

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

**Faculté de Technologie**

Département de Mécanique

**THESE DE DOCTORAT**

Spécialité : Génie Mécanique

COMPORTEMENT THERMIQUE DES BATIMENTS A PAROIS INCORPORANT  
LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

Par

**Lotfi DERRADJI**

Devant le jury composé de :

M. MERZOUK	Professeur, U. de Blida	Président
A. HAMID	Professeur, U. de Blida	Rapporteur
B. LAARIBI	Professeur, U. El Khemis	Examineur
L. LOUKARFI	Professeur, U. Chlef	Examineur
A. KHELLAF	Directeur de recherche, CDER	Examineur
D. SEMMAR	Professeur, U. de Blida	Examineur

Blida, Juin 2015

## RÉSUMÉ

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont la capacité d'absorber ou de libérer une grande quantité de chaleur latente, pendant leur changement de phase, pour améliorer le confort thermique et réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments. Ce travail de thèse a pour but de faire une étude numérique et expérimentale pour tester l'influence de l'intégration des MCP dans les matériaux de construction sur le comportement thermique des bâtiments en Algérie.

Dans ce but, une étude numérique a été effectuée sur le comportement thermique de parois composées des matériaux de construction utilisés en Algérie et de parois dans lesquelles est incorporé un matériau à changement de phase. Le modèle, basé sur la formulation enthalpique, est décrit par une équation de transfert de chaleur. Cette équation est résolue par une méthode implicite aux différences finies pour étudier le transfert de chaleur à travers une paroi intégrant un matériau à changement de phase (MCP). Les résultats numériques ont permis d'analyser l'influence de l'épaisseur de la paroi et de sa composition ainsi que l'effet des matériaux MCP sur l'évolution au cours du temps de la température de la face interne de la paroi.

Ensuite, une investigation expérimentale est réalisée sur une nouvelle utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) comme enduit recouvrant des parois en béton et en briques creuses pour étudier l'influence de l'intégration des MCP sur le comportement thermique des cellules et sur l'amélioration du confort thermique sous le climat de l'Algérie. Des essais de flexion, de compression, d'adhésion et de dureté ont été réalisés à 7 jours d'âge sur un matériau composite plâtre/MCP. Différents pourcentages de matériau à changement de phase MCP ont été utilisés pour déterminer la composition optimale (plâtre/MCP). Le matériau à changement de phase utilisé est une paraffine encapsulée sous forme de poudre, deux types de paraffines ont été utilisés (le DS 5001 avec une température de fusion de 26 °C et le DS 5008 avec une température de fusion de 23 °C). Des mesures in-situ ont été réalisées pour déterminer la température de l'air et des parois de trois cellules ; l'une construite avec des matériaux classiques et les deux autres avec un matériau composite plâtre/MCP. Les cellules sont

implantées dans la région d'Alger. Les résultats des mesures montrent que l'utilisation d'un enduit en plâtre intégrant 30 % MCP contribue à une réduction de l'amplitude (diurne/nocturne) de la température de l'air à l'intérieur de la cellule de 4 °C en période d'été. L'utilisation de MCP a permis aussi d'améliorer le confort thermique et d'augmenter la température maximale des cellules de 2 °C en période d'hiver.

Enfin, A l'aide du logiciel TRNSYS, une simulation thermique en régime dynamique a été effectuée pour comparer le comportement thermique d'un local à usage de bureau à parois de type classique avec un local à parois incorporant des matériaux à changement de phase (MCP) en utilisant le type 204. La simulation a été effectuée, pour différentes zones climatiques en Algérie, sur un bureau au dernier étage, de 3,5 m de longueur, 3 m de largeur et 3 m de hauteur. Les résultats de la simulation montrent que l'utilisation des matériaux à changement de phase dans le plafond en béton et les murs en briques creuses a permis d'augmenter la température du bureau de 3 à 4 °C en période d'hiver. Les résultats montrent aussi que la présence des matériaux à changement de phase dans les parois a réduit la surchauffe en période d'été, en diminuant la température de l'air de 7 °C.

## ملخص

المواد المتغيرة الأطوار لديها القدرة على امتصاص أو إطلاق كمية كبيرة من الحرارة الكامنة، خلال مرحلة التغير، لتحسين الراحة الحرارية وخفض استهلاك الطاقة في المباني. هذه الأطروحة تهدف إلى إجراء دراسة رقمية وتجريبية لاختبار تأثير دمج المواد المتغيرة الأطوار مع مواد البناء على السلوك الحراري للمباني في الجزائر.

أولاً، في هذا السياق، تم إجراء دراسة رقمية على السلوك الحراري للجدران المتكونة من مواد البناء الكلاسيكية في الجزائر و للجدران التي تحتوي على مادة متغيرة الأطوار. يوصف هذا النموذج، بتطبيق معادلة نقل الحرارة. تم حل هذه المعادلة باستخدام أسلوب الفرق محدود الضمني لدراسة نقل الحرارة من خلال جدار يحتوي على مادة متغيرة الأطوار. استخدمت النتائج الرقمية لتحليل تأثير سمك الجدار وتأثير مادة متغيرة الأطوار على تغيرات درجة الحرارة للوجه الداخلي للجدار.

وبعد ذلك، تم إجراء الفحص التجريبي على استخدام جديد لمادة متغيرة الأطوار كطلية مع الخرسانة و الأجر لدراسة تأثير دمج هذه المادة على السلوك الحراري لبنايات نموذجية و تحسين الراحة الحرارية في مناخ الجزائر. لقد أجريت اختبارات الخصائص الميكانيكية على المادة المركبة من جبس و مادة متغيرة الأطوار بعد 7 أيام من العمر. استخدمت في المادة المركبة مختلف النسب لمادة متغيرة الأطوار. استخدمت نوعين من المواد المتغيرة الأطوار (مادة ذات درجة حرارة انصهار 26 درجة، و مادة ذات درجة حرارة انصهار 23 درجة). أجريت قياسات في الموقع لتحديد درجة حرارة الهواء والجدران لثلاث بنايات نموذجية. البناية الأولى بنيت بمواد بناء كلاسيكية والبنائيتين الأخرين من المادة المركبة من جبس و مادة متغيرة الأطوار. وتقع هذه الثلاث بنايات في منطقة الجزائر. وتشير نتائج القياس أن استخدام طلية الجبس مع 30% من مادة متغيرة الأطوار يساهم في الحد من درجة حرارة الهواء داخل البناية ب 4 درجات في فترة الصيف، وتحسين الراحة الحرارية في فصل الشتاء بزيادة درجة الحرارة الداخلية القصوى ب 2 درجة مئوية.

وأخيراً، بواسطة برنامج محاكاة الحراري الديناميكي باستخدام نوع 204، تم مقارنة السلوك الحراري للمكتب ذو الجدران التقليدية مع المكتب ذو الجدران التي تحتوي على المواد المتغيرة الأطوار. تم إجراء المحاكاة الرقمية، في مناطق مناخية مختلفة في الجزائر، على مكتب في الطابق الأخير طوله 6،3 متر، عرضه 7،2 متر وارتفاعه 9،2 متر. وتبين نتائج المحاكاة أن استخدام المواد متغيرة الأطوار في الجدران زاد من 3 إلى 4 درجات مئوية من حرارة المكتب في فترة الشتاء، وخفض درجة حرارة الهواء للمكتب ب 7 درجات مئوية في فترة الصيف.

## ABSTRACT

The phase change materials (PCMs) have the ability to absorb or release a large amount of latent heat during phase change, to improve thermal comfort and reduce energy consumption in buildings. This thesis aims to make a numerical and experimental study to test the influence of the integration of MCP into construction materials on the thermal behavior of buildings in Algeria.

First, in this context, a numerical study of the thermal behavior of walls made up of construction materials used in Algeria and walls containing a phase change materials is presented. The model, based on the enthalpy formulation, is described by an equation of heat transfer. This equation is solved by an implicit method of finite differences and algorithm of Thomas. We analyzed the influence of the wall's thickness and its composition on the evolution during the time of the temperature of the inside face of the wall.

Next, an experimental investigation is performed on a new use of phase change materials as coating material on concrete and hollow bricks walls, to study the influence of the integration of PCM on the thermal behavior of cells and on the improvement of thermal comfort under the climate of Algeria. Tests of the flexural strength, compressive strength, bond strength and hardness were performed at 7 days of age on a composite materials plaster/PCM. Different percentages of phase change material (PCM) were used in the designs of composition (plaster/PCM). The phase change material used is encapsulated paraffin-type powder. Two types of paraffins were used, namely, PCM (5001 DS) with a phase change temperature of 26 °C and PCM (5008 DS) with a phase change temperature of 23 °C.

In situ measurements of air and walls temperatures were made in three cells. The first one built with traditional materials and the two others with a composite plaster/PCM material. The cells are located in the Algiers region. The measurement results show that the use of a gypsum plaster incorporating 30 % PCM contributes to a reduction of the indoor temperature amplitude of the cell by 4 °C in the summer period. The use of PCM has also improved thermal comfort and increased the cell maximum temperature of 2 °C during winter.

Finally, using the TRNSYS thermal simulation software, thermal dynamic simulation system was conducted to compare the thermal behavior of a local office to use conventional walls with a local to walls incorporating change materials phase (MCP) using type 204. The simulation was performed for different climatic zones in Algeria, on a top-floor office, 3.5 m length, 3 m wide and 3 m high. The simulation results showed that the use of phase change materials in the concrete ceiling and the hollow brick walls has increased the office temperature by 3 to 4 °C in the winter period.

The results also show that the presence of the phase change materials in the walls reduced the overheating in the summer period, decreasing the air temperature by 7 °C.

## REMERCIEMENTS

Je tiens, en premier lieu, à remercier Allah, le tout puissant, de m'avoir donné autant de patience, courage et force pour réaliser ce travail. Dieu Merci.

La partie expérimentale de ce travail a été réalisée au laboratoire du Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB). Je tiens à remercier Monsieur le Directeur Général du CNERIB pour tous les moyens mis à ma disposition pour le bon déroulement de mon travail de thèse. J'adresse également mes remerciements à mes collègues du CNERIB qui ont contribué à la réussite de ce travail et je cite en particulier: Monsieur AMARA Mohamed, Monsieur BOUDALI ERREBAI Farid et Monsieur MAOUDJ Yassine.

J'adresse mes plus vifs sentiments de gratitude à mon directeur de thèse, Monsieur HAMID Abdelkader, Maître de recherche (A) à l'université de Blida, pour la confiance qu'il m'a accordé, son soutien constant, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de cette recherche.

J'adresse mes vifs remerciements au Professeur MERZOUK Mustapha, d'avoir pris le temps de lire ce manuscrit et de juger le travail en acceptant de présider le jury de ma thèse.

Comme je tiens à exprimer mes remerciements à : Monsieur SEMMAR Djaffar, Maître de recherche (A) à l'université de Blida, Monsieur KHELLAF Abdellah, Directeur de recherche au CDER, Monsieur LOUKARFI Larbi, Professeur à l'université de Chlef et Monsieur LAARIBI Boualem, Professeur à l'université d'El Khmis.

Enfin, je remercie toute ma famille, mes parents, ma femme et mes deux enfants pour le soutien et la patience dont ils ont fait preuve tout au long de ces années de thèse, un grand merci à vous.

## TABLE DE MATIÈRES

TABLE DE MATIÈRES .....	8
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	11
CHAPITRE 1 .....	14
ENVELOPPE DU BÂTIMENT ET CONFORT THERMIQUE.....	14
1.1. Introduction.....	14
1.2 La consommation énergétique par secteur d'activité en Algérie.....	14
1.3 La consommation dans le secteur résidentiel.....	15
1.4 La consommation dans le tertiaire.....	15
1.5 Consommation d'énergie moyenne des logements en Algérie.....	16
1.6 Enveloppe du bâtiment et confort thermique .....	17
1.7 Confort thermique intérieur.....	17
1.8 Isolation thermique .....	18
1.9 Inertie thermique.....	18
1.10 Architecture solaire.....	20
1.11 Fonctionnalités de l'enveloppe .....	21
1.11.1 Exigences hivernales .....	21
1.11.2 Exigences estivales.....	21
1.12. Stockage thermique pour l'amélioration du confort thermique des Bâtiments.....	22
1.12.1 La chaleur sensible .....	23
1.12.1.1 Le stockage de chaleur sensible par un solide .....	23
1.12.2. Chaleur latente à changement de phase (solide-liquide) .....	24
1.13 Les matériaux à changement de phase (MCP) .....	26
1.13.1 Classification des matériaux à changement de phase .....	28
1.13.2 Encapsulation du matériau MCP.....	35
1.13.3. Encapsulation des MCP dans les structures.....	41
1.13.4. Incorporation des MCP avec les matériaux de construction .....	45
Conclusion.....	55
CHAPITRE 2.....	56
ETUDE NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE PAROI INCORPORANT DES MCP .....	56
2.1. Introduction.....	56
2.2. Modèle physique et formulation mathématique .....	56
2.2.1 Modèle physique.....	56

2.2.2. Formulation mathématique .....	57
2.2.3. Composition des parois.....	59
2.3. Résultats et discussion .....	60
2.4. Conclusion.....	64
CHAPITRE 3.....	65
COMPORTEMENT THERMIQUE ET MÉCANIQUE D'UN MATÉRIAU COMPOSITE PLÂTRE/MCP .....	65
3.1. Introduction.....	65
3.2. Matériaux.....	65
3.2.1. Plâtre.....	65
3.2.2. Matériau MCP .....	66
3.3. Détermination des caractéristiques mécaniques et thermiques.....	67
3.3.1. Appareillage .....	67
3.3.2. Préparation des échantillons.....	68
3.3.3. Détermination de la résistance à la flexion.....	69
3.3.4. Détermination de la résistance à la compression.....	70
3.3.5 Détermination de la résistance d'adhésion .....	71
3.3.6. Essai de dureté .....	73
3.3.7. Mesures des propriétés thermiques ( $\lambda$ et $c_p$ ).....	73
3.4. Résultats des essais au laboratoire .....	74
3.5. Conclusion.....	81
CHAPITRE 4 .....	82
COMPORTEMENT THERMIQUE DES CELLULES À PAROIS INCORPORANT UN MATÉRIAU À CHANGEMENT DE PHASE.....	82
4.1. Introduction.....	82
4.2. Description des cellules .....	82
4.2.1. La cellule de référence C1 .....	83
4.2.2. La cellule C2 .....	86
4.2.3. La cellule C3 .....	87
4.3. Description du système d'acquisition.....	88
4.3.1. Mesure des températures .....	89
4.3.2. Mesure des conditions météorologiques.....	92
4.4. Résultats des mesures thermiques in situ .....	95
4.4.1 Rayonnement solaire .....	95
4.4.2 Évolution de la température ambiante en été.....	96
4.4.3 Évolution de la température de la paroi en été.....	97
4.4.4 Évolution de la température de la dalle en été .....	98
4.4.5 Évolution de la température ambiante en hiver sans chauffage.....	99

4.4.6 Évolution de la température ambiante en hiver avec chauffage.....	100
4.4.7 Évolution de la température de la paroi en hiver.....	101
4.4.8 Évolution de la température de la dalle en hiver .....	102
4.5 Conclusion .....	103
CHAPITRE 5.....	104
SIMULATION THERMIQUE DES BÂTIMENTS À PAROIS INCORPORANT DES MCP .....	104
5.1. Introduction.....	104
5.2. La simulation thermique dynamique .....	104
5.2.2. Principes d'une simulation thermique dynamique .....	104
5.2.5 Méthodologie de la simulation thermique dynamique .....	105
5.2.6. TRNSYS (Transient System Simulation).....	106
5.2.7. Simulation thermique d'un bâtiment à parois incorporant des MCP...	109
5.3. Résultats de la simulation thermique.....	112
5.3.1 Évolution de la température de l'air en hiver (cas d'Alger) .....	112
5.3.2 Évolution de la température de l'air en été (cas d'Alger).....	113
5.3.3 Les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation (cas d'Alger) .....	114
5.3.4 Évolution de la température de l'air en hiver (cas de Djelfa).....	116
5.3.5 Évolution de la température de l'air en hiver (cas de Djelfa).....	117
5.3.6 Les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation (cas de Djelfa).....	118
5.3.7 Évolution de la température de l'air en hiver (cas de Béchar).....	121
5.3.8 Évolution de la température de l'air en été (cas de Béchar).....	122
5.3.9 Les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation (cas de Béchar) .....	123
5.3.10. Comparaison entre les différents matériaux de construction : .....	126
5.3.11. Effet de MCP associé à l'isolation thermique.....	130
5.4. Conclusion.....	133
CONCLUSION .....	134
RÉFÉRENCES.....	136
APPENDICE A.....	143
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS .....	143
APPENDICE B.....	144
FICHE TECHNIQUE DU MICRONAL DE LA SOCIÉTÉ BASF .....	144
APPENDICE C.....	145
RÉSULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE .....	145

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

En Algérie, le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi les secteurs économiques, avec 41% de l'énergie finale totale et 21% des émissions de CO<sub>2</sub> [1]. Il s'avère donc nécessaire de minimiser la consommation d'énergie et de réduire l'impact environnemental de ce secteur en promouvant le concept des bâtiments économes en énergie.

Une des façons de diminuer les besoins énergétiques d'un bâtiment est la conception d'une enveloppe économe en énergie, limitant les déperditions thermiques et récupérant au maximum les apports calorifiques. Le stockage thermique est une solution pour une meilleure gestion de l'énergie thermique, il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de réaliser une bonne relation entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. De plus, le stockage contribue à l'amélioration du confort thermique dans le bâtiment en utilisant des matériaux de construction à grande capacité thermique. Il existe deux techniques principales de stockage thermique, le stockage par la chaleur sensible qui se base sur l'inertie thermique des parois et le stockage par la chaleur latente qui utilise l'énergie emmagasinée ou restituée durant le changement de phase.

Les matériaux à changement de phase (MCP), peuvent absorber ou libérer une grande quantité de chaleur latente au cours de leur changement de phase de l'état liquide vers l'état solide ou vice versa. Ils ont le potentiel de réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments. Ces matériaux à changement de phase servent souvent à stocker l'énergie pour pallier l'inadaptation horaire entre l'offre et la demande thermique dans un bâtiment, par exemple le stockage de l'énergie thermique solaire pour un chauffage des locaux pendant la soirée [2-7].

Depuis 1980, les matériaux à changement de phase ont été intégrés dans différents matériaux de construction (béton, briques, carreaux de plâtre, etc) pour les applications de stockage d'énergie thermique dans le domaine du bâtiment [8-

9]. Les MCP permettent d'améliorer l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment et de substituer au stockage par chaleur sensible un stockage par chaleur latente qui, pour une même quantité de chaleur, nécessite un volume et une masse inférieure à celles des autres modes de stockage [10-14].

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail de thèse. Nous avons réalisé une étude numérique et expérimentale pour tester l'influence de l'intégration des MCP dans les matériaux de construction sur le comportement thermique des bâtiments en Algérie. Ce travail s'intéresse à l'étude numérique du comportement thermique des parois avec des matériaux de construction largement utilisés en Algérie et d'analyser l'effet des matériaux à changement de phase sur l'amélioration de l'inertie thermique des parois.

Dans ce cadre, le MCP a été incorporé dans du plâtre pour réaliser un nouvel enduit en plâtre/MCP. Afin de déterminer le pourcentage optimal de MCP, il a été procédé à des mesures des propriétés mécaniques (Dureté, résistance à la flexion, résistance à la compression et résistance d'adhésion) et des propriétés thermiques (conductivité thermique et chaleur spécifique), sur le matériau composite plâtre/MCP. Différents pourcentages de matériaux à changement de phase ont été utilisés. Le matériau à changement de phase utilisé est une paraffine encapsulée sous forme de poudre, deux types de paraffines ont été utilisés (le DS 5001 avec une température de fusion de 26°C et le DS 5008 avec une température de fusion de 23°C). Après la détermination du pourcentage adéquat de matériau MCP, trois cellules ont été réalisées avec des parois du type classique en Algérie en utilisant un enduit intérieur en plâtre/MCP. Des instruments de mesures ont été mis en place pour déterminer l'influence du MCP sur le comportement thermique des cellules en Algérie.

Ce rapport de thèse est structuré en une introduction générale, cinq chapitres, et une conclusion générale.

Le premier chapitre présente l'utilité du stockage thermique pour l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments en réalisant une analyse bibliographique sur les matériaux à changement de phase, la classification en fonction de leurs propriétés et des objectifs à atteindre, ainsi que leurs applications dans le domaine du bâtiment.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude numérique sur le comportement thermique de parois composées des matériaux de construction utilisés en Algérie et de parois dans lesquelles est incorporé un matériau à changement de phase. Ceci dans le but d'analyser l'influence de l'épaisseur de la paroi et de sa composition ainsi que l'effet des matériaux MCP sur l'évolution de la température de la face interne de la paroi.

Le troisième chapitre décrit les essais mécaniques et thermiques réalisés sur le matériau composite plâtre/MCP et présente les résultats permettant de déterminer le pourcentage de MCP qui contribue à l'amélioration de la capacité calorifique du matériau sans provoquer une grande diminution de ses propriétés mécaniques.

Le quatrième chapitre consiste à faire une investigation expérimentale sur une nouvelle utilisation des matériaux à changement de phase comme enduit sur des parois en béton et en briques creuses pour étudier l'influence de l'intégration des MCP sur le comportement thermique des cellules et sur l'amélioration du confort thermique sous le climat algérien.

Le cinquième chapitre présente la simulation thermique en régime dynamique pour comparer le comportement thermique d'un local à usage de bureau, où les parois sont du type classique avec un local à parois incorporant des matériaux à changement de phase en utilisant le type 204.

## **CHAPITRE 1**

### **ENVELOPPE DU BÂTIMENT ET CONFORT THERMIQUE**

#### 1.1. Introduction

Ce premier chapitre est consacré à une revue bibliographique sur la contribution du stockage thermique, par l'utilisation des matériaux à changement de phase, à l'amélioration du confort thermique dans le bâtiment. Il s'articule autour de deux parties : la première partie est dédiée au stockage thermique pour l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments où nous rappelons les différents types de stockage thermique. La deuxième partie est consacrée à un état de l'art sur les matériaux à changement de phase, la classification en fonction de leurs propriétés et des objectifs à atteindre, ainsi que leurs applications dans le domaine du bâtiment.

#### 1.2 La consommation énergétique par secteur d'activité en Algérie

Pour l'année 2007, les statistiques sur l'énergie montrent que l'Algérie en a consommé 20 millions de TEP (Tonne Equivalent Pétrole). La figure 1.1 illustre la répartition de la consommation finale par secteur d'activité. Le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) consomme la plus grande proportion d'énergie, il absorbe 41 % de la consommation nationale, le reste de la consommation se répartit sur le secteur des transports avec 33 %, le secteur de l'industrie et du BTP avec 19 % et enfin l'agriculture et l'hydraulique avec 7 % [1].

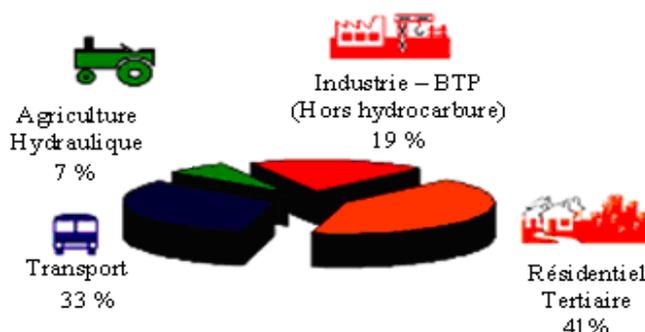


Figure 1.1: consommation nationale par secteur d'activité

### 1.3 La consommation dans le secteur résidentiel

La consommation finale du secteur résidentiel a atteint 6,5 millions de TEP, la répartition de celle-ci par type d'énergie est représentée par la figure 1.2. La consommation électrique du secteur résidentiel a atteint 770 KTEP, ce qui représente 33% de la consommation totale d'électricité. Il consomme 436 KTEP en produits gazeux soit 70% de la consommation totale des produits gazeux, Il représente, de ce fait, le premier secteur grand consommateur d'énergie électrique au niveau national [1].

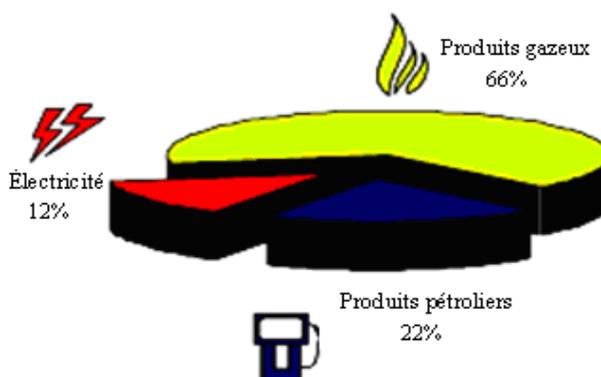


Figure 1.2 : Consommation du secteur résidentiel par type d'énergie

### 1.4 La consommation dans le tertiaire

La consommation énergétique du secteur tertiaire a atteint 1,2 million de TEP, la répartition de la consommation du tertiaire par produit (figure 1.3), montre que l'électricité représente la plus grande consommation. Cela est dû à l'introduction massive des équipements de chauffage et de climatisation et la généralisation de l'utilisation des matériels bureautiques et informatiques [1].

Entre 2000 et 2007, la consommation finale du secteur résidentiel a progressé annuellement de 6,7%. Ce sont l'électricité et les produits gazeux qui ont contribué à cette augmentation, ils consomment respectivement 53% et 36%. Une forte demande d'électricité est à prévoir en raison des perspectives de développement de ce secteur.

En ce qui concerne l'analyse de la consommation d'électricité par usages, l'éclairage et le froid représente 90%. Le chauffage et la cuisson sont responsables de 60% de la consommation du gaz naturel.

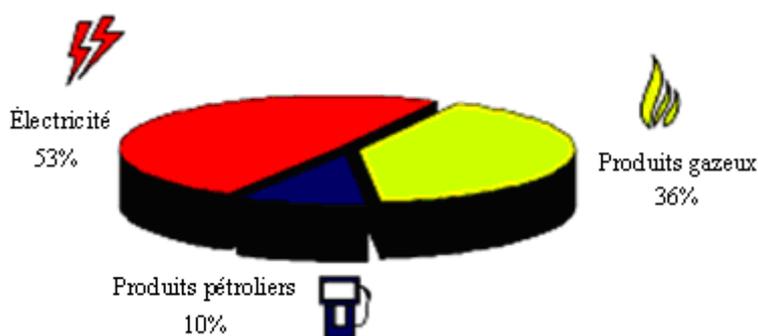


Figure 1.3 : Consommation du secteur tertiaire par type d'énergie

### 1.5 Consommation d'énergie moyenne des logements en Algérie

L'analyse des statistiques de la consommation domestique d'énergie en Algérie montre que celle-ci suit une courbe croissante. Cette tendance s'est maintenue en 2007 où la consommation énergétique moyenne annuelle d'un logement a atteint 1,048 TEP [1].

Selon une étude du Centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment (CNERIB), la consommation moyenne d'un appartement en Algérie est estimée à 15,2 m<sup>3</sup> de gaz par m<sup>2</sup> par an et à 2200 kWh par an pour l'électricité. L'appartement qui a servi à cette étude se situe à Alger. Il a une surface habitable de 66 m<sup>2</sup> et était occupé par un couple avec trois enfants [15].

## 1.6 Enveloppe du bâtiment et confort thermique

L'enveloppe du bâtiment est une séparation entre l'espace intérieur et l'extérieur. Elle joue un rôle important d'un point de vue social et humain ainsi que du point de vue architectural et énergétique. Elle protège les occupants des conditions extérieures, elle délimite un espace et crée une intimité.

Les problématiques énergétiques influent aujourd'hui sur la conception des nouvelles enveloppes du bâtiment. L'isolation thermique et l'inertie sont présentées comme un acteur majeur pour l'amélioration du confort thermique intérieur.

## 1.7 Confort thermique intérieur

Le confort est un état de bien être général. Il est mesuré par le taux de satisfaction des occupants. Celui-ci est donc une sensation physiologique dépendant de plusieurs paramètres [16]. Le confort thermique tient compte des paramètres suivants :

Les facteurs liés à l'individu :

- Son activité et le rendement de cette activité.
- Son habillement.

Les facteurs liés à l'environnement :

- Les températures de l'air et des surfaces des parois.
- La vitesse relative de l'air et le degré de turbulence.
- L'humidité relative de l'air.

L'enveloppe influe principalement sur le confort thermique par les températures surfaciques des parois. Ces dernières doivent être les plus homogènes possibles dans l'espace et dans le temps. Les asymétries thermiques (différence de température entre deux surfaces) engendrent une sensation d'inconfort par échange thermique radiatif entre l'individu et les parois du bâtiment. L'enveloppe bien isolée limite les échanges thermiques entre les environnements intérieur et extérieur, en influant sur la température de l'air intérieur.

L'isolation thermique des bâtiments réduit l'influence des conditions extérieures sur l'environnement intérieur et une inertie thermique importante permet d'amortir les pics de la chaleur et de déphaser les ondes de température.

### 1.8 Isolation thermique

L'enveloppe extérieure doit limiter les déperditions thermiques en hiver et protéger des apports solaires en été. Cette propriété d'atténuation dépend des propriétés de transmission thermique des parois par conduction, convection et radiation.

La nécessité d'isoler thermiquement est surtout importante pour les parois qui sont soumises aux conditions climatiques extérieures ou qui sont en contact avec un local non chauffé (vide sanitaire ventilé, garage, etc.).

Cette isolation a pour rôle de préserver l'ambiance intérieure des fluctuations de l'ambiance extérieure, en limitant les échanges de chaleur entre les deux ambiances. L'isolation thermique est la meilleure solution pour conserver la chaleur ou la fraîcheur dans une habitation. Elle empêche aussi la froideur ou la chaleur extérieure de se transmettre à l'intérieur, selon que l'on soit en hiver ou en été.

Une bonne isolation de l'enveloppe d'un bâtiment dépend de l'épaisseur et du type de matériau utilisé. Donc, l'isolation thermique est indispensable pour construire ou rénover un bâtiment à haute performances énergétiques. Une isolation renforcée permet de réaliser des économies d'argent en réduisant la consommation d'énergie sur le chauffage et la climatisation.

### 1.9 Inertie thermique

L'inertie thermique se traduit par la capacité d'un bâtiment à emmagasiner de la chaleur (ou de la fraîcheur), à amortir les pics et à déphaser les fluctuations de température extérieure. Elle permet de stocker les flux de chaleur pour les distribuer de manière déphasée (décalée dans le temps). La propriété des constructions à forte inertie est de conserver une température stable et de se réchauffer ou se refroidir très lentement.

L'inertie permet de limiter l'inconfort dû aux fortes variations de températures dans les bâtiments en période d'été durant la journée, la chaleur absorbée dans les parois peut être évacuée la nuit par la ventilation nocturne, ceci engendrera la réduction de la puissance de climatisation. En hiver, l'inertie consiste à réduire les consommations de chauffage par le stockage des apports solaires gratuits transmis par les vitrages. Lorsque le bâtiment se refroidit, la chaleur est restituée afin d'augmenter la température intérieure.

L'inertie est liée principalement à la densité, la chaleur spécifique et la conductivité thermique du matériau.

Une chaleur spécifique et une masse volumique élevée permettent d'accumuler un maximum de chaleur, et une conductivité thermique élevée facilite la pénétration de la chaleur dans le matériau.

La capacité d'accumulation de la chaleur d'un matériau est exprimée par l'effusivité thermique, donnée par l'expression (1.1). La chaleur spécifique de la plupart des matériaux de construction est d'environ 1000 J/kg. K, et que la conductivité thermique augmente en général avec la masse volumique. La figure 1.4 montre que l'effusivité thermique est proportionnelle à la masse volumique des matériaux [17].

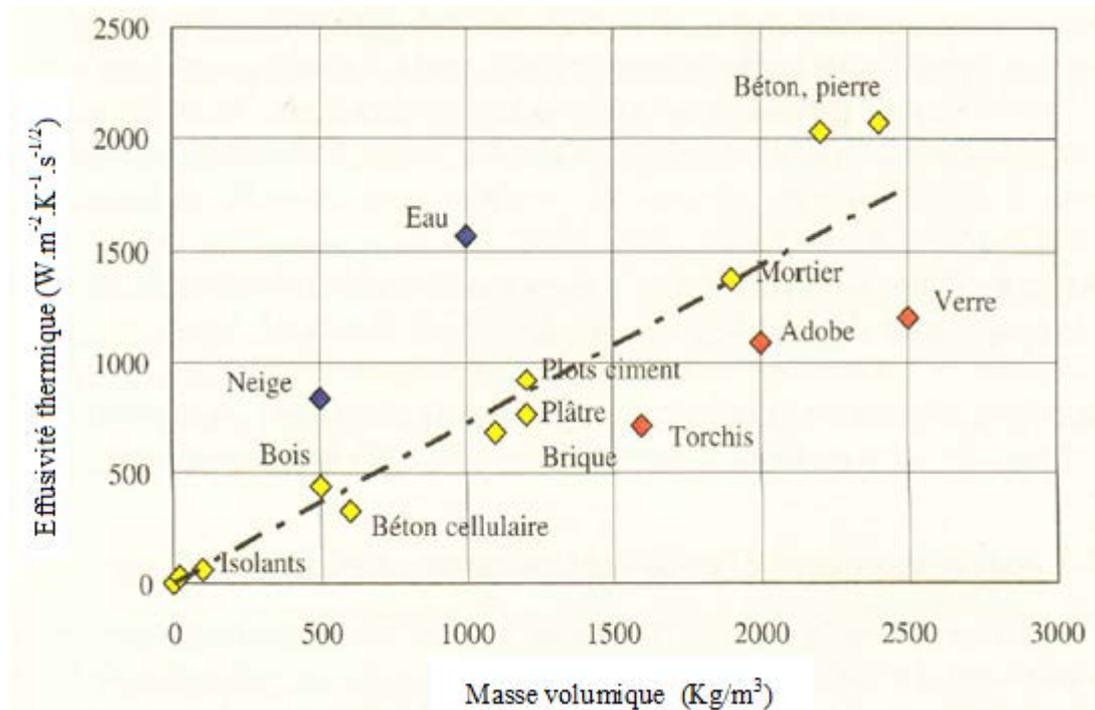


Figure 1.4 : Effusivité thermique de divers matériaux en fonction de leur masse volumique

La diffusivité thermique exprime la vitesse de pénétration de la chaleur dans un matériau pour se chauffer rapidement, elle est donnée par l'expression (1.2). Ces deux paramètres permettent d'évaluer la quantité de chaleur stockée ainsi que la profondeur de pénétration de l'onde de chaleur dans le matériau pour une sollicitation donnée.

Effusivité thermique : 
$$e_{th} = \sqrt{\lambda \rho C} \quad (\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}) \quad (1.1)$$

$$\text{Diffusivité thermique : } \alpha = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (1.2)$$

Avec  $k$  la conductivité thermique,  $\rho$  la masse volumique et  $C_p$  la chaleur spécifique du matériau.

A partir des effusivités et diffusivités thermiques, il est possible de définir les expressions suivantes.

La quantité de chaleur stockée dans un matériau pendant un temps  $t$  est donnée comme suit:

$$Q = e_{th} \sqrt{t} \quad (1.3)$$

La profondeur de pénétration de l'onde de chaleur après un temps  $t$  est donnée par la formule suivante:

$$p = \sqrt{\alpha_{th} t} \quad (1.4)$$

Cette capacité de stockage thermique doit être bien dimensionnée pour assurer une restitution des quantités de chaleur dans des temps adéquats. La dynamique de l'inertie dans le bâtiment est généralement journalière (stockage le jour et restitution/évacuation la nuit). La dynamique annuelle peut être amortie pour des épaisseurs de matériaux beaucoup trop importantes.

L'amélioration de la capacité de stockage thermique peut être réalisée par l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) qui se généralise aujourd'hui dans les laboratoires. Les MCP présentent des caractéristiques thermiques intéressantes qui peuvent être appliqués dans le bâtiment. Les MCP couramment utilisés sont des matériaux inorganiques (hydrates salins, sels, ...), organiques (paraffines, polyalcools, ...) et eutectiques d'inorganiques et/ou organiques.

### 1.10 Architecture solaire

L'architecture solaire consiste à intégrer l'énergie solaire dans la conception du bâtiment. Elle permet de maximiser les gains solaires en hiver afin de diminuer les besoins en chauffage et de se protéger contre les rayons solaires en été pour éviter le phénomène de la surchauffe. L'architecture solaire nécessite les paramètres suivants dans l'enveloppe [18]:

- Coefficient de transmission thermique faible des parois.
- Bonne étanchéité de l'enveloppe et renouvellement d'air par VMC.

- Orientation intelligente du bâtiment (ouvertures au Sud).
- Définition des ouvertures et protections suivant le parcours du soleil annuellement (bonne pénétration hivernale et faible pénétration estivale), faible ouverture à l'ouest.
- Dimensionnement et répartition réfléchie de l'inertie (rayonnement direct, protections éventuelles) avec isolation extérieure.

L'augmentation de la surface du vitrage accroît les déperditions thermiques de l'enveloppe. Une maison solaire présente plus de déperdition qu'une maison à forte isolation. Toutefois, ses apports solaires sont plus importants et le bilan énergétique est plus favorable que la maison à forte isolation. Les besoins ponctuels en chauffage sont plus élevés, mais la période de chauffe est plus faible.

### 1.11 Fonctionnalités de l'enveloppe

L'enveloppe doit être conforme aux exigences de confort thermique en prenant en considération l'occupation des locaux ainsi que l'environnement proche du bâtiment (temps de réponse de la construction, site urbain, rural, habitation, public, tertiaire, ...).

L'architecture solaire consiste à trouver un compromis optimum entre ces éléments, le climat et le type d'occupation. Pour le confort thermique, le respect des cahiers des charges estival et hivernal impose les exigences suivantes :

#### 1.11.1 Exigences hivernales

- Capturer l'énergie solaire
- Stocker l'énergie solaire
- Conserver la chaleur interne
- Répartir l'énergie interne

#### 1.11.2 Exigences estivales

- Se protéger des rayons solaires
- Évacuer la chaleur interne
- Minimiser les apports solaires
- Amortir les pics de température

### 1.12. Stockage thermique pour l'amélioration du confort thermique des Bâtiments

Le stockage thermique est une solution pour une meilleure gestion de l'énergie thermique en adaptant la production aux besoins. Il peut réguler cette gestion en réalisant un équilibre entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. L'utilisation des matériaux de construction à grande capacité de stockage peut contribuer à l'amélioration du confort des occupants et réaliser des économies d'énergie sur le chauffage et la climatisation.

Il existe deux techniques principales de Stockage Thermique :

- Le stockage par la chaleur sensible (Stockage Thermique Sensible, STS) dans lequel la température des matériaux de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée. Cette méthode est traditionnelle, elle se base sur l'inertie thermique des parois et se traduit par des parois suffisamment lourde telles que les murs en pierre, en terre, en BTS, toub...
- Le stockage par la chaleur latente (Stockage Thermique Latent, STL) qui utilise l'énergie emmagasinée ou restituée lorsqu'un corps change d'état (solide, liquide, gaz). Cette chaleur latente est liée au changement d'état des matériaux qui permet d'avoir une capacité de stockage plus élevée que celle de la chaleur sensible. La figure 1.5 présente l'ordre de grandeur des possibilités de stockage thermique de quelques matériaux [19].

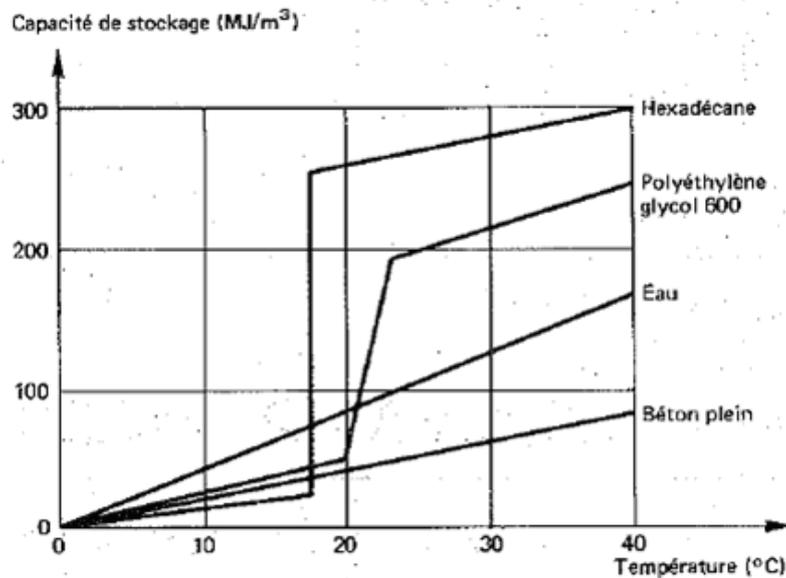


Figure 1.5 : Capacités de stockage comparées des différents matériaux [19]

### 1.12.1 La chaleur sensible

La chaleur sensible est le moyen le plus commun de stockage d'énergie thermique. La Figure 1.6 montre que la chaleur transférée au support de stockage conduit à une augmentation de la température du milieu de stockage. Un capteur thermique peut mesurer cette augmentation de la température et de la chaleur emmagasinée qui est appelée chaleur sensible.

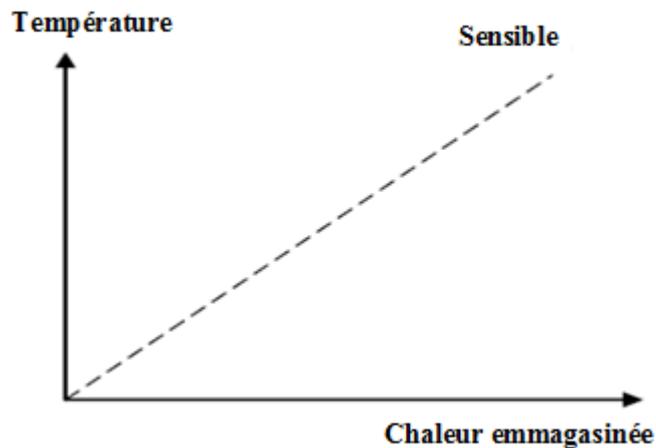


Figure 1.6 : Stockage d'énergie par chaleur sensible

La capacité thermique  $C$  est représenté par le rapport entre la chaleur stockée  $\Delta Q$  et l'augmentation de la température  $\Delta T$  du milieu de stockage.

