche concernant ce domaine.

Xing Jin et al, ont effectué une sur l'importance de l'emplacement des MCP dans les murs des bâtiments pour une meilleure performance thermique. La performance thermique des murs avec et sans MCPTS a été évaluée expérimentalement à l'aide d'un simulateur de mur dynamique. Des panneaux d'isolation thermique MCP (MCPTS) ont été placés dans l'isolation des murs à différentes distances de la surface intérieure des panneaux muraux d'enceinte, et la couche limite s'est avérée être la couche limite la plus éloignée de la source de chaleur du simulateur. Évaluer à l'aide d'un simulateur de mur dynamique. Des panneaux d'isolation thermique MCP (MCPTS) ont été placés dans l'isolation des murs à différentes distances de la surface intérieure des panneaux de mur d'enceinte et la couche limite s'est avérée être la couche limite la plus éloignée de la source de chaleur du simulateur [1].

Dimos A. Kontogeorgos et al, ont effectué une étude expérimentale de firésistance des cloisons sèches multicouches systèmes intégrant des panneaux d'isolation sous vide et un changement de phase matériaux. Une étude pilote a été élaborée et mise en œuvre pour étudier sur firésistance et comportement de cloisons sèches multicouches innovantes, hautement isolées thermiquement, telles qu'ensembles incorporant des matériaux d'isolation conventionnels, VIP et MCP lorsqu'ils sont exposés à Conditions d'incendie [2].

Wenye Lin et al, ont effectué une enquête sur les performances thermiques des bâtiments avec l'intégration des matériaux à changement de phase. Si la méthode de TAGUCHI est utilisée pour déterminer le débit d'air optimal pour le collecteur PVT, l'épaisseur de la couche de MCP, le type de MCP et l'isolation supplémentaire des murs, le CTPE de la maison peut être augmenté à 70,2 %. Les résultats de l'optimisation montrent également que l'isolation supplémentaire des murs de la maison est un facteur clé affectant les performances thermiques des bâtiments améliorés MCP avec des capteurs PVT [3].

Xu Wang et al, ont fait une évaluation expérimentale sur un type de mur composite incorporant des matériaux à changement de phase à stabilisation de forme (SSMCP). Le but de cette étude est d'évaluer un mur composite-MCP innovant adapté aux zones aux étés chauds et aux hivers froids. Un matériau à changement de phase stable composé de graphite expansé, de polyéthylène haute densité et de paraffine est mélangé à du mortier de ciment pour préparer des briques de matériau à changement de phase [4].

Amirreza Fateh et al, ont effectué une étude numérique et expérimentale d'une couche d'isolation avec des matériaux à changement de phase (MCP). Plusieurs tests expérimentaux valident le modèle numérique. De plus, cet article présente la manière dont la position de la couche d'isolation MCP, dans un panneau mural typique, affecte la température et le flux de chaleur, à l'intérieur de chaque couche, dans des conditions transitoires. Les résultats montrent que, dans le cas évalué, la réduction maximale de la consommation de chaleur, d'environ 15 %, a été obtenue lorsque les MCP sont situés aux positions trois et quatre, qui sont approximativement au milieu du mur. De plus, ce type particulier de couche isolante génère un retard du flux de chaleur maximal qui est d'environ deux heures [5].

Mohamed EL Wazna et al, ont effectué une étude expérimentale et numérique sur les performances thermiques des matériaux isolants alternatifs à base de déchets textiles : Une approche par différences finies. L'étude expérimentale porte sur le développement et la caractérisation d'un nouveau matériau isolant à base de laine et d'acrylique puis teste leurs performances thermiques dans une cavité qui simule une pièce de bâtiment à échelle réduite thermiquement contrôlée [6].

Mushtaq I. Hasan et al, ont effectué une Étude expérimentale des matériaux à changement de phase pour l'isolation des bâtiments résidentiels. De nombreux cas ont été étudiés selon l'épaisseur du MCP et selon l'orientation (mur Nord, mur Sud, mur Est, mur Ouest et plafond). Les résultats obtenus ont montré une réduction de la température intérieure de la zone et une réduction de la charge de refroidissement et, par conséquent, une économie de consommation d'électricité grâce à l'utilisation de MCP comme matériaux d'isolation [7].

Myriam Bahrar et al, ont effectué une Etude numérique et expérimentale sur l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) micro encapsulés dans des panneaux textiles en béton armé pour le stockage d'énergie. Des caractérisations expérimentales multi-échelles ont été réalisées pour évaluer les performances thermiques de différentes configurations. Les

résultats ont montré que le MCP améliorait la capacité de stockage thermique et l'inertie thermique du béton armé textile. De plus, un modèle numérique a été développé et vérifié avec des résultats expérimentaux [8].

Sajith Wijesuriya et al, ont fait un appareil expérimental et méthodologie pour tester et quantifier les performances thermiques des matériaux à changement de phase micro et macro-encapsulés dans les applications d'enveloppe de bâtiment. Les données montrent que l'environnement de la chambre et les systèmes de chauffage et de refroidissement permettent des tests de cycle complet des panneaux muraux contenant du MCP. L'étude a également généré des données de test parallèles pour 4 panneaux muraux qui peuvent être utilisés dans un programme de modélisation énergétique du bâtiment pour valider l'algorithme de modélisation MCP. Les tests de cyclage capturent également les effets thermiques du MCP et le comportement complexe du MCP tel que la surfusion dans les sels d'hydrate de MCP [9].

Yanna Gao et al, ont analysé le comportement thermique des briques creuses remplies de matériau à changement de phase (MCP). Dans cette étude, des murs bidimensionnels ont été choisis pour analyser les performances thermiques des murs construits à partir de briques creuses remplies de MCP. Des simulations numériques ont été réalisées dans des conditions météorologiques. La première simulation visait à supprimer les effets de la distribution de température initiale, et les données de la deuxième simulation ont été utilisées pour analyser le comportement thermique des parois. Les changements de température de l'air extérieur et d'intensité du rayonnement solaire sont indiqués, tandis que la température de l'air intérieur est maintenue à 25°C. Le confinement adiabatique a été appliqué aux surfaces supérieures et inférieures [10].

Mustapha Mahdaoui et al, ont examiné les briques de construction avec matériau à changement de phase (MCP) : Performances thermiques. Une modélisation physique et une analyse numérique du transfert de chaleur à travers des briques creuses contenant du MCP ont été réalisées. Une étude paramétrique a été menée pour évaluer l'effet des conditions météorologiques sur la réponse thermique de cet élément de construction, et les effets des caractéristiques MCP ont été étudiés et discutés. Il a été constaté que l'utilisation de MCP dans les briques de construction stabilise et réduit les fluctuations de température intérieure [11].

Chiara Rubino et al, ont examiné les déchets textiles non tissés ajoutés avec MCP pour les applications de construction. Le logiciel Design Builder a été utilisé pour évaluer la

consommation énergétique d'une structure de type abri mobile sous trois scénarios climatiques différents. Une comparaison entre les matériaux expérimentés et d'autres solutions, actuellement disponibles sur le marché, a mis en évidence une réduction significative de la consommation d'énergie lors de l'adoption des matériaux testés [12].

Dariusz Heim et al, ont examiné une étude dynamique du processus de fusion dans les fenêtres de matériau à changement de phase déterminée sur la base de la transmission directe de la lumière. L'expérience a été réalisée sur une triple cavité en verre remplie de paraffine RT21HC comme MCP. L'appareil est monté sur un support spécial et exposé au rayonnement du soleil artificiel. Mesurer l'éclairement vertical à l'aide d'un posemètre et comparer avec le cas de référence pour déterminer la transmission directe de la lumière [13].

Dans ce travail, la performance thermique du mur extérieur du bâtiment contenant du MCP est étudiée numériquement en tenant compte des charges de chauffage et de refroidissement. L'objectif principal de l'étude était d'identifier la contribution de la chaleur latente de la couche de MCP sur la masse thermique du mur et d'optimiser l'épaisseur de la couche de MCP et la température de fusion pour une amélioration potentielle de la performance énergétique des bâtiments. En adhérant à cet objectif, dans l'étude, les impacts de l'emplacement du MCP (près de l'environnement intérieur ou extérieur) et de l'épaisseur de la couche de MCP (e varie de 5 à 15 millimètre) sont examinés sur l'économie d'énergie, le facteur de décrémentation et le décalage temporel.

Chapitre 02
Le transfert de chaleur

2.1 Qu'est-ce que le transfert de chaleur?

Le transfert de chaleur est le transfert d'énergie thermique entre deux corps. La circulation de la chaleur ira du corps le plus chaud au moins chaud.

Il existe trois (03) modes de transfert de chaleur qui se situe comme suit [14,15]:

2.1.1 Transfert de chaleur par conduction:

Le transfert de chaleur par conduction se traduit d'un corps à un autre par le contact physique.

Cette chaleur se propage à travers les parois des différents composants de l'architecture. Le schéma ci-dessous nous indique la conduction de cette chaleur [14,15].

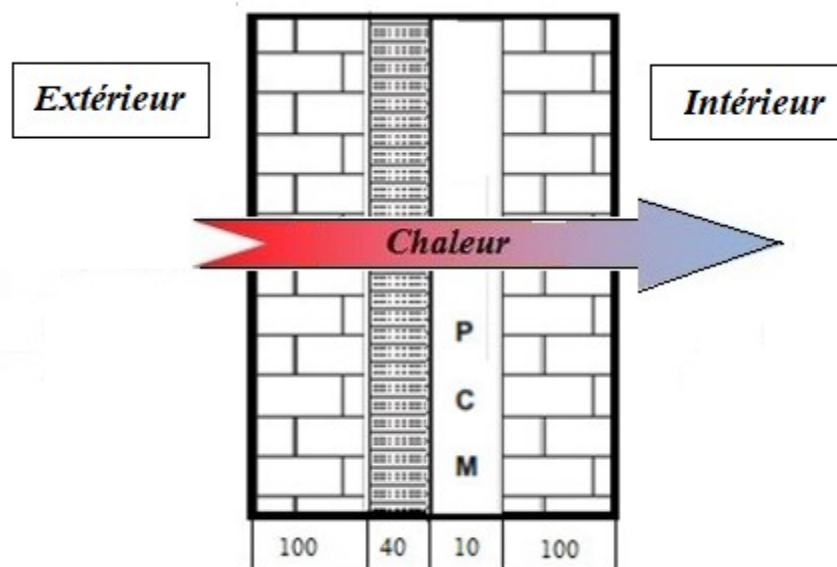


Figure.2.1 : Le phénomène de conduction sur une paroi.

2.1.2 Transfert de chaleur par convection :

Le transfert de chaleur par convection se détermine par des échanges de chaleur entre un fluide et une paroi. Toutefois, il existe deux sortes de convection, à savoir :

- **Convection naturelle** : c'est-à-dire que le fluide se met tout à fait en un seul effet.
- **Convection forcée** : l'induction de ce mouvement se traduit par une cause indépendante des différentes températures (pompe, ventilateuretc..).

Dans ce cas précis nous optons que pour la convection naturelle [14,15].

Le schéma ci-dessous nous démontre cette action :

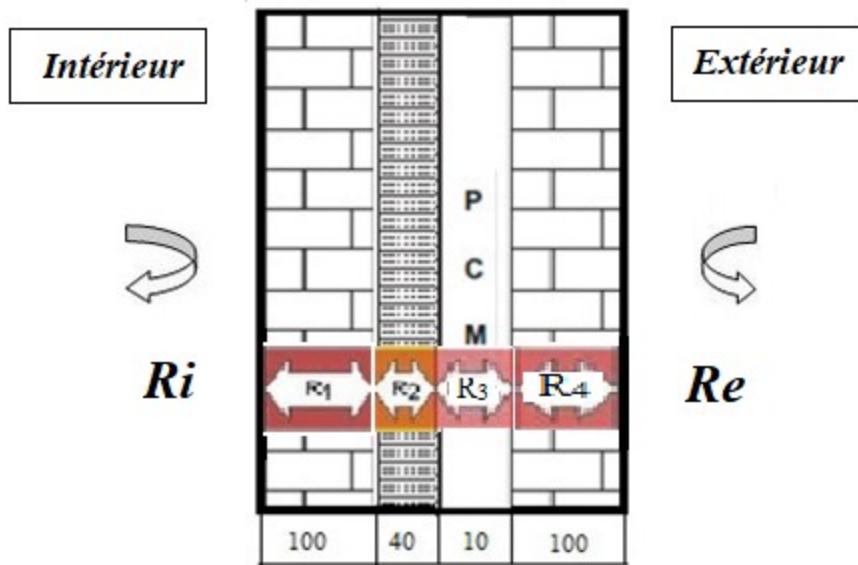


Figure.2.2 : Le phénomène de convection sur une paroi.

2.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement:

Le rayonnement est le transfert de chaleur d'un corps à un autre, sans aucun contact entre eux, par le déplacement d'ondes dans l'espace [14,15].

Aussi il existe le **rayonnement thermique** qui concerne les longueurs d'ondes comprises entre 100 μm et 0,01 μm et va de l'infrarouge à l'ultraviolet en couvrant le visible, et qu'il peut se propager dans le vide. Comme la montre la figure ci-dessous :

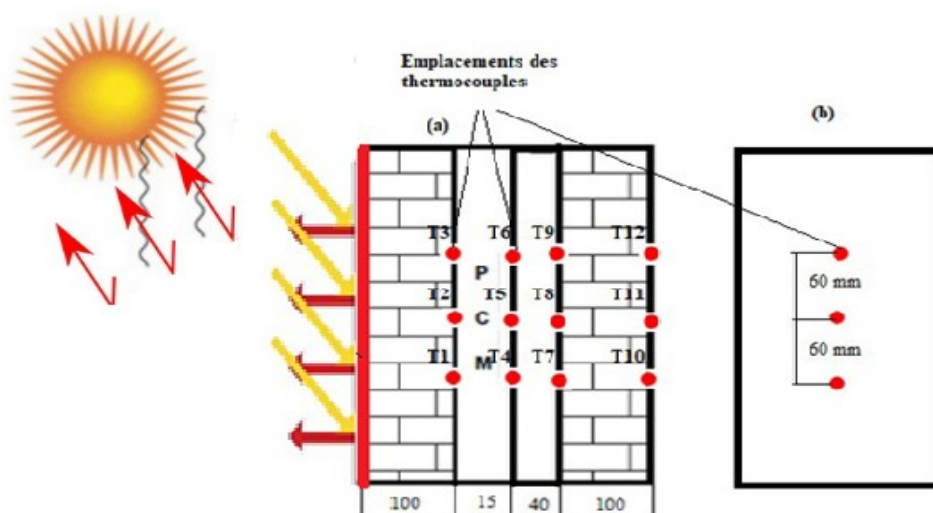


Figure.2.3 : Le phénomène de rayonnement sur une paroi.

2.2 Le flux chaleur:

Le flux de chaleur est la quantité d'énergie ou de chaleur passant au travers 1 m² de paroi pendant une seconde. Un flux de chaleur est donc équivalent à une puissance et s'exprime en watt ou joules par seconde.

Dans l'étude des déperditions de chauffage ou d'isolation thermique des bâtiments, les flux de chaleur sont appelés déperdition thermique. On distingue deux sources de ces déperditions thermiques :

- Les flux de chaleur qui traversent les parois séparant le bâtiment de l'extérieur ou de locaux non chauffés : ce sont les déperditions par transmission à travers les parois ;
- Les flux de chaleur qui résultent des différences entre les quantités de chaleur emportées par l'air qui sort du bâtiment et les quantités de chaleur apportées par l'air qui y entre : ce sont les déperditions par renouvellement d'air.

Nous avons ici un échange thermique créé par une combinaison de conduction, convection et rayonnement. Comme le montre la **figure.2.4** ci-contre :

- l'échange thermique du milieu chaud vers la paroi; [14,15].
- la conduction thermique à travers la paroi; [14,15].
- l'échange thermique de la paroi vers le milieu plus froid. [14,15].

Dans la pratique nous calculons le flux thermique à l'aide de la relation suivante :

$$\Phi = U \cdot A \cdot (\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{e}}) \quad (2.1)$$

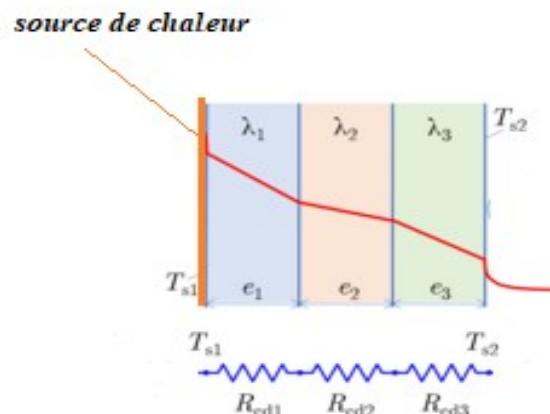


Figure.2.4 : Résistance thermique d'une paroi multicouche.

Chapitre 03

Stockage thermique et le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

3.1 Stockage thermique

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé. La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes:

- La chaleur sensible : stockage dans des matériaux inertes (Exemple : Eau, Briques, Béton renforcé, Tuiles et céramiques, Sable – roche – huile minérale.....).
- La chaleur latente : utilisation de matériaux à changement de phase qui emmagasinent l'énergie à mesure qu'ils changent de phase (Exemple : Acide maléique, Xylitol, NaNO_3 ,.....).
- La chaleur des réactions : thermochimie et absorption (Exemple : $\text{MgH}_2 + \Delta H_r \leftrightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$,.....).

3.1.1. Stockage sensible

Le stockage sensible est le moyen le plus commun de réutiliser la chaleur [16]. Dans les enceintes de stockage sensible, la température du moyen de stockage augmente avec la chaleur transférée. Ce stockage, non isotherme accumule une quantité de chaleur proportionnelle à sa masse et à sa capacité calorifique telle que présentée dans l'équation (3.1) [16]:

$$E_{\text{sensible}} = m C_p \Delta T \quad (3.1)$$

Dans ces types de stockage, le matériau de stockage se présente soit sous forme liquide, soit sous forme solide, soit les deux.

