

République Algérienne Démocratique et
Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique
Université « SAAD DAHLAB » de BLIDA 1
Institut d'Architecture et d'Urbanisme



Lab ETAP

THESE DE DOCTORAT D/LMD
ARCHITECTURE, PATRIMOINE BATI ET ENVIRONNEMENT

**INTEGRATION DE NOUVEAUX MATERIAUX DANS
LE BATIMENT : Impact sur le confort thermique et les
économies d'énergie**

**Présenté par
BOUSSABA Lisa**

Sous la Direction de :

**MAKHLOUF Saïd
LEFEBVRE Gilles**

Nom et prénoms	Jury	Grade	Institution
Chergui Samia	Président	Pr.	Université de Blida 1
Draoui Belkacem	Examineur	Pr.	Université de Bechar
Mohammedi Kamal	Examineur	Pr.	Université de Boumerdes
Cheikh Zouaoui Mustapha	Examineur	Pr.	Université de Blida 1
Lefebvre Gilles	Rapporteur	Pr.	Université Paris Est Créteil
Makhlouf Saïd	Rapporteur	Pr.	Université de Tizi- Ouzou

Année Universitaire : 2019/2020

« L'Architecture est une science qui embrasse une grande variété d'études et de connaissances »

Vitruve 1847. L'an 80 av. J.C.

À ceux qui m'ont soutenue et aidée

À ceux qui souhaitent sincèrement me voir réussir

Je leur dédie le fruit de mes efforts

RESUMÉ

L'intégration passive des matériaux à changement de phase bio-sourcés (bio-MCP) dans le bâtiment est une nouvelle solution reconnue efficace pour améliorer le confort thermique et faire des économies d'énergie avec des moyens simples et peu coûteux. Ces matériaux peuvent être intégrés aussi bien dans le bâtiment neuf que dans l'existant pour opérer des réhabilitations thermiques.

De nouveaux bio-MCP couplés à une matrice argileuse bio-sourcée ont fait l'objet d'un nouveau composite-MCP. La longue opération de caractérisation du matériau a prouvé son efficacité comme candidat potentiel pour les applications visées dans le bâtiment.

Un protocole d'application du nouveau matériau dans des enveloppes en brique de terre cuite double cloison a été proposé. Son efficacité thermique a été testée expérimentalement sur un banc d'essais et numériquement sur Comsol Multi physics 3.5a®.

L'impact de l'intégration du nouveau matériau à l'échelle d'un bâtiment sous les conditions climatiques de la ville d'Alger a été étudié numériquement sous Energy-Plus V 8-7-0. Les résultats montrent que le composite-MCP contribue plus efficacement à l'amélioration du confort d'été, son impact est faible pendant la saison froide et la demi-saison.

La simulation énergétique confirme les résultats de la simulation thermique, l'intégration du nouveau matériau dans l'enveloppe du bâtiment testé a une incidence sur la réduction des besoins en énergie due à la climatisation, l'impact sur les besoins de chauffage est faible.

Les résultats de cette recherche montrent que le nouveau matériau convient aux applications dans les bâtiments situés sous des climats où les besoins de climatisation sont les plus dominants à l'instar des climats des villes algériennes.

ABSTRACT

The passive integration of Bio-based Phase Change Materials (Bio-based PCM) into the building envelopes is recognized as a solution that is effective in improving thermal comfort and saving energy with simple and inexpensive means. These materials can be integrated both in the new buildings and in the existing ones to operate thermal rehabilitations.

A novel Bio-based PCM coupled to a Bio-based clay matrix has been the subject of a new composite-PCM elaborated in this project. The long characterization process of the material proved its efficiency as a potential candidate in building applications.

An application protocol of the novel material into a double-walled hollow brick envelopes is proposed. Its thermal efficiency was tested experimentally in a testbed and numerically on Comsol Multiphysics 3.5a® software.

The impact of the integration of the novel material in a building under the climatic conditions of Algiers was studied numerically by Energy-Plus V 8-7-0 software. The results show that the composite-PCM contributes more effectively to the improvement of summer comfort; however, its impact is less important during the cold season and the mid-season.

The energy simulation confirms the results of the thermal simulation. The integration of the novel tested material in the building envelope has an effective impact on the reduction of energy needs due to air conditioning, when the impact on heating needs is low.

The results of this research show that the new elaborated material is suitable for building applications located in climates where air conditioning needs are the most dominant like the Algerian cities' climates.

ملخص

المواد متغيرة الطور (MCP) عبارة عن مواد تمتص كمية كبيرة من الطاقة الحرارية عند الانصهار وتقوم بتحريرها عند التصلب. لذلك إحدى استخدامات هذه المواد هي تخزين الطاقة الحرارية، حيث يمكن للمواد متغيرة الطور المدمجة مع مواد البناء أن تزيد من العنونة الحرارية للأبنية وأن تخفض الطاقة اللازمة للتدفئة والتكييف. يكمن استخدام هذه المواد في المباني حديثة الإنشاء أو القديمة من أجل التكييف أو إعادة التهوية على حد سواء.

يهدف هذا البحث الي دراسة الخصائص الترموفيزيائية والميكانيكية لمادة جديدة عبارة عن خليط من مواد متغيرة الطور، مواد بناء صديقة للبيئة ومواد ذات إيصاليه حرارية مرتفعة وتأثير استخدامها على السلوك الحراري للبناء عند الشروط المناخية للمدن الجزائرية. وقد مكنت دراسة الخصائص الترموفيزيائية من اثبات فعالية وجدوائية استخدام المادة المركبة الجديدة لتخزين الطاقة الحرارية الزائدة داخل المباني بشكل كامل.

تم خلال هذه الدراسة اقتراح بروتوكول استخدام للمادة الجديدة في هيكل المباني (الجدران الداخلية) ذات جدران من الطين النضيج. تمت أيضا دراسة العنونة الحرارية للمادة قيد البحث من خلال دراسة تجريبية ودراسة رقمية بفضل برنامج المحاكاة الرقمية متعدد الفيزياء ©3.5a Comsol Multi physics.

أظهرت نتائج محاكاة السلوك الحراري باستخدام برنامج المحاكاة الرقمية Energy-Plus V 8-7-0 لعمارة عند الشروط المناخية لمدينة الجزائر العاصمة، ان ادماج الماد متغيرة الطور المركبة الجديدة في الجدران الداخلية للعمارة يؤدي الي تحسين الشعور بالراحة الحرارية للقاطنين في البناء بالإضافة الي انخفاض كبير لأحمال التبريد الذي يؤدي بدوره إلى تقليل استهلاك الطاقة بينما كان تأثيرها منخفض على احمال التدفئة أي خلال المواسم الباردة والانتقالية.

وتوصلت الدراسة الي ان الماد متغيرة الطور المركبة الجديدة، المنشئة في إطار هذا البحث، تتمتع بفاعلية قصوى في المناطق التي تتميز بالحاجة الي التكييف أكثر من التدفئة على مدار السنة وهو السلوك الحراري في اغلب المناطق والمدن الجزائرية.

REMERCIEMENTS

Quatre superbes années de thèse qui s'achèvent mais qui m'auront ouvert les portes pour débiter des travaux de recherche passionnants autour des matériaux à changement de phase dans le bâtiment. Bien plus qu'une expérience scientifique et intellectuelle, ces années m'auront été une école sur le plan humain et administratif ; mais également une occasion de me frotter à des personnes hautement qualifiées ayant fait preuve de générosité pour m'orienter, me conseiller et aiguiller mes connaissances.

Je ne saurais jamais remercier assez mon directeur de thèse P^r Saïd MAKHLOUF de m'avoir embarquée dans ce monde fascinant et d'avoir su me conduire. Je le remercie d'avoir été patient avec moi à mes débuts de thèse et de m'avoir supportée pendant cette période qui m'était particulièrement tendue en tant que nouvelle thésarde... Je n'oublierai jamais ses encouragements lorsque les premiers résultats commençaient à voir le jour, je n'aurais jamais pu avancer sans cela. Je vous remercie de votre générosité intellectuelle et d'avoir permis à la jeune thésarde que j'étais, qui débarquait fraîchement de la graduation de mûrir sur vos pas dans le nouveau monde de la post-graduation.

Un énorme MERCI à mon co-directeur de thèse le Pr Gilles LEFEBVRE grâce à qui j'ai pu découvrir d'autres horizons en France. Merci grandement de m'avoir aussi bien accueillie au laboratoire CERTES de l'université Paris XII et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens matériels et intellectuels qui m'ont permis de mener à bien la caractérisation thermo-physique des nouveaux composites-MCP ainsi que la partie numérique de ce travail. C'est grâce à votre rapidité à déceler les problèmes rencontrés en numérique que j'ai pu avancer dans ce monde qui m'était complètement nouveau. Je n'oublierai pas de vous exprimer ma reconnaissance de m'avoir permis de travailler au Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain (LIED) de l'université Paris VII avec le P^r Laurent ROYON.

Je profite de cette occasion pour exprimer ma profonde gratitude envers Laurent ROYON. Sa disponibilité, son dynamisme, sa générosité et surtout sa confiance en moi m'ont énormément aidée à dénouer les problèmes que j'ai pu rencontrer tant en caractérisation par DSC qu'en numérique sur Comsol Multi-

Physics 3.5a. J'ai beaucoup appris de Laurent et mes remerciements ne pourront jamais égaler tout ce qu'il a fait pour moi.

Je n'oublierai pas de remercier P^r Amina FOUFA pour sa disponibilité, et ses encouragements. C'est grâce à votre courage, et bonne volonté qu'on en est aujourd'hui là au laboratoire ETAP. Je n'oublierai pas de vous exprimer mes sincères remerciements de ne pas avoir hésité un moment à m'établir les demandes administratives d'introduction dans plusieurs laboratoires nationaux pour me permettre d'effectuer des tests de caractérisation. Merci de m'avoir accompagnée dans le laboratoire FUNDAPL de Blida pour appuyer ma demande d'effectuer les tests de caractérisation par MEB. Un grand merci de m'avoir permis de profiter de l'expérience « Solar Decathlon Europe 2019 » en Hongrie.

Je saisis cette occasion pour remercier tous les responsables des laboratoires ayant répondu favorablement à mes demandes d'outils de caractérisation. Merci aux techniciens de laboratoires qui ont eu la gentillesse de m'aider durant cette phase.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance particulière envers les mécaniciens du Hall de technologie de l'université de Tizi-Ouzou d'avoir été à l'écoute pour usiner et ré-usiner des pastilleuses en aluminium et en acier inoxydable adaptées exactement à nos besoins d'élaboration des échantillons du nouveau matériau composite. Je remercie Saci Tarek, étudiant en génie mécanique d'avoir participé efficacement à l'usinage des pastilleuses auprès des techniciens du Hall de technologie afin de gagner du temps et me permettre au plus vite d'avoir mes moules. Merci Tarek, tu es plus qu'un cousin mais un petit frère, je suis certaine que tu seras un excellent mécanicien.

Je souhaite remercier les membres du jury de ma soutenance de faire honneur à cette thèse par leurs lectures ainsi que leurs critiques constructives qui permettront de juger mon travail. Je vous remercie de tenir ce rôle clé à ce stade de la recherche. Les défauts et les qualités que vous rapportez à travers votre analyse me sont précieux.

Pour finir je remercie tous mes amis chercheurs (doctorants, post-doctorants...) que j'ai pu rencontrer en Algérie ou à l'étranger avec qui j'ai pu échanger des idées, des connaissances ou même des expériences scientifiques personnelles qui apportent toujours un plus.

TABLE DES MATIERES

RESUMÉ	I
ABSTRACT	II
REMERCIEMENTS	IV
TABLE DES MATIERES	VI
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	XV
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : UTILISATION DES MCP POUR LE CONFORT THERMIQUE DANS LE BÂTIMENT	7
1.1 INTRODUCTION	7
1.2 CONTEXTE : OBJECTIFS ET MOTIVATIONS.....	8
1.3 REPÈRES HISTORIQUE SUR L'UTILISATION DES MCPs DANS LE BÂTIMENT	9
1.4 LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE ET LES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE	12
1.4.1 <i>Le stockage sensible de l'énergie thermique dans le bâtiment</i>	13
1.4.2 <i>Le stockage latent de l'énergie thermique dans le bâtiment</i>	15
1.5 LES MATÉRIAUX À CHANGEMENT DE PHASE (MCPs) DANS LE BÂTIMENT.....	17
1.5.1 <i>Généralités sur les Matériaux à Changement de Phase</i>	17
1.5.2 <i>Les substances utilisables comme MCPs dans le bâtiment</i>	23
1.5.3 <i>L'utilisation des bio-MCPs dans le bâtiment</i>	26
1.5.4 <i>Le conditionnement des MCPs avant l'utilisation dans le bâtiment</i>	26
1.5.5 <i>Les modes d'intégration des MCPs ou des composites-MCPs dans le bâtiment</i>	31
1.5.6 <i>Étude de quelques exemples de bâtiments intégrant des MCPs</i>	34
1.6 LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET L'EXPÉRIMENTATION DES MCPs DANS LE BÂTIMENT.....	41
1.7 CONCLUSION.....	44
CHAPITRE 2 : MATERIEL, MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES D'ÉLABORATION DES NOUVEAUX MATÉRIAUX COMPOSITES-MCP	46
2.1 INTRODUCTION	46
2.2 ÉTUDE DU CHOIX DES MATRICES POUR LE CONDITIONNEMENT DES MCPs	47
2.2.1 <i>Description des matrices retenues pour l'élaboration du nouveau matériau composite-MCP</i>	49
2.2.2 <i>Proposition d'additifs obtenus par recyclage des déchets pour améliorer les propriétés des matrices</i>	54
2.3 RECHERCHE DE SUBSTANCES MCPs BIO-SOURCÉS APPROPRIÉES AUX APPLICATIONS PASSIVES DE STOCKAGE LATENT DE LA CHALEUR DANS LE BÂTIMENT	57
2.3.1 <i>Propriété des bio-MCPs à basses températures de fusion retenus pour l'étude</i>	60
2.4 MÉTHODE D'ÉLABORATION DES NOUVEAUX MATÉRIAUX COMPOSITES-MCP	66
2.4.1 <i>Préparation des matrices pour le conditionnement des MCPs</i>	67
2.4.2 <i>Le conditionnement des bio-MCPs dans la matrice préparée</i>	73
2.4.3 <i>Processus d'élaboration des panneaux composites-MCP</i>	80
2.5 CONCLUSION.....	81
CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES NOUVEAUX MATÉRIAUX : IDENTIFICATION DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET MÉCANIQUES	83
3.1 INTRODUCTION	83
3.2 PRÉSENTATION DES OUTILS ET DES TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION	84
3.2.1 <i>La caractérisation thermique</i>	84
3.2.2 <i>La caractérisation physico-chimique</i>	92
3.2.3 <i>La caractérisation mécanique</i>	99

3.3	IDENTIFICATION DES PROPRIÉTÉS DES COMPOSÉS UTILISÉS DANS LE PROCESSUS D'ÉLABORATION DES NOUVEAUX MATÉRIAUX.	101
3.3.1	<i>Propriétés des composés des matrices</i>	102
3.3.2	<i>Caractérisation des MCPs retenus pour les applications visées</i>	108
	<i>Caractérisation des composites (PP/FC/Gr/Paraffine)</i>	112
3.4.2	<i>Caractérisation des composites à base d'argile naturelle (AN/FC/Gr/GVC)</i>	121
3.4.3	<i>Caractérisation des composites (AN/FC/Gr/GVP)</i>	129
3.4.3.6	<i>Caractérisation mécanique à la compression simple des composites (AN/FC/GVP).</i>	136
3.4.4.1	<i>La caractérisation par calorimétrie différentielle à balayage des nouveaux composites-MCP4</i>	139
3.4.4.2	<i>La caractérisation par Microscopie Électronique à Balayage</i>	141
3.4.4.3	<i>La caractérisation par FT-IR</i>	141
3.4.4.4	<i>La caractérisation de la conductivité thermique par Hot-disk</i>	142
3.5	ÉTUDE DU VIEILLISSEMENT THERMIQUE DES NOUVEAUX MATÉRIAUX COMPOSITES-MCPs	143
3.6	CONCLUSION	157
CHAPITRE 4 : ÉTUDE DU PROTOCOLE D'APPLICATION DU NOUVEAU MATÉRIAU COMPOSITE-MCP DANS L'ENVELOPPE DES BÂTIMENTS		160
4.1	INTRODUCTION	160
4.2	PRINCIPE DE CONCEPTION DU PROTOCOLE D'APPLICATION DU NOUVEAU MATÉRIAU DANS L'ENVELOPPE DES BÂTIMENTS	161
4.3	DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	165
4.4	DESCRIPTION DES INSTRUMENTS DE MESURE	169
4.4.1	<i>L'enregistreur de données PICOLOG TC-08</i>	169
4.4.2	<i>Les thermocouples</i>	170
4.4.3	<i>Le fluxmètre thermique</i>	171
4.5	MESURES EFFECTUÉES SUR LE BANC D'ESSAIS	171
4.5.1	<i>Étalonnage des thermocouples</i>	171
4.5.2	<i>Résultats des mesures de température effectuées sur le banc d'essais</i>	173
4.5.3	<i>Résultats des mesures de flux effectuées sur le banc d'essais</i>	184
4.6	CONCLUSION	190
CHAPITRE 5 : SIMULATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN EXEMPLE DE BÂTIMENT INTÉGRANT LES NOUVEAUX MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION		192
5.1	INTRODUCTION	192
5.2	SIMULATION NUMÉRIQUE DU BANC D'ESSAIS TESTÉ EXPÉRIMENTALEMENT SOUS COMSOL MULTI-PHYSICS 3.5A.....	193
5.3	SIMULATION NUMÉRIQUE SUR ENERGY-PLUS DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT AVEC ET SANS L'INTÉGRATION DU COMPOSITE-MCP1	227
5.3.1	<i>Localisation des bâtiments simulés sur Energy-Plus</i>	227
5.3.2	<i>Configuration des modèles de bâtiment simulés sur EP</i>	228
5.3.3	<i>Description du modèle numérique implanté sur Energy-Plus</i>	231
5.3.4	<i>Résultats et discussion des simulations réalisées sur Energy-Plus</i>	236
5.4	SIMULATION NUMÉRIQUE SUR ENERGY-PLUS DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES D'UN BÂTIMENT AVEC ET SANS L'INTÉGRATION DU COMPOSITE-MCP1	256
5.5	CONCLUSION	267
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES		269
RÉFÉRENCES		273

LISTE DES FIGURES

FIGURE1. 1 L'IGLOO-LA PREMIÈRE CONSTRUCTION TRADITIONNELLE UTILISANT UN MCP. ³⁵	10
FIGURE1. 2 ARTICLES DE JOURNAUX FAISANT CONNAITRE LA PREMIÈRE MAISON À MCP RECONNUE. ³⁶	10
FIGURE1. 3 DESSINS D'ARCHITECTURE D'ELEANOR RAYMOND DE LA MAISON SOLAIRE À MCP À DOVER. ³⁶	11
FIGURE1. 4 LA MAISON SOLAIRE À MCP ACHEVÉE. ³⁶	11
FIGURE1. 5 LES DIFFÉRENTS MODES DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE. ⁴⁶	13
FIGURE1. 6 CLIFF PALACE, LA PLUS CÉLÈBRE HABITATION EN PISÉ (COLORADO, ÉTATS UNIS D'AMÉRIQUE). ⁴⁹	14
FIGURE1. 7 SCHÉMA MONTRANT LA DIFFÉRENCE ENTRE LE STOCKAGE SENSIBLE ET LE STOCKAGE LATENT.	16
FIGURE1. 8 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES D'UN MATÉRIAU CHAUFFÉ AVEC LA MÊME SOURCE DE CHALEUR SUR LA MÊME PLAGE DE TEMPS AVEC ET SANS L'INTÉGRATION D'UN MCP	18
FIGURE1. 9 PROPRIÉTÉS THERMIQUES DES SUBSTANCES MCPs UTILISABLES DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT ³⁵	24
FIGURE1. 10 QUELQUES EXEMPLES D'MCP MACRO ENCAPSULÉS DANS DIFFÉRENTS TYPES DE CAPSULES ^{125,126}	27
FIGURE1. 11: IMAGE MICROSCOPIQUE DES MICROCAPSULES INTÉGRÉ DANS DU BÉTON ⁷⁰	28
FIGURE1. 12 : IMAGE DE QUELQUES MCPs DE "RUBITHERM TECHNOLOGIES GMBH". À DROITE: PLAQUE DE PLÂTRE AVEC MCP; À GAUCHE: MCP EN FORME DE BILLES.	29
FIGURE1. 13 : MÉTHODE L'ÉLABORATION D'MCP À FORME STABILISÉE (EN GRIS : MCP EN FUSION, EN NOIR : LE MATÉRIAU MATRICE). ⁷⁰	30
FIGURE1. 14 : NOUVEAU COMPOSITE-MCP OBTENU PAR IMMERSION D'UNE MATRICE POREUSE DANS UN MCP LIQUIDE (EN GRIS: L'MCP, EN NOIR: LA MATRICE). ⁷⁰	30
FIGURE1. 15 : COMPOSITE-MCP À FORME STABILISÉE ^{134, 135}	30
FIGURE1. 16 : COMPOSITE-MCP ÉLABORÉ PAR IMMERSION DIRECT D'UN MATÉRIAU POREUX DANS UN MCP LIQUIDE ¹³⁶	31
FIGURE1. 17: PLAQUES DE REVÊTEMENT DE SOL COMPORTANT UN MCP ¹⁴⁹	32
FIGURE1. 18 : REVÊTEMENT INTÉRIEUR À MCP POUR PLAFOND DUPONT™ ENERGAIN® ¹⁴⁹	32
FIGURE1. 19 : IMAGE D'UN SYSTÈME DE CHAUFFAGE INTÉGRÉ AU PLANCHER RENFORCÉ D'MCP ¹⁴⁷	34
FIGURE1. 20 BÂTIMENT DU CONSEIL GÉNÉRAL DU LOIRET (ORLÉANS, FRANCE) ¹⁶⁸	35
FIGURE1. 21 : BÂTIMENT SARL BUSIPOLIS, ANNÉE DE CONSTRUCTION 2010 (METZ, FRANCE) ¹⁶⁹	35
FIGURE1. 22 : IMAGE 3D ET SUR TERRAIN DE LA MAISON RÉSIDENIELLE À MCP, TENNESSEE (USA) ¹⁷⁰	36
FIGURE1. 23 : IMAGE DE LA MAISON DURABLE À BIO-MCP TREK-HAUSS (ÉTATS-UNIS) ¹⁷¹	37
FIGURE1. 24 : MISE EN PLACE DU BIO-MCP SUR LES MÛRS DE LA MAISON TREK-HAUSS ³⁵	37
FIGURE1. 25 : MAISON MODERNE À MCP (MUNICH, ALLEMAGNE) ¹⁷²	38
FIGURE1. 26 : REVÊTEMENT INTÉRIEUR EN PLAQUE DE PLÂTRE À MCP DE LA MAISON MODERNE DURABLE (MUNICH, ALLEMAGNE) ¹⁷²	38
FIGURE1. 27 : IMAGE DU BÂTIMENT RÉHABILITÉ; À GAUCHE : AVANT L'OPÉRATION, À DROITE : APRÈS LA RÉHABILITATION ³⁵	39
FIGURE1. 28 : BLOC ADMINISTRATIF DU COLLÈGE CLAUDE-BERNARD VILLE-FRANCHE SAÔNE ¹⁷³	40
FIGURE1. 29 : STRUCTURE INTÉRIEURE DU BLOC APRÈS RÉHABILITATION AVEC MCPs ¹⁷³	40
FIGURE1. 30 : IMMEUBLE DE BUREAU À MCPs EN AUSTRALIE, COUPE SUR L'IMMEUBLES EXPLIQUANT LES MODES D'INTÉGRATION DES MCPs ³⁵	41
FIGURE1. 31 : COURBE CLASSIQUE ENTHALPIE/ TEMPÉRATURE D'UN MATÉRIAU À CHANGEMENT DE PHASE AVEC LE SAUT D'ENTHALPIE DURANT LE CHANGEMENT DE PHASE ¹⁸⁵	42
FIGURE1. 32 COURBE CLASSIQUE DU Cp CALCULÉ À PARTIR DES TESTS DE DSC DE DEUX MATÉRIEAUX AVEC DIFFÉRENTES VITESSES. ¹⁹⁰	43
FIGURE 2. 1 : IMAGE D'UN CARREAU DE PLÂTRE COMPOSITE-MCP FABRIQUÉ EN LABORATOIRE.	51
FIGURE 2. 2 IMAGE DU GRAPHITE RECYCLÉ UTILISÉ DANS CETTE ÉTUDE	52
FIGURE 2. 3 SCHÉMA DU PROTOCOLE DE MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DU GRAPHITE RECYCLÉ.	52
FIGURE 2. 4 IMAGE D'UN ÉCHANTILLON DE POUDRE D'ARGILE NATURELLE UTILISÉE DANS LE PROCESSUS D'ÉLABORATION DES NOUVEAUX MATÉRIEAUX	54

FIGURE 2. 6 IMAGE DES DÉCHETS DU SON DE BLÉ A) AVANT TRAITEMENT, B) APRÈS TRANSFORMATION ...	56
FIGURE 2. 7 IMAGE DES FIBRES DE CELLULOSE OBTENUES PAR RECYCLAGE DU PAPIER	57
FIGURE 2. 8 IMAGE DE LA CONSISTANCE DE LA VASELINE BLANCHE À TEMPÉRATURE AMBIANTE	60
FIGURE 2. 9 IMAGE D'UN ÉCHANTILLON DE COMPOSITE-VASELINE ÉLABORÉ	61
FIGURE 2. 10 IMAGES DU FRUIT DE COCOS NUCIFERA (A) ET D'UN ÉCHANTILLON DE LA GRAISSE VÉGÉTALE DE COPRAH RÉCUPÉRÉE (B).	62
FIGURE 2. 11 IMAGE D'UN ÉCHANTILLON DE NOYAUX DU FRUIT DU PALMIER À HUILE (A) ET D'UN ÉCHANTILLON DE GRAISSE VÉGÉTALE DE PALMISTE (B).	63
FIGURE 2. 12 IMAGE D'UN ÉCHANTILLON DE LA GRAISSE VÉGÉTALE À 33 °C DE POINT DE FUSION.	64
FIGURE 2. 13. IMAGE D'UN ÉCHANTILLON DE BEURRE DE CACAO TESTÉ	65
FIGURE 2. 14 RÉSULTATS DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DU BEURRE DE CACAO TESTÉ.	65
FIGURE 2. 15 ÉCHANTILLONS DES DIFFÉRENTES MATRICES ÉLABORÉES À PARTIR DE PLUSIEURS COMBINAISONS (POUDRE MINÉRALE/ DÉCHET DE RECYCLAGE).	67
FIGURE 2. 16 SCHÉMA DES ÉTAPES DU PROCESSUS DE PRÉPARATION DE LA MATRICE COMPOSITE.	68
FIGURE 2. 17 IMAGES DU PROCESSUS DE TRANSFORMATION DU PAPIER CARTON	69
FIGURE 2. 18 LES DIFFÉRENTS COMPOSANTS CONSTITUTIFS DE LA MATRICE : A) PA, B) FC, C) GRAPHITE.	70
FIGURE 2. 19 IMAGE D'UN ÉCHANTILLON DE LA PATE COMPOSITE OBTENUES.	71
FIGURE 2. 20 IMAGE DU MOULE EN ACIER FABRIQUÉ EN LABORATOIRE POUR LE MOULAGE DES PASTILLES.	71
FIGURE 2. 21 IMAGE DE LA PRESSE HYDRAULIQUE UTILISÉE DANS LE PROCESSUS DE COMPRESSION UNI-AXIALE.	72
FIGURE 2. 22 IMAGE DES PASTILLES EN REFROIDISSEMENT.	73
FIGURE 2. 23 IMAGE D'UN ÉCHANTILLON DE PASTILLE COMPOSITE (AR/FC/GR).	73
FIGURE 2. 24 PROCESSUS D'ÉLABORATION DES NOUVEAUX COMPOSITES-MCPs.	74
FIGURE 2. 25 DIMENSION DE LA TACHE GRASSE CAUSÉE PAR LA FUITE DE LA PARAFFINE DES COMPOSITES PP/FC/GR. (A) IMAGE DE L'ÉCHANTILLON SUR PAPIER FILTRE; (B1~B5) EMPREINTE GRASSE DES ÉCHANTILLONS DE 1 À 5.	75
FIGURE 2. 26 DIMENSION DE LA TACHE GRASSE CAUSÉE PAR LA FUITE DE LA GRAISSE VÉGÉTALE DE COPRAH DE LA MATRICE PA/FC/GR : A) AVANT TRAITEMENT, B) APRÈS TRAITEMENT.	76
FIGURE 2. 27 UN EXEMPLE D'ÉCHANTILLON IMMÉRGÉ DANS L'EAU POUR TESTER SA PERMÉABILITÉ À L'EAU	78
FIGURE 2. 29 DIMENSIONNEMENT AU PIED À COULISSE NUMÉRIQUE DES ÉCHANTILLONS COMPOSITES-MCP ÉLABORÉS	79
FIGURE 2. 28 PESÉE À LA BALANCE DE PRÉCISION DES ÉCHANTILLONS COMPOSITES-MCPs ÉLABORÉS. ...	80
FIGURE 2. 30 SCHÉMA ET IMAGE DE LA CONFIGURATION DU COMPOSITE-MCP SANDWICH.	81
FIGURE 2. 31 IMAGE DES D'UN EXEMPLE DE PANNEAU ENTIÈREMENT COUVERT PAR DES FEUILLES D'ALUMINIUM.	82
FIGURE 3. 1 IMAGE DU CALORIMÈTRE DSC 1 STARE SYSTEM DE METTLER TOLEDO UTILISÉ.	86
FIGURE 3. 2 IMAGE DES CREUSETS "S" ET "R" PLACÉS DANS LES FOURS DSC.	86
FIGURE 3. 3 IMAGE DU CT-MÈTRE H112N POUR LA MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION.	88
FIGURE 3. 4 IMAGE DE L'ÉPROUVETTE COMPOSITE-MCP ÉLABORÉE PLACÉE DANS LE CT-MÈTRE.	89
FIGURE 3. 5 IMAGE DE LA HOT-DISK TPS 500 (PERKIN ELMER).	90
FIGURE 3. 6 IMAGE DES SONDES EN KAPTON UTILISÉES POUR LA MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE.	90
FIGURE 3. 7 IMAGE DU DISPOSITIF DE VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉ.	91
FIGURE 3. 8 IMAGES DE L'ENCEINTE DE CYCLAGE THERMIQUE : A) ENCEINTE COUVERTE DE PÂTE THERMIQUE, B) L'ENCEINTE AVEC LE MATÉRIAU COMPOSITE À CHANGEMENT DE PHASE.	92
FIGURE 3. 9 SCHÉMA DU DISPOSITIF DE CYCLAGE THERMIQUE	92
FIGURE 3. 10 IMAGE DU SPECTROPHOTOMÈTRE IRAFFINITY-1 (SHIMADZU).	94
FIGURE 3. 11 : A) IMAGE DES POUDRES DANS LE MORTIER ; B) IMAGE DES PASTILLES EN KBR	94
FIGURE 3. 12 IMAGE DU MOULE SOUS LA PRESSE À VIDE DE SHIMADHU	95
FIGURE 3. 13 MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE FEI QUANTA 650	96
FIGURE 3. 14 IMAGE DU DIFFRACTOMÈTRE D2 PHASER BRUKER.	97
FIGURE 3. 15 IMAGE DE LA GRANULOMÉTRIE MALVERN MASTERSIZER 2000	98

FIGURE 3. 16 PASSEUR D'ÉCHANTILLONS DE GRANULOMÉTRIE LASER	99
FIGURE 3. 17 IMAGE DES ÉPROUVETTES CUBIQUES DE CARACTÉRISATION MÉCANIQUE	100
FIGURE 3. 18 MACHINE D'ESSAIS DE COMPRESSION IBERTEST.	100
FIGURE 3. 19 ÉTAPES DE LA COMPRESSION DESTRUCTIVE D'UNE ÉPROUVETTE COMPOSITE.	101
FIGURE 3. 20 : COURBE DE LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DE LA POUDRE D'ARGILE NATURELLE.	102
FIGURE 3. 21 SPECTRE IR DE LA POUDRE D'ARGILE NATURELLE UTILISÉE DANS LA FABRICATION DES COMPOSITES-MCPs	103
FIGURE 3. 22 COURBE DE LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DE LA POUDRE DE PLÂTRE	104
FIGURE 3. 23 SPECTRE IR DE LA POUDRE DE PLÂTRE UTILISÉE DANS LES EXPÉRIENCES.....	104
FIGURE 3. 24 IMAGE DU GRAPHITE AJOUTÉ DANS LE NOUVEAU COMPOSITE-MCP.....	105
FIGURE 3. 25 COURBE DE LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DU GRAPHITE RECYCLÉ.....	105
FIGURE 3. 26 SPECTRE IR DE LA POUDRE DE GRAPHITE RECYCLÉ.....	106
FIGURE 3. 27 IMAGE DES FIBRES DE CELLULOSE PRÉPARÉES AU LABORATOIRE.....	107
FIGURE 3. 28 SPECTRE IR DES FIBRES DE CELLULOSE UTILISÉE	107
FIGURE 3. 29 IMAGE DE LA VASELINE BLANCHE UTILISÉE	108
FIGURE 3. 30 COURBE DE L'ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE ENREGISTRÉE PAR UN THERMOCOUPLE DE TYPE K ET UN DATA LOGGER.	109
FIGURE 3. 31 IMAGE DE LA GRAISSE VÉGÉTALE DE COPRAH	110
FIGURE 3. 32 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES ENREGISTRÉES PAR UN THERMOCOUPLE DE TYPE K À L'INTÉRIEUR D'UNE MASSE DE GRAISSE VÉGÉTALE DE COPRAH	111
FIGURE 3. 33 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES D'UN ÉCHANTILLON DE GVP EN FONCTION DU TEMPS.....	112
FIGURE 3. 34 IMAGES MEB DU COMPOSITE (PP/FC/GR/PARAFFINE).....	114
FIGURE 3. 35 SUPERPOSITION DES SPECTRES IR DES PRINCIPAUX COMPOSÉS DU COMPOSITE (PP/FC/GR/PARAFFINE).	115
FIGURE 3. 36 MODÈLE DRX DU COMPOSITE-MCP	116
FIGURE 3. 37 COURBE ATG D'UN ÉCHANTILLON DU COMPOSITE (PP/CL/GR/PARAFFINE).	117
FIGURE 3. 38 CYCLE ENDOTHERMIQUE DE DSC DU NOUVEAU COMPOSITE-MCP.	118
FIGURE 3. 39 SCHÉMA DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DANS LES ÉCHANTILLONS AVEC ET SANS MCP.	120
FIGURE 3. 40 : COMPARAISON DE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DANS LES COMPOSITES SOLlicitÉS PAR LA MÊME SOURCE DE CHALEUR AVEC ET SANS MCP	120
FIGURE 3. 41 COURBES DE DSC DE L'MCP1 PURE ET DU COMPOSITE-MCP1	122
FIGURE 3. 42 SUPERPOSITION DES SPECTRES IR DU BIO-MCP ET DU COMPOSITE-MCP.....	124
FIGURE 3. 43 IMAGES MEB DU COMPOSITE E4. A,C,E LE COMPOSITE SANS MCP. B,D,F LE COMPOSITE AVEC MCP ; SOUS DIFFÉRENTES MAGNIFICATIONS (x1000, x500, x100).....	126
FIGURE 3. 44 COURBE ATG DU COMPOSITE-MCP1	127
FIGURE 3. 45 VALEURS DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DU BIO-MCP ET DES DIFFÉRENTS ÉCHANTILLONS DU COMPOSITE-MCP1.....	128
FIGURE 3. 46 COURBES DE DSC DU MCP (GVP) ET DU COMPOSITE-MCP2.....	130
FIGURE 3. 47 COURBE ATG DE L'MCP (GVP).....	132
FIGURE 3. 48 COURBE ATG DU COMPOSITE-MCP.....	132
FIGURE 3. 49 SPECTRES IR DU BIO-MCP (GVP) ET DU COMPOSITE-MCP2.....	133
FIGURE 3. 50 IMAGES MEB DE LA MATRICE ET DU COMPOSITE-MCP2	135
FIGURE 3. 51 COURBE DE L'ÉVOLUTION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DES COMPOSITES-MCP2	136
FIGURE 3. 52 COURBE DE PRESSION/DÉFORMATION DU COMPOSITE SANS LE MCP EN COMPRESSION SIMPLE	137
FIGURE 3. 53 COURBE (PRESSION/DÉFORMATION) DU COMPOSITE-MCP 2 EN COMPRESSION SIMPLE. ...	138
FIGURE 3. 54 COURBES DE DSC DU BIO-MCP ET DES COMPOSITES-MCPs 3.....	140
FIGURE 3. 55 IMAGE MEB DU COMPOSITE-MCP3 : A) LE COMPOSITE SANS MCP, D) LE COMPOSITE AVEC MCP.....	141
FIGURE 3. 56 SPECTRE IR DU BIO-MCP ET DU COMPOSITE BIO-MCP	142
FIGURE 3. 57 AMÉLIORATION DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DES COMPOSITES-MCP3.	143
FIGURE 3. 58 COURBES DES PREMIÈRES DIZAINES DE CYCLAGE THERMIQUE EFFECTUÉ SUR LE COMPOSITE- MCP1	145
FIGURE 3. 59 COURBE DU DÉTAIL D'UN CYCLE COMPLET (FUSION/ CRISTALLISATION).....	145