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1.5)$$

Souvent, la capacité thermique est donnée par rapport à la quantité de matériau, le volume ou la masse. Elle est alors appelée molaire, volumétrique, ou capacité thermique spécifique massique. L'équation 1.5 montre le cas de la capacité de chaleur spécifique massique,  $m$  est la masse du matériau de stockage. Le stockage par chaleur sensible est souvent utilisé avec des solides comme la pierre ou la brique, ou des liquides comme l'eau, en tant que matériau de stockage. Les Gaz ont une très faible capacité thermique volumétrique et ne sont donc pas utilisés pour le stockage par chaleur sensible.

#### 1.12.1.1 Le stockage de chaleur sensible par un solide

Les matériaux comme, la pierre, le béton, le sable et la brique de terre stabilisée (BTS) peuvent être utilisés pour le stockage thermique aux faibles et hautes températures parce qu'ils ne peuvent ni se congeler ni entrer en ébullition.

Les matériaux locaux comme la pierre et la terre sont parmi les premiers matériaux qui ont été utilisés pour le stockage de l'énergie solaire afin d'améliorer le confort thermique des habitations.

Le stockage et la récupération de l'énergie thermique se fait en fonction des matériaux et de la taille des parois. Pour une variation de la température de 50 °C, les pierres et le béton peuvent stocker de l'ordre de 36 kJ/kg ou  $10^5$  kJ/m<sup>3</sup>.

#### 1.12.1.2 Le stockage de chaleur sensible par un fluide

L'eau est un bon milieu de stockage pour des faibles températures. Elle a la plus grande capacité thermique massique par rapport aux autres liquides ( $4185 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  à 20 °C). L'eau peut stocker 250 kJ/kg ou  $2,5 \cdot 10^5$  kJ/m<sup>3</sup> pour une variation de température de 60 °C.

De plus, l'eau a l'avantage d'être disponible et n'est pas chère. Cependant, sa grande pression de vapeur, pour les applications à haute température, nécessite une isolation renforcée et un réservoir de stockage qui résiste aux fortes pressions.

L'eau est utilisée non seulement comme un moyen de stockage mais aussi comme un fluide transporteur d'énergie. Actuellement, l'eau chaude est le fluide le plus utilisé dans les installations solaires dans une plage de températures allant de 25 à 90°C.

Les liquides autres que l'eau destinée à être utilisés pour le stockage thermique sont principalement des huiles organiques ou des sels fondus. Leurs capacités thermiques massiques sont faibles. Elles sont de l'ordre de 25 à 40 % de celle de l'eau.

#### 1.12.2. Chaleur latente à changement de phase (solide-liquide)

La chaleur est stockée sous forme de chaleur latente, lorsqu'il se produit un changement de phase du matériau de stockage.

Le changement de phase solide-liquide par fusion et solidification peut stocker de grandes quantités de chaleur ou de froid, si le matériau approprié est utilisé. La fusion est caractérisée par une faible variation du volume, généralement inférieure à 10%.

Lors de la fusion, la chaleur est transférée au matériau de stockage. Ce dernier conserve sa température constante à la température de fusion, appelé température de changement de phase (Figure.1.7).

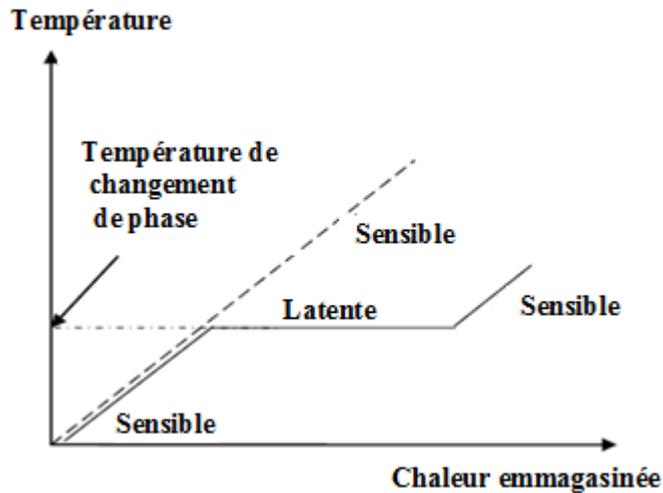


Figure 1.7 : Stockage d'énergie par chaleur latente (solide-liquide)

Dès que la fusion est terminée, un autre transfert de chaleur entraîne à nouveau le stockage par chaleur sensible. Le stockage de la chaleur de fusion ne peut pas être détecté à partir de la température, parce que la fusion se déroule à une température constante.

La chaleur fournie lors de la fusion est donc appelée chaleur latente. En raison de la faible variation de volume, la chaleur stockée est égale à la différence d'enthalpie.

$$\Delta Q = \Delta H = m \cdot \Delta h \quad (1.6)$$

La chaleur latente est la chaleur stockée lors du processus de changement de phase, elle est calculée à partir de la différence d'enthalpie  $\Delta H$  entre le solide et la phase liquide.

Dans le cas de changement de phase (solide-liquide), elle est appelée enthalpie à changement de phase solide-liquide, enthalpie de fusion, ou chaleur de fusion. Les matériaux de stockage de chaleur ou de froid, présentant un changement de phase solide-liquide, sont communément appelés matériau de stockage de chaleur latente ou matériau à changement de phase (MCP). Certains changements de phase solide-solide ont les mêmes caractéristiques que les changements de phase solide-liquide, mais le plus souvent ne possèdent pas un grand changement de phase d'enthalpie. Cependant, il existe des exceptions et ils sont utilisés dans quelques applications.

Les matériaux avec un changement de phase solide-liquide peuvent être combinés avec d'autres matériaux en formant un matériau composite.

#### 1.12.2.1 Chaleur latente à changement de phase (liquide-vapeur)

Le changement de phase liquide-vapeur par évaporation et par condensation a généralement une importante enthalpie de changement de phase. Le processus d'évaporation dépend des conditions aux limites suivantes:

- Dans les systèmes fermés à volume constant, l'évaporation conduit à une forte augmentation de la pression de la vapeur. Cette augmentation de la pression engendre l'accroissement de la température nécessaire pour un nouveau changement de phase. Ce changement de phase liquide-vapeur à un volume constant. Il est donc, généralement, pas utile pour le stockage thermique.
- Dans le système fermé à pression constante, l'évaporation conduit à un grand changement de volume. Ceci est difficile à réaliser, et donc ce système ne peut pas être appliqué pour le stockage de la chaleur.
- Les systèmes ouverts à pression constante, cela signifie la pression ambiante. Lors du stockage de la chaleur, le matériau est évaporé. Le matériau de stockage est perdu dans l'environnement, car le système est ouvert.

Pour récupérer la chaleur stockée, le matériau de stockage doit être récupéré à partir de l'environnement. Cela signifie qu'il doit être une partie naturelle de l'environnement. L'eau est le seul matériau qui peut être techniquement utilisable aujourd'hui. (Cabeza, [20] ).

Si un seul composant est présent, comme l'eau. Le processus est appelé spécifiquement (évaporation-condensation) homogène. Mais, l'eau ne se condense pas à un taux élevé de l'atmosphère par elle même. Par conséquent, la condensation doit être améliorée par une réduction de la pression de la vapeur d'eau dans le stockage en utilisant une surface hygroscopique. L'effet hygroscopique peut être provoqué par l'adsorption de l'eau à la surface d'un solide ou l'absorption dans un liquide. En raison de la seconde composante, on l'appelle (évaporation-condensation) hétérogène.

#### 1.13 Les matériaux à changement de phase (MCP)

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont été développés pour le stockage de l'énergie thermique, ils peuvent absorber ou libérer une grande

quantité de chaleur latente au cours de leur changement de phase du liquide au solide ou vice versa. Les MCP servent souvent à stocker l'énergie pour pallier l'inadaptation horaire entre l'offre et la demande thermique dans le domaine du bâtiment. Il existe une grande gamme de matériaux à changement de phase caractérisée par une température de fusion dans la plage de température entre 0 et 120°C. Les MCP utilisés comme matériaux de stockage doivent vérifier certain nombre de critères. Abhat (1983) [21] présente les principaux critères que doit posséder un MCP pour le stockage de chaleur :

- Posséder une chaleur latente de fusion et une chaleur spécifique par unité de masse et de volume élevée, pour réduire la quantité de matériaux de stockage.
- Posséder un point de fusion compris dans l'intervalle de température du domaine d'application.
- une pression de vapeur faible, inférieur à 1 bar, à la température de fonctionnement.
- Avoir une conductivité thermique élevée.
- Avoir un changement de volume faible durant la transition de phase, pour faciliter son application.
- Présenter peu ou pas d'effets de surfusion.
- Être chimiquement stable et non -corrosif.
- Être disponible à des prix abordables.
- Il ne doit pas être dangereux, hautement inflammable ou toxique.

### 1.13.1 Classification des matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase se divisent en deux principales catégories : les matériaux organiques qui sont constitués principalement d'acides gras et de paraffines et les matériaux inorganiques constitués principalement d'hydrates de sel. Chaque groupe possède ses propres intervalles de température de fusion et de chaleur latente (figure 1.8 et 1.9).

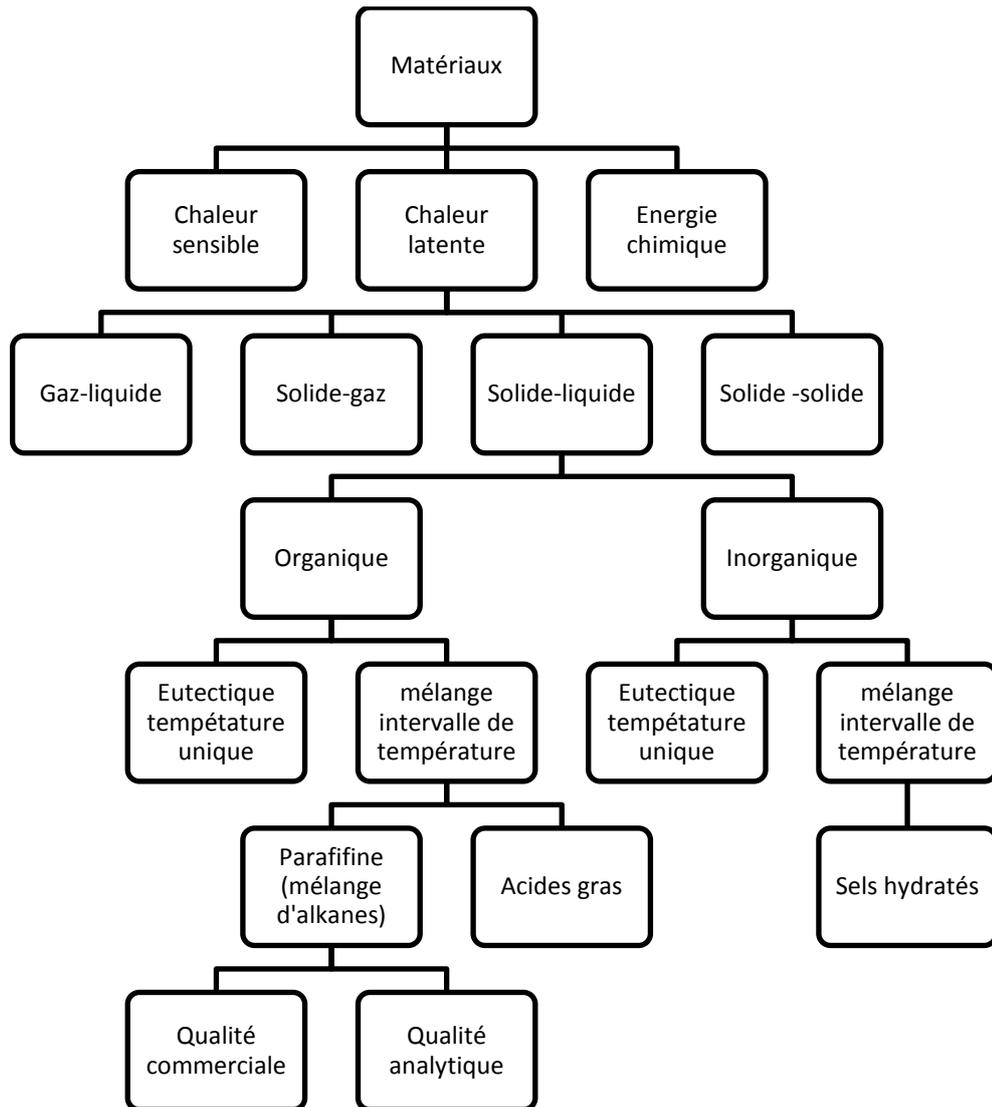


Figure 1.8 : Classification des MCP (Abhat 1983) [21]

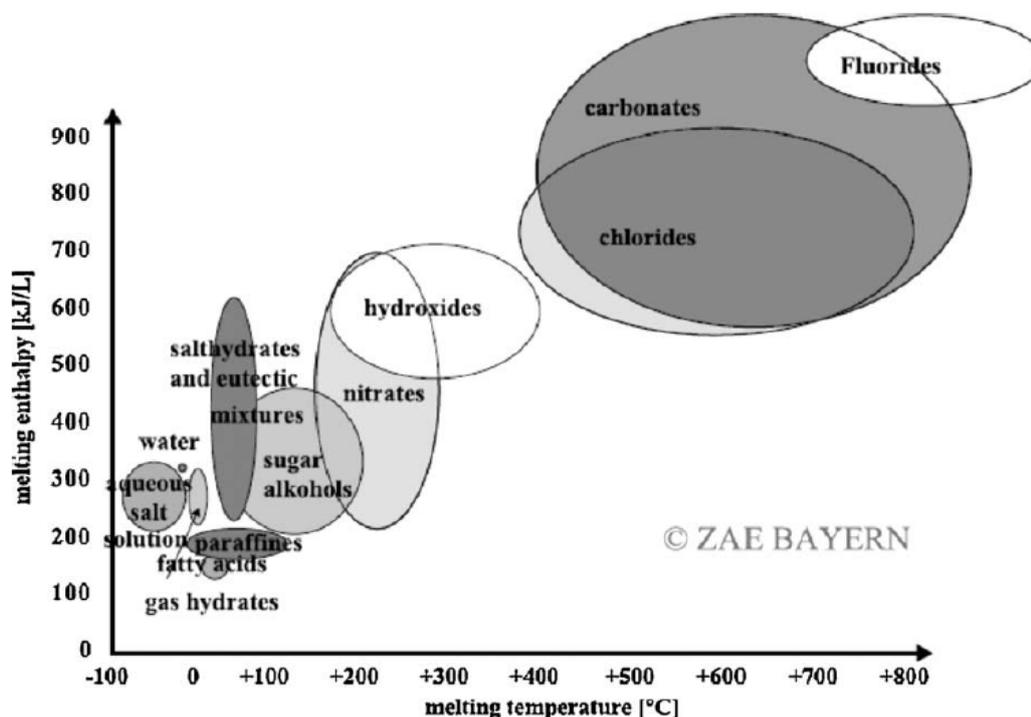


Figure 1.9 : Enthalpie de différents MCP en fonctions de leur température de fusion [22,23].

Les matériaux destinés à être intégrés dans l'enveloppe du bâtiment doivent avoir une température de fusion dans la zone de confort thermique qui est comprise entre 20 et 26 °C, tout en respectant au mieux les critères donnés précédemment [24]. Le tableau 1.1 présente les avantages et les inconvénients des matériaux organiques et inorganiques.

Tableau 1.1: Comparaison des matériaux organiques et inorganiques pour le stockage de chaleur

	Matériaux organiques	Matériaux inorganiques
<b>Avantage</b>	Non corrosifs Peu ou pas de surfusion Stabilité chimique et thermique	Une chaleur latente de fusion élevée
<b>Inconvénients</b>	Une faible chaleur latente de fusion Une faible conductivité thermique Inflammables	Surfusion Corrosion Séparation de phase Ségrégation et manque de stabilité thermique

Les propriétés des composés organiques et les composés inorganiques sont très différentes, elles influent fortement sur la conception des systèmes de stockage de chaleur (tableau 1.2).

Tableau 1.2: Classification et propriétés des MCP

<b>Classification</b>	<b>Inorganique</b>	<b>Organique</b>
Catégorie	Hydrate cristallin, sel fondu, métal ou alliage	hydrocarbure aliphatique, acide/sels, alcools, hydrocarbures aromatiques, fréon, catégorie multi-carbonatée, polymères
Avantages	Une densité plus élevée de stockage d'énergie, une conductivité thermique plus élevée, non-inflammable, peu coûteux	Une stabilité physique et chimique, un bon comportement thermique, zone de transition réglable
Inconvénients	Surfusion, ségrégation et corrosion	Une faible conductivité thermique, Une faible chaleur latente de fusion, forte inflammabilité et changement de volume
Méthodes pour l'amélioration	Mélangé avec des agents de nucléation et des agents épaississants, couche mince disposée horizontalement, remuée mécaniquement	Additifs à hautes conductivité thermique, les additifs ignifuges

#### 1.13.1.1 Matériaux organiques

Les matériaux organiques présentent des propriétés thermiques inférieures à celles des matériaux inorganiques, et ils comprennent les paraffines et les non-paraffines. Les composés organiques sont chimiquement stables, non corrosifs, non toxiques. Ils cristallisent avec peu ou pas de surfusion ou de ségrégation et sont caractérisés par une chaleur latente de fusion élevée. Les composés organiques possèdent une densité de stockage thermique comprise entre 128 et 200 kJ/kg, Sharma *et al.* (2009) [25]

Khudhair et Farid (2004) [4] ont étudié les propriétés thermiques des paraffines en signalant que ces dernières possèdent une conductivité thermique très faibles, ce qui diminue le taux de stockage ou déstockage de la chaleur latente pendant le

changement de phase. Hasnain (1998) [26] montre aussi que durant la fusion, les paraffines subissent une grande variation de volume.

Différents travaux de recherche ont été réalisés pour améliorer le transfert de chaleur des paraffines,

Hafner et Schwarzer (1999) [27] ont introduit les MCPs dans une structure matricielle de composants métalliques pour augmenter l'échange de chaleur. Agyenim, Eames et Smyth (2009) [28] présentent l'effet d'associer des fragments de matériaux métalliques très fins avec la paraffine pour augmenter la conductivité thermique de cette dernière.

Des contenants plastiques de différentes géométries ont été utilisés pour réduire la variation de volume lors du changement de phase. Selon Baetens, Jelle et Gustaven (2010) [29], la complexité de ces techniques présente un blocage pour une large utilisation des paraffines dans l'enveloppe du bâtiment.

Une étude approfondie a été menée par Abhat *et al.* (1981) [30] sur les composés organiques non-paraffines appropriés au stockage de l'énergie et il a été identifié certains nombres des composés organiques non-paraffines comme les acides gras, alcool, esters et glycols. Il a été signalé par Hasnain (1998) [26] que les matériaux non-paraffines ont des propriétés de fusion et de solidification meilleurs, mais ils coûtent trois fois plus chers que les paraffines, ce qui limite leur utilisation.

#### 1.13.1.2 Matériaux inorganiques

Les composés inorganiques sont caractérisés généralement par une capacité de stockage thermique très élevée, elle varie entre 250 à 400 kJ/kg Sharma *et al.* (2009) [25]

Naumann et Emons (1989) [31].et de Peippo *et al.* (1991) [32] ont réalisé des études sur les matériaux à changement de phase inorganiques, composés principalement des hydrates de sel. Ils ont précisé que les MCPs inorganiques possèdent une conductivité thermique élevée (d'environ 0,5 W/m·K) et une densité de stockage thermique importante (d'environ 240 kJ/kg). Ils sont aussi disponibles à des prix abordables.

Cependant, les MCPs inorganiques présentent certains inconvénients comme la corrosivité et la surfusion, Kenisarin (2007) [33]. Ils doivent être encapsulés pour être incorporés dans les matériaux de construction.

Pasupathy et al. (2008) [34] montrent que la surfusion entraîne un mélange non homogène des composants chimiques du matériau, ceci provoque un phénomène de ségrégation. La figure 1.10 présente le phénomène de ségrégation, Joulin *et al.* (2011) [35].

Mehling et Cabeza (2008) [22] précisent que l'ajout des agents de gélification ou épaississants peut limiter le phénomène de ségrégation. Les agents de gélification sont des matériaux réticulés, comme les polymères, qui permettent de lier les composés chimiques du matériau. Les agents épaississants créent une bonne liaison entre les molécules en augmentant la viscosité. La surfusion de MCP peut être résolue en introduisant des agents de nucléation. Ces agents influent sur le comportement du matériau autour de la température de fusion pour améliorer la capacité d'absorption ou de restitution de la chaleur.

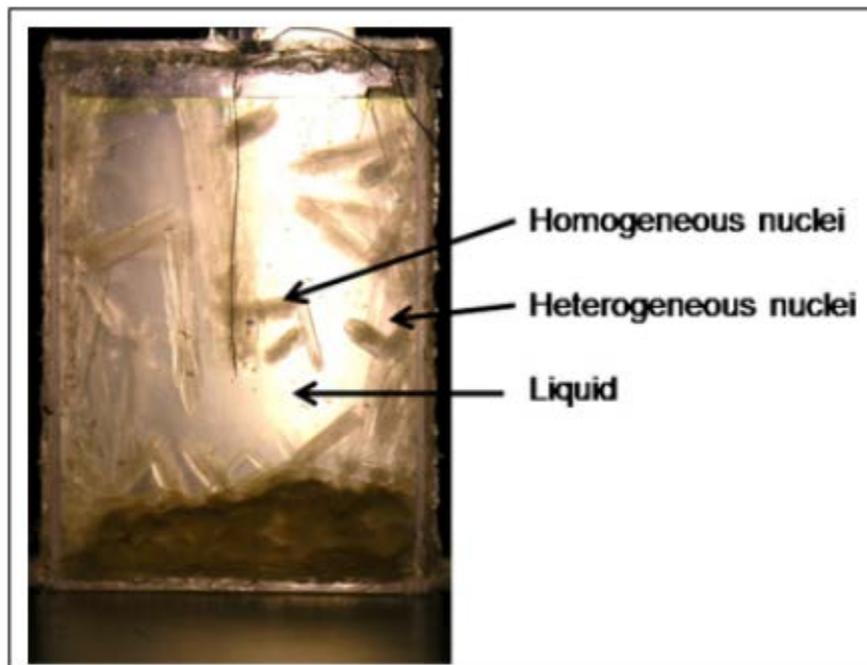


Figure 1.10 : Solidification et visualisation d'une phase hétérogène

Tableau 1.3 : Propriétés thermo-physiques des matériaux pour des applications de confort dans les bâtiments (température entre 22 et 28 °C).

Matériau	Type	Température de fusion °C	Chaleur latente (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.k)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
n-Heptadecane	Organique	18	240	0.21	760(liquide)
61.5 mol% capric acid + 38.5 mol% lauric acid stéarate de butyle	Mélange d'acides gras Organique	19.1	132	-	-
Paraffine C16–C18	Organique	19	140	0.21	760(liquide)
FeBr3·6H2O	Inorganique (l'hydrate de sel)	18-23	123-200	-	-
Acide caprique + Acide laurique	Mélange d'acides gras	20-22	152	-	-
Dimethyl sabacate	Organique	21	105	-	-
Octadecyl 3-mencaptopropylate	Organique	21	143	-	-
26,5% d'acide myristique + 73,5% d'acide caprique	Mélange d'acides gras	21.4	152	-	-
Paraffine C17	Organique	21.7	213	-	-
Poly glycol E600	Organique	22	127.2	0.1897 (liquide, 38.6°C)	1126 (liquide, 25°C)
		17-22	127	0.19 liquide	1232 (solide, 4°C)
		20-25	146	-	-
65-90% de palmitate de méthyle + 35-10% de stéarate de méthyle	Mélange organique	22-25.5	120	-	-
Paraffine C13–C24	Organique	22-24	189	0.21 liquide	0.76 liquide 0.9 solide
75,2% d'acide caprique + 24,8% d'acide palmitique	Mélange d'acides gras	22.1	153	-	-
Ethyl palmitate	Mélange organique	23	122	-	-
34% C14H28O2 + 66% C10H20O2	Eutectique organique	24	147.7	-	-
55–65% LiNO3·3H2O+ 35–45% Ni(NO3)2	Mélange organique	24.2	230	-	-
45% Ca(NO3)2·6H2O+ 55% Zn(NO3)2·6H2O	Mélange organique	25	130	-	1930
66.6% CaCl2·6H2O+ 33.3% MgCl2·6H2O	Mélange organique	25	127	-	1590
50% CaCl2 + 50% MgCl2 + 6H2O	Eutectique inorganique	25	95	-	-
Octadecane + docosane	Eutectique organique	25.5-27.0	203.8	-	-

Tableau 1.3 : Propriétés thermophysiques des matériaux pour des applications de confort dans les bâtiments (température entre 22 et 28 °C). (Suite)

Matériau	Type	Température de fusion °C	Chaleur latente (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.k)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	
Mn(NO3)·6H2O	Inorganique (l'hydrate de sel)	25.5	125.9	-	1738	
		25.8	125.9	-	(liquide, 20°C) 1728	
				148	-	(liquide, 40°C) 1795
					-	(liquide, 5°C) -
Octadecane + heneicosane	Eutectic Organic	25.8-26.0	173.93	-	-	
Acide lactique	Acide gras	26	184	-	-	
Octadecyl thioglyate	Organique	26	90	-	-	
34% d'acide myristique + 66% d'acide caprique	Organique	26	147.7	-	-	
1-Dodecanol	Organique	26	200	-	-	
		17.5-23.3	188.8	-	-	
48% CaCl2 + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H2O	Mélange inorganique	27	188	-	1640	
86.6% capric acid + 13.4% stearic acid	Fatty acid mixture	26.8	160	-	-	
50% CH3CONH2 + 50% NH2CONH2	Eutectique Organique	27	163	-	-	
4.3% NaCl + 0.4% KCl + 48% CaCl2 + 47.3% H2O	Mélange inorganique	27	188	-	1530 (liquide) 1640 (solide)	
Stéarate de vinyle	Organique	27-29	122	-	-	
		27				
Paraffine C18	Organique	28	244	0.148 (liquide)	0.774 (liquide)	
		27.5-22.5	243.5	0.15 (solide)	0.15 (solide)	
n-Octadecane	Organique	28	200	0.148 (liquide)	774 (liquide)	
				0.358 (solide)	814 (solide)	
		28-28.1	245	0.358 (solide)	779 (liquide)	
			250-247.7		-	

Tableau 1.4 : Propriétés thermo-physiques des matériaux commercialisés pour des applications de confort dans les bâtiments (température entre 22 et 28 °C).

Produit	Type	Température de fusion °C	Chaleur latente (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.k)	Société
RT 20	Paraffine	22	172	0.88	Rubitherm Gmbh
Climsel C 23	Hydrate de sel	23	148	-	Climator
E23	Hydrate de sel	23	155	0.43	EPS LTD
Climsel C 24	Hydrate de sel	24	108	1.48	Climator
TH 24	Hydrate de sel	24	45.5	0.8	TEAP
RT 25	Paraffine	25	131	0.88	Rubitherm Gmbh
RT 26	Paraffine	26	232	-	Rubitherm Gmbh
STL 27	Hydrate de sel	27	213	1.09	Mitsubishi Chemical
S27	Hydrate de sel	27	207	-	Cristopia
AC 27	Hydrate de sel	27	207	1.47	Cristopia
RT 27	Paraffine	28	179 146	0.87 0.2	Rubitherm Gmbh
RT 30	Paraffine	28	206	-	Rubitherm Gmbh
E28	Hydrate de sel	28	193	0.21	EPS LTD

### 1.13.2 Encapsulation du matériau MCP

Dans la plupart des utilisations techniques, les matériaux à changement de phase doivent être encapsulés, pour éviter l'écoulement de ces derniers dans l'endroit d'application et perdre leurs performances énergétiques.

Il existe deux principaux moyens d'encapsulation [4].

### 1.13.2.2 Macro-encapsulation

La première méthode d'encapsulation est la macro-encapsulation, elle comprend l'incorporation de MCP dans des sacs, des tubes, des sphères, des panneaux ou autres récipients. Ces matériaux peuvent servir directement comme des échangeurs de chaleur ou ils peuvent être incorporés dans les produits de construction.

La macro-encapsulation se fait généralement dans des récipients à des diamètres supérieurs à 1 cm. Cette technique d'encapsulation permet de maintenir le MCP à l'état liquide et empêche le changement de sa composition par contact avec l'environnement d'application. Elle permet aussi de:

- Améliorer la compatibilité des matériaux avec l'environnement, à travers la réalisation d'une séparation.
- Améliorer la manipulation du MCP dans une production.
- Réduire le changement de volume externe, ce qui est un effet positif pour faciliter l'application.

Le matériau à changement de phase macro-encapsulé a été utilisé dans des parois sous forme des sphères de MCP (acide caprique et n-octadécane), Hammou et al. (2006) [36]. La simulation thermique d'une pièce à l'échelle réelle, de 5 m x 5 m x 3 m avec un mur de 19 cm d'épaisseur incorporant un MCP, a montré que le MCP a permis de réaliser une économie de 32 % sur la consommation électrique. La macro-encapsulation a été utilisée aussi avec le mur Trombe. Zalewski *et al.* (2012) [37] ont introduit les MCP dans les briques d'un mur Trombe pour augmenter la capacité de stockage de l'énergie solaire afin de la restituer avec un décalage temporel.

### 1.13.2.1 Micro-encapsulation

Le deuxième moyen est la micro-encapsulation, par laquelle de petites particules, sphériques ou en forme de bâtonnets sont enfermées dans un film polymère mince à poids moléculaire élevé. Les particules encapsulées peuvent alors être incorporées dans n'importe quelle matrice compatible avec le film d'encapsulation. Il est important aussi que le film d'encapsulation doit être compatible à la fois avec le MCP et avec la matrice.

La micro-encapsulation, est l'encapsulation dans des particules inférieures à 1mm de diamètre. Cette nouvelle forme d'encapsulation des MCP est récemment développée. La Micro-encapsulation sert le même but que la macro encapsulation, mais en outre:

- Elle améliore le transfert de chaleur à travers la grande surface de contact par rapport au volume.
- Elle améliore la stabilité de cycle car la distinction entre deux phases s'effectue pour des distances microscopiques.

L'encapsulation peut former des matériaux MCP composites, qui sont des matériaux constitués d'un MCP et au moins un autre matériau. L'autre matériau sert à améliorer au moins l'une des propriétés du MCP. Cette composition peut également:

- Améliorer la stabilité de cycle, encore une fois, par des structures microscopiques qui réduisent la séparation de phase.
- Améliorer le transfert de chaleur, grâce à l'ajout de matières avec une grande conductivité thermique comme, le graphite.

L'encapsulation des MCP a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches en évoquant les avantages et les inconvénients des différentes géométries d'encapsulation avec différents matériaux et leur compatibilité

Sarier et al. (2007) [38] ont fait une étude sur l'impact de la taille des capsules avec une poudre sur le comportement du matériau composite. Il a été constaté que la micro-encapsulation donne les mêmes performances thermiques que le MCP à l'état brut et aucun problème de fuite n'a été observé.

Cependant, les MPCs micro-encapsulés présentent quelques inconvénients, Yamagishi *et al.* (1996) [39] ont observé la surfusion durant la solidification des microcapsules. Zhang *et al.* (2005) [40] ont étudié la possibilité de limiter le phénomène de la surfusion en ajoutant des agents de nucléation, comme le 1-tétradécanol ou le 1-pentadécanol. Ces MCPs micro-encapsulés peuvent être incorporés dans un matériau support et conditionnés en formant des plaque de matériaux composites. La figure 1.11 montre un panneau en matériau composite intégrant un MCP micro-encapsulé.

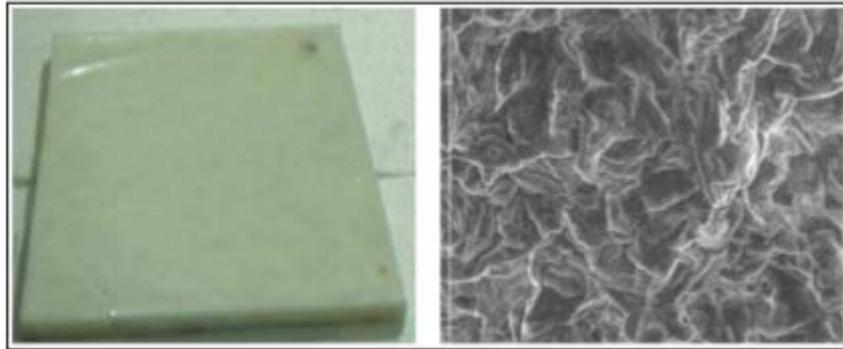


Figure 1.11 : Panneau en matériau composite aux échelles macro et micro

Zhang *et al.* (2005) ont étudié la possibilité de l'augmentation de la conductivité thermique de ces plaques composites en ajoutant le graphite. L'introduction de 10 % de l'additif graphite a augmenté la conductivité thermique du matériau composite de 50 %, soit de 0,150 W/m·K à 0,229 W/m·K.

Pour les applications des MCP dans le domaine du bâtiment, différentes méthodes d'incorporation peuvent être utilisées : incorporation directe, immersion et encapsulation. La figure 1.12 montre un exemple d'un réseau de polyacrylamide comme MCP. Le MCP doit être encapsulé afin qu'il n'influe pas sur la fonction du matériau de construction.

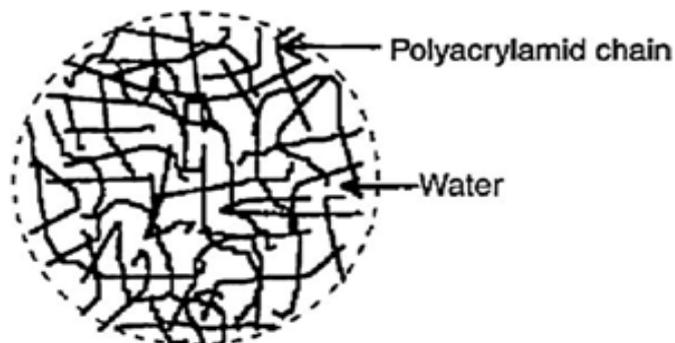


Figure 1.12 : Le réseau de la polyacrylamide contenant de l'eau utilisée pour le stockage à basse température de changement de phase.

Plusieurs chercheurs ont étudié les MCP micro-encapsulés développés par des entreprises comme BASF.

Néanmoins, l'utilisation potentielle de MCP microencapsulé dans diverses applications de stockage thermique est limitée par leur coût un peu élevé (Figures. 1.14 et 1.15).

Les sociétés développant le MC ont trouvé différentes façons d'encapsulation de [41].

Par exemple, Cristopia encapsule le MCP dans les nodules (Fig. 1.16). Les nodules sphériques (billes) sont moulées par soufflage à partir d'un mélange de polyoléfines et remplis de MCP. La société Rubitherm a développé un granulé de stockage de chaleur contenant environ 35% en poids d'un matériau à changement de phase (Fig. 1.17). D'autres entreprises ont développé des produits encapsulés également commercialisés (Fig. 1.18-1.21).

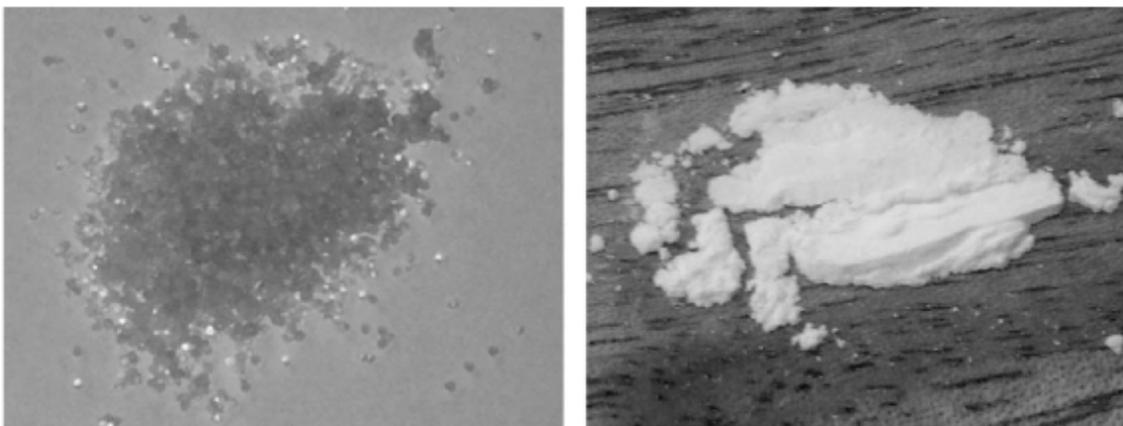


Figure 1.13 : Des MCP micro-encapsulés

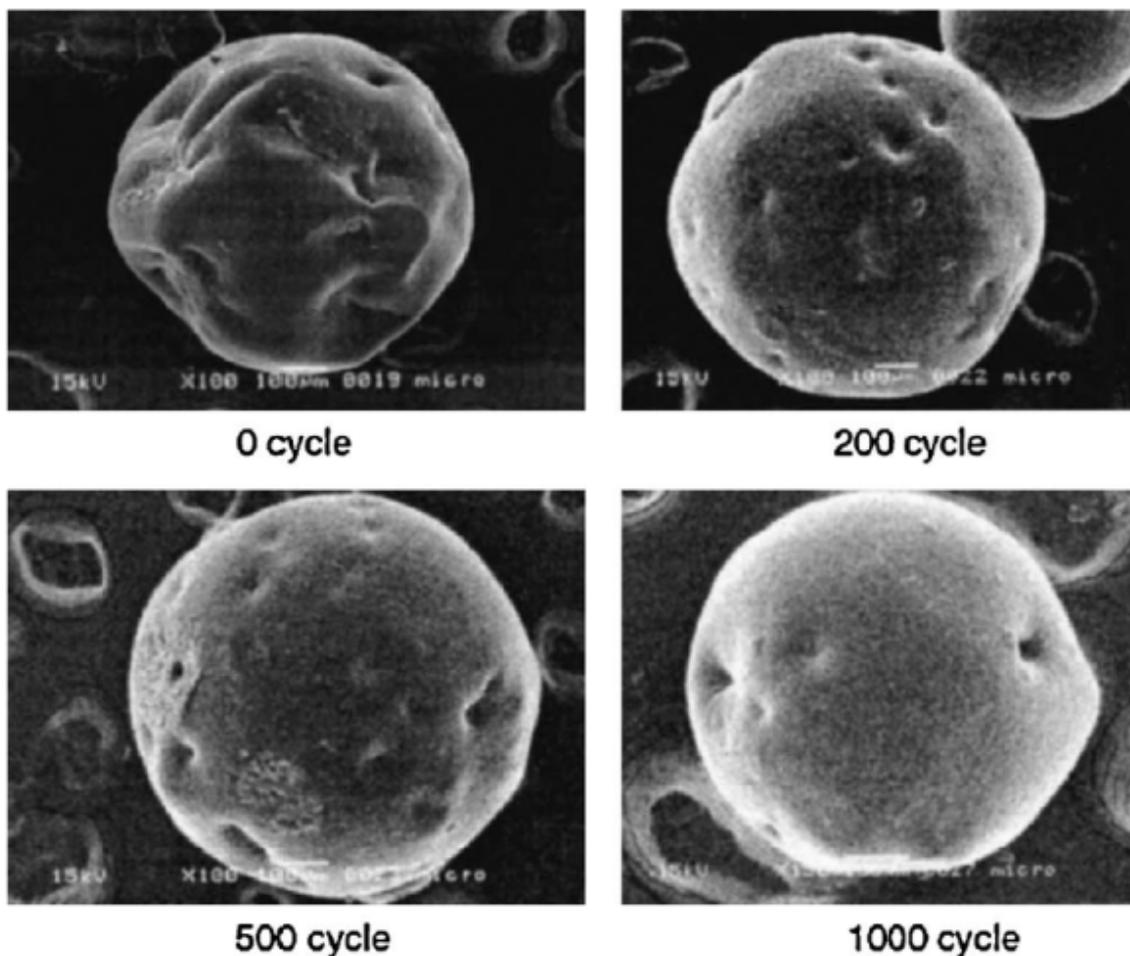


Figure 1.14 : Profil microcapsule de paraffine évalué par SEM à différents cycles thermiques

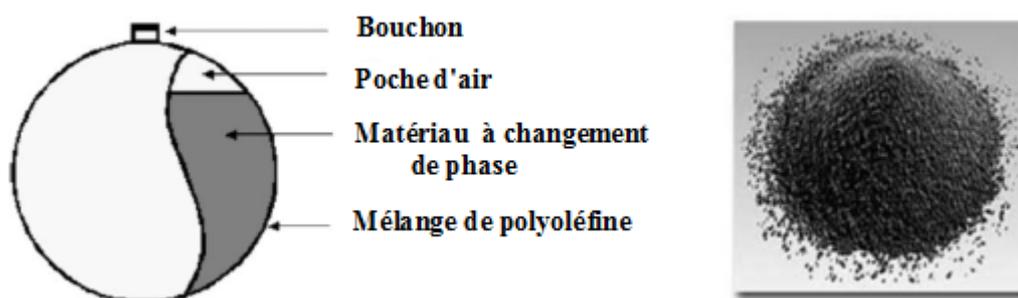


Figure 1.15 : MCP encapsulé développé et commercialisé par Rubitherm

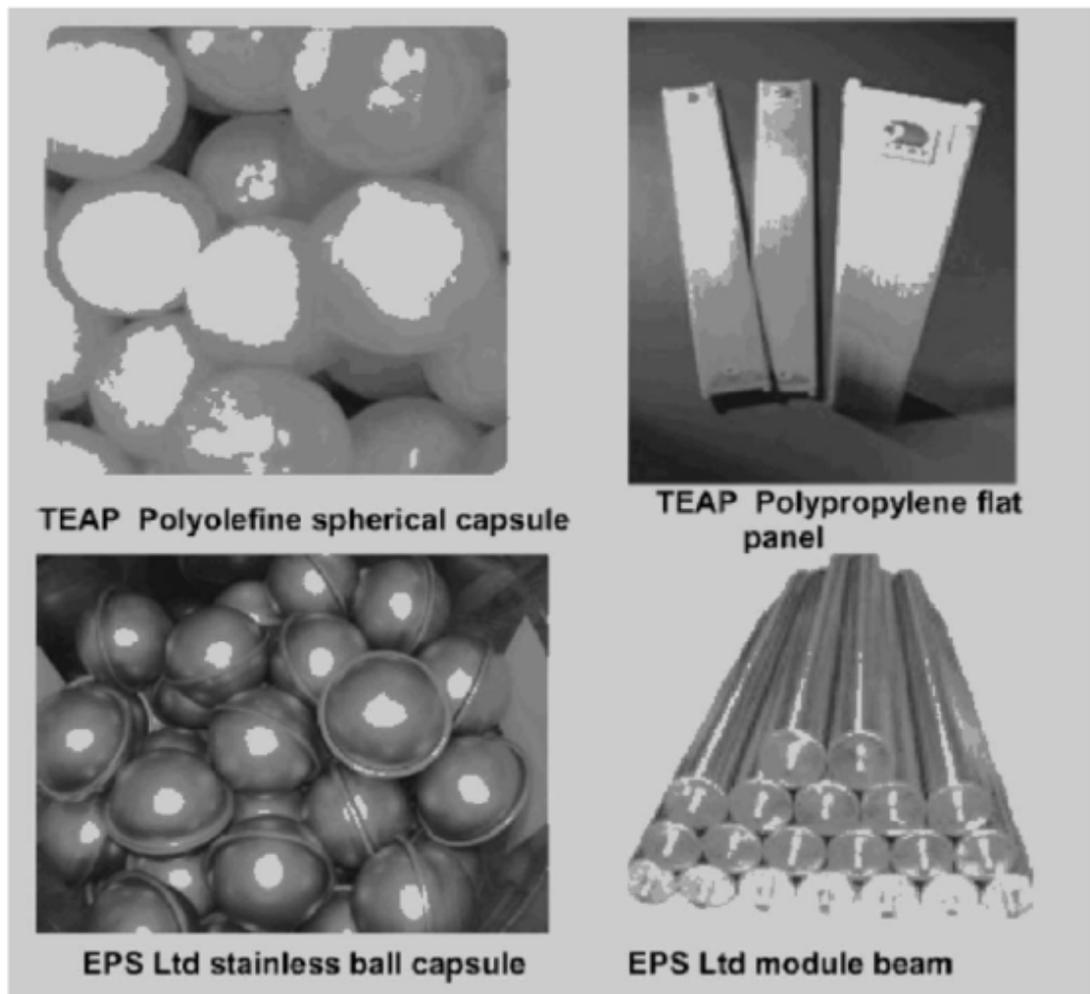


Figure 1.16 : Des produits commercialisés pour le stockage de chaleur par changement de phase

### 1.13.3. Encapsulation des MCP dans les structures

Au cours des 20 dernières années, plusieurs formes de MCP encapsulé en vrac ont été commercialisées pour les applications solaires actives et passives. Cependant, la surface de la plupart des produits commercialisés était insuffisante pour fournir la chaleur nécessaire au bâtiment après la fusion du MCP par le rayonnement solaire direct.