Dans les réservoirs de stockage solide, le matériau de stockage est conditionné sous forme de lit granulaire ou matriciel fixe et l'échange de chaleur est réalisé via un fluide caloporteur qui transfère sa chaleur via un échangeur de chaleur ou qui traverse directement le matériau de stockage poreux. Dans ce cas, le réservoir de stockage s'appelle un régénérateur. Lorsque le fluide caloporteur est un gaz, sa capacité calorifique étant très faible devant le matériau de stockage, sa contribution au stockage est négligeable. Lorsque le fluide caloporteur est un liquide, alors, sa contribution au stockage n'est pas négligeable et le système est appelé dual. Le solide le plus utilisé est le béton de par son faible coût, sa facilité d'usage et sa disponibilité, ses propriétés de résistance mécanique mais surtout sa capacité calorifique élevée [17]. D'autres matériaux peuvent être considérés comme les roches, le sable ou encore les matériaux réfractaires comme la silice ou l'alumine.

Dans les réservoirs de stockage liquide, il est possible de profiter de la stratification naturelle du matériau et de stocker du fluide chaud et du fluide froid dans un même réservoir. Ce type de réservoir s'appelle thermocline et présente une couche chaude dans la partie supérieure et une couche froide dans la partie inférieure ainsi que d'une zone de gradient thermique entre les deux. C'est précisément cette zone que l'on nomme thermocline. Le gradient entre la couche chaude et la couche froide dépend des propriétés du matériau de stockage ainsi que des débits du fluide caloporteur circulant dans le système de stockage. Lorsque l'on utilise un régénérateur, c'est-à-dire lorsque le matériau de stockage est une matrice solide dans laquelle circule un fluide caloporteur, il est possible d'obtenir une stratification thermique plus grande sur une plus petite hauteur de réservoir grâce aux propriétés d'inertie thermique de la matrice solide et de réduire ainsi les volumes de stockage [18]. Il existe par ailleurs des systèmes de stockage thermique liquide où le chaud et le froid sont stockés dans deux réservoirs différents, si bien que les volumes de stockage sont multipliés par deux. C'est le cas dans certaines centrales solaires à concentration, comme Solar Two aux Etats-Unis [19]. Dans la catégorie des liquides, on trouve les sels fondus, les huiles minérales ou synthétiques ou plus communément l'eau, utilisée notamment dans les ballons d'eau chaude, stockage de chaleur sensible le plus répandu [18].

3.1.2. Stockage latent

Le stockage de la chaleur latente implique de chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, c'est-à-dire soit de la phase solide à la phase liquide, soit de la phase liquide à la phase gaz ou encore lors de sa transition solide-solide. Lorsque le matériau atteint sa température de changement de phase, il absorbe une quantité de chaleur pour réaliser la transformation, connue sous le nom de chaleur latente de fusion ou de vaporisation selon le cas. A l'inverse, lorsque le matériau liquide ou gaz est refroidi, il retourne à la phase solide ou liquide en restituant sa chaleur latente. La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau et selon l'équation (3.2) :

$$E_{latente} = m \Delta h_{S-L \text{ ou } L-G} \quad (3.2)$$

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe température – énergie de la Figure 3.1.

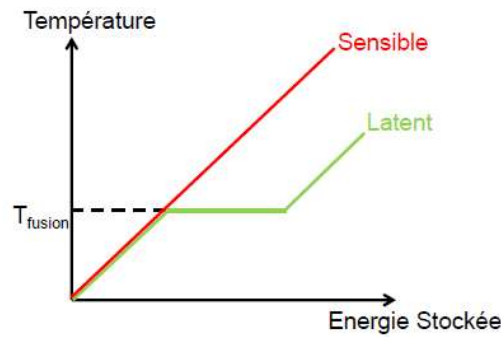


Figure 3.1 : Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible [16]

Lorsque le matériau est chauffé, il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible lui permettant d'atteindre la température de changement de phase. A ce stade, l'énergie apportée au matériau cesse de le chauffer et est utilisée à la place pour accomplir le changement de phase. La chaleur est stockée de façon isotherme à condition que le corps soit pur sous forme de chaleur latente. Une fois que la transformation est complète, la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur. Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puisque pour arriver au point de changement de phase, le matériau doit subir une montée en température, stockant inévitablement une part d'énergie sensible. La quantité d'énergie stockée peut être exprimée pour le cas de la transition solide-liquide selon l'équation (3.3) :

$$Q = \int_{T_{initial}}^{T_{fusion}} m C_{p,S} dT + m \Delta h_{S-L} + \int_{T_{fusion}}^{T_{final}} m C_{p,L} dT \quad (3.3)$$

Les matériaux utilisés pour le stockage thermique latent sont connus sous le nom de Matériaux à Changement de Phase (MCP). Les MCP peuvent être employés pour leur transition solide-solide, solide-liquide ou liquide-gaz.

La transition solide-solide a été envisagée pour remplacer l'encapsulation des MCP utilisée en batch dans certains containers de stockage. Cette transition est simple à gérer dans la mesure où il n'y a pas ou peu d'expansion volumique, ce qui limite les risques de fuites et de surpression. Cependant, peu de matériaux ont été identifiés, parfois car la chaleur latente de transition solide-solide est trop faible devant celle de la transition solide-liquide, ou parfois car le matériau n'est pas stable thermiquement.

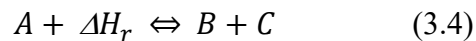
Les transformations liquide-gaz sont attractives car elles présentent la plus grande chaleur latente. Néanmoins, l'énorme changement de volume associé à l'évaporation du liquide rend

le stockage complexe et souvent inutilisable. C'est pourquoi cette transition est écartée des systèmes de stockage latent.

Bien que la chaleur latente de fusion soit plus faible que la chaleur latente d'évaporation, la transition solide-liquide est la plus prometteuse puisqu'elle permet de limiter l'expansion volumique et ainsi l'augmentation de pression due au changement de phase. Lors d'une fusion, il faut compter une augmentation volumique d'environ 10 % [16]. Si un volume d'expansion est prévu dans le container, alors le solide comme le liquide peuvent être contenus dans le système de stockage limitant ainsi la pression subie par le réservoir.

3.1.3. Stockage thermochimique

La troisième façon de stocker l'énergie thermique consiste en l'utilisation de l'énergie endothermique des réactions chimiques réversibles. La chaleur de réaction qui est stockée est souvent associée à la dissociation des réactifs chimiques en deux composants. Tout où partie de cette chaleur peut être récupérée plus tard lorsque la réaction de synthèse a lieu.



Avec

A : Réactif solide ou liquide ;

ΔH_r : Chaleur de réaction en J/mol ;

B et C : Produits sous forme gaz, liquide ou solide.

Une condition pour que le stockage ait une taille suffisamment petite est que les réactifs soient plutôt solides ou liquides. Les produits obtenus peuvent être indépendamment des gaz, liquides ou solides. Lorsque la réaction se fait avec un gaz, le système de stockage peut se présenter sous la forme d'un réacteur à lit fluidisé. Par ailleurs, dans ce type de stockage, les produits obtenus sont stockés pour être utilisés ultérieurement et ce système est propice au stockage inter-saisonnier.

3.2. Le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

3.2.1. Matériaux à Changement de Phase (MCP)

On nomme matériau à changement de phase - ou MCP - tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement localisée entre 10 et 80 degrés. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...) [20].

3.2.2. Types de MCP

On peut classer les MCP selon trois catégories :

- Les composés organiques: paraffines, corps non-paraffiniques.
- Les composés inorganiques: hydrates de sels, sels et métaux.
- Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

Les différents sous-groupes de MCP présentent des propriétés thermiques et chimiques très différentes qui affectent significativement la conception du système de stockage thermique pour une application donnée.

En 1983, Abhat [21] a donné une classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la Figure 3.2.



Figure 3.2 : Classification des MCP proposée par Abhat [21].

3.2.3. Propriétés chimiques et physiques particulières de la cire d'abeille [22] :

- Une densité de 0,96, la cire flotte donc sur l'eau ;
- Un point de fusion à 63°C environ ;
- Malléable à température ambiante ;
- Insoluble dans l'eau (hydrophobe) ;
- Liquide quand elle est fondue (pas visqueuse) ;
- Longue conservation.

3.2.4. Propriétés de la cire d'abeille :

- La densité de la cire d'abeille est de l'ordre de 0.96 mais elle peut varier entre 0.94 et 0.98. Cela signifie donc que 1 décimètre cube (1 litre) pèse environ 960 grammes. La cire peut donc flotter sur l'eau car elle est plus légère que cette dernière [22].
- À partir de 63°C, elle fond
- À partir de 85°C, elle perd sa coloration
- À 120°C, elle s'enflamme
- À 200°C, elle se vaporise
- À aucun moment elle ne boue
- Le chloroforme est le meilleur solvant de la cire d'abeille.

3.2.4. Mur de stockage avec MCP

Le système de mur de stockage a été construit pour l'expérience, comme illustré à la figure 3.3. Les dimensions de MCP du système de mur de stockage d'essai sont de 0.5, 1.0 et 1.5 cm (épaisseur) 20 cm (largeur) 30 cm (hauteur).



Figure 3.3 : La cire d'abeille (MCP).

Chapitre 04
Procédure expérimentale

4.1 Procédure expérimentale**4.1.1 But :**

Dans ce travail de fin d'étude, nous avons présenté quatre parties des essais expérimentales :

1. Effets de lame d'air et polystyrène sur la distribution de température dans un mur extérieur ;
2. Effets de position de la couche MCP ;
3. Effets de l'épaisseur de la couche MCP ;
4. Effets de charge et décharge de la couche MCP.

4.1.2. Equipement nécessaire

- Banc didactique comprenant :
 - ✓ Module d'entrées analogiques 24 bits, 4 voies, RTD 100Ω.
 - ✓ Kit de connexion haute tension avec serre-câble, borné.
 - ✓ Compact DAQ chassis (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.
 - ✓ Brique.
 - ✓ La cire d'abeille.
 - ✓ Polystyrène.
 - ✓ La résistance chauffante.

4.1.3. Mode opératoire

- Le banc didactique à l'arrêt, relevé les températures T_1 à T_{15} .

4.2. Fonctionnement théorique

4.2.1 Description du dispositif expérimental

Afin de valider le modèle développé, plusieurs mesures thermiques ont été effectuées pour un mur isolé en utilisant MCP. La figure 4.1 montre le schéma de l'installation à section d'essais avec la coupe transversale du mur isolée intégrée un matériau à changement de phase (MCP).

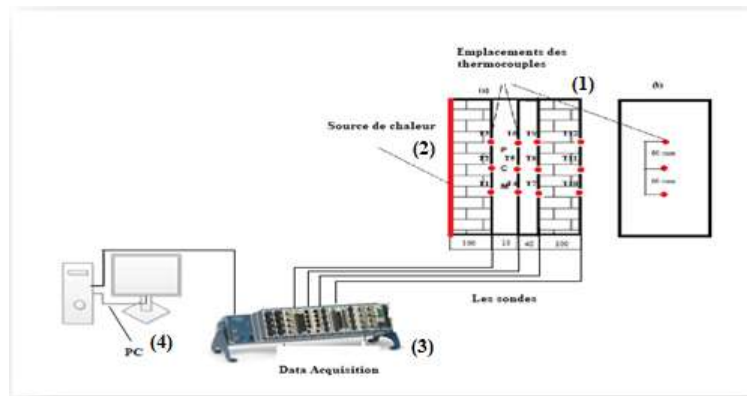


Figure 4.1 : Schématisation du dispositif expérimental.

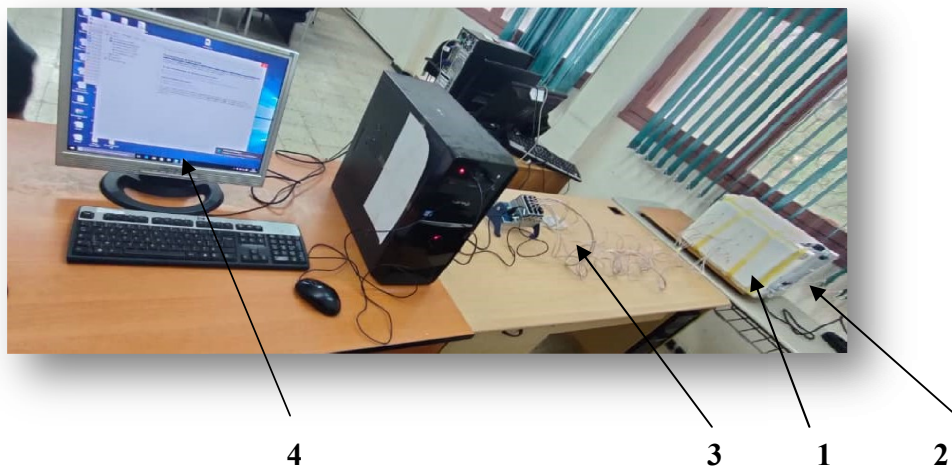


Figure 4.2 : Photo du dispositif expérimental.

- (1) : Section d'essai;
- (2) : Source de chaleur (La résistance chauffante);
- (3) : Unité d'acquisition de données (Data Acquisition);
- (4) : Micro-ordinateur.

Légende :**1. Section d'essais :**

La section d'essai c'est un mur extérieur qui constitue deux briques, Polystyrène ou lame d'air comme isolation et la cire d'abeille comme matériaux à changement de phase (MCP).

Nous avons changé :

- Les positions de MCP dans le mur;
- L'épaisseur de MCP de 5, 10 et 15 mm, comme montre la figure 4.3.

Les dimensions de brique crosse est de 10 cm d'épaisseur, 20 cm de largeur et 30 cm de la hauteur.

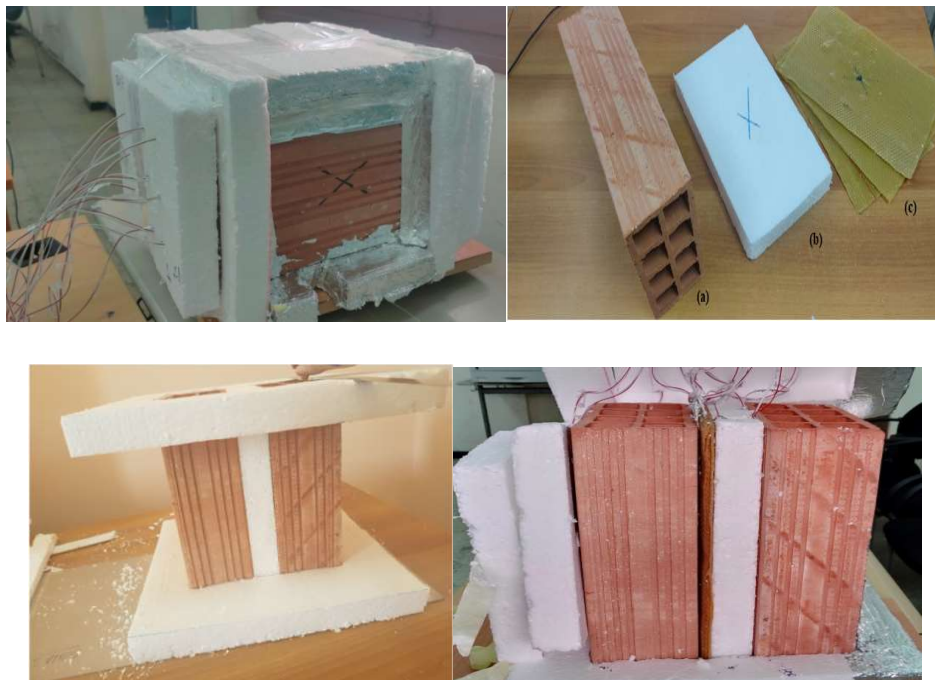


Figure 4.3 : Les composants de Section d'essais

2. La résistance chauffante :

Est une source de chaleur, elle est contact avec la paroi extérieur de section d'essai (voir la figure 4.4).



Figure 4.4: La résistance chauffante.

3. Data Acquisition :

Le montage expérimental était équipé des capteurs de température type RTD à l'intervalle entre - 40°C minimale et 70 °C à maximal. Le Compact DAQ est un instrument d'acquisition par connexion USB qui peut supporter de différents modules. Pendant les expériences, quatre modules de température sont utilisés, chacun contenant quatre ports de sonde de capteurs.



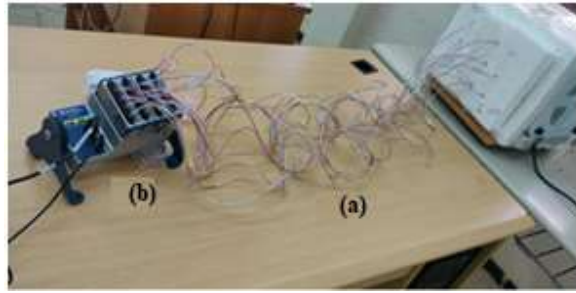


Figure 4.5: Raccordement des thermocouples (RTD) avec Data d'acquisition NI.

4. Micro-ordinateur :

Le pilotage des instruments de mesure est assuré par LabVIEW. La figure 4.6 présente l'interface du programme LabVIEW développée pour piloter l'ensemble des instruments utilisés dans le cadre de cette étude (voir la figure 4.7).