FIGURE 3. 60 COURBE DE LA DERNIÈRE DIZAIN DES 2000 CYCLES IMPOSÉS AU NOUVEAU MATÉRIAU COMPOSITE-MCP.	146
FIGURE 3. 61 IMAGE DU PROFIL DE TEMPÉRATURE SUR UN CYCLE COMPLET FUSION/CRISTALLISATION APRÈS 2000 CYCLES.	147
FIGURE 3. 62 COURBE DSC DU MCP (GVC), COMPOSITE-MCP1 AVANT CYCLAGE THERMIQUE ET DU COMPOSITE-MCP1 APRÈS CYCLAGE THERMIQUE.	148
FIGURE 3. 63 PREMIÈRES DIZAIN DE CYCLES EFFECTUÉS SUR LE COMPOSITE-MCP2	150
FIGURE 3. 64 PROFIL DE TEMPÉRATURE SUR DEUX PREMIERS CYCLES THERMIQUES.....	150
FIGURE 3. 65 DERNIÈRE DIZAIN DE CYCLES EFFECTUÉS SUR LE COMPOSITE-MCP3.....	151
FIGURE 3. 66 PROFIL DE TEMPÉRATURE SUR LES DERNIERS CYCLES THERMIQUES.....	151
FIGURE 3. 67 COURBES DE DSC DE L'MCP (GVP), DU COMPOSITE-MCP2 AVANT CYCLAGE THERMIQUE ET DU COMPOSITE-MCP2 APRÈS CYCLAGE THERMIQUE.....	152
FIGURE 3. 68 PROFIL DES TOUT PREMIERS CYCLES SUR 1000 DE VIEILLISSEMENT THERMIQUE ACCÉLÉRÉ	153
FIGURE 3. 69 DÉTAIL DE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES LORS D'UN CYCLE COMPLET DE FUSION CRISTALLISATION (PREMIERS CYCLES).....	154
FIGURE 3. 70 PROFIL DE TEMPÉRATURE DES DERNIERS CYCLES DE VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉ.....	155
FIGURE 3. 71 DÉTAIL DU PROFIL DE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES SUR UN CYCLE COMPLET DE (FUSION/CRISTALLISATION) (DERNIERS CYCLES)	156
FIGURE 3. 72 RÉSULTATS DE LA DSC DU COMPOSITE-MCP3 AVANT ET APRÈS LE VIEILLISSEMENT THERMIQUE ACCÉLÉRÉ.	156
FIGURE 4. 1 : TRANSFERTS DE CHALEUR DANS LA PAROI DE BRIQUE DOUBLE CLOISON : A) SANS MCP, B) AVEC MCP	163
FIGURE 4. 2 : CONFIGURATION DE LA PAROI EN BRIQUE DE TERRE CUITE DOUBLE CLOISON.	165
FIGURE 4. 3 : SCHÉMA DE PRINCIPE DU BANC D'ESSAIS	166
FIGURE 4. 4 : IMAGE DU BANC D'ESSAI MONTÉ : A) SANS LA DOUBLE COQUE D'ISOLATION, B) AVEC LA DOUBLE COQUE D'ISOLATION.....	166
FIGURE 4. 5 : IMAGE DES PAROIS INTÉRIEURES DU BANC D'ESSAIS.....	167
FIGURE 4. 6 : IMAGE DU DISPOSITIF ÉMETTEUR DU FLUX DE CHALEUR SUR LA PAROI DE BRIQUE DE TERRE CUITE.....	167
FIGURE 4. 7 : IMAGE DE LA PAROI DE STOCKAGE INTÉGRÉE DANS LE BANC D'ESSAIS: A) FACE INTÉRIEURE, B) FACE EXTÉRIEURE	168
FIGURE 4. 8 : IMAGE DE LA PAROI DE BRIQUE DE TERRE CUITE DANS LE BANC D'ESSAI.....	169
FIGURE 4. 9 : IMAGE DE L'ENREGISTREUR DE DONNÉES THERMOCOUPLES PICOLOG TC-08.....	170
FIGURE 4. 10 IMAGE DES THERMOCOUPLES TYPE "K" UTILISÉS.	170
FIGURE4. 11 A) IMAGE DU FLUXMÈTRE THERMIQUE, B) FLUXMÈTRE THERMIQUE SUR LA PAROI À MESURER	171
FIGURE 4. 12 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL D'ÉTALONNAGE DES THERMOCOUPLES.	172
FIGURE4. 13 SCHÉMA DES DIFFÉRENTS POINTS DE MESURE.	174
FIGURE4. 14 ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE À LA SURFACE DE LA PAROI CAPTATRICE.....	175
FIGURE4. 15 COMPARAISON DE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES À L'INTÉRIEUR DE LA LAME D'AIR AVEC LE COMPOSITE-MCP1, LE COMPOSITE-MCP2 ET SANS MCP.....	176
FIGURE4. 16 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DANS LE COMPOSITE-MCP1	177
FIGURE4. 17 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES À L'INTÉRIEUR DU COMPOSITE-MCP2.....	178
FIGURE 4. 18 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES SUR LA FACE INTERNE DE LA PAROI INTÉRIEURE.....	179
FIGURE4. 19 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DE LA PAROI INTÉRIEURE AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP2	181
FIGURE4. 20 LA PAROI MULTICOUCHE AVANT DÉBUT DES TESTS DANS LE BANC D'ESSAIS.....	182
FIGURE 4. 21 SUPERPOSITION DES PROFILS DES TEMPÉRATURES DES DIFFÉRENTES COUCHES DE LA PAROI INTÉGRANT LE COMPOSITE-MCP1	183
FIGURE4. 22 SUPERPOSITION DES PROFILS DE TEMPÉRATURE DES DIFFÉRENTES COUCHES DE LA PAROI INTÉGRANT LE COMPOSITE-MCP2	183
FIGURE4. 23 MESURE DU FLUX DE CHALEUR À LA SURFACE EXTÉRIEURES DE LA PAROI CAPTATRICE.	185
FIGURE4. 24 COMPARAISON DE LA DIFFÉRENCE DE FLUX INCIDENT ET SORTANT SUR LA FACE INTERNE DE LA PAROI INTÉRIEURE DE LA PAROI MULTICOUCHE AVEC ET SANS MCP.	187

FIGURE4. 25 COMPARAISON DE LA DIFFÉRENCE DE FLUX INCIDENT ET SORTANT SUR LA FACE INTERNE DE LA PAROI INTÉRIEURE DE LA PAROI MULTICOUCHE AVEC ET SANS MCP.	188
FIGURE4. 26 CONTROL DU FLUX DE CHALEUR INCIDENT EN FUSION ET SOLIDIFICATION DU COMPOSITE-MCP1.	189
FIGURE4. 27 CONTROL DU FLUX DE CHALEUR INCIDENT EN FUSION ET SOLIDIFICATION DU COMPOSITE-MCP2.	189
FIGURE 5. 1 CONFIGURATION ET COMPOSITION DU MODÈLE PHYSIQUE.	194
FIGURE 5. 2 CONFIGURATION 3D DU MODÈLE SIMULÉ SUR COMSOL MULTIPHYSICS 3.5A.....	195
FIGURE 5. 3 THERMOGRAMMES CLASSIQUES DE DSC	195
FIGURE 5. 4 CONDITIONS LIMITES POSÉES POUR RETROUVER LA CONDUCTIVITÉ ÉQUIVALENTE.	197
FIGURE 5. 5 SIMULATION NUMÉRIQUE SUR PLUSIEURS PORTIONS DE MUR POUR RETROUVER LA CONDUCTIVITÉ ÉQUIVALENTE DE LA BRIQUE.	198
FIGURE 5. 6 COURBE DES FLUX DE CHALEUR ENREGISTRÉS AUX SURFACES DES DIFFÉRENTES SECTIONS DE PAROI DE BRIQUE SIMULÉES	199
FIGURE 5. 7 GÉOMÉTRIE ET MAILLAGE DU MODÈLE SIMULÉ : HAUT) SANS MCP, BAS) AVEC MCP.	201
FIGURE 5. 8 LES CONDITIONS AUX LIMITES DU MODÈLE SIMULÉ NUMÉRIQUEMENT	202
FIGURE 5. 9 DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE PENDANT 6 H DE TEST : A)SANS MCP, B) AVEC LE COMPOSITE-MCP1, C) AVEC LE COMPOSITE-MCP	205
FIGURE 5. 10 DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE SUR LA PAROI 2D SIMULÉ APRÈS 8H DE TEST : A) SANS MCP, B) AVEC LE COMPOSITE-MCP1, C) AVEC LE COMPOSITE-MCP2	207
FIGURE 5. 11 DIAGRAMME À TRAITS CONTINUS DE LA CIRCULATION DE L'AIR À L'INTÉRIEUR DE LA PAROI SIMULÉE	207
FIGURE 5. 13 TRAJECTOIRE DU FLUX DE CHALEUR TRAVERSANT LA PAROI SIMULÉE SANS CONVECTION..	208
FIGURE 5. 12 MODÈLE DE TRANSFERT DU FLUX DE CHALEUR SANS CONVECTION : A) SANS MCP, B) AVEC MCP.....	209
FIGURE 5. 14 COURBE DU PROFIL DE TEMPÉRATURE (SIMULÉE/ EXPÉRIMENTÉE) À L'INTÉRIEUR DE LA LAME D'AIR INTÉGRANT LA PAROI DE STOCKAGE COMPOSITE-MCP1.	
FIGURE 5. 15 COURBE DU PROFIL DE TEMPÉRATURE À L'INTÉRIEUR DE LA PAROI DE STOCKAGE COMPOSITE-MCP1 (SIMULATION EXPÉRIMENTATION).....	211
FIGURE 5. 16 COURBE DU PROFIL DE TEMPÉRATURE (SIMULÉE/ EXPÉRIMENTÉE) SUR LA FACE INTERNE DE LA PAROI INTÉRIEUR.....	212
FIGURE 5. 17 PROFILS DE TEMPÉRATURE (SIMULÉ/ EXPÉRIMENTÉ) À L'INTÉRIEUR DE LA LAME D'AIR INTÉGRANT LE COMPOSITE-MCP2.	213
FIGURE 5. 18 PROFIL DE TEMPÉRATURE À L'INTÉRIEUR DE LA PAROI DE STOCKAGE COMPOSITE-MCP2..	214
FIGURE 5. 19 PROFIL DE TEMPÉRATURE SUR LA FACE INTERNE DE LA PAROI INTÉRIEURE DU MUR INTÉGRANT LE COMPOSITE-MCP2.	214
FIGURE 5. 20 TEMPÉRATURES (SIMULÉE/ EXPÉRIMENTÉE) DE LA FACE INTERNE DE LA PAROI INTÉRIEURE SANS LA PAROI DE STOCKAGE COMPOSITE-MCP	216
FIGURE 5. 21 DISTRIBUTIONS DES TEMPÉRATURES SUR LE MODÈLE 2D DE LA PAROI MULTICOUCHE INTÉGRANT LE COMPOSITE-MCP1 PENDANT LE REFROIDISSEMENT.....	217
FIGURE 5. 22 DIGRAMME À FLÈCHES DU CHAMP DE VITESSE DE L'AIR DANS LE MODÈLE 2D DE LA PAROI MULTICOUCHE INTÉGRANT LE COMPOSITE MCP1 PENDANT LE REFROIDISSEMENT	217
FIGURE 5. 23 TRAJECTOIRE DU FLUX DE CHALEUR DANS LE MODÈLE 2D INTÉGRANT LE COMPOSITE-MCP1 PENDANT LE REFROIDISSEMENT.	218
FIGURE 5. 24 DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS LE MODÈLE 2D DE LA PAROI MULTICOUCHE INTÉGRANT LE COMPOSITE-MCP2 PENDANT LE REFROIDISSEMENT.....	218
FIGURE 5. 25 DIAGRAMME À FLÈCHE DU CHAMP DE VITESSE DE L'AIR DANS LE MODÈLE 2D DE LA PAROI MULTICOUCHE INTÉGRANT LE COMPOSITE-MCP2 PENDANT LE REFROIDISSEMENT.....	219
FIGURE 5. 26 TRAJECTOIRE DU FLUX DE CHALEUR TOTAL DANS LE MODÈLE 2D INTÉGRANT LE COMPOSITE-MCP2	219
FIGURE 5. 27 DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE SUR LE MODÈLE 2D DE A PAROI MULTICOUCHE SANS L'INTÉGRATION D'AUCUN COMPOSITE-MCP	220
FIGURE 5. 28 DIAGRAMME À FLÈCHE DU CHAMP DE VITESSE DE L'AIR DANS LE MODÈLE 2D DE LA PAROI MULTICOUCHE SANS AUCUN COMPOSITE-MCP.	220
FIGURE 5. 29 TRAJECTOIRE DU FLUX DE CHALEUR TOTAL SUR LE MODÈLE 2D DE LA PAROI MULTICOUCHES SANS AUCUN COMPOSITE-MCP.	221

FIGURE 5. 30 : SCHÉMA DES POSITIONS DES DIFFÉRENTS POINTS DE MESURE PENDANT LE PROCESSUS DE CRISTALLISATION.	221
FIGURE 5. 31 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES AUX POINTS (P1) DANS LES TROIS MODÈLES.....	222
FIGURE 5. 32 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES AU POINT « P2 » DANS LES TROIS MODÈLES SIMULÉS... ..	223
FIGURE 5. 33 SUPERPOSITION DES PROFILS DE TEMPÉRATURE AU POINT P1 (DE LA PAROI EXTÉRIEURE) ET CELLES DU POINT (P3) DES TROIS MODÈLES AVEC ET SANS MCP.....	223
FIGURE 5. 34 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DANS LES : COMPOSITE-MCP1 ET COMPOSITE-MCP2.	224
FIGURE 5. 35 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES AU POINT P5 DANS LES TROIS MODÈLES.....	225
FIGURE 5. 36 MODÈLE 2D DE LA PARTIE DE BÂTIMENT SIMULÉE AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1....	228
FIGURE 5. 37 MODÈLE 3D DU BÂTIMENT SIMULÉ	229
FIGURE 5. 38 CONFIGURATION 2D DU MODÈLE DE LA MAISON SIMULÉE	230
FIGURE 5. 39 LES DIFFÉRENTES ZONES CLIMATIQUES QUI CONSTITUENT LE MODÈLE 2D ÉTUDIÉ.....	230
FIGURE 5. 40 : FIGURE RÉSUMANT LES DIFFÉRENTS INPUTS DU CHAMP « CONTRÔLE DE LA SIMULATION ».	232
FIGURE 5. 41 : POSITIONNEMENT DU PLAN 2D D'UN EXEMPLE DE MAISONS SIMULÉES POUR DÉFINIR UN SENS CONVENTIONNEL DE LECTURE ET DÉTERMINER L'ARCHITECTURE DU MODÈLE.	234
FIGURE 5. 42 DÉFINITION DU SENS CONVENTIONNEL D'INTRODUCTION DES COORDONNÉES CARTÉSIENNES DES POINTS DE CHAQUE ÉLÉMENT DU BÂTIMENT.	235
FIGURE 5. 43 CAPTURE EP MONTRANT COMMENT LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DU BÂTIMENT SONT DÉFINIS À PARTIR DE LEURS COORDONNÉES CARTÉSIENNES.	235
FIGURE 5. 44 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES OPÉRATIVE À L'INTÉRIEUR DE LA ZONE THERMIQUE UNIQUE AVEC ET SANS MCP (JANVIER).	238
FIGURE 5. 45 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES À L'INTÉRIEUR DE LA ZONE THERMIQUE 4 AVEC ET SANS MCP (JANVIER).	239
FIGURE 5. 46 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DE L'AIR À L'INTÉRIEUR DE LA ZONE THERMIQUE UNIQUE AVEC ET SANS MCP (FÉVRIER).....	240
FIGURE 5. 47 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DE L'AIR INTÉRIEUR DE LA ZONE 4 AVEC ET SANS MCP (FÉVRIER).	240
FIGURE 5. 48 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE UNIQUE AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 (MARS).....	241
FIGURE 5. 49 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE THERMIQUE 4 SUR TROIS JOURS AVEC ET SANS MCP (MARS).	241
FIGURE 5. 50 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DE LA ZONE THERMIQUE UNIQUE AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 SUR TROIS JOURS (AVRIL).	242
FIGURE 5. 51 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE UNIQUE SUR 24H AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1. (AVRIL).	242
FIGURE 5. 52 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE 4 SUR TROIS JOURS AVEC ET SANS MCP (AVRIL).....	243
FIGURE 5. 53 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES DE L'AIR INTÉRIEUR DE LA ZONE THERMIQUE 4 SUR UNE PÉRIODE DE 24H (AVRIL).....	243
FIGURE 5. 54 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE UNIQUE SIMULÉE SUR 72 H AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP (Mai).	244
FIGURE 5. 55 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE 4 SUR 72 H AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 (Mai).	245
FIGURE 5. 56 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES INTÉRIEURES DE LA ZONE UNIQUE SUR TROIS JOURS AVEC ET SANS MCP (JUIN).	246
FIGURE 5. 57 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE 4 AVEC ET SANS MCP SUR TROIS JOURS (JUIN).	246
FIGURE 5. 58 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE THERMIQUE SIMULÉE SUR UNE PÉRIODE DE 72 H AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 (JUILLET).	247
FIGURE 5. 59 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEUR DE LA ZONE THERMIQUE 4 SUR UNE PÉRIODE DE 72H AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 (JUILLET).	247
FIGURE 5. 60 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE THERMIQUE UNIQUE SUR 72H AVEC ET SANS MCP (AOÛT).....	248
FIGURE 5. 61 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DANS LA ZONE 4 SUR UNE PÉRIODE DE 72H AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 (AOÛT).	248

FIGURE 5. 62 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE UNIQUE SIMULÉE AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 SUR UNE PÉRIODE DE 72H (SEPTEMBRE)	249
FIGURE 5. 63 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE UNIQUE SIMULÉE AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 SUR UNE PÉRIODE DE 72H (SEPTEMBRE)	250
FIGURE 5. 64 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE UNIQUE SUR UNE PÉRIODE DE 72 H AVEC ET SANS MCP (OCTOBRE)	251
FIGURE 5. 65 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE 4 AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 SUR UNE PÉRIODE DE 72H (OCTOBRE)	251
FIGURE 5. 66 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES À L'INTÉRIEUR DE LA ZONE UNIQUE SIMULÉE SUR UNE PÉRIODE DE 72H AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 (NOVEMBRE)	252
FIGURE 5. 67 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES À L'INTÉRIEUR DE LA ZONE 4 AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 SUR UNE PÉRIODE DE 72H. (NOVEMBRE)	252
FIGURE 5. 68 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DE LA ZONE THERMIQUE UNIQUE SOUS 72H DU MOIS DE DÉCEMBRE AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 (DÉCEMBRE).....	253
FIGURE 5. 69 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INTÉRIEURES DANS LA ZONE 4 SUR UNE PÉRIODE DE 72H DU MOIS DE DÉCEMBRE AVEC ET SANS LE COMPOSITE-MCP1 (DÉCEMBRE).....	253
FIGURE 5. 70 : SCÉNARIO D'OCCUPATION JOURNALIÈRE DE L'ESPACE PAR 4 PERSONNES	257
FIGURE 5. 71 : CONFIGURATION DU CONTROL DES TEMPÉRATURES DE CONSIGNE DE L'ESPACE SIMULÉ POUR LE CHAUFFAGE ET LA CLIMATISATION	257
FIGURE 5. 72 : ÉNERGIE DE CHAUFFAGE NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 20°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS DE NOVEMBRE	258
FIGURE 5. 73 : ÉNERGIE DE CHAUFFAGE NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 20°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS DE DÉCEMBRE.....	259
FIGURE 5. 74 : ÉNERGIE DE CHAUFFAGE NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 20°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS DE JANVIER.	259
FIGURE 5. 75 : ÉNERGIE DE CHAUFFAGE NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 20°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS DE FÉVRIER.....	260
FIGURE 5. 76 : ÉNERGIE DE CLIMATISATION NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 24°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS DE MARS.....	260
FIGURE 5. 77 : ÉNERGIE DE CLIMATISATION NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 24°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS D'AVRIL.....	261
FIGURE 5. 78 : ÉNERGIE DE CLIMATISATION NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 24°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS MAI.	262
FIGURE 5. 79 : ÉNERGIE DE CLIMATISATION NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 24°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS DE JUIN.....	262
FIGURE 5. 80 : ÉNERGIE DE CLIMATISATION NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 24°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS DE JUILLET.....	263
FIGURE 5. 81 : ÉNERGIE DE CLIMATISATION NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 24°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS D'AOÛT.	263
FIGURE 5. 82 : ÉNERGIE DE CLIMATISATION NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 24°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS DE SEPTEMBRE.	264
FIGURE 5. 83 : ÉNERGIE DE CLIMATISATION NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR À 24°C SUR UNE PÉRIODE DE 24H LA TEMPÉRATURE DU LOCAL SIMULÉ EN JOURNÉE TYPIQUE DU MOIS D'OCTOBRE	264
FIGURE 5. 84 : COMPARAISON DES BILANS JOURNALIERS POUR LES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE DE CHAUFFAGE ET DE CLIMATISATION POUR UN JOUR TYPE DE CHAQUE MOIS DE L'ANNÉE.....	265

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. 1 : TABLEAU DES PROPRIÉTÉS THERMO PHYSIQUES DE QUELQUES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LE STOCKAGE SENSIBLE 52, 53.	15
TABLEAU 1. 2: LES PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTS TYPES D'MCPs ⁶⁷	20
TABLEAU 1. 3: PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES MCPs ORGANIQUES PARAFFINIQUES.....	20
TABLEAU 1. 4: PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES MCPs ORGANIQUES NON-PARAFFINIQUES	21
TABLEAU 1. 5: PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES MCPs COMMERCIALISÉS.	21
TABLEAU 1. 6: PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES MCPs INORGANIQUES	22
TABLEAU 1. 7: PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES MCPs EUTECTIQUES (ORGANIQUES ET INORGANIQUES)	23
TABLEAU 1. 8 LE NOMBRE DE CYCLES REQUIS/ JOUR ET /ANNÉE À UN MCP DE BÂTIMENT PENDANT SA DURÉE DE VIE ^{35, 110}	25
TABLEAU 2. 1 : CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES DE CERTAINES MATRICES D'ORIGINE MINÉRALE OU VÉGÉTALE.....	48
TABLEAU 2. 2 : QUELQUES PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DE QUELQUES MATRICES MINÉRALES OU VÉGÉTALES.	49
TABLEAU 2. 3 : LES MATIÈRES RÉCUPÉRÉES POUVANT SERVIR DE MCP.....	58
TABLEAU 2. 4 : DIFFÉRENTES FRACTIONS MASSIQUES UTILISÉES DANS LA PRÉPARATION DE LA MATRICE..	70
TABLEAU 2. 5 : TAUX D'MCP ABSORBÉ ET RETENU PAR LES DIFFÉRENTES MATRICES (PA/ FC/ GR).	77
TABLEAU 2. 6 : TAUX D'MCP ABSORBÉ ET RETENU PAR LES DIFFÉRENTES MATRICES (PP/FC/GR).	77
TABLEAU 2. 7 : VALEURS MESURÉES (KG/M3) DES COMPOSITES ÉLABORÉS.	80
TABLEAU 3. 1 : AFFECTATION CHIMIQUE DES BANDES IR ENREGISTRÉES.....	103
TABLEAU 3. 2 : PROPRIÉTÉS DE LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES POUDRES UTILISÉES COMME MATRICE.....	106
TABLEAU 3. 3 : PROPRIÉTÉS THERMIQUE DE L'MCP ET DU COMPOSITE-MCP.....	119
TABLEAU 3. 4 : COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DU COMPOSITE-MCP1 AVEC D'AUTRE COMPOSITES-MCPs TIRÉS DE LA LITTÉRATURE.	119
TABLEAU 3. 5 : COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS THERMIQUE DE CETTE ÉTUDE AVEC CELLES DES AUTRES ÉTUDES TROUVÉES DANS LA LITTÉRATURE.	124
TABLEAU 3. 6 : COMPARAISON DES CONDUCTIVITÉS THERMIQUES DE LA PRÉSENTE ÉTUDE AVEC CELLE DES AUTRES ÉTUDES DE LA LITTÉRATURE.	129
TABLEAU 3. 7 : COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS DE LA PRÉSENTE RECHERCHE À CELLES RETROUVÉES DANS LA LITTÉRATURE.	131
TABLEAU 3. 8 : COMPARAISON DE LA RÉSISTANCE MÉCANIQUE DU COMPOSITE-MCP 3 PRÉPARÉS AVEC CELLE DES AUTRES ÉTUDES PRÉSENTES DANS LA LITTÉRATURE.	138
TABLEAU 3. 9 : LES DIFFÉRENTS TAUX DE MCP RETENUS PAR LES DIFFÉRENTES MATRICES ARGILEUSES.	140
TABLEAU 4. 1: LES DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES MESURÉES PAR LES THERMOCOUPLES.....	173
TABLEAU 5. 1 : RÉCAPITULATIF DES PROPRIÉTÉS THERMO PHYSIQUES DES MATÉRIAUX DU MÛR SIMULÉ SOUS DES CONDITIONS DE TEMPÉRATURE AMBIANTE (20 °C) ET DE PRESSION ÉGALE À Pr=1ATM..	203
TABLEAU 5. 2 : LES TEMPÉRATURES MOYENNES DE L'AIR À L'INTÉRIEUR DES DIFFÉRENTES ZONES CLIMATIQUES DU DEUXIÈME MODÈLE CONSIDÉRÉ DANS LE PROCESSUS DE SIMULATION.	255
TABLEAU 5. 3 : ESTIMATION DES BESOINS JOURNALIERS DE CHAUFFAGE ET DE CLIMATISATION POUR CHAQUE JOUR TYPE DE CHAQUE MOI DE L'ANNÉE AVEC ET SANS L'INTÉGRATION DU COMPOSITE-MCP1.	266

INTRODUCTION

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique où la demande énergétique est de plus en plus croissante ^{1, 2}, le bâtiment se présente comme l'un des secteurs les plus énergivores avec une consommation de plus de 34 % de l'énergie exclusivement dépendante des énergies fossiles ³.

En Algérie, tout le parc immobilier existant, qu'il soit; ancien, nouveau ou en cours de construction, peut être considéré comme thermiquement défectueux, puisque le maintien des conditions de confort à l'intérieur est étroitement lié à l'utilisation des systèmes actifs de climatisation et de chauffage. Malgré cela, nous assistons à une construction en constante croissance de nouveaux bâtiments ⁴, sans aucune prise en compte des contraintes d'intégration de ceux-ci à leur environnement climatique d'une part, ni d'un point de vue du confort thermique qui en résulterait dans les futures ambiances intérieures d'autre part. Ce qui se répercuterait inéluctablement sur les consommations énergétiques par le recours aux systèmes énergivores ⁵ que nous cherchons à éviter ou à réduire au maximum. L'impacte sur l'environnement ne ferait donc que s'empirer et la demande d'énergie liée à ce secteur ne se verrait sans aucun doute pas en baisse dans les quelques années à venir.

Théoriquement, les voies de progrès et les marges de manœuvre dans ce secteur se trouvent au premier rang pour une stratégie nationale de développement durable ⁶ qui s'est traduite par une volonté de maîtriser et de réduire les consommations énergétiques dans le bâtiment depuis quelques années. Nous pouvons citer : la promulgation du décret exécutif N° 2000-90 du 24 Avril 2000 portant réglementation thermique. La loi 99-09 du 28 Juillet 1999 sur la maîtrise de l'énergie ⁷, le Document Technique Réglementaire (DTR) C3-2 sur la réglementation technique des bâtiments d'habitation (règles de calcul des déperditions calorifiques) ⁸. Le DTR C3-4 sur les règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments (climatisation) ⁹.

Malgré les efforts déployés, les résultats sont très peu visibles sur le plan pratique. L'augmentation des gaz à effet de serre et des consommations des énergies fossiles dues au secteur du bâtiment ne font qu'augmenter¹⁰. Cela devrait pousser les acteurs du bâtiment et de la construction (Architecte, chercheurs, ingénieurs...etc.) à réfléchir à des systèmes innovants d'intervention à la fois sur le bâtiment neuf et ancien afin de remédier à cette situation.

À priori, il serait plus intéressant de mettre l'accent sur les procédés passifs de conception architecturale et constructive. Ceux-là sont reconnus comme étant des moyens sûrs pour améliorer la qualité des ambiances thermiques à l'intérieur des bâtiments tout en minimisant les consommations énergétiques¹¹.

Toutefois, on pouvait espérer que l'amélioration de l'efficacité thermique des enveloppes extérieures des bâtiments pourrait s'obtenir en isolant efficacement. L'isolation est l'un des procédés passifs les plus utilisés pour corriger les ponts thermiques et empêcher les flux de chaleur intérieurs et extérieurs de traverser les enveloppes des bâtiments¹². Néanmoins les chercheurs ont vite fini par détecter les limites de cette technique¹³. L'isolation réduit l'impact de l'inertie thermique des matériaux de l'enveloppe en provoquant des pics de températures dus aux apports internes notamment dans les climats où les besoins de climatisation sont les plus dominants¹⁴.

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique et des limites que peut connaître l'isolation thermique sous les conditions climatiques de la plupart des villes algériennes, il devient plus urgent de nous saisir de la question du confort d'été et ce en augmentant le potentiel inertiel des enveloppes des bâtiments¹⁵.

En effet, une bonne inertie thermique des enveloppes extérieures apparaît comme l'un des moyens les plus efficaces pour améliorer les conditions de confort thermique sans recourir aux dispositifs énergivores^{16,17}. L'enveloppe extérieure du bâtiment se comporte de sorte à réduire les écarts importants entre les températures des ambiances intérieures et celles des zones de confort de l'être humain en stockant transitoirement de l'énergie

excédentaire rendue disponible au moment où elle en est le plus utile. Ainsi nous pourrions prétendre à la préservation du confort thermique en toutes saisons ¹⁸.

Grâce à la configuration de leurs parois épaisses construites avec des matériaux lourds, tels la pierre et la terre, qui permettent de stocker de la chaleur dans leurs masses, les constructions traditionnelles ont toujours montré de bonnes conditions de confort intérieur. Dans ce cas, l'inertie de l'enveloppe est obtenue par le stockage dit « sensible » ¹⁹.

Malgré leur forte inertie thermique, les nouvelles exigences constructives et architectoniques ne permettent plus de concevoir de telles enveloppes qui alourdissent la structure en poids. Aujourd'hui, le volume de l'unité de stockage (paroi) doit être infiniment petit et le plus léger possible.

Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) sont des substances thermiquement actives reconnues comme un moyen sûr d'améliorer l'inertie thermique des enveloppes des bâtiments tout en répondant à ce double souci de légèreté et de volume. Les MCPs ont la capacité de stocker transitoirement la chaleur excédentaire qui peut être restituée dans l'ambiance intérieure en cas de besoin, dans ce cas le stockage est dit « latent ».

Contrairement au stockage sensible, le stockage latent par MCPs s'effectue à température constante dans des volumes faibles et légers ²⁰ tout en garantissant une capacité de stockage supérieure de 5 à 14 fois à celle des matériaux de construction classiques²¹. Ce qui présente en outre un grand avantage au niveau architectonique. Le potentiel des MCPs dans l'enveloppe des bâtiments est donc confirmé comme un moyen sûr d'améliorer leurs performances thermique ^{22, 23} et est reconnu comme une stratégie innovante pour bâtir un environnement durable tout en économisant l'énergie ²⁴. Ce qui suscite l'attention particulière des architectes, chercheurs et ingénieurs au cours de ces dernières décennies ²⁵.

L'utilisation des MCPs dans l'enveloppe des bâtiments est un sujet qui a été traité dans la littérature scientifique durant les trois dernières décennies, mais plusieurs points d'ombre restent encore à éclairer puisque les travaux sont souvent menés à l'échelle microscopique et sont très spécialisés dans la

compréhension de certains phénomènes physiques ou chimiques très particuliers tels : l'étude du phénomène de changement de phase en lui-même, l'étude de la conductivité thermique, étude des réactions chimiques MCP/matrices...etc. Ces résultats ne sont pas sans importance, mais laissent souvent l'étude des applications pratiques des MCPs et de leur impact à l'échelle d'un bâtiment incompris et difficilement envisageable. Il ne faut aussi pas perdre de vue que le prix élevé des MCPs commercialisés et leur indisponibilité sont parfois des verrous technologiques qui entravent l'étude de leurs applications à une échelle importante telle un bâtiment.

L'étude menée dans le cadre de ce projet de thèse tente d'être la plus complète possible, l'idée est d'élaborer et caractériser un nouveau matériau de construction éco-responsable (stable chimiquement, thermiquement et mécaniquement) à partir de composés bio-sourcés et disponibles à bas coût, suivant des procédés d'élaboration simples et non coûteux. Puis d'imaginer une configuration de la paroi qui permette de doter les bâtiments neufs ou existants d'une capacité d'autorégulation thermique sans nuire à leurs surfaces utilisables et sans alourdir leurs structures.