En revanche, les murs et les plafonds d'un bâtiment offrent de grandes surfaces d'échange de chaleur au sein de chaque zone du bâtiment.



Figure 1.17 : Macro-encapsulation dans des sacs.

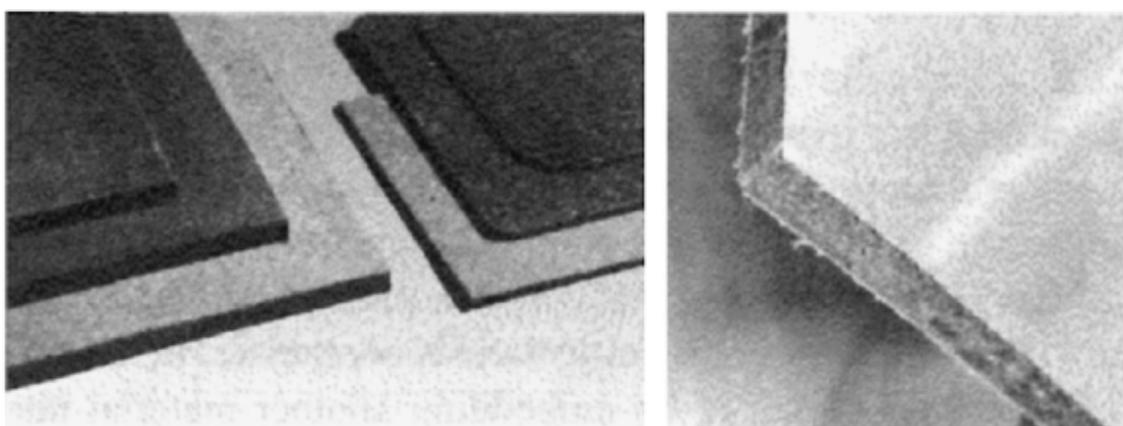


Figure 1.18 : Des plaques en matériau composite contenant des MCP



Figure 1.19 : Macro-encapsulation d'un MCP inorganique (TEAP / Australie et Dörken / Allemagne)

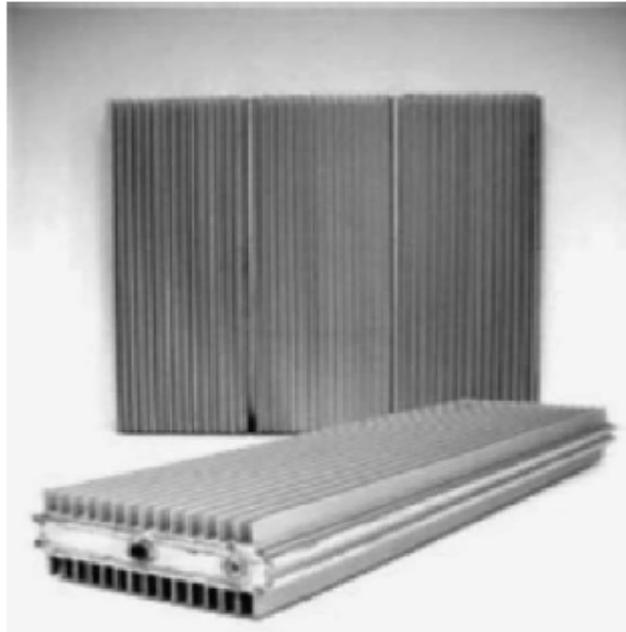


Figure 1.20 : Macro-encapsulation dans des profilés en aluminium avec des ailettes pour améliorer le transfert de chaleur (Climator/Suède)



Figure 1.21 : Echangeur de chaleur à tubes et à ailettes

Plusieurs travaux ont étudié les méthodes d'intégration des MCP dans des plaques de plâtre et dans d'autres matériaux de construction.

Khudhair et al. [4] Ont présenté les techniques de fabrication, les performances thermiques et les applications des MCP intégrés dans des plaques de plâtre et de blocs de béton.

Les panneaux (Wallboards) incorporant des MCP sont largement utilisés et peu coûteux dans une variété d'applications, ce qui les rend très appropriés pour leur application dans les murs et les plafonds des bâtiments. Cette méthode permet d'intégrer directement le MCP dans du plâtre, du béton ou d'autres matériaux pour former une enveloppe efficace en énergie. Il existe différents procédés d'incorporation du MCP dans les Wallboards durant la fabrication. Les premiers produits sont maintenant disponibles sur le marché. Dans les années 90, Hawes, Feldman et Banu (1993) [5] ont étudié l'incorporation de différents types de MCP (stéarate de butyle, dodécanol, propyl palmitate et acides gras) dans des panneaux muraux. Il a été conclu que les panneaux en matériau composite étaient comparables à des panneaux standards en termes de durabilité, de résistance mécanique et de stabilité. Les résultats ont montré que les panneaux intégrant de MCP ont une capacité de stockage thermique 12 fois mieux qu'un panneau standard. Stovall et Tomlinson (1992) [42] et Salyer et Sircar (1990) [43] ont constaté que l'utilisation des panneaux intégrant 20 à 22 % de MCPs, dans l'enveloppe d'un bâtiment, permet de réaliser jusqu'à 30 % d'économie d'énergie sur le chauffage et la climatisation.

Cabeza et al. (2007) [7] ont abordé l'effet de l'intégration de MCP avec d'autres matériaux de construction sur le comportement mécanique de l'enveloppe. Il a été conclu que la présence de MCP peut fragiliser les propriétés mécaniques de l'enveloppe.

Certains chercheurs se tournent donc vers l'étude des propriétés mécaniques de matériaux de construction intégrant des MCPs. Feldman et al. (1984) [44] ont étudié les propriétés mécaniques des matériaux de construction intégrant des MCPs. Ils ont analysé l'évolution de la résistance à la compression de ciment intégrant des MCPs. Il a été conclu, qu'il est possible de renforcer les propriétés mécaniques du matériau intégrant un MCP, par exemple par des fibres de verre.

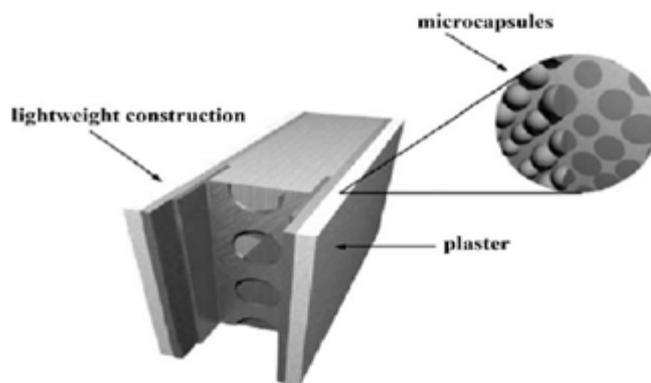


Figure 1.22 : Un panneau léger avec MCP micro-encapsulé

#### 1.13.4. Incorporation des MCP avec les matériaux de construction

##### 1.13.4.1. MCP dans des panneaux en gypse (wallboards)

Au cours des dernières années, plusieurs travaux de recherches ont été effectués pour étudier et développer une grande variété des plaques de plâtre incorporant des MCP et des parois en (wallboards/ MCP) pour leur application dans les constructions légères. Ces produits pourraient être utilisés pour diminuer les fluctuations de température dans les bâtiments existants rénovés et dans de nouveaux bâtiments légers.

Les auteurs [45] ont développé une plaque de plâtre intégrant un MCP micro-encapsulé, agrégats minéraux et ont ajouté quelques adjuvants pour améliorer les propriétés des parois. Le MCP incorporé a une température de fusion entre 25 et 28 °C. La chaleur sensible et latente du matériau a été mesurée avec la calorimétrie à balayage différentiel (DSC) avec une chaleur constante et vitesse de refroidissement de 2 K/min.

Les plaques en MCP développées ont été testées dans deux chambres identiques adjacentes réalisées en parois légères, l'une était recouverte par des panneaux de plâtre/MCP et l'autre avec des plaques de plâtre ordinaires. L'épaisseur de la plaque de plâtre a varié entre 1 cm et 3 cm.

Il a été constaté que l'utilisation des panneaux de plâtre/MCP a permis de diminuer les pics de température de la chambre d'environ 3 °C, dans la période chaude, par rapport à la chambre sans MCP.

Dans [46], il a été testé le comportement thermique d'une pièce à l'échelle réelle en utilisant des plaques de plâtre intégrant des MCP micro-encapsulées. Ils ont réalisé aussi certaines expériences à l'échelle réduite avec des appareils

spécialement conçus pour tester des échantillons de mur. Un petit échantillon de 50 cm x 50 cm a été testé entre deux plaques de cuivre, qui peuvent être chauffées et refroidies de façon indépendante.

Les performances thermiques des échantillons de mur avec MCP ont été testées pour un flux de chaleur constant des deux côtés de l'échantillon. La température au milieu de l'échantillon a été enregistrée. Il a été remarqué que la température de l'échantillon n'a pas augmenté de façon linéaire à cause de l'effet de MCP durant sa fusion.

Les mesures à pleine échelle ont été menées sur deux locaux de test. L'un des locaux était couvert d'un plâtre de référence ordinaire et l'autre avec du plâtre/MCP. Ces locaux étaient orientés vers le sud. Dans ce projet, deux produits MCP différents ont été testés: le premier est un enduit en plâtre à base de 40% de MCP et de 6 mm d'épaisseur, le second contient 20% de MCP avec une épaisseur de 15 mm.

L'étude expérimentale a indiqué que l'enduit en plâtre incorporant un MCP a contribué à faire diminuer les pics de température. Sur une période de trois semaines, la température du local de référence était supérieure à 28 °C pendant environ 50 heures, tandis que celle du local avec MCP n'était que 5 heures au-dessus de 28 °C. Les auteurs ont souligné que le MCP micro-encapsulé a l'avantage d'une application facile sans le risque de fuite, contrairement au matériau MCP macro-encapsulé.

Kuznik, et al. 2009 [11] ont réalisé des essais expérimentaux sur un matériau composite, fabriqué par la société Dupont de Nemours (ENERGAIN), contenant 60% de la paraffine micro-encapsulée et 40 % de polymère. La conductivité thermique de ce matériau composite est de 0,22 W/(m.K) à l'état liquide et 0.18 W/(m.K) à l'état solide.

L'enthalpie du matériau a été mesurée par la méthode de DSC avec un taux de refroidissement et de chauffage de 0.05 K/min. La température maximale de fusion a été obtenue à 22,2 °C et la température de solidification 17,8 °C.

La paroi composite a été examinée dans une salle d'essai MINIBAT conçue à cet effet. La salle d'essai à l'échelle réelle a été réalisée par l'institut (CETHIL- INSA de Lyon, France), elle est composée de deux enceintes identiques, appelé cellule 1 et cellule 2, dont les dimensions sont (3,10m x 3,10m x 2,50m). Les expériences ont été réalisées uniquement sur la cellule 1.

Le côté Sud de la cellule 1 est en contact avec une chambre climatique, dont la température est contrôlée par un système de traitement d'air. La température de la chambre climatique peut varier entre -10 et 40 °C en fonction du temps. Les essais thermiques ont été réalisés selon trois scénarios:

- En période d'été: la température dans la chambre climatique varie entre 15 et 30 °C, avec une ventilation nocturne de la cellule 1 pour améliorer la restitution de la chaleur par le MCP.
- En mi-saison: la température dans la chambre climatique varie entre 10 et 18 °C.
- En période d'hiver: la température dans la chambre climatique varie entre 5 et 15 °C , le système de chauffage dans la salle de test a été activé lorsque la température baisse en-dessous de 20 °C.

Le flux solaire était identique pour tous les scénarios d'essai. L'expérience a été menée pour comparer le comportement de la chambre d'essai avec et sans MCP sur les murs. Les résultats obtenus ont permis de conclure que la paroi composite incorporant des MCP est une solution intéressante pour l'application dans la construction, pour améliorer le confort thermique, pour trois raisons:

- La paroi incorporant un MCP réduit l'effet de la surchauffe en période d'été et l'énergie stockée est libérée lorsque la température de la salle diminue.
- Les pics de la température de la surface de la paroi avec MCP sont réduits.
- La stratification de la température de l'air dans la chambre avec MCP est moins observée par rapport à celle de la chambre sans MCP.

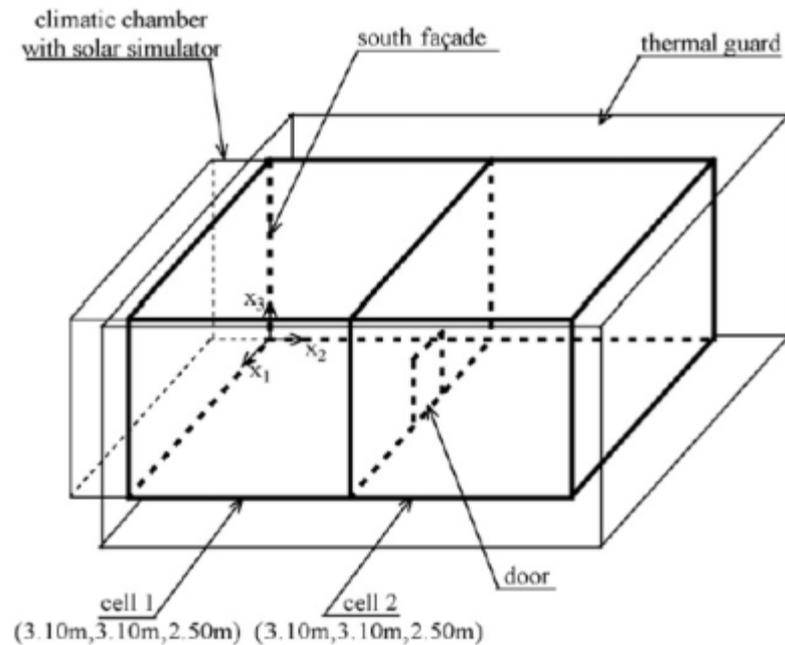


Figure 1.23 : Cellule d'essai expérimentale MINIBAT

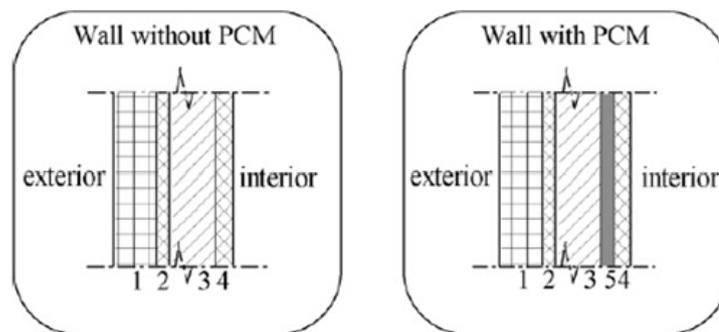


Figure 1.24 : Composition des murs avec et sans MCP

Au cours des dernières années, de nombreuses études se sont intéressées à l'utilisation des MCP avec du plâtre en réalisant des parois composites [47-51]. Il a été conclu que le MCP peut être intégré au plâtre avec un pourcentage qui peut atteindre les 45% lorsque la structure est renforcée par des additifs. Le matériau MCP peut être aussi intégré à des parois composites légères avec un pourcentage de 60%.

Le MCP avec le plâtre a été utilisé comme une solution passive pour augmenter la capacité thermique des parois, ce qui engendre l'amélioration des performances thermiques des bâtiments en réduisant l'amplitude de la température intérieure. Dans l'expérimentation, il a été utilisé souvent une étude comparative entre deux chambres soumises aux mêmes conditions climatiques,

l'une réalisée avec des parois en plaques de plâtre incorporant des MCP et l'autre réalisée avec des plaques de plâtre ordinaires. L'influence des MCP est évaluée par la diminution de l'amplitude de la température intérieure.

#### 1.13.4.2. MCP dans le béton

L'intégration des matériaux à changement de phase dans le béton a pour but d'accroître la capacité de stockage de la chaleur des matériaux de construction lourds. La combinaison de la chaleur latente du MCP et de la forte densité du béton est un concept intéressant pour une nouvelle technologie de stockage thermique qui permet de réaliser des économies d'énergie sur le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Au cours des dernières années, plusieurs études ont été effectuées sur l'intégration des MCP dans le béton.

Entrop et al. 2011 [52]. ont réalisé une investigation expérimentale sur des cellules utilisant des planchers en béton intégrant des matériaux à changement de phase (MCP) pour emmagasiner l'énergie fournie par le soleil. Quatre cellules de même dimensions ont été construites; deux cellules avec un plancher en béton /MCP et les deux autres avec un plancher en béton ordinaire. Les dimensions des cellules sont présentées par la figure 1.25. La seule source de chaleur dans chaque cellule est le rayonnement solaire à travers les fenêtres. Dans cette étude, le plancher incorporant un matériau à changement de phase a été exposé directement au rayonnement solaire direct sans utiliser un revêtement de sol.

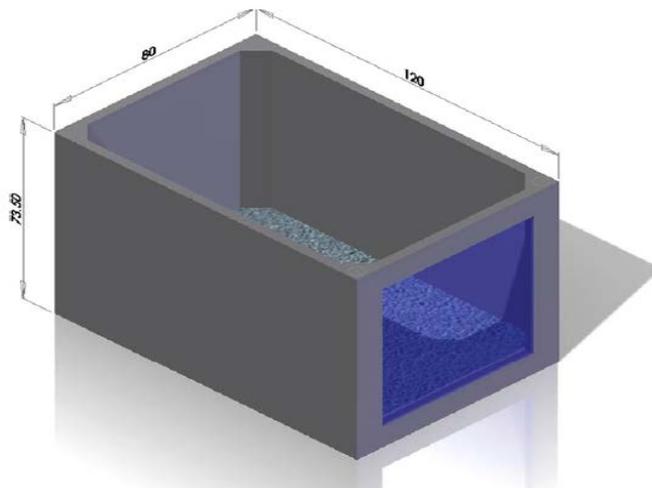


Figure 1.25 : Dimensions de la cellule de test

Les quatre cellules de test ont été réalisées au Pays-Bas pour étudier l'influence de MCP sur le comportement thermique des parois. Des thermocouples ont été installés pour mesurer l'évolution de la température à l'intérieur des cellules en fonction de l'isolation thermique de l'ambiance extérieure et du rayonnement solaire. L'intégration du MCP dans les planchers en béton a entraîné une diminution des températures maximales de plancher jusqu'à  $16 \pm 2\%$  et une augmentation des températures minimales allant jusqu'à  $7 \pm 3\%$ .

Les résultats ont montré que cette technique pourrait réduire les fluctuations de température dans les maisons, mais il est très difficile de mettre en œuvre cette technique sur une plus grande échelle.



Figure 1.26 : Quatre cellules de test réalisées au Pays-Bas

Cabeza et al (2007) [7] ont étudié l'aspect thermique d'un nouveau béton innovant incorporant des matériaux à changement de phase (MCP) pour développer un produit qui permet d'obtenir des économies d'énergie importantes sur le chauffage et la climatisation des bâtiments. Deux prototypes à l'échelle réelle ont été réalisés pour étudier l'effet d'un MCP qui a une température de changement de phase de  $26\text{ °C}$ . L'un est réalisé en béton classique et l'autre avec un nouveau béton qui intègre 5% d'un MCP micro-encapsulé.

Le matériau à changement de phase utilisé est un MCP micro-encapsulé appelé Micronal et développé par la société (BASF), ce MCP a une température de fusion de  $26\text{ °C}$ , et une chaleur latente de fusion de  $110\text{ kJ/kg}$ .

L'incorporation de ce MCP dans le béton a été développée dans le cadre du projet (MOPCON). Les résistances mécanique et thermique du matériau composite béton/MCP ont été testées [7]. Il a été constaté que le béton de Mopcon a une résistance à la compression supérieure à 25 MPa et une résistance à la traction supérieure à 6 MPa (après 28 jours). Ces valeurs ouvrent la possibilité d'utilisation à des fins structurelles.

Les deux prototypes sont construits dans la localité de Puigverd de Lleida (Espagne). Les résultats de cette étude montrent que le stockage de l'énergie dans les murs en béton intégrant un MCP est supérieur par rapport à celui du béton classique sans MCP, ceci conduit à une inertie thermique améliorée avec des amplitudes de température internes plus basses.

Les résultats obtenus ont montré une diminution de la fluctuation de la température dans le prototype avec le béton intégrant un MCP et un déplacement du pic de température de la paroi de 2 heures. La diminution des fluctuations de la température est due à la conductivité thermique faible et à la capacité de stockage de chaleur élevée du matériau composite (béton avec MCP).

Ces résultats montrent que l'incorporation de MCP dans le béton donne une réelle opportunité de réaliser des économies d'énergie dans les bâtiments.



Figure 1.27 : Deux prototypes à l'échelle réelle

Arce, et al. (2012) [53] ont continué le travail présenté précédemment [7]. L'un des principaux inconvénients relevés dans [7] était la grande influence des pics des températures extérieures élevées et le rayonnement solaire sur la

performance de MCP pendant la période d'été, ce qui a empêché sa solidification pendant la nuit.

L'objectif principal de ce travail présenté dans [53] était de surmonter le problème et d'augmenter la durée de fonctionnement de MCP et d'améliorer le confort thermique. Pour diminuer les températures élevées dans les cellules prototypes, une protection horizontale a été utilisée sur le toit pour minimiser les apports solaires à travers la toiture et les ouvertures (côté Est, Sud et Ouest). Les résultats indiquent que les températures ont été légèrement réduites et le MCP est resté actif 4% plus de temps que dans le travail précédent [7]. Le problème des températures élevées n'a pas été entièrement résolu.

Hunger et al.(2009) [54] se sont intéressés à la caractérisation thermique d'un béton intégrant un MCP. Il a été conclu que la méthode de DSC, ne peut pas être utilisée pour mesurer la chaleur spécifique des matériaux non homogènes puisque les échantillons appropriés pour la méthode DSC sont de l'ordre de quelques milligrammes, ce qui n'est pas représentatif pour les matériaux hétérogènes. Hunger et al ont utilisé une nouvelle méthode pour mesurer la chaleur spécifique du béton/MCP qui a aussi quelques inconvénients. Le flux de chaleur utilisé dans les mesures est celui fourni à la surface de l'échantillon. En réalité, le flux thermique est variable à l'intérieur de l'échantillon suite à la différence de la température au niveau des deux faces de l'échantillon. En conséquence, il a été constaté que cette méthode surestime le flux de chaleur transféré de l'échantillon par rapport au gradient de température interne au cours du temps et, par conséquent, la chaleur spécifique calculée est également surestimée. De plus, cette méthode ne tient pas compte de l'influence de la température ambiante sur le transfert de chaleur dans l'échantillon, ce qui pourrait également donner lieu à des incertitudes.

De nombreuses études se sont intéressées à l'effet des matériaux MCP sur les propriétés thermiques et mécaniques des parois. Parmi ces études, Meshgin et al (2012) [12] ont étudié le comportement thermique et mécanique d'un mortier isolant intégrant des matériaux à changement de phase (MCP) et des particules en caoutchouc des pneus réutilisés. Différents types de mortier de ciment ont été élaborés sur la base du rapport de volume ou de poids de chaque composant. Une gamme des additifs utilisés dans les mélanges de mortiers a été déterminée sur la base des études faites sur l'intégration des particules en caoutchouc dans le

béton Li et al. [55,56]. Comme beaucoup de paramètres influent sur le comportement de mortier, les résultats de Li et al. ont été utilisés pour définir les modèles de mélange des mortiers à tester.

Le matériau à changement de phase utilisé a une température de fusion de 28 °C et une capacité de chaleur latente de (180–195 kJ/kg), il a été développé par la société Microtek .

Ce produit MCP a été choisi en raison de sa température de fusion de 28 °C, ce qui est approprié pour l'application dans le domaine du bâtiment, la capacité thermique du MCP commence à augmenter à 28 °C, absorbant une quantité importante de la chaleur. Une autre raison du choix de ce produit est que le MCP est encapsulé dans un polymère spécial qui résiste au processus de mélange du mortier. Dans ce travail, les résistances à la compression, à la flexion, à l'adhésion ainsi que la conductivité thermique du mortier ont été étudiés. L'essai de la résistance à la flexion et à la compression ont été effectuées à 7 jours et à 28 jours sur des éprouvettes prismatiques de dimension (160 mm x 40 mm x 40 mm) (figure 1.28). Les résultats expérimentaux ont prouvé que les propriétés mécaniques peuvent être améliorées en ajoutant des additifs. Les résultats montrent également que les particules en caoutchouc peuvent réduire la conductivité thermique du mortier de manière significative, alors que le MCP contribue à accroître la chaleur spécifique du mortier.



Figure 1.28 : Eprouvettes prismatiques en mortier ciment pour essai de flexion



Figure 1.29 : Spécimen utilisé pour l'essai d'arrachement

Dehdezi P.K et al (2012) [57] ont étudié les aspects thermiques, mécaniques et microstructuraux du béton contenant différentes quantités de MCP en microcapsules. L'augmentation de la quantité de MCP dans le béton provoque une diminution de la conductivité thermique et une augmentation de la capacité calorifique du béton. Cependant, la résistance à la compression et à la flexion diminue de manière significative.

Le mélange de béton est composé de calcaire et de sable naturel inférieur à 4mm en conformité avec la norme BS EN 12620 (2008) et de ciment à haute résistance (classe CEM 1, 52,5 N /mm<sup>2</sup>). Le MCP mélangé avec du béton est de la paraffine micro-encapsulée sous la forme d'une poudre sèche fourni par la société (Ciba Specialty Chemicals, Bradford, Royaume-Uni), la température de fusion est de 26 °C et une chaleur latente de 160 kJ/kg. Le diamètre des particules de MCP se situe généralement entre environ 20 et 80 µm, comme représenté sur la figure 1.30.

Le diamètre des particules de MCP a été déterminé par l'appareil microscopique électronique à balayage (grossissement 250). Pour la préparation du béton incorporant un MCP, il a été utilisé 4 compositions : 0,5% en masse, 1% en masse, 3% en masse et 5% en masse de la poudre MCP, sur la base de la masse totale du béton.

Tous les échantillons de béton ont été compactés en utilisant une table de vibration et séché à l'air pendant 24 h dans les conditions de laboratoire, puis ils ont été conservés pendant une période de 28 jours à une température de 20 ± 2°C.

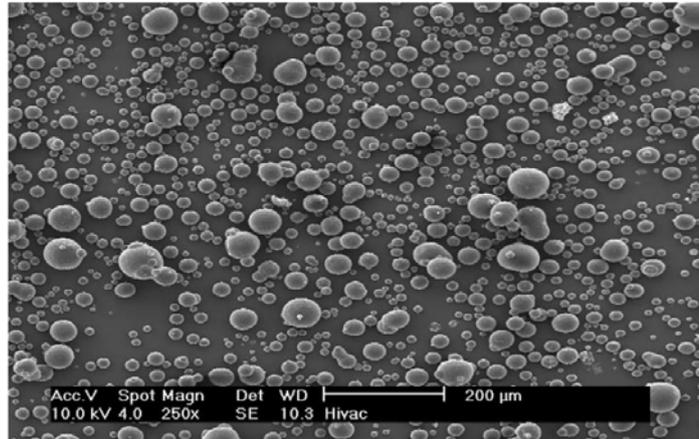


Figure 1.30 : Particules de MCP dans le Béton

Zhengguo Zhang et al (2013) [58] ont étudié la capacité du stockage thermique ainsi que les propriétés mécaniques d'un mortier ciment (TESCM) réalisé en mortier ciment ordinaire intégrant un matériau à changement de phase (MCP) en fonction de n- octadécane et le graphite expansé (EG). Les résultats des essais mécaniques réalisées sur les cubes de TESCM montrent que le n- octadecane/EG composite MCP a une bonne compatibilité avec les matériaux de construction. Sur la base de l'évaluation des performances de stockage de l'énergie thermique, il a été constaté que le TESCM contenant le n-octadecane/EG composite MCP joue un rôle dans la réduction de la variation de la température intérieure, ce qui contribue à diminuer la consommation d'énergie pour les bâtiments.

### Conclusion

Ce chapitre a comporté, dans une première partie, la technique du stockage thermique pour l'amélioration du confort thermique dans le bâtiment en utilisant des matériaux de construction à grande capacité thermique. Puis, nous avons cité les avantages du stockage thermique par chaleur latente par rapport au stockage par chaleur sensible.

Une deuxième partie est consacrée à une revue bibliographique des études réalisées sur les méthodes d'intégration des matériaux à changement de phase dans les matériaux de construction pour accroître leur capacité de stockage de la chaleur. Plusieurs travaux de recherches ont été présentés sur le développement d'une grande variété des panneaux incorporant des MCP pour les utiliser dans la construction afin de diminuer les fluctuations de température dans les bâtiments.

## CHAPITRE 2

### ETUDE NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE PAROI INCORPORANT DES MCP

#### 2.1. Introduction

Ce chapitre s'intéresse à l'étude numérique du comportement thermique de parois composées des matériaux de construction utilisés en Algérie et de parois dans lesquelles est incorporé un matériau à changement de phase. Le modèle, basé sur la formulation enthalpique, est décrit par une équation de transfert de chaleur. Cette équation est résolue par une méthode implicite aux différences finies pour étudier le transfert de chaleur à travers une paroi intégrant un matériau à changement de phase (MCP).

#### 2.2. Modèle physique et formulation mathématique

##### 2.2.1 Modèle physique

Considérons une paroi verticale d'épaisseur  $e$  dans laquelle est incorporé un matériau à changement de phase (MCP). Cette paroi se trouve entre l'ambiance intérieure caractérisée par une température fixée à  $23\text{ °C}$  et l'ambiance extérieure qui a une température variant sinusoïdalement et avec laquelle elle échange de la chaleur par convection (figure 2.1).

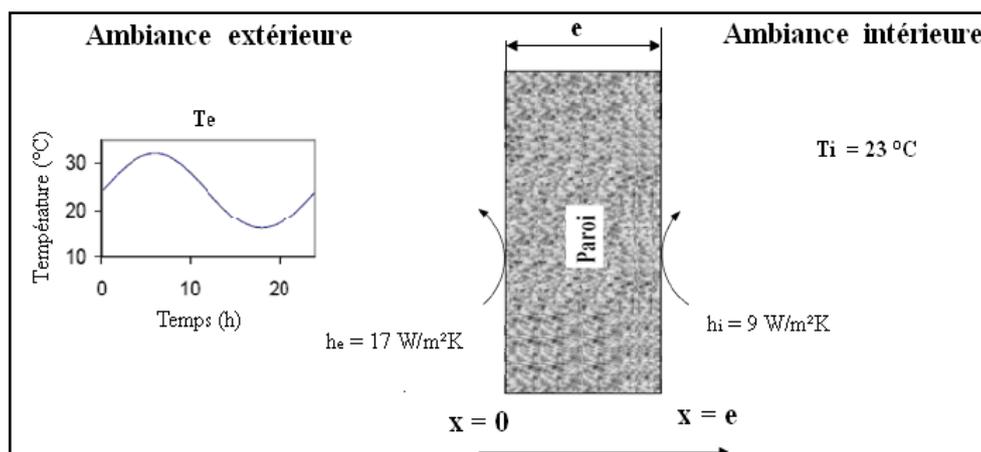


Figure 2.1 : Schéma du modèle physique

## 2.2.2. Formulation mathématique

### 2.2.2.1 Hypothèses simplificatrices

- le transfert de chaleur est unidirectionnel;
- les propriétés thermo physiques sont constantes;
- régime transitoire.

Compte tenu des hypothèses formulées ci-dessus, l'équation de transfert vérifie l'expression suivante [59] :

$$\rho_k \frac{\partial h_k}{\partial t} = \lambda_k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

$h_k$  : enthalpie de la couche k de la paroi.

Pour les matériaux homogènes comme le plâtre, le béton, le BTS et la pierre, la dérivée partielle de l'enthalpie est donnée par [59]:

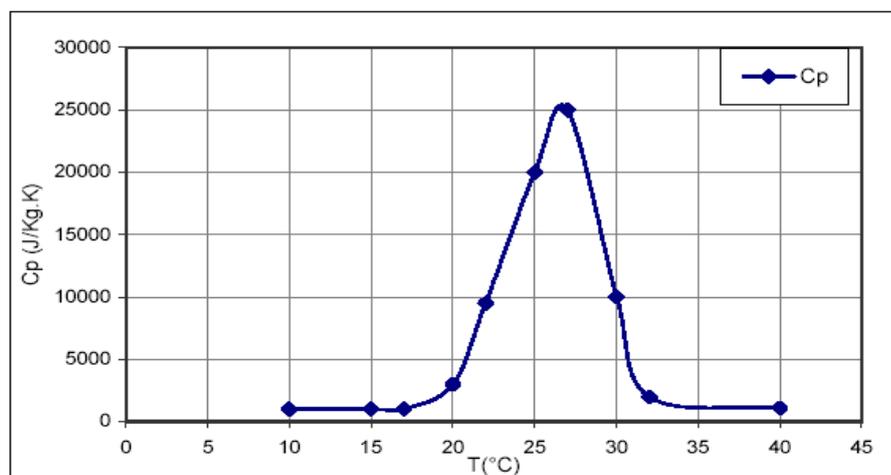
$$\frac{\partial h_k}{\partial t} = C_k \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

$C_k$  : chaleur spécifique .

Pour une paroi en plâtre contenant un matériau MCP, l'équation (2.1) s'écrit [59]:

$$\frac{\partial h_{PCM}}{\partial t} = \frac{\partial h_{PCM}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = C_{PCM}(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

Pour le mélange considéré (plâtre 70%, GR 30%), la chaleur spécifique de ce mélange varie en fonction de la température [13,14], comme il est reporté sur la figure 2.2.



**Figure. 2.2.** Évolution de la capacité thermique d'un mélange Plâtre/ MCP (30%) en fonction de sa température [13,14].

### 2.2.2.2 Conditions initiales et conditions aux limites

#### - Conditions initiales

$\forall t < t_0$ ,  $t_0$  étant l'instant à partir duquel la paroi est soumise aux transferts de chaleur par convection;

$$T(x,t) = T_{in} ;$$

$T_{in} = 23 \text{ °C}$ , où  $T_{in}$  étant la température initiale.

#### - Conditions aux limites

$$\forall t > t_0$$

à  $x = 0$ , une condition aux limites de type Fourier a été établie :

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h_e (T_e - T(0,t)) \quad (2.4)$$

Avec :

- Une température extérieure variant sinusoïdalement suivant la relation :

$$T_e(t) = 24 + 8 \sin(7.27 \cdot 10^{-5} t) \quad (\text{avec } \tau = 86400 \text{ s})$$

- Un coefficient d'échange de chaleur entre la paroi extérieure et l'atmosphère [60] :

$$h_e = 17 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

à  $x = e$ , la condition aux limites de type Fourier est donnée comme suit :

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=e} = h_i (T(e,t) - T_i) \quad (2.5)$$

Avec :

- Une température intérieure constante :

$$T_i = 23 \text{ °C}$$

- Un coefficient d'échange de chaleur entre la paroi intérieure et l'air intérieur [60] :

$$h_i = 9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

### 2.2.2.3 Méthodologie numérique

Afin de résoudre l'équation différentielle non linéaire qui régit le transfert de chaleur à travers une paroi intégrant un matériau MCP, la méthode des différences finies suivant un schéma implicite a été établie. La discrétisation de l'équation (2.1) conduit à l'expression suivante

$$\rho_i C_i^n \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \lambda_i \left( \frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \right) \quad (2.6)$$

L'équation (2.6) écrite pour chaque point  $1 < i < N$  résulte en un système de  $n$  équations simultanées et  $n$  inconnues. Nous avons obtenu un système d'équations algébriques de type tri diagonal que nous avons résolu en utilisant l'algorithme de Thomas.

### 2.2.3. Composition des parois

Nous avons considéré des parois en : plâtre, béton, Brique de Terre Stabilisée (BTS), pierre, ainsi que des parois composées d'un mélange plâtre/MCP.

Les tableaux 2.1 et 2.2 présentent les valeurs de la conductivité thermique ( $\lambda$ ), de la masse volumique ( $\rho$ ) et de la capacité thermique massique ( $C$ ) des différents matériaux étudiés.

Tableau .2.1 : Propriétés thermo physiques des matériaux étudiés

Matériau	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.k)	C (J/kg.°C)
Plâtre	1000	0,35	936
Béton	2200	1,75	1080
BTS	2000	1,3	1325
Pierre	2340	1,4	936

Tableau .2.2 : Propriétés thermo physiques du mélange plâtre/ MCP [13,14]

Matériau	Concentration	Etat	C [J/kg.K]	$\lambda_e$ [W/m.K]
Plâtre/ GR25	30%	Solide	1217,7	0,2602
Plâtre/GR25	30%	Liquide	1368,1	0,2639

### 2.3. Résultats et discussion

Nous avons analysé l'influence de l'épaisseur de ces parois en considérant une épaisseur comprise entre 1 cm et 8 cm. Les calculs ont été effectués pour une température intérieure  $T_i=23^\circ\text{C}$  et une température extérieure

$$T_e(t) = 24 + 8 \sin(7.27 \cdot 10^{-5} t)$$

avec  $\tau = 86400$  s.

Les coefficients de transfert de chaleur par convection entre la paroi et l'air ambiant ( $h_e$ ) et entre la paroi et l'air intérieur ( $h_i$ ) sont respectivement égaux à  $17 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  et  $9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

La figure 2.3 permet de constater l'effet du MCP sur la stabilité thermique de la face interne d'une paroi composée de plâtre et de MCP. La température de la face interne de cette paroi d'épaisseur égale à 1 cm, varie entre 18,8 et 26,5 °C avec un déphasage par rapport à la température extérieure de 3h30. Pour une épaisseur égale à 8 cm, la température est quasiment constante au cours de la journée; avec une variation au cours du temps très faible (inférieure à 1°C). Notons que la température de la face interne de la paroi est voisine de 23 °C, cette valeur contribue à améliorer le confort thermique d'un habitat dont les parois

seraient soumises aux mêmes contraintes que la paroi retenue dans cette étude. Nous constatons que la variation au cours du temps de la température de la face interne de la paroi diminue avec l'augmentation de son épaisseur et que pour une épaisseur au moins égale à 3 cm, le déphasage est très élevé. Ainsi, pour une épaisseur de 3 cm, le déphasage est estimé à 8h et pour une épaisseur égale à 5 cm il est de 12h.