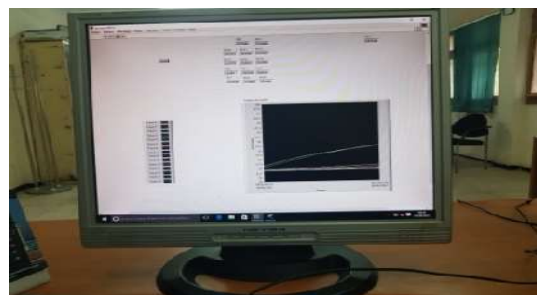
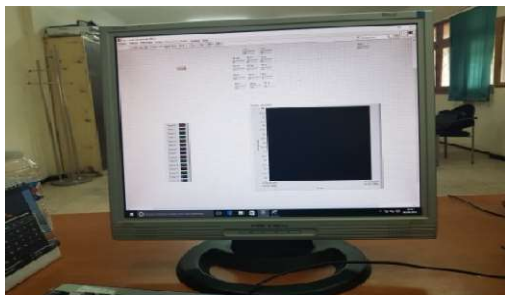
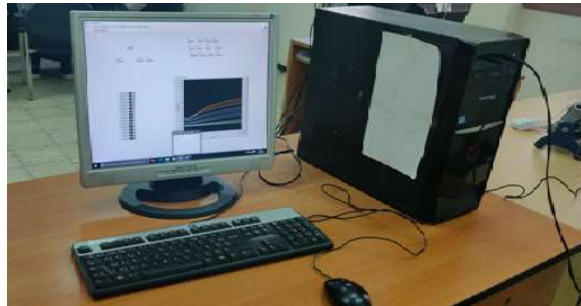


Figure 4.6: Interface LABVIEW développée dans le cadre de cette étude.

4.2.2 Schéma de principe

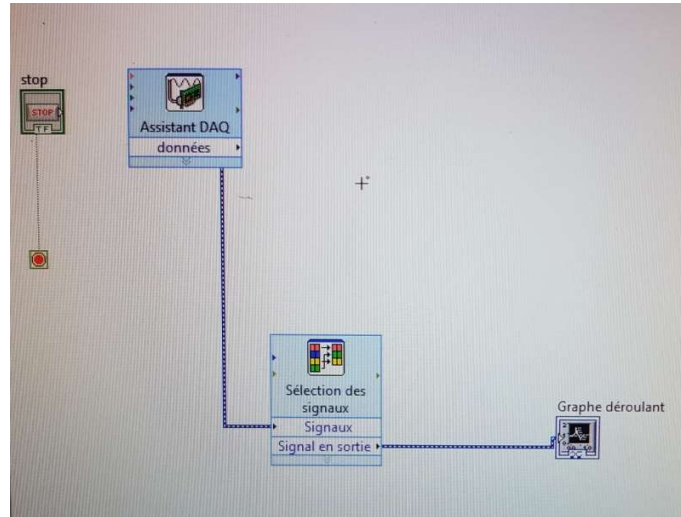


Figure 4.7 : Schéma utilisés dans le cadre de cette étude par logiciel LabVIEW

4.2.3 Mise en marche

- Préparation de section d'essai.



- Nous avons placé des capteurs de température à chaque position entre les frontières de chaque paroi.



- Remplacement les module d'entre analogique RTD dans le kit connexion.
- Relier le kit de connexion avec le PC (par les câbles de connexion).
- Traçage de schéma dans le cadre de l'étude qui nous avons présente dans logiciel LABVIEW.
- Lancement NI Max (Système-Measurement & Automation) pour relier les modules d'entré et testé.



- D'émarge de résistance pendant quinze minute (15 min) après lancement de logiciel.



- Récupération le résultat chaque quarante cinq minute (45 min) pendant trois heure (3 h) de charge et quatre heure (4 h) de décharge.
- Traitement de résultat de température obtenu par logiciel LABVIEW.
- Traçage des figures et l'interprétation des résultats.

Chapitre 05
Résultats et discussion

5. Introduction

En fait, en l'Algérie, les bâtiments représentent environ 50 % de la consommation d'énergie finale totale et sont à l'origine d'une grande partie des émissions globales de carbone. Cependant, le secteur du bâtiment peut également être une source considérable d'économies d'énergie. Le présent travail porte sur le développement d'éléments de façade pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. La solution proposée consiste en de nouveaux murs comprenant des matériaux à changement de phase (MCP).

- Des expériences seront réalisées sur le comportement thermique d'un système collecteur-mur de stockage utilisant du MCP.
- Des plaques de MCP seront fixées à l'intérieur de mur pour augmenter le stockage de la chaleur.
- Les tests seront effectués pendant une période de charge de trois heures et une période de décharge de quatre heures, respectivement.

5.1 Méthodologie

Dans cette étude expérimentale, le mur extérieur du bâtiment sans MCP (mur de base) se compose de trois couches ; Brique crosse extérieur (100 mm), polystyrène ou la lame d'air (40 mm) et brique crosse intérieur (100 mm). Deux scénarios différents d'intégration du MCP au mur de base ont été envisagés : i) placer le MCP entre brique crosse extérieur et l'isolant (MCP avant), (Configuration 2) et ii) placer le MCP entre l'isolant et brique crosse intérieur (MCP après) (Configuration 3). L'épaisseur de la couche de MCP, e varie entre 5 et 15 mm pour les deux emplacements différents de MCP dans la paroi de base.

La figure 5.1 montre un schéma du mur. Les propriétés thermiques de la les matériaux des murs en maçonnerie, utilisés comme données d'entrée dans les calculs, sont résumé dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Les propriétés thermiques de la les matériaux des murs en maçonnerie

	ρ (kg/m ³)	λ (W/m °C)	CP (J/kg °C)
Brique crosse	0,4	0.37	1000
La lame d'air	1	0.13	1000
Polystyrène	18	0.042	1450

5.2 Objectifs

L'objectif visé par ce travail, touche les deux points suivants :

1. Technologique :

Les applications industrielles de ce travail sont les suivantes :

- Dimensionner un système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente, afin d'améliorer certaines applications dans le domaine de urbanisme par exemple les murs de bâtiment (thermique des bâtiments)
- Déterminer la meilleure combinaison entre un système de stockage et un Matériau à Changement de Phase (MCP).

2. Impact attendus

Les résultats obtenus vont contribuer à une meilleure compréhension du phénomène de stockage d'énergie thermique (par chaleur latente).

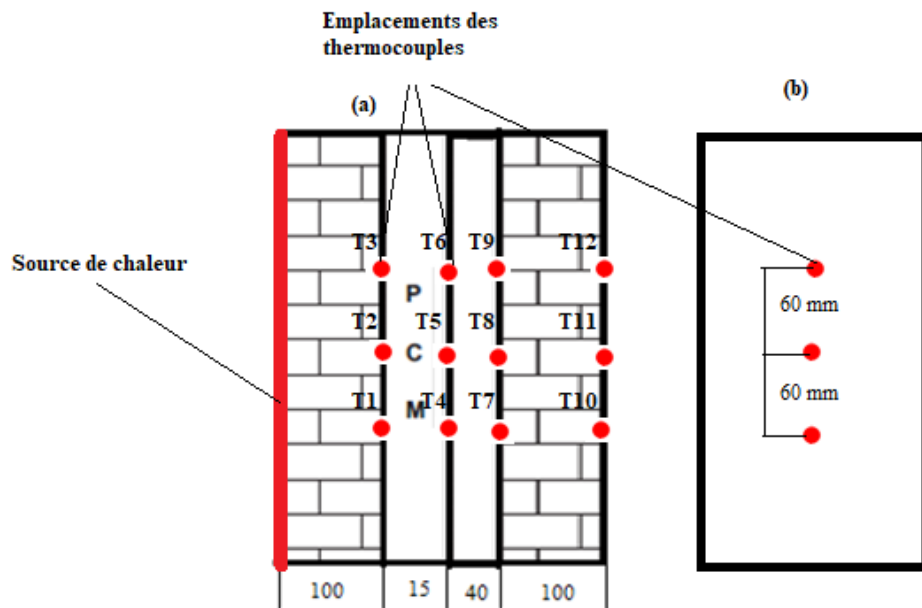


Figure 5.1 : Emplacements des thermocouples sur le mur, (a) Surface du côté des couches de mur et (b) Surface du côté de l'entrefer.

Le transfert de chaleur à travers la paroi composite de base illustré à la figure 5.2. Un deuxième mur (mur composite MCP) est étudié sous les mêmes conditions. Ce mur est identique au premier qui est illustré à la figure 5.2, mais intègre un MCP laminé en une seule couche de 5, 10 et 15 mm d'épaisseur dans la maçonnerie. La position du MCP influence le

comportement thermique du mur. En raison de cette propriété, deux différentes configurations, illustrées à la figure 2, 3 et 4, sont proposées :

Configuration 1 : le mur sans MCP (cas référence), comme illustré à la figure 5.2.

Configuration 2 : le MCP est placé avant la lame d'air ou polystyrène avec la variation de l'épaisseur, comme illustré à la figure 5.3.

Configuration 3 : le MCP est placé après la lame d'air ou polystyrène avec la variation de l'épaisseur, comme illustré à la figure 5.4.

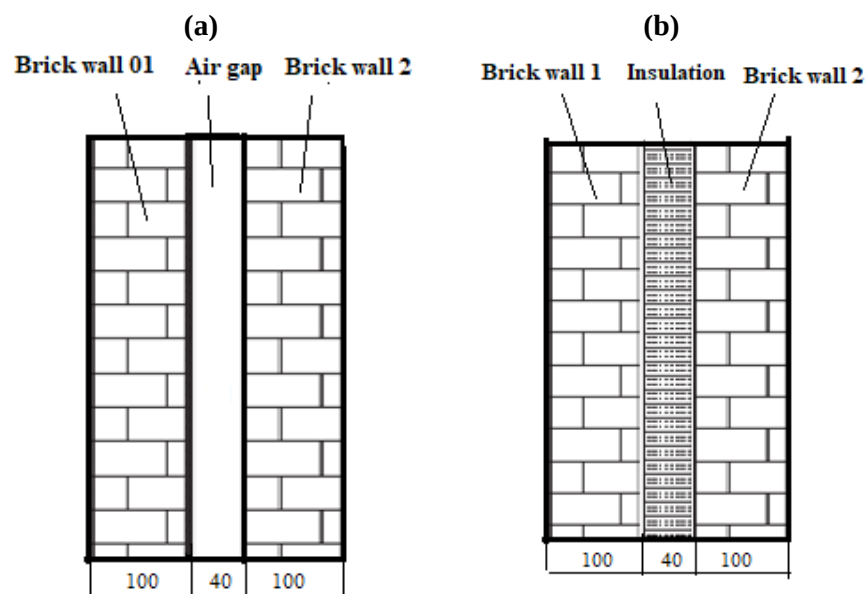
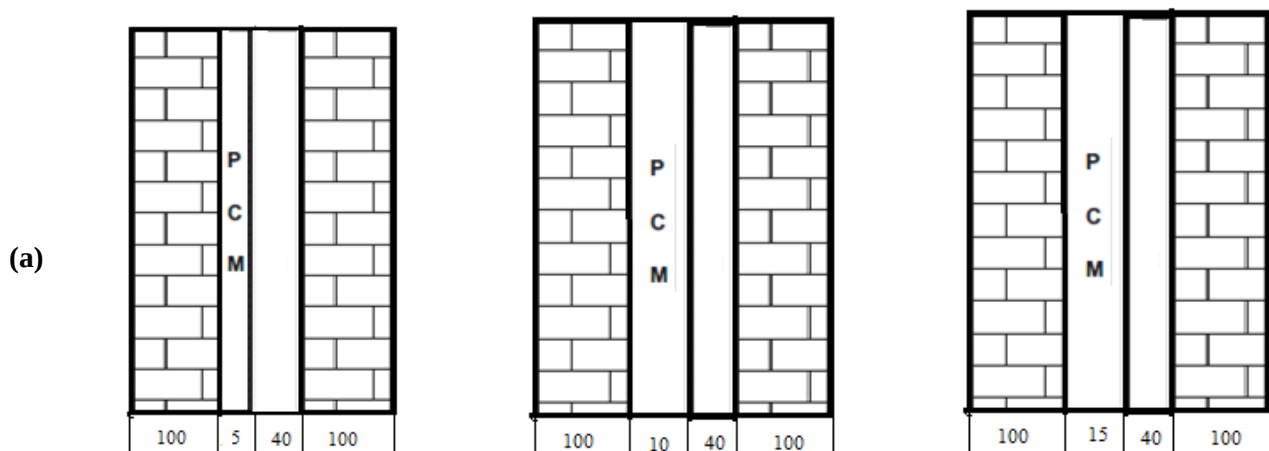


Figure 5.2 : Configuration 01 pour le cas référence ; a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène.



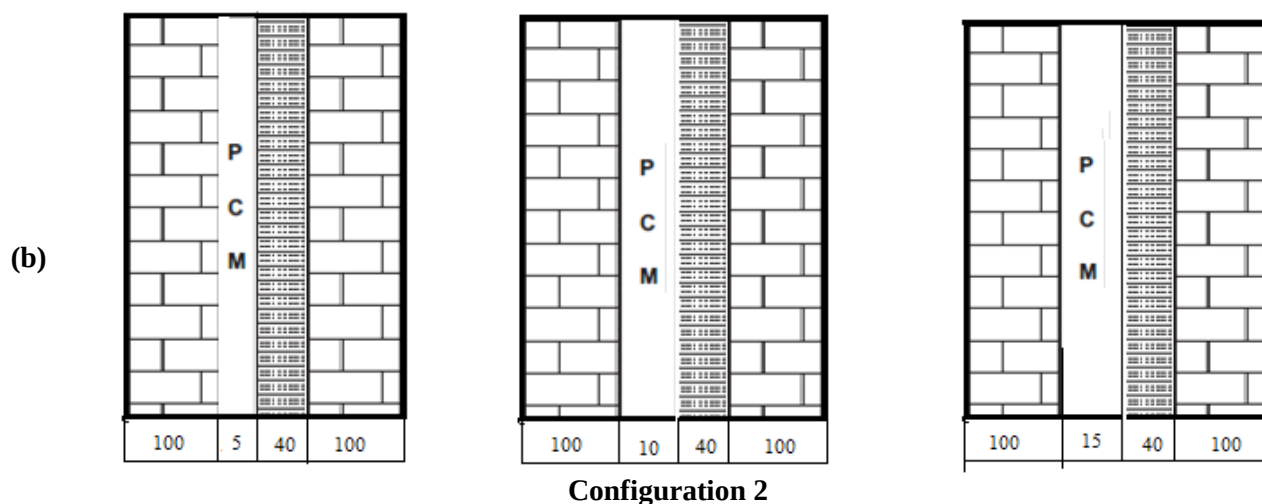


Figure 5.3 : Configuration 2 pour une épaisseur $e_{MCP} = 5, 10 \text{ et } 15 \text{ mm}$; a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène.

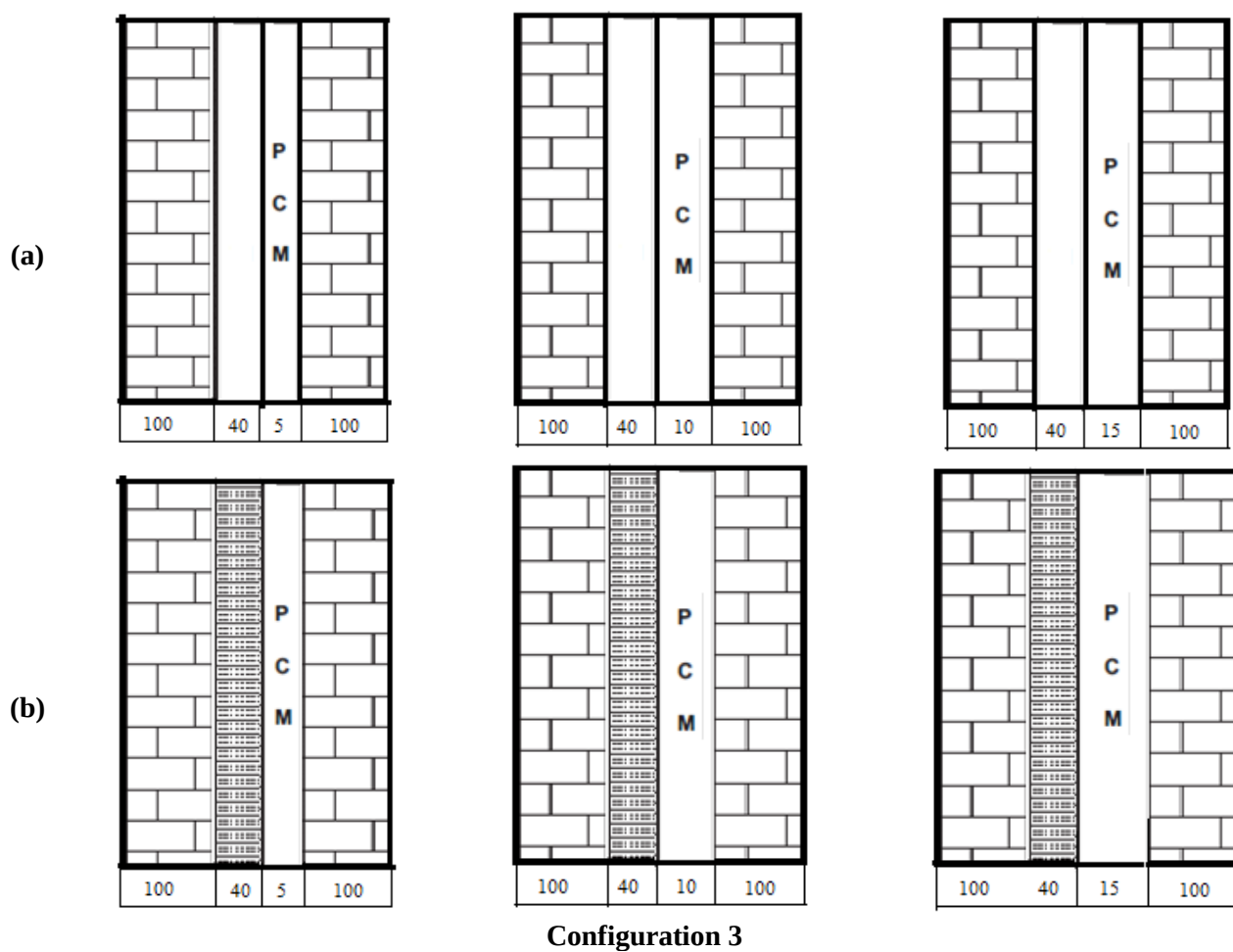


Figure 5.4 : Configuration 3 pour une épaisseur $e_{MCP} = 5, 10 \text{ et } 15 \text{ mm}$; a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène.