La double problématique réside donc dans l'étape d'élaboration et de caractérisation du nouveau matériau de construction composite-MCP et dans l'analyse des performances de l'intégration de celui-ci comme solution passive pour le bâtiment neuf ou à réhabiliter ? Quel potentiel aurait le nouveau matériau pour répondre aux besoins de régulation thermique d'un bâtiment sous les conditions climatiques de la ville d'Alger ? Serrait-il fonctionnel en toute saison (hivernale, estivale et en mi-saison) ?

Pour répondre à la problématique débattue dans ce travail de thèse, plusieurs disciplines ont été embrassées telles : la thermique du bâtiment, le génie civil, la physique, la chimie, la modélisation numérique, le travail expérimental...etc. Ce qui atteste de la pluridisciplinarité de l'Architecture et de l'Architecte. Vitruve (1847) en l'an 80 avant J.C. le précise : « *L'Architecture est une science qui embrasse une grande variété d'études et de connaissances* »²⁶.

Cette thèse n'aurait jamais pu se concrétiser sans la précieuse collaboration entre plusieurs laboratoires nationaux et internationaux. Le travail a été mené au sein des laboratoires : ETAP (Environnement et Technologie pour l'Architecture et le Patrimoine) de l'université de Blida-1-, il s'inscrit dans les préoccupations de son axe de recherche intitulé « Architecture et matériaux innovants » ; le laboratoire LMSE (Laboratoire de Mécanique Structure et Énergétique) de l'université de Tizi-Ouzou ; le CERTES (Centre d'Études et de Recherches en Thermique Environnement et Systèmes) de l'université Paris-Est Créteil (PARIS XII) et enfin le Laboratoire Interdisciplinaire des Énergie de demain (LIED) de l'université Paris Diderot (PARIS VII).

Cette thématique est une première pour les filières de l'Architecture en Algérie. La spécificité de ce travail tel qu'il a été décrit précédemment est qu'il s'intéresse à l'étude d'un nouveau matériau composite-MCP depuis son stade d'élaboration jusqu'à l'étude de son comportement à l'intérieur de l'enveloppe d'un bâtiment.

Ainsi, la thèse est structurée en cinq chapitres. Le premier a pour objet d'introduire le lecteur au contexte du domaine d'étude en donnant un aperçu historique sur l'utilisation des MCPs, une synthèse de l'état de l'art sur le stockage de la chaleur et sur les MCPs en général (leurs types, leur processus d'intégration dans les matériaux de l'enveloppe des bâtiments) ainsi que leurs applications dans le domaine du bâtiment.

Le second chapitre présente les méthodes et les techniques expérimentales d'élaboration du nouveau matériau de construction composite-MCP. Il donne les explications sur le processus de son élaboration, les propriétés et la provenance des matières premières employées ainsi que le matériel et équipements de laboratoire utilisés.

Le troisième chapitre traite de l'identification des propriétés du nouveau matériau de construction composites-MCP par différentes techniques de caractérisation thermique, mécanique et physico-chimique. Les techniques ainsi que les appareils de caractérisation y sont présentés.

Un banc expérimental conçu spécialement pour accueillir un prototype de mûr en brique de terre cuite (modèle de parois très répandu en Algérie et dans la plupart des pays méditerranéens) introduisant le nouveau matériau composite-MCP a été mis en place afin d'effectuer des campagnes de mesures comparatives de la performance de cette paroi avec et sans l'intégration du nouveau matériau. Cette phase est résumée dans le chapitre 4 de cette thèse.

Le cinquième chapitre est consacré à la modélisation numérique. Le protocole expérimental présenté dans le chapitre 3 a été modélisé numériquement sous COMSOL Multiphysics V3.5a® avec et sans l'intégration du nouveau matériau composite-MCP. Les résultats expérimentaux obtenus dans le chapitre 3 ont été confrontés aux résultats numériques afin de valider le modèle numérique.

Un exemple de maison d'habitation a été modélisé avec et sans l'intégration du composite-MCP dans l'environnement numérique de Energy-Plus sous les conditions climatiques de la ville d'Alger sur tous les mois de l'année afin de vérifier l'impact de l'intégration de ce nouveau matériau sur les conditions de températures intérieures ainsi que sur les consommations d'énergie liées au chauffage et à la climatisation à l'intérieur de la maison modélisée avant et après l'intégration du nouveau matériau composite-MCP.

La thèse se termine par une conclusion générale qui résume les principaux résultats tirés en réponse à la problématique débattue et met en lumière les perspectives de cette recherche pour la continuité des travaux.

CHAPITRE 1

UTILISATION DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE POUR LE CONFORT THERMIQUE DANS LE BATIMENT

1.1 Introduction

Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) sont connus pour améliorer l'inertie thermique des enveloppes de bâtiments et doter ceux-ci d'une bonne capacité d'autorégulation des températures intérieures autour des zones de confort de l'être humain. Le présent chapitre a pour objectif d'éclairer le contexte dans lequel vient s'insérer ce travail de recherche et de définir quelques notions fondamentales nécessaires à la compréhension du sujet de thèse.

Un bref rappel historique sur l'utilisation des MCPs dans le bâtiment est important à écrire en guise de reconnaissance à cette admirable innovation mise au point par l'architecte américaine Eleanor Raymond en collaboration avec l'ingénieur hongroise Maria Telkes au début des années quarante³⁶.

Le stockage thermique par chaleur sensible et par chaleur latente intéresse de près la communauté scientifique puisque ces deux phénomènes permettent d'améliorer l'inertie thermique des bâtiments de manière passive. Contrairement aux matériaux de construction traditionnels, les MCPs sont le seul vecteur prometteur qui permet d'avoir ces deux modes de stockage que nous expliquons dans le présent chapitre.

Un état de l'art sur les MCPs se décline ensuite en trois grandes parties : une première partie qui donne une présentation détaillée de ce que les MCPs, leurs classifications, leur principe actif, la différence entre les MCPs de laboratoire et les MCPs commercialisés. La seconde partie présente les

MCPs qui peuvent être retenus pour des applications dans le bâtiment, les différents processus de leur intégration dans les matériaux de construction. Dans la dernière partie de ce chapitre nous réalisons une revue des travaux qui s'intéressent aux applications pratiques des MCPs dans le bâtiment ainsi qu'aux travaux expérimentaux et numériques publiés dans ce domaine.

1.2 Contexte : Objectifs et motivations

Si l'Algérie a connu d'énormes progrès dans le domaine du génie civil après la catastrophe sismique de 2003, elle n'accorde par contre que très peu d'intérêts à la thermique de tous les types de bâtiments sur le plan pratique : anciens, nouveaux ou en cours de construction... au moment où plusieurs pays du monde se mobilisent pour adopter les mesures nécessaires afin d'éviter ou du moins diminuer les conséquences de la catastrophe qui risque de peser lourd sur la planète. Si de sérieuses mesures ne sont pas prises pour améliorer l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment, la demande énergétique augmenterait de 50 % d'ici 2050²⁷.

Dans des circonstances où de réels efforts devraient être déployés pour concevoir au mieux des bâtiments efficaces énergétiquement, nous assistons au contraire dans notre pays à des pratiques architecturales inappropriées telles : la mise en place arbitraire des structures en mûr rideau copiées sur les pays froids ; une utilisation standardisée des matériaux des enveloppes des bâtiments sans tenir compte des spécificités climatiques des régions (béton, brique de terre creuse, parpaing, mortier de ciment...etc.) ; prédilection envers les coffrages tunnels pour leur rapidité d'exécution prouvée mais qui en revanche donnent forme aux enveloppes les plus défectueuses thermiquement. Il s'agit de parois en béton armé d'une épaisseur d'une dizaine de centimètres avec un coefficient de transmission thermique « U ($W/m^2.K$) » très élevé. En plus de cela, aucune mesure n'est prise pour la réhabilitation thermique des vieilles constructions qui elles aussi sont aujourd'hui dotées d'installation de climatisation et de chauffage afin de les rendre exploitables.

Malgré les avancées de la recherche et de la science, il semble que nos ancêtres ont mieux su se conformer aux exigences de la construction durable avant l'heure, puisque celles-ci n'avaient été mises au point qu'au lendemain

du choc pétrolier de 1973²⁸. Les configurations des enveloppes traditionnelles étaient si efficaces qu'on pouvait avoir des conditions de confort à l'intérieur indépendamment de tout système consommateur d'énergie.

Aujourd'hui, les nouveaux besoins de la construction moderne ne permettent plus de reproduire à l'identique les configurations des bâtiments anciens malgré leur efficacité thermique. Les chercheurs confirment que l'avenir du bâtiment durable est lié aux matériaux verts en général et aux matériaux à changement de phase en particulier^{29,30}.

Ainsi, il s'agit dans ce travail de thèse d'expérimenter un nouveau matériau à changement de phase de laboratoire, bio sourcé et éco responsable pour renforcer de manière simple et non coûteuse l'inertie thermique des enveloppes des bâtiments neufs et anciens.

1.3 Repères historique sur l'utilisation des MCPs dans le bâtiment

L'utilisation des MCPs remonte au moyen âge. Les grecs et les romains acheminaient de la glace des montagnes à dos d'ânes pour la vendre aux citadins dans ce que l'on appelait autrefois les « magasins de glace ». Celle-ci était utilisée entre autre pour le refroidissement des pièces de vie³¹. Leur technique de réfrigération consistait à creuser un trou dans le sol à l'intérieur duquel la glace était placée puis recouverte de paille.

Depuis des générations, les habitants de l'arctique s'étaient servis de la glace –matériau disponible localement pour construire leurs igloos et se tenir au chaud³². La température moyenne à l'intérieur d'un igloo (Fig1.1) occupé est autour de 9 °C à 15 °C, même pendant les hivers rigoureux ou les températures extérieures descendent en dessous de -45 °C³³. Ce type d'habitations des indigènes du nord est une invention ingénieuse qui applique le principe de la chaleur latente de changement de phase du matériau de son enveloppe pour autoréguler les températures intérieures.

Il aurait fallu attendre le milieu du XVIII^{ème} siècle pour que ces concepts de la chaleur latente et de la chaleur sensible soient compris après avoir été découvert par le scientifique Écossais Joseph Black ; professeur de médecine et de chimie à l'université de Glasgow (Royaume Uni) qui a assisté James Watt dans le développement de la machine à vapeur³⁴. Désormais, tout

matériau qui utilise sa capacité de changement de phase à des fins de chauffage, de refroidissement ou de stabilisation des températures est défini comme un Matériau à Changement de Phase.

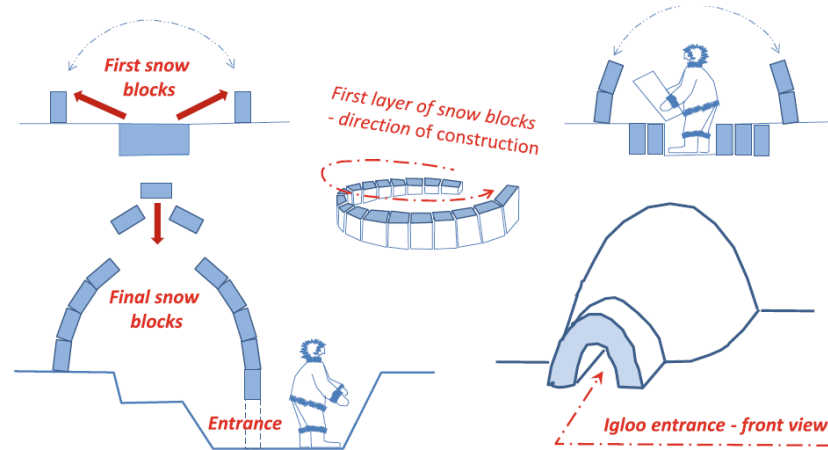


Figure1. 1 l'igloo-La première construction traditionnelle utilisant un MCP. ³⁵

Depuis le milieu du XX^{ème} siècle, la chaleur latente de changement de phase de la glace ainsi que de plusieurs autres matériaux capables de stocker et de déstocker de la chaleur pendant la transition de phase ont été utilisés avec succès dans le bâtiment³⁵, mais la première grande expérience éco technologique connue mondialement (Fig. 1.2) a été réalisée au lendemain de la seconde guerre mondiale (1948) à Dover, Massachusetts, USA. Il s'agit de la première maison solaire intégrant des MCPs dans son enveloppe. Elle a été conçue par l'architecte américaine Eleanor Raymond (1887-1989) en collaboration avec l'ingénieur hongroise Maria Telkes (1900-1995)³⁶.



Figure1. 2 Articles de journaux faisant connaître la première maison à MCP reconnue. ³⁶

Les dessins d'architecture de la maison solaire (Fig. 1.3) ont été esquissés en février 1948 afin que cette dernière ouvre ses portes avec beaucoup d'enthousiasme en mars 1949 (Fig. 1.4).

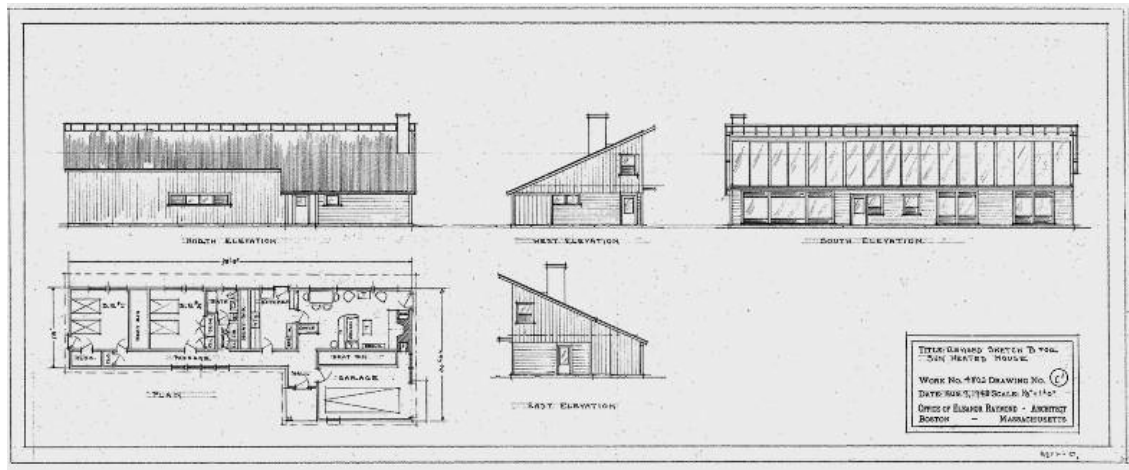


Figure1. 3 Dessins d'architecture d'Eleanor Raymond de la maison solaire à MCP à Dover. ³⁶

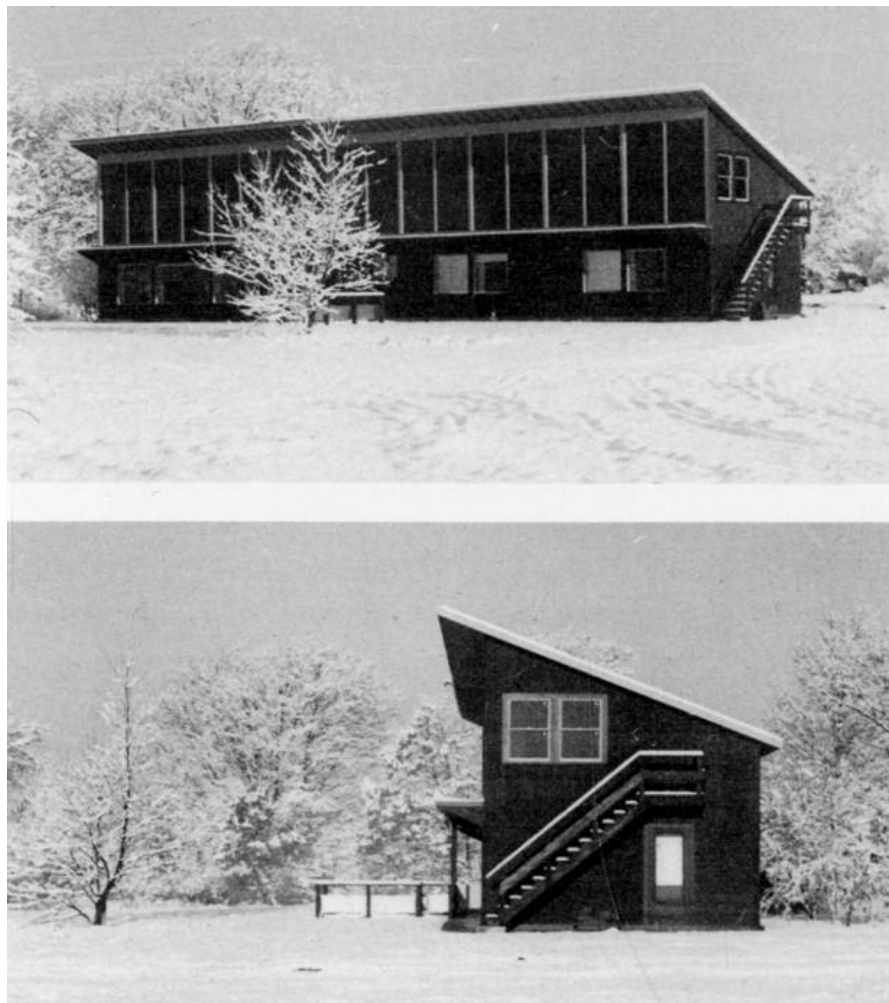


Figure1. 4 La maison solaire à MCP achevée. ³⁶

Entre 1950 et 1980, plusieurs bâtiments résidentiels dans le monde ont été construits suivant le principe de la conception solaire de Maria Telkes et Eleanor Raymond. L'une des premières maisons solaires d'une surface de 102 m² plancher a été construite au nouveau Mexique (USA) ³⁷.

Entre 1977 et 1979, à la suite des résultats d'essais prometteurs effectués sur le terrain et des nombreuses publications du « Los Alamos National Laboratory » (USA), décrivant les principes de la conception solaire passive^{38,39}, la construction des maisons solaires intégrant les MCPs s'est multipliée aux états unis. En Europe, la construction des maisons intégrant des MCPs combinée à de nouvelles découvertes dans le domaine de l'architecture solaire passive commençaient aussi à se développer⁴⁰.

En 1980, les MCPs furent incorporés dans les matériaux de construction conventionnels, ainsi plusieurs techniques ont été mises au point pour imprégner d'MCP des matériaux tels le béton et le gypse ^{41, 42, 43, 44,45}.

Au cours de la première décennie du XXI^{ème} siècle, des centres de recherches avaient mis au point des isolants renforcés d'MCPs. En 2003, le chercheur américain Jan Košny a conçu et construit le premier mur renforcé de mousse comportant un MCP. En 2004 des équipes de recherche du Oak Ridge National Laboratory (ORNL) ont conduit les premières expériences dynamiques sur un mûr équipé d'une double couche de mousse imprégnée d'MCP. À partir de 2010 l'union européenne a pris la tête du développement de nouveaux isolants renforcés d'MCPs ³⁵.

Aujourd'hui, l'intégration des MCPs dans les enveloppes des bâtiments est au centre de la recherche, cela constitue un enjeu majeur en cette période de prise de conscience de la nécessité de faire des économies d'énergie dans le domaine du bâtiment. Si de grands chercheurs comme ceux que nous avons cités précédemment confirment que l'avenir du bâtiment est dans les MCPs, c'est qu'il faut vraiment leur faire confiance et que nous devrions plutôt continuer à écrire cette histoire...

1.4 . Le stockage de l'énergie thermique et les économies d'énergie

Dans la plupart des systèmes, il existe un décalage entre l'offre et la demande de l'énergie. Le stockage de celle-ci offrirait une solution efficace

pour compenser ce déséquilibre. Ainsi, les sujets de recherche sur le stockage de l'énergie thermique sont donc nettement aussi importants que ceux qui s'intéressent au développement de nouvelles sources d'énergie alternatives^{45, 388, 389,390}.

Dans le secteur du bâtiment, le chauffage et la climatisation constituent une charge importante sur nos ressources énergétiques, or une grande partie de cette charge peut être couverte par l'énergie solaire en utilisant un mode de stockage approprié. Le stockage de l'énergie thermique, communément appelé « stockage de la chaleur ou du froid » permet d'emmagasiner (stocker) de bonnes quantités de froid ou de chaleur pour une réutilisation ultérieure. Pour cela le stockage doit être réversible^{46, 47}. La figure 1.5 montre les différentes méthodes de stockage réversibles possibles dans le domaine du bâtiment.

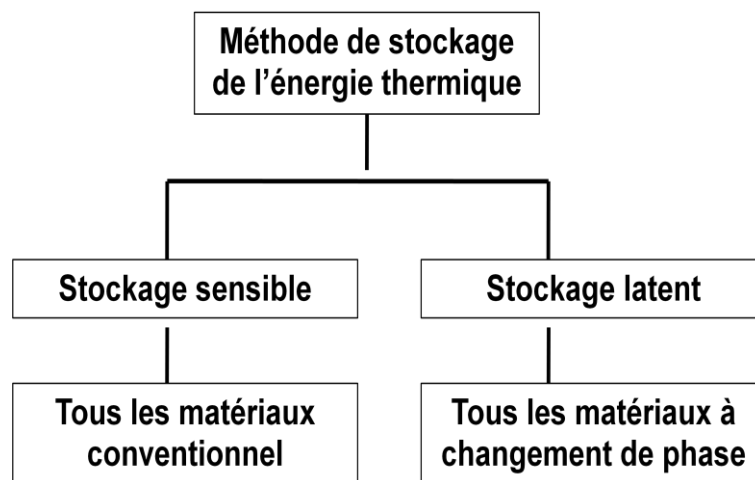


Figure1. 5 les différents modes de stockage de l'énergie thermique.⁴⁶

L'énergie thermique peut être stockée à des moments où elle est abondamment disponible afin d'être utilisée ultérieurement selon le besoin, cependant l'un des facteurs à prendre en considération dans le choix du système de stockage dans le bâtiment est l'espace occupé par l'unité de stockage ainsi que son poids.

1.4.1 Le stockage sensible de l'énergie thermique dans le bâtiment

L'homme d'autrefois avait toujours construit des habitations dont les enveloppes extérieures permettaient d'absorber la chaleur pendant la journée

empêchant la surchauffe tout en maintenant une température confortable à l'intérieur des habitations. Ceci se faisait avec des matériaux lourds tels la pierre et l'adobe par exemple. Ces matériaux inertes ont la capacité d'emmagasiner d'importantes quantités de chaleur pendant la journée pour les libérer progressivement le soir⁴⁸, c'est ce que l'on appelle le stockage sensible.

Les constructions traditionnelles dans le monde sont connues pour stabiliser les températures des ambiances intérieures grâce au stockage sensible de l'énergie thermique à l'intérieur de leurs enveloppes construites à partir de matériaux lourds. Le Cliff Palace (Colorado, États Unis d'Amérique) (Fig. 1.6) est l'une des plus grandes et célèbres habitations traditionnelles dans le monde, qui utilise le principe du stockage sensible dans la pierre et la terre pour un confort thermique optimal à l'intérieur.

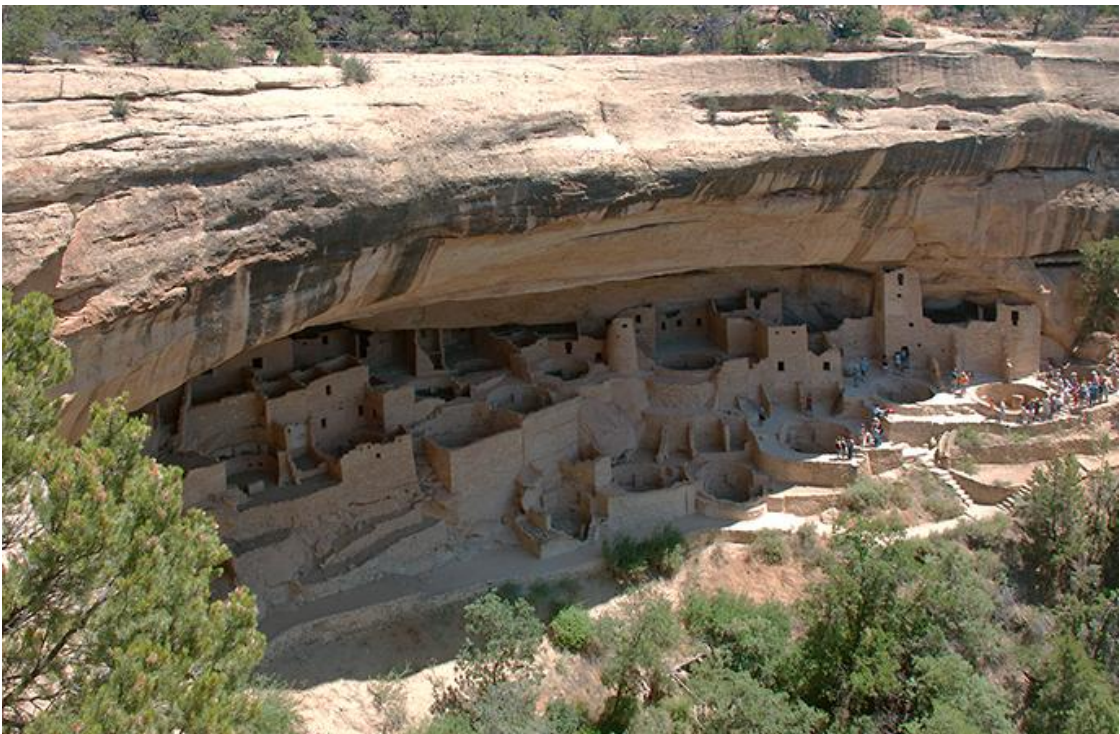


Figure1. 6 Cliff palace, la plus célèbre habitation en pisé (Colorado, états unis d'Amérique).⁴⁹

La capacité du stockage sensible de l'énergie thermique dépend de la chaleur spécifique du matériau de l'enveloppe « C », de l'importance de son volume « V » ainsi que de sa densité « ρ ». Ce type de stockage s'accompagne d'une augmentation considérable de la température de l'unité de stockage (l'enveloppe) ^{50,51}. Le tableau 1.1 montre les propriétés thermo-

physiques de certains matériaux qui ont une bonne capacité de stockage sensible de l'énergie thermique.

Tableau 1. 1 : Tableau des propriétés thermo physiques de quelques matériaux utilisés pour le stockage sensible 52, 53.

Le matériau	La densité ρ (kg/m ³)	Chaleur spécifique C (J/kg.K)
La pierre	2560	879
La brique	1600	840
Le béton	1900-2300	880
L'argile naturelle	1458	879
La terre	2050	1840

1.4.2 Le stockage latent de l'énergie thermique dans le bâtiment

Les nouvelles exigences architecturales et structurelles de construction de nouveaux bâtiments ou de réhabilitation thermique de l'ancien bâti ne permettent plus d'opter pour les matériaux inertes utilisés anciennement dans le processus du stockage thermique sensible. Ceux-là alourdissent la structure en poids et occupent d'importants volumes souvent déduits des espaces intérieurs exploitables. La littérature a montré que le stockage latent de l'énergie thermique est l'un des domaines de recherche les plus actifs qui œuvrent à améliorer plus efficacement la qualité des ambiances intérieures dans le bâtiment tout en remédiant aux problèmes détectés dans le stockage sensible⁵⁴. Cela n'est rendu possible dans le bâtiment qu'en pensant à intégrer les matériaux à changement de phase dans les matériaux et structures de celui-ci.

Le stockage latent implique de chauffer un matériau (MCP pur ou composite-MCP) jusqu'à ce qu'il atteigne sa température caractéristique de changement de phase (appelée température de fusion). À ce moment là, il devient capable de stocker d'importantes quantités de chaleur à température constante (la température du matériau reste donc stable pendant tout le processus de changement de phase). D'importantes quantités de chaleur peuvent être alors stockées dans des volumes réduits de ces matériaux (MCPs

ou composites-MCP). Ce phénomène physique est connu sous le nom de chaleur latente de fusion⁵⁵.

À l'inverse, la chaleur stockée durant la phase de fusion est restituée progressivement lorsque les températures descendent en dessous du point de fusion. À ce moment là, le matériau (MCP ou composite-MCP) se solidifie pour se préparer à un second cycle de fusion. Cela est connu sous le nom de chaleur latente de solidification⁵⁶.

Lors du processus de choix d'un système de stockage approprié à l'application désirée, Il est très important de prendre en considération le volume de l'unité de stockage. C'est pour cela que la méthode du stockage latent reste la plus appropriée pour les applications de bâtiment, que ça soit dans le cas de la construction neuve ou dans celui de l'éco-réhabilitation thermique des bâtiments existants. Contrairement à la méthode sensible, le stockage latent permet de stocker plus de dix fois de quantité de chaleur dans des volumes très réduits^{57, 58,59}. La figure 1.7 illustre la différence entre le mode de stockage sensible et le mode de stockage latent.

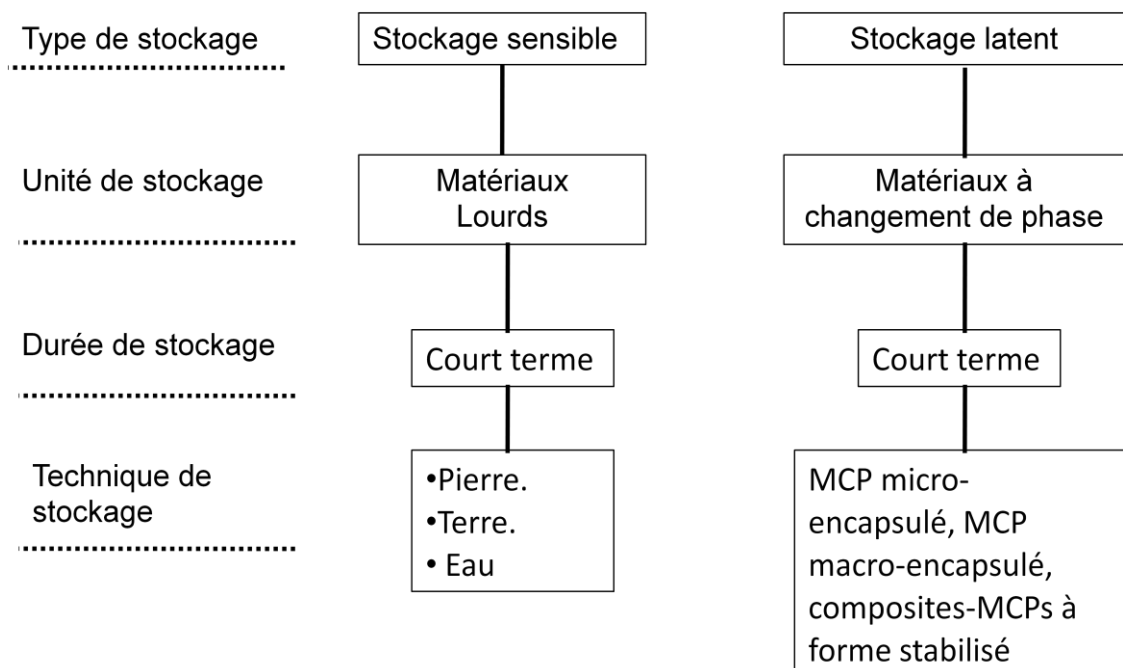


Figure1. 7 Schéma montrant la différence entre le stockage sensible et le stockage latent.

1.5 Les Matériaux à Changement de Phase (MCPs) dans le bâtiment

L'utilisation des MCPs combinés aux matériaux de construction conventionnels (bois, brique, pierre, béton, plâtre...etc.) est une alternative très attrayante pour renforcer l'inertie thermique des bâtiments par la méthode de stockage latent de la chaleur dans des volumes faibles et une augmentation insignifiante de la température sensible de l'unité de stockage.

Les plages de température de changement de phase des MCPs applicables dans le bâtiment se situent généralement entre -5 °C (température minimale de l'enveloppe des bâtiments en saison hivernale) et 70 °C (température maximale du toit d'un bâtiment en saison estivale). Ces températures englobent toutes les applications confondues (actives et passives)⁶⁰. Les températures de changement de phase des MCPs utilisables pour des applications passives telles : les matériaux de finitions intérieures des bâtiments, dans les structures des murs et planchers...etc. ; devraient se situer autour des températures de confort de l'être humain (de 19 °C à 24 °C)^{61, 62}.

L'utilisation des MCPs (solide-liquide) pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des constructions neuves ou des bâtiments existants a été démontrée à travers plusieurs projets. Ainsi il s'agit dans la présente partie de donner une définition des MCPs (solide/liquide) ainsi que des différents types de substances utilisées comme MCP dans le bâtiment. Un aperçu des différents modes d'intégration de ces substances dans le domaine du bâtiment est décrit. Pour finir des exemples de projets réalisés par l'intégration des MCPs à travers le monde sont donnés.

1.5.1 Généralités sur les Matériaux à Changement de Phase

Les matériaux à changement de phase sont des substances thermiquement actives dont la performance se base sur de simples lois de la physique. Tout matériau a la capacité d'exister dans la nature sous trois formes (solide, liquide, gaz). C'est la température de celui-ci qui détermine la phase sous laquelle ce dernier peut paraître. L'exemple de l'eau est le plus commun. C'est le matériau le plus abondant à la surface de la terre, tout le monde sait qu'au dessous de 0°C l'eau se solidifie pour se transformer en

glace, entre 0°C et 100 °C l'eau reste à l'état liquide et au dessus de 100 °C elle se vaporise pour devenir gaz.

Il convient de préciser que pendant le processus de changement de phase (glace/eau) (solide/liquide), une bonne quantité de chaleur responsable de la fonte de la glace est stockée à température constante (0°C) sur une plage de temps (t). Ce qui explique que la température mesurée de l'eau à l'état liquide reste de 0°C pendant tout le processus de fusion. Le stockage est dit latent dans ce cas.

Tous les matériaux passent exactement par les mêmes séquences de changement de phase citées précédemment. Cependant, chacun dispose de ses propres températures caractéristiques de changement de phase à partir desquelles il peut paraître sous un état physique donné. Cette grandeur caractéristique de chaque matériau est appelée : point de fusion/ ou de solidification (T_f/ T_s).

Chaque matériau dispose de sa propre capacité à stocker des quantités de chaleur données sur des plages de temps différentes pendant lesquelles sa température sensible est maintenue stabilisée. Cette deuxième grandeur caractéristique aux MCPs est appelée la capacité latente de fusion ou de solidification (L_f/ L_s) (l'enthalpie de changement de phase). La figure 1.8 illustre le principe actif d'un MCP.

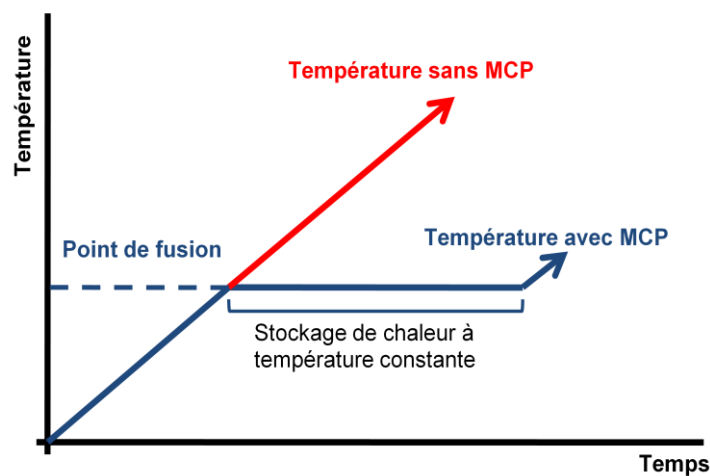


Figure1. 8 Évolution des températures d'un matériau chauffé avec la même source de chaleur sur la même plage de temps avec et sans l'intégration d'un MCP

À partir de la figure 1.8, on constate que la température d'un même matériau chauffé suivant le même processus de chauffe évolue différemment avec et sans MCP. La température du matériau sans MCP continue d'évoluer de manière linéaire tandis que celle-ci reste constante sur une plage de temps importante si ce même matériau devient doté d'un MCP. La stabilisation de la température s'effectue une fois le changement de phase atteint. C'est cette propriété des MCPs qui rend leur application avantageuse dans le domaine du bâtiment.