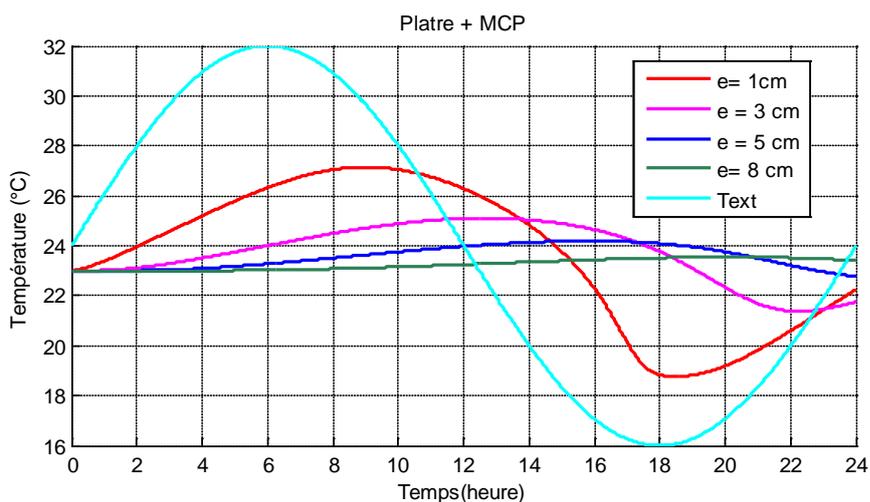


Figure 2.3 : Évolution de la température de la surface intérieure pour des parois en plâtre /MCP

La figure 2.4 présente l'évolution au cours du temps de la température de la face interne d'une paroi de plâtre en fonction de l'épaisseur ( $e$ ). Pour une épaisseur égale à 1 cm, la température est comprise entre 19 et 28 °C avec une amplitude, définie par la différence entre les températures maximales et minimales au cours de la journée, égale à 9 °C. Pour une épaisseur de 8 cm, elle oscille au cours du temps entre une valeur minimale de 21 et une valeur maximale de 25,5 °C, avec une amplitude de 4,5 °C. Nous constatons que comme le cas précédent, l'amplitude de la température de la surface intérieure diminue avec l'augmentation de son épaisseur.

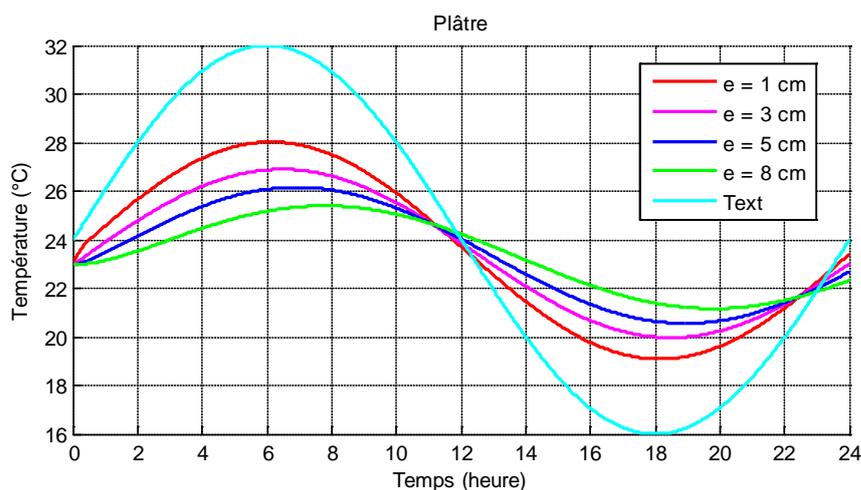


Figure 2.4 : Évolution de la température de la surface intérieure pour des parois en plâtre

La figure 2.5 illustre l'évolution au cours d'une journée de la température de la face interne d'une paroi en béton en fonction de son épaisseur. Pour une épaisseur égale à 1 cm, la température varie de 18,8 au 28,8 °C avec une amplitude de 9 °C ; elle est comprise entre 20 et 27 °C pour une épaisseur égale à 8 cm. Il s'ensuit un déphasage de 2,2 heures entre la température de l'extérieur et celle de la face interne de la paroi.

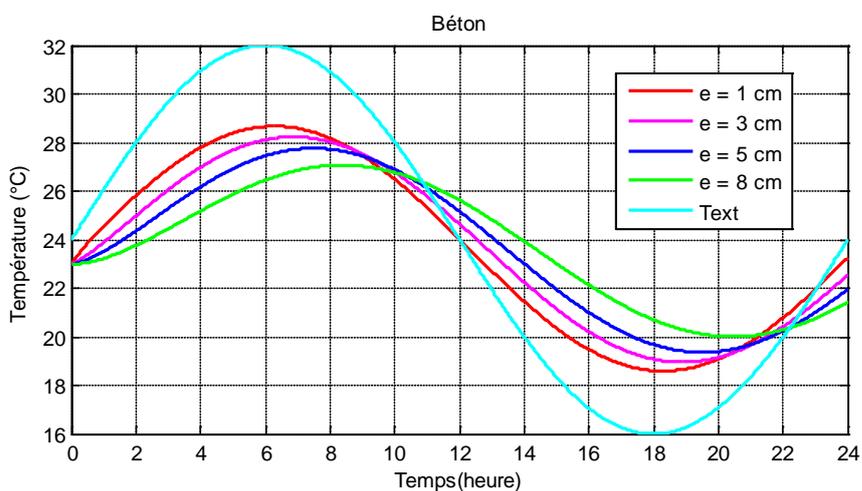


Figure 2.5 : Évolution de la température de la surface intérieure pour des parois en Béton

Pour une paroi en brique de terre stabilisée d'épaisseur égale à 1 cm, la variation de la température de la face interne est comprise entre 18,8 et 28,8 °C

avec une amplitude de 10 °C (figure 2.6). L'amplitude est réduite de 6°C pour une épaisseur égale à 8 cm et cette température varie entre 20,5 et 26,5 °C.

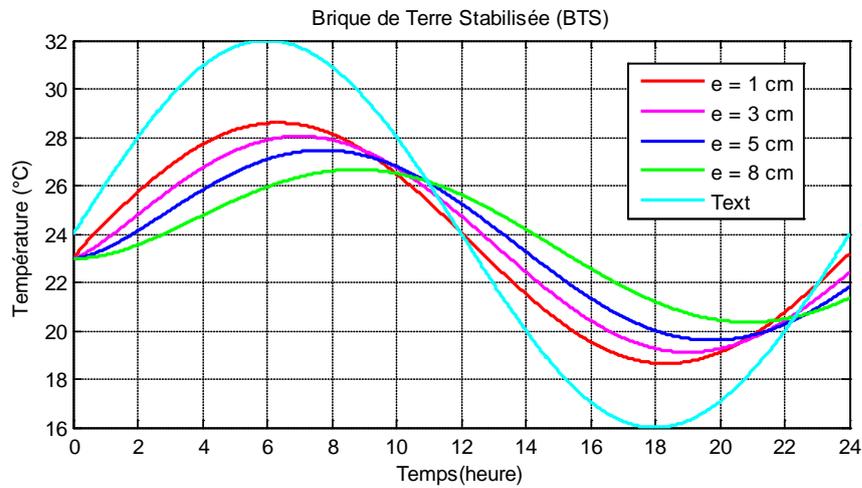


Figure 2.6 : Évolution de la température de la surface intérieure pour des parois en  
BTS

La température de la face interne d'une paroi en pierre, varie de 18,8 au 28,5 °C avec une amplitude de 10 °C pour une épaisseur égale à 1 cm et oscille entre une valeur minimale de 22,2 et une valeur maximale de 26,8 °C, avec une amplitude de 4,6 °C pour une épaisseur égale à 8 cm (figure 2.7).

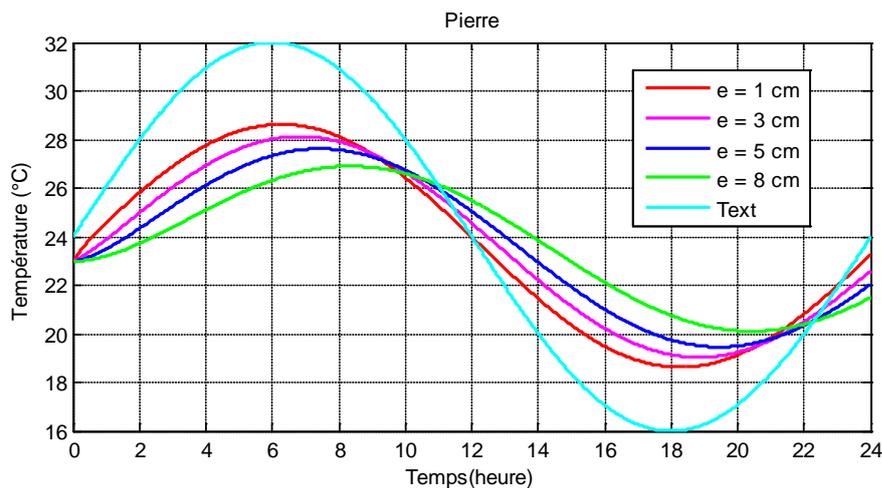


Figure 2.7 : Évolution de la température de la surface intérieure pour des parois en  
pierre

#### 2.4. Conclusion

Ce travail a permis d'étudier les transferts de chaleur à travers une paroi composée des matériaux MCP et d'analyser l'effet de ces matériaux à changement de phase sur l'amélioration de l'inertie thermique. Les résultats montrent qu'une épaisseur de 8 cm d'une paroi incorporant un matériau à changement de phase, permet de stabiliser la température de la surface intérieure de la paroi durant les 24 heures, avec une amplitude de température très faible (inférieure à 1°C). La température de la face interne de la paroi varie autour de 23 °C, ceci génère un meilleur confort thermique. Par contre, la température de la surface intérieure des parois des autres matériaux de construction, varie entre 20 et 26 °C, présentant un déphasage qui ne dépasse pas 3 heures et des amplitudes de température variant de 5 heures à 7 heures.

## CHAPITRE 3

### COMPORTEMENT THERMIQUE ET MÉCANIQUE D'UN MATÉRIAU COMPOSITE PLÂTRE/MCP

#### 3.1. Introduction

Ce chapitre consiste à faire une étude expérimentale sur l'influence de l'intégration des matériaux MCP sur le comportement mécanique et thermique des enduits en plâtre. Des mesures des propriétés mécaniques (Résistance à la flexion, résistance à la compression, résistance d'adhésion et dureté) et des propriétés thermiques (conductivité thermique et chaleur spécifique) ont été effectuées sur un matériau composite plâtre/MCP, afin de déterminer le pourcentage de MCP qui contribue à l'amélioration de la capacité calorifique du matériau sans provoquer une grande diminution de ses propriétés mécaniques.

#### 3.2. Matériaux

Le matériau composite étudié dans ce travail est constitué d'un mélange en plâtre avec différent pourcentage de matériau à changement de phase (MCP). Le gâchage du matériau composite plâtre/MCP a été effectué à l'aide d'un malaxeur automatique (PERRIER).

##### 3.2.1. Plâtre

Le plâtre étudié est un matériau utilisé comme enduit de plâtre traditionnel qui s'applique manuellement sur tous les supports. Il convient aux travaux d'aménagement des constructions neuves ou en rénovation. Le plâtre utilisé est constitué principalement d'hémihydrate bêta ( $\text{CaSO}_4,1/2\text{H}_2\text{O}$ ) et d'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), les autres composés présents provenant d'impuretés contenues initialement dans le gypse. La composition chimique du plâtre est présentée dans le tableau suivant:

Tableau 3.1 : Composition chimique du plâtre

$\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$	72 %	$\text{CaCO}_3$	7 %	Argile et silice	2 %
$\text{CaSO}_4$	18 %	$\text{MgCO}_3$	1 %	Adjuvants	< 1 %

### 3.2.2. Matériau MCP

Le matériau à changement de phase utilisé est une paraffine encapsulée sous forme de poudre, appelé Micronal, fournie par la société BASF (figure 3.1). Deux types de MCP ont été utilisés à savoir, le MCP (DS 5001) avec une température de changement de phase de 26°C et le MCP (DS 5008) avec une température de changement de phase de 23°C. Le tableau 3.2 donne les propriétés physiques du MCP.

Tableau 3.2. : Propriétés physiques du matériau MCP

Produit	Type de produit	Température de changement de phase	Chaleur latente	Masse volumique
DS 5001	poudre	26°C	110 kJ/kg	250–350 kg/m <sup>3</sup>
DS 5008	poudre	23°C	110 kJ/kg	250–350 kg/m <sup>3</sup>



Figure 3.1 : Produit MCP sous forme poudre

Dans le cadre de cette étude, les essais ont été effectués sur six compositions. Le tableau 3.3 présente les différentes compositions étudiées.

Tableau 3.3 : Les compositions étudiées

Composition	Pourcentage du plâtre (%)	Pourcentage du MCP (%)
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40
6	50	50

### 3.3. Détermination des caractéristiques mécaniques et thermiques

Dans le cadre de cette étude, des essais de flexion, de compression d'adhésion et de dureté, ainsi que des mesures thermiques ont été réalisés sur le matériau composite plâtre/MCP.

#### 3.3.1. Appareillage

Les principaux appareils qui peuvent être utilisés pour réaliser les essais mécaniques sont donnés ci-après.

- malaxeur pour gâcher le mortier (voir figure 3.2),
- moules métalliques, composés d'un cadre ouvert à parois amovibles formant trois compartiments lorsqu'elles sont assemblées (voir figure 3.3),
- dessiccateur,
- machine d'essai de compression,
- machine d'essai de flexion,
- appareil d'essai d'arrachement,
- appareil d'essai de Dureté.



Figure 3.2 : Malaxeur



Figure 3.3 : Moules métalliques

### 3.3.2. Préparation des échantillons

La préparation des éprouvettes se fait par plusieurs étapes, à savoir :

- préparation des moules et un léger graissage des faces intérieures des moules assemblés afin d'empêcher l'adhésion du mortier,
- pesée des différents matériaux qui constituent la formulation,
- gâchage de la formulation à l'aide d'un malaxeur,
- confection des éprouvettes destinées aux essais mécaniques.

Les éprouvettes sont des prismes de 160 mm x 40 mm x 40 mm. Trois éprouvettes sont préparées pour chaque composition (figure 3.4). Une fois atteint le degré de solidité adéquat, des marques d'identification sont appliquées sur les prismes. Ceux-ci sont conservés pendant 7 jours en atmosphère normale. Faire

sécher jusqu'à masse constante à  $(40 \pm 2)$  °C, ensuite refroidir les échantillons jusqu'à la température ambiante dans un dessiccateur.



Figure 3.4 : Confection des éprouvettes

### 3.3.3. Détermination de la résistance à la flexion

Afin d'effectuer des essais de flexion sur le matériau composite plâtre/MCP, des éprouvettes prismatiques de dimension (160 mm x 40 mm x 40 mm) sont préparées, à raison de trois éprouvettes pour chaque composition (figure 3.5). Une fois atteint le degré de solidité adéquat, des marques d'identification sont appliquées sur les prismes. Les éprouvettes sont conservées pendant 7 jours en atmosphère normale.

L'appareil de flexion (CONTROLS) de laboratoire du Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) a été utilisé pour mesurer la résistance à la flexion des mortiers. L'essai de flexion est réalisé selon la norme NA 5073 (plâtre et enduit à base de plâtre pour le bâtiment, méthode d'essai) [61]. Cet essai sert à déterminer la force requise pour briser un prisme de plâtre mesurant 160 mm x 40 mm x 40 mm, reposant sur des rouleaux support distants de 100 mm.



Figure 3.5 : Appareil de flexion (CONTROLS)



Figure 3.6 : Prismes de plâtre (160 mm x 40 mm x 40 mm)

#### 3.3.4. Détermination de la résistance à la compression

La résistance à la compression des différentes compositions est mesurée par l'appareil de compression (CONTROLS) de laboratoire du CNERIB (figure 3.7). L'essai de compression a été effectué, selon la norme NA 5073 [61], sur des éprouvettes de dimension (160 mm x 40 mm x 40 mm) à 7 jours d'âge. La résistance à la compression a été déterminée en appliquant une charge, jusqu'à la rupture, sur la partie brisée du prisme qui a été utilisé pour déterminer la résistance à la flexion.



Figure 3.7 : Appareil de compression (CONTROLS)

### 3.3.5 Détermination de la résistance d'adhésion

#### 3.3.5.1. Appareillage

Les principaux appareils qui peuvent être utilisés pour réaliser l'essai d'adhésion sont donnés ci-après.

- plaques métalliques de 50 mm de diamètre et d'au moins 10 mm d'épaisseur, équipées d'un point d'attache centrale destiné aux essais d'adhésion (figure 3.8),
- Adhésifs à base de résine,
- Découpeur de noyau destiné au prélèvement d'échantillons de 50 mm de diamètre,
- Dispositif de traction permettant d'appliquer une force de traction sur les plaques métalliques sans que l'ensemble soit soumis à une contrainte de flexion.



Figure 3.8 Échantillons pour faire l'essai d'adhésion

L'essai d'adhésion est assuré par l'appareil d'adhésion (SEDITECH) du laboratoire du CNERIB conformément à la norme NA 5073 [61]. L'essai consiste à déterminer l'adhésion du mortier à un support spécifique comme étant la charge maximale supportée lorsqu'un disque métallique fixé sur le mortier est arraché de la surface.

La force d'arrachement est exercée perpendiculairement à la surface d'essai, à l'aide de l'appareil d'adhésion. Cet appareil permet d'appliquer une force de traction sur les plaques métalliques, de 50 mm de diamètre et dotées d'un point d'attache centrale destiné aux essais de traction, sans que l'ensemble soit soumis à une contrainte de flexion. L'indicateur doit permettre la lecture de la force d'essai appliquée, avec une précision de mesurage égale à  $\pm 5\%$  de la charge maximale enregistrée.

Dans ce travail, l'essai a été effectué sur un support en brique creuse de terre cuite (25 cm x 20cm x10 cm). 3 points d'arrachement ont été utilisés pour chaque composition. La charge est appliquée à une vitesse uniforme comprise dans une plage allant de 0,003 N/mm<sup>2</sup>.s à 0,1 N/mm<sup>2</sup>.s. La figure 3.9 montre le dispositif utilisé pour l'essai d'adhésion.



Figure 3.9 : Appareil d'adhésion (SEDITECH)

### 3.3.6. Essai de dureté

La dureté des différentes compositions est mesurée par l'appareil Duromètre (Shore C) conformément à la norme ISO 3051 [62]. Cet appareil de dureté possède un accessoire de mesure avec une tête de mesure et une échelle d'une précision de lecture de 0,5 unité de dureté.

Dans ce travail, 6 mesures ont été effectuées pour chaque enduit (plâtre/MCP) à l'état sec, l'enduit en plâtre est considéré sec lorsque son taux d'humidité est inférieur à 1% (DTR E 6.2.1) [63].

### 3.3.7. Mesures des propriétés thermiques ( $\lambda$ et $c_p$ )

Les mesures de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique du matériau composite sont effectuées à l'aide d'un appareil appelé CT-METRE, à une température de l'ambiance fixée à 18 °C. Les essais effectués avec le CT-METRE se font selon le principe du fil chaud conformément à la norme ISO 8894 [64]. Ceci consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans la même sonde), à déterminer les propriétés thermiques des matériaux en mesurant l'élévation des températures subies par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisée.



Figure 3.10 : Appareil CT-METRE

Le CT METRE est composé principalement de deux éléments à savoir, l'organe de commande qui est chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester ainsi que, la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite.

Trois éprouvettes de dimension (200 mm x 150 mm x 50 mm) ont été préparées pour chaque composition. Les éprouvettes ont été séchées dans une étuve à 50 °C puis, ont été pesées chaque une heure jusqu'à ce que la perte de poids soit inférieure à 1%. Ensuite, les surfaces des échantillons ont été polies pour réaliser des surfaces douces afin de maintenir un bon contact entre la sonde du CT-METRE et les éprouvettes à tester.



Figure 3.11 : Trois éprouvettes de dimension (200 mm x 150 mm x 50 mm)

#### 3.4. Résultats des essais au laboratoire

La figure 3.12 représente l'évolution de la résistance à la flexion du matériau composite en fonction de sa composition en MCP. Les résultats ont montré que la résistance du plâtre pur (composition 1) est meilleure que celles des autres compositions plâtre/MCP (compositions 2,3,4,5 et 6). Cette figure a permis de constater que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du pourcentage de matériau à changement de phase (MCP) dans le matériau composite plâtre/MCP. A partir de la composition 5, 60 % plâtre / 40 % matériau MCP, la résistance à la flexion du mortier devient faible, elle est inférieure à la valeur de référence exigé par la norme NF EN 13279-1 qui est 1 N/mm<sup>2</sup> [65]. Ces résultats sont en accord avec les résultats du travail de Dehdezi P.K et al [57] qui ont analysé les propriétés mécaniques et thermiques d'un béton contenant des matériaux à changement de phase en microcapsules, Les résultats montrent que

l'augmentation de dosage en MCP réduit de manière significative la résistance à la flexion du béton. La réduction de la résistance à la flexion est de 14%, 17%, 37% et 45% pour des pourcentage de MCP respectivement 0,5% , 1% , 3% et 5% .

La figure 3.13 illustre les résultats des essais de compression effectués sur les différentes compositions. Les résultats montrent que l'incorporation du matériau MCP dans le mortier en plâtre engendre une diminution de la résistance à la compression. La réduction de la résistance à la compression est de 44 %, 60 %, 77 %, 86 % et 89% pour des pourcentage de MCP respectivement 10 % , 20% , 30%, 40% et 50% .

La résistance à la compression des compositions 5 et 6, respectivement 60 % plâtre / 40 % MCP et 50 % plâtre / 50 % MCP, présente des valeurs très faibles (inférieures à 1,5 N/mm<sup>2</sup>).

Ces résultats sont en accord avec les résultats du travail de Dehdezi P.K et Zhengguo Zhang. Dehdezi P.K et al ont prouvé que l'augmentation de dosage en MCP réduit la résistance à la compression de 25%, 45%, 70% et 80% pour des pourcentage de MCP respectivement 0,5% , 1% , 3% et 5% . Zhengguo Zhang et al [58] ont montré que l'augmentation du pourcentage des MCP de 0 à 2,5% dans un mortier en ciment provoque une diminution de sa résistance à la compression.

La diminution de la résistance à la flexion et la résistance à la compression du matériau composite est le résultat de la faiblesse de la matrice qui se produit lorsque la quantité de la paraffine encapsulée dans le mélange est augmentée (c-à-dire lorsque la quantité de plâtre dans le mélange est diminuée).

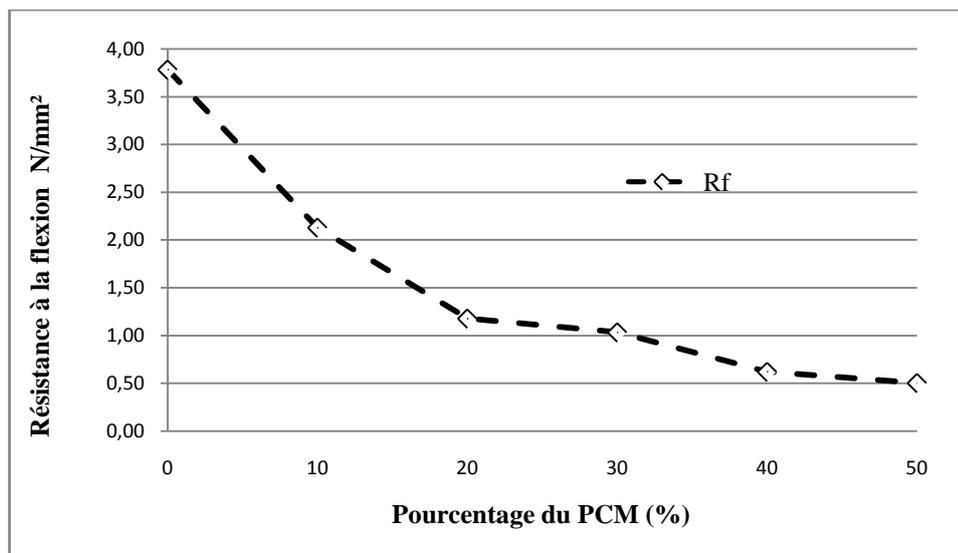


Figure 3.12 : Évolution de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de MCP

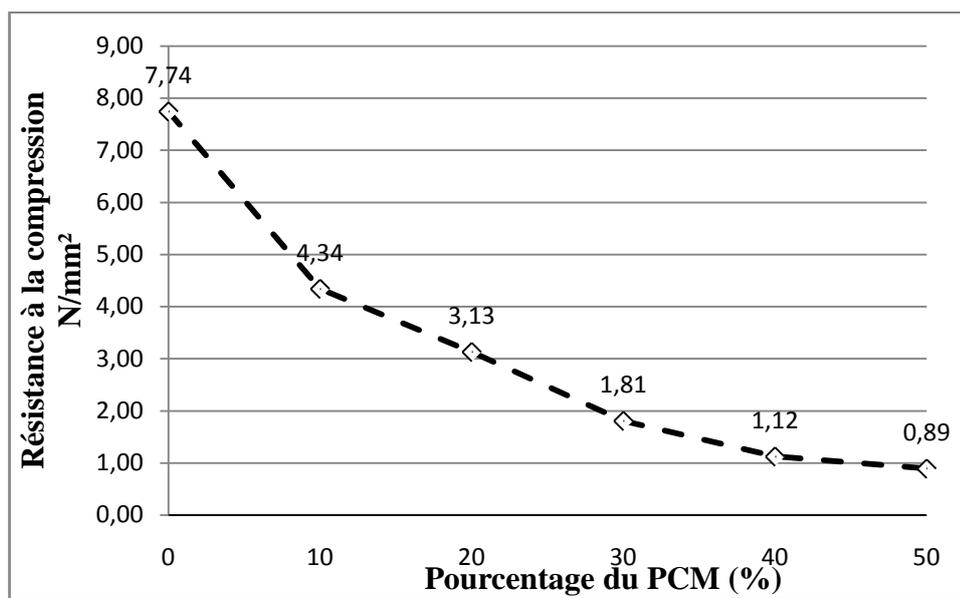


Figure 3.13 : Évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de MCP

Tableau 3.4 : Résistance à la flexion

<b>Compositions</b>	<b>Résistance à la flexion (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>≥ 1 N/mm<sup>2</sup></b>
<b>1</b>	3,78	Ok
<b>2</b>	2,13	Ok
<b>3</b>	1,18	Ok
<b>4</b>	1,03	Ok
<b>5</b>	0,62	No
<b>6</b>	0,50	No

Tableau 3.5 : Résistance à la compression

<b>Compositions</b>	<b>Résistance à la compression (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>≥ 2 N/mm<sup>2</sup></b>
<b>1</b>	7,74	Ok
<b>2</b>	4,34	Ok
<b>3</b>	3,13	Ok
<b>4</b>	1,81	No
<b>5</b>	1,12	No
<b>6</b>	0,89	No

L'évolution de la résistance d'adhésion en fonction de la composition en MCP du matériau composite correspondant aux échantillons à 7 jours est reportée sur la figure 3.14. Il a été observé que la résistance à l'adhésion diminue avec l'augmentation de la quantité de MCP. Ceci est dû à la liaison médiocre entre le support en brique creuse de terre cuite et les particules de MCP encapsulés en polymère. Donc l'adhésion est devenue très faible entre le matériau composite et le support en terre cuite. Il est à noter une forte diminution de la résistance d'adhésion lorsque le pourcentage de MCP passe de 30 à 40% jusqu'à des valeurs inférieures à 0,1 N/mm<sup>2</sup>. Rappelons que pour éviter la rupture entre l'enduit et le support, la résistance d'adhésion du matériau composite doit être supérieure à 0,1 N/mm<sup>2</sup> (NF EN 13279-1) [65].

Les résultats de mesures effectuées par le Duromètre (Shore C) sur les différentes compositions sont présentés par la figure 3.15. Les résultats montrent que la dureté du matériau composite diminue avec l'intégration des matériaux MCP. Il a été constaté que la dureté du plâtre pur atteint les 69,17 Shore, elle est meilleure que celles des autres compositions qui incorporent des MCP. La dureté diminue lentement jusqu'à 40,5 Shore qui correspond à la composition 4 (30 % de matériau MCP). Les compositions 5 et 6 présentent un matériau très fragile avec des duretés très faibles, respectivement 19 et 10 Shore.

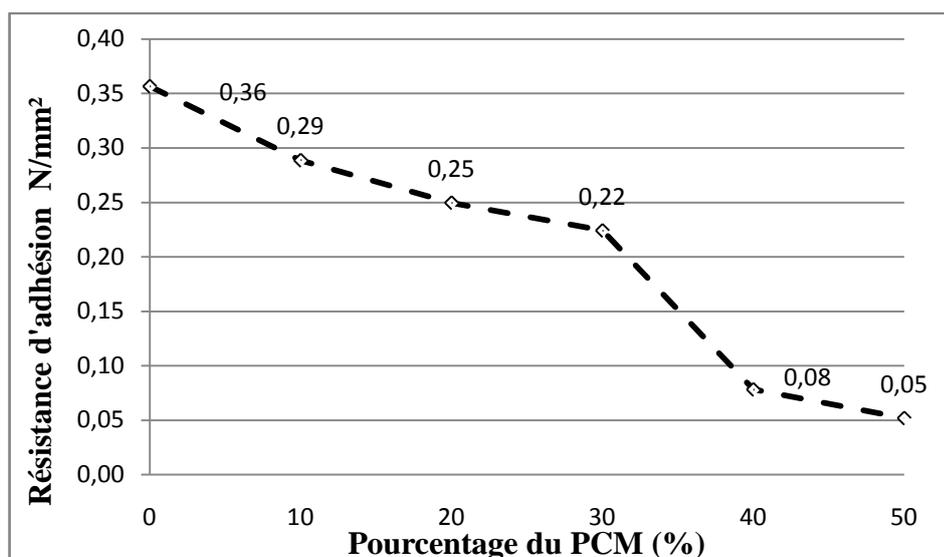


Figure 3.14 : Évolution de la résistance d'adhésion en fonction du pourcentage de MCP

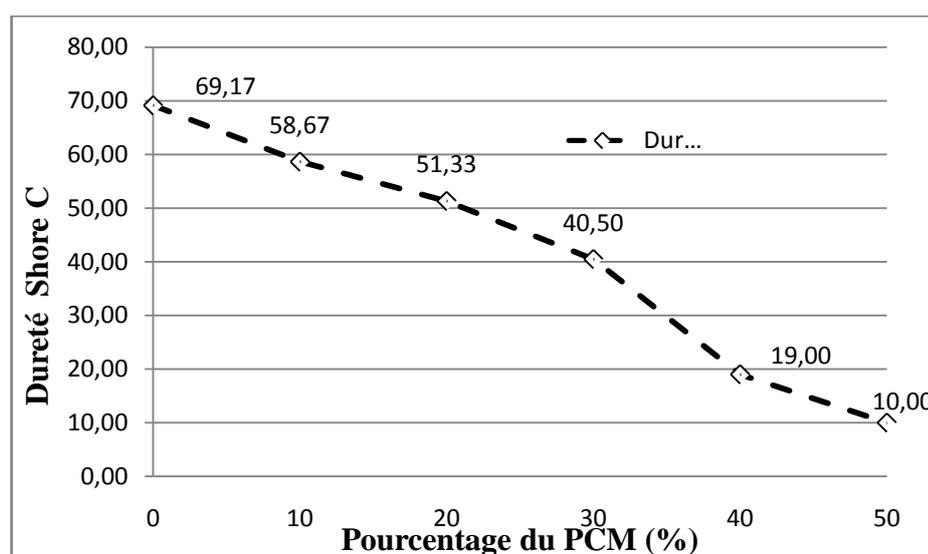


Figure 3.15 : Évolution de la dureté en fonction du pourcentage de MCP

Tableau 3.6 : Résistance d'adhésion

<b>Compositions</b>	<b>Résistance d'adhésion (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>≥ 0,1 N/mm<sup>2</sup></b>
<b>1</b>	0,36	Ok
<b>2</b>	0,29	Ok
<b>3</b>	0,25	Ok
<b>4</b>	0,22	Ok
<b>5</b>	0,08	No
<b>6</b>	0,05	No

Tableau 3.7 : Dureté

<b>Compositions</b>	<b>Dureté (Shore C)</b>	<b>≥ 40 Shore C</b>
<b>1</b>	69,17	Ok
<b>2</b>	58,67	Ok
<b>3</b>	51,33	Ok
<b>4</b>	40,50	Ok
<b>5</b>	19,00	No
<b>6</b>	10,00	No

Les essais thermiques ont été effectués sur les différentes compositions à 7 jours d'âge à une température de l'ambiance fixée à 18 °C. La figure 3.16 montre l'évolution de la conductivité thermique pour différents pourcentages de matériau à changement de phase. La conductivité thermique du plâtre pur est 0,4 W/m.°C, elle est inférieure à celles des autres compositions qui intègrent les matériaux MCP. Ces résultats ont permis de constater que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation du pourcentage de matériau MCP dans le matériau composite plâtre/ MCP, elle atteint 1,11 W/m.°C pour 50 % de matériau MCP. Cela explique que le niveau d'isolation du plâtre est meilleur que celui des matériaux MCP.

La figure 3.17 illustre la variation de la chaleur spécifique en fonction du pourcentage de MCP dans le matériau composite. Ces résultats montrent clairement que l'incorporation des matériaux MCP engendre une augmentation remarquable de la capacité thermique du matériau composite, ceci est dû à l'effet de la grande capacité thermique que possèdent les paraffines encapsulées. Il a été constaté aussi que la chaleur spécifique du mélange plâtre/ MCP augmente lentement pour les compositions 1, 2 et 3. Par contre, à partir de la composition 4 qui intègre 30 % de matériau MCP, l'augmentation de la chaleur spécifique devient rapide, elle atteint 3108 J/kg.°C pour 50 % de matériau MCP.

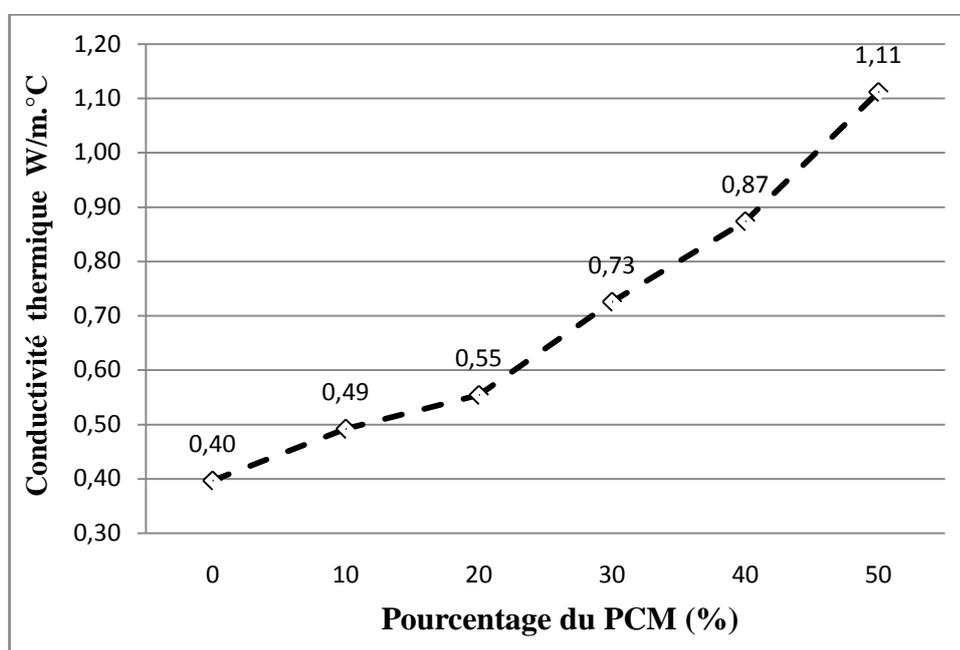


Figure 3.16 : Évolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de MCP

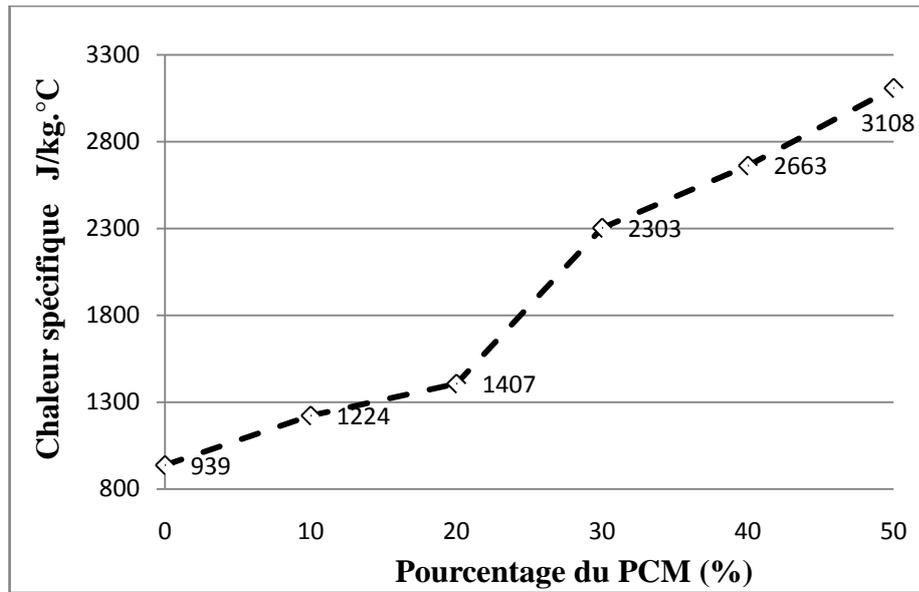


Figure 3.17 : Évolution de la chaleur spécifique en fonction du pourcentage de MCP

### 3.5. Conclusion

Une analyse expérimentale du comportement thermique et mécanique de matériaux composites plâtre/MCP a été réalisée. Il a été mis en évidence que l'augmentation de la concentration de MCP dans un matériau composite plâtre/MCP engendre une diminution de ses propriétés mécaniques. Les résultats expérimentaux montrent que la formulation (30 % de MCP et de 70% de plâtre) est la composition optimale pour laquelle le matériau composite possède une chaleur spécifique et des propriétés mécaniques bien adaptées à l'utilisation de ce matériau dans le bâtiment.

## CHAPITRE 4

### COMPORTEMENT THERMIQUE DES CELLULES À PAROIS INCORPORANT UN MATÉRIAU À CHANGEMENT DE PHASE

#### 4.1. Introduction

Ce chapitre présente une investigation expérimentale sur une nouvelle utilisation des matériaux à changement de phase comme enduit avec des parois en béton et en briques creuses pour étudier l'influence de l'intégration des MCP sur le comportement thermique des cellules et sur l'amélioration du confort thermique sous le climat algérien. Le matériau à changement de phase utilisé est une paraffine encapsulée sous forme de poudre, deux types de MCP ont été utilisés (le DS 5001 avec une température de fusion de 26°C et le DS 5008 avec une température de fusion de 23°C). Des mesures in-situ ont été réalisées pour déterminer la température de l'air et des parois de trois cellules ; l'une construite avec des matériaux classiques et les deux autres avec un matériau composite plâtre/MCP. Les cellules sont implantées dans la région d'Alger.

#### 4.2. Description des cellules

Afin d'étudier l'influence des matériaux à changement de phase sur l'efficacité énergétique des bâtiments en Algérie, trois cellules de 1 mètre cube ont été réalisées de la même manière sauf que le mortier intérieur est différent. Ces cellules sont implantées dans la région d'Alger, plus précisément dans le village de Souidania (figure 4.1). Cette région fait partie de la zone climatique A (Latitude 36,70 N, Longitude 3,20 E) qui est caractérisée par un hiver frais et un été chaud et humide.



Figure 4.1 : Trois cellules de test

#### 4.2.1. La cellule de référence C1

La première cellule constitue un élément de référence. Il s'agit d'une conception classique en Algérie. Les planchers sont réalisés en béton armé et les murs sont construits en une seule paroi en briques creuses. Le plancher haut et les murs sont enduits à la face intérieure en plâtre pur. Une fenêtre en PVC double vitrage (60 cm x 60 cm) est installée dans le côté sud de la cellule.



Figure 4.2 : Cellule en construction

##### 4.2.1.1 Plancher haut

Le plancher haut de la cellule est réalisé d'une couche de 5 cm de béton armé, La composition du béton est la suivante : 1 volume de sable, 2 volumes de gravier et 1 volume de ciment. La composition du plancher haut de la cellule de référence est illustrée par la figure 4.3.

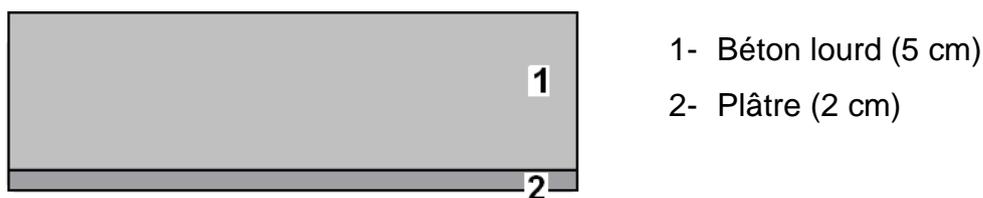


Figure 4.3 : Plancher haut de la cellule C1

#### 4.2.1.2. Mur extérieur

Les murs sont réalisés en une seule paroi en briques creuses (épaisseur 10 cm) enduites à la face extérieure en mortier de ciment et à la face intérieure en enduit plâtre. Les briques sont montés au mortier de ciment, la composition du mortier de montage est la suivante : 2 volumes de sable pour 1 volume de ciment. La figure ci-dessous, donne la description schématique du mur.

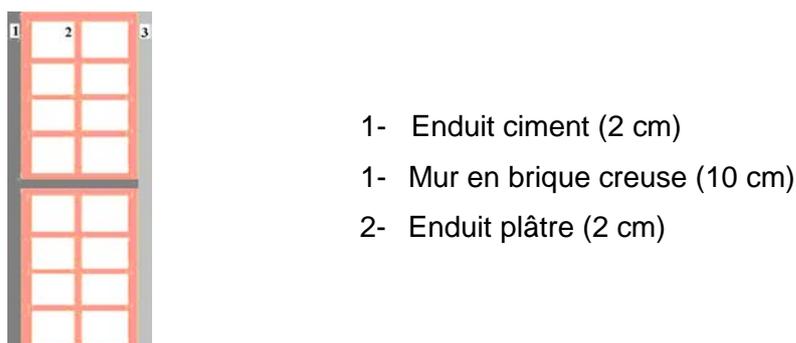


Figure 4.4 : Mur de la cellule C1

#### 4.2.1.3 Plancher bas

Le plancher bas est une dalle de béton de 5 cm d'épaisseur, la composition du béton est la suivante: 1 volume de sable, 2 volumes de gravier et 1 volume de ciment. Le gâchage a été réalisé à l'aide d'une bétonnière afin de garantir une bonne homogénéité.