5.3 Les hypothèses du travail :

Il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses. Les hypothèses utilisées souvent dans l'étude expérimentale du transfert thermique d'une paroi multicouche en présence de matériau à changement de phase (MCP) sont comme suit :

- Le régime d'écoulement est transitoire.
- Le contact est considéré comme étant parfait dans la paroi de la brique et du MCP.
- Le transfert de chaleur par convection et rayonnement est négligeable.
- Le stockage de l'énergie thermique par la chaleur latente.

5.4 Résultats et discussions

Dans ce travail, l'objectif est d'évaluer l'étude de la performance thermique des matériaux de construction remplis d'un MCP. La paroi extérieure proposée du bâtiment se compose de deux couches de briques creuses avec MCP et séparées par une lame d'air. Ce système est utilisé pour stocker de l'énergie pendant la période de chaleur et l'utiliser pour la nécessité d'un confort thermique.

Dans ce travail de fin d'étude, nous avons présenté quatre parties d'essais expérimentales

1. Effets de la lame d'air et polystyrène sur la distribution de température dans un mur extérieur ;
2. Effets de position de la couche MCP ;
3. Effets de l'épaisseur de la couche MCP ;
4. Effets de charge et décharge de la couche MCP.

Première partie: Effets de la lame d'air et polystyrène sur la distribution de température dans un mur extérieur.

Dans le premier essai expérimental, nous avons étudié l'effet de la lame d'air et du polystyrène sur la distribution de température dans un mur extérieur. Pour cela nous avons injecté à l'intérieur du mur deux types : La lame d'air et le polystyrène.

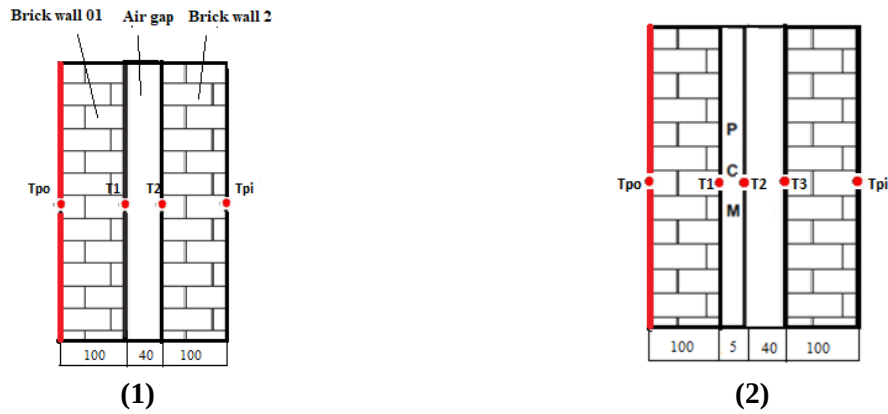


Figure 5.5 : Position les capteurs de température concernant : 1) la première configuration et 2) les autres configurations.

Les deux figures 5.6 et 5.7, représentent la variation des températures et le flux de chaleur par unité de surface dans le temps avec la lame d'air et polystyrène. Nous remarquons dans la figure 5.6, que l'utilisation de matériaux isolants nous donne généralement un résultat proche de celui obtenu avec la couche d'air. Cependant, on trouve que le profil de température de l'air est légèrement plus élevé que d'autres matériaux en raison de la différence des propriétés thermiques entre ces matériaux et en particulier la conductivité thermique. La figure 5.7 montre les densités de flux de chaleur mesurées à travers les murs isolés. Tout d'abord, il est clairement observé que l'isolant polystyrène a une grande capacité de réduction de la chaleur.

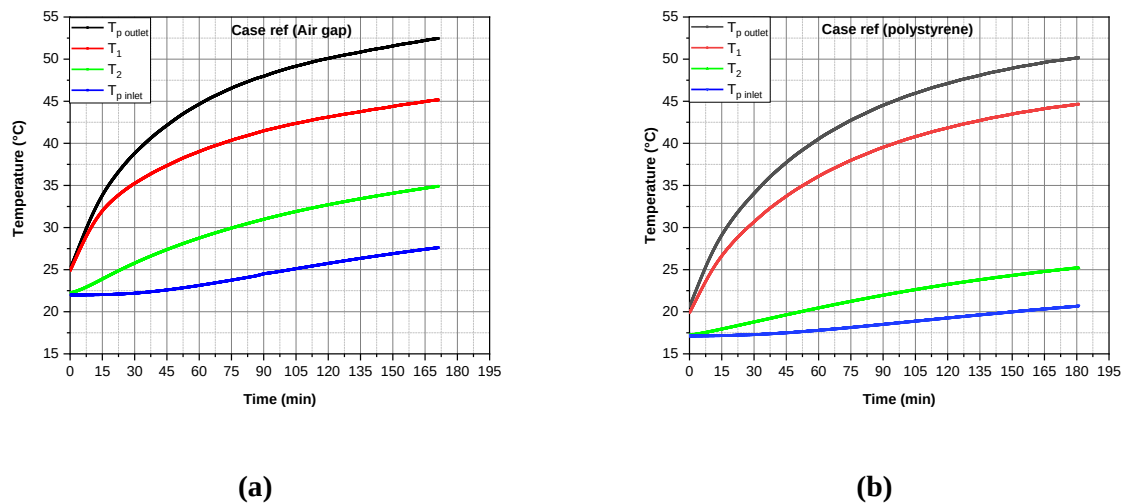
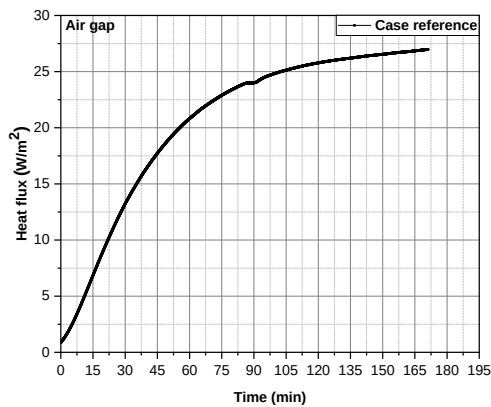
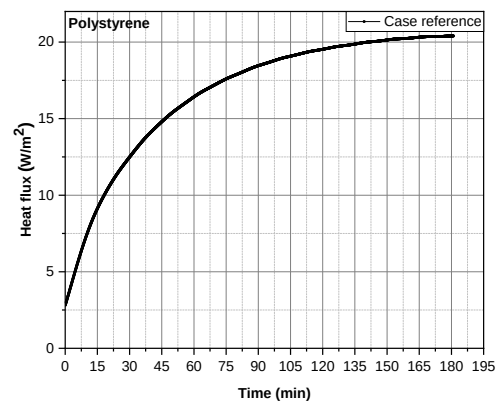


Figure 5.6 : Représente la variation des températures dans le temps de quatre positions; a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène.



(a)

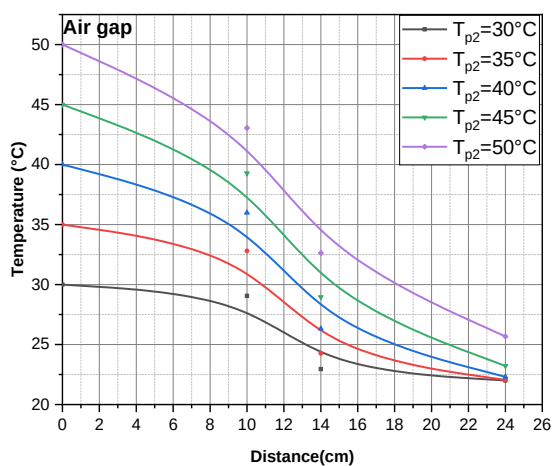


(b)

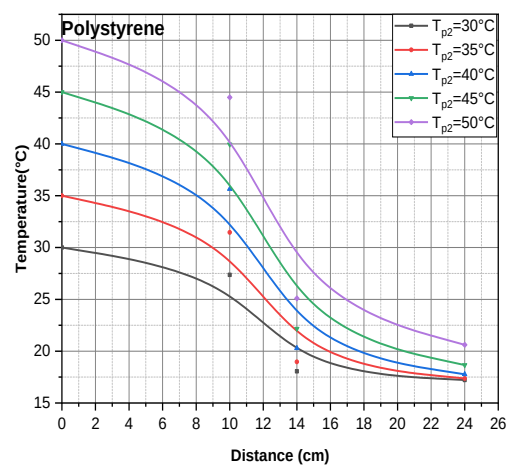
Figure 5.7 : Représente la variation des flux de chaleur par unité de surface dans le temps; a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène.

La lame d'air : Nous remarquons, d'abord que la température de la paroi extérieure égale à 30, 35, 40, 45 et 50 °C que la température à l'intérieur du mur s'étale avec des gradients suivants x et qu'à la fin de mur, la température de paroi est entre 22 et 26 °C.

Polystyrène : Nous remarquons, d'abord que la température de la paroi extérieure égale à 30, 35, 40, 45 et 50 °C que la température à l'intérieur du mur s'étale avec des gradients suivants x et qu'à la fin de mur, la température de paroi est entre 17 et 21 °C, ce qui reste admissible selon les conditions de confort.



(a)



(b)

Figure 5.8 : Représente la variation de la température en fonction d'épaisseur de cinq température ;

a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène.

La figure 5.9 représente une comparaison entre la lame d'air et le polystyrène concernant la distribution de température sur le mur. Nous remarquons que lorsque la température de la paroi extérieure augmente, la courbe de polystyrène commence à coïncider avec la courbe de la lame d'air au niveau de brique. Par contre dans la courbe de polystyrène, la température diminue au niveau de la paroi intérieure. Aussi nous avons constaté que la lame d'air fait plusieurs centimètres d'épaisseur (4 cm), ce qui fait que l'air qu'elle contiendra, ne sera pas stable, il y aura des mouvements de convection naturelle qui vont apparaître et par voie de conséquence, la lame n'isolera pas. Une lame d'air non ventilée de 4 cm d'épaisseur a une résistance thermique équivalente d'environ $0.14 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$. Du polystyrène, la conductivité thermique égale à $35 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ avec une épaisseur de 4cm conduira a une résistance thermique d'environ $1.3 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$. Si on veut isoler d'avantage, on met du polystyrène.

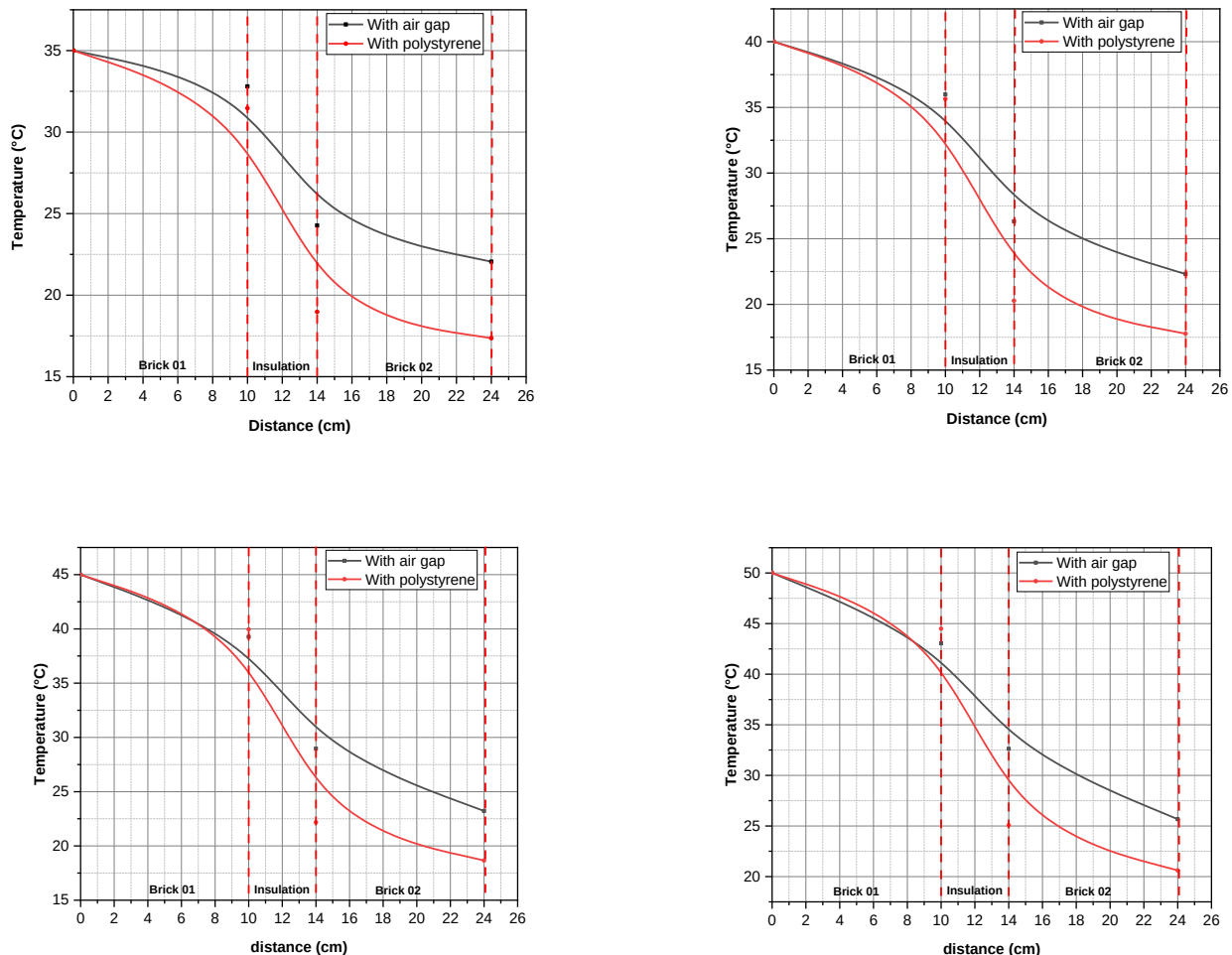


Figure 5.9 : Comparaison la variation de la température en fonction d'épaisseur de la lame d'air avec polystyrène de quatre températures maximale à l'extérieur.

Deuxième partie: Effets de la position de la couche MCP.

Dans le deuxième essai expérimental, nous avons étudié l'effet de la position de la couche MCP sur la distribution de température dans un mur extérieur dans la première période de charge (trois heures). Pour cela nous avons injecté le MCP à l'intérieur du mur avec changement de position comme illustré dans la configuration 2 (le MCP est placé avant la lame d'air ou le polystyrène avec une épaisseur de 10 mm) et configuration 3 (le MCP est placé après la lame d'air ou le polystyrène avec une épaisseur de 10 mm), comme illustré à la figure 5.4.

Ce mur est identique au premier, qui est illustré à la configuration 1, mais intègre un MCP laminé en une seule couche de 10 mm d'épaisseur dans la maçonnerie. La position du MCP influence le comportement thermique de la paroi. En raison de cette propriété, deux configurations différentes, illustrées à la figure 5.4, sont proposées :

- Configuration 2 : le MCP est placé à côté de la face extérieure de l'isolat.
- Configuration 3 : le MCP est placé à côté de la face intérieure de l'isolat.

Les deux figures 5.10 et 5.11 représentent la variation de la température et du flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps dans la période de charge.

Dans le cas de configuration 2 (avant) et avec une épaisseur de 10 mm, nous avons constaté que:

1- Avec la lame d'air, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 46 ° C, soit 6° C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T2).

2- Avec polystyrène, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 47.5 ° C, soit 3° C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T2).

Dans le cas de configuration 3 (après) et avec une épaisseur de 10 mm, nous constaté que:

1- Avec la lame d'air, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 45 ° C, soit 7.5° C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T2).

Ceci est dû à la présence d'une surface de la lame d'air de 40 mm d'épaisseur après la couche de MCP avec une température $T_3 = 33^\circ\text{C}$ a la fin de charge (3 h).

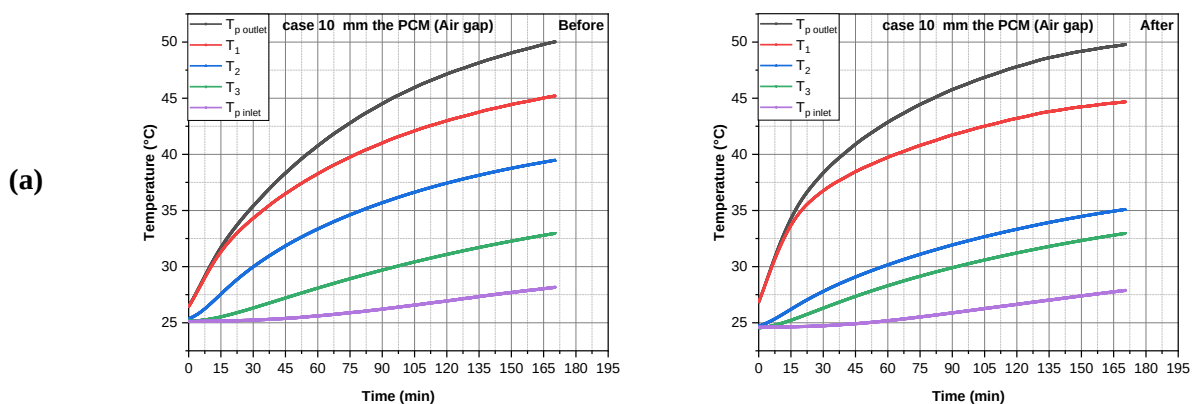
2- Avec polystyrène, la température de surface T_1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 47.5°C , soit 4.5°C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T_2). Ceci est dû à la présence d'une surface de la lame d'air de 40 mm d'épaisseur après la couche de MCP avec une température $T_3 = 30^\circ\text{C}$ a la fin de charge (3 h).

Dans le cas de configuration 3 (après)et avec une épaisseur de 10 mm, nous constaté que:

1- Avec la lame d'air, la température de surface T_1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 44.5°C , soit 12°C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T_3). Ceci est dû à la présence d'une surface de la lame d'air de 40 mm d'épaisseur entre le brique crosse extérieur et la couche de MCP avec une température $T_2 = 35^\circ\text{C}$.