Il s'agit dans le présent travail de thèse de s'intéresser au changement de phase (solide/liquide) pour la fusion et (liquide/solide) pour la solidification. Ce type de changement de phase est le plus approprié aux applications de bâtiment en raison de son importante enthalpie qui permet de stocker de grandes quantités de chaleur d'une part, de sa faible expansion volumique inférieure à 10 % pendant le processus de transition de phase⁶³.

Les MCPs peuvent être classés en trois grandes familles : les substances organiques, inorganiques et les eutectiques^{52, 64}. Les MCPs organiques ont la capacité de faire plusieurs cycles de fusion/ solidification sans ségrégation de phase, ceux-ci montrent très peu ou presque pas de surfusion, ils sont en plus non corrosifs. Cette catégorie de MCPs englobe les substances paraffiniques (cires) et les non paraffiniques (acides gras)⁶⁵.

Les MCPs inorganiques englobent les hydrates de sel et les métaux. Ils sont utilisés pour les applications de hautes températures. Ce sont des substances qui ont une forte enthalpie de changement de phase mais qui présentent en revanche plusieurs inconvénients. Les MCPs inorganiques se cristallisent à basse température et sont difficilement maîtrisables à haute température^{66, 67}.

Les eutectiques sont des mélanges de MCPs (organique/ organique), (organique/ inorganique), (inorganique/ inorganique) qui sont mis au point de sorte à ce que le MCP composite résultant ait une température de fusion la plus basse possible, comparée aux substances initiales qui les composent⁶⁸.

Chaque famille de MCP a ses propres avantages et inconvénients. Le tableau 1.2 résume les principaux avantages et inconvénients des familles

principales des substances MCPs citées précédemment. Les tableaux suivants affichent certains MCPs ainsi que leurs propriétés de changement de phase.

Tableau 1. 2: les principaux avantages et inconvénients des différents types d'MCPs ⁶⁷.

	Organiques	Inorganiques
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Non corrosif • Pas ou peu de surfusion. • Bonne stabilité chimique et thermique 	<ul style="list-style-type: none"> • Grande chaleur latente
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Faible chaleur latent • Faible conductivité thermique • Haute Inflammabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Surfusion • Corrosifs • Séparation de phase • Ségrégation de phase • Instabilité thermique

Tableau 1. 3: Principales caractéristiques de quelques MCPs organiques paraffiniques.

L'MCP	Symbole chimique	Point de fusion (°C)	L _f kJ/kg
n-Tetradecane ⁷⁰	C ₁₄ H ₃₀	6	228
n-Pentadecane ³⁵	C ₁₅ H ₃₂	10	205
n-Exadecane ⁷¹	C ₁₆ H ₃₄	18	237
n-Heptadecane ⁷²	C ₁₇ H ₃₆	22	213
n-Octadecane ⁷³	C ₁₈ H ₃₈	28	244
n-Nanodécane ⁷⁴	C ₁₉ H ₄₀	32	222
n-Eicosane ⁷¹	C ₂₀ H ₄₂	37	246
n-Henicosane ³⁵	C ₂₁ H ₄₄	40.4	200
n-Docosane	C ₂₂ H ₄₆	44.5	249
n-Tricosane ⁷⁶	C ₂₃ H ₄₈	47.5	232
n-Tetracosane ⁷⁷	C ₂₄ H ₅₀	52	255
n-Pentacosane ⁷⁷	C ₂₅ H ₅₂	54	238
n-Exacosane ³⁵	C ₂₆ H ₅₄	56.5	256
n-Heptacosane	C ₂₇ H ₅₆	59	236
n-Octacosane ⁷⁵	C ₂₈ H ₅₈	64.5	253
n-Nonacosane ⁷⁶	C ₂₉ H ₆₀	65	240
n-Triacontane ⁷⁷	C ₃₀ H ₆₂	66	251
n-Hentriacontane ³⁵	C ₃₁ H ₆₄	67	242
n-Dotriacontane ⁷⁵	C ₃₂ H ₆₆	69	170
n-Triatriacontane ³⁵	C ₃₃ H ₆₈	71	268

Tableau 1. 4: Principales caractéristiques de quelques MCPs organiques non-paraffiniques

L'MCP	Point de fusion (°C)	L _f kJ/kg
Acide Formique ⁷⁹	7.8	247
Poly glycol E400 ⁸⁰	8	99.6
Diméthylsulfoxyde ⁸¹	16.5	86.7
glycérine ⁸²	17.9	198.7
Octadécyle 3-Mercaptopropylate ⁷⁸	21	143
Polyglycole E600 ⁷⁸	22	127.2
I-Dodécanol ⁸²	26	200
Octadécyl thioglycate ⁸³	26	90
Palmitate de méthyle ⁸⁴	29	205
I-Tetradécanol ⁷⁹	38	205
Camphénylone ⁸²	39	205
Docasyl bromure ⁸³	40	201
Caprylone ⁸³	40	259
Phénol ⁷⁸	41	120
Stéarate de méthyle-12-hydroxy ⁷⁸	42-43	120-126
cyanamide ⁸⁴	44	209
Acide hydrocinnamique ⁸⁴	48	118
Camphène ⁸¹	50	238
Nitro Naphtalene ⁷⁹	56.7	103
Cire d'abeille ⁸¹	61.8	177
Acide glycolique ⁸⁴	63	109
Polyglycol E6000 ⁸⁰	66	190
Acide acrylique ⁷⁸	68	115

Tableau 1. 5: Principales caractéristiques des MCPs commercialisés.

L'MCP	Point de fusion (°C)	L _f kJ/kg
RT20 ⁸⁵	20-22	172
RT26 ⁸⁶	24-28	131
RT27 ⁸⁶	26-28	179
ClimSel C 23 ⁸⁹	23	148
ClimSel C 24 ⁸⁷	24	216
Climsel C 32	32	212
STL 27 ⁸⁹	27	213
S27 ⁸⁷	27	207
E17 ⁸⁸	17	143
E19-E21-E30 ⁸⁸	19-21-30	146-150-201

Tableau 1. 6: Principales caractéristiques des MCPs inorganiques

L'MCP	Point de fusion (°C)	L _f kJ/kg
Di potassium phosphate hexa hydraté ⁹⁰	14	109
Tétra hydrate de fluorure de potassium ⁹¹	18.5	231
Bromure ferrique hexa hydraté ⁹²	21	105
Nitrate de manganèse hexa hydraté ⁹²	25.8	125.9
		171-
Chlorure de calcium hexa hydraté ⁹⁰	29-30	190
Tri hydrate de nitrate de lithium ⁹³	30	296
Bromure de calcium hexa hydraté ⁹⁴	30.2	115.5
Sulfate de sodium déca hydraté ⁹⁵	32.4	254
Yavapaïte dodécahydrate ⁹²	33	173
Bromite de lithium di hydraté ⁹⁵	34	124
Carbonate de sodium déca hydraté ⁹⁰	34.2	146.9
Ortho phosphate de sodium dodécahydrate ⁹¹	35.5-44	265
Nitrate de zinc hexa hydraté ⁹⁴	36.2	246.5
Chlorure ferrique hexa hydraté ⁹²	37	223
Nitrate de manganèse tétra hydraté ⁹³	37.1	115
Sulfate de cobalt hepta hydraté ⁹⁵	40.7	170
Fluorure de potassium di hydraté ⁹⁴	42	162
Iodure de magnésium octa hydraté ⁹⁵	42	133
Iodure de calcium hexa hydraté ⁹⁴	42	162
Nitrate de zinc tétra hydraté ⁹⁰	45	110
Nitrate de magnésium tétra hydraté ⁹⁶	47	142
Nitrate de calcium tétra hydraté ⁹⁶	47	153
Nitrate ferrique nano hydraté ⁹⁶	47	155
Silicate de sodium tétra hydraté ⁹⁶	48	168
Ortho phosphate de potassium tri hydraté ⁹¹	48	99
		187-
Thiosulfate de sodium penta hydraté ⁹³	48-55	209
Sulfate de magnésium hepta hydraté	48.5	202
Tri hydrate de nitrate de calcium	51	104
Zinc nitrate bi hydraté ⁹⁷	55	68
Chlorure ferrique bi hydraté ⁹¹	56	90
Nitrate de nitrate hexa hydraté ⁹³	57	169
		226-
Acétate de sodium tri hydraté ⁹⁷	58	264
		151-
Chlorure de magnésium tétra hydraté	58	178
Nitrate ferrique hexa hydraté ⁹³	60.5	126
Sulfate d'aluminium et de sodium déca hydraté ⁹¹	61	181
Dodéca hydrate de phosphate de sodium ⁹⁷	65	190
Tétra sodium pyrophosphate deca hydraté ⁹⁷	70	184
Acétate de lithium di hydraté ⁹⁷	70	150

Tableau 1. 7: Principales caractéristiques des MCPs eutectiques (organiques et inorganiques)

L'MCP	Proportion %	Point de fusion (°C)	L _f kJ/kg
Acide caprylique-1-dodacanol ⁹⁸	70-30	6.5	171
Acide caprique-laurique plus penta décane ¹⁰³	90- 10	13.3	142.2
Acide caprique-laurique ¹⁰³	65- 35	18	148
Acide laurique-caprique ¹⁰⁰	55-45	21	143
Acide caprique-myristique ¹⁰⁰	73.5-26.5	21.4	152
Capric-acide palmitique ¹⁰¹	76.5- 23.5	21.8	171.2
Acide caprique-myristique ¹⁰²	66- 54	24	147
Acide caprique-stéarique ⁹⁹	82- 17	24.7	178.6
Acide laurique-palmitique ¹⁰¹	77- 23	33	150.6
Acide laurique-myristique ¹⁰¹	66- 34	34.2	168.8
Acide laurique-palmitique ¹⁰¹	69- 31	35.2	166.3
L'acide laurique-stéarique ⁹⁹	75.5 - 24.5	37	183.7
L'acide myristique-palmitique ¹⁰²	58 - 42	42.6	169.7
L'acide myristique-stéarique ¹⁰²	64- 36	44.1	182.4
L'acide palmitique-stéarique ⁹⁹	64.2- 35.8	52.3	181.7
Acide naphthalène-benzoïque	67.1- 32.9	67	123
Triéthyloléthane + eau + urée	45- 55	13.4	160
Butyl stéarate-butyl palmitate ¹⁰²	49-48+3+adjs	17	138
Stéarate de méthyle-stéarate de cétyle ¹⁰³	91 - 9	22.2	180
Stéarate de méthyle-palmitate de méthyle ⁹⁹	86 - 14	23.9	220
Stéarate de méthyle-palmitate de cétyle ¹⁰³	91 - 9	28.2	189
Triéthyloléthane + urée ⁹⁸	62.5 - 37.5	29.8	218
Acétamide-urée ⁹⁸	63.5 - 37.5	53	—

1.5.2 Les substances utilisables comme MCPs dans le bâtiment

D'après la définition des MCPs fournie dans la section précédente du présent chapitre, toutes les substances qui se trouvent à la surface de la terre pourraient être utilisées pour les applications de stockage latent de l'énergie, or cette hypothèse ne peut guère être vérifiée pour les applications de bâtiment.

En 1980, Lane ¹⁰⁴ et Guyer¹⁰⁵ avaient répertorié environ 210 substances MCPs dont les propriétés correspondent aux applications dans le domaine du bâtiment.

Les recherches ont montré que les MCPs de bâtiment devraient se caractériser par une forte enthalpie d'une part, et des températures de changement de phase adaptées aux conditions d'exploitation du bâtiment en question d'autre part. La figure 1.9 situe les MCPs de bâtiment en fonction de leurs propriétés thermiques parmi tout le reste des substances MCPs. Cette catégorie de MCPs devraient être capables de stocker et de déstocker de la chaleur sur un intervalle de temps d'une journée pendant toute la durée de vie de l'élément du bâtiment –estimée à environ 25 ans- dans lequel ils sont intégrés¹⁰⁶. De plus, les propriétés thermiques des MCPs de bâtiment ne devraient pas être affectées après plusieurs cycles répétitifs de (stockage/déstockage)¹⁰⁷. Le tableau 1.8 montre le nombre de cycles de (fusion/solidification) que devrait remplir un MCP sur un intervalle d'une journée puis d'une année suivant l'application envisagée.

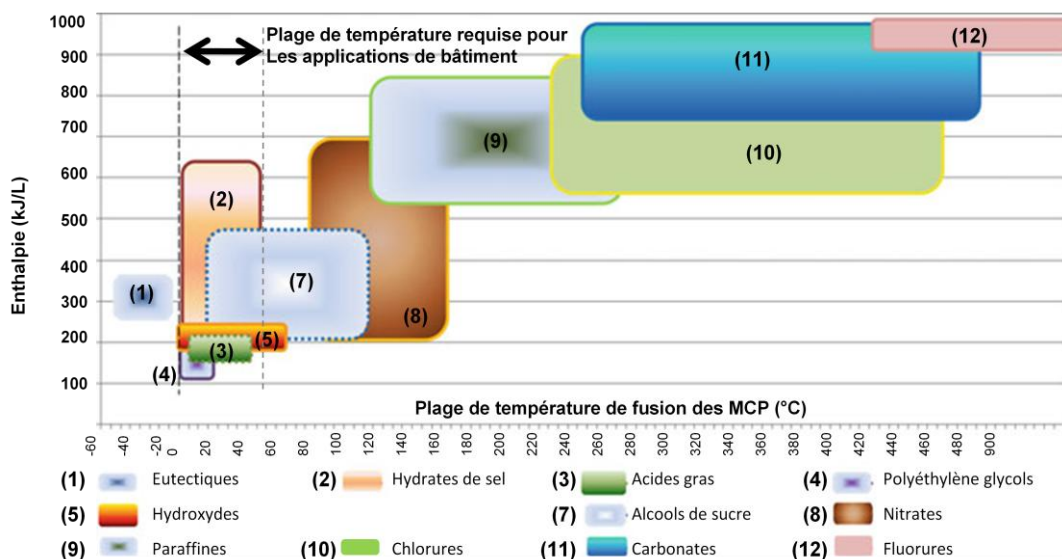


Figure 1.9 Propriétés thermiques des substances MCPs utilisables dans le domaine du bâtiment³⁵.

Malgré leur faible conductivité thermique, les substances MCPs organiques (solide/ liquide) restent les plus appropriées aux applications de bâtiment en raison de leur compatibilité avec les éléments de la structure, leur stabilité chimique, leur disponibilité dans une large gamme de température de changement de phase...etc¹⁰⁸. Le poids de celles-ci est de 2 à 10 fois plus faible que les matériaux conventionnels (béton, brique, plâtre, céramique...etc.) et stockent des quantités de chaleur supérieures¹⁰⁹.

Tableau 1. 8 Le nombre de cycles requis/ jour et /année à un MCP de bâtiment pendant sa durée de vie ^{35, 110}.

Application	Nmbr de cycles/jour	Nmbr de jours/année	Durée de vie de l'élément de bâtiment	Nombre minimum de cycle d'MCP
Carreaux à MCP pour planchers ou dalle de béton amélioré par un MCP. (intégration passive)	1	300	80	24000
Carreaux MCP pour planchers ou dalle de béton amélioré par un MCP utilisé avec un système hydronique pour plancher	10	300	80	24000
Carreaux de plâtre renforcé par un MCP, ou revêtement de plâtre sur mur léger	1	300	30	9000
Panneaux composite renforcés par des MCP ou pochettes de MCP installée derrière les carreaux de plâtre ou des revêtements intérieurs en plâtre	1	300	30	9000
Mur de béton renforcé par MCP	1	240	80	19200
Isolation thermique renforcée par MCP, installée dans les cavités murales	1	240	80	19200
Carreaux composites renforcés par MCP ou pochettes de MCP installées côté extérieur des murs.	1	240	30	7200
Tuiles à MCP (usage passif)	1	300	30	9000
Tuiles à MCP utilisée conjointement avec un système actif	1-10	300	30	9000-90000
Isolation à MCP de planchers des greniers aménageables	1	240	80	19200
Carreaux composites de MCP ou pochettes MCP placées au niveau des toits-terrasse	1	240	50	12000
Élément de plancher renforcés par MCP	1	240	15-20	3600-4800

1.5.3 L'utilisation des bio-MCPs dans le bâtiment.

Parmi les différentes catégories de MCPs précitées, les bio-MCPs constituent une grande partie des substances organiques (paraffiniques et non-paraffiniques) ayant attiré l'attention des chercheurs par leurs propriétés désirables pour le stockage latent de chaleur dans le bâtiment ⁷⁹.

Les bio-MCPs sont généralement obtenus à partir des graisses végétales¹¹¹ et animales¹¹⁴ telles : les graisses végétales de soja, de coco, de palme, de palmiste...etc. ^{112, 113}.

Contrairement aux MCPs commercialisés à des prix exorbitants¹¹⁶, les bio-MCPs sont récupérés à moindres coûts, ils constituent une excellente source de matières renouvelables et non polluantes n'ayant aucun impact négatif sur l'environnement ^{111,59, 115}. De plus, Les bio-MCPs se distinguent par leur force d'attraction superficielle de l'ordre de 2 à 4. 10⁻⁴ N/cm à l'état liquide, ce qui est suffisamment élevé pour les intégrer avec succès à l'intérieur de leurs matrices qui peuvent être représentées par les matériaux de construction conventionnels¹¹⁷.

Les propriétés thermo-physiques de ces substances bios-sourcées font d'elles une alternative aux MCPs (sels et paraffines) utilisés anciennement dans le bâtiment, ce qui justifie l'intérêt grandissant pour ces études durant ces dernières années^{118, 119, 120, 121}.

1.5.4 Le conditionnement des MCPs avant l'utilisation dans le bâtiment.

Durant leur processus de stockage latent de chaleur à température sensiblement constante, les MCPs de bâtiment passent de la phase solide à la phase liquide. C'est donc à leur état liquide que l'utilisation de ces substances pour améliorer le confort thermique des bâtiments devient problématique.

Les MCPs devraient donc être conditionnés avant toute application. Cela permet d'éviter tout risque de fuite ou de suintement des éléments de bâtiment lors d'une intégration passive de ceux-ci d'une part, et d'éviter d'affecter le fonctionnement des systèmes lorsqu'ils sont intégrés dans des systèmes actifs. De plus, le conditionnement des MCPs permet de protéger

leurs propriétés, d'éviter que ceux-ci soient en contact direct avec l'environnement. Le conditionnement des MCPs permet parfois d'améliorer les conditions de stabilité mécanique, thermique et chimique du système intégrant le MCP.

Il existe deux principaux procédés de conditionnement des MCPs : la micro-encapsulation et la macro-encapsulation, mais les nouvelles avancées de la recherche parlent aujourd'hui de la nano encapsulation ^{122, 123, 124}.

La macro encapsulation consiste à introduire le MCP à l'intérieur d'une enceinte (capsule) visible et manipulable à l'œil nu dont la configuration doit remplir certaines conditions d'exploitation du MCP. Son enveloppe doit être suffisamment rigide afin de protéger le MCP et empêcher sa fuite pendant la phase de fusion, sa conductivité thermique doit être suffisamment élevée pour permettre au flux de chaleur d'atteindre le MCP afin qu'il soit stocké par ce dernier¹³². Si la fusion du MCP est accompagnée d'une expansion volumique, le dimensionnement de la capsule doit prendre en considération cette expansion volumique. Par ailleurs, la taille et la forme de la capsule ainsi que de son matériau dépendent du MCP contenu et de l'application envisagée. La figure 1.10 montre quelques exemples de MCPs macro encapsulés avant leur application.



Figure1. 10 Quelques exemples d'MCP macro encapsulés dans différents types de capsules ^{125,126}

La micro encapsulation consiste à piéger des MCP à l'intérieur de microbilles polymériques, c'est un procédé thermiquement efficace mais techniquement contraignant et fort coûteux. Les microbilles chargées de MCPs sont ensuite intégrées dans la masse de n'importe quel matériau (béton, plâtre, céramique, marbre...etc.) à condition que l'enveloppe de la microbille soit compatible avec le matériau dont nous avons l'intention de renforcer son inertie thermique par intégration d'MCP¹²⁷.

Plus la capsule contenant le MCP est petite, mieux les échanges thermiques se font plus rapidement, c'est pour cela que la recherche tente d'atteindre aujourd'hui l'échelle de la nano encapsulation^{128, 129, 130}.

La majeure partie des MCPs organiques qui sont stables chimiquement et qui ont une bonne compatibilité avec les enveloppes polymériques sont aujourd'hui piégés dans des micro ou nano capsules avant d'être utilisés pour n'importe quelle application.

La figure 1.11 montre l'image au microscope des billes intégrées dans le matériau tandis que la figure 1.12 montre deux exemples de deux matériaux fabriqués par « RUBITHERM Technologies GmbH » sous différentes formes : à gauche sous forme de bille, à droite sous forme de panneau. Les microcapsules sont intégrées à l'intérieur du panneau de plâtre.

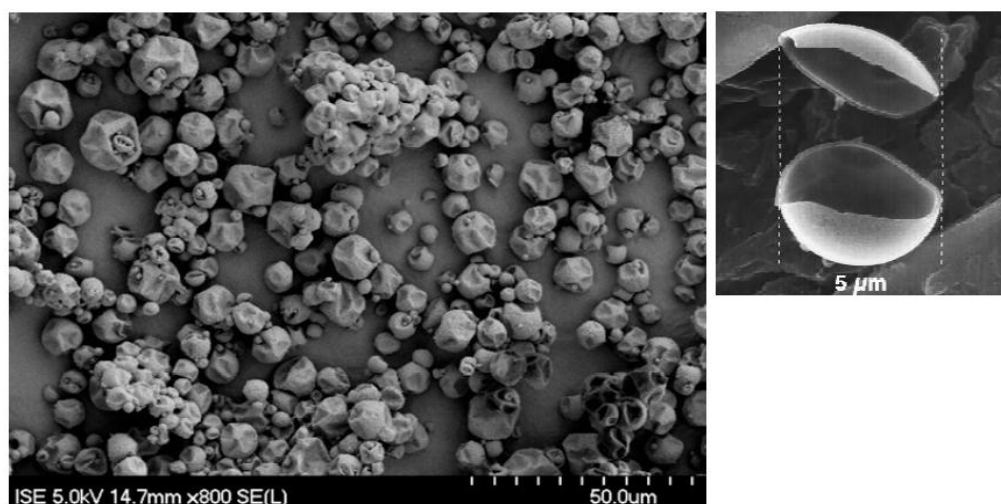


Figure1. 11: image microscopique des microcapsules intégrées dans du béton⁷⁰.

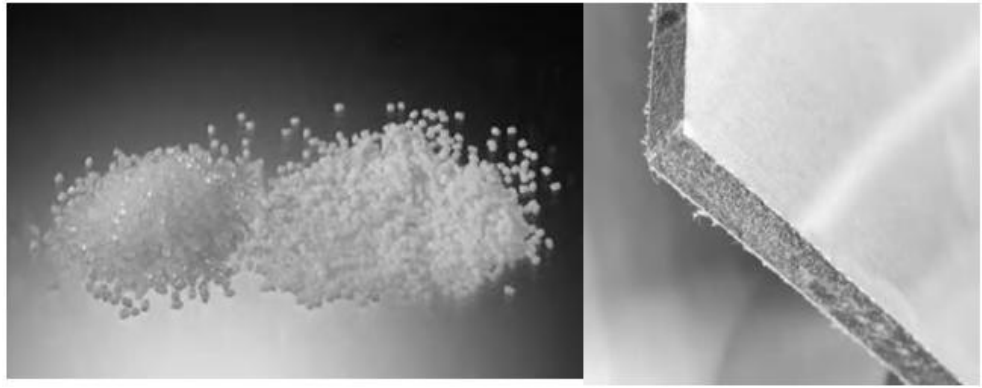


Figure1. 12 : Image de quelques MCPs de "Rubitherm technologies GmbH". À droite: plaque de plâtre avec MCP; À gauche: MCP en forme de billes.

C'est à partir de là que de nouveaux procédés de conditionnement des MCPs ont vu le jour pour des applications dans le bâtiment. Les MCPs sont directement piégés dans la micro-porosité des matériaux appelés par la suite matrice. Le rapport MCP/ matrice est étudié de sorte à ce que le MCP soit bien confiné à l'intérieur du matériau sans aucun risque de fuite ni de suintement dans sa phase liquide¹⁵³.

Le contact entre le MCP et le matériau est direct, c'est pour cela qu'il est plus intéressant de privilégier les substances organiques ayant fait preuve d'une bonne stabilité chimique, les substances inorganiques tels les sels sont à éviter dans ce genre de procédés à cause de leur interaction chimique destructive avec le matériau conteneur.

Ces procédés d'intégration directes des MCPs dans les nouveaux composites-MCP sont obtenus par deux méthodes : par immersion¹³¹ d'un bloc de matériau poreux dans le MCP liquide, ou par dispersion de matériaux sous forme de fines particules ou de fibres à l'intérieur du MCP en fusion. Le matériau obtenu par ce second procédé est appelé « MCP à forme stabilisée ». Les figures 1.13, 1.14 montrent les schémas représentatifs des deux méthodes d'élaboration des nouveaux composites-MCPs par introduction directe. Ces méthodes sont connues pour être moins coûteuses et plus simples à réaliser¹³³.

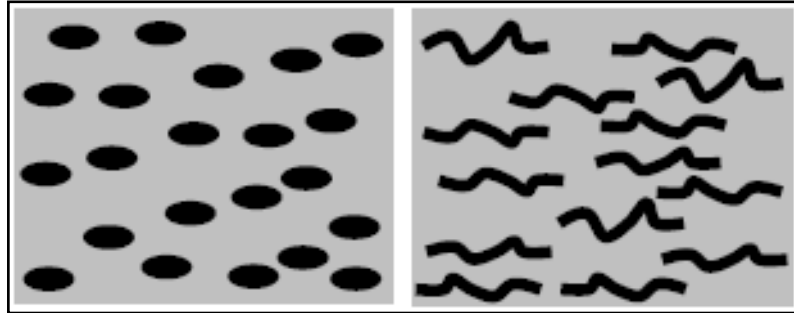


Figure1. 13 : méthode l'élaboration d'MCP à forme stabilisée (En gris : MCP en fusion, En noir : le matériau matrice).⁷⁰

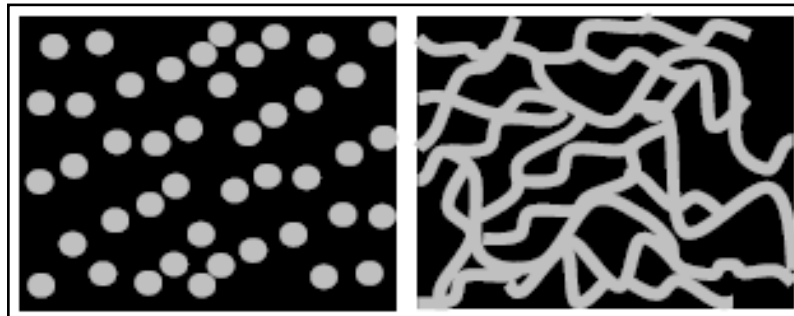


Figure1. 14 : Nouveau composite-MCP obtenu par immersion d'une matrice poreuse dans un MCP liquide (En gris: l'MCP, en noir: la matrice).⁷⁰

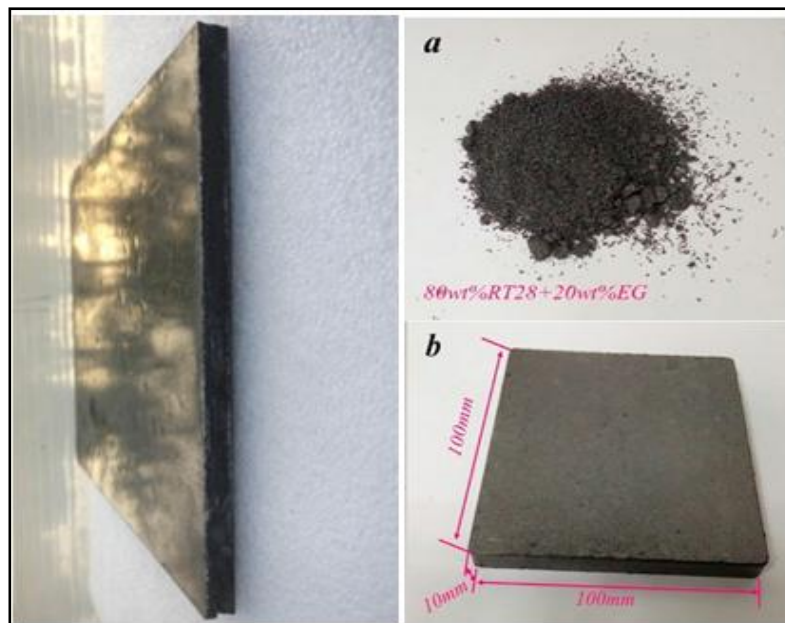


Figure1. 15 : Composite-MCP à forme stabilisée^{134, 135}.

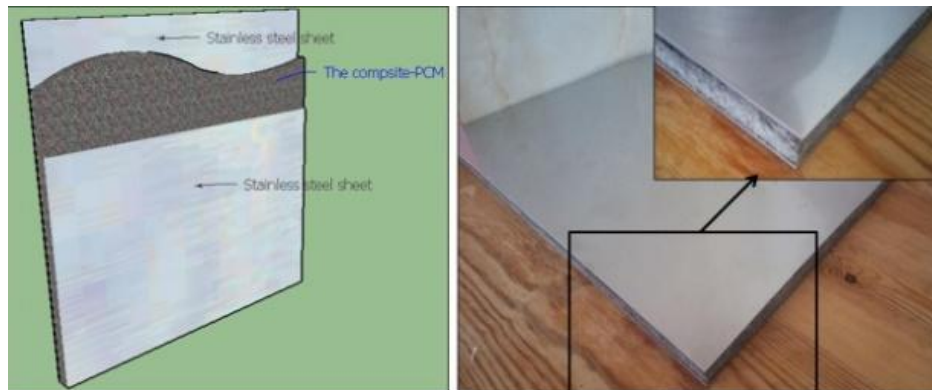


Figure1. 16 : Composite-MCP élaboré par immersion direct d'un matériau poreux dans un MCP liquide¹³⁶.

1.5.5 Les modes d'intégration des MCPs ou des composites-MCPs dans le bâtiment

Les MCPs ou les composites-MCPs sont introduits dans le secteur du bâtiment pour contribuer à améliorer les conditions de confort thermique des ambiances intérieures. Ceux-ci peuvent être intégrés suivant deux procédés principaux.

La méthode passive dans laquelle le MCP fait partie intégrante de la structure du bâtiment (enveloppe, murs, revêtement, fenêtre, planchers, plafond, mobilier...etc.) est la plus utilisée des applications passives du MCP.

Dans ce cas les échanges de chaleur ne sont pas actionnés par un système mécanique. Le stockage et le déstockage des quantités de chaleur s'effectue au gré des échanges thermiques régis par les conditions de températures moyennes intérieures, du type de structure dans laquelle l'MCP est incorporé, des conditions d'ensoleillement et de températures moyennes extérieures (air extérieur, rayonnement solaire, rayonnement nocturne).

Il existe dans la littérature plusieurs travaux qui traitent de l'intégration passive des MCPs ou composites-MCPs dans le bâtiment. Des panneaux de plâtre/ MCP ont été utilisés comme revêtement intérieur des surfaces des murs afin de réduire les consommations d'énergie dues à la climatisation^{137, 138}. La même expérience a été réeffectuée pour évaluer la performance de la même

application passive sous différentes zones climatiques¹³⁹, puis sur différents types de structures d'enveloppes de bâtiments^{140, 142}.

Des chercheurs ont expérimenté des isolants renforcés de MCP placés à l'intérieur des cavités des enveloppes des bâtiments afin de tester leur impact sur la performance thermique de celles-ci^{141, 144}. D'autres expériences ont été menées sur des blocs de béton porteurs renforcés de MCPs ainsi que sur des panneaux d'argile intégrant des MCPs pour renforcer la performance thermique des parois verticales et améliorer les conditions de confort thermique des ambiances intérieures^{145, 146}.

D'autres applications passives consistent en l'application des MCP dans les stores¹⁵⁰, dans les revêtements de sol (Fig.1.17)¹⁴⁹, dans les murs Trombe¹⁵⁰, dans les revêtements de plafonds (Fig. 1.18).



Figure1. 17: Plaques de revêtement de sol comportant un MCP¹⁴⁹

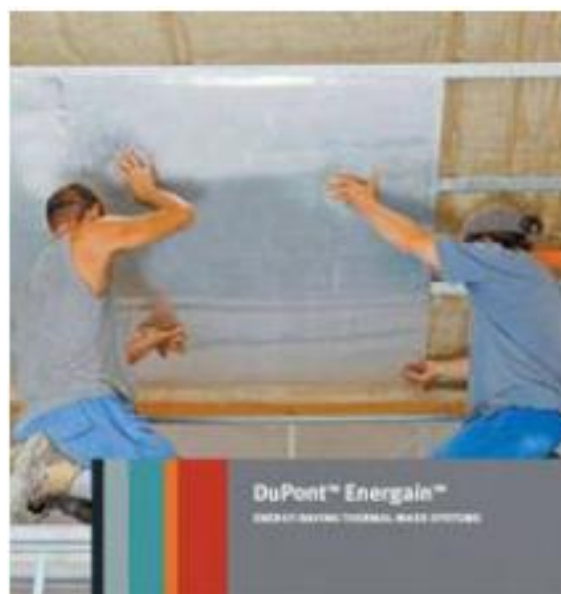


Figure1. 18 : Revêtement intérieur à MCP pour plafond Dupont™ Energain®¹⁴⁹

La liste des applications énoncées ci-dessus est très loin d'être exhaustive, elle a pour simple objet d'expliquer quelques procédés d'applications passives des MCPs dans le bâtiment.

La méthode active consiste à utiliser le MCP en combinaison avec un système actif de chauffage ou de refroidissement. Le MCP est souvent intégré pour optimiser le rendement des dispositifs actifs ou pour récupérer l'excédent de chaleur qu'ils dégagent, puis le stocker pour une éventuelle réutilisation ultérieure. De plus, les MCPs peuvent être intégrés dans les systèmes actifs pour optimiser leurs dimensionnements (taille).

Dans ce cas, le processus de stockage ou de déstockage est déclenché par un système mécanique selon le besoin et la demande, autrement dit : « de façon non subie »^{149, 152}. Dans les précédés actifs, les MCPs sont appliqués pour une assistance aux systèmes de chauffage ou aux systèmes de refroidissement^{154, 155}.

Plusieurs systèmes actifs de refroidissement ont été conçus différemment par plusieurs auteurs^{156, 157, 158, 159, 160, 161}. La performance et le rendement du système de refroidissement sont contrôlés pendant le processus de changement de phase.

Dans les applications de chauffage actif, les MCPs sont intégrés dans les équipements mécaniques tels que les pompes à chaleur solaire, les échangeurs stockeurs, les chauffe eau domestiques ainsi que le chauffage par le sol.