La composition de plancher bas est présentée dans le schéma ci-dessous.

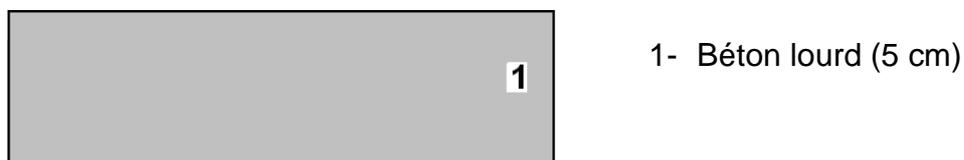


Figure 4.5 : Plancher bas de la cellule C1

Le tableau suivant donne les détails de compositions et les caractéristiques thermiques des différents matériaux utilisés dans les éléments de la cellule 1.

Tableau 4.1 : Caractéristiques thermiques des différentes parois de la cellule 1

	<b>Composition</b>	<b>Epaisseur (m)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\lambda</math> (W/m.K)</b>	<b>C (J/kg.°C)</b>
<b>Plancher haut</b>	Béton lourd	0,05	2200	1,75	1080
	Enduit plâtre	0,02	1000	0,35	936
<b>Mur extérieur</b>	Mortier de ciment	0,02	2200	1,4	1080
	Brique	0,10	900	0,48	936
	Brique	0,02	1000	0,35	936
	Enduit plâtre				
<b>Plancher bas</b>	Béton lourd	0,10	1,75	0,13	0,34

#### 4.2.2. La cellule C2

Afin d'augmenter l'inertie thermique des parois, 30 % d'un matériau à changement de phase (MCP), sous forme de poudre, a été introduit dans l'enduit plâtre sur cette cellule. Le MCP (DS 5001) a été acheté auprès de la société BASF Algérie. Il s'agit de produits de type paraffine encapsulés (Figure 4.6). La distribution de la taille des capsules se trouve dans l'intervalle 5-40 microns. La température de changement de phase du produit utilisé pour la cellule C2 est 26°C.

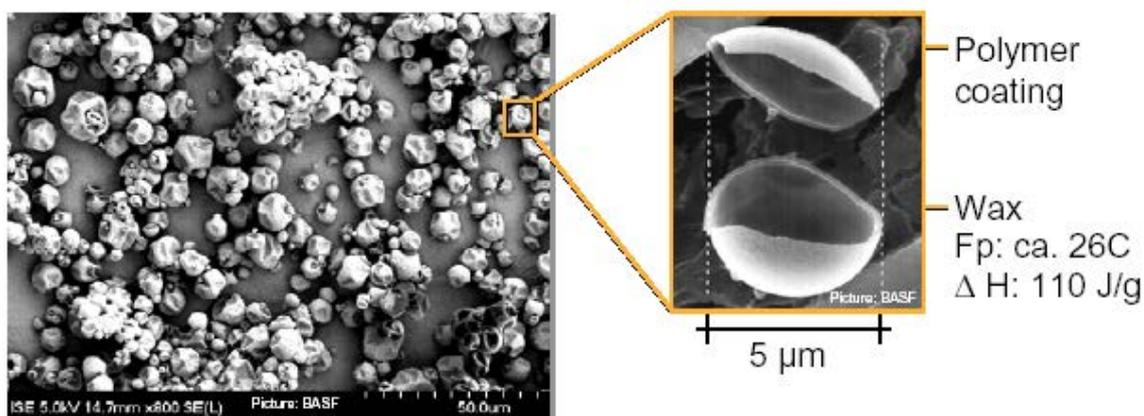


Figure 4.6 : Paraffine encapsulé

Le tableau suivant donne les détails de compositions et les caractéristiques thermiques des différents matériaux utilisés dans les éléments de la cellule 2.

Tableau 4.2 : Caractéristiques thermiques des différentes parois de la cellule 2

	<b>Composition</b>	<b>Epaisseur (m)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\lambda</math> (W/m.K)</b>	<b>C (J/kg.°C)</b>
<b>Plancher haut</b>	Béton lourd	0,05	2200	1,75	1080
	Enduit (70 % plâtre / 30 % MCP Ds5001)	0,02	1000	–	–
<b>Mur extérieur</b>	Mortier de ciment	0,02	2200	1,4	1080
	Brique	0,10	900	0,48	936
	Enduit (70 % plâtre / 30 % MCP Ds5001)	0,02	1000	–	–
<b>Plancher bas</b>	Béton lourd	0,10	2200	1,75	1080

#### 4.2.3. La cellule C3

Pour la cellule C3, le plancher haut et les murs sont enduits à la face intérieure par un enduit composé de 70 % plâtre et 30 % matériau à changement de phase (MCP, DS 5008). La température de changement de phase du produit utilisé pour la cellule C3 est 23 °C. Le tableau 4.3 donne les détails de compositions et les caractéristiques thermiques des différents matériaux utilisés dans les éléments de la cellule 3.

Tableau 4.3 : Caractéristiques thermiques des différentes parois de la cellule 3

	<b>Composition</b>	<b>Epaisseur (m)</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\lambda</math> (W/m.K)</b>	<b>C (J/kg.°C)</b>
<b>Plancher haut</b>	Béton lourd	0,05	2200	1,75	1080
	Enduit (70 % plâtre / 30 % MCP Ds5008)	0,02	1000	–	–
<b>Mur extérieur</b>	Mortier de ciment	0,02	2200	1,4	1080
	Brique	0,10	900	0,48	936
	Enduit (70 % plâtre / 30 % MCP Ds 5008)	0,02	1000	–	–
<b>Plancher bas</b>	Béton lourd	0,10	2200	1,75	1080

#### 4.3. Description du système d'acquisition

Le système d'acquisition permet l'enregistrement des températures intérieures et extérieures pour étudier le comportement thermique des cellules réalisées avec des parois incorporant des matériaux à changement de phase. Ce système d'acquisition doit être à la fois fiable pour assurer une collecte de données continue, précis pour assurer la qualité de ces données, flexible pour permettre la modification des variables mesurées advenant des changements au cours du projet et simple pour en faciliter la compréhension.

L'ensemble des mesures vise à évaluer la température de l'air et la température des parois à l'intérieur des cellules ainsi que la température de l'ambiance extérieur et le rayonnement solaire. Ces grandeurs physiques sont mesurées chaque demi-heure.

La figure 4.7 illustre le schéma du système d'acquisition utilisé pour étudier le comportement thermique des cellules.

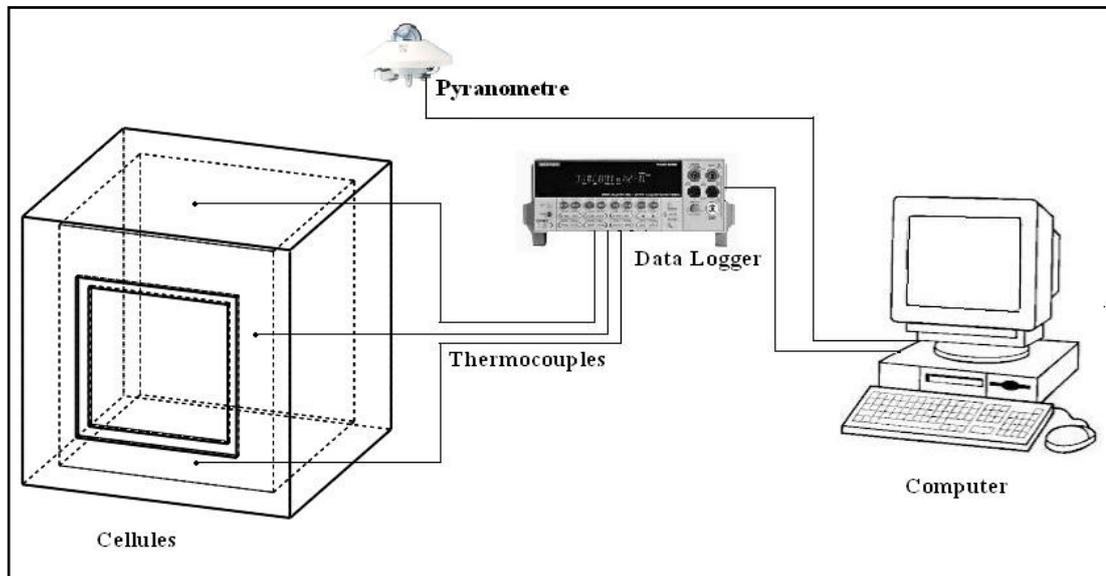


Figure 4.7 : Schéma du système d'acquisition

#### 4.3.1. Mesure des températures

##### 4.3.1.1. Système d'acquisition

Les mesures des différents points de température sont assurées par l'appareil KEITHLEY 2700 (voir figure 4.8) est un système d'acquisition de données à 40 voies de mesure. Ces mesures sont enregistrées toutes les demi-heures, les thermocouples sont installés sur la partie arrière de l'appareil KEITHLEY [66].



Figure 4.8 : Système d'acquisition KEITHLEY 2700 (40 voies de mesures)

#### 4.3.1.2 Thermocouples

La plage de températures mesurées dans notre travail est de  $-10\text{ °C}$  à  $45\text{ °C}$ , le thermocouple de type T (Constantan - cuivre) présenté ci-dessous est le type le plus approprié pour cette utilisation, car celui-ci est particulièrement adapté pour une utilisation à basse température ( $-200$  à  $350\text{ °C}$ ).

La température des faces internes des parois est mesurée par des thermocouples de type T qui sont collés sur les surfaces des parois avec du plâtre.

#### 4.3.1.3 Disposition des thermocouples dans les cellules

Afin d'étudier le comportement thermique des cellules à parois incorporant des matériaux à changement de phase, huit thermocouples de type T sont installés à l'intérieur des cellules pour mesurer la température de l'air et des parois. Un thermocouple est installé à l'extérieur pour déterminer la température de l'ambiance extérieure. Le tableau 9 spécifie les paramètres à mesurer ainsi que la localisation de chaque thermocouple.

Tableau 4.4 : Disposition des thermocouples

Numéro de Thermocouple et thermo-hygromètre	mesure	zone
Thermocouple (T1)	Température du plafond	Cellule 1
Thermocouple (T2)	Température du mur	
Thermo-hygromètre(Thy1)	Température et humidité de l'air	
Thermocouple (T3)	Température du plafond	Cellule 2
Thermocouple (T4)	Température du mur	
Thermo-hygromètre (Thy2)	Température et humidité de l'air	
Thermocouple (T5)	Température du plafond	Cellule 3
Thermocouple (T6)	Température du mur	
Thermo-hygromètre (Thy3)	Température et humidité de l'air	
Thermocouple (Tex)	Température de l'air à l'extérieur	Extérieur
Anémomètre	Vitesse et direction de vent	
Pluviomètre	pluviométrie	
Thermo-hygromètre	Température et humidité de l'air à l'extérieur	
Pyranomètre	Rayonnement solaire	

#### 4.3.1.4 Mesure de la température de l'air des cellules

Les mesures de la température de l'air sont effectuées à l'aide du thermo-hygromètres enregistreur TESTO 175-H1 disposés à l'intérieur des cellules [67]. La localisation des thermo-hygromètres est présentée dans le tableau 9.



Figure 4.9 : Mesure de la température de l'air

#### 4.3.2. Mesure des conditions météorologiques

Une mini station météo sans fil WMR918 a été installée au centre du CNERIB, plus précisément dans le village de Souidania (la région d'Alger). La mini station est installée à une hauteur de 7 mètres du sol. Celle-ci est un système qui permet de mesurer les paramètres climatiques suivants [68]:

- Température de l'air ;
- Humidité relative ;
- Pression atmosphérique ;
- Vitesse et direction du vent ;
- Niveaux de précipitation.



Figure 4.10 : Mini station météorologique (WMR918)

#### 4.3.2.1. Unité principale

L'unité principale porte un écran d'affichage, cet appareil reçoit et affiche les données issues des capteurs [68]. L'unité principale peut être posée à plat sur un bureau, sur un meuble ou être suspendue au mur au moyen de ses deux oeillets d'accroche murale.

L'appareil s'alimente sur secteur mais possède des piles de sauvegarde. En cas de coupure de courant ou de déplacement de celui-ci vers une autre prise de courant, les données mémorisées sont ainsi préservées.



Figure 4.11 : Unité principale

#### 4.3.2.2. Baro-thermo-hygromètre

La température et l'humidité intérieure sont mesurées par le baro-thermo-hygromètre BTHR918 (voir figure 4.12) [68]. Ce capteur mesure en outre la pression atmosphérique et donne les prévisions météo. Ces informations sont affichées sur le capteur lui-même qui possède son propre écran LCD et qui sont transmises toutes les 38 secondes à l'unité principale qui les affiche à son tour.



Figure 4.12 : Baro-thermo-hygromètre

#### 4.3.2.3 Les transmetteurs/panneaux solaires

Les transmetteurs STR918 sont à la fois des transmetteurs radio et des panneaux solaires [68]. L'énergie reçue du soleil sert à alimenter le système de transmission et les capteurs associés. Dans chaque transmetteur sont placées 2 piles au lithium UM3 ou AA/R6 à titre d'alimentation de soutien.

Pour que les transmetteurs fonctionnent de manière optimale, il faudra veiller à les exposer correctement aux rayons du soleil, en les tournant vers le sud et en évitant les ombres portées. On pourra régler l'inclinaison du panneau solaire pour bénéficier du maximum d'énergie en fonction de la saison.

#### 4.3.2.4 Thermo-hygromètre d'exterieur

Ce capteur relève les conditions extérieures de température et d'humidité relative. Il est étanche au ruissellement. Les mesures effectuées par le THGR918 servent aussi à calculer la température du point de rosée [68].

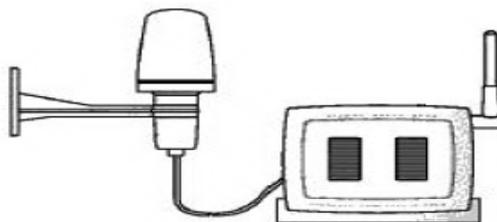


Figure 4.13 : Thermo-hygromètre

#### 4.3.2.4 Mesure radiation solaire

La mesure de rayonnement solaire direct est effectuée à l'aide d'un pyranomètre (CM3 KIPP&ZONEN), (voir figure 4.14). Le capteur est relié à un enregistreur et à un système d'acquisition CC 48 DATALOGGER KIPP&ZONEN (voir figure 4.15).



Figure 4.14 : Pyranomètre



Figure 4.15 : Système d'acquisition du Pyranomètre CC 48 KIPP&ZONEN

#### 4.4. Résultats des mesures thermiques in situ

##### 4.4.1 Rayonnement solaire

La figure (4.16) représente le profil du rayonnement solaire direct sur une surface horizontale dans la période du 05 au 09 Septembre 2012. Les résultats montrent que la valeur maximale à atteindre du rayonnement solaire est 800  $W/m^2$ . Le rayonnement des trois premières journées est instable à cause des perturbations du climat durant la journée.

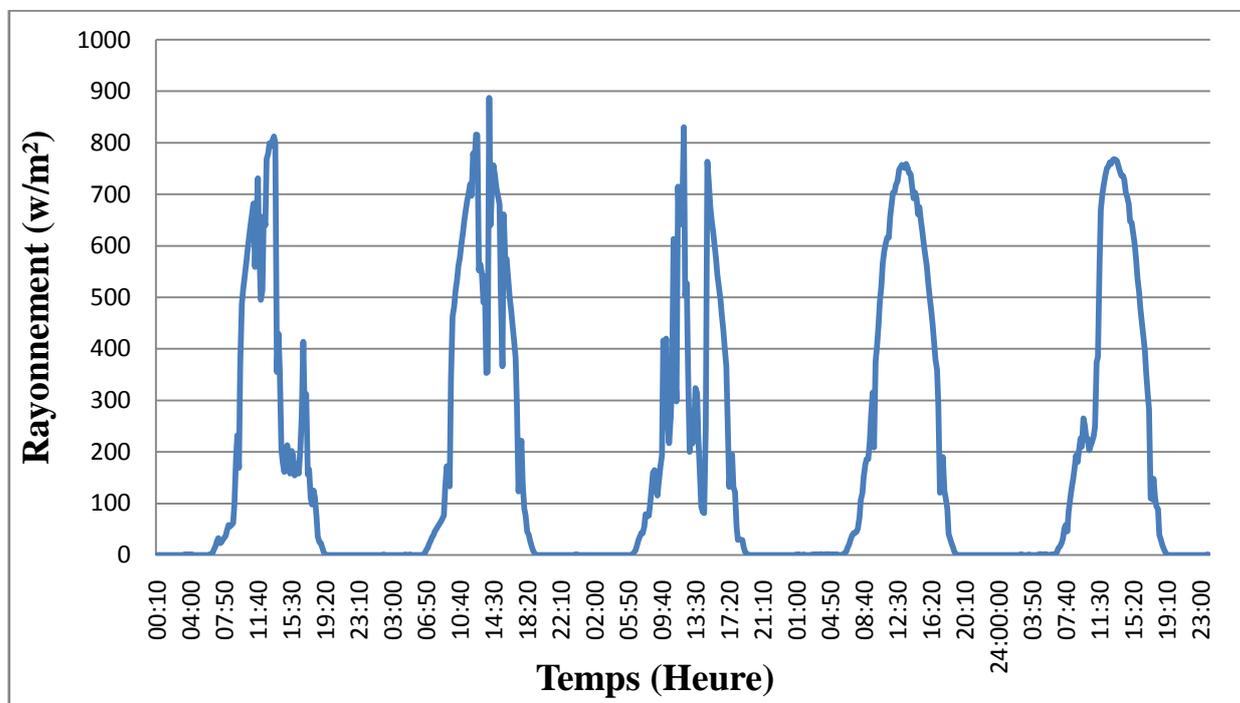


Figure 4.16 : Evolution au cours du temps de la densité du flux solaire (5-9 Septembre 2012)

#### 4.4.2 Évolution de la température ambiante en été

La figure 4.17 illustre l'évolution au cours du temps des températures de l'air extérieur et celle de l'air à l'intérieur (cellule C1 sans MCP, cellule C2 avec MCP (26°C) et cellule C3 avec MCP (23°C)). Les résultats montrent que pendant la journée, la température maximale de l'ambiance intérieure de la cellule C2 et de la cellule C3 avec MCP atteint les 32,5 °C alors que celle de la cellule C1 sans MCP dépasse les 35 °C. La chaleur absorbée par le MCP durant son changement de phase a engendré une lente augmentation de la température de l'air de la cellule C2 et C3 par rapport à celle de la cellule C1.

Pendant la nuit, la température de la cellule C2 et C3 avec MCP s'abaisse à 22 °C, alors que celle de la cellule C1 sans MCP diminue jusqu'à 21 °C. Il est remarqué que le refroidissement des cellules C2 et C3 durant la restitution de la chaleur par le MCP est moins rapide que celui de la cellule C1.

L'amplitude de la variation de la température de l'air de la cellule C2 et celle de la cellule C3 est presque la même, la température des deux cellules varie entre 22 et 32 °C.

Les résultats montrent également que la présence de 30 % de matériau MCP avec le plâtre permet de réduire l'amplitude (diurne/nocturne) de la température de l'air de 4 °C.

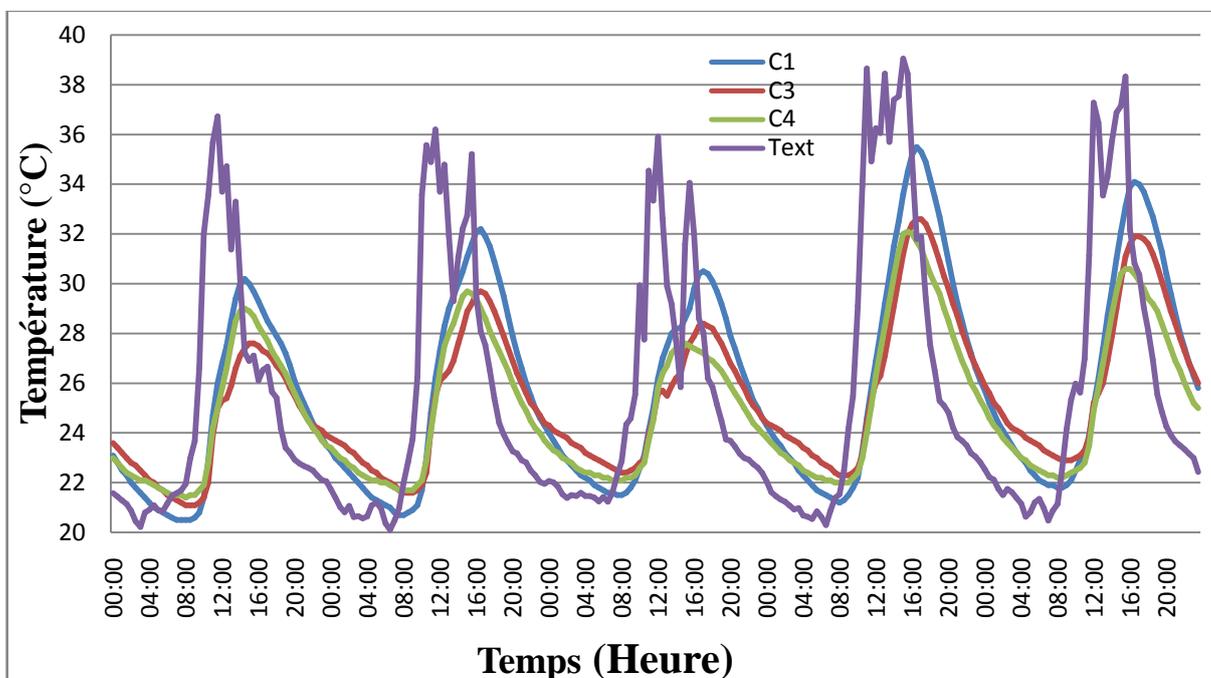


Figure 4.17 : Évolution au cours du temps de la température ambiante (5-9 Septembre 2012)

#### 4.4.3 Évolution de la température de la paroi en été

La figure 4.18 présente l'évolution au cours du temps de la température de la paroi de la cellule C1 sans MCP et celle des parois des cellules C2 et C3 avec MCP pour la période du 05 au 09/09/2013. L'analyse des résultats expérimentaux des trois premières journées, montre que la température de la paroi de la cellule C1 sans MCP varie de 20 à 34 °C avec une amplitude de 14 °C, tandis que la température des parois des cellules C2 et C3 avec MCP est comprise entre 22 et 30 °C avec une amplitude de 8 °C. Dans les deux dernières journées, la température de la paroi de la cellule varie entre 21 et 38 °C avec une amplitude de 17 °C, alors que celle des cellules C2 et C3 est comprise entre 22 et 34 °C avec une amplitude de 12 °C.

Les températures minimales de la paroi de la cellule C2 avec MCP de 26 °C est plus élevée que celles de la cellule C3 avec MCP de 23 °C. La cellule C2 commence à restituer la chaleur avant la cellule C3 car sa température de fusion est supérieure à celle de la cellule C3.

Les résultats ont permis de constater que l'incorporation de matériau MCP comme enduit avec une paroi en brique creuse a permis d'augmenter la capacité du stockage thermique de la paroi et a engendré une réduction de l'amplitude de la température des parois de 6 °C.

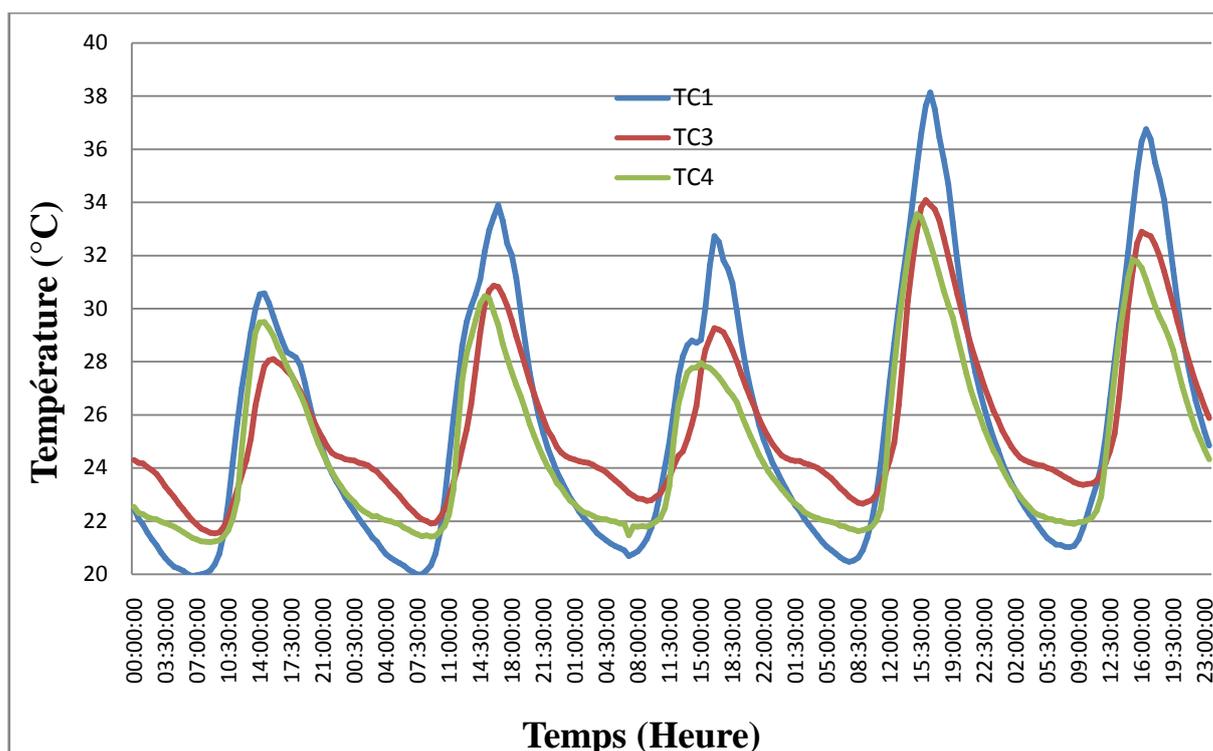


Figure 4.18 : Évolution au cours du temps de la température de paroi (5-9 Septembre 2012)

#### 4.4.4 Évolution de la température de la dalle en été

La figure 4.19 illustre l'évolution de la température de la dalle de la cellule C1 sans MCP et celle de la dalle des cellules C2 et C3 avec MCP. La température de la dalle sans MCP durant les trois premières journées varie de 19 au 36 °C avec une amplitude de 17 °C. Par contre la température de la dalle avec MCP présente une amplitude un peu moindre d'environ 12 °C, variant de 21 au 33°C. Pendant les deux dernières journées, la température de la dalle de la cellule C1 varie entre 20 et 40 °C avec une amplitude de 20 °C, alors que celle des cellules C2 et C3 est comprise entre 21 et 38 °C avec une amplitude de 17 °C.

La réduction de l'amplitude de la température des dalles en béton avec un enduit intégrant des MCP est moins importante que celle des parois réalisées en briques creuses avec un enduit intégrant des MCP. L'utilisation du MCP est plus efficace avec la brique qu'avec le Béton. Le MCP engendre une amélioration de l'inertie thermique de la brique qui possède déjà un bon niveau d'isolation thermique par rapport aux autres matériaux.

Les résultats de ce travail sur l'importance des MCP dans l'amélioration du confort thermique dans un climat méditerranéen viennent compléter les résultats

trouvés par plusieurs travaux de recherches (Cabeza et al (2007) et Entrop et al (2011)).

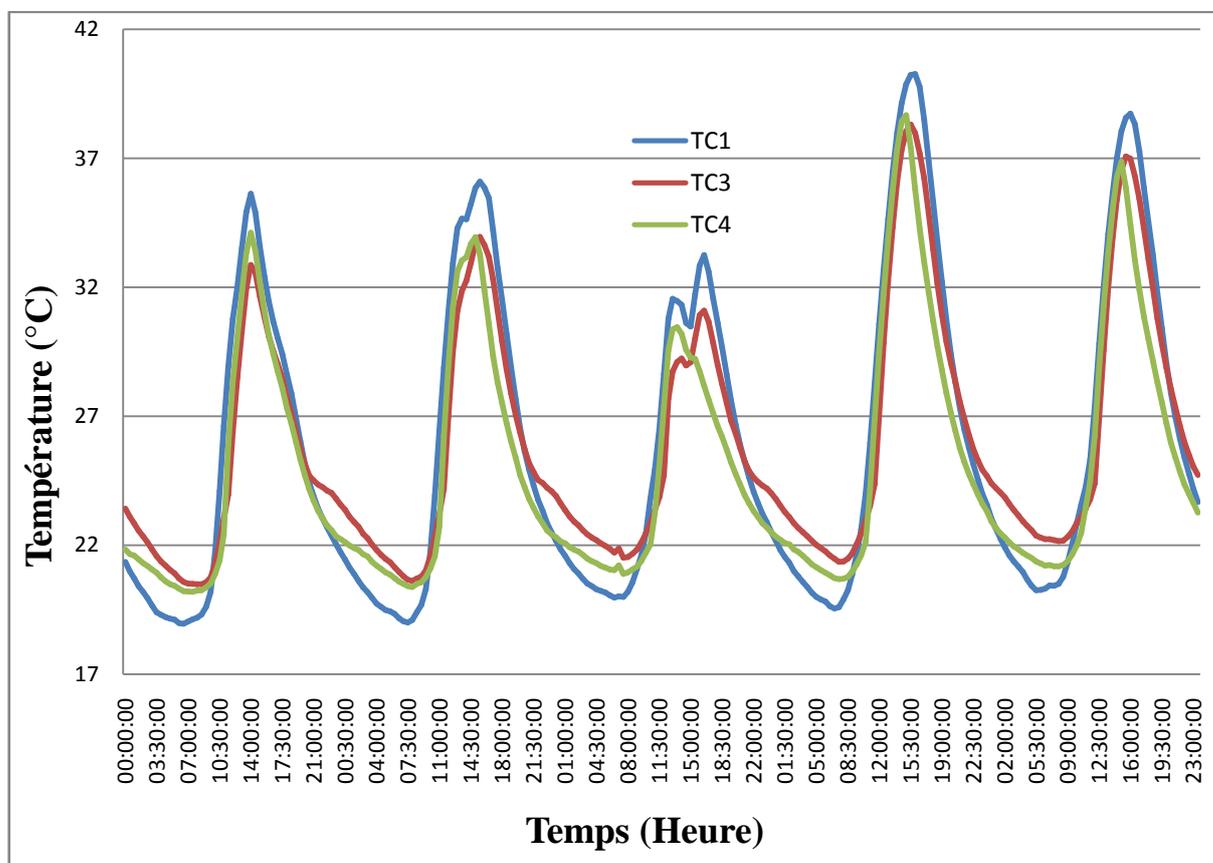


Figure 4.19 : Évolution au cours du temps de la température de dalle (5-9 Septembre 2012)

#### 4.4.5 Évolution de la température ambiante en hiver sans chauffage

La figure 4.20 illustre l'évolution de la température de l'air extérieur et celle de l'air intérieur des cellules ((C1 sans MCP, C2 avec MCP (26 °C) et C3 avec MCP (23 °C)) pour la période du 01 au 06 /01/2013. Les cellules n'ont pas été chauffées. La température extérieure varie la plupart du temps entre 7 et 16 °C.

Les résultats montrent que la température des cellules varie de la même façon, elle est comprise la plupart du temps entre 8 °C et 16 °C. La température de la cellule C1 est légèrement supérieure à celle des cellules C2 et C3 durant les deux premières journées.

L'effet du MCP sur le comportement thermique des cellules C2 et C3 est insignifiant, car la température à l'intérieur de ces cellules n'a pas dépassée la

température de changement de phase des MCP utilisée (MCP 23°C et MCP 26°C).

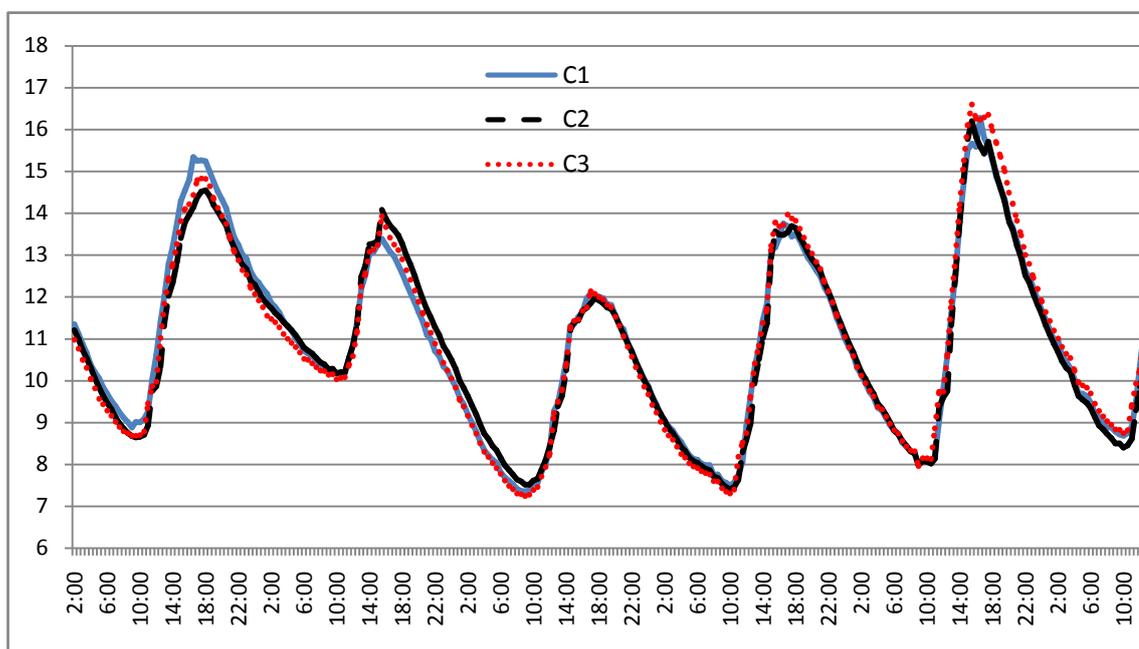


Figure 4.20 : Évolution au cours du temps de la température ambiante sans chauffage (du 01 au 06 Janvier 2013)

#### 4.4.6 Évolution de la température ambiante en hiver avec chauffage

La figure 4.21 illustre l'évolution de la température de l'air extérieur et celle de l'air intérieur des cellules pour la période du 24 au 28/02/2013. Les cellules ont été chauffées par des lampes de 200 W pendant la journée du 9 h à 15 h. Les résultats montrent qu'avec la même puissance de chauffage, la température maximale de l'air des cellules (C2 avec MCP (26 °C) et C3 avec MCP (23 °C)) est plus élevée par rapport à celle de la cellule (C1) sans MCP. Il est constaté que, dans les trois premières journées, le MCP a permis d'améliorer le confort thermique et d'augmenter la température maximale de 2 °C. Dans la dernière journée, la température des cellules augmente et elle se rapproche, elle atteint les 26 °C. Après éteindre le chauffage des cellules, il est remarqué que le refroidissement de la cellule C2 et C3 est moins rapide comparé à celui de la cellule C1, ceci est dû à la restitution de la chaleur par le MCP.

Pendant la nuit sans chauffage, la température des cellules est presque identique, car l'effet de MCP devient négligeable.

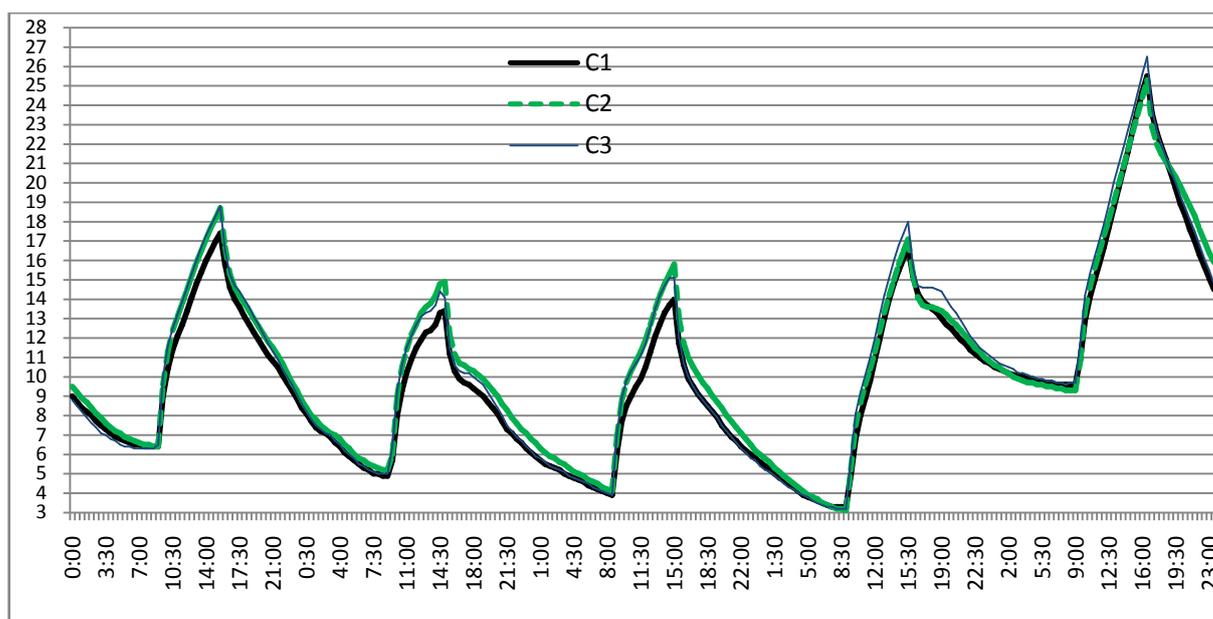


Figure 4.21 : Évolution au cours du temps de la température ambiante avec chauffage (24–28 Février 2013)

#### 4.4.7 Évolution de la température de la paroi en hiver

La figure 4.22 présente l'évolution au cours du temps de la température de la face interne de la paroi de la cellule C1 sans MCP et celle de la paroi des cellules (C2 avec MCP (26 °C) et C3 avec MCP (23 °C)) pour la période du 24 au 28/02/2013. Les résultats montrent que le chauffage des cellules avec une puissance de 200 W a engendré l'augmentation de la température des parois incorporant des MCP au dessus de 20 °C durant la journée. Il est remarqué que dans les quatre premières journées, les températures maximales des parois avec MCP de la cellule C2 et C3 varient entre 20 et 24 °C par contre la température maximale de la paroi sans MCP (cellule C1) varie entre 17 et 21 °C. La température de paroi avec MCP (23 °C) de la cellule C3 est légèrement supérieure à celle de paroi avec MCP (26 °C) de la cellule C2. La température maximale de la dernière journée de la paroi sans MCP est de 29 °C, alors que la température de la paroi avec MCP (26°C) atteint les 31 °C et celle de la paroi avec MCP (23°C) atteint les 33 °C.

Les températures minimales des parois sans l'utilisation du chauffage varient de la même façon entre 6 °C et 3 °C durant les quatre premières journées, pour la dernière journée les températures minimales augmentent à 10 °C.

Les résultats ont permis de constater que l'incorporation de matériau MCP comme enduit avec une paroi en brique creuse a permis d'améliorer le confort thermique et d'augmenter la température maximale des parois de 4 °C.

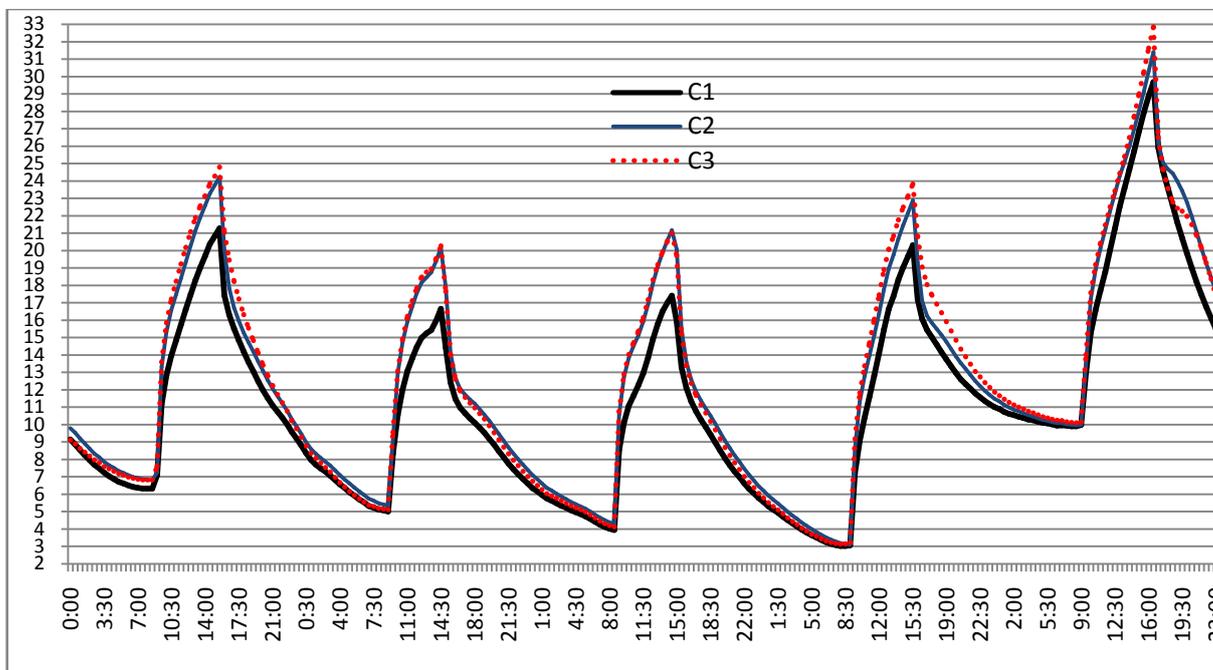


Figure 4.22 : Évolution au cours du temps de la température de paroi (24–28 Février 2013)

#### 4.4.8 Évolution de la température de la dalle en hiver

La figure 4.23 présente l'évolution au cours du temps de la température de la face interne de la dalle de la cellule C1 sans MCP et celle de la dalle de la cellule C2 et C3 avec MCP. Les résultats montrent, qu'avec un apport d'énergie de 200 w fournies aux cellules de 9 h à 15 h, que les températures maximales des quatre premières journées de la face interne de la dalle de la cellule C1 sans MCP varie entre 15 et 20 °C, alors que la température de la dalle de la cellule C2 et C3 avec MCP varie entre 20 et 25 °C. Pour la dernière journée, la température de la dalle sans MCP est de 29 °C, par contre celle de la dalle avec MCP atteint 34 °C. Les résultats expérimentaux montrent que l'utilisation de l'enduit plâtre/MCP avec une dalle du béton a permis d'augmenter la température maximale de la surface interne des dalles durant la journée de 5 °C.