2- Avec polystyrène, la température de surface T_1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 52°C , soit 22.5°C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T_3). Ceci est dû à la présence d'une surface de polystyrène de 40 mm d'épaisseur entre le brique crosse extérieur et la couche de MCP avec une température $T_2 = 32.5^\circ\text{C}$.

Dans des conditions transitoires, le MCP emmagasinant et libérant de la chaleur, la configuration 3 semble être la plus appropriée pour un bâtiment ayant la charge thermique la plus élevée pendant l'hiver. Cette configuration permet au MCP de retenir plus d'énergie à l'intérieur du bâtiment que lorsque l'énergie latente stockée dans le MCP est libérée en raison de la haute résistance au transfert de chaleur causée par l'isolation.



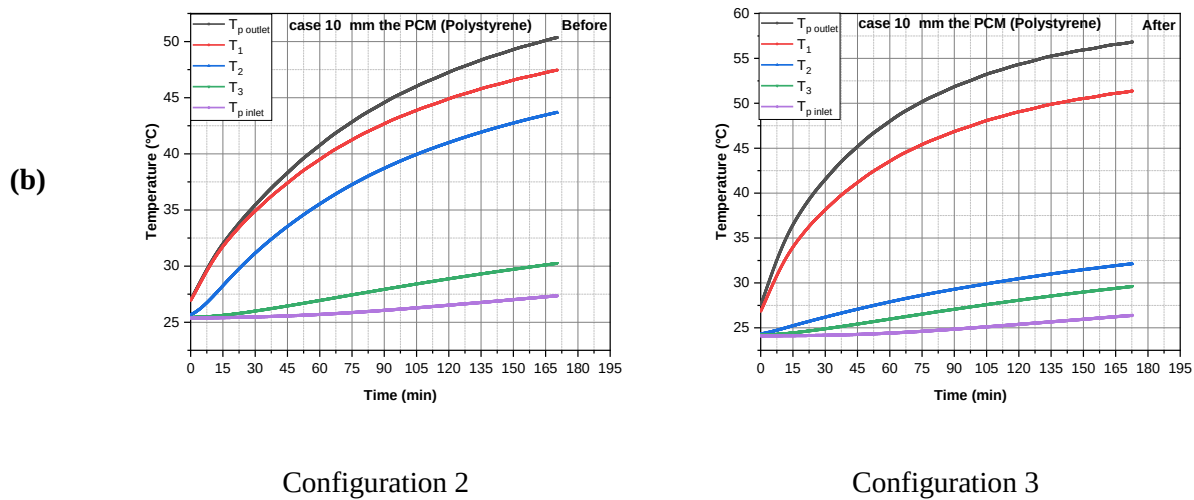


Figure 5.10 : Représente la variation des températures dans le temps de cinq positions pour le cas de l'épaisseur $e = 10$ mm; a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène.

Dans figure 5.11 qui représente la variation de flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps dans la période de charge.

Dans le cas de configuration 2 (avant) et avec une épaisseur de 10 mm de MCP, nous avons constaté que:

1- Avec la lame d'air, le flux de chaleur par unité de surface est la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 17.5 w/m^2 a la fin de charge (3 h). Mais dans le cas de configuration 3 (après), nous constaté que le flux de chaleur par unité de surface est la plus petite atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 10.5 w/m^2 a cause il ya une recirculation de l'air entre le brique crosse et la couche de MCP (convection).

Dans le cas de configuration 2 (avant), nous avons constaté que:

1- Avec polystyrène, le flux de chaleur par unité de surface est la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 18 w/m^2 a la fin de charge (3 h). Mais dans le cas de configuration 3 (après), nous constaté que le flux de chaleur par unité de surface est la plus petite atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 12 w/m^2 a cause de l'obstacle de couche de polystyrène entre le brique crosse et la couche de MCP et le rôle de cette couche pour le retour de chaleur à l'intérieur.

Finalement on peut conclure que le flux de chaleur par unité de surface avec la couche de polystyrène est la plus élevée par rapport de couche de la lame d'air.

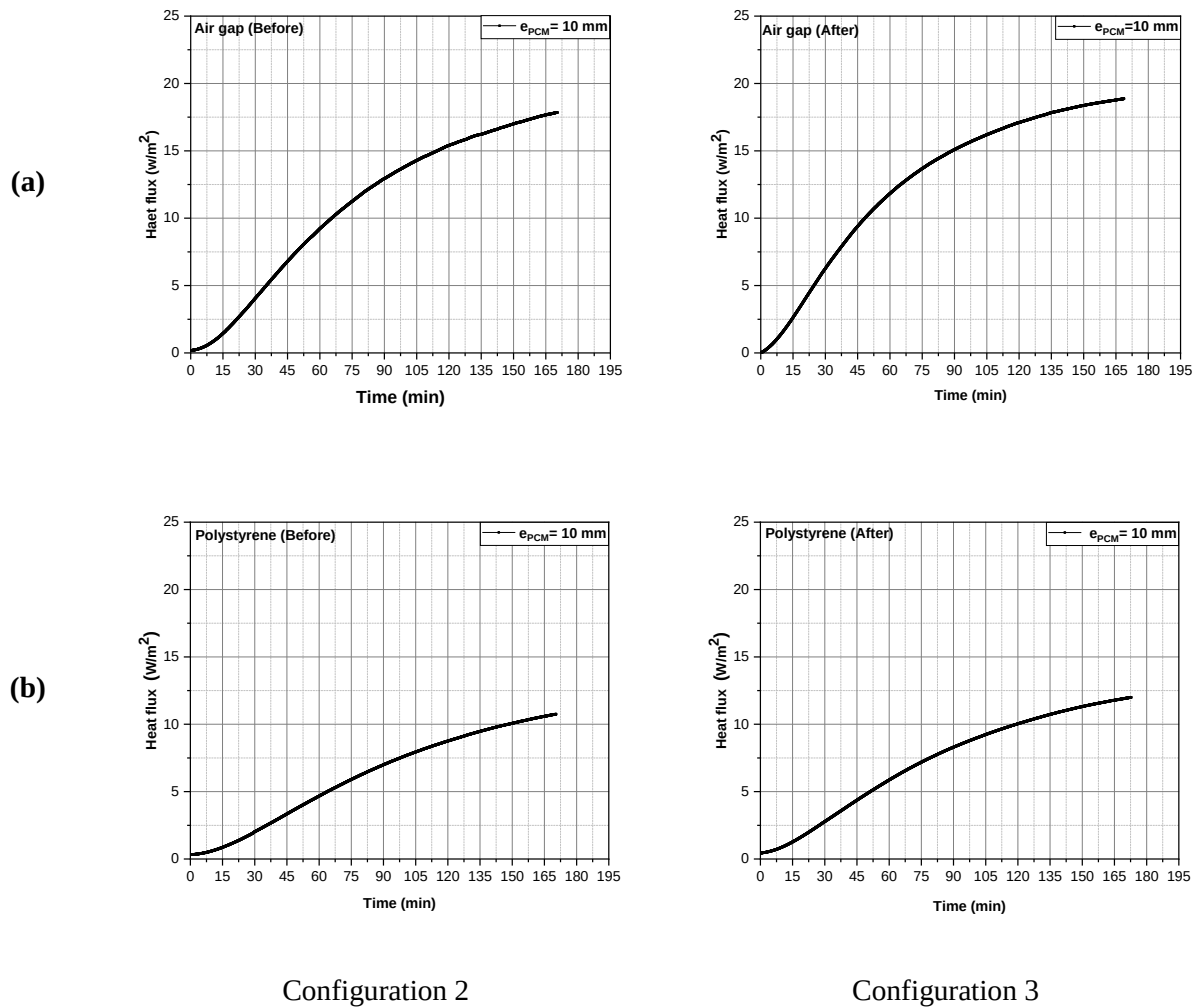


Figure 5.11 : Représente la variation le flux de chaleur par unité de surface dans le temps pour le cas de l'épaisseur $e = 10 \text{ mm}$; a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène.

Troisième partie: Effets de l'épaisseur de la couche MCP

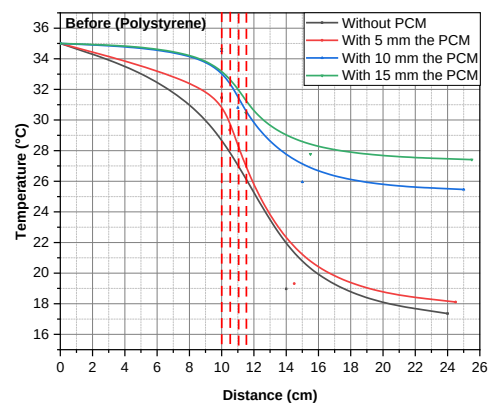
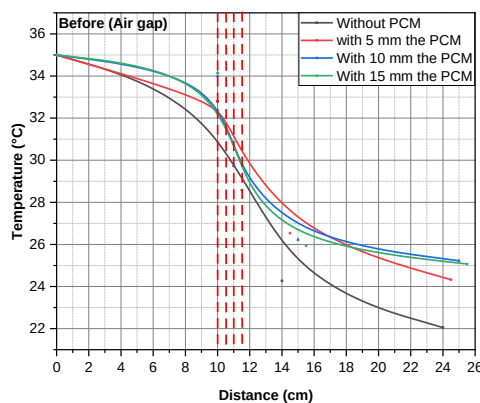
Dans le troisième essai expérimental, nous avons étudiée l'effet de l'épaisseur de la couche MCP sur la distribution de température dans un mur extérieur. Pour cela nous avons injecté le MCP à l'intérieur de mur avec la variation de l'épaisseur 5, 10 et 15 mm.

Dans les deux figures 5.12 et 5.13, nous avons représentant la variation de la température en fonction de l'épaisseur de mur à $T_{p-outlet}$ égale : 35, 40 et 45 °C ; a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène concernant les deux configurations 2 et 3 respectivement.

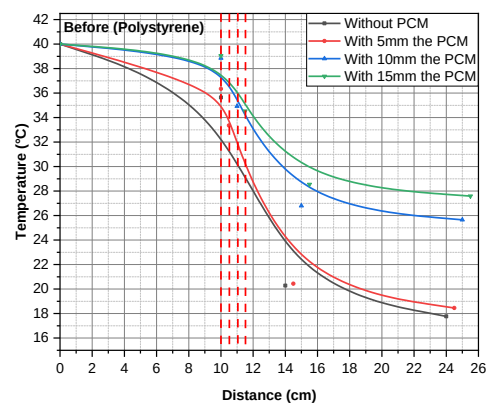
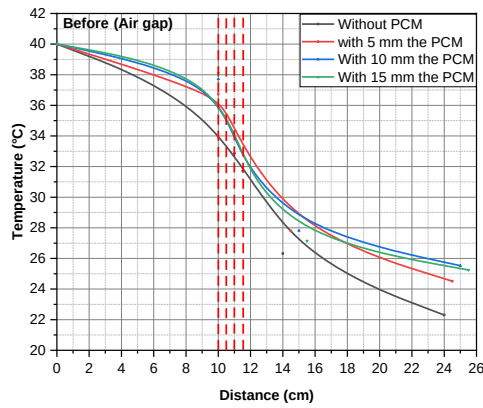
Dans tous les cas étudiés, on constate que les résultats performants en termes d'efficacité thermique sont obtenus lorsque le MCP est installé près du côté intérieur (configuration 3). D'autre part, lorsque le MCP est proche du côté extérieur (configuration 2), il est exposé à un flux de chaleur plus élevé, conduisant à une vitesse de fusion rapide qui produit une augmentation des gains thermiques.

Variation de température le long de l'épaisseur d mur pour le mur intégré MCP (MCP) et le mur sans MCP à différentes de température de la paroi extérieure de la période de la charge (3heurs) (35 °C, 40 °C et 45 °C) a été illustré aux figures 5.12 et 5.13, respectivement. On peut observer que la variation majeure le long de l'épaisseur de mur se produit pendant la température grand lorsque $T = 45\text{ °C}$. La couche de briques et la lame d'air, qui sont toutes deux à la frontière de la couche de MCP, ont de larges distributions de température tout au long de la période de la charge par rapport à la couche de polystyrène. Cela est dû à l'absorption de chaleur dans la couche MCP et à son élimination lente qui entraîne l'ajout de chaleur aux couches extérieur. Dans le mur avec MCP intégré, la température moyenne dans la couche d'intérieur est toujours inférieure à 26 °C, alors que dans le mur sans MCP, la température de la couche d'intérieur présente de grandes variations au cours des différentes heures de la charge. Cela est dû au fait que la couche de MCP entre le brique crosse et le polystyrène à une chaleur latente de fusion élevée et est capable d'absorber l'énergie froide.

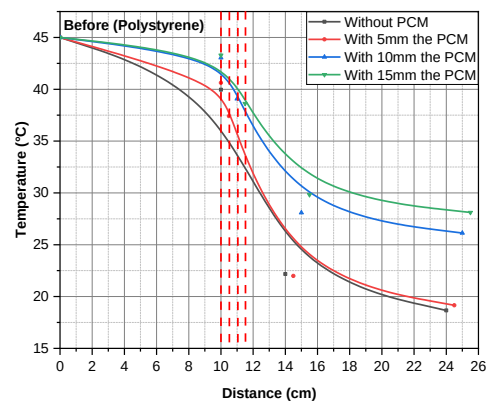
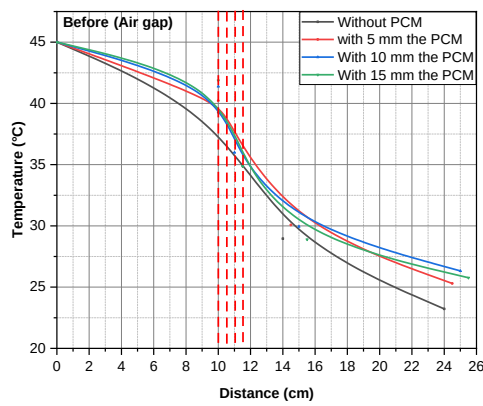
35 °C



40 °C



45 °C

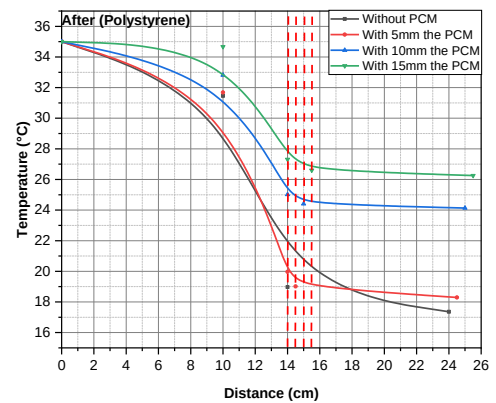
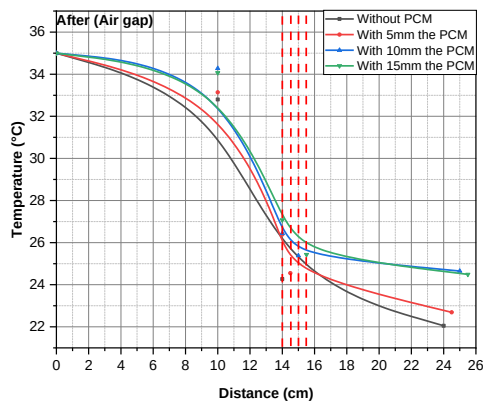


(a)

(b)

Figure 5.12 : Configuration 2 ; la variation de la température en fonction de l'épaisseur de mur à $T_{p-outlet}$ égale : 35, 40 et 45 °C ; a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène.