Il existe dans la littérature plusieurs travaux qui traitent de l'intégration des MCPs dans les systèmes actifs de chauffage dans le bâtiment^{162, 163, 164, 165, 166}. La figure 1.17 montre un exemple de plancher chauffant intégrant des MCPs macro-encapsulés dans des capsules coniques. L'excédent de chaleur dégagée par les tubes du système de chauffage est stocké par le MCP pour assurer le chauffage du plancher par déstockage quand le système est à l'arrêt. Les applications actives citées dans cette partie ne sont pas exhaustives, elles ont pour objet d'expliquer le principe d'intégration active des MCPs dans les systèmes actifs et d'en citer les plus utilisées dans le bâtiment.

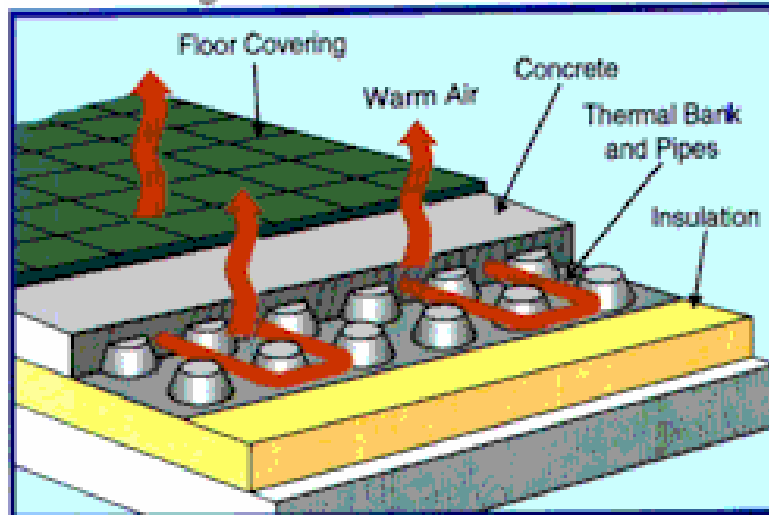


Figure1. 19 : Image d'un système de chauffage intégré au plancher renforcé d'MCP¹⁴⁷.

1.5.6 Étude de quelques exemples de bâtiments intégrant des MCPs

Les essais à grande échelle des MCPs appliqués sur les enveloppes des bâtiments sont très souvent la dernière étape à entreprendre avant la commercialisation de ces nouveaux matériaux composites-MCPs utilisés pour le stockage latent de l'énergie. Le développement des outils numériques nécessaires à l'analyse de ces technologies ainsi qu'à la validation de ces outils est une autre raison qui peut pousser les chercheurs et les décideurs à effectuer ce type de tests. Enfin, la mise en place de nouveaux codes de l'énergie ainsi que l'étude de la question de la durabilité des nouveaux composites-MCPs à long terme sont autant d'autres raisons qui nécessitent des essais en grandeur réelle. Ce type d'essais peut être effectué sur des maquettes expérimentales grandeur réelle, d'autres sont réalisés sur des bâtiments conçus et construits avec l'intégration des matériaux à changement de phase ; quelques exemples sont présentés ci-dessous.

Le bâtiment du conseil général du Loiret (Orléans, France) est la première infrastructure publique en France labélisée Haute Qualité Environnementale (HQE) (Fig.1.20). Le bâtiment inauguré en 2011 comprend des cloisons à changement de phase Energain ® dans les bureaux orientés sud dotés de grandes baies vitrées plein sud pour contrôler les températures intérieures ainsi que les gains thermiques¹⁶⁷.



Figure1. 20 Bâtiment du conseil général du Loiret (Orléans, France)¹⁶⁸

En 2010, SARL Busipolis à Metz (France) reçoit plusieurs prix pour l'excellente performance énergétique¹⁶⁹ de ses 1950 m² de bureaux. Ce bâtiment d'architecture contemporaine, construit avec une structure en acier et en verre (Fig.1.21) comprend 500 m² de MCP à forme stabilisée dont le point de fusion est de 21.70 °C. Les MCPs sont intégrés derrière les panneaux de revêtement intérieur en plâtre ainsi qu'à l'intérieur du faux plafond de ce bâtiment. Le but est de renforcer l'inertie thermique de cette structure légère et d'améliorer les conditions de confort à l'intérieur.



Figure1. 21 : Bâtiment SARL Busipolis, année de construction 2010 (Metz, France)¹⁶⁹

Le bâtiment résidentiel à deux étages d'une surface de 253 m² (Fig.1.22) construit entre les années 2009 et 2010 à Oak Ridge (Tennessee, USA) est le fruit d'un projet de recherche en collaboration entre le laboratoire Oak Ridge National Laboratory et des entreprises de matériaux de construction et de construction bâtiment. Celui-ci a été sponsorisé par l'US « department of energy ».

Le but de cette opération est de démontrer l'intérêt des résultats de la recherche auxquels sont arrivés les chercheurs du laboratoire d'une part, et de mettre au point de nouvelles technologies éco-énergétiques pour les maisons américaines.



Figure 1. 22 : Image 3D et sur terrain de la maison résidentielle à MCP, Tennessee (USA) ¹⁷⁰

La maison est composée d'une ossature à double paroi qui comprend dans ses cavités extérieures un isolant à base de fibres de cellulose renforcées de 20 % de matériau à changement de phase micro-encapsulé. Les cavités intérieures sont quand à elles remplies de fibres soufflées. Le plancher ainsi que les murs pignons du grenier sont eux aussi recouverts de cellulose renforcée d'MCPs micro-encapsulés.

En 2012, un groupe d'architectes à Portland, Oregon (États-Unis), venaient d'achever avec succès la maison durable Trek-Hauss, d'une surface de 155 m² (Fig.1.23).

La maison se distingue par son enveloppe à haute performance thermique qui permet de minimiser au maximum les déperditions de chaleur en hiver et les infiltrations en été. La maison est dotée de plusieurs systèmes actifs et passifs permettant d'optimiser la performance thermique de son

enveloppe, mais le plus surprenant est l'utilisation de bio-MCPs à base de graisse végétale de soja comme nouveau matériau pour le stockage latent de la chaleur à température constante.



Figure1. 23 : Image de la maison durable à bio-MCP Trek-Hauss (États-Unis) ¹⁷¹

Le bio-MCP est conditionné dans des pochettes en plastique résistant (macro-encapsulation) avant d'assembler ces dernières en forme de tapis (Fig.1.24) qui ensuite est placé derrière les revêtements intérieurs des murs ainsi que sur le dernier plancher de la maison pour travailler de manière passive¹⁷¹.



Figure1. 24 : mise en place du bio-MCP sur les murs de la maison Trek-hauss ³⁵

En 2001, une compétition d'architecture ayant pour objet la conception d'une maison familiale moderne et durable a été organisée. La maison ayant remportée le premier prix de cette compétition a ouvert ses portes au public en 2005 (Munich, Allemagne) (Fig.1.25). Celle-ci se distingue par ses 600 m² de surface intérieure recouverte de panneaux de plâtre (Fig.1.26) intégrant des MCPs micro-encapsulés et ayant une température de changement de phase de 23 °C¹⁷².



Figure1. 25 : Maison moderne à MCP (Munich, Allemagne)¹⁷²



Figure1. 26 : Revêtement intérieur en plaque de plâtre à MCP de la maison moderne durable (Munich, Allemagne)¹⁷².

Plusieurs autres projets similaires de construction de maisons familiales éco-responsables qui se basent sur l'intégration des MCPs micro-encapsulés dans des panneaux de plâtre comme revêtement intérieur ont été réalisées dans le monde. Nous pouvons citer la « 3L house » réalisée à Séoul (Korè)³⁵.

Hormis les projets de construction de bâtiments neufs intégrant différents types d'MCPs ou de bio-MCPs conditionnés différemment, il existe plusieurs autres projets de réhabilitation thermique des structures existantes n'ayant pas montré un bon comportement thermique au cours de leur exploitation.

La figure 1.27 montre une image d'un projet qui a été lancé en 2010 à Ludwigshafen (Allemagne). Il s'agit d'une rénovation et d'une réhabilitation thermique d'un ancien bâtiment construit dans les années 1950 pour en faire une unité d'habitation pour les employés de BASF. L'objectif principal est de réduire les charges dues au chauffage. Parmi les mesures entreprises, la plus importante consiste en l'utilisation des panneaux de plâtre à MCPs micro encapsulés³⁵.



Figure1. 27 : Image du bâtiment réhabilité; à gauche : avant l'opération, à droite : après la réhabilitation³⁵.

Le deuxième projet de réhabilitation thermique avec MCP consiste en un bloc administratif du collège Claude Bernard situé à Villefranche-sur-Saône (Rhône). Depuis sa construction qui date des années 1949, la structure du bâtiment n'a bénéficié d'aucune opération de rénovation ou de réhabilitation jusqu'en 2009 où de sérieux problèmes d'inconfort ont été détectés en été comme en hiver.

Le bâtiment sous forme de barre (Fig.1.28) a été réhabilité thermiquement en appliquant des MCPs brevetés par Dupont De Nemours sur sa façade principale orientée plein sud, ainsi que sur son plafond, plancher et cloisons intérieures (Fig.1.29)¹⁷³.



Figure1. 28 : Bloc administratif du collège Claude-Bernard Ville-Franche Saône¹⁷³



Figure1. 29 : Structure intérieure du bloc après réhabilitation avec MCPs¹⁷³

L'immeuble de bureaux du campus CSU Thurgooona (Australie) est le premier bâtiment conçu en 2008 par l'architecte McPhee et réalisé par « Zauner constructions » en Australie, l'objectif est d'avoir des bureaux à très basse consommation d'énergie.

Pour cela, des MCPs micro-encapsulés ont été intégrés dans les planchers, des panneaux de plafond en MCP ayant un point de fusion de 23 °C ont été utilisés sur les plafonds des premier et deuxième étages. Le plancher bas a été réalisé avec des MCPs micro encapsulés dans du béton.

Les applications des MCPs micro-encapsulés ont grandement amélioré l'inertie thermique du bâtiment, ainsi la température opérative à l'intérieur des bureaux est entre 21 et 23 °C en hiver et entre 23 et 26 °C en été sans recourir à aucun système actif.

Il est important de noter qu'en 2008, l'utilisation des MCPs micro-encapsulés dans du béton est l'une des premières applications dans ce genre réalisées dans le monde³⁵.

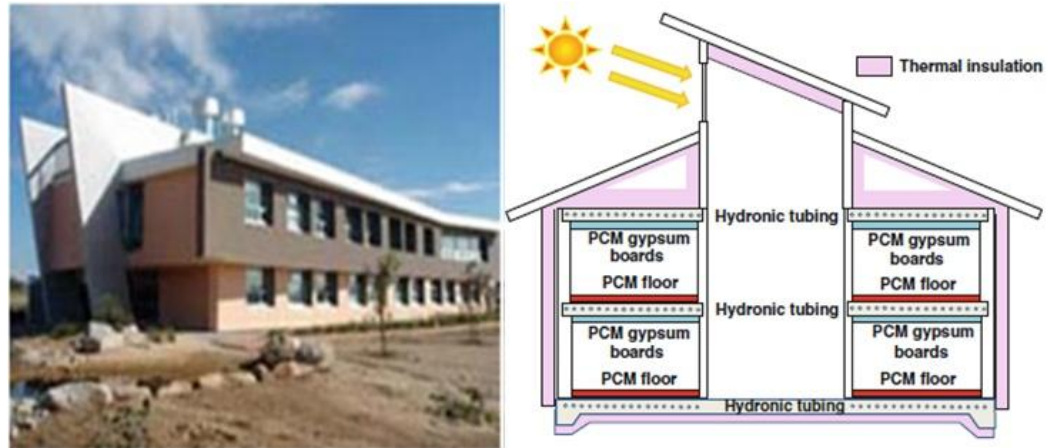


Figure1. 30 : Immeuble de bureau à MCPs en Australie, Coupe sur l'immeubles expliquant les modes d'intégration des MCPs³⁵.

1.6 La modélisation numérique et l'expérimentation des MCPs dans le bâtiment

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments par l'intégration des MCPs dépend d'un certain nombre de facteurs qui sont : la quantité de MCPs utilisés, de ses caractéristiques thermiques, de sa localisation à l'intérieur de la structure du bâtiment, des conditions climatiques par lesquelles il est sollicité et du type de la structure du bâtiment...etc.

Le comportement thermique dynamique des enveloppes des bâtiments amélioré par les MCPs peut-être étudié numériquement à l'aide de modèles thermiques à l'échelle du système ou de simulations thermiques et énergétiques à l'échelle d'un bâtiment entier. Cela est rendu possible grâce à plusieurs logiciels : TRNSYS, Ansys-Fluent, Energy-Plus, RADCOOL, Cody BA, BSim, PCM Express, WUFI...etc.

Il existe aujourd'hui un certain nombre de solutions numériques pour étudier les transferts de chaleur avec changement de phase dans le bâtiment^{173, 174, 175, 176,177}. Ainsi, en vue de la modélisation du changement de phase, deux méthodes principales sont utilisées : il s'agit de la méthode

enthalpique d'une part et la méthode dite de la capacité thermique massique d'autre part^{178, 179, 180}.

La première méthode (la méthode enthalpique) est la plus couramment utilisée pour résoudre numériquement ce qu'on l'on appelle le problème des frontières mobiles dans les matériaux à changement de phase, également connue sous le nom de : problème de Stefan^{182, 183, 184}. Il s'agit dans ce cas de considérer l'enthalpie du matériau comme une variable qui évolue en fonction de la température ; lors du processus de changement de phase celle-ci montre un saut (Fig.1. 31). Cette valeur correspond à la capacité latente de changement de phase du matériau.

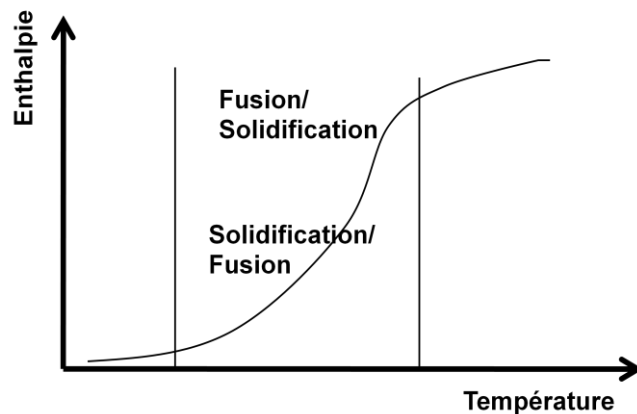


Figure1. 31 : Courbe classique Enthalpie/ Température d'un Matériau à Changement de phase avec le saut d'enthalpie durant le changement de phase¹⁸⁵.

De nombreux auteurs ont étudié de manière pointue et approfondie des formulations d'enthalpie en vue d'analyser numériquement les problèmes de changement de phase des matériaux dans le bâtiment^{186, 187, 188, 174}.

La deuxième méthode est celle de la capacité thermique massique, autrement appelée capacité calorifique. Il s'agit de modéliser la chaleur latente pendant la fusion ou la solidification du MCP par l'évolution de sa capacité thermique massique $[C(T)]$ à l'intérieur de l'intervalle des températures de changement de phase de celui-ci. Lors de la modélisation, on utilise en entrée la courbe de la capacité thermique massique équivalente (Fig.1.32) du matériau en fonction des températures qui se situent dans l'intervalle de ses températures de changement de phase en considérant que celui-ci présente

une enthalpie maximale (équivalente à la valeur de la capacité latente de changement de phase obtenue par l'analyse calorimétrique différentielle à balayage DSC) à la température de changement de phase.

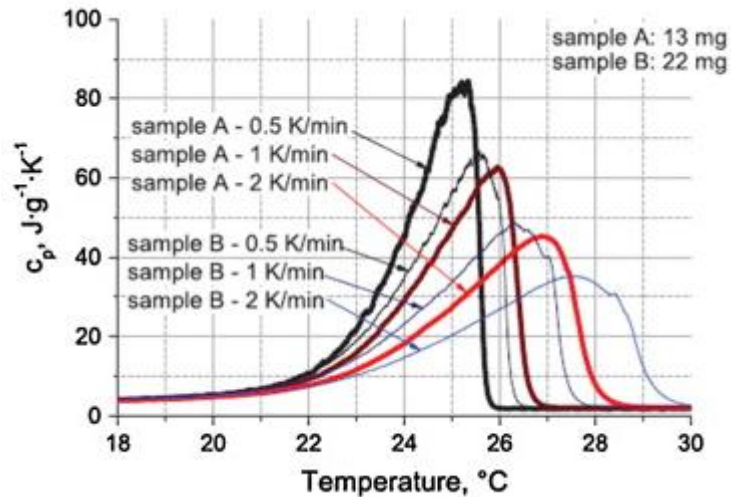


Figure1. 32 Courbe Classique du C_p calculé à partir des tests de DSC de deux matériaux avec différentes vitesses.¹⁹⁰

Deux approches théoriques peuvent être identifiées avec la méthode de la capacité calorifique : la capacité thermique ou calorifique massique apparente^{191, 192} et la capacité thermique massique équivalente^{193, 194, 195}.

La méthode de la capacité calorifique apparente a été introduite pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur unidirectionnels avec changement de phase dans une zone qui ne devient pas liquide après fusion (zone plus ou moins pâteuse)¹⁹⁶. La popularité de cette méthode réside dans le fait que durant le processus de simulation, la température reste la seule variable indépendante à résoudre sous forme discrétisée. De plus, des résultats expérimentaux peuvent être utilisés pour approximer la capacité thermique massique du matériau¹⁹⁷. Les résultats de calcul de la capacité calorifique (C) par une méthode de calcul qui se base sur les résultats de la DSC ont déjà été utilisés dans la modélisation du changement de phase suivant la méthode de la capacité calorifique apparente^{198, 199}.

La méthode de la capacité calorifique effective suppose que le MCP ne peut être en dehors de la plage de température de changement de phase que lorsqu'il est complètement chargé ou déchargé¹⁹⁴. Lors des simulations suivant la méthode de la capacité calorifique effective, les valeurs de la capacité

thermique sont calculées pour chaque nœud à l'aide des équations de discrétisation basées sur la température nodale équivalente. Cependant, étant donné que la relation entre la capacité calorifique et la température pendant la transition de phase est hautement non linéaire, un schéma très explicite doit être mis en place lors du calcul. Cette non linéarité peut entraîner des erreurs et des imprécisions dans les situations de forte variation de la capacité calorifique par rapport à la température²⁰⁰.

Un grand nombre d'études numériques récemment effectuées permettent de comprendre la physique des MCPs ainsi que le potentiel énergétique et thermique des matériaux de construction renforcés de MCP ^{201, 202, 203, 204, 205}.

1.7 Conclusion

Les différentes substances pouvant faire office de MCPs pour les applications de bâtiment ainsi que leurs caractéristiques thermo-physiques ont été présentées dans cette partie. Les MCPs organiques ont été reconnus comme les substances les plus appropriées aux applications de bâtiments tandis que les bio-MCPs ont été définis et présentés comme substances bio-sorcées, récupérables à moindre coût ayant prouvé leur efficacité dans le stockage latent de la chaleur à température constante.

Les modes de conditionnement directs des MCPs dans les matériaux de construction sont les procédés les plus simples et les moins coûteux. Les composites-MCPs résultant font l'objet de plusieurs applications passives ou actives dont les plus importantes sont présentées dans ce chapitre. Plusieurs exemples de bâtiments construits avec l'intégration de ces matériaux à travers le monde y sont présentés.

Les différentes publications montrent que la modélisation numérique d'un bâtiment, d'une partie d'un bâtiment ou d'un élément de sa structure intégrant un ou plusieurs MCPs peut-être réalisée avec des méthodes de modélisation simplifiées du changement de phase par : la méthode enthalpique ou par les méthodes de la capacité calorifique massique (équivalente ou apparente).

La méthode de la capacité thermique massique apparente a retenu notre attention pour la modélisation du changement de phase des matériaux n'ayant pas un point de fusion franc mais plutôt une plage de température de changement de phase.

Parmi les différents types d'MCPs étudiés, les différentes méthodes de leur conditionnement dans les matériaux de construction, leurs méthodes d'application dans la structure des bâtiments ainsi que les différentes méthodes de modélisation du changement de phase présentées dans le premier chapitre ; il est question dans les chapitres qui suivent de mettre le point sur celles qui sont retenues pour l'élaboration de nos nouveaux matériaux composites-MCP, pour leur application ainsi que pour la modélisation numérique du comportement thermique et énergétique d'un exemple de bâtiment intégrant les nouveaux matériaux renforcés de MCPs.

CHAPITRE 2

MATERIEL, MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES D'ELABORATION DES NOUVEAUX MATERIAUX COMPOSITES-MCP

2.1 Introduction

En se basant sur les données mentionnées dans le chapitre précédent, il existe plusieurs méthodes d'élaboration des matériaux composites-MCPs autrement appelés matériaux architecturés par quelques auteurs¹⁵³. Ce sont de nouveaux composés préparés à partir de plusieurs matériaux monolithiques.

Le présent chapitre a pour objectif de donner un aperçu des matières utilisées dans le processus de fabrication de nouveaux matériaux de construction composites-MCPs. Une présentation du matériel et des méthodes utilisées dans le processus d'élaboration y sont fournis.

Dans la première partie de ce chapitre, une description des premières matrices sélectionnées à partir de matériaux d'origine minérale ou végétale est détaillée. Quelques unes de ces matrices font partie des matériaux de construction anciennement utilisés dans les constructions traditionnelles tandis que d'autres ne sont pas utilisés dans l'industrie du bâtiment. Les nombreuses publications tirées de la littérature, montrent que la matrice conteneur d'un MCP doit en effet avoir des propriétés qui lui permettent de retenir le MCP dans sa phase liquide sans aucun risque de fuite ni de suintement pendant sa durée de vie.

La deuxième partie de ce chapitre s'intéresse à la description des processus de synthèse de déchets recyclés d'origine organique et de leur intégration dans la matrice conteneur de MCP. Ces déchets qui se trouvent généralement en abondance dans la nature sont récupérés afin d'être réutilisés dans le processus de fabrication de nouveaux matériaux de

construction. Ces adjuvants bio-sourcés permettent de satisfaire certaines propriétés recherchées notamment : la légèreté, le coût du matériau, sa durabilité, sa capacité d'absorption et de rétention du MCP dans sa phase de fusion et sa réutilisation en fin de vie.

La troisième partie de ce chapitre donne une description des MCPs bio-sourcés à basses températures de fusion qui ont été retenus pour être utilisés dans le processus d'élaboration de nouveaux matériaux de construction composites-MCPs. Les propriétés thermo-physiques de ces substances sont favorables aux applications passives de stockage latent de l'énergie thermique dans les enveloppes des bâtiments.

2.2 Étude du choix des matrices pour le conditionnement des MCPs

L'élaboration d'un nouveau matériau de construction composite-MCP pour les applications pratiques de stockage latent de la chaleur dans le domaine du bâtiment passe avant tout par le choix d'une matrice adéquate qui retienne le MCP dans de bonnes conditions.

La matrice ne doit pas entraver les cycles répétitifs de stockage/déstockage de la chaleur tout en garantissant de retenir le MCP sans risque de fuite ni de suintement dans sa phase liquide. À cela s'ajoute d'autres conditions notamment : la stabilité mécanique du composite-MCP, la stabilité chimique (MCP/ matrice), la stabilité thermique après plusieurs cycles répétitifs de fusion/cristallisation (fatigue thermique), une bonne conductivité thermique permettant de transférer les flux de chaleur à l'intérieur du matériau pour enclencher les processus de stockage/ déstockage de la chaleur.

La matrice peut donc être une matière d'origine minérale ou organique ayant les propriétés structurales, morphologiques et physico-chimiques qui permettent de retenir le MCP dans le respect des conditions précitées. La recherche d'une ou des matrices adéquates ainsi que l'étude de ses propriétés constitue donc la première étape non sans grande importance dans ce travail de thèse.

Le tableau 2.1 résume quelques propriétés de certaines matrices d'origine minérale ou végétale pouvant être de bons candidats pour être

utilisés dans le processus d'élaboration des nouveaux composites-MCPs applicables aux enveloppes des bâtiments. C'est de cette manière que s'est effectué le premier choix des matrices pour le conditionnement des MCPs dans ce projet de thèse.

Tableau 2. 1 : caractéristiques thermiques de certaines matrices d'origine minérale ou végétale.

Matrices	Conductivité λ (w/m.°C)	Dilatation α (m/m.°C)	C kcal/kg. °C	Comportement au feu
Argiles ²⁰⁶	0.85	-	0.2	
Calcaire ^{207, 208}	1.4 -1.7	7.10^{-6}	0.2	M0
Ciments ²⁰⁶	0.8	$1,2.10^{-5}$	0.2	
Céramique ²⁰⁷	1.38	$0,55.10^{-5}$	0.18	M0
Fibres de verre ²⁰⁹	0.4-1.2	12à 25.10^{-6}	0.24- 0.33	M1
Granit ^{210, 208}	1.7- 4	8.10^{-6}	0.3	M0
Grès ^{207, 211, 210}	1.83	5à 13.10^{-6}	0.2	M0
Gypse ²¹⁰	0.36	$2,5.10^{-5}$	0.3	M0
Laine de roche ²¹⁰	0.042	-	0.25	M0- M1
Laine de verre ²¹⁰	0.041	0.00025	3.51	M0- M1
Marbre ^{207, 210, 208}	2	5à 13.10^{-6}	0.21	M0
Perlite expansée ^{210, 212}	0.048	-	0.2	M0
Pierre ponce ²¹²	0.133	-	0.2	M0
Silice ²¹⁰	1.4	5.10^{-7}	0.35	
Terre cuite ²⁰⁹	0.6 -0.14	5 à 8.10^{-6}	0.2	M0- M1
Vermiculite exfoliée ^{210, 212}	0.062	-	0.22	M0
carton ²⁰⁶	0.07	-	0.32	
Chanvre ²¹²	0.04-0.045	-	0.43	M4
Chènevotte ²¹²	0.052	-	0.45	M4
laine de mouton ²¹²	0.035	-	0.38	M4
Liège ²¹⁰	0.04	0	0.14	
Liège expansé ²¹⁰	0.043-0.048	-	0.48	M1
Ouate de cellulose ²¹²	0.038	-	0.45	M1
Paille ²¹⁰	0.12	-	0.32	
Plumes de canards ²⁰⁶	0.035	-	0.38	M4
Textile recyclé ²¹²	0.039	-	0.33	M4

Tableau 2. 2 : Quelques propriétés physico-chimiques de quelques matrices minérales ou végétales.

Matrices	Masse volumique ρ (t/m ³)	Porosité P (%)	Teneur en eau W	pH
Argiles ^{206, 208}	1.6 - 2.2	60- 70	30 - 65	4.6 - 10.2
Calcaire ²¹³	2.7	45	4.53	7.6
Céramique ²¹⁴	2.2	15- 30	-	-
Fibres de verre	2.5 - 2.6	0.09- 15	-	-
Granit ²¹⁰	2.7	12.8	5.72	6.4
Grès ²¹³	2.1-2.5	0.5 - 3	4.31	6
Gypse ²¹³	2.3 - 2.4	10 -15	-	-
Laine de roche ²¹⁰	0.02 - 0.16	95	4	7
Laine de verre ²¹⁰	0.035 - 0.1	94	0.4	7.7
Perlite expansée ^{210, 212}	0.15	96.5	-	7 - 7.2
Pierre ponce ²¹²	0.9	85	-	5.5 - 6.5
Silice ²¹²	2.2	42 - 44	40 - 60	4.7
Terre cuite ²⁰⁹	2.1-2.4	15 - 30	0.5	-
Vermiculite exfoliée ²¹⁰	0.4- 0.6	95.4	-	6 - 6.5
Chênevotte ^{210, 212}	0.32	78	10	-
laine de mouton ²¹²	0.035	30	-	-
Liège ²¹²	0.0.9 - 0.16	-	1.6 - 2	4.6
Ouate de cellulose ²¹²	0.07	85*	-	7
Paille ²¹⁰	0.083- 0.1	93	18	8

2.2.1 Description des matrices retenues pour l'élaboration du nouveau matériau composite-MCP

Pour rappel, le choix de la matrice conteneur du MCP se fait de façon à répondre à certaines conditions qui devraient être prises en considération dès la phase d'élaboration du nouveau matériau de construction composite-MCP.

Il s'agit dans le présent travail de thèse de développer un nouveau matériau composite-MCP bon marché et respectueux de l'environnement, pour des applications passives dans les enveloppes des bâtiments afin de

stabiliser les températures intérieures autour de celles de la zone de confort de l'être humain. Le choix de la matrice étant l'une des premières étapes à considérer pour obtenir un niveau de performance du matériau adéquat à l'application désirée.

2.2.1.1 Le plâtre

Le plâtre est un matériau de construction classique d'origine minérale, fabriqué à partir d'une roche qui est le gypse. Il a été utilisé depuis très longtemps dans le domaine du bâtiment principalement comme enduit de revêtement des parois intérieures ou dans la mise en œuvre des éléments décoratifs.

Le plâtre pris est connu pour être un matériau léger et poreux (~50 %) ²¹⁵. Ses hautes performances d'isolation reviennent au fait qu'une bonne quantité d'air soit piégée à l'intérieur de sa microstructure poreuse. C'est cette propriété qui avait suscité notre attention pour tester le plâtre en tant que matériau pour le conditionnement des MCPs. L'objectif était de tenter de piéger le MCP en question à la place de l'air à l'intérieur de la porosité du plâtre pris. Ainsi, les propriétés d'isolation du plâtre se transformeraient en propriétés de stockage latent de la chaleur.

Il est important de noter que la conductivité thermique du plâtre est très faible ($\sim 0.20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ²¹⁶. Cette propriété qui ne favorise pas son utilisation pour les applications de stockage latent de l'énergie entrave le transfert des flux de chaleur vers l'intérieur du matériau. Cela empêche l'enclenchement des cycles de fusion/solidification des MCPs. Par conséquent, des particules d'un adjuvant conducteur (graphite, graphène, tubes de carbone...etc.) devraient y être introduits pour renforcer la conductivité thermique.

La figure 2.1 montre une image d'un panneau de plâtre que nous avons testé en laboratoire. Il a été fabriqué à partir de poudre de plâtre disponible dans le commerce ; des particules de graphite recyclé ont été introduites pour améliorer sa conductivité thermique. Les premières observations ont montré une très faible résistance mécanique du panneau composite-MCP dans la phase liquide du composite-MCP.



Figure 2. 1 : Image d'un carreau de plâtre composite-MCP fabriqué en laboratoire.

2.2.1.2 Le graphite

Le graphite est un matériau d'origine minérale de formule chimique « C », un des allotropes naturels du carbone²¹⁷, Il existe sous différentes formes : graphite naturel, graphite synthétique, graphite naturel expansé^{218, 219}. C'est un matériau connu pour sa conductivité thermique élevée qui peut varier de 100 à 2000 W.m⁻¹.K⁻¹^{220, 221}. C'est pour cette raison qu'il est utilisé comme additif dans l'élaboration des composites-MCPs ayant une faible conductivité thermique. Cet adjuvant est versé dans de faibles quantités pour ne pas affecter les propriétés thermiques du nouveau composite-MCP.

Le graphite utilisé dans le présent travail de thèse est un graphite recyclé (Fig. 2.2) récupéré des déchets de sidérurgie jetés dans la nature. Sa conductivité thermique est nettement inférieure à celle des autres types de graphite. Par conséquent, celui-ci est ajouté dans des quantités plus importantes pour atteindre une conductivité thermique du composite-MCP élaboré pour permettre aisément le stockage et le déstockage de chaleur.

En dépit de sa faible conductivité thermique, l'utilisation du graphite recyclé a été motivée par le fait qu'il soit un déchet récupéré à très bas coût.



Figure 2. 2 Image du graphite recyclé utilisé dans cette étude

La conductivité thermique du graphite broyé et tamisé a été mesurée par Hot-Disk afin d'estimer la quantité à ajouter dans les futures composite-MCPs, elle est autour de $5.8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La figure 2.3 schématise le protocole de mesure.

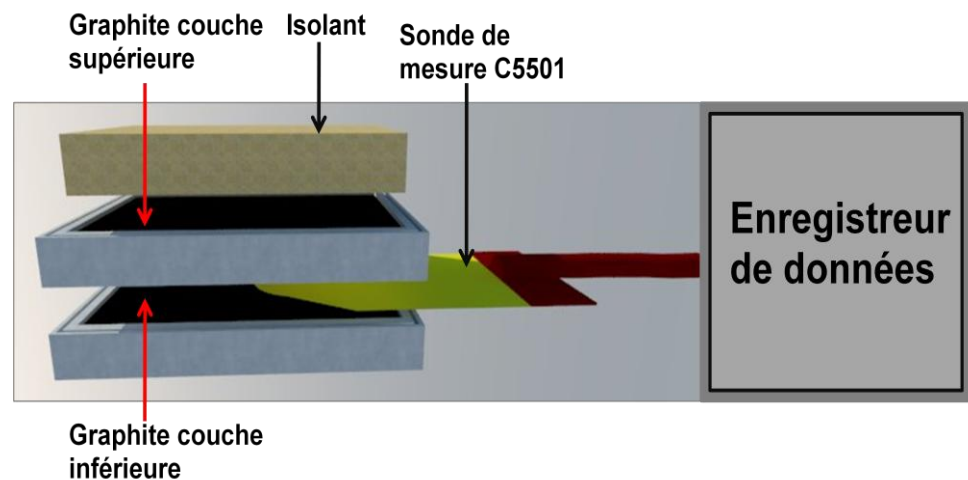


Figure 2. 3 Schéma du protocole de mesure de la conductivité thermique du graphite recyclé.

2.2.1.3 L'argile naturelle

L'argile est l'un des plus anciens matériaux de construction ; c'est une matière naturelle d'origine minérale, localement abondante utilisée depuis des milliers d'années par l'homme dans la construction. L'argile donne la possibilité de l'exploiter comme matériau de construction avec une maîtrise limitée de la

construction et sans aucun traitement chimique ni d'intégration d'adjuvants avant l'emploi²²².

Le pisé, est en effet une technique ancestrale de construction en terre qui repose sur l'utilisation de systèmes de banches à l'intérieur desquelles nous venons compacter manuellement ou mécaniquement de la terre.

L'adobe constitue des briques de terre fabriquées manuellement suivant un procédé de moulage très simple. Cette technique a prouvé son efficacité dans la construction ancienne.

Le torchis est un matériau de construction à base de terre mélangée à de la paille utilisé comme remplissage des cloisons des constructions à ossature en bois.

Si l'argile a été anciennement utilisée dans la construction, elle reste aujourd'hui un matériau de construction qui intéresse les chercheurs et les constructeurs pour sa durabilité, sa disponibilité, ses propriétés hygrothermiques, son faible coût, sa qualité sanitaire...etc²²³.

La mise en place d'un institut de la terre ainsi que la réalisation du quartier de terre de l'Isle d'Abeau (Quartier construit en terre en 1985, l'un des plus emblématiques ensembles architecturaux d'Europe dédié tout particulièrement à l'innovation et à l'expérimentation) atteste de l'intérêt grandissant que porte un pays comme la France à ce matériau²²⁴.

De ce fait, nous proposons d'exploiter ce matériau dans le processus d'élaboration des nouveaux matériaux composites à changement de phase dédiés à des applications d'amélioration de l'inertie thermique des enveloppes extérieures des bâtiments par stockage latent de l'énergie thermique.