Les résultats de ce travail sur l'effet des MCP avec chauffage sur l'amélioration du confort thermique viennent compléter les résultats trouvés par Zhou et al. [69,70].

Zhou et al. ont montré qu'un système de chauffage hybride associé à un stockage thermique utilisant une chape intégrant un matériau à changement de phase (SSPCM) permet de maintenir la température de confort et de réaliser des économies d'énergie sur le chauffage.

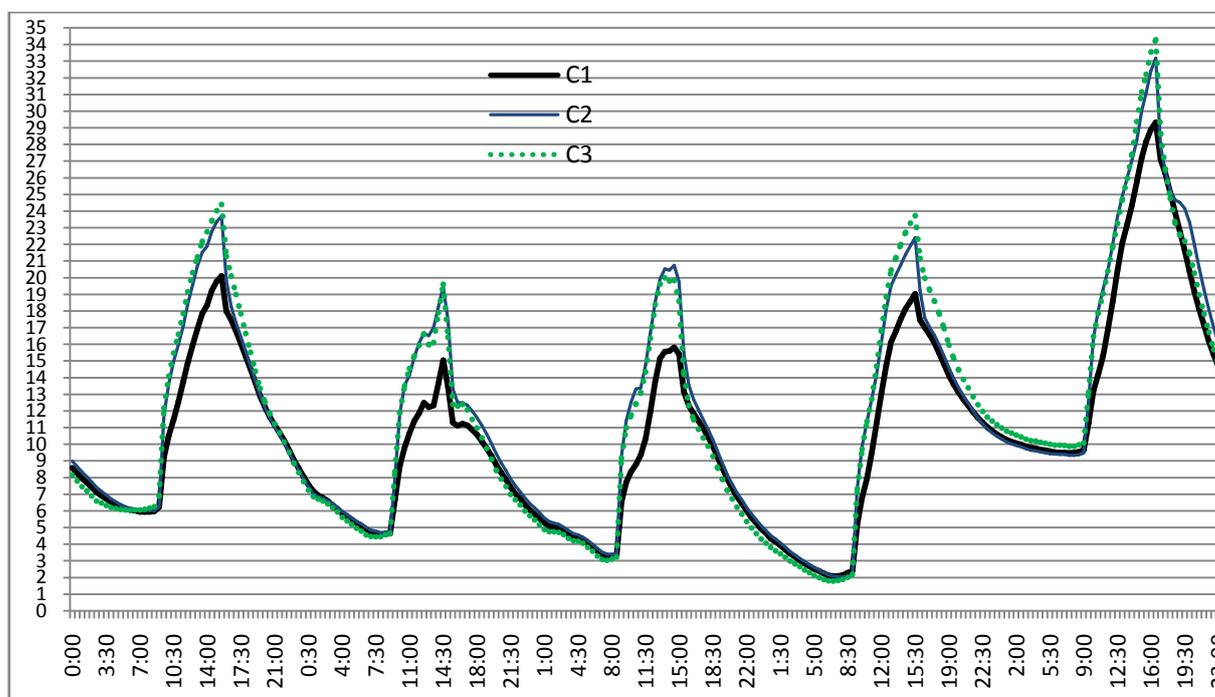


Figure 4.23 : Évolution au cours du temps de la température de dalle (24–28 Février 2013)

#### 4.5 Conclusion

Un travail expérimental a été réalisé pour étudier l'influence de l'intégration des MCP sur le comportement thermique de trois cellules (C1, C2 et C3). La cellule C1 est composée des matériaux classiques en Algérie, la cellule C2 est réalisée avec des parois intégrant un MCP (23 °C) et la cellule C3 est réalisée avec des parois intégrant un MCP (26 °C).

Les résultats des mesures in situ en période d'été ont montré que, pendant la période ensoleillée, l'incorporation de MCP dans les parois et le plafond de la cellule diminue de 2,5°C la température maximale de l'ambiance intérieure et réduit l'amplitude (diurne/nocturne) de la température à l'intérieur de la cellule de 4 °C. Les résultats des mesures en période d'hiver montrent que le MCP a permis d'améliorer le confort thermique et d'augmenter la température maximale des cellules de 2 °C.

## CHAPITRE 5

### SIMULATION THERMIQUE DES BÂTIMENTS À PAROIS INCORPORANT DES MCP

#### 5.1. Introduction

Ce chapitre présente un travail de simulation thermique en régime dynamique, réalisé avec le logiciel de simulation thermique TRNSYS, pour comparer le comportement thermique d'un local à usage de bureau à parois de type classique avec un local à parois incorporant des matériaux à changement de phase (MCP) en utilisant le type 204.

#### 5.2. La simulation thermique dynamique

La simulation thermique dynamique permet de faire "vivre virtuellement" le comportement thermique d'un bâtiment soumis à des conditions extérieures imposées. Elle permet de prévoir ou d'interpréter des phénomènes thermiques qui se déroulent pendant le temps, elle se base sur des modèles mathématiques complexes pour étudier le comportement thermique d'un bâtiment en régime variable.

L'outil de simulation thermique dynamique (STD) a une véritable utilité pour modéliser les bâtiments et de mesurer l'influence de chaque paramètre de la construction sur sa performance énergétique. Il permet aussi de faire une étude de faisabilité technique par la comparaison des différentes solutions techniques à mettre en œuvre sur une construction (enveloppe, isolations, inertie,..). Il permet aussi d'identifier la répartition des déperditions thermiques dans l'enveloppe du bâtiment, de préconiser des solutions et de quantifier les économies d'énergie.

#### 5.2.2. Principes d'une simulation thermique dynamique

Le bâtiment est modélisé avec un logiciel de simulation pour analyser ses interactions avec son environnement selon un pas de temps qui peut être horaire et pour une période qui peut atteindre une année en fonction des données météorologiques locales et des paramètres propres au bâtiment.

### 5.2.2.1 Paramètres d'entrée

Ce sont les données nécessaires à introduire et qui pourront être stockées dans la bibliothèque du logiciel en vue d'une utilisation ultérieure par le concepteur. Elles concernent les paramètres suivants :

- Structure : orientation du bâtiment, parois opaques, parois vitrées, protection solaires, ....
- Équipements : chauffage, climatisation, ventilation...
- Intérieurs : scénarios d'occupation, apports internes dus aux équipements,...
- Extérieurs : température, vitesse de vents, données météorologiques.

### 5.2.2.2. Paramètres de sortie

C'est l'ensemble des résultats fournis par le logiciel de simulation, comme :

- Évolution des températures en fonction du temps pour chaque zone du bâtiment.
- Puissance de chauffage ou de rafraîchissement nécessaire.

### 5.2.5 Méthodologie de la simulation thermique dynamique

La simulation apporte 3 types de réponse. Elle permet en effet, de viser un objectif de performance énergétique qui peut être, par exemple, un Bâtiment Basse Consommation ou une Maison Passive. La simulation dynamique devient nécessaire, car pour atteindre ces performances, la conception du bâtiment doit équilibrer le comportement thermique en fonction des apports solaires, de l'inertie et de l'isolation.

Elle permet de faire un choix entre plusieurs techniques constructives (plancher chauffant, double ou triple vitrage) tout en garantissant un bon comportement thermique. La simulation thermique aide à prendre une décision en ce qui concerne la meilleure approche financière.

Elle permet aussi d'optimiser le confort d'hiver et d'été. Pour cela, les fichiers météo sont légèrement exagérés (15 à 25%), pour simuler des situations extrêmes d'hiver et d'été.

### 5.2.6. TRNSYS (Transient System Simulation)

Le logiciel TRNSYS (TRaNsient System Simulation Program ou programme de simulation de systèmes transitoires) est un logiciel multi-zones de simulation en régime dynamique. Développé au laboratoire "Solar Energy" de l'université Wisconsin à Madison, TRNSYS est structuré de manière modulaire. Il permet le calcul des performances techniques des bâtiments mono ou multi-zones.

Ces simulations peuvent être couplées avec les conditions météorologiques, les scénarios d'occupation et l'utilisation de différentes formes d'énergie. TRNSYS évalue le niveau de confort thermique d'un bâtiment par rapport à son environnement climatique et le choix opéré sur son système thermique (type de chauffage, niveau d'isolation, orientation des pièces...). Il évalue aussi les systèmes de chauffage et de climatisation des plus simples au plus complexes, comme les installations solaires innovantes, grâce à une bibliothèque de 50 familles de composants.

L'un des facteurs clés de la réussite de TRNSYS au cours des 35 dernières années est sa structure modulaire, ouverte. Le code source, ainsi que les modèles de composants sont fournis à l'utilisateur. Cela simplifie l'extension des modèles existants pour les adapter aux besoins spécifiques de l'utilisateur. La figure ci-dessous illustre l'interface du logiciel TRNSYS.

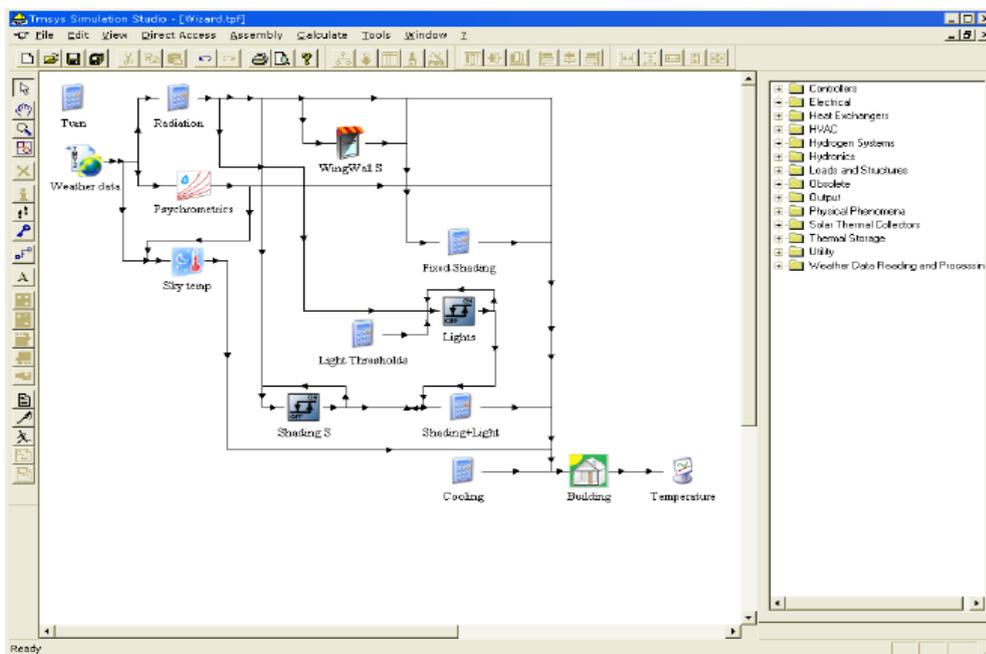


Figure 5.1 : Interface du logiciel TRNSYS

### 5.2.6.1 Données introduites

Les données introduites sont la description du bâtiment et les données météo (fournies avec le programme pour certaines villes) ainsi que la description des équipements thermiques et de leur fonctionnement. Des liens existent avec certains programmes de dessin pour faciliter la saisie des données décrivant le bâtiment.

### 5.2.6.2 Utilisation du logiciel TRNSYS

La simulation thermique d'un bâtiment avec TRNSYS doit disposer d'au moins de trois composants. Le premier fournit les données météorologiques de la région climatique où se situe le bâtiment, le second concerne les caractéristiques thermiques des parois et le troisième traite les échanges de chaleur dans le bâtiment.

Ces trois composants nécessaires pour exécuter la simulation dans TRNSYS sont identifiés par le fichier météo TRNWIN, le fichier DECK (programme propre à la simulation) et le fichier BUI (description du bâtiment), comme le montre la figure 5.2.

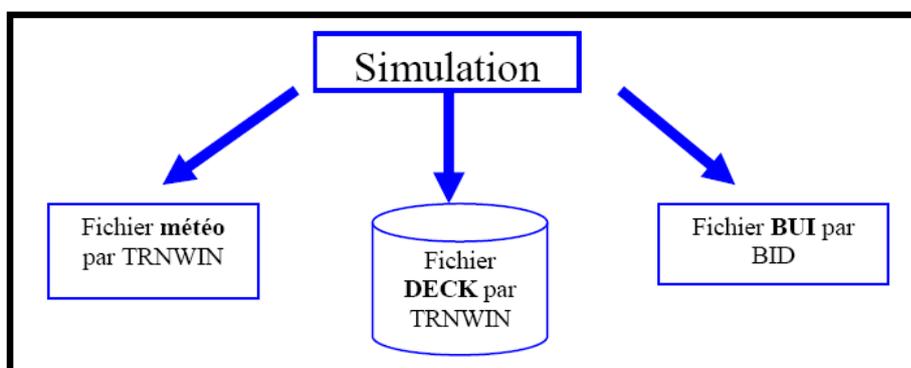


Figure 5.2 : Fichiers nécessaires au lancement de la simulation

Chaque composant est identifié par un type et un numéro et il est défini par des paramètres, des entrées et des sorties (cf. figure 5.3).

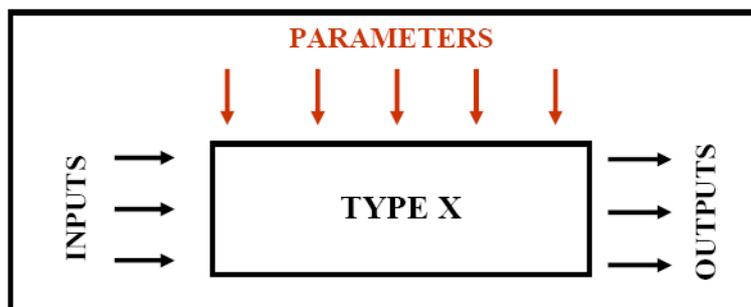


Figure 5.3 : Description du module "Type X"

### 5.2.6.3 L'interface du bâtiment (TRNBuild)

TRNBuild est l'outil utilisé pour faire entrer toutes les données sur les bâtiments multizones. Il permet de spécifier tous les détails de la structure du bâtiment, ainsi que tout ce qui est nécessaire pour simuler le comportement thermique du bâtiment, tels que les propriétés optiques des fenêtres, les horaires de chauffage et de refroidissement, les scénarios d'occupation et les gains internes, etc. TRNBuild crée un fichier de description du bâtiment (\* de .b17) qui comprend toutes les informations utiles pour simuler le bâtiment.

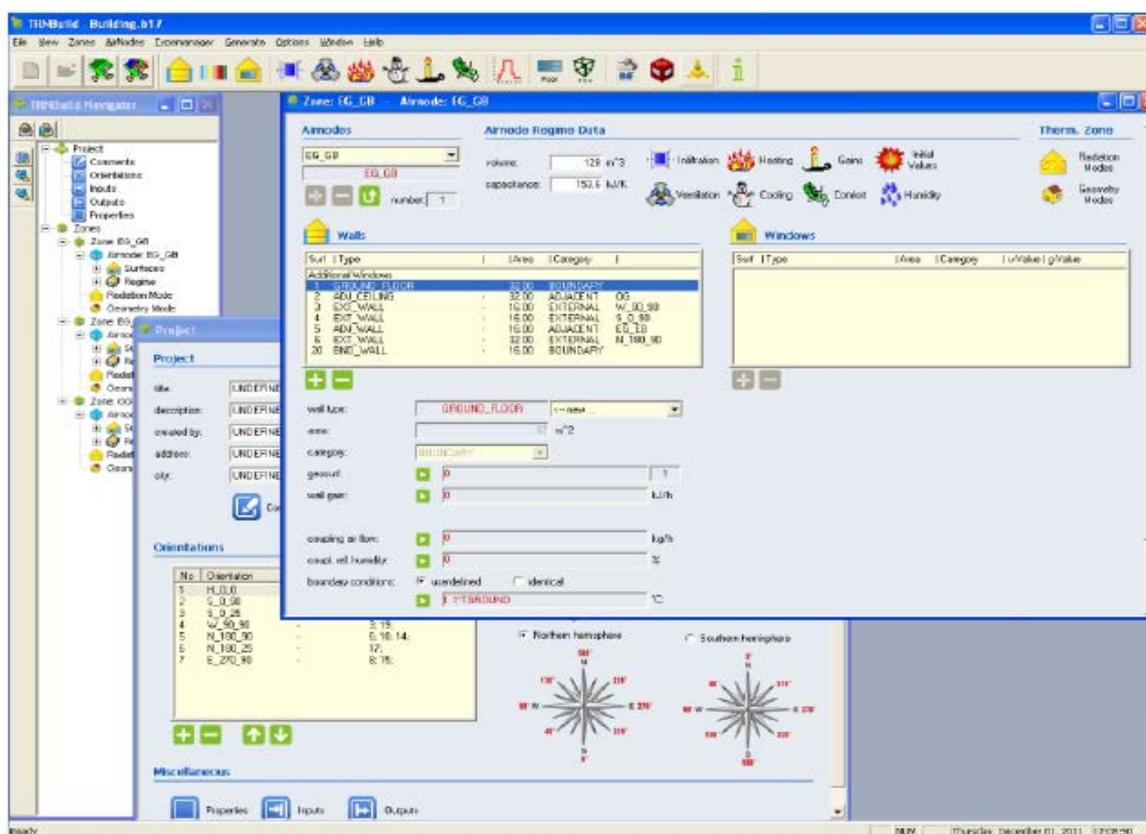


Figure 5.4 : L'interface (TRNBuild)

#### 5.2.6.5 Avantages

TRNSYS est extrêmement flexible par sa composition modulaire, qui permet de modéliser un ensemble de systèmes thermiques à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées).

L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine. Une vaste documentation existe sur les sous-programmes, les usages usuels et les équations de base.

Une définition très souple de la période de simulation (choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation) est possible.

#### 5.2.6.6. Inconvénients

TRNSYS a l'inconvénient de ne pas disposer de valeurs ou de systèmes par défaut. Il est nécessaire d'introduire l'ensemble des données définissant le bâtiment et les systèmes.

#### 5.2.7. Simulation thermique d'un bâtiment à parois incorporant des MCP

La simulation thermique en régime dynamique a été effectuée sur un local à usage de bureau à parois incorporant des matériaux à changement de phase (MCP) en utilisant le type 204. La figure 5.5 illustre l'interface de la simulation studio de TRNSYS en utilisant deux types 204. Le premier type pour simuler la couche de MCP sur les murs et le deuxième pour simuler la couche de MCP sur le plafond.

##### 5.2.7.1 Description du Type 204

Le composant TYPE 204 (figure 5.6) a été développé en FORTRAN et intégré dans TRNSYS par une équipe de recherche de l'université de technologie d'Helsinki, en Finlande (Lamberg et al, [71]). La méthode des différences finies avec un schéma de Crank-Nicholson a été appliquée, ce modèle simule le transfert de chaleur à travers un composant de paroi composite 3-D MCP contenant un total de 729 nœuds (9 nœuds dans les trois directions x, y et z). A chaque nœud, le transfert de chaleur par conduction, convection et par rayonnement est pris en considération.

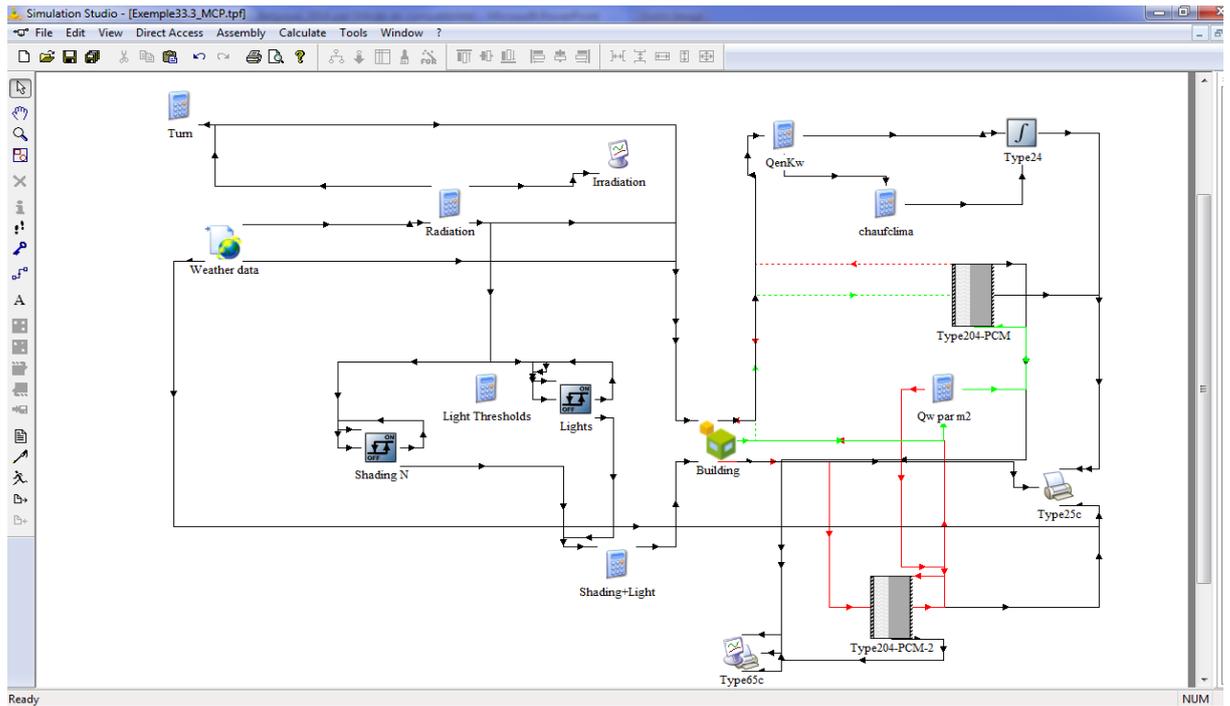


Figure 5.5 : Interface de la simulation studio (type 204)

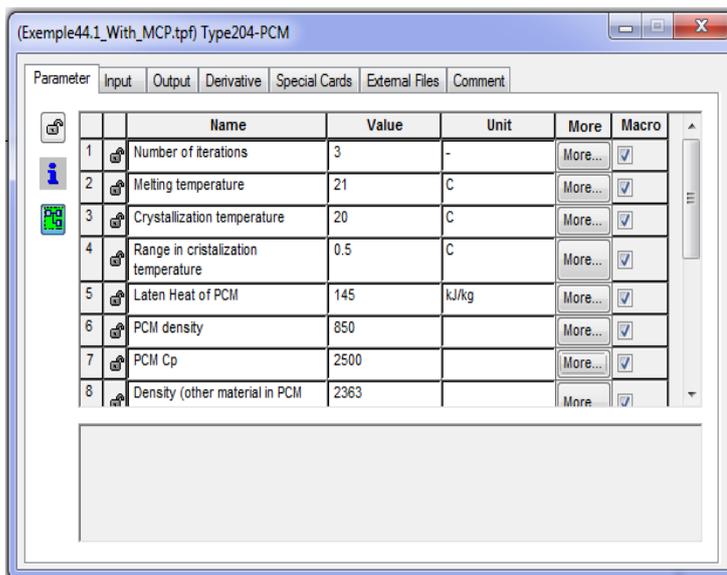


Figure 5.6 : Type 204

### 5.2.7.2 Description du local étudié

La simulation a été effectuée sur un local à usage de bureau au dernier étage, de 3,5 m de longueur, 3 m de largeur et 3 m de hauteur (figure 5.7). Le mur sud de bureau est en contact avec l'extérieur et il contient une fenêtre double vitrage de 1,96 m<sup>2</sup>, il est réalisé en double paroi en briques creuses de 10 cm

séparé par une lame d'air de 10 cm. La toiture est réalisée en béton de 15 cm et isolée par une couche de 5 cm de polystyrène expansé. Les autres parois sont réalisées en béton et sont en contact avec les autres bureaux. Pour les apports internes, ils sont supposés être, de 8h à 16h, un occupant, un micro et un éclairage de 5 W/m<sup>2</sup>. Pour l'infiltration, nous avons supposé 0,2 V/h et 1 V/h pour la ventilation.

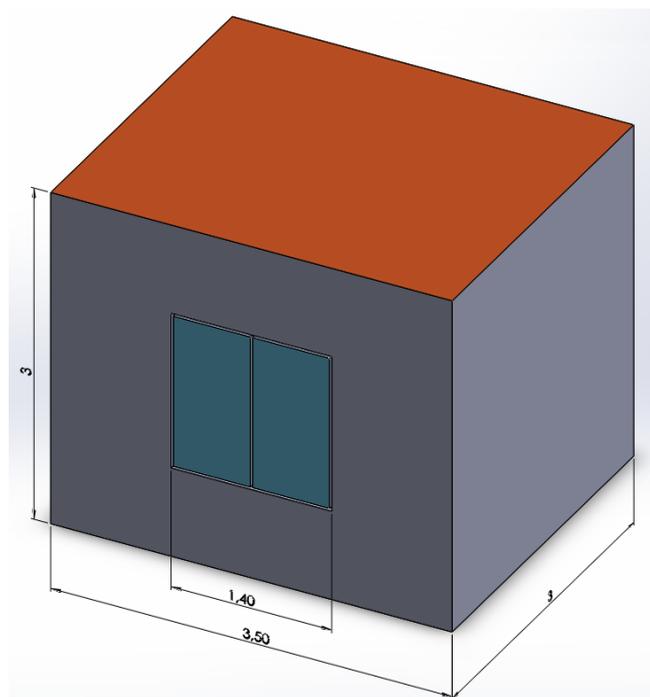


Figure 5.7 : Dimensions du bureau étudié

### 5.2.7.3 Composition des parois

**Tableau 5.1 : Composition de mur extérieur**

Mur ext	e (mm)	$\lambda$ (W/m.°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	C (J/kg.°C)
Mortier ciment	20	1,4	2200	940
Briques creuses	100	0,48	900	936
Lame d'air	100	0,62	2200	1006
Briques creuses	100	0,48	900	936
Enduit plâtre	15	1,2	1800	840

**Tableau 5.2 : Composition de la toiture**

Toiture	e (mm)	$\lambda$ (W/m .°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	C (J/kg.°C)
Mortier ciment	20	1,4	2200	940
Polys_exp	50	0,04	25	1380
Béton	150	1,7	2500	840
Enduit plâtre	15	1,2	1800	840

**Tableau 5.3 : Composition du plancher**

Plancher	e (mm)	$\lambda$ (W/m .°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	C (J/kg.°C)
Carrelage	10	1	2000	940
Mortier ciment	20	1,4	2200	940
Béton	150	1,7	2500	840
Enduit plâtre	15	1,2	1800	840

**Tableau 5.4 : Apports internes**

Source d'apports de 8h à 16 h	Charge thermique (W)
Ordinateur et imprimante	200
Éclairage (5W/m <sup>2</sup> )	49
01 Personne	75

### 5.3. Résultats de la simulation thermique

#### 5.3.1 Évolution de la température de l'air en hiver (cas d'Alger)

La figure 5.8 illustre l'évolution de la température de l'air intérieur d'un bureau à parois incorporant des MCP et celle d'un bureau à parois sans MCP pour la période (du 25 au 31 Janvier) à ALGER. Il est constaté que la température de l'air de bureau sans MCP varie entre 16 et 21 °C. Alors que celle du bureau avec MCP présente des valeurs plus élevées, elle varie entre 18 et 22 °C. Ceci permet d'assurer une ambiance thermique acceptable aux occupants. Les résultats de la simulation montrent que l'utilisation des matériaux à changement de phase dans le plafond en béton et les murs en briques creuses a permis d'augmenter la température du bureau de 2 à 3 °C en période d'hiver.

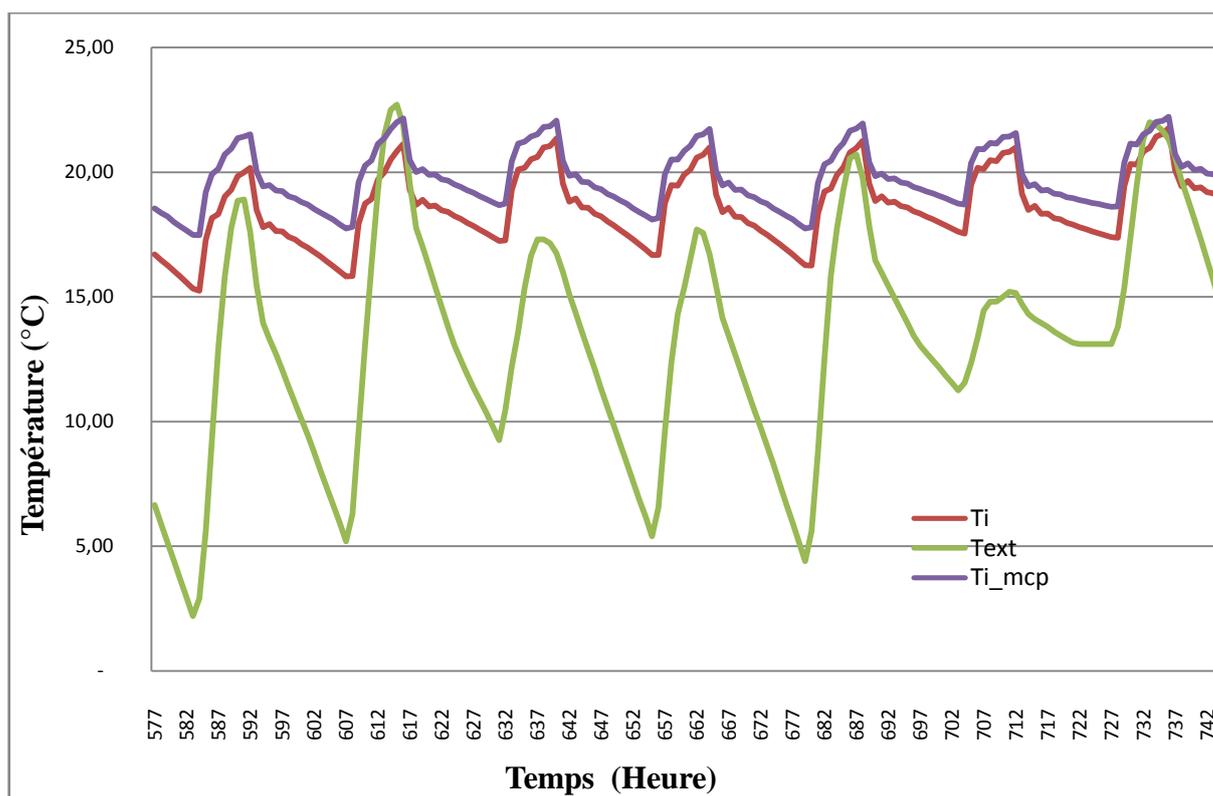


Figure 5.8 : Évolution de la température de l'air en hiver (Alger/ du 25 au 31 Janvier)

### 5.3.2 Évolution de la température de l'air en été (cas d'Alger)

La figure 5.9 présente la variation de la température de l'air extérieur et la température de l'air intérieur d'un bureau à parois incorporant des MCP et celle d'un bureau à parois sans MCP pour la période (du 22 au 28 Juillet) à Alger. Les résultats de la simulation montrent que la température de l'air extérieur varie entre 20 et 31 °C. La température de l'air du bureau sans MCP est comprise entre 33 et 37 °C, elle est plus élevée que celle de l'extérieure. Les apports internes durant l'occupation et les apports solaires à travers la fenêtre côté sud ont engendré une augmentation remarquable de la température du bureau sans MCP. La température du bureau avec des parois intégrant un MCP présente des valeurs faibles comparée à celle du bureau sans MCP, la température du bureau avec MCP varie la plupart du temps entre 25 et 28 °C. Il a été constaté que la présence des matériaux à changement de phase dans les parois a réduit la surchauffe en période d'été, en diminuant la température de l'air de 8 °C. Il est remarqué aussi que l'effet des matériaux à changement de phase est très important car l'amplitude

de la température est plus grande et que les parois ne sont pas isolées sauf la toiture.

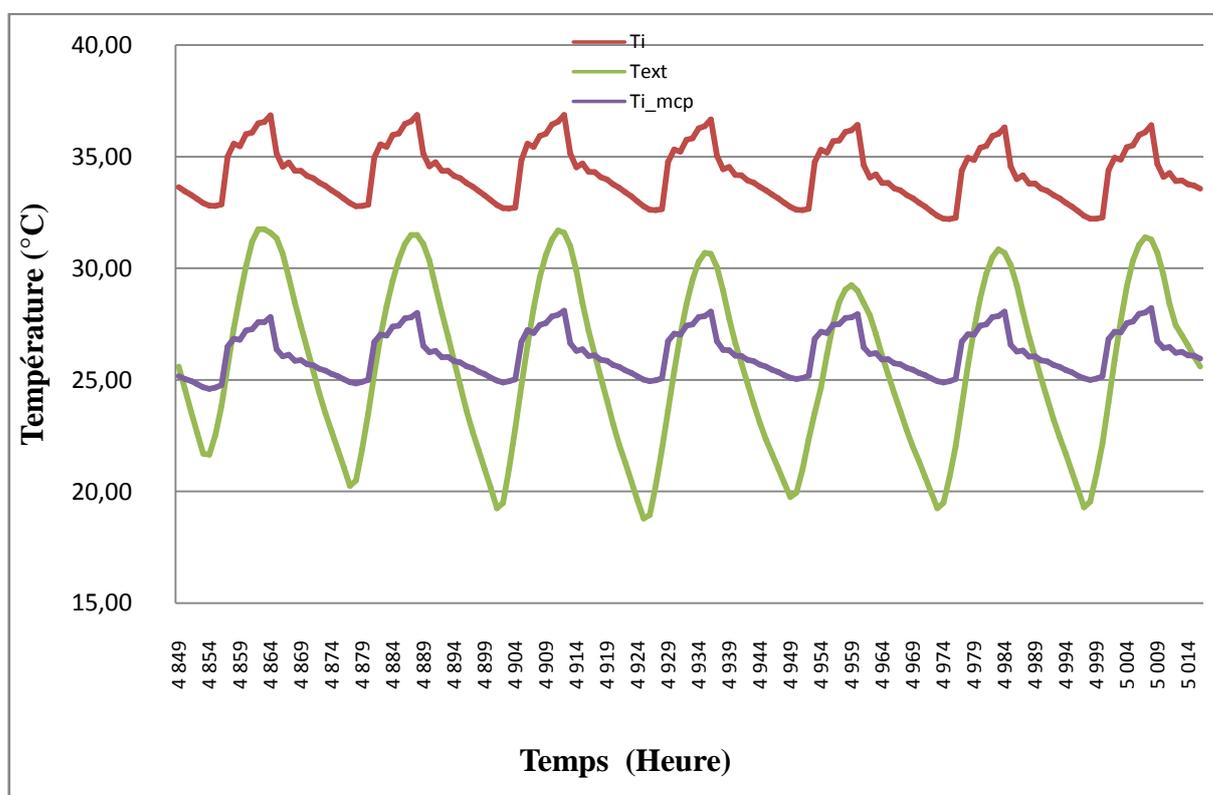


Figure 5.9 : Évolution de la température de l'air en été (Alger/ du 22 au 28 Juillet)

### 5.3.3 Les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation (cas d'Alger)

#### 5.3.3.1 Consommation mensuelle de chauffage et de climatisation (cas d'Alger)

Les figures 5.10 et 5.11 présentent les besoins mensuels de chauffage et de climatisation d'un bureau à parois incorporant des MCP et ceux d'un bureau à parois sans MCP. La comparaison des besoins de chauffage et de climatisation pour les deux bureaux étudiés, nous montre que le bureau avec MCP consomme moins d'énergie, de chauffage et de climatisation, par rapport au bureau sans MCP durant tous les mois de l'année. En période d'hiver, le mois de Janvier présente la consommation d'énergie la plus élevée durant la période de chauffage. Le bureau sans MCP consomme 33 kWh de chauffage au mois de Janvier par contre le bureau avec MCP ne consomme que 18 kWh.

En période d'été, le mois d'Août a la consommation la plus élevée pendant la période de climatisation. La consommation d'énergie de climatisation du bureau avec MCP au mois d'Août est légèrement inférieure à celle du bureau sans MCP.

Les résultats montrent que la présence des matériaux à changement de phase dans les parois a permis de réaliser des économies d'énergie par la réduction de la période de chauffage en hiver en conservant la chaleur durant le changement de phase et la diminution de la période de climatisation en évitant au maximum la surchauffe due aux apports solaires et aux apports internes.

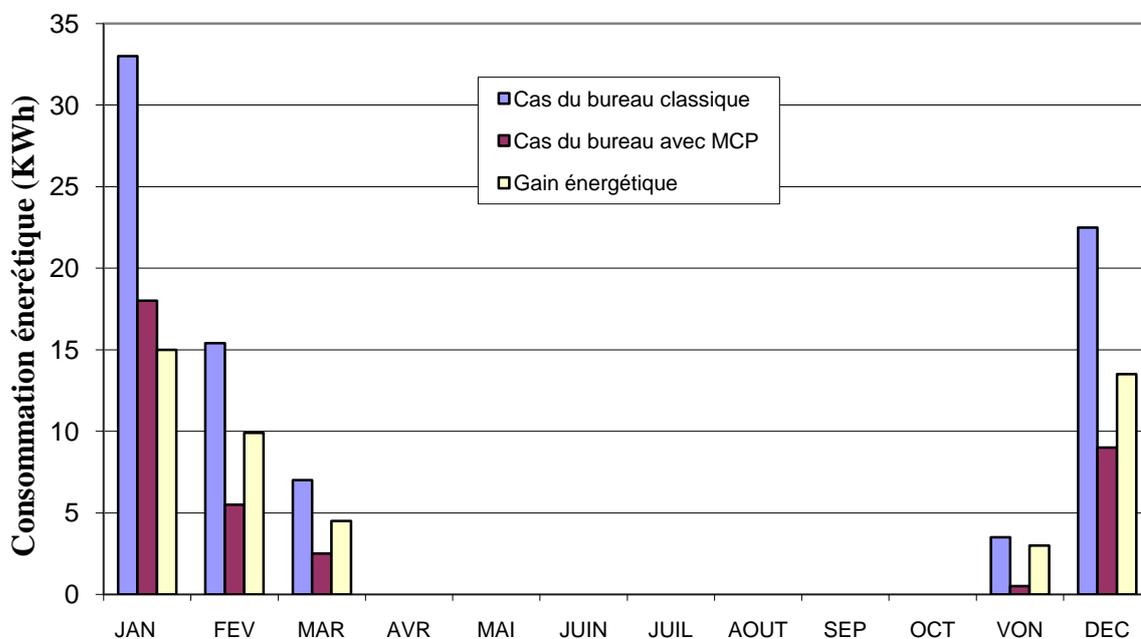


Figure 5.10: Comparaison de la consommation mensuelle de chauffage du bureau classique et celle du bureau avec MCP (cas d'Alger)

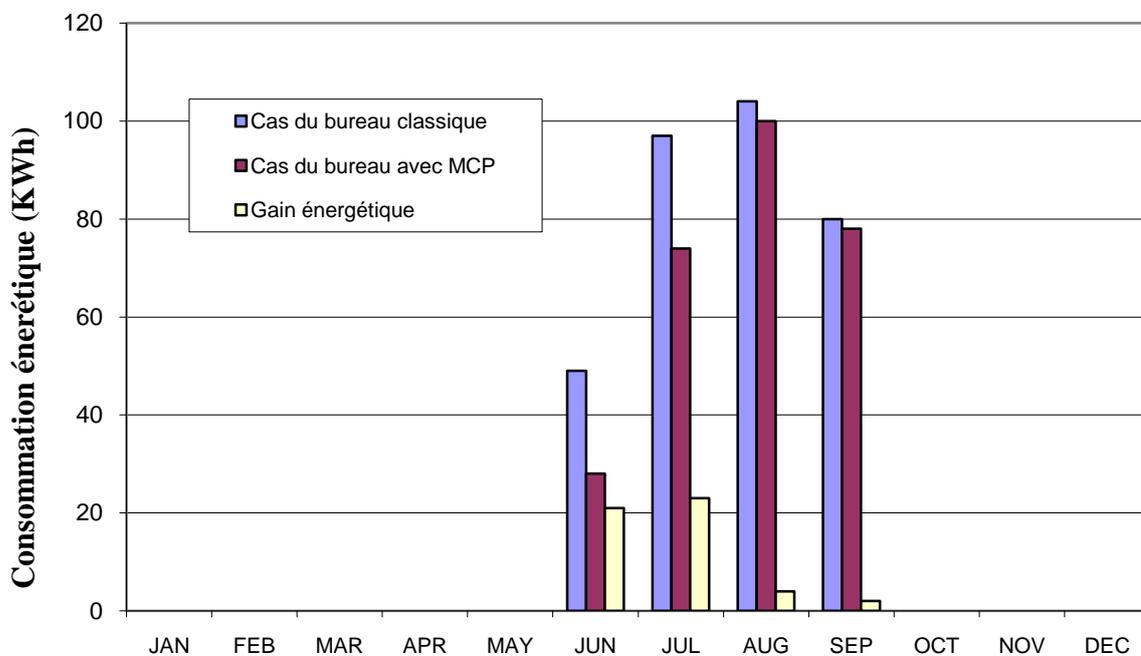


Figure 5.11: Comparaison de la consommation mensuelle de rafraîchissement du bureau classique et celle du bureau avec MCP (cas d'Alger)

### 5.3.3.2 Consommation annuelle de chauffage et de climatisation

La figure 5.12 illustre les résultats de la consommation annuelle de chauffage et de climatisation du bureau classique et du bureau à parois incorporant un matériau à changement de phase. Le bureau classique consomme environ 410 kWh par ans, alors que le bureau avec MCP consomme que 315 kWh par an. Les résultats ont permis de constater que la présence de 30 % d'un matériau à changement de phase avec le plâtre comme enduit intérieur dans un local à usage de bureaux permet de réaliser 23 % d'économie d'énergie, pour le chauffage et la climatisation, dans la région d'Alger.