35 °C



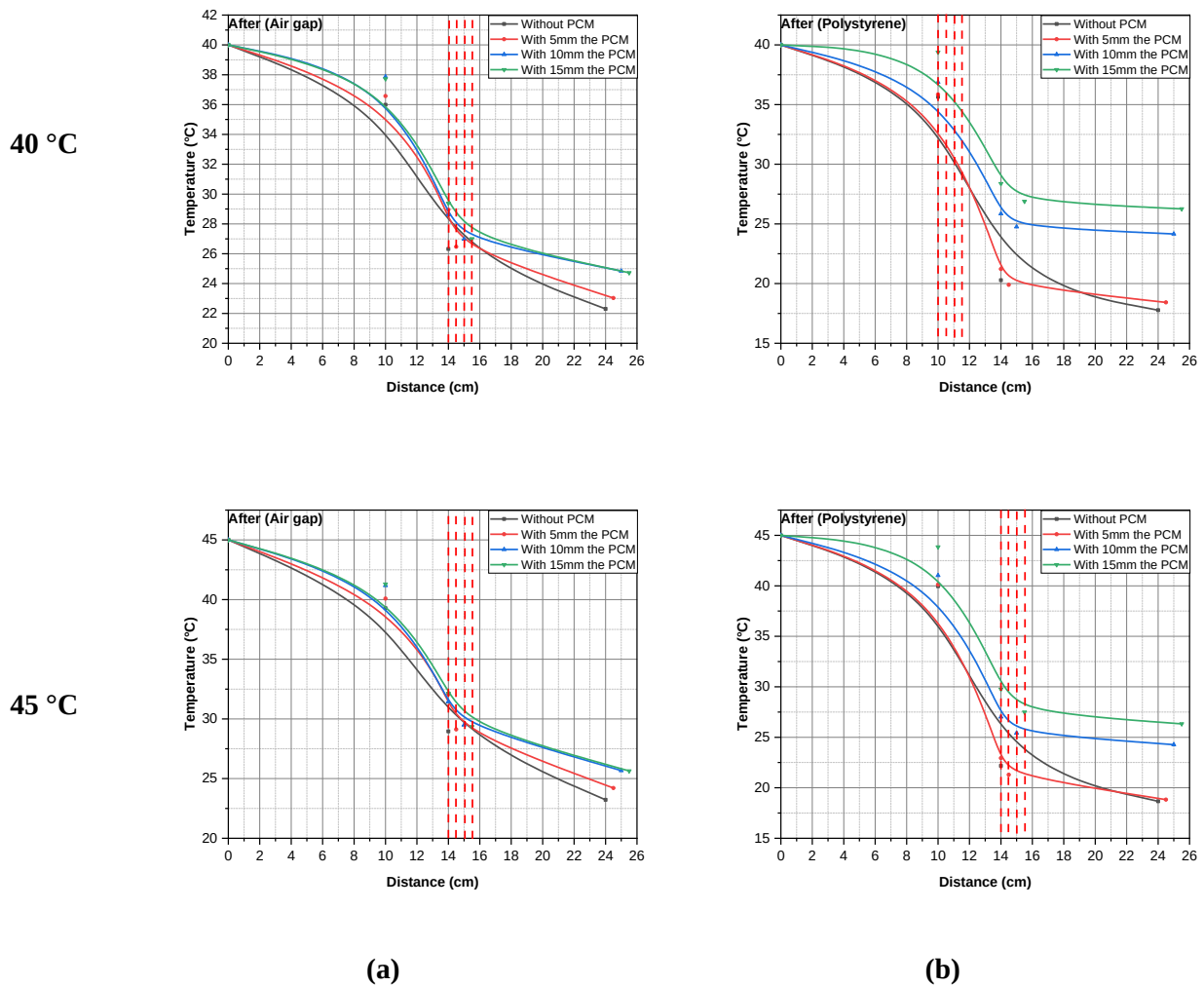


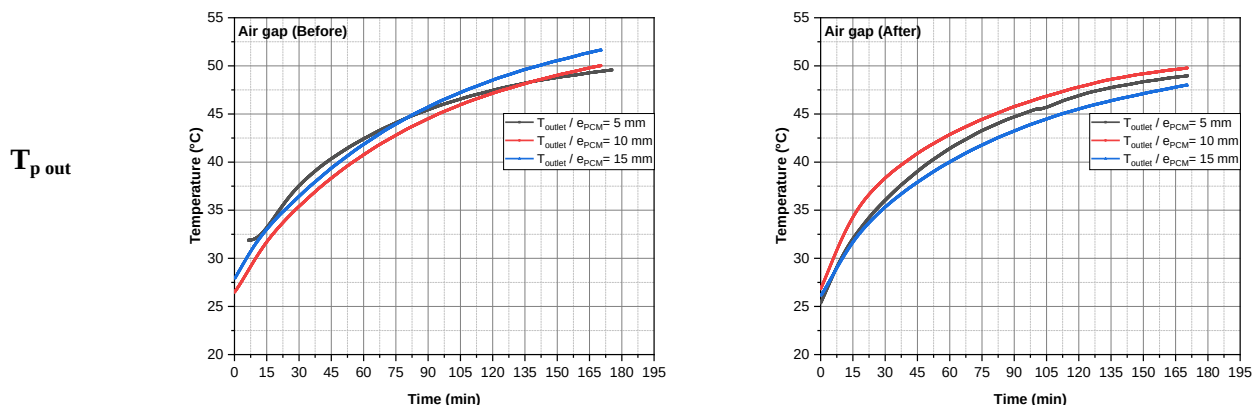
Figure 5.13 : Configuration 3 ; la variation de la température en fonction de l'épaisseur de mur à

$T_{p-outlet}$ égale : 35, 40 et 45 °C ; a) avec la lame d'air, b) Avec polystyrène.

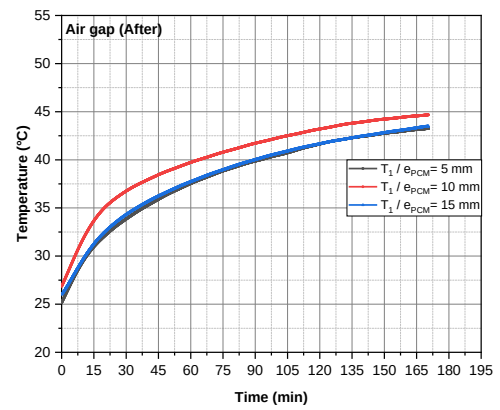
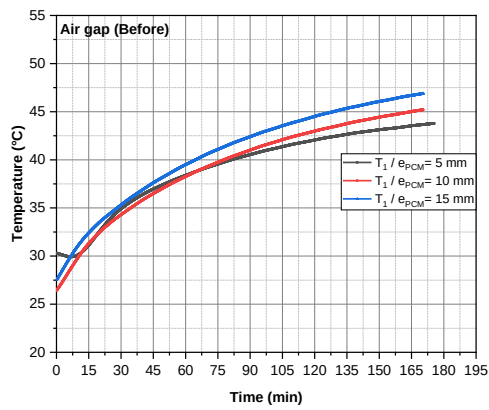
La capacité de stockage d'un matériau à changement de phase donné dépend de la quantité de MCP qui peut subir un cycle de transition de phase complet pendant une journée complète. La quantité efficace (épaisseur) du MCP dépend de l'amplitude d'excitation du MCP et de la durée d'excitation. L'épaisseur de MCP adaptée au maintien du confort thermique et entraînant des économies d'énergie peut être déterminée par corrélation. Pour cela nous avons fait une étude sur l'effet de l'épaisseur de la couche de MCP pour maintenir le confort thermique dans les murs extérieurs des pièces du bâtiment avec différentes épaisseurs de couche de MCP de 5, 10 et 15 mm pour le MCP ayant une température de transition de 26 °C comme le montre la figure 5.12 et 5.13. Avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche MCP, la température moyenne maximale dans la couche de la brique extérieur est réduite et retardée.

Le pic de température dans la couche de MCP pour une épaisseur de couche de MCP de 5 mm se produit à 165 min et est d'environ 42 °C pour la configuration 2 (avant lame de l'air) et 32 °C pour la configuration 3 (après lame de l'air), pour une épaisseur de MCP de 10 mm à 165 min et est d'environ 39 °C avant lame de l'air et 32.5 °C après la lame d'air et pour 15 mm L'épaisseur du MCP à 165 min est d'environ 39 °C avant lame de l'air et 31 °C après la lame d'air. Le pic de température dans la couche de MCP pour une épaisseur de couche de MCP de 5 mm se produit à 165 min et est d'environ 46 °C pour la configuration 2 (avant polystyrène) et 26 °C pour la configuration 3 (après polystyrène), pour une épaisseur de MCP de 10 mm à 165 min et est d'environ 43 °C avant polystyrène et 29.5 °C après polystyrène et pour 15 mm L'épaisseur du MCP à 165 min est d'environ 41 °C avant polystyrène et 31 °C après polystyrène.

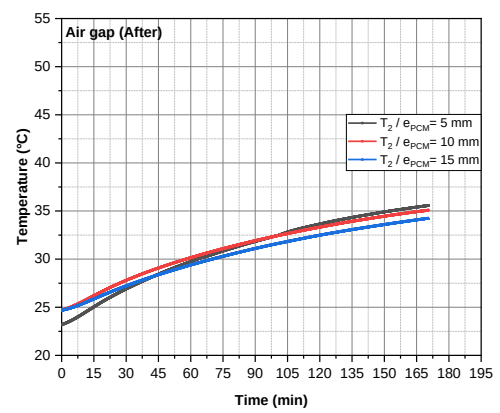
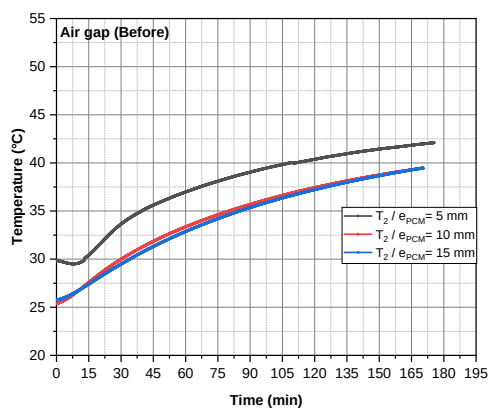
Cet effet retardé de la température maximale avec l'épaisseur de la couche MCP est dû à l'absorption de plus d'énergie thermique dans le matériau à changement de phase. De plus, il convient de noter qu'il existe une épaisseur optimale de MCP qui peut stocker le maximum d'énergie thermique pendant une longue période. D'après la figure 5.14, on peut observer qu'avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche MCP, il y a une certaine réduction des fluctuations de température mais il n'est pas possible de maintenir une température confortable constante.



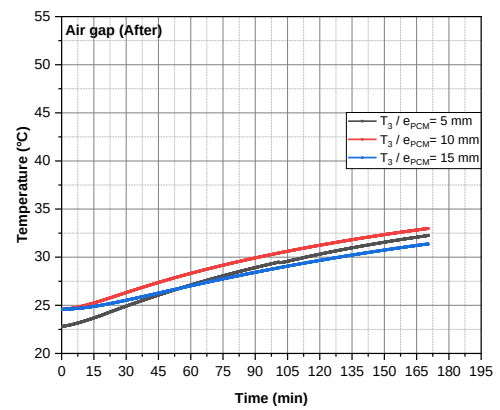
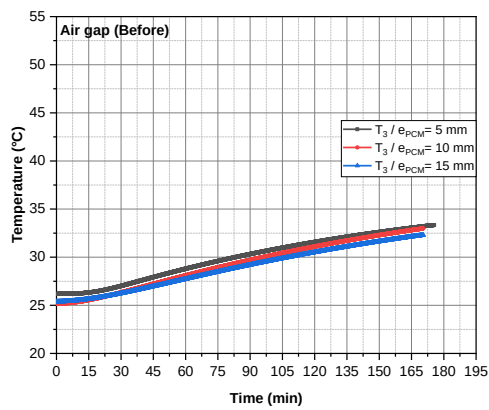
T_1



T_2



T_3



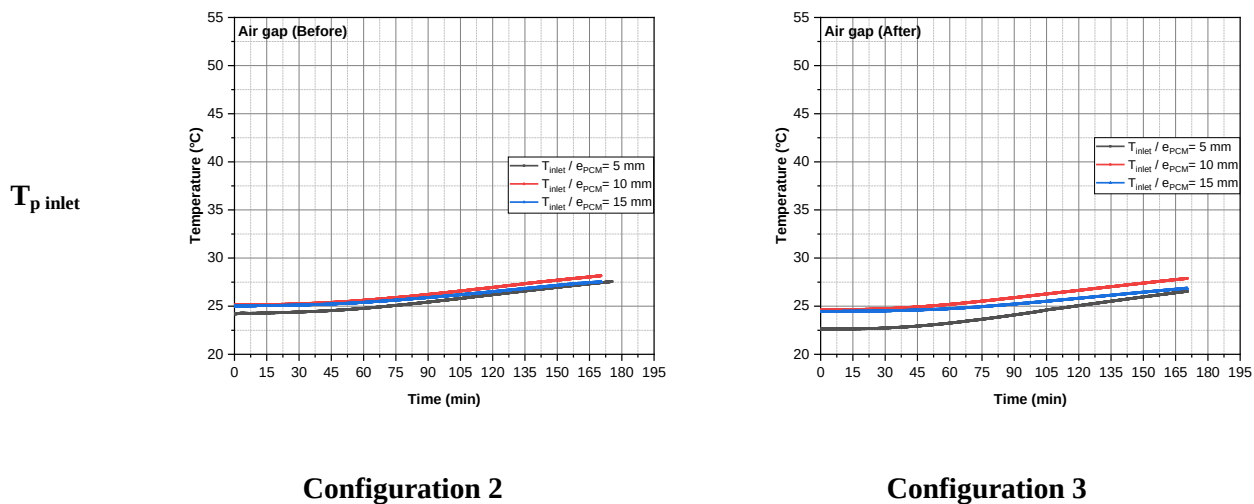


Figure 5.14 : Représente la variation de la température en fonction du temps dans chaque remplacement des thermocouples dans le mur (voir la figure 5.5), avec la lame d'air.

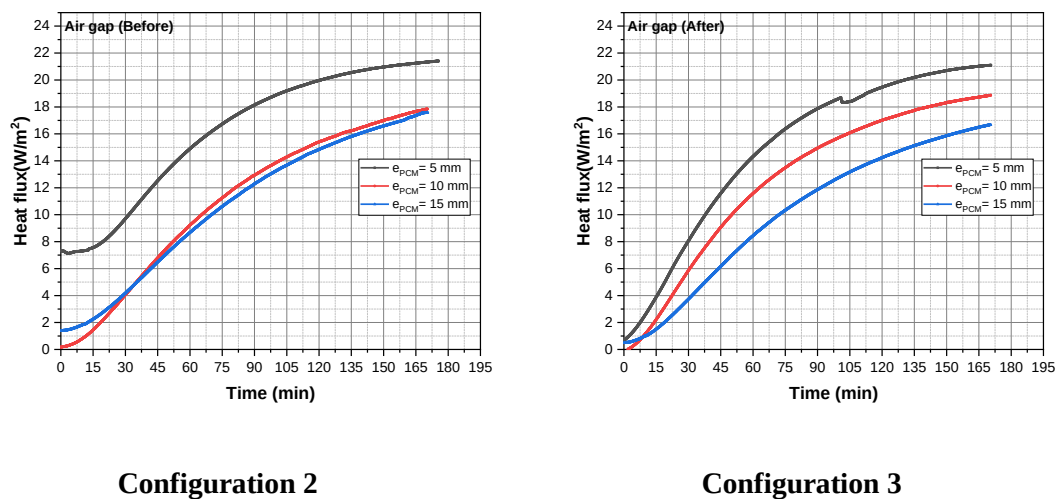
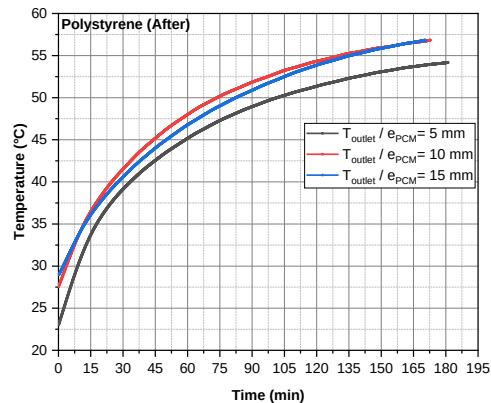
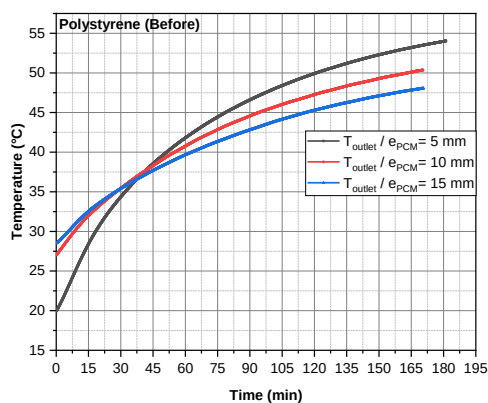
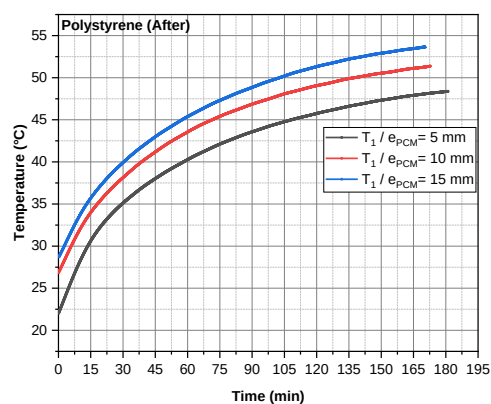
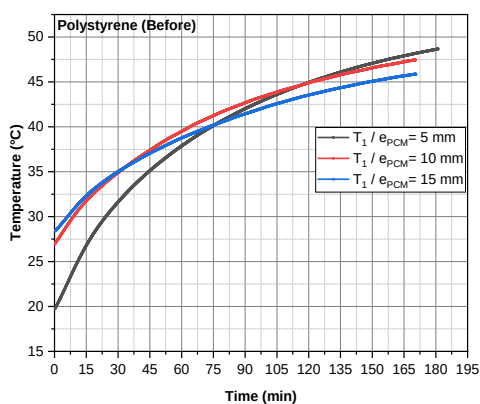
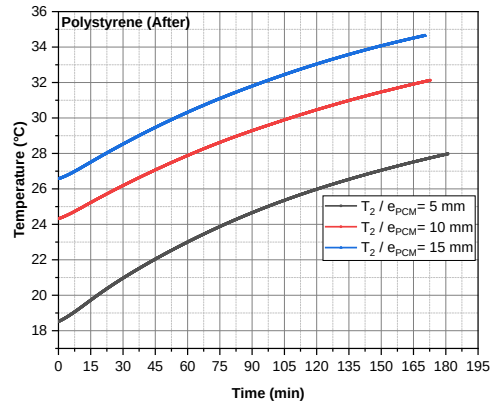
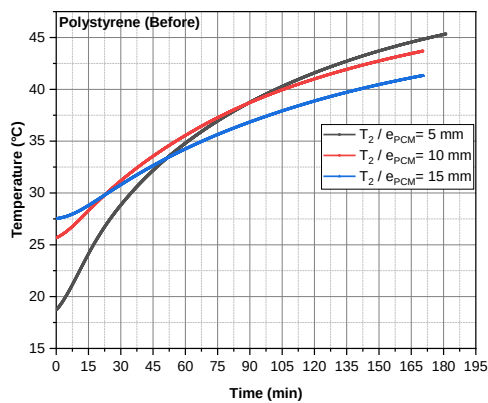
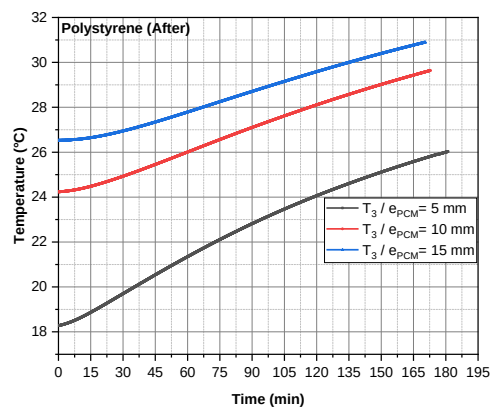
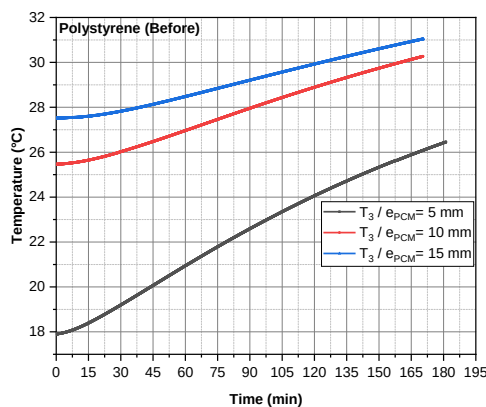
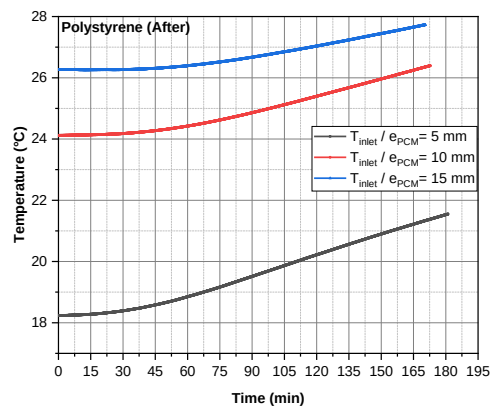
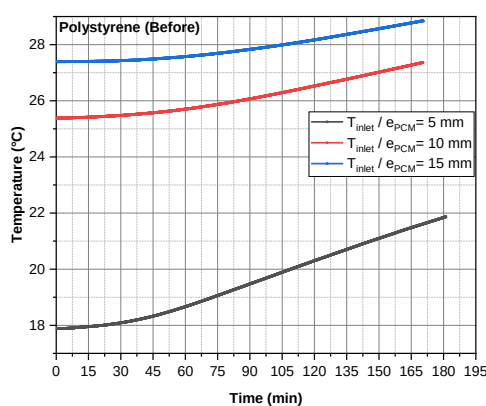


Figure 5.15 : Représente la variation le flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps Avec la lame d'air.