L'Argile utilisée dans le présent travail de thèse est une argile naturelle sous forme de poudre récupérée de chez SOALKA (Society of Kaolins of Algeria), Jijel (Algérie). Celle-ci a été mélangée à sec à d'autres adjuvants tels que le graphite afin d'obtenir une matrice apte à contenir le MCP dans les conditions citées précédemment : stabilité mécanique, chimique, thermique, résistance au feu, facilité de mise en œuvre et faible coût. La figure 2.4 montre un échantillon de la poudre d'argile naturelle utilisée dans le processus expérimental d'élaboration des nouveaux composites-MCPs.



Figure 2. 4 Image d'un échantillon de poudre d'Argile naturelle utilisée dans le processus d'élaboration des nouveaux matériaux

2.2.2 Proposition d'additifs obtenus par recyclage des déchets pour améliorer les propriétés des matrices

L'utilisation de l'une des substances minérales précitées (argile ou plâtre) indépendamment de tout autre adjuvant en tant que matrices pour le conditionnement des MCPs reste insuffisante pour avoir un composite-MCP ayant toutes les propriétés requises pour le stockage de la chaleur. Certaines conditions importantes peuvent ne pas être vérifiées de cette façon : conductivité thermique faible, faible capacité de rétention de MCP sans fuite ni suintement, faible résistance mécanique notamment dans la phase de fusion du MCP. Par conséquent, l'utilisation de certains adjuvants est justifiée par l'utilité d'obtenir un composite-MCP stable (thermiquement, chimiquement et mécaniquement). Notre choix s'est orienté vers les additifs issus du recyclage des déchets ; ceci est important pour développer un matériau bon marché et respectueux de m'environnement.

2.2.2.1 Valorisation de la sciure de bois

Les premières réflexions menées dans ce sillage se sont orientées plutôt vers le recyclage de la sciure de bois (Fig.2.5 a) ; un déchet d'origine

organique produit en abondance par les menuiseries et dont le recyclage en Algérie ne présente que 3 à 9% du total produit¹²⁶.

La sciure de bois a été traitée avant d'être proposée comme adjuvant à mélanger à sec à une poudre d'origine minérale qui serait choisie pour l'élaboration de la matrice conteneur du MCP. Le traitement consiste en un lavage de celle-ci à l'eau distillée à 100 °C puis un séchage à l'étuve avant d'être moulue au moulin électrique. La forme finale de la sciure de bois est montrée sur la figure 2.5 b.

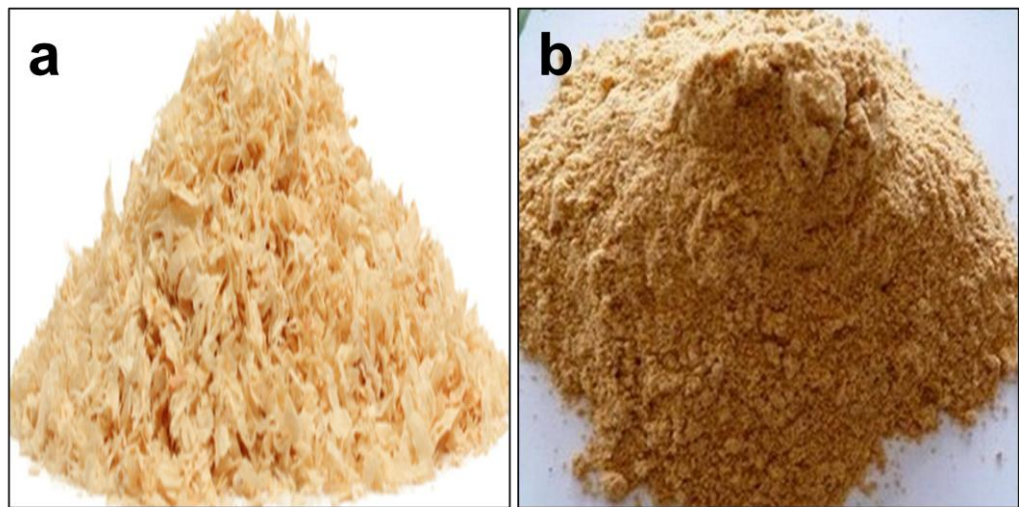


Figure 2. 5 Image de la sciure de bois: a) avant transformation, b) après transformation

2.2.2.2 Valorisation des déchets de son de blé

Les déchets de son de blé avaient eux aussi suscité notre attention pour les considérer comme additifs des matières d'origine minérales dans le processus d'amélioration des performances des matrices conteneurs des MCPs. En 2009 les statistiques avaient montré que les résidus recyclés pour l'alimentation des animaux ne présentent que 1/3 des résidus perdus²¹⁴. À cet effet ce déchet à été récupéré, traité en laboratoire avant d'être moulu et tamisé puis proposé pour être mélangé à sec aux matières d'origine minérales dans l'élaboration des matrices conteneurs de MCPs. La figure 2.6 montre des images du son de blé récupéré avant et après traitement.



Figure 2. 6 Image des déchets du son de blé a) Avant traitement, b) Après transformation

2.2.2.3 Les fibres de cellulose, un additif obtenu par recyclage du papier

Des additifs de matrices comme la sciure de bois et les déchets de son de blé ont été les premières substances ayant suscité notre attention tout au début de ce projet de thèse en raison de leur abondance et de disponibilité à moindre coût. Les premiers tests effectués au laboratoire en exploitant ces matières n'ont pas donné satisfaction, puisque les matrices obtenues montraient une faible résistance mécanique tout en maintenant une capacité d'absorption de MCP inchangée. Par conséquent d'autres substances ont été testées.

Le papier, un déchet dont $\frac{1}{4}$ sur un gisement de 500 000 tonnes est recyclé en Algérie⁷⁰. Sa valorisation en vue de faire un composant d'un matériau de construction serait une réelle contribution à la protection de l'environnement et au développement d'un matériau bon marché.

Des fibres de cellulose courtes sont ainsi élaborées à partir du papier carton qui était jeté dans la nature. Le procédé de transformation en vue de l'obtention des fibres de cellulose est détaillé dans la section méthode. La figure 2.7 montre une image des fibres de celluloses obtenues.



Figure 2. 7 Image des fibres de cellulose obtenues par recyclage du papier

2.3 Recherche de substances MCPs bio-sourcés appropriées aux applications passives de stockage latent de la chaleur dans le bâtiment

Le choix d'un MCP approprié aux applications passives de stockage de l'excédent de chaleur à température constante dans les enveloppes des bâtiments doit se faire dans le respect de certaines conditions fondamentales énumérées dans le chapitre 1, à savoir : son point de fusion et de solidification ainsi que sa capacité de stockage latent de la chaleur pendant le changement de phase. D'autres conditions s'ajoutent au processus du choix des MCPs à utiliser dans le cadre de ce projet de thèse puisqu'on se veut économique et écologique.

Les MCPs industrialisés sont commercialisés à des prix exorbitants, c'est pour cela que notre choix s'est tourné vers l'utilisation de produits issus de la récupération. Si l'on regarde de plus près, nous nous rendons compte que les MCPs sont présents autour de nous en permanence, de l'eau que nous buvons à quelques produits alimentaires jusqu'à plusieurs autres produits utilisés dans différent secteurs tels : les bougies, les cirages, quelques produits pharmaceutiques...etc. Ces matières peuvent être des matériaux à changement de phase ayant des propriétés thermiques différentes les uns des autres.

Afin de répondre aux objectifs de développer un composites-MCP bon marché, écologique à partir de matériaux disponibles et respectueux de l'environnement pour une application passive de stockage latent de la chaleur dans les enveloppes des bâtiments ; nous avons choisi d'explorer les MCPs énumérés dans le tableau 2.3. Ces substances peuvent être récupérées à bas coût à partir des secteurs industriels, sanitaires ou agroalimentaires cités.

Tableau 2. 3 : Les matières récupérées pouvant servir de MCP.

Domaine d'utilisation	Mode d'usage	MCP	T _f (°C)
	Imprégnation et revêtement du papier	*Paraffine C ₃₀ -C ₅₀	T _f ≥ 66°C.
Cire de paraffine utilisée dans l'industrie du papier	Revêtement et amélioration de la dureté des papiers	*Cire microcristalline C ₂₇ -C ₃₆	60-75°C
		*Cire de polyéthylène	90-95°C
	Fermeture des emballages	*Cire de paraffine microcristalline C ₂₅ -C ₂₆	54-58
	Additifs aux formats de papier	*Cire microcristalline C ₂₃ -C ₃₀	50-65°C
Cires de paraffine utilisées dans les produits ménagers	Cirage pour planchers	*Cire de carnauba	83°C
		*Cire de Montan raffinée	70-90°C
		*Cire macro-cristalline	54°C
	Crèmes émollientes pour chaussures	*Cire de Candellila C ₂₉ -C ₃₃	68-70°C
		*Cire d'abeilles	62-65°C
	Nettoyants pour meubles	*Cire de Japon	53°C
*Mélange de cires précitées. *Ozokérite		58-100°C	

	Fabrication de bougies	*Paraffine microcristalline 79% *Acide stéarique *Cire de carnauba	68.8°C
	Vaseline blanche	*Paraffine liquide. C_nH_{2n+2} : $8 < n < 19$ *Cire microcristalline * $n > 25$	$-2 < T_f < 32$ $T_f > 54$
	Parfums solides Masques de beauté	*Paraffine macro-cristalline *Cire d'abeilles	50-60°C
	Beurre de cacao	*34% acide stéarique ($T_f = 70^\circ C$). *34% acide oléique ($T_f = 13^\circ C$) *26% acide palmitique ($T_f = 63^\circ C$).	34.1°C
Industrie pharmaceutique Et cosmétique	Beurre de karité	*40 à 60% acide oléique ($T_f = 13^\circ C$) *20 à 50% acide stéarique ($T_f = 70^\circ C$). *2 à 9% acide palmitique ($T_f = 63^\circ C$). *3 à 11% acide linoléique ($T_f = -5^\circ C$)	28 à 35°C
	Huile de coconut	*43-50% acide laurique 41-43°C *15-21% acide myristique $T_f = 49-51^\circ C$ *7-11% acide palmitique. *4-9% acide caprylique $T_f = 16-17^\circ C$. *2-4% acide stéarique.	25°C
Agro-alimentaire	Plumage de volaille.	Cire de paraffine	60 à 65°C

Couverture des fromages	Cire de paraffine	70 à 75°C
Huile de palm	*38-48% acide palmitique *3-6%acide stéarique. *0-2% acide myristique	35°C

2.3.1 Propriété des bio-MCPs à basses températures de fusion retenus pour l'étude

Après avoir parcouru un large éventail de MCPs issus de la récupération, notre choix s'est orienté dans un premier temps vers la vaseline blanche : un MCP organique composé de cire microcristalline et de paraffine liquide récupéré du secteur sanitaire. Cette substance avait suscité notre attention par sa consistance à température ambiante (Fig.2.8). Ainsi, des composites-MCP (Vaseline) ont été testés au laboratoire. Des échantillons ont été élaborés (Fig.2.9) et caractérisés. Les résultats avaient fait l'objet de quelques manifestations scientifiques.



Figure 2. 8 Image de la consistance de la vaseline blanche à température ambiante



Figure 2. 9 Image d'un échantillon de composite-Vaseline élaboré

La suite des recherches avaient vite révélé que les composites-MCPs (vaseline) perdent leurs propriétés thermiques de stockage latent après les premiers cycles fusion/ solidification. De plus, les températures de changement de phase de ces composites initialement mesurées sont de 34.98 °C pour la fusion et de 36.01 °C pour la solidification, ce qui ne correspond pas aux températures des applications passives visées par ce projet de thèse. L'objectif est d'élaborer des composites-MCPs dont les points de fusion seraient autour des températures du confort de l'être humain. Les températures de confort sont fixées de 26 °C à 28 °C par la Réglementation Thermique des bâtiments (RT 2012).

Pour répondre aux conditions de confort visées, d'autres types d'MCPs ont été testés au laboratoire. Contrairement à la vaseline blanche, ces bio-MCPs ont été récupérés du secteur agroalimentaire. Ce sont des composés d'acides gras. Ces substances sont des graisses végétales dont les points de fusion varient entre 22°C et 30 °C selon la composition de La substance en question.

2.3.1.1 La graisse végétale de coprah hydrogénée

C'est une graisse d'origine végétale de couleur blanche, de goût et d'odeur neutre, extraite de la pulpe du fruit de Cocos Nucifera (Fig.2.10). Elle à été proposée pour être exploitée en tant que matériau à changement de

phase bio-sourcé pour des applications passives de stockage latent de la chaleur dans les enveloppes des bâtiments. La substance a été récupérée de chez SLAMA Frères Groupe pour le raffinage et le conditionnement des huiles et graisses végétales (Tunis, Tunisie).



Figure 2. 10 Images du fruit de *Cocos Nucifera* (a) et d'un échantillon de la graisse végétale de coprah récupérée (b).

La fiche technique qui décrit le produit montre que cette substance est composée de plusieurs acides gras saturés à raison de 91 %. L'acide Laurique est le composé qui présente le taux le plus élevé dans la composition du produit.

Des tests de caractérisation par Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) ont été effectués sur un échantillon de quelques dizaines de milligrammes de ce bio-MCP afin d'identifier ses propriétés thermiques de changement de phase et sa capacité de stockage latent de l'énergie thermique. L'analyse a révélé que le bio-MCP présente des températures de fusion et de solidification intéressantes pour les applications passives visées. Elles sont de 22.63 °C et de 17.44 °C pour la fusion et la solidification pour des valeurs de capacité latente respectives de changement de phase de 106.17 J/g et de 107.34 J/g.

2.3.1.2 La graisse végétale de palmiste

C'est une substance d'origine végétale inodore, de couleur blanche, extraite des noyaux du fruit du palmier à huile (Fig.2.11). Cette graisse végétale de palmiste hydrogénée dont nous avons testé la possibilité d'exploiter en tant que MCP bio-sourcé pour des applications passives de stockage latent de la chaleur dans le bâtiment a été achetée à bas coût de chez Pacific Inter-Link SDN-BHD, Kuala Lumpur, Malaysia.

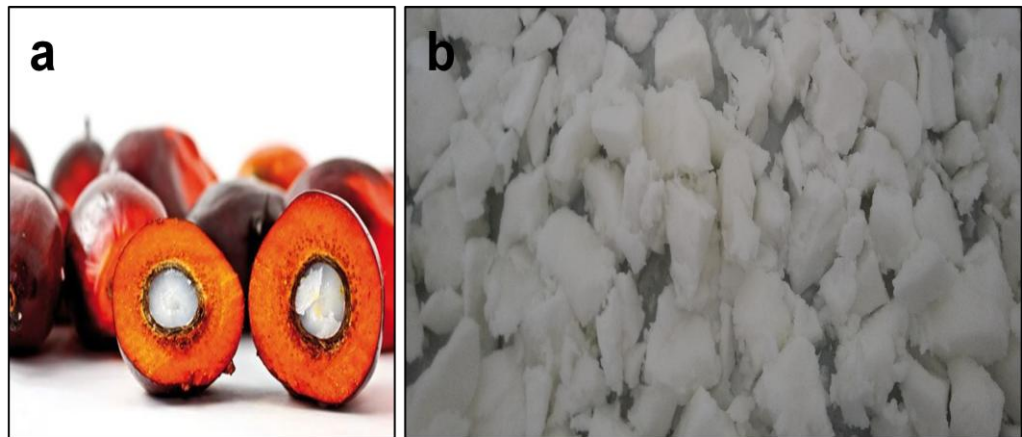


Figure 2. 11 Image d'un échantillon de noyaux du fruit du palmier à huile (a) et d'un échantillon de graisse végétale de palmiste (b).

Les résultats de l'identification des propriétés thermiques de ce MCP bio-sourcé montrent que celui-ci peut-être un candidat potentiel pour le stockage latent de l'énergie thermique dans le domaine du bâtiment. Ses températures respectives de fusion et de solidification sont de 26.53 °C et de 23.30 °C respectivement ; ses valeurs respectives de chaleur latente de changement de phase sont de 74.35 J/g et 75.24 J/g.

2.3.1.3 La graisse végétale non hydrogénée à 33 °C de température de fusion

C'est un produit récupéré du secteur de l'industrie agro-alimentaire (Fig.2.12). Il est généralement utilisé dans la fabrication des confiseries et des produits chocolatés. Contrairement aux autres graisses végétales présentées précédemment, celle-ci se caractérise par un point de fusion relativement

élevé qui est de 32.98 °C et par une température de solidification de 20.59 °C inférieure à celle de la fusion d'environ 12.39 °C. C'est ce que l'on appelle le phénomène de surfusion. En dépit de ce phénomène, la capacité de stockage latent de la chaleur de cette substance reste satisfaisante ; elle est de 108.39 J/g et 109.73 J/g pour la fusion et la solidification respectivement. De plus, sa disponibilité à faible coût justifie l'intérêt de la tester comme MCP pour des applications passives de stockage latent de chaleur sous les conditions des climats chauds et ses ou les écarts de températures entre le jour et la nuit sont très importants (Climat saharien).



Figure 2. 12 Image d'un échantillon de la graisse végétale à 33 °C de point de fusion.

2.3.1.4 Exploration du beurre de cacao comme bio-MCP

Les premières caractéristiques de changement de phase des graisses végétales explorées semblent favorables aux applications passives de stockage latent de la chaleur dans le bâtiment, ce qui nous a motivés à explorer les propriétés de stockage latent du beurre de cacao.

Le beurre de cacao est une graisse végétale de couleur jaune pâle (Fig.2.13) utilisée dans la fabrication des chocolats et confiseries. Celle-ci a été caractérisée par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) dans le but d'identifier ses caractéristiques de changement de phase. La figure 2.14 montre les résultats de mesure des propriétés thermiques du beurre de cacao testé.

Les résultats de la DSC montrent que le beurre de cacao a un point de fusion et de solidification de 19.43 °C et de 14.96 °C respectivement pour des chaleurs latentes respectives de changement de phase de 73.38 J/g et de 71.95 J/g.



Figure 2. 13. Image d'un échantillon de beurre de cacao testé

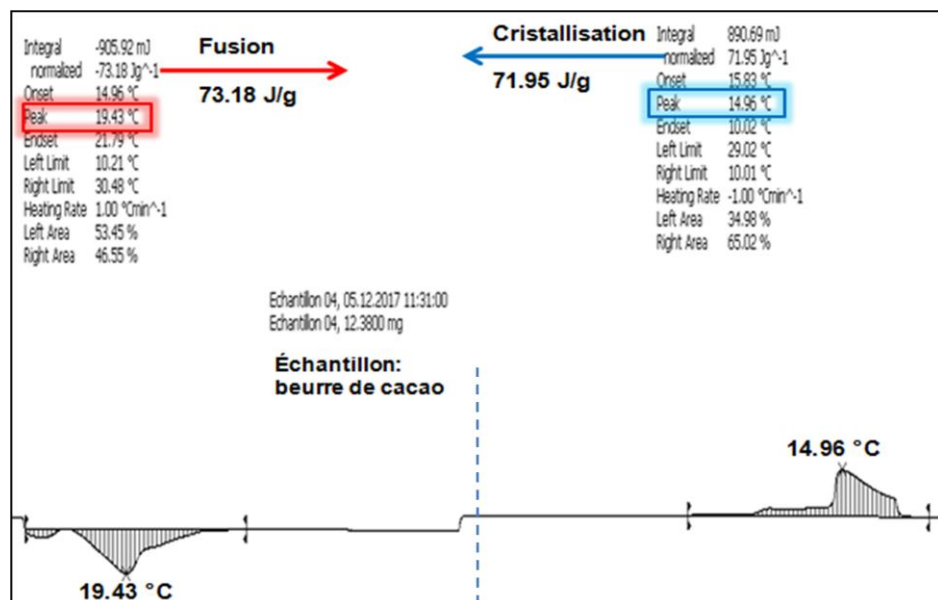


Figure 2. 14 Résultats des propriétés thermiques du beurre de cacao testé.

Contrairement aux autres graisses végétales testées, le beurre de cacao avait montré des signes de dégradation chimique manifestés par le retrait volumiques après quelques jours laissé à l'air libre accompagné d'un

dégagement d'odeurs. Son instabilité chimique rend son utilisation inadéquate dans le domaine du bâtiment.

2.4 Méthode d'élaboration des nouveaux matériaux composites-MCP

Il existe plusieurs méthodes d'élaboration des nouveaux composites-MCPs pour le stockage latent de l'énergie thermique dans le bâtiment. La différence entre les méthodes d'élaboration réside dans la façon de conditionner le MCP à l'intérieur de sa matrice.

Pour rappel, les méthodes d'intégration directes (l'immersion, la dispersion...etc.) des MCPs à l'intérieur de leurs matrices sont connues pour être les plus simples et les moins coûteuses.

Il s'agit dans ce projet de thèse de développer des nouveaux matériaux de construction bon marché, ce qui favorise l'adoption de ces procédés. Les premiers essais effectués en laboratoire s'étaient basés sur la méthode de dispersion des poudres (matrices) dans les MCPs à l'état fusion. Les matrices avaient d'abord été réduites en fines poudres afin d'améliorer la surface spécifique des grains et de faciliter l'imprégnation. Le MCP est ensuite porté à l'état liquide par le biais d'un bain marie. Les poudres matrices sont enfin dispersées dans l'MCP puis agitées pendant 10 minutes. Le composite résultant est comprimé à l'intérieur d'une pastilleuse sur laquelle est exercée une compression uni-axiale à froid en utilisant une presse hydraulique.

Les composites-MCPs obtenus par la présente méthode sont efficaces thermiquement mais présentent une très faible résistance mécanique. Leur consistance à température ambiante n'est pas favorable aux applications passives dans la structure des bâtiments. Par conséquent, la méthode d'immersion des matrices solides dans des MCPs à l'état fusion a été testée. Le processus de préparation des matrices solides et des composites-MCPs est détaillé ci-dessous.

2.4.1 Préparation des matrices pour le conditionnement des MCPs

La préparation des matrices a fait l'objet d'un long processus d'essais en laboratoire. L'objectif est de développer une matrice qui puisse contenir une bonne quantité de MCP dans de bonnes conditions, sans risque de fuite ni de suintement dans la phase de stockage de chaleur.

Des combinaisons (poudre minérale/ déchets recyclés) ont été testées au laboratoire en utilisant différentes fractions massiques des composés précités afin de préparer une matrice performante (Fig.2.15). Cette première étape avait suscité beaucoup d'efforts car la plus grande partie des combinaisons effectuées donnaient forme à des matrices qui ne remplissaient pas les critères d'absorption et de rétention des MCPs ainsi que la condition de résistance mécanique détectée de manière empirique dès les premières phases du processus d'élaboration.



Figure 2. 15 Échantillons des différentes matrices élaborées à partir de plusieurs combinaisons (poudre minérale/ déchet de recyclage).

Les composites [(Poudre de plâtre (PP)/ fibres de cellulose (FC)/ graphite (Gr)] constituaient des matrices ayant retenu une bonne quantité de MCP sans fuite, mais leur résistance mécanique reste insatisfaisante. Par conséquent, la méthode de préparation des matrices a été retenue pour l'élaboration d'autres matrices plus résistantes.

Des composites à base de [(Poudre d'Argile naturelle (PA)/ Fibres de Cellulose (FC)/ Graphite (Gr)] ont été élaborés et ont montré une bonne capacité d'absorption et de rétention de MCP dans sa phase liquide sans afficher aucune déformation relative à une perte de résistance mécanique après l'intégration des MCPs. Le processus d'élaboration des matrices est schématisé dans la figure 2.16.

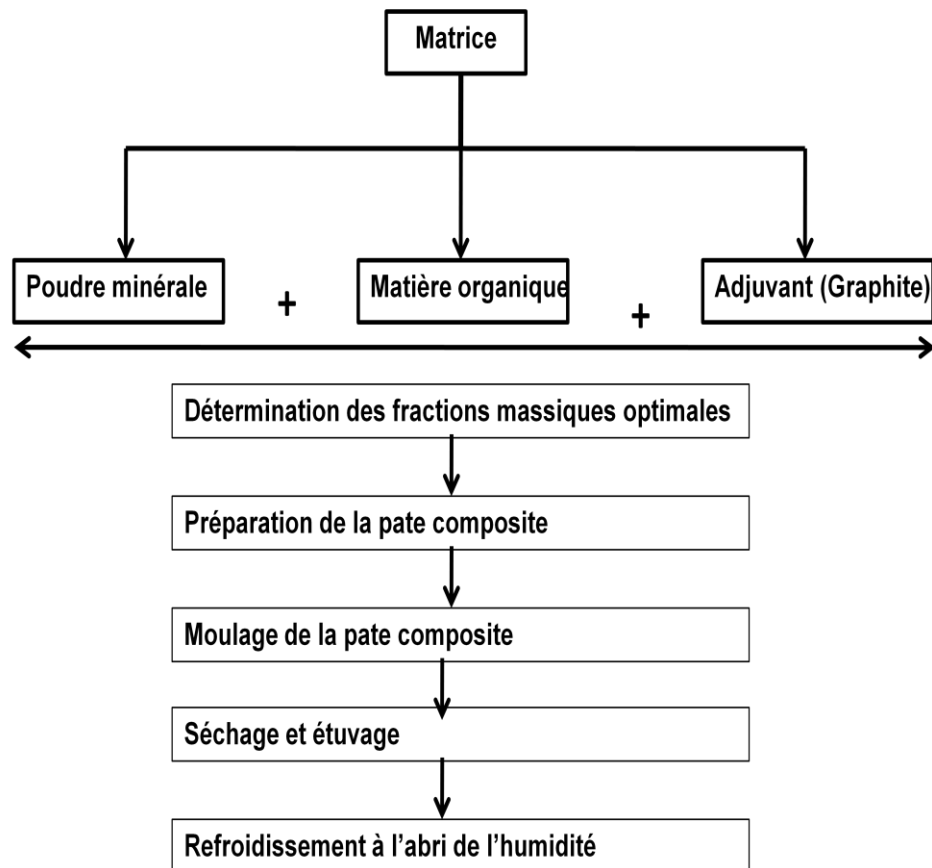


Figure 2. 16 Schéma des étapes du processus de préparation de la matrice composite.

2.4.1.1 Préparation des fibres de cellulose

Les fibres de cellulose ont été préparées par recyclage du papier carton (Fig.2.16 a). Tout type de carton ayant accompli ses fonctions de base et jeté dans la nature est récupéré afin d'être transformé en fibres courtes de cellulose.

Le processus de transformation est très simple : les cartons sont d'abord débarrassés de toute matière plastique ou autre matière étrangère au papier se trouvant dessus. Ils sont ensuite découpés et trempés dans de l'eau pendant 48h, le but de cette opération est de séparer toutes les fibres les unes

des autres. Au bout de 48 h, il en résulte une pâte (Fig.2.16 b), celle-ci est égouttée (Fig.2.16 c) puis séchée à l'étuve à 105 °C pendant 24h avant de subir un broyage au broyeur électrique. La figure 2.16 d montre la forme finale des fibres obtenues.



Figure 2. 17 Images du processus de transformation du papier carton

2.4.1.2 Étude de la composition optimale des matrices : Détermination des fractions massiques (PA/FC/Gr)

Plusieurs fractions massiques des composants (Fig.2.17) qui constituent la matrice composite destinée à conditionner le MCP ont été testées au laboratoire afin d'en déduire la composition optimale. Toutes les fractions massiques testées ne sont pas intégrées dans le présent rapport de thèse. Nous n'avons présenté que celles qui se rapprochent de la fraction massique optimale retenue pour l'élaboration du composite-MCP. Le tableau 2.4 présente ces valeurs.

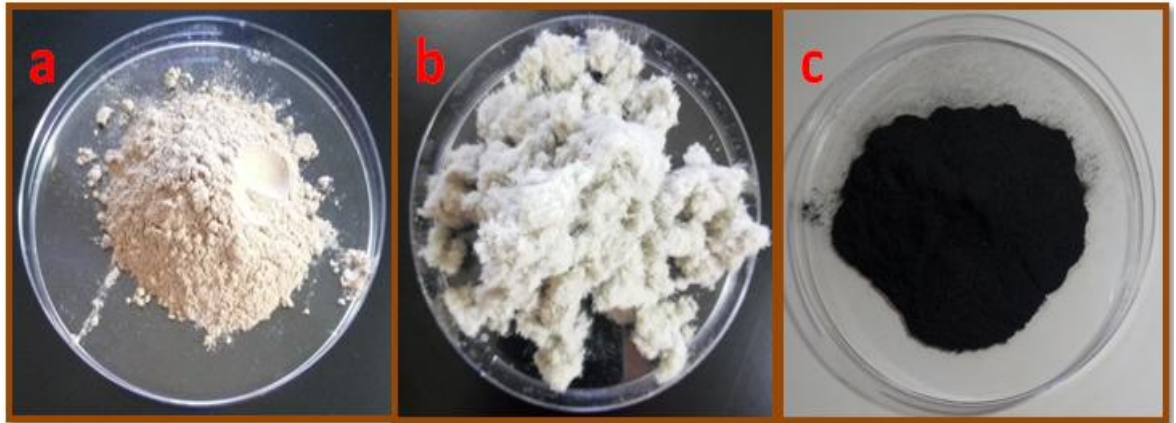


Figure 2. 18 Les différents composants constitutifs de la matrice : a) PA, b) FC, c) Graphite.

Tableau 2. 4 : Différentes fractions massiques utilisées dans la préparation de la matrice.

Échantillons	$\frac{\text{Fibres de cellulose}}{\text{Total composants}}$	$\frac{\text{Argile naturelle}}{\text{Total composants}}$	$\frac{\text{Graphite}}{\text{Total composants}}$
Échantillon 1 (E1)	1: 2	2: 5	1: 10
Échantillon 2 (E2)	5: 12	1: 3	1: 4
Échantillon 3 (E3)	5: 13	4: 13	4: 13
Échantillon 4 (E4)	5: 14	2: 7	3: 7

2.4.1.3 Préparation de la pate composite (PA/FC/Gr)

Les différentes fractions massiques des composants précités ont été mélangées à l'intérieur d'un récipient à fermeture hermétique en subissant une agitation mécanique pendant 10 minutes pour enrober les fibres de cellulose d'un film fin de poudre d'argile naturelle et assurer une répartition régulière des particules de graphite. De l'eau distillée est ajoutée dans le mélange avec une fraction massique de 1 :1 pour chaque composition. Le mélange est ensuite malaxé puis laissé à l'air libre (Fig.2.19) pendant 60 minutes afin que la pate puisse commencer sa prise.



Figure 2. 19 Image d'un échantillon de la pate composite obtenues

2.4.1.4 Moulage de la pate composite

La pate composite préparée a subi une compression uni-axiale d'une valeur de 2 kN à l'intérieur d'une pastilleuse sous la presse hydraulique. La pastilleuse à empreinte parallélépipédique en acier inoxydable (Fig.2. 19) a été fabriquée à cet effet dans le laboratoire de mécanique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Hall de Technologie). La pate est d'abord pesée à l'aide d'une balance de précision avant passage au moule et à la presse. La figure 2.20 donne une image de la presse hydraulique utilisée.

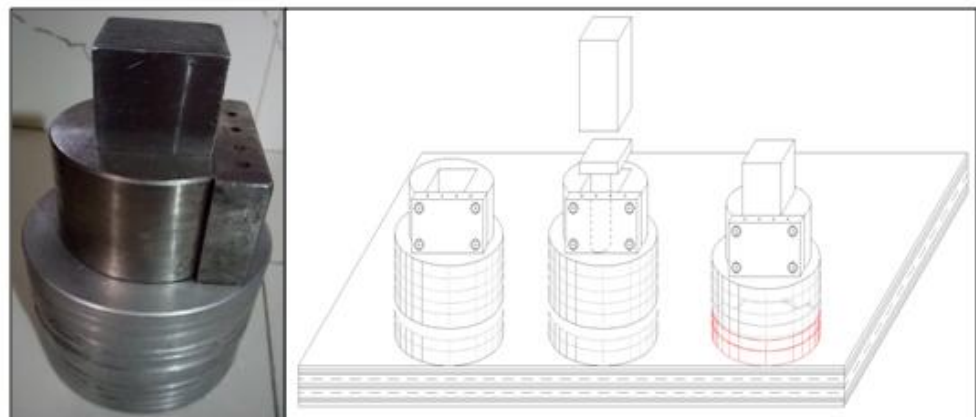


Figure 2. 20 Image du moule en acier fabriqué en laboratoire pour le moulage des pastilles.



Figure 2. 21 Image de la presse hydraulique utilisée dans le processus de compression uniaxiale.

2.4.1.5 Séchage et étuvage des matrices composites obtenues

À l'issue du moulage de la pâte composite, il en est résulté des pastilles parallélépipédiques de dimension (40 mm x 40mm x 10 mm). Celles-ci ont été séchées à l'étuve à 105 °C pendant 24h pour évacuer les particules d'eau et d'humidité piégées à l'intérieur de leurs microstructures puis refroidies à l'intérieur d'une boîte en verre à fermeture hermétique (Fig.2.22) afin d'éviter toute pénétration d'humidité. Les pastilles (Fig. 2.23) sont ainsi prêtes pour le conditionnement du matériau à changement de phase.

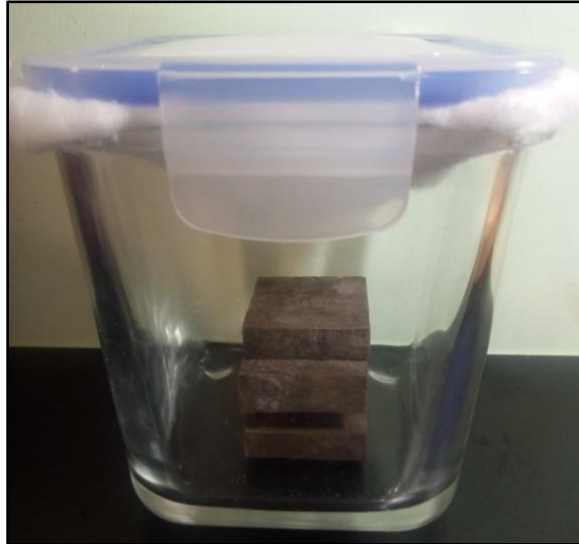


Figure 2. 22 Image des pastilles en refroidissement.



Figure 2. 23 Image d'un échantillon de pastille composite (AR/FC/Gr).

2.4.2 Le conditionnement des bio-MCPs dans la matrice préparée

Les différentes pastilles préparées ont été chargées de MCP suivant le processus simple et non coûteux d'immersion directe. Pour procéder, le MCP a été maintenu à l'état liquide en se servant d'un bain thermostaté pendant toute la durée d'immersion. Les matrices y sont immergées pendant 20 minutes jusqu'à saturation. Pendant les quatre premières minutes, le contact (MCP/matrice) est mono-face, la pastille flotte. Ce qui prouve qu'elles sont légères ; celles-ci coulent au fond du récipient en se chargeant de MCP.

Il est important de noter que la température du MCP est maintenue constante pendant toute la durée de l'opération. Les pastilles chargées de MCP ont été retirées et posées sur du papier absorbant pour enlever l'excédent de MCP qui se trouve en surface avant de les soumettre aux différentes caractérisations thermo-physiques et chimiques. La figure 2.24 schématise les principales étapes d'élaboration des nouveaux composites-MCPs.