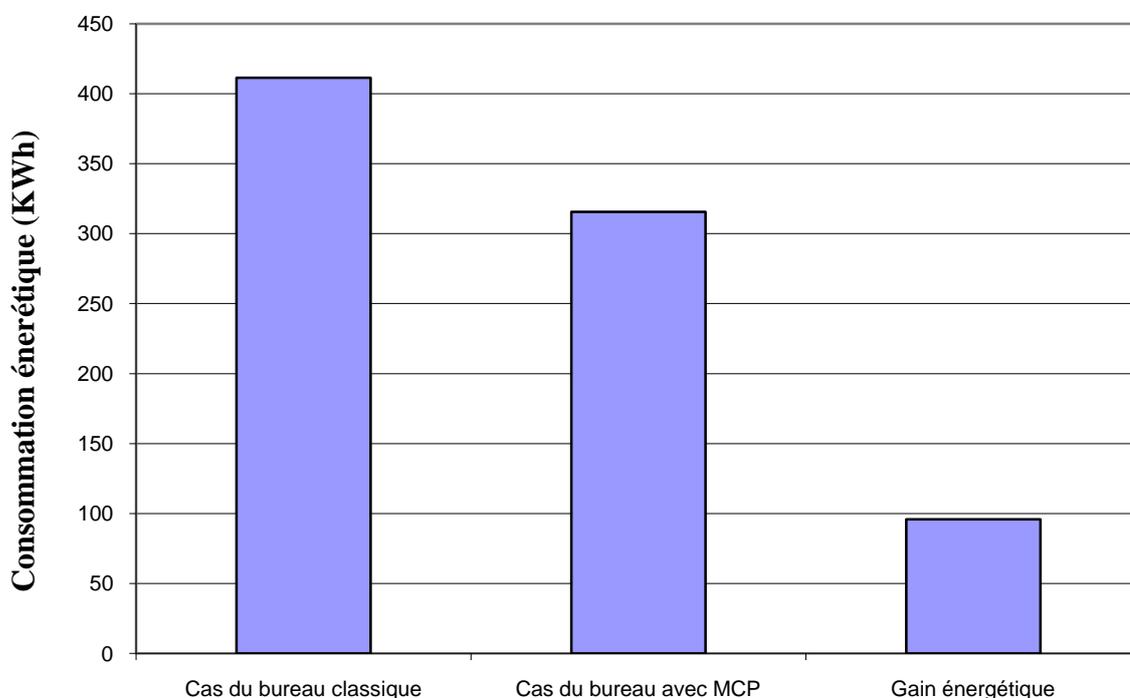


Figure 5.12: Comparaison de la consommation annuelle de chauffage et de rafraîchissement du bureau classique et celle du bureau avec MCP (cas d'Alger)

### 5.3.4 Évolution de la température de l'air en hiver (cas de Djelfa)

La figure 5.13 illustre les variations de la température intérieure du bureau classique et du bureau à parois intégrant un matériau à changement de phase, en période d'hiver, dans la région de Djelfa. Il est remarqué que les températures sont nettement plus basses que celles d'Alger, car la température extérieure présente des valeurs très faibles, variant la plupart du temps entre 0 et 10 °C. La température de l'air intérieur du bureau classique, varie entre 12 et 16 °C. Les températures maximales durant la journée dépassent rarement 16 °C, ce qui

engendre aux occupants une sensation d'inconfort thermique en période d'hiver. Par contre, la température de l'ambiance intérieure du bureau avec MCP présente des valeurs plus élevées, variant entre 15 et 18 °C. Les températures maximales durant la journée varient entre 17 et 19 °C, ce qui proche de la zone de confort en période d'hiver. La récupération des apports solaires et des apports internes par le MCP a engendré l'augmentation de la température du bureau.

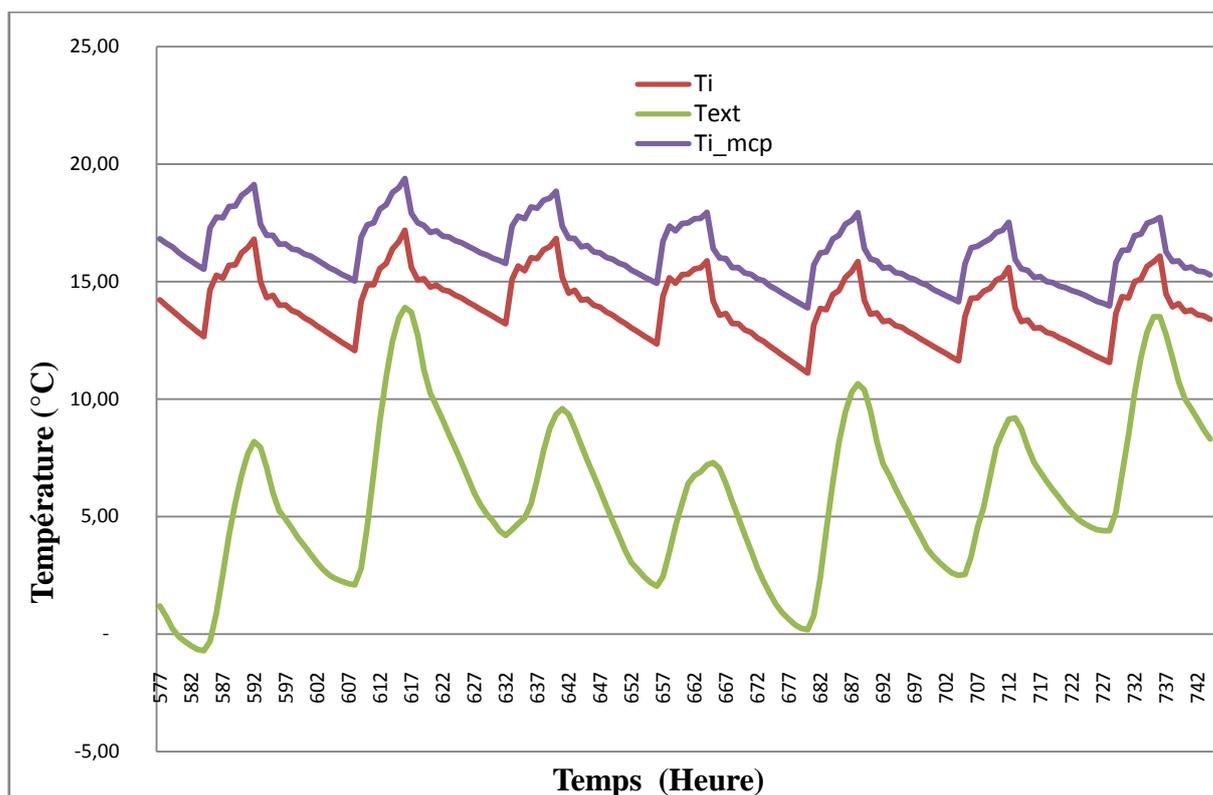


Figure 5.13 : Évolution de la température de l'air en hiver (Djelfa / du 25 au 31 Janvier)

### 5.3.5 Évolution de la température de l'air en hiver (cas de Djelfa)

La figure 5.14 illustre l'évolution de la température du bureau classique et celle du bureau à parois incorporant un MCP en période d'été dans la région de Djelfa. La température du bureau classique est très élevée, elle varie entre 35 et 40 °C, ce qui provoque aux occupants un inconfort thermique. La température du bureau avec MCP varie entre 26 et 28 °C, ceci génère une température confortable sans climatisation. L'incorporation de MCP avec le plâtre a permis d'augmenter l'inertie thermique des parois pour emmagasiner la chaleur due aux apports solaires et aux apports internes durant la journée et la restituer durant la nuit.

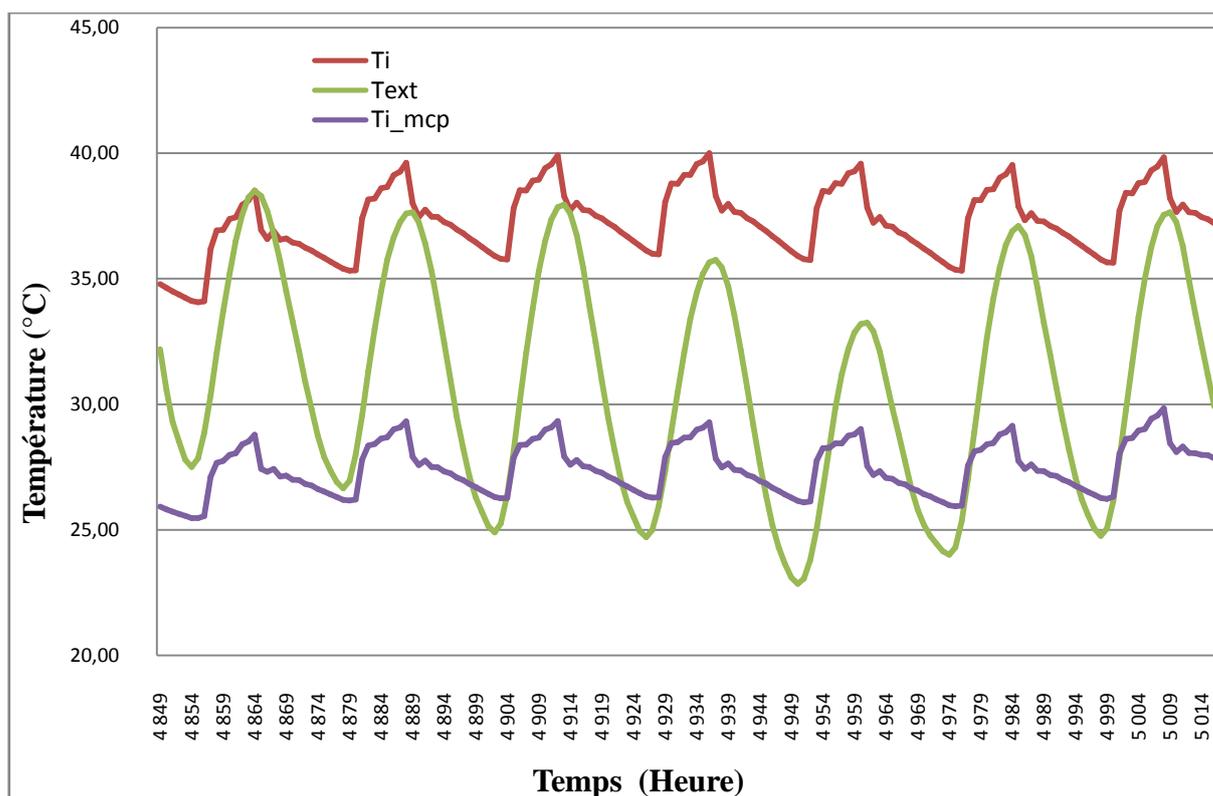


Figure 5.14 : Évolution de la température de l'air en été (Djelfa/ du 22 au 28 Juillet)

### 5.3.6 Les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation (cas de Djelfa)

#### 5.3.6.1 Consommation mensuelle de chauffage et de climatisation (cas de Djelfa)

Les figures 5.15 et 5.16 présentent les besoins mensuels de chauffage et de climatisation d'un bureau à parois incorporant des MCP et ceux d'un bureau à parois de type classique dans la région de Djelfa. Il est constaté que la consommation d'énergie du bureau avec MCP, de chauffage et de climatisation, est inférieure à celle du bureau sans MCP durant tous les mois de l'année. En période d'hiver, le mois de Janvier présente la consommation d'énergie la plus élevée durant la période de chauffage, avec 82 kWh pour le bureau classique et 59 kWh pour le bureau avec MCP.

En période d'été, le mois de Juillet a la consommation la plus élevée pendant la période de climatisation. Le bureau classique consomme 145 kWh au mois de Juillet alors que, le bureau avec MCP ne consomme que 97 kWh.

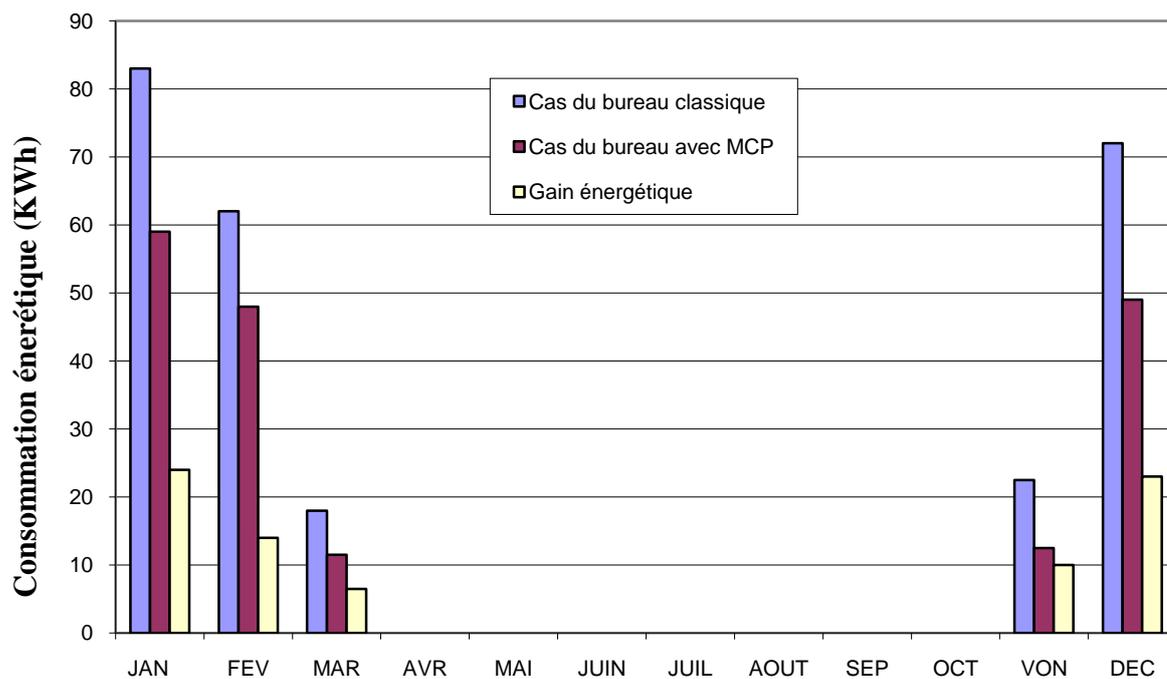


Figure 5.15: Comparaison de la consommation mensuelle de chauffage du bureau classique et celle du bureau avec MCP (cas de Djelfa)

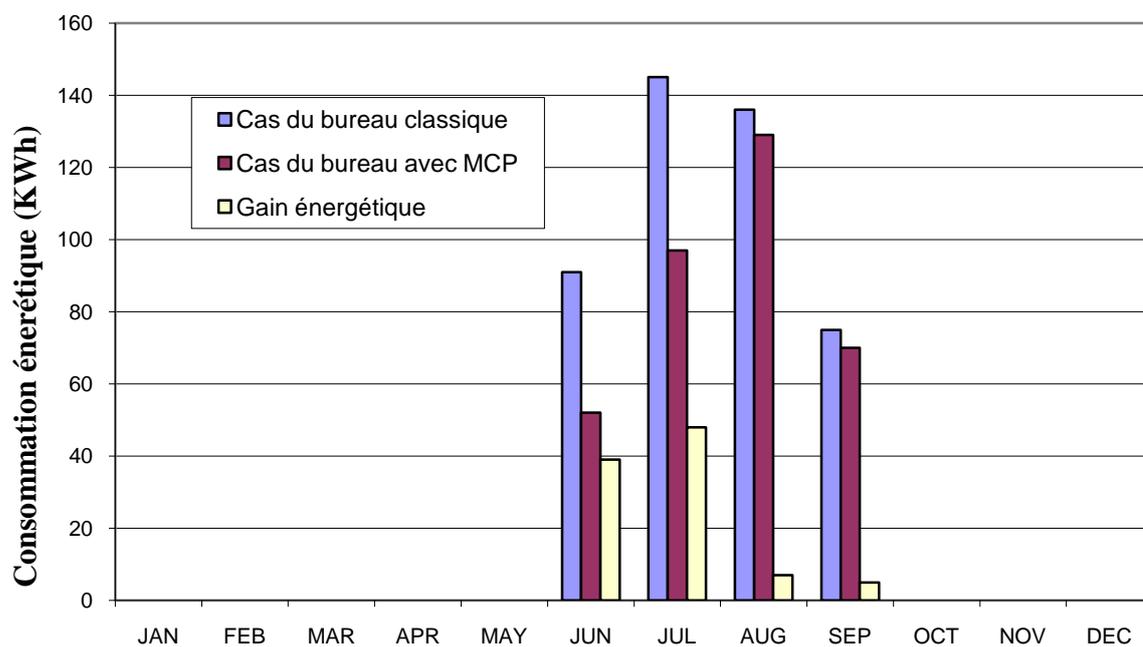


Figure 5.16 : Comparaison de la consommation mensuelle de rafraîchissement du bureau classique et celle du bureau avec MCP (cas de Djelfa)

### 5.3.6.2 Consommation annuelle de chauffage et de climatisation

La figure 5.17 illustre les résultats de la consommation annuelle de chauffage et de climatisation du bureau classique et du bureau à parois incorporant un matériau à changement de phase dans la région de Djelfa. Le bureau classique consomme environ 704 kWh par an, alors que le bureau avec MCP ne consomme que 528 kWh par an. Il est constaté que l'utilisation d'un matériau à changement de phase dans les parois d'un local à usage de bureau permet de réaliser 25 % d'économie d'énergie, pour le chauffage et la climatisation, dans la région de Djelfa.

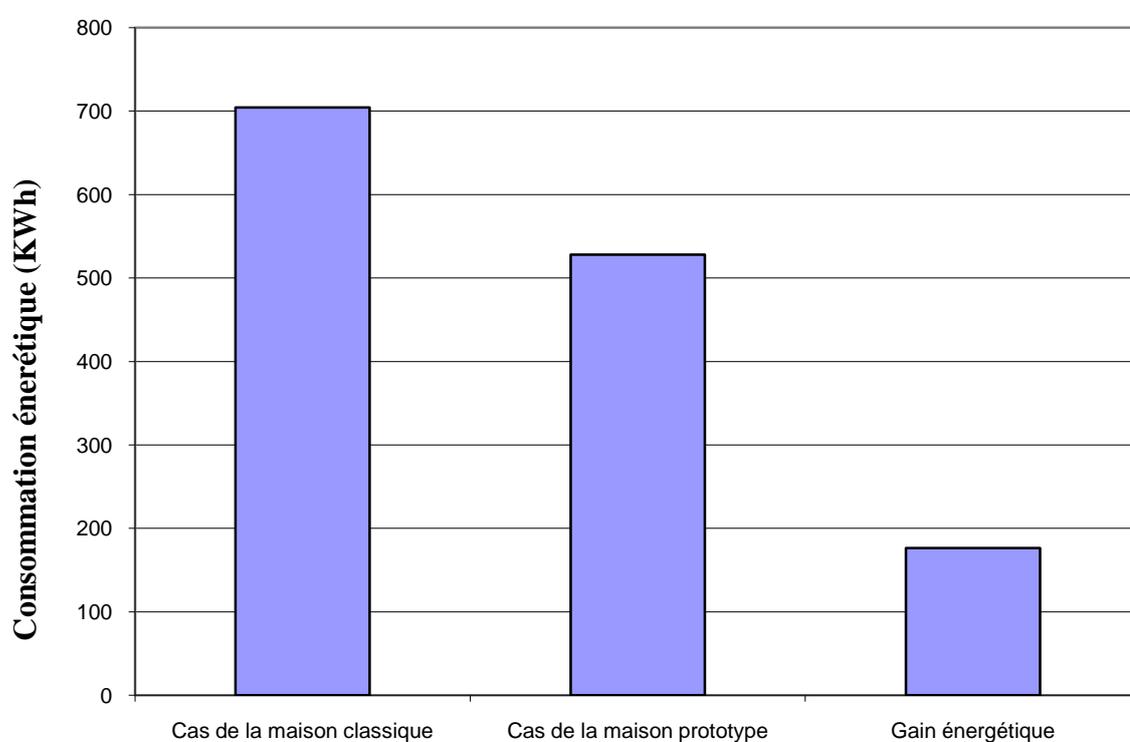


Figure 5.17 : Comparaison de la consommation annuelle de chauffage et de rafraîchissement du bureau classique et celle du bureau avec MCP (cas de Djelfa)

### 5.3.7 Évolution de la température de l'air en hiver (cas de Béchar)

La figure 5.18 représente le profil de la température du bureau classique et celle du bureau à parois incorporant un MCP en hiver dans la région de Béchar. Les résultats permettent de constater que la température des deux bureaux est élevée, comparant avec celles d'Alger et de Djelfa. Les apports solaires importants, à travers la fenêtre côté Sud, ont engendré l'augmentation de la température des deux bureaux. La température varie entre 19 et 22 °C, durant l'occupation, en assurant le confort thermique en période d'hiver. La température du bureau avec MCP est légèrement supérieure à celle du bureau classique.

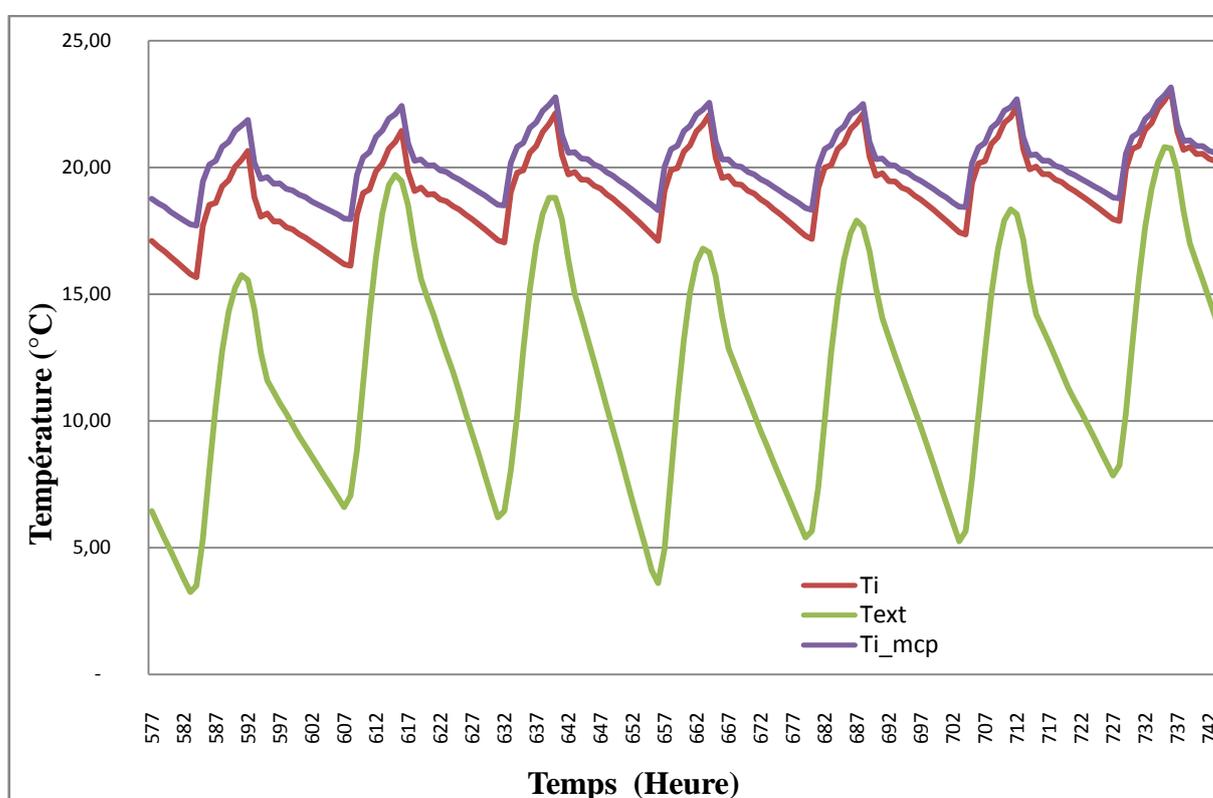


Figure 5.18 : Évolution de la température de l'air en hiver (Béchar / du 25 au 31 Janvier)

### 5.3.8 Évolution de la température de l'air en été (cas de Béchar)

La figure 5.19 présente l'évolution de la température du bureau classique et celle du bureau à parois incorporant un MCP en été dans la région de Béchar. L'analyse et la comparaison des résultats de la simulation, nous montrent clairement que la température de bureau avec MCP est très faible par rapport à celle du bureau classique. La température du bureau classique présente des valeurs très élevées, elle varie entre 37 et 42 °C. Par contre, la température de bureau avec MCP varie, la plupart du temps, entre 27 et 30 °C. Cette réduction de la température est due à la bonne inertie thermique de l'enveloppe du bureau en incorporant un matériau à changement de phase qui a une capacité de stockage thermique importante durant la journée.

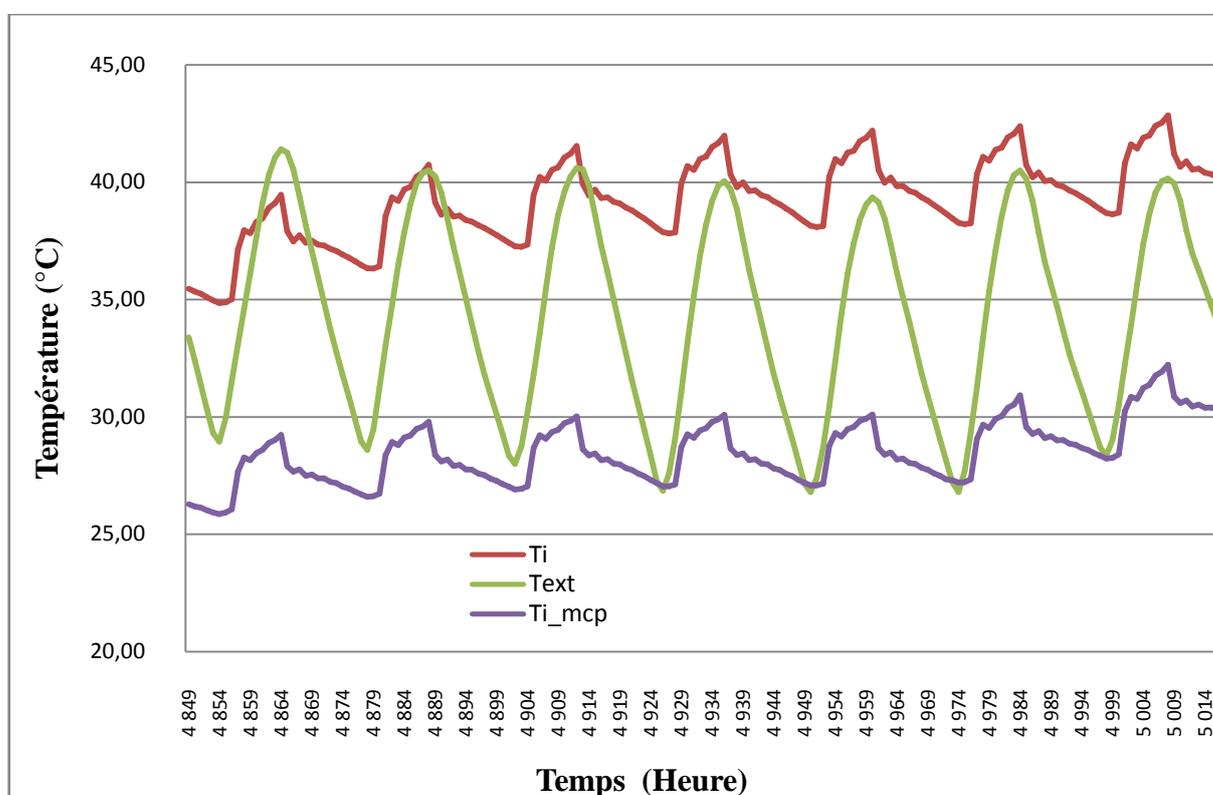


Figure 5.19 : Évolution de la température de l'air en été (Béchar/ du 22 au 28 Juillet)

### 5.3.9 Les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation (cas de Béchar)

#### 5.3.9.1 Consommation mensuelle de chauffage et de climatisation (cas de Béchar)

La comparaison des résultats entre les besoins mensuels de chauffage et de climatisation d'un bureau à parois incorporant des MCP et ceux d'un bureau à parois de type classique dans la région de Béchar (figures 5.20 et 5.21) permet de constater que la consommation d'énergie du bureau avec MCP, de chauffage et de climatisation, est inférieure à celle du bureau sans MCP durant tous les mois de l'année. Au mois de Janvier, le bureau classique consomme 22.5 kWh, par contre le bureau avec MCP ne consomme que 10 kWh.

En période d'été, il est remarqué que les consommations de climatisation sont très élevées par rapport à celles de la région d'Alger et de Djelfa. Le bureau classique consomme 190 kWh au mois de Juillet alors que le bureau avec MCP ne consomme que 125 kWh.

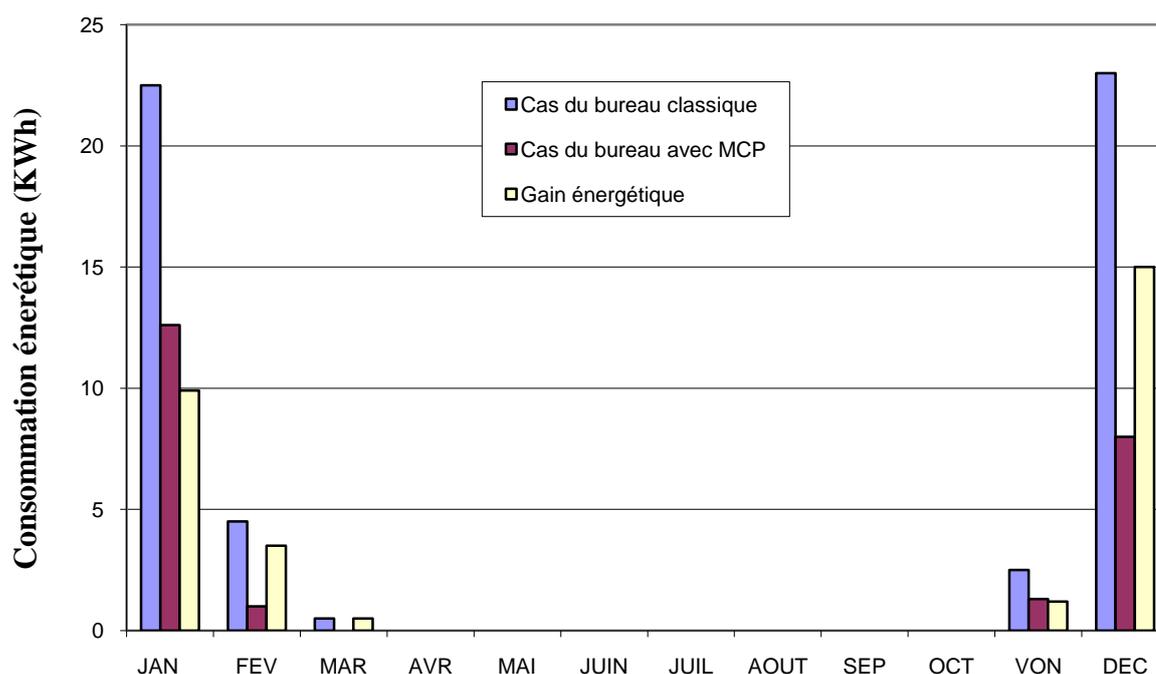


Figure 5.20 : Comparaison de la consommation mensuelle de chauffage du bureau classique et celle du bureau avec MCP (cas de Béchar)

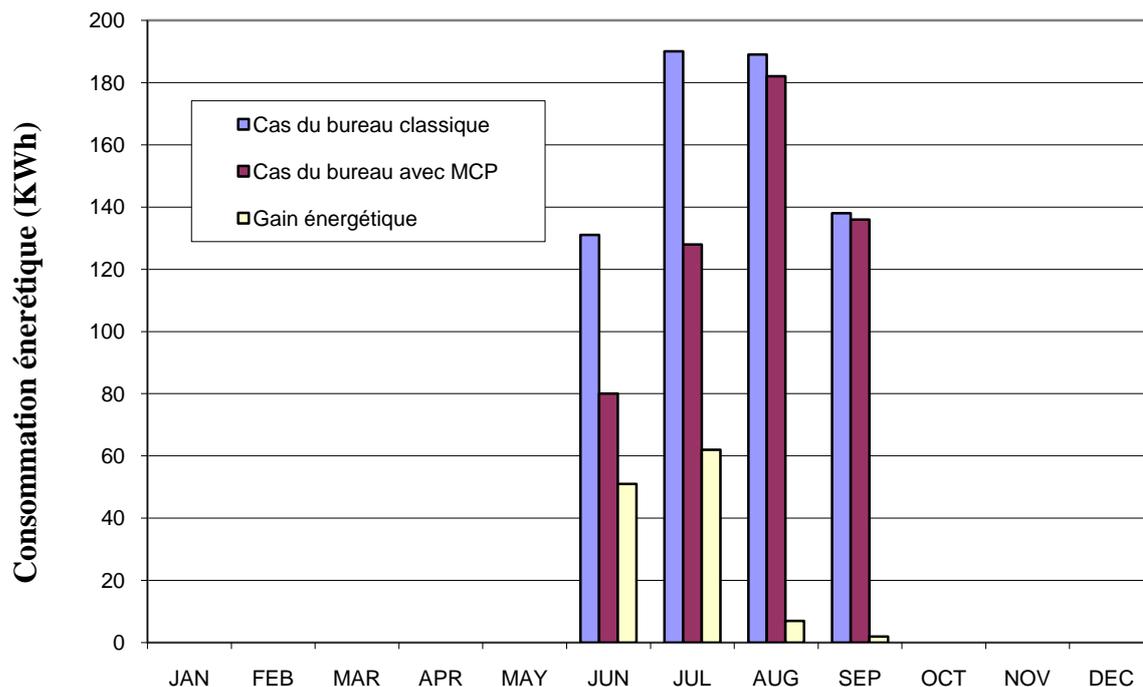


Figure 5.21 : Comparaison de la consommation mensuelle de rafraîchissement du bureau classique et celle du bureau avec MCP (cas de Béchar)

La figure 5.22 illustre les résultats de la consommation annuelle de chauffage et de climatisation du bureau classique et du bureau à parois incorporant un matériau à changement de phase dans la région de Béchar. Le bureau classique consomme environ 701 kWh par an, alors que le bureau avec MCP consomme que 548 kWh par an. Il est constaté que l'utilisation d'un matériau à changement de phase dans les parois d'un local à usage de bureau permet de réaliser 21,7 % d'économie d'énergie, pour le chauffage et la climatisation, dans la région de Béchar.

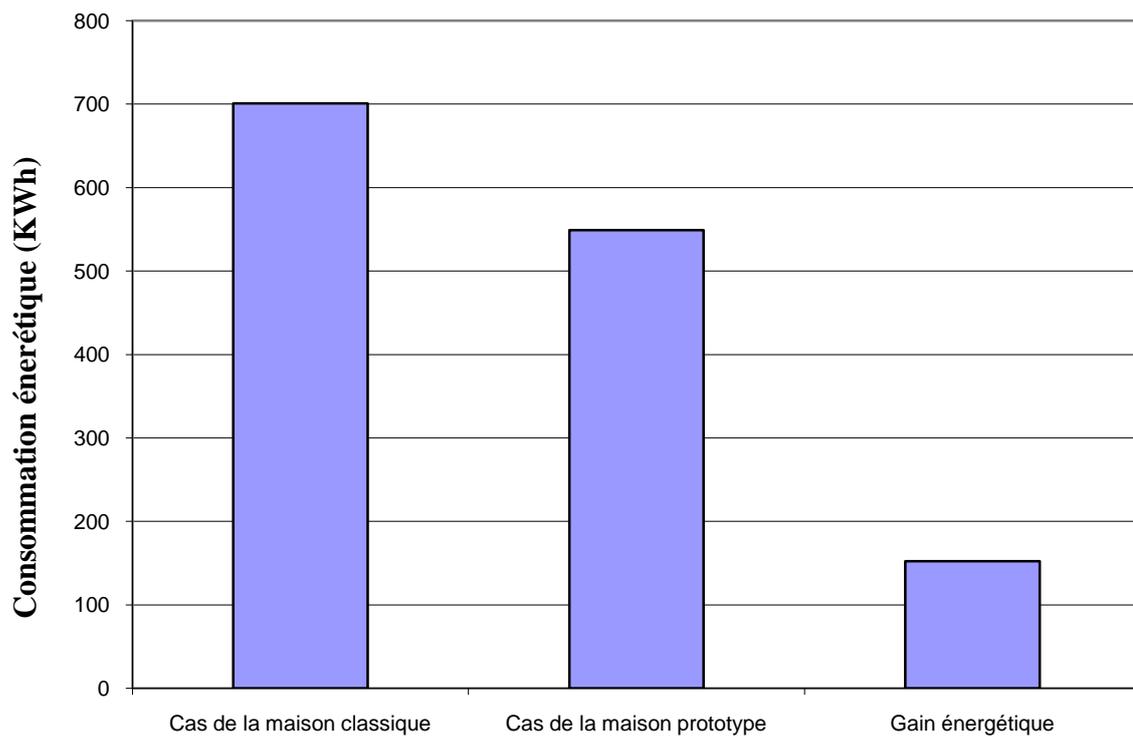


Figure 5.22 : Comparaison de la consommation annuelle de chauffage et de rafraîchissement du bureau classique et celle du bureau avec MCP (cas de Béchar)

### 5.3.10. Comparaison entre les différents matériaux de construction :

Dans cette partie, il a été étudié l'effet de différents matériaux de construction intégrant une couche d'un matériau à changement de phase sur le comportement thermique d'un local à usage de bureau. Il a été pris en compte les matériaux suivants : la brique creuse, le béton, le parpaing et la brique à terre stabilisée. Le tableau 5.5 donne la composition des murs étudiés ainsi que les caractéristiques des différents matériaux.

Tableau .5.5 : Composition des parois et caractéristiques thermiques des différents matériaux

Matériau	Epaisseur (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.k)	C (J/kg.°C)
Brique	0,2	900	0,2	936
Béton	0,2	2200	1,75	1080
BTS	0,2	2000	1,3	1325
Parpaing	0,2	1300	1,1	1080

La figure 5.23 montre l'effet des différents matériaux de construction des murs sur l'évolution de la température du bureau étudié en période d'été, ces résultats montrent que la température de bureau présente des valeurs très élevées qui peuvent atteindre 37 °C. Il est constaté que la brique creuse présente une amplitude de température plus élevée par rapport aux autres matériaux, variant de 33 à 37 °C, cela est dû à la faible inertie thermique de la brique. Le BTS avec sa capacité thermique importante présente la plus faible amplitude de température variant entre 32 et 34 °C.

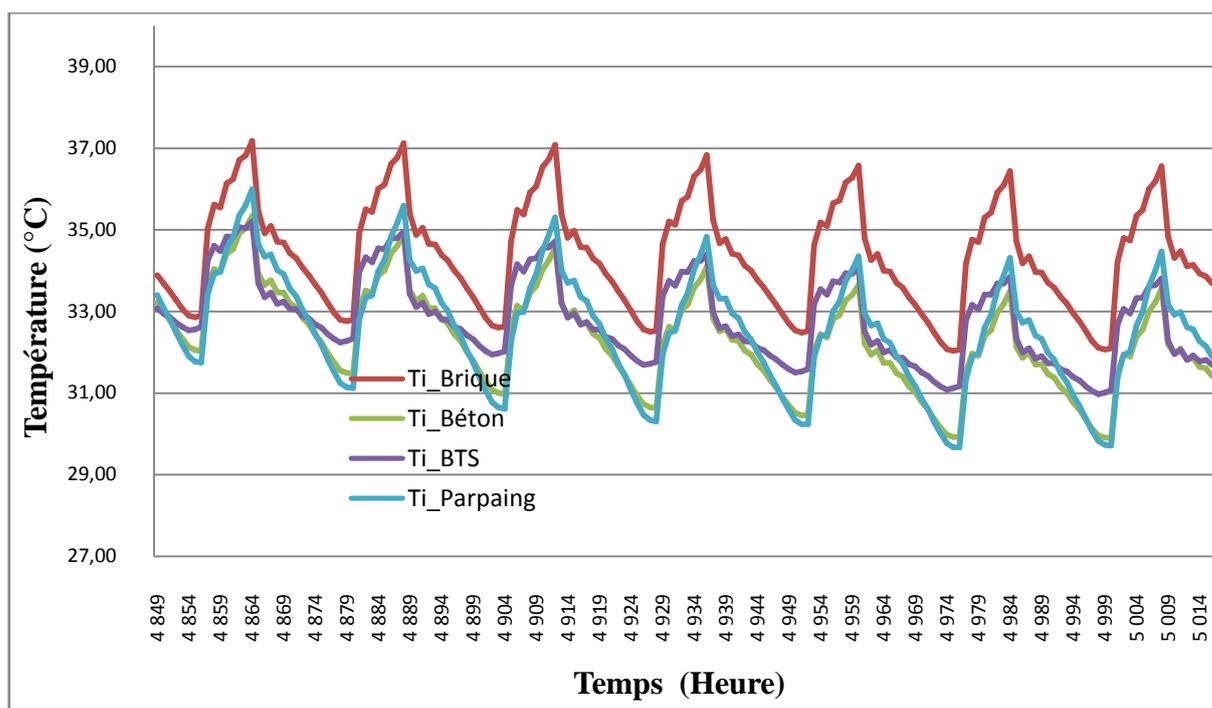


Figure 5.23 : Effet des matériaux de construction sans MCP en été (du 22 au 28 Juillet)

La figure 5.24 présente l'influence de l'intégration d'un MCP avec différents matériaux de construction des murs sur l'évolution de la température du bureau étudié en période d'été, les résultats montrent que la température de bureau varie la plus part du temps entre 25 et 28 °C. L'introduction de MCP avec le BTS présente l'amplitude de température la plus faible par rapport aux autres matériaux. Les résultats montrent que la présence d'une couche de MCP avec les différents matériaux de construction réduit les températures maximales et contribue à améliorer le confort thermique d'été.