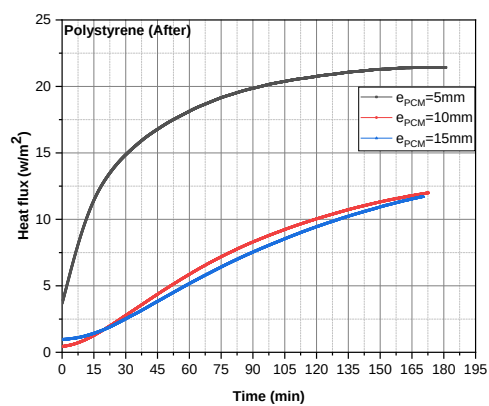
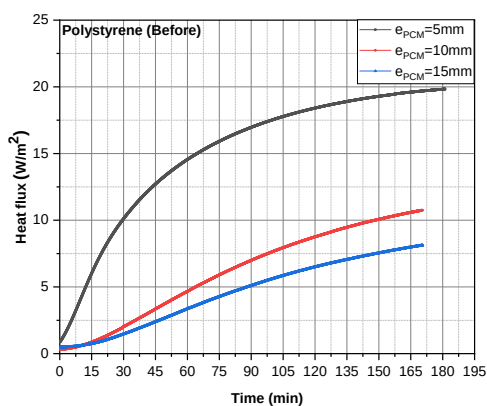
$T_{p\ out}$  T_1  T_2 

T_3  $T_{p \text{ inlet}}$ 

Configuration 2

Configuration 3

Figure 5.16 : Représente la variation de la température en fonction du temps dans chaque remplacement des thermocouples dans le mur (voir la figure 5.5), avec polystyrène.



Configuration 2

Configuration 3

Figure 5.17 : Représente la variation le flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps avec polystyrène.

Quatrième partie: Effets de charge et de décharge de la couche MCP.

Dans le quatrième essai expérimental, nous avons étudié l'effet de charge et de décharge de la couche MCP dans un mur extérieur. Pour cela nous avons injecté le MCP à l'intérieur du mur avec la variation de l'épaisseur 10 et 15 mm. Les tests seront effectués pendant une période de charge de trois heures et une période de décharge de quatre heures, respectivement.

On résume l'interprétation de tous les résultats de la quatrième partie. La répartition de la température sur les frontières des surfaces côté de couche (Brique crosse, MCP, la lame d'air et brique crosse). Les figures présentent la répartition transitoire de la température sur la surface côté de couche MCP pendant l'ensemble des processus de charge et de décharge. On peut voir qu'après l'allumage de la plaque chauffante et après 15 minute, les cinq températures (de T_{p-out} à $T_{p-inlet}$), augmentent rapidement au cours des 90 premières minutes, puis augmentent un peu lentement pendant 90 min, et remontent rapidement pendant 15 min à la fin du processus de charge. Cela est dû au fait que la couche MCP est initialement à l'état solide avec une température inférieure au point de fusion du MCP, de sorte que l'énergie absorbée est utilisée pour élever la température du panneau MCP de manière linéaire sous forme de chaleur sensible pendant cette période. Une fois que la température du MCP atteint le point de fusion, l'énergie absorbée doit être stockée sous forme de chaleur latente et la température du MCP change dans une plage étroite 25 °C entraînant une augmentation tardive des températures de surface. Après avoir retiré la plaque chauffante, le processus de décharge a commencé. Il montre que toutes les températures de surface diminuent fortement pendant environ 145 minutes, puis entrer dans une région « rampante » avec de légères baisses de température pendant 120 minutes parce que nous avons fixé une période de charge de trois heures (3 h) et le décharge de quatre heures (4 h).

Les deux figures 5.18 et 5.19 représentent la variation de la température et flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps dans la période de charge et décharge respectivement.

Dans le cas de configuration 2 (avant) et avec une épaisseur de 10 mm, nous constaté que:

1- Avec la lame d'air, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 46 ° C, soit 6° C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T2).

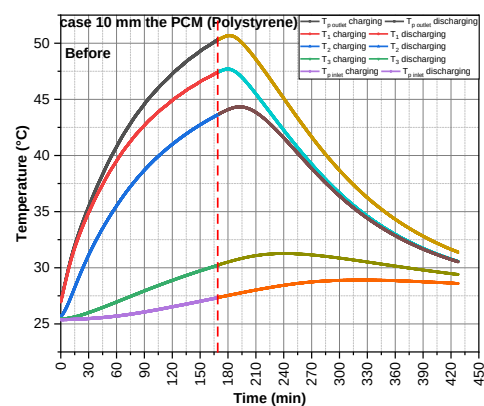
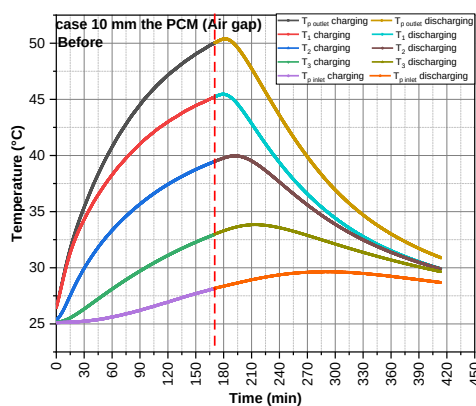
2- Avec polystyrène, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 47.5 ° C, soit 3° C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T2).

Dans le cas de configuration 3 (après)et avec une épaisseur de 10 mm, nous constaté que:

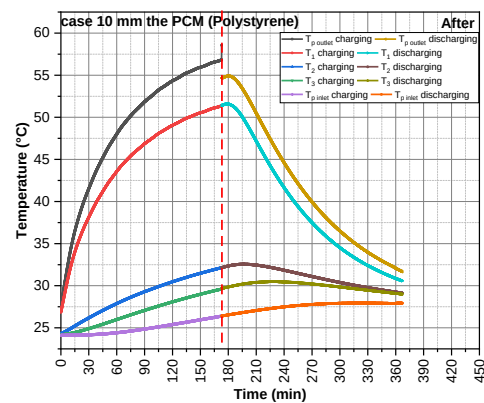
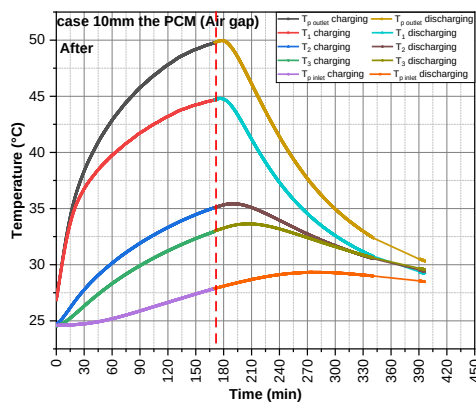
1- Avec la lame d'air, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 50 ° C, soit 16° C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T3). Ceci est dû à la présence d'une surface de la lame d'air de 40 mm d'épaisseur entre le brique crosse extérieur et la couche de MCP avec une température T2 = 35.5 °C.

2- Avec polystyrène, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 52 ° C, soit 21.5° C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T3). Ceci est dû à la présence d'une surface de polystyrène de 40 mm d'épaisseur entre le brique crosse extérieur et la couche de MCP avec une température T2 = 32.5 °C.

2



3



(a)

(b)

Figure 5.18 : Représente la variation de la température en fonction du temps dans la période de charge et décharge, 2) configuration 2, 3) configuration 3, a) avec la lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 10 mm.

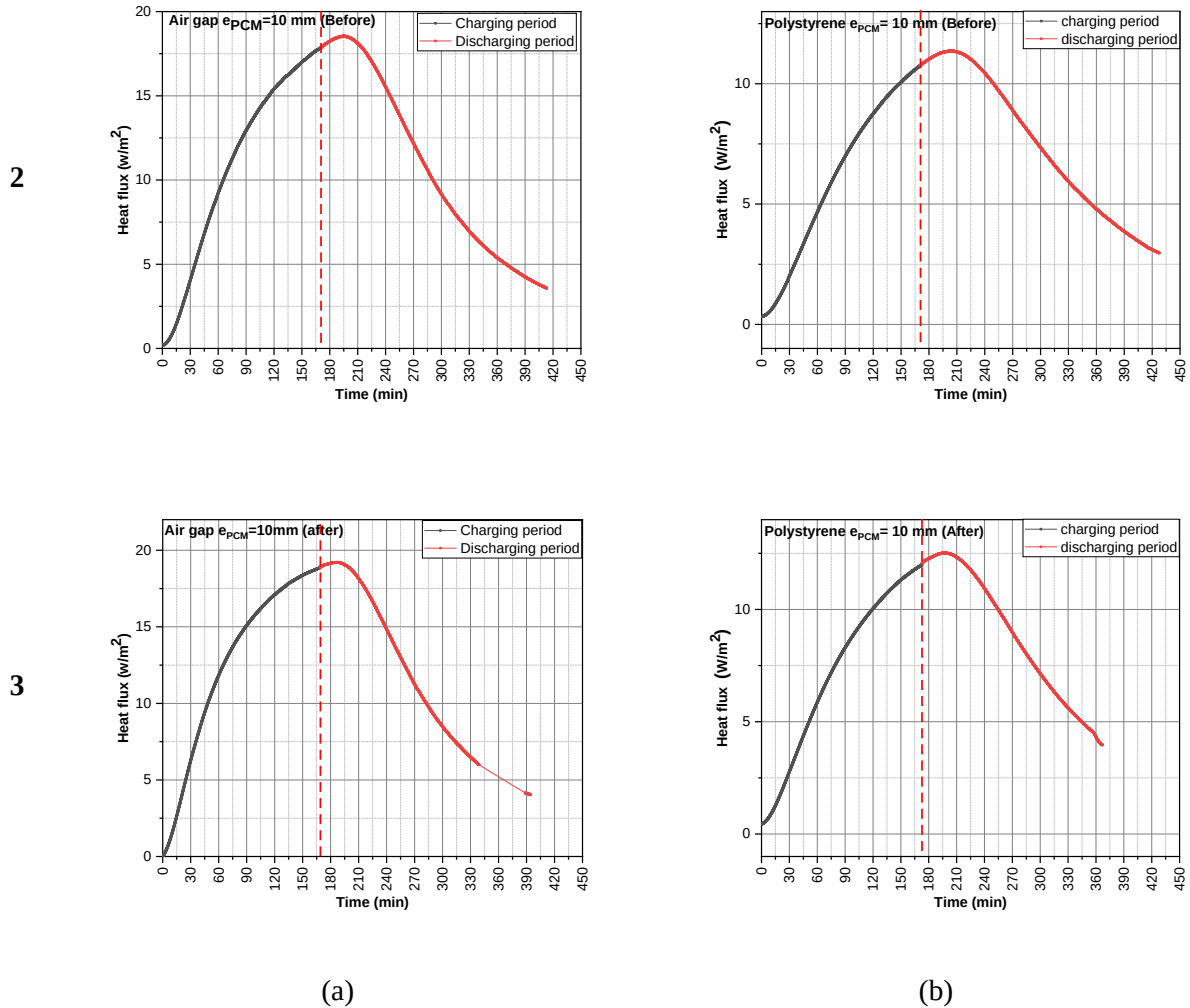


Figure 5.19 : Représente la variation de flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps dans la période de charge et décharge, a) avec la lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 10 mm.

Les figures 5.20 et 5.21 représentent la variation de la température et du flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps dans la période de charge et décharge respectivement.

Dans le cas de configuration 2 (avant) et avec une épaisseur de 15 mm, nous constaté que:

1- Avec la lame d'air, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 47.5 °C, soit 7.5 °C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T2).

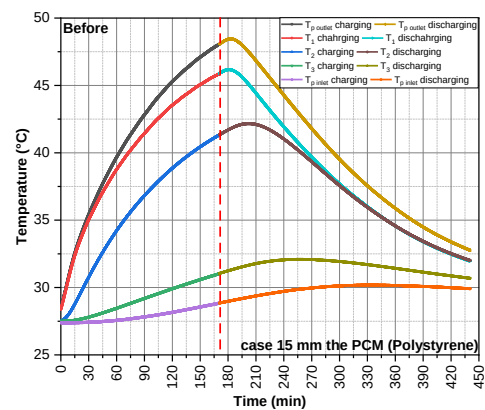
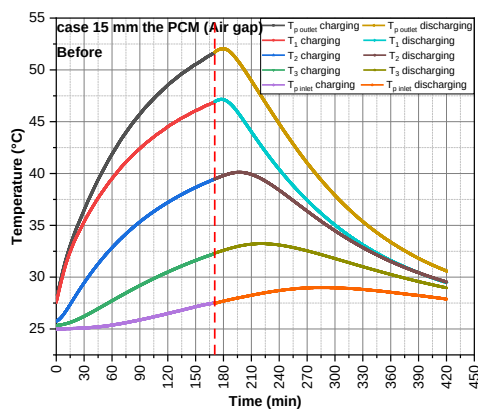
2- Avec polystyrène, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 46 ° C, soit 3.5° C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T2).

Dans le cas de configuration 3 (après) et avec une épaisseur de 15 mm, nous constaté que:

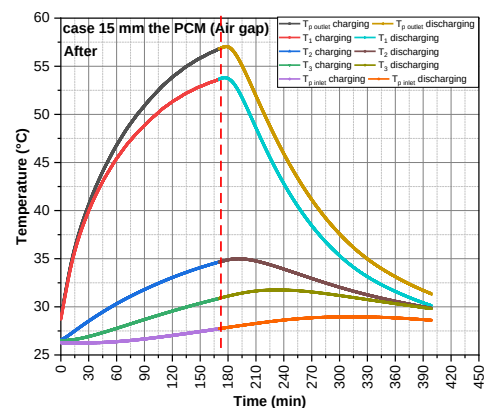
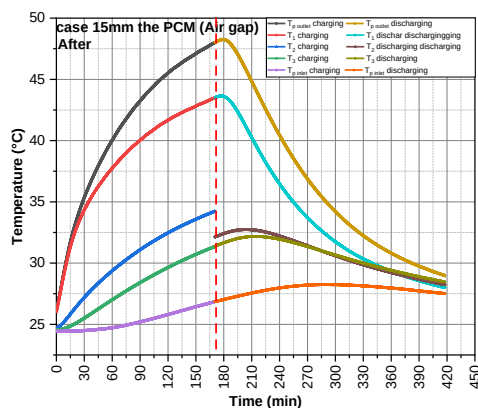
1- Avec la lame d'air, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 44 ° C, soit 11.5° C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T3). Ceci est dû à la présence d'une surface de la lame d'air de 40 mm d'épaisseur entre le brique crosse extérieur et la couche de MCP avec une température T2 = 34 °C.

2- Avec polystyrène, la température de surface T1 la plus élevée atteinte à la fin du processus de charge n'est que de 54.5 ° C, soit 22.5° C de moins que celle de la surface côté de la couche de MCP (T3). Ceci est dû à la présence d'une surface de polystyrène de 40 mm d'épaisseur entre le brique crosse extérieur et la couche de MCP avec une température T2 = 35 °C.