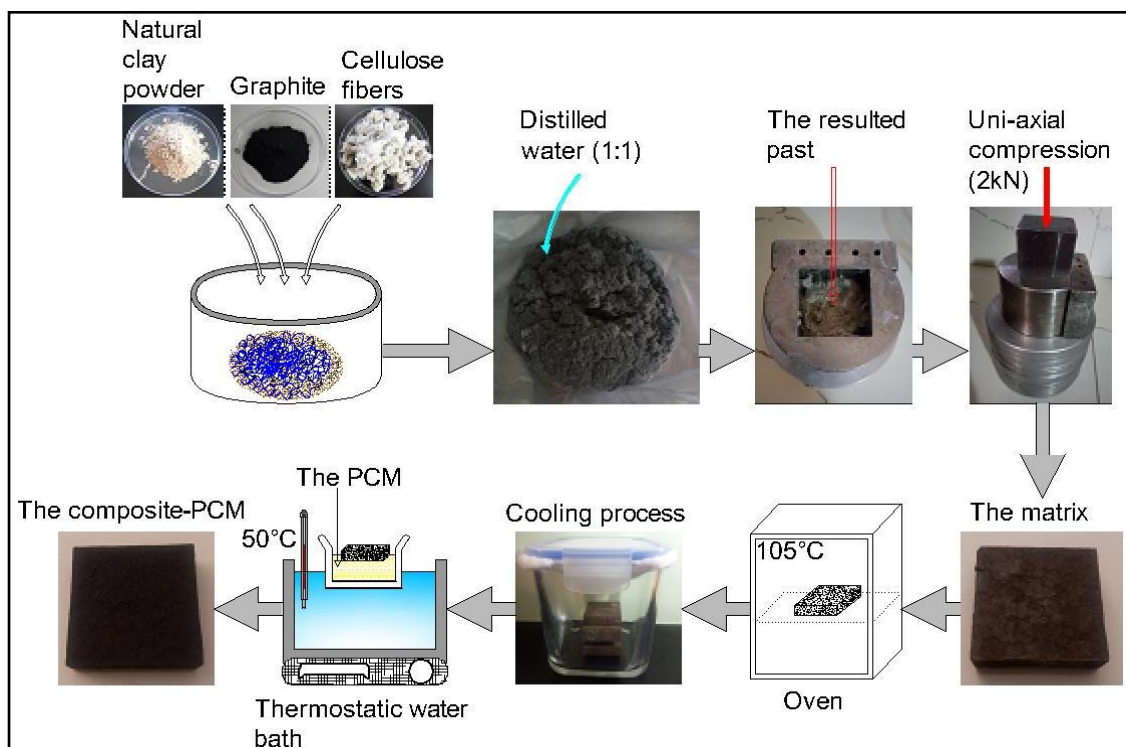


Figure 2. 24 Processus d'élaboration des nouveaux composites-MCPs.

2.4.2.1 Traitement des composites-MCP : test de fuite des MCPs à l'état fusion

Les matrices chargées d'MCP forment des composites-MCPs qui devraient avoir la capacité de stocker et de déstocker transitoirement de la chaleur à température constante. Cette principale fonction de stockage/déstockage de la chaleur ne peut s'accomplir que si le MCP se trouve mal conditionné dans la microstructure de sa matrice ou si celle-ci fuit lorsqu'il est dans sa phase liquide pendant laquelle s'opère le stockage de la chaleur. Par

conséquent, un test de fuite du MCP a été effectué en laboratoire sur tous les composites-MCP préparés.

Tous les composites-MCP ont été posés sur du papier filtre puis ont subi un étuvage à 50 °C; température visiblement supérieure à leurs températures caractéristiques de fusion.

La figure 2. 25 montre la dimension de la tache grasse sur le papier filtre due à la fuite du MCP des composites à base de (plâtre/paraffine) (PP/FC/Gr/Paraffine) après un traitement de 30 minutes à l'intérieur de l'étuve.

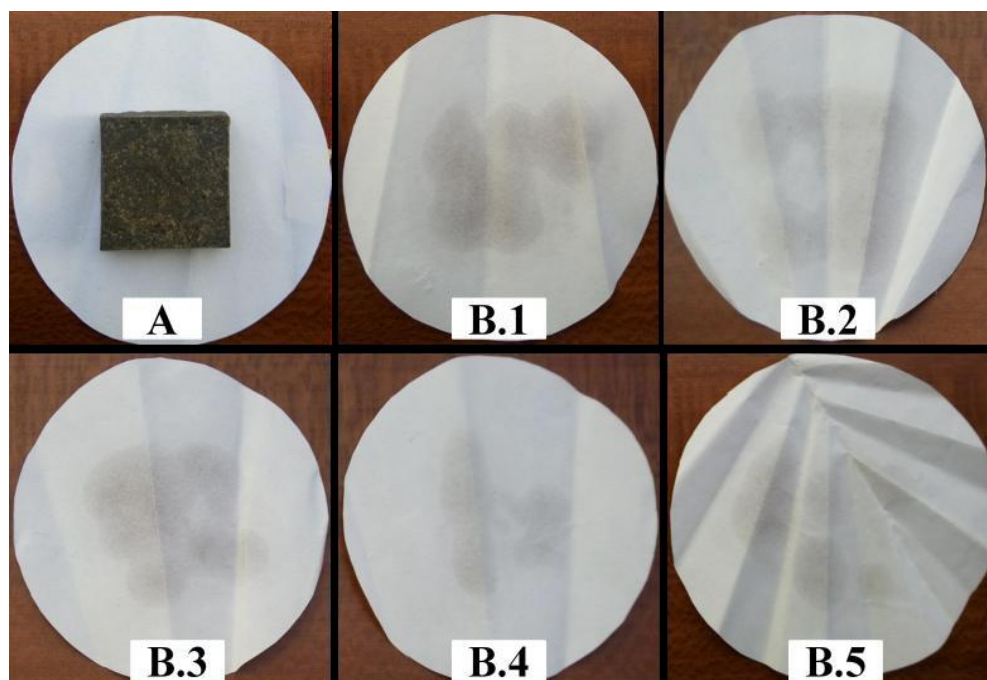


Figure 2. 25 Dimension de la tache grasse causée par la fuite de la paraffine des composites PP/FC/Gr.(A) image de l'échantillon sur papier filtre; (B1~B5) empreinte grasse des échantillons de 1 à 5.

Les composites-MCP à base d'Argile/ graisse végétale, (PA/FC/Gr/ Acides Gras (graisses végétales de coprah) ont subi le même traitement à la même température et pendant la même durée ; par contre aucune fuite de MCP n'a été enregistrée. Par conséquent, la durée du traitement a été portée jusqu'à 90 minutes à la même température (50 °C) ; deux fois supérieure à la température de fusion du composite-MCP.

La figure 2.26 montre la configuration et la dimension de la tache grasse causée par la fuite du MCP (Acide gras : la graisse végétale de coprah) après 90 minutes de traitement.

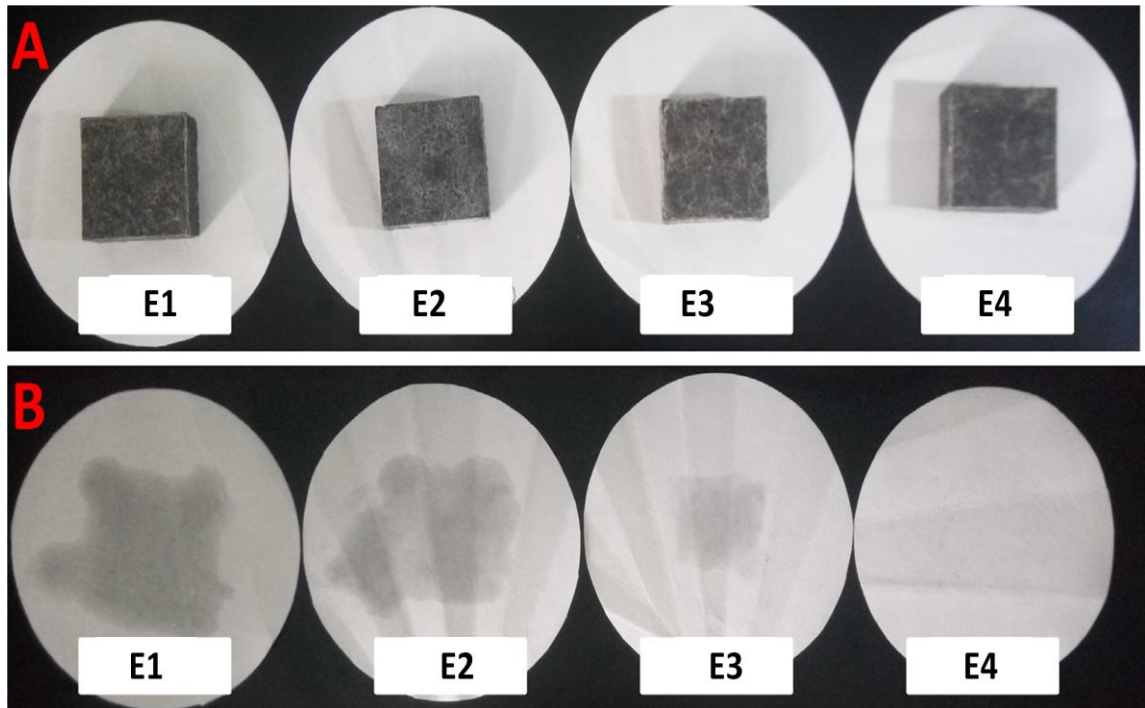


Figure 2. 26 Dimension de la tache grasse causée par la fuite de la graisse végétale de coprah de la matrice PA/FC/Gr : A) Avant traitement, B) Après traitement.

La comparaison des résultats de ce test nous amène à constater que le MCP est mieux conditionné à l'intérieur de la microstructure des matrices à base d'argile (PA/FC/Gr) comparé à celles élaborées à base de plâtre (PP/FC/Gr).

À partir des résultats du traitement thermique des composites (PA/FC/Gr), nous constatons que la composition de la matrice 4 est la plus appropriée au conditionnement de l'MCP dans sa phase liquide.

2.4.2.2 Mesure du taux de rétention des MCPs pour chaque matrice

Les matrices composites préparées ont montré des taux d'absorption et de rétention de MCP différents dans sa phase liquide. Cela dépend principalement de leurs compositions respectives et de la viscosité de MCP dans lequel elles ont été immergées.

Pour estimer le taux de MCP retenu par chaque matrice, nous avons procédé par la technique de la pesée avant et après imprégnation. Le tableau 2.5 montre les taux d'absorption respectifs de la paraffine pour chaque matrice composite à base de plâtre (PP/ FC/Gr) tandis que le tableau 2.6 montre les taux d'absorption et de rétention de MCP pour les composites à base d'argile (PA/FS/Gr).

Tableau 2. 5 : Taux d'MCP absorbé et retenu par les différentes matrices (PP/ FC/ Gr).

Échantillons	Quantité de MCP absorbée et retenue (% massique)
Échantillon 1 (E1)	44
Échantillon 2 (E2)	46
Échantillon 3 (E3)	55
Échantillon 4 (E4)	56

Tableau 2. 6 : Taux d'MCP absorbé et retenu par les différentes matrices (PA/FC/Gr).

Échantillons	Quantité de MCP absorbée et retenue (% massique)
Échantillon 1 (1)	47.31
Échantillon 2 (2)	49.48
Échantillon 3 (3)	58.88
Échantillon 4 (4)	64.36
Échantillon 5 (5)	80.39

Les échantillons composites (PP/FC/Gr) ont montré des taux d'absorption d'MCP élevés, ils présentent par contre des fuites d'MCPs après traitement thermique et une faible résistance mécanique lors de la phase liquide de celui-ci.

Les composites (PA/FC/Gr) présentent eux aussi des taux d'absorption de MCP importants, de bonnes caractéristiques de les retenir dans leurs phase fusion sans montrer des signes de dégradation mécanique. Le composite préparé à partir de la matrice (E4) (PP/FC/Gr) a été retenu comme le plus approprié aux applications visées du moment qu'il présente le taux

d'absorption massique de MCP le plus élevé et ne montre aucune fuite de MCP dans sa phase liquide.

2.4.2.3 Test de l'imperméabilité des composites-MCP à l'eau

Les meilleurs candidats composites-MCPs retenus par rapport à leur taux d'absorption et à leur aspect dans la phase liquide de MCP ont été sélectionnés pour des tests de perméabilité à l'eau. Pour cela, les pastilles de dimension (40 mm x 40 mm x 10mm) ont été immergées dans de l'eau à température ambiante (22 °C) pendant 72h. La figure 2.27 montre un exemple d'échantillon immergé dans l'eau.



Figure 2. 27 Un exemple d'échantillon immergé dans l'eau pour tester sa perméabilité à l'eau

Grâce à la technique de la pesée avant et après immersion de l'échantillon en question dans l'eau, nous avons procédé à l'estimation de sa perméabilité à l'eau grâce au calcul du paramètre (Δ_m).

$$\Delta_m = M_1 - M_0 \dots\dots\dots(1)$$

Δ_m : Est la différence de masse de l'échantillon avant et après immersion dans l'eau.

M_0 : C'est la masse de l'échantillon avant son immersion.

M_1 : c'est la masse de l'échantillon après immersion.

Les résultats du test de perméabilité à l'eau ont été répétés trois fois sur le même échantillon, ils avaient montré que le (Δ_m) est de l'ordre de 3 à 5 %, ce

qui reste insignifiant. Le résultat montre que les échantillons composites-MCPs sont imperméables à l'eau.

2.4.2.4 Mesure de la masse volumique des MCPs et des composites-MCP expérimentés

La mesure de la masse volumique des échantillons composites élaborés est une grandeur physique qui permet de connaître la quantité de matière par unité de volume dans les nouveaux matériaux composites-MCPs élaborés. Les mesures ont touché les meilleurs candidats composites ayant justifié de bonnes propriétés pour les applications passives visées par ce projet de thèse.

La masse volumique notée (ρ) est exprimée mathématiquement par la relation :

$$\rho = \frac{m}{V} \dots \dots \dots (2)$$

Les masses respectives des échantillons ont été prises à la balance de précision (Fig. 2. 28) tandis que la mesure des dimensions qui nous permettent de connaître le volume de l'échantillon s'était fait au pied à coulisse numérique (Fig. 2. 29).



Figure 2. 28 Dimensionnement au pied à coulisse numérique des échantillons composites-MCP élaborés

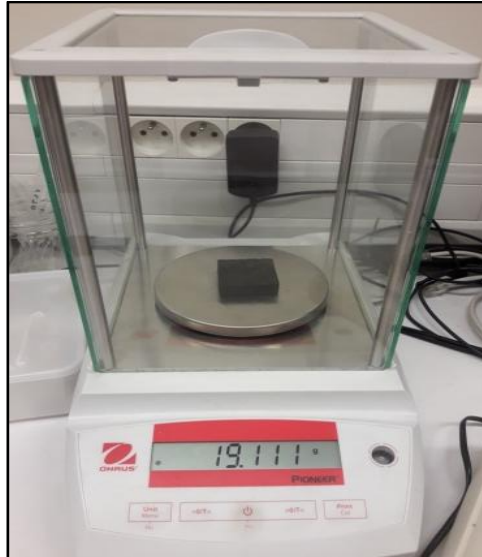


Figure 2. 29 Pesée à la balance de précision des échantillons composites-MCPs élaborés.

La masse volumique est une donnée importante, c'est une grandeur nécessaire à exploiter dans les simulations numériques du comportement du matériau intégré dans l'enveloppe du bâtiment. Le tableau 2.7 résume les résultats de calcul de la masse volumique des différents échantillons.

Tableau 2. 7 : Valeurs mesurées (kg/m^3) des composites élaborés.

Échantillons	0.3 % Gr	0.4 % Gr
Composite sans MCP	880.57	665.35
Composite-MCP (MCP1)	1246.05	1249.84
Composite-MCP (MCP2)	1271.58	1223

*Composite-MCP1 : Composite à base de plâtre.

*Composite MCP2 : Composite à base d'argile naturelle.

2.4.3 Processus d'élaboration des panneaux composites-MCP

Les premiers tests réalisés sur les échantillons composites-MCPs de dimension (40 mm x 40 mm x 10mm) ont permis de retenir les meilleurs candidats pour continuer l'étude par des tests de caractérisation thermique, physico-chimique et mécanique.

Des panneaux composites-MCP de dimension (300 mm x 320 mm x 12 mm) ont été élaborés à partir des compositions retenues. Une couverture en

feuilles de tôle en acier inoxydable d'une épaisseur de 1 mm a été appliquée de part et d'autre de sorte à former des panneaux sandwich afin de protéger le matériau sans pour autant affecter sa capacité à conduire le flux de chaleur vers l'intérieur du composite-MCP pour le stockage. La figure 2.30 montre la configuration du matériau ainsi qu'une image du panneau sandwich.

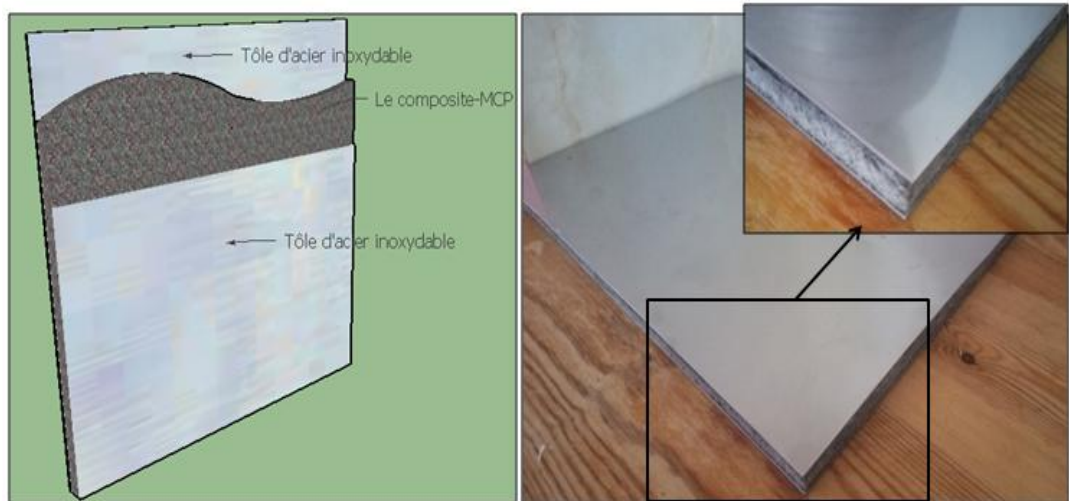


Figure 2. 30 Schéma et image de la configuration du composite-MCP sandwich.

L'épaisseur importante des tôles en acier peut retarder le processus de transfert des flux de chaleur et donc du stockage. Ainsi, une couverture en feuilles d'aluminium d'une très faible épaisseur et d'une conductivité 4 fois supérieures a été proposée. La figure 2.31 montre des images du panneau composite-MCP couvert de feuilles d'aluminium.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la présentation des différentes substances utilisées dans le processus d'élaboration des nouveaux matériaux de construction composites-MCP ainsi que leurs principales propriétés ayant suscité notre attention pour les exploiter dans le domaine du stockage latent de la chaleur dans le bâtiment. Il s'agit de justifier l'intérêt que nous portons à l'utilisation des déchets en vue de les recycler pour les ajouter dans la composition des matrices de conditionnement des MCPs.



Figure 2. 31 Image des d'un exemple de panneau entièrement couvert par des feuilles d'aluminium.

Les bio-MCPs sont des substances récupérées du secteur sanitaire et agro-alimentaire à très bas coût. Leurs caractéristiques de changement de phase sont favorables aux applications de stockage latent de la chaleur dans le bâtiment.

Ce chapitre relate le cheminement des essais expérimentaux qui nous ont permis de sélectionner la composition optimale des matrices potentielles pour le conditionnement des bio-MCPs dans de bonnes conditions. Les matrices à base d'argile naturelle sont celles qui ont montré les meilleures propriétés.

Des panneaux composites-MCPs de (40 mm x 40 mm x 10 mm) recouverts de feuilles d'aluminium ont été élaborés à partir des compositions retenues. Les propriétés thermiques, physiques et chimiques du nouveau composite sont indispensables pour sa validation en tant que candidat potentiel pour les applications de stockage latent dans le bâtiment. Les méthodes et résultats de la caractérisation sont présentés dans le chapitre 3¹.

¹ « *Infra* » : pages 84,102

CHAPITRE 3

Caractérisation des nouveaux matériaux : identification des propriétés thermiques, physico-chimiques et mécaniques

3.1 Introduction

Le présent chapitre fait suite aux données scientifiques mises en exergue dans le chapitre précédent quand aux méthodes, matériel et techniques d'expérimentation des nouveaux matériaux composites à changement de phase. Il vise à présenter les outils et les techniques de caractérisation utilisés en vue de l'identification des propriétés du nouveau matériau élaboré.

Dans un second temps, le chapitre s'atèle à détailler les résultats obtenus à l'issue de la longue opération de caractérisation. Les caractéristiques des matières premières utilisées dans le processus d'élaboration des nouveaux matériaux sont détaillées en avant de cette partie. Celle-ci est suivie de la présentation des résultats de caractérisation des nouveaux composites-MCPs retenus pour faire l'objet d'une proposition d'application passive dans l'enveloppe des bâtiments.

Il est très important de préciser qu'il y a eu un travail de va et vient entre les différentes phases d'élaboration et de caractérisation des nouveaux matériaux composites-MCP au cours du processus de recherche, le travail ne s'est pas effectué à la chaîne comme peut le refléter l'organisation du manuscrit.

En plus des différentes caractérisations thermiques, physico-chimiques et mécaniques, les nouveaux composites-MCP retenus ont subi un test de vieillissement thermique accéléré ; autrement appelé « le cycle thermique ». C'est une technique de caractérisation thermique particulière qui consiste à vérifier expérimentalement si le matériau n'a pas perdu ses propriétés thermiques après un certain nombre de cycles imposés. Cela correspond dans

la réalité à la période de temps durant lequel le matériau subira naturellement la fusion/solidification à l'intérieur de l'enveloppe pendant son exploitation.

3.2 Présentation des outils et des techniques de caractérisation

Cette section détaille les différents outils de caractérisation utilisés dans le présent travail de thèse ainsi que leurs principes de fonctionnement. Ceux-ci sont détaillés suivant la catégorie de caractérisation à laquelle ils appartiennent. Par conséquent, il est important de donner un aperçu des différents types de caractérisations utilisées, à savoir : les caractérisations thermiques par (DSC, TGA, Hot-Disk, CT-mètre, vieillissement thermique) ; les caractérisations physico-chimiques par (FT-IR, SEM, XRD, Granulométrie laser...etc.) et enfin une caractérisation mécanique pour tester la résistance à la compression.

3.2.1 La caractérisation thermique

Le stockage de la chaleur par MCPs est aujourd'hui reconnu comme l'une des techniques les plus prometteuses pour améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité des bâtiments. Ceci se confirme avec les innombrables recherches laborieuses effectuées durant ces dernières décennies dans le domaine du développement des nouveaux matériaux à forte chaleur latente de changement de phase destinés à des applications pratiques dans les enveloppes de bâtiments^{35, 225, 226}.

Les matériaux composites-MCP appliqués dans les enveloppes des bâtiments sont très souvent des matériaux très légers²²⁷. Ils ont la capacité de contrôler les transferts des charges thermiques extérieures vers les ambiances intérieures grâce à leur capacité de stockage et de déstockage de la chaleur à température constante. C'est donc l'un des principaux avantages de l'utilisation des MCPs dans le domaine du bâtiment.

La capacité de stockage et de déstockage de la chaleur dans les matériaux du bâtiment intégrant des MCPs diffère d'un matériau à un autre (matrice ou MCP) en fonction de sa masse (m), sa chaleur spécifique (C_p), de l'enthalpie (h) et de l'intervalle des températures de fonctionnement du MCP

utilisé (Point de fusion). La quantité de chaleur stockée dans un composite-MCP peut-être calculée mathématiquement par la formule suivante :

$$\varphi = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot Cp \cdot dT + m \cdot f_m \cdot \Delta h \dots\dots\dots(3)$$

φ : Le flux de chaleur.

m : La masse.

Cp : La chaleur spécifique.

f_m : La fraction massique du MCP intégré dans le matériau de construction.

Δh : L'enthalpie.

Il n'est souvent pas simple d'avoir toutes les données pour calculer les propriétés thermiques des matériaux composites-MCPs. C'est pour cela que plusieurs instruments de mesure très précis et rapides ont été mis au point pour nous permettre d'obtenir les caractéristiques thermiques des matériaux étudiés. Tous les outils que nous présenterons ci-dessous et pour lesquels nous précisons le principe de fonctionnement ont été utilisés dans le processus de caractérisation thermique des MCPs et des composites-MCPs développés dans le présents travail de thèse. La liste des outils et des méthodes n'est donc pas exhaustive.

3.2.1.1 La Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC)

La Calorimétrie Différentielle à Balayage autrement appelée « Differential Scanning Calorimetry » (DSC) à compensation de puissance à été utilisée pour identifier les caractéristiques thermiques des MCPs et des composites-MCP élaborés. Il est important de noter qu'il existe deux catégories de DSC : la DSC à compensation de puissance et la DSC à flux de chaleur. Nos échantillons ont été testés par le premier modèle de DSC; C'est un appareil très précis de mesure de flux de chaleur absorbé par les matériaux (phénomène endothermique) et du flux dégagé (phénomène exothermique).

Le calorimètre METTLER TOLEDO DSC STAR[®] SYSTÈME que nous avons utilisé (Fig.3.1) appartient au Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain (LIED) de l'université Paris 7. Celui-ci nous a permis de calculer la

chaleur latente des matériaux en fusion (L_f) et en solidification (L_s) ainsi que leurs points de fusion respectifs (T_f), leurs points de solidification respectifs (T_s) et leurs chaleurs spécifiques (C_p).



Figure 3. 1 Image du calorimètre DSC 1 STARe System de METTLER TOLEDO utilisé.

Le principe de ce type de DSC est simple. L'appareil est équipé de deux fours indépendants l'un de l'autre dans lesquels viennent se placer des creusets en aluminium. Le creuset désigné par la lettre S (sample ou échantillon) est destiné à contenir une quantité de l'ordre de quelques milligrammes du matériau à tester. Le creuset désigné par la lettre R (Référence) est destiné à contenir un échantillon étalon qui est généralement le vide (Fig.3.2).



Figure 3. 2 Image des creusets "S" et "R" placés dans les fours DSC.

3.2.1.2 L'Analyse Thermogravimétrique (ATG)

L'Analyse Thermo Gravimétrique (ATG) autrement appelée Thermo Gravimetric Analysis (TGA) est une technique de caractérisation de la dégradation thermique d'un matériau sollicité par un régime de température sous une atmosphère contrôlée (sous air, azote, vapeur ou sous vide éventuellement). L'objectif est d'identifier la stabilité thermique du matériau sur une plage de température fixée par son application future.

On utilise généralement une quantité infiniment petite du matériau à tester (de l'ordre de 10 à 20 mg environ). Celle-ci est d'abord pesée à la balance de précision puis placée dans des creusets en aluminium généralement. Il est important de noter qu'il existe d'autres creusets fabriqués avec d'autres matières telles le graphène, l'alumine...etc. Ce sont également les mêmes creusets utilisés en DSC.

L'ATG nous permet de connaître la température du début de dégradation thermique du matériau testé exprimée par une perte de masse de celui-ci.

Les mesures effectuées sur les nouveaux matériaux composites-MCPs élaborés dans le cadre de ce travail de thèse nous ont permis de vérifier leur stabilité thermique sur une plage de température allant des températures ambiantes (20 °C) jusqu'à 600 °C. Nous avons utilisé l'appareil PERKIN ELMER Simultaneous Thermal Analyser STA 6000 appartenant au Laboratoire Revêtement, Matériau et Environnement de l'université M'hammed Bougara de Boumerdes.

3.2.1.3 Mesure de la conductivité thermique

3.2.1.3.1 Mesure de la conductivité thermique par CT-mètre

La mesure de la conductivité thermique des nouveaux matériaux de construction élaborés est un paramètre important pour la caractérisation de leur aptitude à conduire le flux de chaleur afin de provoquer le changement de phase et donc le stockage de la chaleur. Les premières mesures de la conductivité thermique effectuées au début de ce travail de thèse sur les

premiers composites-MCPs élaborés ont été réalisées par le CT-mètre H112N qui mesure exclusivement la conductivité thermique des matériaux de construction. C'est un appareil qui appartient au laboratoire LMSE de l'université de Tizi-Ouzou (Fig.3.3).

Le principe est de placer une plaque de dimension (30 cm x 30 cm) (Fig.3.4) de surface entre les deux plateaux du CT-mètre dont l'un est froid et l'autre est chaud dans lequel on envoie une puissance de chauffe. Une sonde destinée à recueillir la température dans le matériau testé est placée à la surface de celui-ci.



Figure 3. 3 Image du CT-mètre H112N pour la mesure de la conductivité thermique des matériaux de construction.

La conductivité thermique du matériau est obtenue avec l'équation mathématique (4) fournie par le constructeur de l'appareil. Le calcul s'effectue en se basant sur les données affichées par le CT-mètre à la fin de la mesure :

$$\lambda = \frac{I_s \left[(K1 + (K2 * T)) + \left((k3 + (k4 * T)) * HFM \right) + \left((k5 + (k6 * T)) HFM^2 \right) \right]}{dT} \dots \dots (4)$$

- I_s = c'est l'épaisseur du matériau (m).
- $T = \frac{T1+T2}{2}$
- $dT = T_1 - T_2$
- HFM = lecture du débitmètre de chaleur (mV).
- $K1 = 88.1389$. (K_i : constantes de calibration)
- $K2 = -2.7829$.
- $K3 = -21.3064$

- $K_4 = 0.8037$.
- $K_5 = 0.7954$.
- $K_6 = -0.0189$.

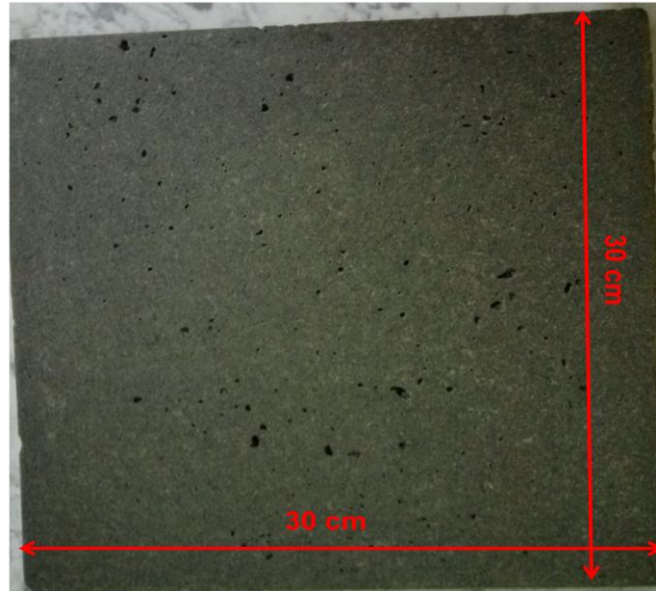


Figure 3. 4 Image de l'éprouvette composite-MCP élaborée placée dans le CT-mètre.

3.2.1.3.2 Mesure de la conductivité thermique par Hot-Disk

Les mesures au CT-mètre s'effectuent sur des éprouvettes de grandes tailles. Cela engendre une consommation abusive de matière première pour la fabrication de ces éprouvettes. Les résultats obtenus à partir de ces échantillons ne sont toujours pas très précis. Par conséquent, nous avons opté pour une autre méthode de mesure de la conductivité thermique.

La méthode des sources planes transitoires a été réalisée par le Hot-Disk TPS 500 de Perkin Elmer (Fig.3.5) du CERTES (Université Paris Est Créteil). Les mesures ont été effectuées à température ambiante à l'intérieur d'une pièce non chauffée en saison hivernale. Cette méthode reste très fiable pour des mesures de conductivité thermique des matériaux isotropes et peu conducteurs tels que les nouveaux matériaux composites-MCPs élaborés dans le cadre de ce travail de thèse^{228, 229}.

Les mesures de la conductivité thermique par Hot-disk s'effectuent sur deux éprouvettes identiques de petite taille au milieu desquelles est placée en sandwich une sonde en Kapton (Fig.3.6).

Le choix de la sonde se fait en fonction de la taille des éprouvettes, de leurs textures (Poudre, solide, pommade...etc.) et de leurs conductivités thermiques approximatives.

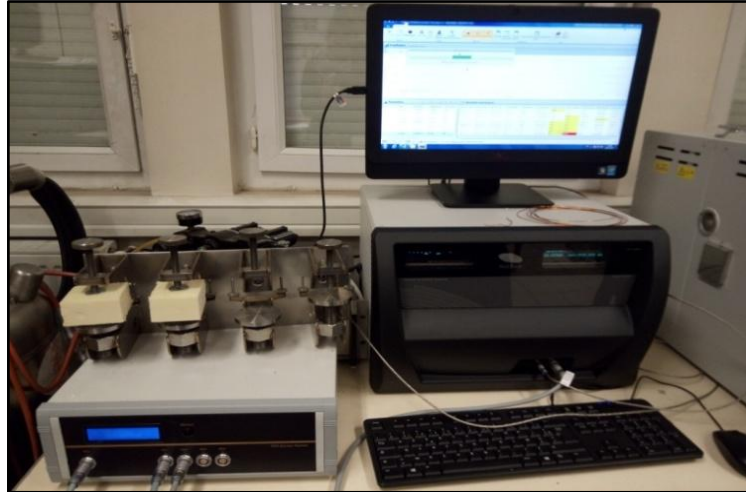


Figure 3. 5 Image de la Hot-Disk TPS 500 (PERKIN ELMER).

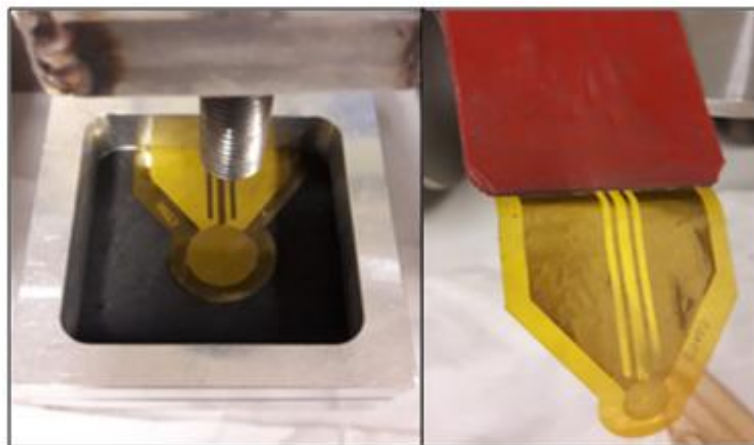


Figure 3. 6 Image des sondes en Kapton utilisées pour la mesure de la conductivité thermique.

3.2.1.4 Étude du vieillissement thermique accéléré du nouveaux matériau composite-MCP par cyclage thermique

Le cycle thermique est une technique de vérification de la durabilité du matériau composite-MCP face aux variations de température qui le sollicitent de manière cyclique en fusion et en solidification au cours de son exploitation²³⁰.

Des échantillons du nouveau matériau composite-MCP ont été sollicités thermiquement par des cycles répétitifs de chauffage/ refroidissement afin de

provoquer des cycles accélérés de fusion/solidification pendant plusieurs jours. L'opération du vieillissement thermique accéléré a été réalisée grâce à un dispositif construit par les ingénieurs chercheurs du laboratoire Matière et Systèmes Complexes de l'université Paris Diderot. Il s'agit de la « valise calorimétrique » illustrée en photo (Fig.3.7) Celle-ci est piloté à distance par ordinateur, elle est équipée d'un programme adapté qui permet de recueillir les données des expériences effectuées sous format « .CSV ».