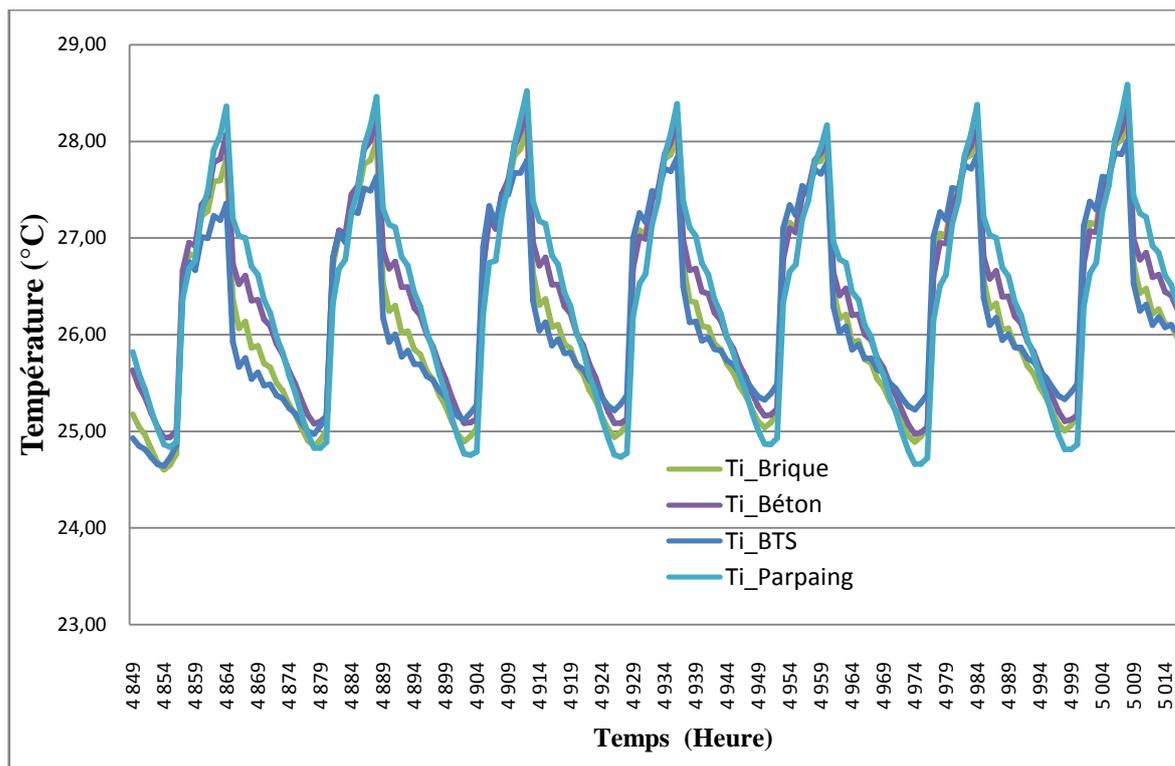


Figure 5.24 : Effet des matériaux de construction avec MCP en été (du 22 au 28 Juillet)

La figure 5.25 illustre l'évolution de la température du bureau, en période d'hiver, pour différents matériaux de construction des murs. Les résultats montrent que les matériaux possédant des conductivités thermiques faibles présentent des températures peu élevées en hiver. Les résultats montrent que l'amplitude de la température pour des murs en briques creuses est plus élevée par rapport à celle des autres matériaux, elle varie entre 17 et 21 °C. Elle est proche de la zone du confort, ceci est dû à la faible conductivité thermique de la brique creuse. Les murs en béton et en parpaing présentent des valeurs minimales très faibles la nuit, elles descendent jusqu'à 14 °C.

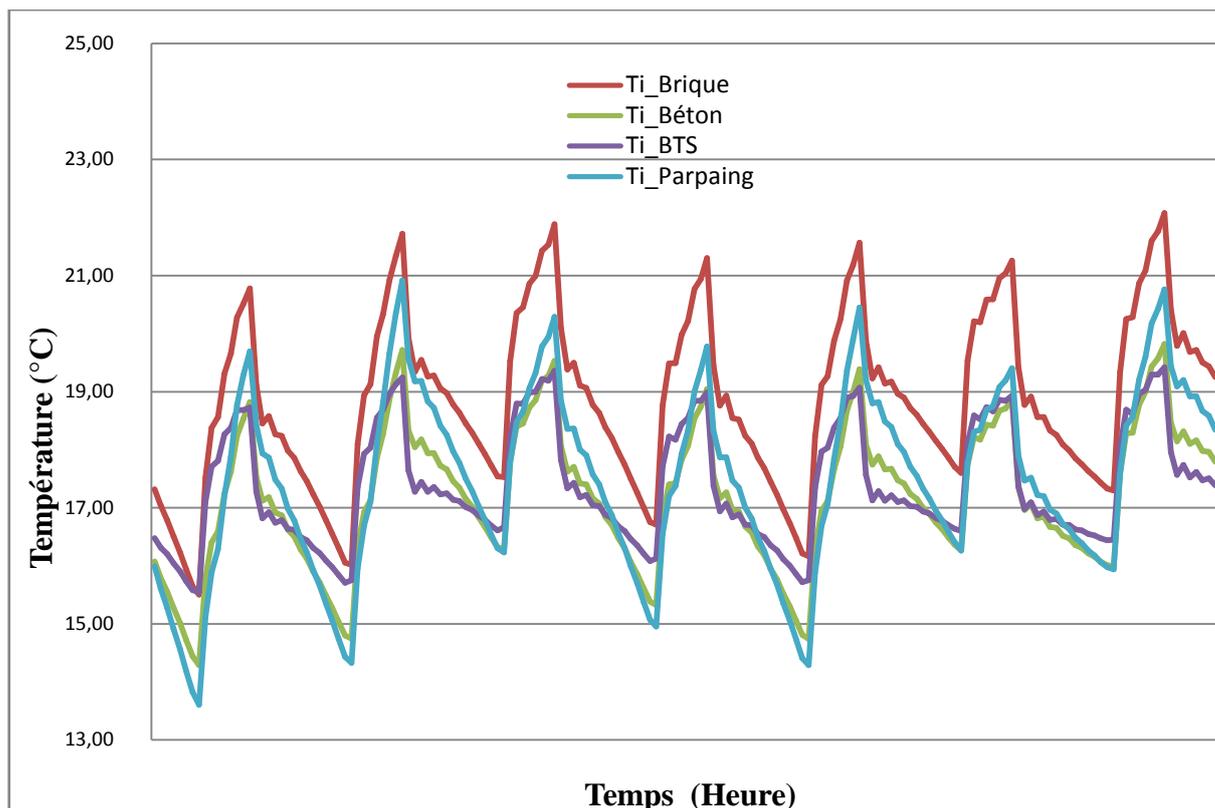


Figure 5.25 : Effet des matériaux de construction sans MCP en hiver

La figure 5.26 présente l'effet de l'intégration d'une couche d'enduit en plâtre/MCP avec différents matériaux de construction des murs sur l'évolution de la température du bureau étudié en période d'hiver.

Les résultats montrent que l'association de MCP avec la brique creuse présente une température plus élevée par rapport aux autres matériaux, elle varie entre 18 et 21°C. Il est constaté que l'intégration de MCP dans les matériaux de construction a contribué à augmenter les températures minimales de 2 °C, durant la nuit, par la restitution de la chaleur emmagasinée pendant la journée.

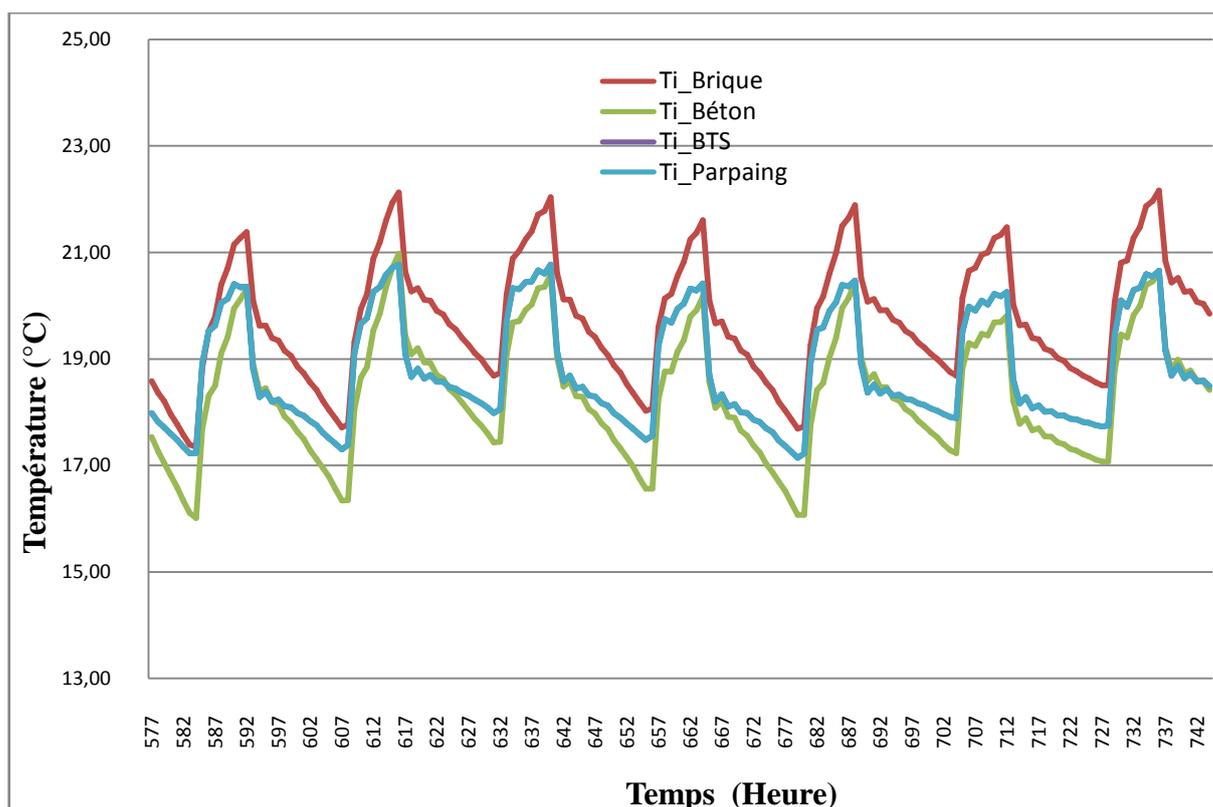


Figure 5.26 : Effet des matériaux de construction avec MCP en hiver

### 5.3.11. Effet de MCP associé à l'isolation thermique

Dans cette partie, il a été étudié l'effet d'associer un matériau à changement de phase à l'isolation thermique sur le comportement thermique d'un local à usage de bureau. Il a été pris en compte les parois suivantes :

Le mur en contact avec l'extérieur est composé d'une double paroi en briques creuses de 10 cm séparée par une couche de 5 cm de polystyrène expansé. La toiture est en béton de 15 cm et isolée de l'extérieur par une couche de 5 cm de polystyrène expansé.

Tableau 5.6 : Composition des parois d'un bureau avec isolation thermique

	<b>Composition</b>	<b>Epaisseur (m)</b>	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.k)	$C$ (J/kg.°C)
<b>Plancher haut</b>	Mortier de ciment	0,03	2200	1,4	1080
	Polystyrène	0,05	20	0,04	1404
	Béton lourd	0,10	2200	1,75	1080
	Plâtre/MCP	0,02	900	-	-
<b>Mur extérieur</b>	Mortier de ciment	0,02	2200	1,4	1080
	Brique	0,10	900	0,48	936
	Polystyrène	0,05	20	0,04	1404
	Brique	0,10	900	0,48	936
	Plâtre/MCP	0,02	900	-	-
<b>Mur intérieur</b>	Plâtre	0,02	2200	1,4	1080
	Brique	0,10	900	0,48	936
	Plâtre/MCP	0,02	900	-	-
<b>Plancher Bas</b>	Béton lourd	0,15	2200	1,75	1080
	Mortier + sable	0,03	2200	1,4	1080
	Carrelage	0,02	1900	1,0	936

La figure 5.27 présente l'effet de MCP associé à l'isolation thermique, en période d'hiver, sur l'évolution de la température de bureau étudié. Il est remarqué que la température de bureau varie entre 15 et 19 °C pour des parois sans isolation. L'isolation de la toiture a permis d'accroître la température de 3 °C, en variant entre 18 et 22 °C. L'isolation de la toiture et du mur extérieur a engendré encore une augmentation de la température de 1°C. Ces résultats ont démontré que l'isolation thermique associée à l'inertie thermique en utilisant un matériau à changement de phase a un rôle important pour l'amélioration du confort thermique en période d'hiver.

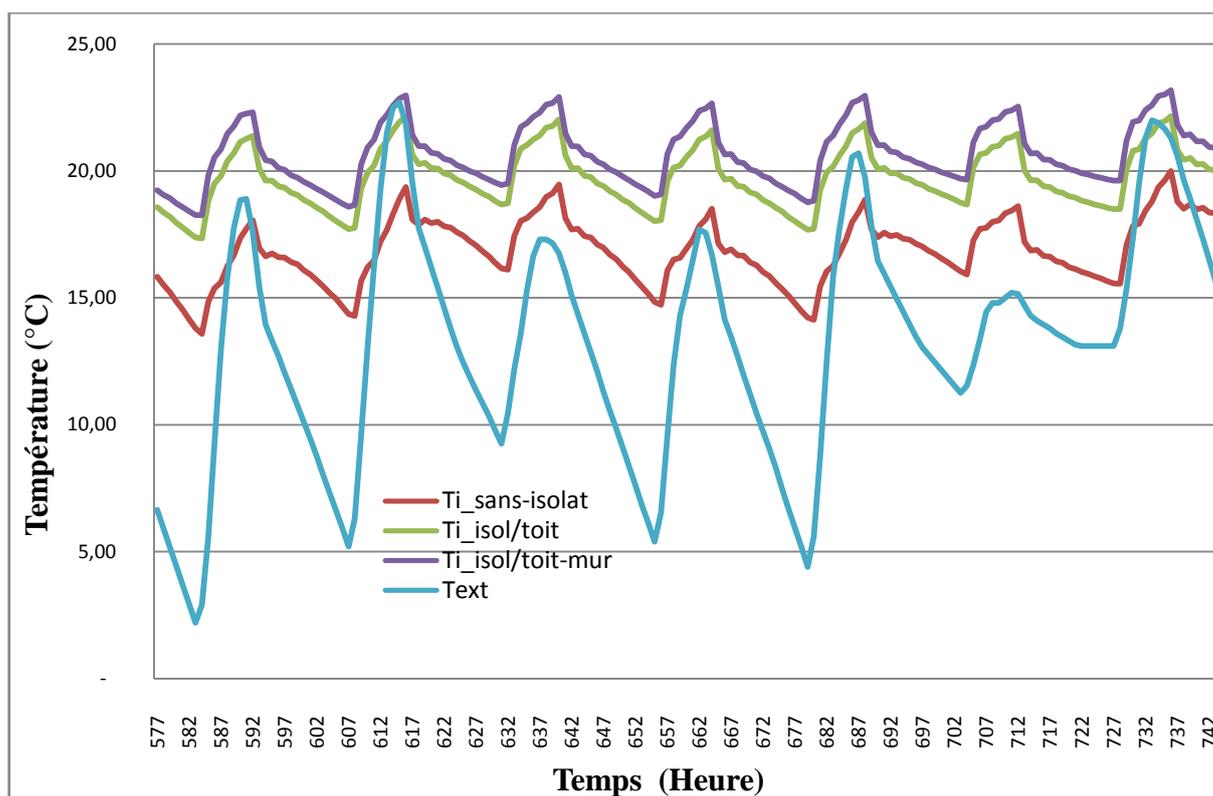


Figure 5.27 : Effet de MCP associé à l'isolation thermique en Hiver

La figure 5.28 présente l'effet de MCP associé à l'isolation thermique, en période d'été, sur le comportement thermique du bureau étudié. Il est remarqué que la température du bureau, pour les différentes parois, varie la plupart du temps entre 25 et 28 °C, ce qui est très proche de la zone de confort d'été.

L'isolation de la toiture et de mur extérieur a réduit légèrement la température maximale du bureau. Il est constaté que l'effet de l'isolation est faible en été par rapport à l'hiver car l'isolation favorise, en été, la surchauffe due aux apports internes durant l'occupation et les apports solaires à travers la fenêtre côté sud.

La présence d'un matériau à changement de phase avec l'isolation thermique a permis d'éviter les pics de température intérieure en stockant les surchauffes ponctuelles et en les étalant dans le temps. Le MCP a contribué à obtenir des températures suffisamment acceptables en période d'été pour réduire en maximum les besoins de rafraîchissement.

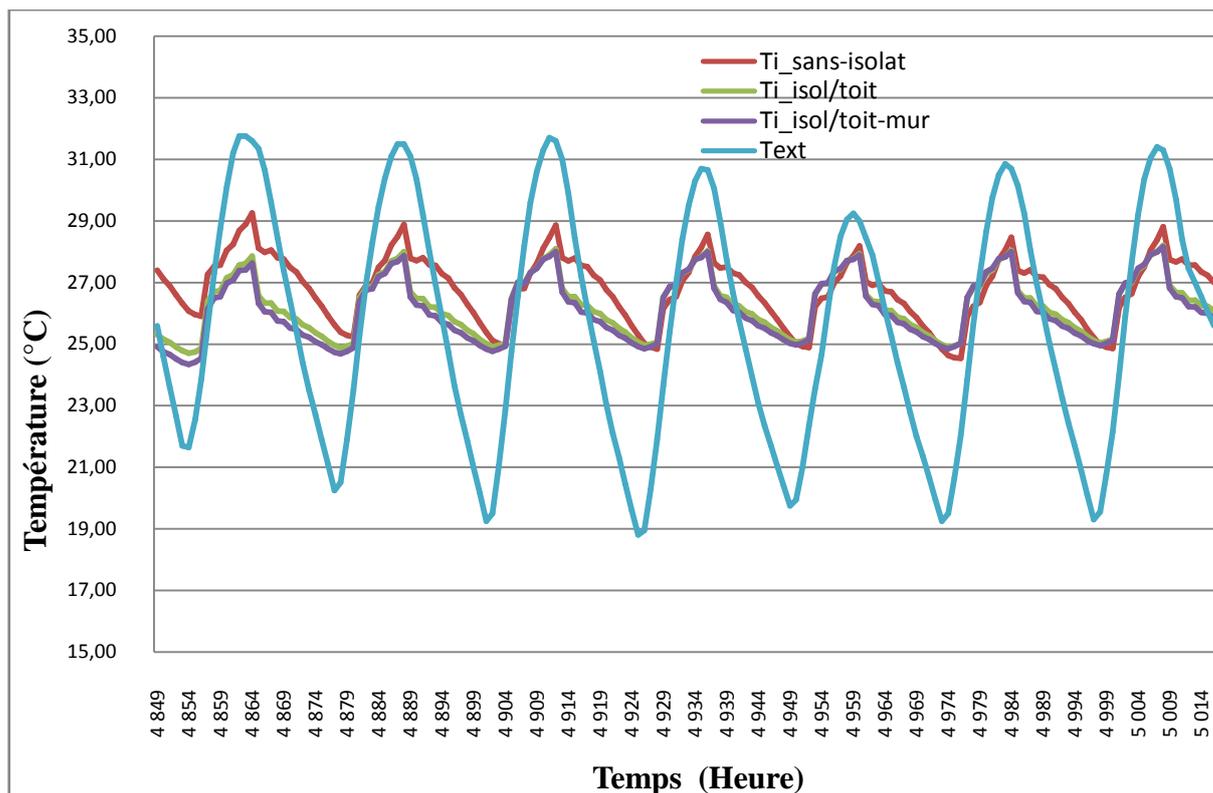


Figure 5.28 : Effet de MCP associé à l'isolation thermique en été

#### 5.4. Conclusion

La simulation thermique en régime dynamique a été effectuée à l'aide du logiciel TRNSYS, afin de comparer le comportement thermique d'un local à usage de bureau à parois de type classique avec un local à parois incorporant des matériaux à changement de phase (MCP) en utilisant le type 204. Les résultats de la simulation ont permis de constater que la présence de 30 % d'un matériau à changement de phase avec du plâtre comme enduit intérieur dans un local à usage de bureaux permet de réaliser jusqu'à 25 % d'économie d'énergie, pour le chauffage et la climatisation, sous le climat de l'Algérie.

## CONCLUSION

Ce travail de thèse a permis d'étudier les transferts de chaleur à travers une paroi composée de matériaux MCP et de voir l'effet des matériaux à changement de phase sur l'amélioration de l'inertie thermique des parois. Dans ce but, l'équation de transfert de chaleur est établie en prenant en compte la conduction et la convection. La résolution de l'équation qui régit le transfert de chaleur par la méthode des différences finies suivant un schéma implicite permet d'analyser les phénomènes ayant lieu dans une paroi intégrant les matériaux MCP.

Ces résultats numériques montrent qu'une épaisseur de 8 cm d'une paroi incorporant un matériau à changement de phase, permet de stabiliser la température de la surface intérieure de la paroi durant les 24 heures, avec une amplitude de température très faible (inférieure à 1°C). La température de la face interne de la paroi varie autour de 23 °C, ceci génère un meilleur confort thermique. Par contre, la température de la surface intérieure des parois des autres matériaux de construction (plâtre, béton, BTS et pierre), varie entre 20 et 26 °C, présentant un déphasage qui ne dépasse pas 3 heures et des amplitudes de température variant de 5 heures à 7 heures.

Ce travail a permis aussi d'étudier le comportement thermique et mécanique des matériaux composites plâtre/MCP. Des mesures des propriétés mécaniques et thermiques ont été effectuées au laboratoire du CNERIB sur le matériau composite plâtre/MCP pour différents pourcentages de matériau à changement de phase MCP.

Les résultats expérimentaux montrent que l'augmentation du pourcentage de matériau à changement de phase (MCP) dans le matériau composite plâtre/MCP engendre une diminution des propriétés mécaniques de ce dernier. Les résultats montrent également que l'incorporation de 30 % de matériau MCP avec le plâtre permet d'améliorer la capacité de stockage thermique de matériau composite (plâtre/MCP) sans fragiliser ses propriétés mécaniques.

Après détermination du pourcentage adéquat de MCP dans le matériau composite plâtre / MCP, nous avons réalisé trois cellules de 1 mètre cube identiques sauf que l'enduit intérieur est différent (cellule 1 avec un enduit intérieur en plâtre pur et les cellules 2 et 3 avec un enduit intérieur en 70 % plâtre / 30 % MCP). Des instruments de mesures ont été mis en place pour déterminer l'influence de matériau MCP sur le comportement thermique des cellules soumises aux conditions climatiques de la banlieue d'Alger.

Les résultats des mesures in situ en période d'été ont montré que, pendant la période ensoleillée, l'incorporation de MCP dans les murs et le plafond de la cellule diminue de 2,5 °C la température maximale de l'ambiance intérieure et réduit l'amplitude (diurne/nocturne) de la température à l'intérieur de la cellule de 4 °C. Les résultats des mesures en période d'hiver montrent que le MCP a permis d'améliorer le confort thermique et d'augmenter la température maximale des cellules de 2 °C.

De plus, la simulation thermique en régime dynamique a été effectuée à l'aide du logiciel TRNSYS, afin de comparer le comportement thermique d'un local à usage de bureau à parois de type classique avec un local à parois incorporant des matériaux à changement de phase en utilisant le type 204. Les résultats de la simulation ont permis de constater que la présence de 30 % d'un matériau à changement de phase avec le plâtre comme enduit intérieur dans un local à usage de bureaux permet de réaliser jusqu'à 25 % d'économie d'énergie, pour le chauffage et la climatisation, sous le climat de l'Algérie. Cela se traduit par la réduction de la consommation du gaz et d'électricité selon les procédés de chauffage et de climatisation utilisés pour assurer le confort thermique des bâtiments. Par conséquent, l'économie d'énergie permet de limiter l'impact du bâtiment sur l'environnement par la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de préserver les énergies fossiles.

## RÉFÉRENCES

1. Consommation énergétique finale de l'Algérie, APRUE, Ministère de l'énergie et des mines, Algérie, Edition 2009.
2. Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, p. 251–283.
3. Tyagi, V.V., Buddhi, D. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, p. 1146–1166.
4. Khudhair, A.M., Farid, M.M. (2004). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, vol. 45, p. 263–275.
5. Hawes, D.W., Feldman, D., & Banu, D. (1993). Latent heat storage in building materials. *Energy and Buildings*, vol. 20, p. 77-86.
6. Feldman, D., Banu, D., Hawes, D., & Ghanbari, E. (1991). Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. *Solar Energy Materials*, vol. 22, p. 231-242.
7. Cabeza, L.F., Castello, C., Nogue's, M., Medrano, M., Zubillaga, O. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, vol.39, p. 113–119.
8. Ling, T.C, & Chi-Sun Poon,C.S. (2013), Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 46,p. 55-62.
9. Kuznik, F., Virgone, J., & Roux, J.J. (2008). Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. *Energy and Buildings*, vol. 40, p. 148–156.
10. Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J.J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15,p. 379–391.

11. Kuznik, F., & Virgone, J. (2009). Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling. *Energy and Buildings*, vol. 41, p. 561–570.
12. Meshgin, P., Xi, Y., & Li, Y., (2012). Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar. *Construction and Building Materials*, vol. 28, p. 713-721.
13. Ahmad, M., Bontemps, A., Salle, H., & Quenard, D., (2006a). Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material. *Energy and Buildings*, vol. 38, p. 357-366.
14. Ahmad, M., Bontemps, A., Salle, H., & Quenard, D., (2006b). Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum insulation panels and phase change material. *Energy and Buildings*, vol. 38, p. 673-681.
15. M. Amirat, S.M.K. El Hassar "Economies d'Énergie dans le Secteur de l'Habitat, Consommation Électrique des Ménages, Cas d'un foyer algérien typique en période d'hiver" CNERIB, Algérie, 2005.
16. Claude-Alain Roulet et Arnaud Dauriat, ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2008.
17. Claude-Alain Roulet, Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments, presses polytechniques et universitaires romandes, 2008.
18. A. Liébard, A. De Herde, *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* – Le moniteur, 2006.
19. Jean Luc Chevalier, stockage thermique par changement de phase aux températures de confort, cahier de CSTB, 1982.
20. L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, p. 1675–1695.
21. Abhat, A. 1983. « Low temperature latent heat thermal energy storage : heat storage materials ». *Solar Energy*, vol. 30, p. 313-332.

22. Mehling H, Cabeza LF. Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications. Springer; 2008.
23. Mehling H, Cabeza LF. Phase change materials and their basic properties. In: Paksoy HO, editor. Thermal energy storage for sustainable energy consumption: fundamentals, case studies and design. Kluwer Academic Publishers Group; 2007. p. 257–78.
24. ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. 1995. *ANSI/ASHRAE Standard 55a-1995: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Norme technique américaine, ISSN 1041-2336, ASHRAE Standard, 5p.
25. Sharma, Atul, V.V Tyagi, C.R Chen et D. Buddhi. 2009. « Review on thermal energy storage with phase change materials and applications ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, p. 318-345.
26. Hasnain, S.M. 1998. « Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage: materials and applications ». *Energy Conversion and Management*, vol.39, n°11, p.1127-1138.
27. Hafner, B. et K. Schwarzer. 1999. « Improvement of the heat transfer in a phase change material storage. » Proceeding of the 4th workshop of IEA ECES IA.
28. Agyenim, F., P. Eames et M. Smyth. 2009. « A comparison of heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins. » *Solar Energy*, vol. 83, p.1509-1520.
29. Baetens, Ruben, Bjorn Petter Jelle et Arild Gustavsen. 2010. « Phase change materials for building applications : A state-of-the-art review ». *Energy and Buildings*, vol.42, p.1361-1368.
30. Abhat, A., D. Heine, M. Heinisch, N.A. Malatidis et G. Neuer. 1981. *Development of a modular heat exchanger with an integrated latent heat storage*. BMFT FBT 81-050. Germany Ministry of Science and Technology. Bonn.
31. Naumann, R. et H.H. Emons. 1989. « Results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials ». *Journal of Thermal Analysis*, vol. 35, p. 1009-1031.

32. Peippo, K., P. Kauranen et P.D. Lund. 1991. «A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating». *Energy and Buildings*, vol. 17, p. 259-270.
33. Kenisarin, M. et K. Mahkamov. 2007. « Solar energy storage using phase change materials ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, p. 1913-1965.
34. Pasupathy, A, R. Velraj et R.V. Seeniraj. 2008. « Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, p. 39-64.
35. Joulin, Annabelle, Zohir Younsi, Laurent Zalewski, Stéphane Lassue, Daniel R. Rousse et Jean-Paul Cavrot. 2011. « Experimental and numerical investigation of a phase change material : Thermal-energy storage and release ». *Applied Energy*, vol. 88, n°7, p. 2454-2462.
36. Hammou, Zouhair Ait et Marcel Lacroix. 2006. « A new PCM storage system for managing simultaneously solar and electric energy ». *Energy and Buildings*, vol. 38, n°3, p.258-265.
37. Zalewski, L., Annabelle Joulin, Stéphane Lassue, Yvan Dutil et Daniel R. Rousse. 2012. «Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material». *Solar Energy*, vol.86, p. 208–219.
38. Sarier, N. et Onder, E. 2007. « The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics ». *Thermochimica Acta*, vol. 452, p. 149-160.
39. Yamagishi, Y., T. Sugeno, T. Ishige, H. Takeuchi et A. Pyatenko. 1996. «An evaluation of microencapsulated PCM for use in cold energy transportation medium» In Proceeding of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1996. IECE 96, p. P2077.
40. Zhang, X-X, Y-F Fan, X-M Tao et K-L Yick. 2005. « Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes ». *Journal of Colloids and Interface Science*, vol. 281, p. 299-306.
41. Dincer, I, Rosen MA. Thermal energy storage. Systems and applications. John Wiley & Sons; 2002.

42. Stovall, T. et J. Tomlinson. 1992. « What Are the Potential Benefits of Including Latent Storage in Common Wallboard ». In *Proceeding of the 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, vol.4, p 265-270.
43. Salyer, I. et A. Sircar. 1990. « Phase Change Materials for Heating and Cooling Residential Buildings and Other Applications » In *Proceeding of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, vol.4, p.236-243.
44. Feldman, D, M.M. Shapiro, P. Fazio et S. Sayegh. 1984. « The compressive strength of cement blocks permeated with an organic phase change material ». *Energy and Buildings*, vol. 6, n°1, p. 85-92.
45. Voelker, C., Kornadt, Ostry, M. 2008. «Temperature reduction due to the application of phase change materials». *Energy and Buildings*, vol.40, p.937–944.
46. Schossig, P., Henning, H.M., Gschwander, S., Haussmann, T. 2005. «Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol.89, p.297–306.
47. Kuznik, F., Virgone, J. 2009. «Experimental assessment of phase change material for wall building use». *Applied Energy*, vol.86, p.2038–2046.
48. Oliver, A., 2012. «Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat». *Energy and Buildings*, vol.4, p.81–7.
49. Liu, H., Hanzim B., Awbi, 2009. «Performance of phase change material boards under natural convection». *Building and Environment*, vol.44, p.1788–1793.
50. Shilei, L., Guohui, F., Neng, Z., Li, D. 2007. «Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards». *Energy and Buildings*, vol.39, p.1088–1091.
51. Shilei, L., Guohui, F., Neng, Z. 2006. «Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter». *Energy and Buildings*, vol.38, p.18–24.
52. Entrop, A.G., Brouwers, H.J.H., Reinders, A.H.M.E. 2011. «Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses». *Solar Energy*, vol.85, p.1007–1020.

53. Arce, P., Castellón, C., Castell, A., Cabesa, L.F., 2012. «Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings». *Energy and Buildings*, vol.44, p.88–93.
54. Hunger, M., Entrop, A.G., 2009 «The behaviour of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials». *Cement and Concrete Composites*, vol.31, p.731–743.
55. Li, Y., Xi, Y., 2006. «Study on the properties of portland cement mortar and concrete containing crumb rubber aggregate». *Concrete*, vol.200, p.45–8.
56. Li, Y., Jin, C., Xi, Y. 2006. «The properties of sulfur rubber concrete (SRC)». *J Wuhan Univ Technol – Mater Sci Ed*, vol.21, p.129–33.
57. Dehdezi, P.K., Hall, M.R., Dawson, A.D., & Casey, S.P., 2012. «Thermal, mechanical and microstructural analysis of concrete containing microencapsulated phase change materials». *International Journal of Pavement Engineering*, vol.1, p.1–14.
58. Zhang, Z., et al. 2013. «Thermal energy storage cement mortar containing n-octadecane/expanded graphite composite phase change material». *Renewable Energy*, vol.50, p.670-675.
59. Lazaro, A., Dolado, P., Jose, M., Marín, Zalba, B., 2009 «PCM–air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Experimental results of two real-scale prototypes». *Energy Conversion and Management*, vol.50, p.439–43.
60. DTR C3-2, Réglementation thermique des bâtiments d’habitation – Règle de calcul des déperditions calorifiques, CNERIB, Algérie, Décembre 1997.
61. Norme ( NA 5073 ). (2004). Plâtre et enduit à base de plâtre pour le bâtiment, méthode d’essai.
62. Norme (ISO 3051). (1974). Gypsum plasters. Determination of mechanical properties.
63. DTR E 6.2.1. Travaux d’enduits intérieurs en plâtre, CNERIB, Algérie, 2004.
64. Norme (ISO 8894-1). (2010). Refractory materials. Determination of thermal conductivity. Part 1: Hot-wire methods (cross-array and resistance thermometer).

65. Norme (NF EN 13279-1). (2005). Plâtre et enduit à base de plâtre pour le bâtiment, définitions et prescriptions.
66. Model 2700 multimeter/data acquisition system service manual, Keithley Instruments, Cleveland Ohio, U.S.A, February 2000.
67. Testo 175-T3, Deux entrées sondes de température externes.
68. Le manuel de l'utilisateur, station météorologique WMR928, LITTOCLIME, France.
69. Zhou, G., Zhang, Y., Wang, X., Lin, K., and Xiao, W. (2007a). "An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar heating." *Solar Energy*, 81(11), 1351–1360.
70. Zhou, G., Zhang, Y., Zhang, Q., Lin, K., and Di, H. (2007b). "Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase change material plates." *Appl. Energy*, 84(10), 1068–1077.
71. Lamberg, P., Lehtiniemi, R., Henell, A. M. 2004. Numerical and experimental investigation of melting and freezing Numerical and experimental investigation of melting and freezing. *International Journal of Thermal Sciences*: 43 277–287.

## APPENDICE A

## LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

C	Chaleur spécifique	J/kg. K
e	Épaisseur de la paroi	m
h	Enthalpie	J/kg
he	Coefficient d'échange convectif intérieur	W/m <sup>2</sup> .K
hi	Coefficient d'échange convectif extérieur	W/m <sup>2</sup> .K
t	Temps	s
T	Température	°C
$\lambda$	Conductivité thermique	W/m .K
$\rho$	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
Q	Quantité de chaleur	J
m	Débit massique	Kg/s
$\alpha$	Diffusivité thermique	m <sup>2</sup> /s
e <sub>th</sub>	Effusivité thermique	W.s <sup>0.5</sup> /m <sup>2</sup> .K
$\Delta t$	Intervalle de temps	s
$\Delta x$	Intervalle de distance	M

**Indices**

e	Extérieur
i	Intérieur
k	Couche de la paroi
MCP	Matériaux à changement de phase

## APPENDICE B

### FICHE TECHNIQUE DU MICRONAL DE LA SOCIÉTÉ BASF

Le Micronal est un matériau à changement de phase en paraffine encapsulée par un polymère, il est développé et commercialisé par la société BASF. Le Micronal peut être incorporé dans les matériaux de construction sous forme de poudre ou de liquide (figure B.1). Le tableau B.1 présente la gamme du produit de Micronal.



Figure B.1: Micronal sous forme de poudre ou de liquide

Tableau B.1: Gamme du produit et caractéristiques du Micronal

Produit	Application			Caractéristiques				
	L'heure d'été la protection excessive de chauffage	Stabilisation de la température intérieure /Application passive et active	Systèmes de refroidissement des surfaces	Type de produit	Point de fusion [°C]	Chaleur latente [kJ / kg]	Densité [kg / m <sup>3</sup> ]	Viscosité [mPa • s]
Micronal® DS 5000	X			Liquide	26	45		200-600
Micronal® DS 5001	X			Poudre	26	110	250-350	
Micronal® DS 5007		X		Liquide	23	43		200-600
Micronal® DS 5008		X		Poudre	23	100	250-350	
Micronal® DS 5030			X	Liquide	21	37		200-600
Micronal® DS 5029			X	Poudre	21	90	250-350	
Micronal® DS 5037 x	X			Liquide	26	45		200-600
Micronal® DS 5038 x	X			Poudre	26	110	250-350	
Micronal® DS 5039 x		X		Liquide	23	43		200-600
Micronal® DS 5040 x		X		Poudre	23	100	250-350	

**APPENDICE C**  
**RÉSULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE**

Tableau C.1 : Résultats d'essais de la résistance à la flexion

Compositions	Charge de rupture (N)	Résistance à la flexion (N/mm <sup>2</sup> )	Résistance à la flexion moyenne (N/mm <sup>2</sup> )
Composition 1	700	1,638	1,62
	550	1,287	
	830	1,9422	
Composition 2	430	1,0062	1,11
	480	1,1232	
	510	1,1934	
Composition 3	430	1,0062	1,08
	420	0,9828	
	540	1,2636	
Composition 4	235	0,5499	0,60
	260	0,6084	
	270	0,6318	
Composition 5	2450	5,733	5,46
	2300	5,382	
	2250	5,265	
Composition 6	660	1,5444	1,54
	550	1,287	
	770	1,8018	

Tableau C.2 : Résultats d'essais de la résistance à la compression

Compositions	Charge de rupture (N)	Résistance à la compression (N/mm <sup>2</sup> )	Résistance à la compression moyenne (N/mm <sup>2</sup> )
Composition 1	5800	3,625	3,17
	5530	3,45625	
	4090	2,55625	
	4150	2,59375	
	5250	3,28125	
	5600	3,5	
Composition 2	2720	1,7	1,61
	2350	1,46875	
	2600	1,625	
	2950	1,84375	
	2200	1,375	
	2590	1,61875	
Composition 3	2200	1,375	1,52
	2090	1,30625	
	2600	1,625	
	2950	1,84375	
	2200	1,375	
	2590	1,61875	
Composition 4	1320	0,825	0,96
	1530	0,95625	
	1490	0,93125	
	1590	0,99375	
	1490	0,93125	
	1780	1,1125	
Composition 5	30450	19,03125	19,09
	37260	23,2875	
	20610	12,88125	
	27100	16,9375	
	34670	21,66875	
	33140	20,7125	
Composition 6	6100	3,8125	3,83
	5720	3,575	
	5870	3,66875	
	6000	3,75	
	6780	4,2375	
	6340	3,9625	

Tableau C.3 : Résultats d'essais de la résistance d'adhésion

Compositions	Charge de rupture (N)	Résistance d'adhésion (N/mm <sup>2</sup> )	Résistance d'adhésion moyenne (N/mm <sup>2</sup> )
Composition 1	700	0,36	0,36
	650	0,33	
	750	0,38	
Composition 2	600	0,31	0,29
	600	0,31	
	500	0,25	
Composition 3	520	0,26	0,25
	500	0,25	
	450	0,23	
Composition 4	470	0,24	0,22
	450	0,23	
	400	0,20	
Composition 5	150	0,08	0,08
	160	0,08	
	150	0,08	
Composition 6	90	0,05	0,05
	100	0,05	
	115	0,06	

Tableau C.4 : Résultats d'essais de la dureté

Compositions	Dureté Shore C	Dureté moyenne Shore C
Composition 1	75	69,17
	60	
	70	
	70	
	65	
	75	
Composition 2	57	58,67
	60	
	60	
	59	
	55	
	61	
Composition 3	50	51,33
	50	
	45	
	55	
	48	
	60	
Composition 4	45	40,50
	40	
	37	
	43	
	40	
	38	
Composition 5	25	19,00
	20	
	19	
	15	
	15	
	20	
Composition 6	10	10,00
	8	
	10	
	12	
	9	
	11	
	10	

Tableau C.5 : Résultats d'essais de la conductivité thermique

Compositions	Conductivité thermique W/m.°C	Conductivité thermique moyenne W/m.°C
Composition 1	0,37	0,40
	0,371	
	0,45	
Composition 2	0,466	0,49
	0,488	
	0,521	
Composition 3	0,537	0,55
	0,54	
	0,586	
Composition 4	0,74	0,73
	0,67	
	0,767	
Composition 5	0,842	0,87
	0,868	
	0,912	
Composition 6	0,997	1,11
	1,228	
	1,11	

Tableau C.6 : Résultats d'essais de la chaleur spécifique

Compositions	Chaleur spécifique J/kg.°C	Chaleur spécifique moyenne J/kg.°C
Composition 1	884,7	939
	953,1	
	978,3	
Composition 2	1209,6	1224
	1198,8	
	1262,7	
Composition 3	1396,8	1407
	1458,9	
	1365,3	
Composition 4	2122,2	2303
	2484	
	2303,1	
Composition 5	2582,1	2663
	2669,4	
	2737,8	
Composition 6	2859,3	3108
	3356,1	
	3109,5	