2



3

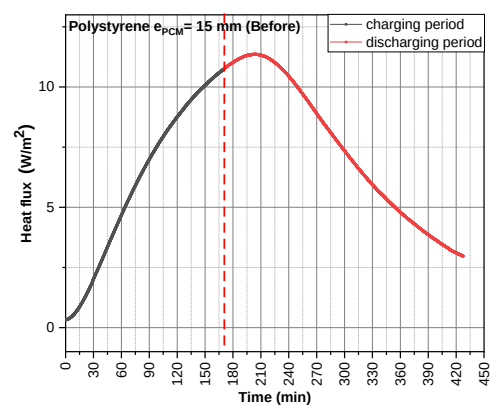
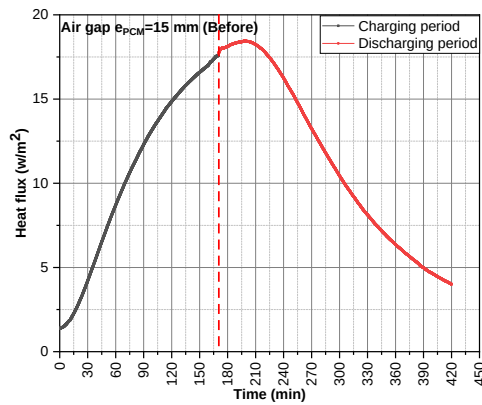


(a)

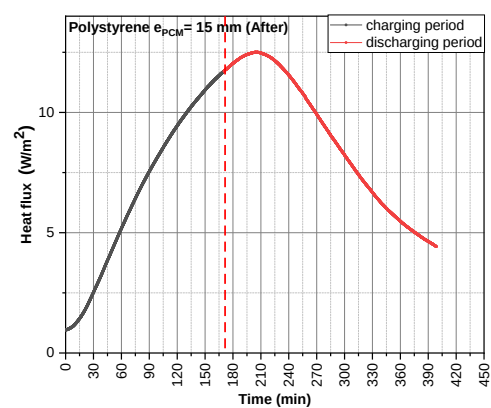
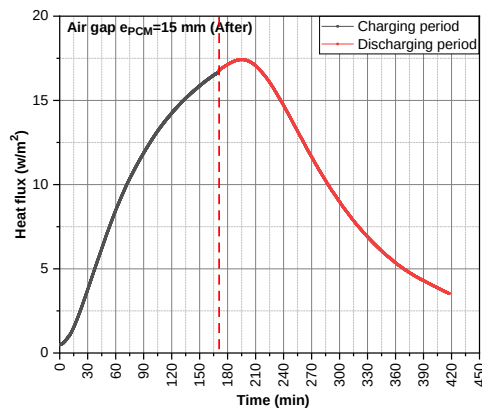
(b)

Figure 5.20 : Représente la variation de la température en fonction du temps dans la période de charge et décharge, 2) configuration 2, 3) configuration 3, a) avec la lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 15 mm.

2



3



(a)

(b)

Figure 5.21 : Représente la variation de flux de chaleur par unité de surface en fonction du temps dans la période de charge et décharge, a) avec la lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 15 mm.

Les figures 5.22 et 5.23, représentent les variations de la température en fonction du temps (T_1 , T_2 et T_3) de la couche de MCP, pour une épaisseur de 10, 15 mm dans la période de charge et décharge avant et après la couche de la lame d'air ou le polystyrène.

Sur cette figure, nous avons tracé trois graphes en trois points, c'est-à-dire sur les côtés et au centre de la surface de MCP (T_1 , T_2 et T_3).

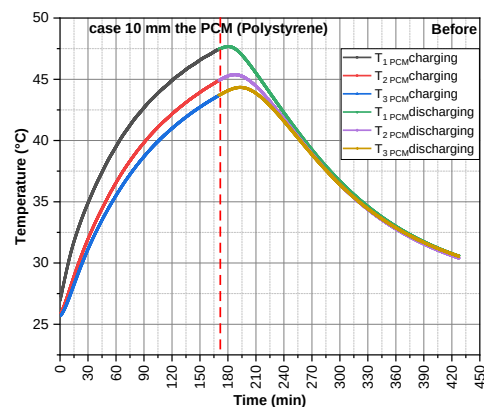
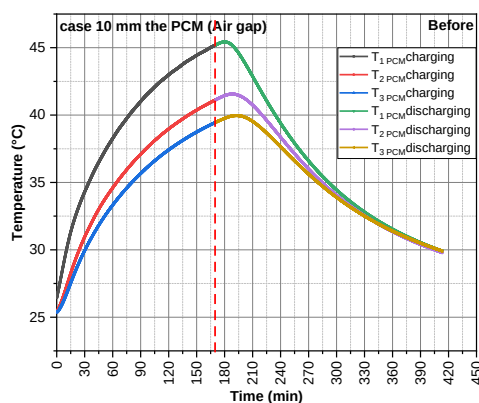
Nous avons constaté que:

Dans la première configuration (Avant), la température de l'entrée de la couche de MCP avec polystyrène (T_1 polystyrène = 47.5°C) est grande par rapport a température de l'entrée avec la lame d'air (T_1 la lame d'air= 45.5°C) même la température de sortie de MCP avec polystyrène (T_3 polystyrène = 44.5°C) est grande par rapport a température de sortie avec la lame d'air (T_3 la lame d'air= 40°C).

Ceci est acceptable car le polystyrène est un isolant et constitue un obstacle pour le flux de chaleur et il ya un donc un retour de chaleur vers le MCP ce qui a pour effet la diminution rapide de la température, mais la sortie de chaleur par le MCP vers la lame d'air est libre été sans aucun obstacle.

Par contre dans la deuxième configuration (Après) l'effet est inverse parce que la quantité de chaleur avec la lame d'air est grande par rapport au cas avec polystyrène comme nous avons pu voir dans la figure 5.23. La température de l'entrée de la couche de MCP avec la lame d'air (T_1 la lame d'air = 35.5°C) est grande par rapport a température d'entrée avec polystyrène (T_1 polystyrène= 32.5°C) même la température de sortie de MCP avec la lame d'air (T_3 la lame d'air = 31.5°C) est grande par rapport à température de sortie avec polystyrène (T_3 polystyrène= 30.5°C).

2



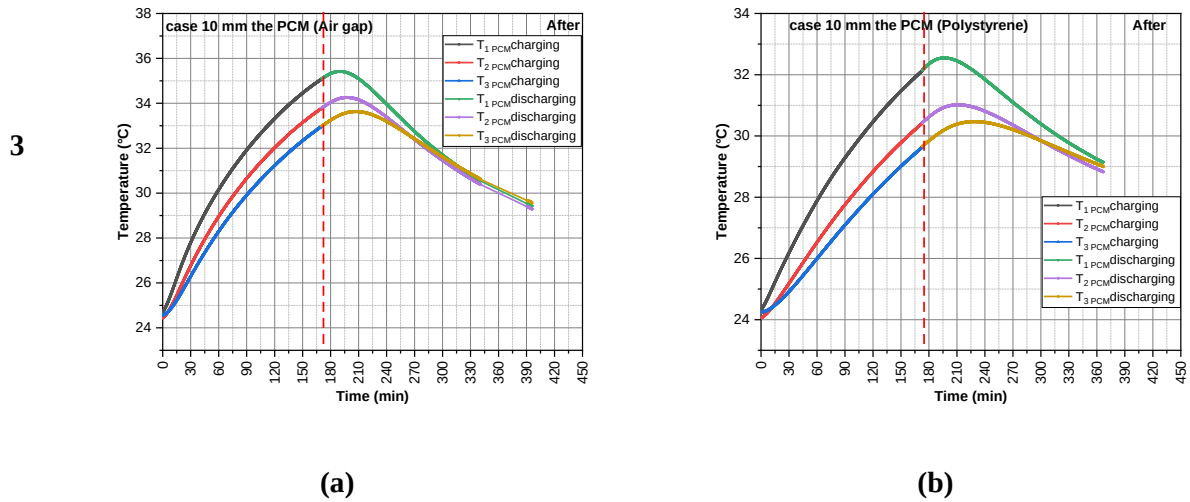


Figure 5.22 : Représente la variation de la température de la couche de MCP en fonction du temps dans la période de charge et décharge, 2) configuration 2, 3) configuration 3, a) avec la lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 10 mm.

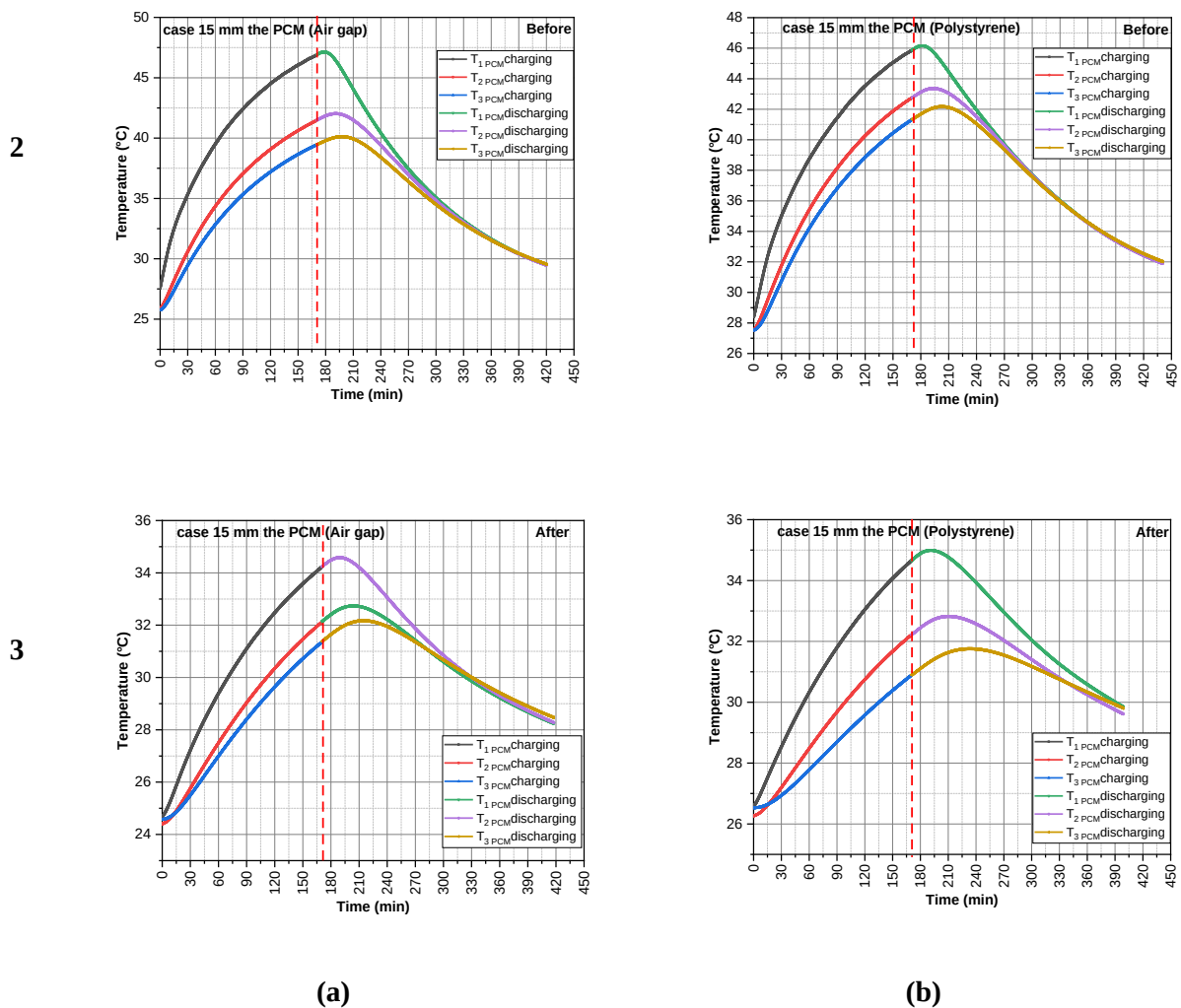


Figure 5.23 : Représente la variation de la température de la couche de MCP en fonction du temps dans la période de charge et décharge, 2) configuration 2, 3) configuration 3, a) avec la lame d'air et b) avec polystyrène pour une épaisseur de 15 mm.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce travail, la performance thermique du mur extérieur du bâtiment contenant du PCM est étudiée expérimentalement en tenant compte de charge (chauffage) et décharge (refroidissement). L'objectif principal de l'étude était d'identifier la contribution de la chaleur latente de la couche de PCM sur la masse thermique du mur et d'optimiser l'épaisseur de la couche de PCM et la température de fusion pour une amélioration potentielle de la performance énergétique des bâtiments. En adhérant à cet objectif, dans l'étude, les impacts de l'emplacement du PCM (près de l'environnement intérieur ou extérieur) et de l'épaisseur de la couche de PCM (e varie de 5 à 15 millimètres) sont examinés sur l'économie d'énergie, le facteur de décrémentation et le décalage temporel.

Les mesures sont effectuées pour le mur extérieur du bâtiment sans PCM (mur de base) et le mur avec MCP. Des mesures ont été effectuées pour trois configurations au niveau du laboratoire de Génie mécanique. Les résultats obtenus dans ce travail sont mis en évidence ci-dessous.

- Le placement de PCM entre l'isolant et brique crosse extérieur permet une économie d'énergie maximale dans des conditions de chauffage. Dans des conditions de refroidissement, l'économie d'énergie maximale est obtenue en plaçant le MCP entre la brique crosse intérieure et polystyrène ou lame d'air.
- Par rapport au mur de base, la plus grande économie d'énergie dans une période long en incorporant du MCP au mur extérieur correspondant pour réduction d'énergie.

Effets de lame d'air et de polystyrène sur la distribution de température dans un mur extérieur ; on n'a trouvé que polystyrène à une grande capacité de réduction de la chaleur.

Et pour effets de position de la couche MCP, la configuration 3 semble être la plus appropriée pour un bâtiment ayant la charge thermique la plus élevée pendant l'hiver. Cette configuration permet au MCP de retenir plus d'énergie à l'intérieur du bâtiment lorsque l'énergie latente stockée dans le MCP est libérée en raison de la haute résistance au transfert de chaleur causée par l'isolation. On conclut que le flux de chaleur par unité de surface avec la couche de polystyrène est le plus élevé par rapport de couche de lame d'air.

Conclusion générale

Il a été conclu que l'optimisation de l'épaisseur du MCP et de la température de fusion du MCP basée sur l'exploitation maximale de la chaleur latente du MCP est très importante du point de vue économique de la construction de systèmes d'énergie passive.

Suivant un raisonnement similaire, la configuration 2 et 3 peut être plus appropriée pour un bâtiment avec la charge thermique la plus élevée pendant l'été. Néanmoins, la configuration choisie doit être la même pour chaque bâtiment.

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

- [1] Xing Jin et al, « Sur l'importance de l'emplacement des PCM dans les murs des bâtiments pour une meilleure performance thermique », *Applied Energy* ; (2013) 106 : 72–78.
- [2] Dimos A. Kontogeorgos et al, « Etude expérimentale de l'irrésistance des cloisons sèches multicouches systèmes intégrant des panneaux d'isolation sous vide et un changement de phase Matériaux », *Fire Safety Journal*; (2016) 81:8–16.
- [3] Wenye Lin et al, « étude et optimisation des performances thermiques des bâtiments avec des matériaux à changement de phase intégrés et des capteurs thermiques solaires photovoltaïques », *Energy and Buildings* ; (2016) : 01-041.
- [4] Xu Wang et al, « évaluation expérimentale sur un type de mur composite incorporant des matériaux à changement de phase à stabilisation de forme (SSPCM) », *Energy and Buildings*, (2016) 128: 567–574.
- [5] Amirreza Fateh et al, « numérique et expérimentale d'une couche d'isolation avec des matériaux à changement de phase (PCM) ». *Energy and Buildings* ; (2017) :08-007.
- [6] Mohamed EL Wazna et al, « expérimentale et numérique sur les performances thermiques des matériaux isolants alternatifs à base de déchets textiles: Une approche par différences finies », *Journal of Industriel Textiles*, (2018): 1–23.
- [7] Mushtaq I. Hasan et al, « Expérimentale des matériaux à changement de phase pour l'isolation des bâtiments résidentiels », *Sustainable Cities and Society*; (2018) 36:42–58.
- [8] Myriam Bahrar et al, « numérique et expérimentale sur l'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM) micro encapsulés dans des panneaux textiles en béton armé pour le stockage d'énergie », *Sustainable Cities and Society* ; 41 (2018) : 455–468.
- [9] Sajith Wijesuriya et al, « Appareil expérimental et méthodologie pour tester et quantifier les performances thermiques des matériaux à changement de phase micro et macro-encapsulés dans les applications d'enveloppe de bâtiment ». *Journal of Energy Storage*; (2020): 32-101770.
- [10] Yanna Gao et al, « analyse du comportement thermique des briques creuses remplies de matériau à changement de phase (PCM) », *Journal of Building Engineering*; (2020): 31-101447.

Références bibliographiques

- [11] Mustapha Mahdaoui et al, « Briques de construction avec matériau à changement de phase (PCM) : Performances thermiques », *Construction and Building Materials* ;(2020) : 0950-0618.
- [12] Chiara Rubino et al, « Déchets textiles non tissés ajoutés avec PCM pour les applications de construction », *Appl. Sci* ;(**2021**):11-1262.
- [13] Dariusz Heim et al, « dynamique du processus de fusion dans les fenêtres de matériau à changement de phase déterminée sur la base de la transmission directe de la lumière », *Energies* (**2021**) :14-721.
- [14] Isolation thermique des logements anciens/agence nationale pour l'amélioration de l'habitat/édition MONITEUR/17 rue d'Uzès 75002 Paris 1980.
- [15] BOUCHETARA Meriem, HAMIDI Mohamed Azam, (2016) : Etude de calculs des déperditions thermique d'une maison, mémoire de fin d'étude de master académique filière Génie mécanique, spécialité isolation thermique et conditionnement d'air. Faculté des sciences et de la technologie, Université de Mostaganem.
- [16] H.Mehling et L.F.Cabeza, *Heat and cold storage with PCM*, Springer - Verlag Berlin Heidelberg ed 2008.
- [17] E. Oro, A. Gil, A. de Gracia, D. Boer, et L. F. Cabeza, "Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants", *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 166-173, 2012.
- [18] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zalba, et L. F. Cabeza, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 31-55, 2010.
- [19] M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, et L. F. Cabeza, "State of the art on hightemperature thermal energy storage for power generation. Part 2-Case studies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 56-72, 2010.

Références bibliographiques

[20] URL:http://www.physique-et-matiere.com/materiau_a_changement_de_phase_thermique.php Date : 03/06/2022.

[21] A. Abhat, "Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials", *Sol. Energy*, vol. 30, no. 4, pp. 313-332, 1983.

[22] URL: <https://apiscera.com/cire-d-abeille/>