Figure 3. 7 Image du dispositif de vieillissement accéléré.

La valise est équipée d'un module à effet Peltier qui permet de produire des montées et des descentes de température en un espace de temps relativement court grâce à un effet thermoélectrique. Un échantillon cylindrique du matériau composite-MCP de diamètre ($\varnothing = 28$ mm) et d'une épaisseur ($e = 12$ mm) est placé de manière à adhérer convenablement à l'enceinte de la valise à l'intérieur de laquelle se produisent les montées et descentes cycliques de température sur un intervalle de température programmé par l'utilisateur en fonction des caractéristiques thermiques de son composite-MCP préalablement identifiées par DSC.

Une pâte thermique conductrice est appliquée sur toutes les parois de l'enceinte cylindrique (Fig.3.8 a) afin d'assurer un contact parfait entre l'enceinte dans laquelle est insérée l'échantillon composite-MCP et le matériau

composite-MCP sollicité. Une sonde permettant de suivre l'évolution des températures à l'intérieur du matériau sollicité pendant le cyclage thermique est fixée au cœur de celui-ci (Fig.3.8 b). Un isolant est placé au dessus de l'enceinte de cyclage pour éviter toute influence de la température du laboratoire sur l'expérience via la partie supérieure (Fig.3.9).

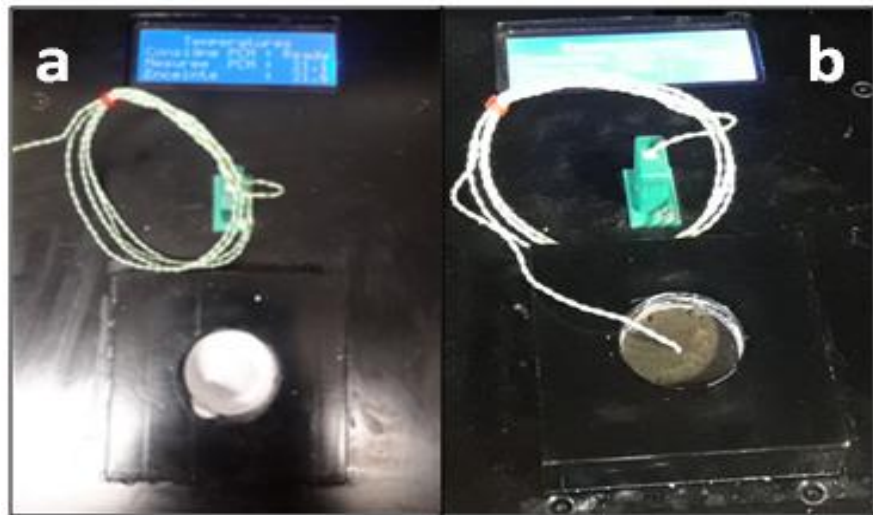


Figure 3. 8 Images de l'enceinte de cyclage thermique : a) enceinte couverte de pâte thermique, b) l'enceinte avec le matériau composite à changement de phase.

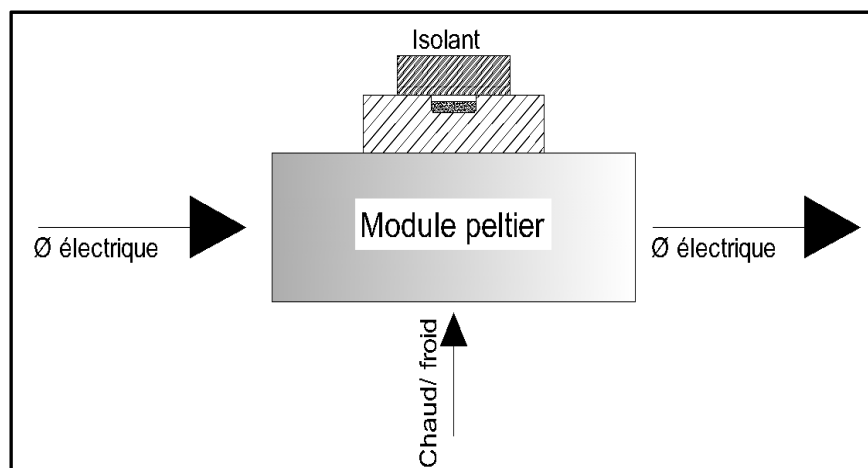


Figure 3. 9 Schéma du dispositif de cyclage thermique

3.2.2 La caractérisation physico-chimique

La caractérisation physico-chimique a touché les matières premières utilisées dans le processus d'élaboration des nouveaux matériaux de

construction afin de déterminer l'influence de chacun d'eux sur le produit final ; ainsi que les nouveaux matériaux composites-MCP élaborés.

La caractérisation des nouveaux composites-MCPs permet d'identifier les propriétés qui nous permettront par la suite de déterminer les applications pratiques adéquates dans l'enveloppe du bâtiment.

3.2.2.1 La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FT-IR)

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier autrement appelée **F**ourier **T**ransformed **I**nfrared **S**pectroscopy est une technique de caractérisation chimique qui permet d'identifier les composés chimiques présents dans l'échantillon analysé ainsi que la nature des liaisons chimiques établies entre ces composés.

La caractérisation des matériaux par FT-IR s'effectue sur des échantillons de l'ordre de quelques milligrammes. L'échantillon est placé à l'intérieur du spectrophotomètre puis est exposé à un faisceau de lumière infrarouge. Les molécules chimiques présentes dans l'échantillon absorbent systématiquement le rayonnement lorsque la longueur d'onde de ce faisceau s'approche de son énergie de vibration.

L'échantillon peut être balayé par plusieurs scans définis par l'utilisateur. Après interaction entre le rayonnement IR et les molécules de l'échantillon, l'énergie du rayonnement diminue conduisant à l'apparition de bandes d'absorption à ces fréquences précises. Par la suite, le signal collecté est traité mathématiquement par un logiciel adapté au spectrophotomètre utilisé afin de le transformer en spectre IR.

Dans le présent travail de thèse, la plus grande partie des échantillons testés s'est effectuée par un spectrophotomètre de type IRAffinity-1 de SHIMADZU (Fig.3.10) qui appartient au laboratoire de recherche en chimie de l'université de Bejaia.



Figure 3. 10 Image du spectrophotomètre IRAffinity-1 (SHIMADZU)

Dans ce type d'appareil, l'échantillon est placé dans le spectrophotomètre sous forme de cellule (pastille) en KBr (Fig.3.11 b). Ces cellules tests sont donc préalablement préparées au laboratoire en mélangeant à l'intérieur d'un mortier (Fig.3.11 a) environ 10 % de l'échantillon à caractériser transformé en poudres avec 80 % de KBr (Bromure de potassium) sur un total en poids (échantillon+ KBr) d'environ 10 mg.

Le KBr est un matériau support du matériau test dont la bande caractéristique n'apparaît pas sur le spectre IR résultant. Le mélange (KBr/échantillon) est placé à l'intérieur d'un moule équipé de deux disques à surfaces lisses avant de le soumettre à une compression sous vide de 80 kN à l'aide d'une presse à compression sous vide de SHIMADZU. C'est un dispositif conçu pour accompagner le spectrophotomètre (Fig.3.12) et qui est destiné à la préparation des cellules tests.

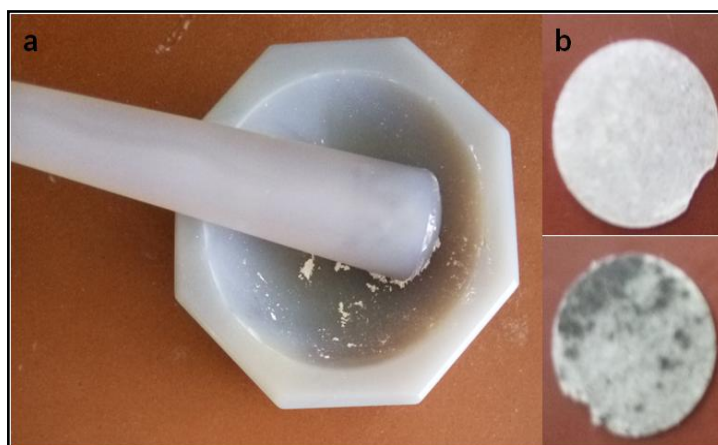


Figure 3. 11 : a) image des poudres dans le mortier ; b) image des pastilles en KBr



Figure 3. 12 Image du moule sous la presse à vide de SHIMADHU

Toutes les pastilles KBr préparées à partir de nos composites-MCPs ainsi qu'à partir de leurs composés ont été balayées par 43 scans en transmission sur une plage de fréquence allant de 400 cm^{-1} à 4000 cm^{-1} avec une résolution de 4 cm^{-1} . Les spectres infrarouge résultants ont été interprétés et retracés avec le logiciel Irsolution.

Quelques unes de nos pastilles KBr ont été analysées avec le spectrophotomètre JASCO FT/IR-4100 appartenant au laboratoire de chimie de l'université de Blida. Son principe de fonctionnement est exactement le même que celui décrit précédemment et le protocole des expérimentations adopté est aussi le même, par contre les spectres IR résultants ont été interprétés et retracés avec le logiciel Essential FTIR.

3.2.2.2 La Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

La Microscopie Électronique à Balayage (MEB) aussi appelée Scanning Electron Microscopy (SEM) est une technique de caractérisation physique qui permet d'observer avec haute précision la microstructure des matériaux ainsi que leur morphologie. Son principe de fonctionnement repose sur un faisceau d'électrons qui vient frapper la surface de l'échantillon observé qui à son tour réémet des particules qui sont captées grâce à des détecteurs intégrés dans le MEB. Ces particules sont réinterprétées afin de construire des images de la

structure de l'échantillon observé avec des grossissements que nous aurons choisis.

Dans le présent travail de thèse, nous avons utilisé la technique du MEB pour observer la microstructure des matrices composites préparées pour le conditionnement des MCPs ainsi que la morphologie du matériau composite-MCP élaboré. La caractérisation par MEB nous a permis de vérifier que le MCP a été confiné avec succès à l'intérieur de la microstructure de sa matrice.

La plus grande partie des échantillons composites élaborés dans le cadre de ce travail de thèse ont été observés au microscope modèle FEI QUANTA 650 (Fig.3.13) qui appartient au laboratoire de recherche fondamentale en physique appliquée de l'université de Blida. Les échantillons ont été observés sous différents grossissement (x250, x500, x1000) avec une tension d'accélération de 10 KV.

Les premières analyses MEB effectuées sur les premiers matériaux composites-MCP élaborés ont été réalisées au MEB environnemental PHILLIPS ESEM XL 30 appartenant au Laboratoire de Recherche en Physique et Chimie des Matériaux de l'université de Tizi-Ouzou.



Figure 3. 13 Microscope Électronique à Balayage FEI QUANTA 650

3.2.2.3 La Diffraction des Rayons X (DRX)

La Diffraction des Rayon X (DRX) autrement appelée X-Ray Diffraction (XRD) est une technique de caractérisation dont les domaines d'utilisation sont très variés. Dans notre cas, elle est utilisée pour valider un nouveau matériau de construction. La DRX nous permet de connaître la structure cristallographique des matériaux étudiés ainsi que leur nature. C'est une technique de caractérisation qui ne s'applique que sur les milieux cristallins tels (les roches, les minéraux, les poudres minérales telles les argiles...etc.).

Son principe repose sur l'émission d'un faisceau de rayons X qui est renvoyé au contact d'un cristal rencontré dans le matériau. La direction du faisceau est déterminée par le réseau cristallin de la matière ainsi que par la longueur d'onde des rayons X. La mesure de l'intensité et des angles des rayons diffractés nous permet d'obtenir des informations structurales concernant le matériau étudié notamment : la position moyenne des atomes du cristal ainsi que leur nature et leurs liaisons chimiques...etc.

Les échantillons analysés dans le présent travail ont préalablement été réduits en poudre avant de les analyser au diffractomètre de type D2-PHASER BRUKER (Fig.3.14) de l'université de Blida.



Figure 3. 14 Image du diffractomètre D2 PHASER BRUKER.

Toutes les analyses ont été effectuées sur une anticathode en cuivre (Cu-K α) ($\lambda = 1.541874 \text{ \AA}$). L'acquisition des mesures est réalisée entre $10^\circ < 2\theta < 60^\circ$.

3.2.2.4 La granulométrie laser

La granulométrie laser désignée aussi par les termes « Particle size distribution » est une technique de caractérisation qui permet de mesurer la taille des particules des poudres.

Cette technique a été utilisée dans notre travail de thèse afin d'identifier la taille des particules des poudres exploitées dans l'élaboration des nouveaux matériaux composites-MCPs, à savoir : la poudre d'argile naturelle, la poudre de graphite recyclé et la poudre de plâtre testée tout au début de ce travail.

La granulométrie des particules de nos poudres a été mesurée avec la granulométrie laser MALVERN MASTERSIZER 2000 (Fig.3.15) qui appartient à l'Unité de Recherche sur les Matériaux (UMR) de l'université de Boumerdes.



Figure 3. 15 Image de la granulométrie Malvern Mastersizer 2000

Le principe de fonctionnement de cet appareil est simple. Il suffit de placer quelques grammes de l'échantillon (poudre) dans le passeur d'échantillons (Fig.3. 16). Cette poudre passe à l'intérieur de l'appareil grâce à une pompe et à un agitateur intégré qui permettent de faire traverser les particules par une lentille située dans l'appareil. La mesure s'effectue à l'aide de deux rayons Laser et des capteurs qui nous donnent la distribution volumique de la taille des particules en un temps de mesure très court de l'ordre de 40 à 60 secondes.



Figure 3. 16 Passeur d'échantillons de granulométrie laser

3.2.3 La caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique des nouveaux matériaux composites-MCP est une étape importante qui permet de confirmer ou d'infirmer la possibilité d'utiliser le nouveau matériau élaboré pour l'application envisagée dans l'enveloppe des bâtiments. Dans le présent travail nous avons vérifié le comportement des nouveaux matériaux élaborés à la compression simple du moment que celui-ci est destiné pour des applications dans les parois verticales. L'objectif de cette caractérisation est aussi de situer la résistance mécanique du nouveau matériau par rapport aux autres résultats des composites-MCP retrouvés dans la littérature. Il est important de noter que le matériau élaboré n'est pas destiné à des applications structurales.

3.2.3.1 Essais de compression simple

Des tests de compression simple ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques de dimensions (50 mm x 50 mm x 50 mm) (Fig.3.17) du nouveau matériau composite. Deux types d'éprouvettes ont été confectionnés : des éprouvettes de la matrice (du nouveau matériau composite sans le MCP), des éprouvettes composites-MCP (après intégration du matériau à changement de phase). Le but de cette opération est de connaître l'influence de l'intégration du MCP sur la résistance mécanique du nouveau matériau.

La confection des éprouvettes destinées à la caractérisation mécanique à été réalisée au laboratoire avec une pastilleuse en acier que nous avons construit à cet usage au sein du Hall de technologie de l'université de Tizi-Ouzou.



Figure 3. 17 Image des éprouvettes cubiques de caractérisation mécanique

La vérification du comportement du nouveau matériau à la compression est justifiée par le fait que celui-ci soit conçu plutôt pour des applications dans les parois verticales des bâtiments à l'intérieur desquelles il sera sollicité en compression.

Les écrasements ont été réalisés à la machine d'essais de compression de type IBERTEST (Fig.3.18) qui appartient au laboratoire de Génie Civil de l'université de Tizi-Ouzou. Cet appareil est piloté par un ordinateur, les résultats des essais sont obtenus directement via le logiciel qui accompagne l'appareil de mesure.



Figure 3. 18 Machine d'essais de compression IBERTEST.

Les écrasements destructifs ont été effectués sur les éprouvettes cubiques avec une vitesse de compression de 0.5 KN/ s (Fig.3.19). Les tests ont été répétés cinq fois sur le même échantillon pour validation des résultats. Cinq (05) éprouvettes identiques de la matrice, cinq (05) autres éprouvettes

identiques pour le composite-MCP. Les tests de caractérisation mécanique consomment énormément de matière première utilisée dans l'élaboration des éprouvettes.

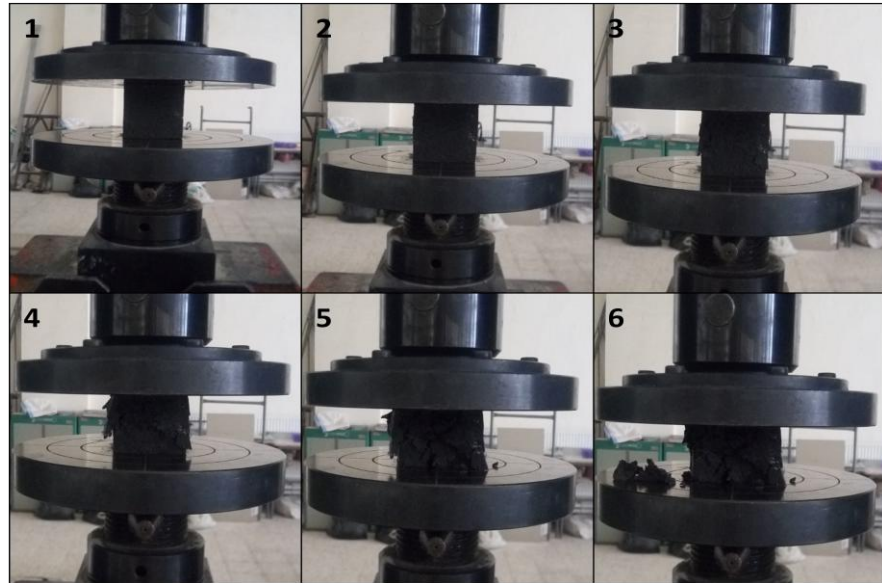


Figure 3. 19 Étapes de la compression destructive d'une éprouvette composite.

3.3 Identification des propriétés des composés utilisés dans le processus d'élaboration des nouveaux matériaux.

L'élaboration des nouveaux matériaux de construction composite-MCP passe avant tout par la sélection des composés susceptibles de satisfaire aux exigences des applications visées en terme : d'amélioration de la performance thermique des enveloppes des bâtiments, du respect de l'environnement, du développement d'un matériau bon marché qui obéit à un processus de fabrication simple et non coûteux. La composition générale du nouveau matériau composite peut-être représentée par l'équation suivante :

$$\text{Nouveau matériau composite-MCP} = \text{Matrice} + \text{MCP} + \text{Adjuvants}$$

La matrice est destinée à contenir le MCP dans de bonnes conditions de stabilité thermique, physique et chimique. Elle est très souvent préparée à partir des matériaux de construction traditionnelle qui sont utilisés habituellement dans les enveloppes des bâtiments.

Les MCPs sont sélectionnés en fonction de leurs propriétés de changement de phase qui pourraient correspondre aux applications futures visées.

Les adjuvants sont des matières minérales ou organiques ajoutées en petite quantité pour améliorer certaines propriétés du matériau à savoir : sa conductivité thermique, sa capacité d'absorption et de rétention de MPC dans sa phase liquide, sa stabilité mécanique...etc.

3.3.1 Propriétés des composés des matrices

3.3.1.1 La poudre d'argile naturelle

Les caractéristiques physico-chimiques de l'argile naturelle utilisée dans l'élaboration des matrices à savoir : sa surface spécifique, sa capacité d'adsorption et de rétention du MCP dans sa phase liquide, sa bonne inertie chimique [rhô]...etc. justifie son exploitation en tant que composé de base dans l'élaboration des matrices de conditionnement des MCP ^{231,232}.

La poudre d'argile naturelle utilisée a été caractérisée par granulométrie laser afin de connaître la taille et la répartition des grains qui constituent cette fine poudre et par FT-IR dans le but d'identifier ses principaux composants.

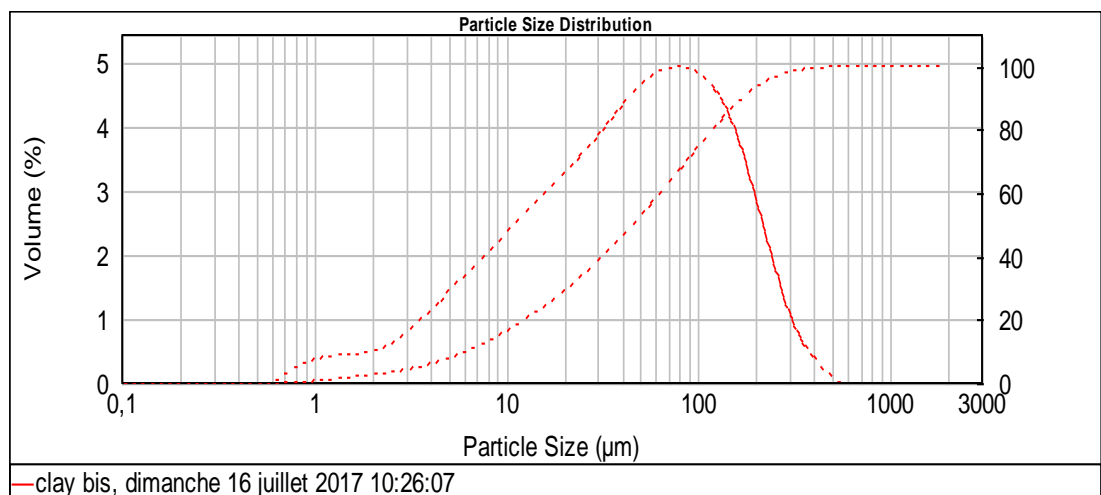


Figure 3. 20 : Courbe de la distribution granulométrique de la poudre d'argile naturelle.

La figure 3.20 montre la distribution de la taille des particules de la poudre d'argile naturelle utilisée. Les propriétés liées à la taille et la distribution des grains sont listées dans le tableau 3.2.

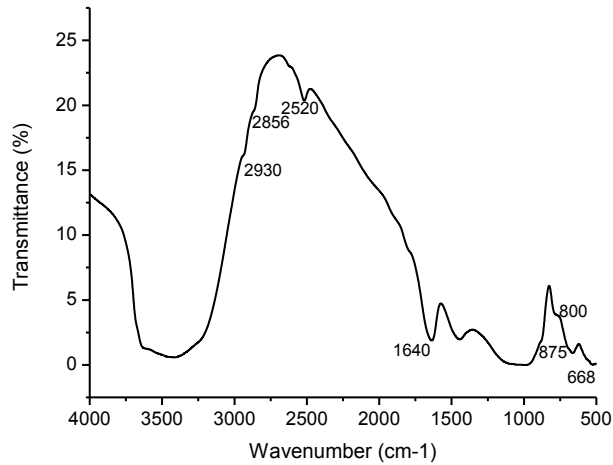


Figure 3. 21 Spectre IR de la poudre d'argile naturelle utilisée dans la fabrication des composites-MCPs

La figure 3.21 montre le Spectre IR obtenu par caractérisation chimique par FT-IR de la poudre d'argile utilisée. Le but de cette caractérisation est d'identifier les composés chimiques présents dans cette matière. Le tableau 3.1 donne un aperçu des composés chimiques que représente chaque bande FT-IR affichée sur le spectre.

Tableau 3. 1 : Affectation chimique des bandes IR enregistrées.

La bande (cm ⁻¹)	Transmittance (%)	Affectation	Réf
668	1	Si-O	12
800	4	Quartz	233
875	2	Illite	233
1640	2	H-O-H	234 235
2520	20	Espèces carbonatées	236
2856	16	Vibration d'élongation C-H	237
2930	16	Vibration d'élongation C-H	237

3.3.1.2 Le plâtre

La caractérisation de la poudre de plâtre par FT-IR et granulométrie laser a été réalisée afin de connaître la composition chimique de cette

substance ainsi que la taille et la distribution de ses grains. En dépit de la faible résistance mécanique des composites-MCP élaborés à base de ce matériau, les analyses thermiques et physico-chimiques préalablement effectuées restent satisfaisantes.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont listés dans le tableau 3.2 tandis que la figure 3.22 montre le spectre IR de la poudre de plâtre utilisée dans le processus d'élaboration de ces nouveaux composites-MCPs.

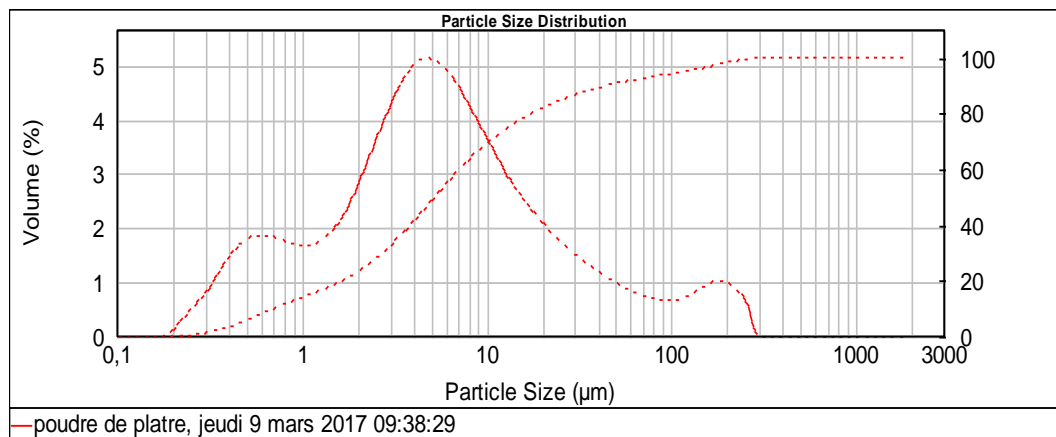


Figure 3. 22 Courbe de la distribution granulométrique de la poudre de plâtre

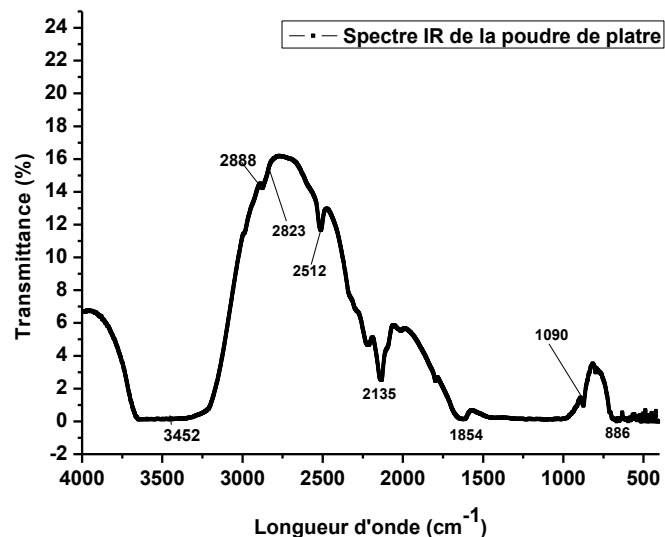


Figure 3. 23 Spectre IR de la poudre de plâtre utilisée dans les expériences.

À partir de la figure 3.23, les piques enregistrés à 888 cm^{-1} , 1854 cm^{-1} et 2135 cm^{-1} révèlent la présence de gypse tandis que les bandes caractérisant la présence de la silice sont signalées à : 1090 cm^{-1} , 2512 cm^{-1} , 2823 cm^{-1} et 888

cm^{-1} . La bande des molécules d'eau O-H apparait vers 3452 cm^{-1} , elle est liée à la présence d'humidité dans l'échantillon analysé. Les résultats sont confirmés par P. Baraldi et H.H.Marey Mahmoud^{238, 239}.

3.3.1.3 Le graphite

Les résultats de la caractérisation par Hot-disk du graphite recyclé utilisé dans ce projet ont révélé que sa conductivité thermique est nettement inférieure par rapport aux autres types de graphite². Néanmoins celui-ci reste un adjuvant efficace pour amener la conductivité thermique de nos composites-MCPs aux valeurs attendues.



Figure 3. 24 Image du graphite ajouté dans le nouveau composite-MCP.

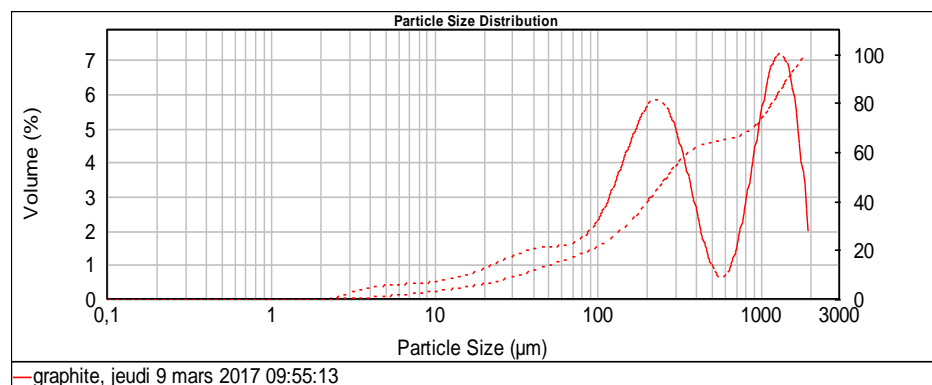


Figure 3. 25 Courbe de la distribution granulométrique du graphite recyclé

² « Supra » : page 46

La figure 3.25 montre la courbe de granulométrie laser de la poudre de graphite recyclé utilisée dans cette étude. Les résultats des propriétés de la taille des grains et de leur distribution sont listés dans le tableau 3.2. La figure 3.26 montre le spectre IR de la poudre de graphite recyclé.

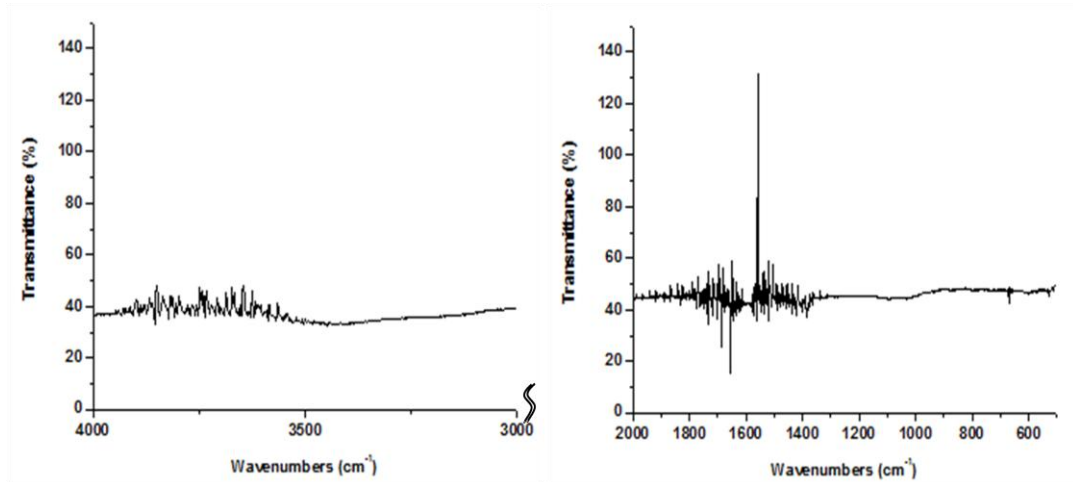


Figure 3. 26 Spectre IR de la poudre de graphite recyclé.

Les résultats de la FT-IR de la poudre de graphite recyclé montrent que celui-ci affiche les pics suivants : 1100 cm^{-1} et à 1670 cm^{-1} , bandes de vibrations C-OH. Le pic observé à 1550 cm^{-1} correspond aux vibrations d'élongation C=C tandis que la bande 1700 cm^{-1} correspond au mode d'étirement des -C=O .^{240, 241}. D'autres pics dus à la présence de résidus apparaissent sur le spectre IR du graphite recyclé.

Tableau 3. 2 : Propriétés de la distribution granulométrique des poudres utilisées comme matrice.

Taille des particules (μm) / échantillons	Poudre d'argile naturelle	Graphite	Poudre de plâtre
d (0.1) μm	6.164	34.338	0.707
d (0.5) μm	45.675	264.504	5.186
d (0.9) μm	170.949	1446.513	43.699
Specific Surface area (m^2/g)	0.426	0.0821	2.9

Annotation : d-correspond aux diamètres des sphères qui répartissent la masse des échantillons en pourcentage donnés. **D (0.1)**, **d (0.5)** and **d (0.9)** représente la taille des particules qui correspondent à la distribution cumulative de l'échantillon à 10 %, 50%, 90% respectivement.

3.3.1.4 Les fibres de cellulose

Les fibres de cellulose (Fig.3.27) sont des adjuvants d'origine organique ajoutées dans la matrice afin d'améliorer sa capacité d'absorption et de rétention de l'MCP dans sa phase liquide. Ce sont des fibres courtes dont la longueur est de l'ordre du micron synthétisées au laboratoire par recyclage de du carton. La figure 3.28 montre le spectre IR des fibres de cellulose.



Figure 3. 27 Image des fibres de cellulose préparées au laboratoire.

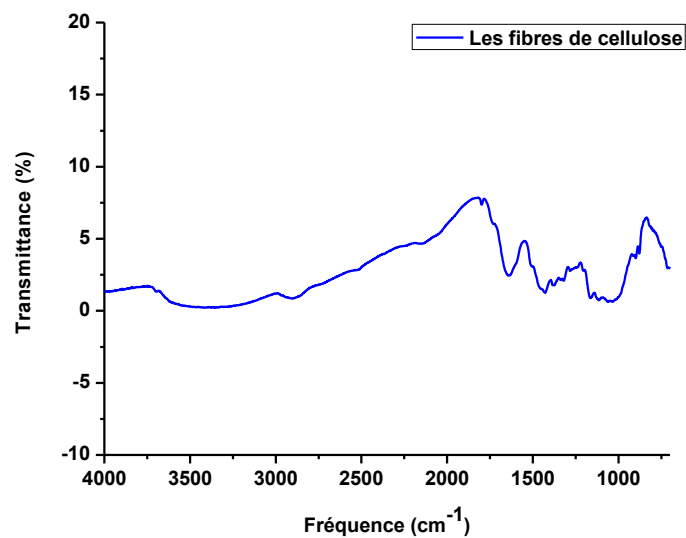


Figure 3. 28 Spectre IR des fibres de cellulose utilisée

Le spectre IR des fibres de cellulose ($C_6H_{10}O_5$)²⁴² montre la présence de bande caractéristique du groupe $-CH_2$ à 1432 cm^{-1} . Les pics enregistrés à 1641 cm^{-1} correspondent aux vibrations de déformation des liaisons C-O, tandis que les autres pics enregistrés 1100 cm^{-1} et 1500 cm^{-1} sont liés à plusieurs déformations d'élongation les liaisons C-H²⁴³.

3.3.2 Caractérisation des MCPs retenus pour les applications visées

Si la fabrication de la matrice est passée par un processus de caractérisation des composés utilisés dans sa fabrication ; la sélection des MCPs appropriés aux applications passives dans les enveloppes des bâtiments est aussi passée par un processus de caractérisation de ceux-ci.

Il est important de noter que tous les MCPs présélectionnés sont des produits issus de la récupération des secteurs sanitaires et agro-alimentaires. Leur utilisation primaire avant récupération justifie leur non toxicité. Le reste des propriétés a été vérifié après un long processus de caractérisation.

3.3.2.1 La paraffine (La vaseline blanche)

La vaseline blanche est une substance hydrophobe d'origine organique constituée de cire microcristalline et de paraffine liquide. C'est un distilla de pétrole constitué de plusieurs Alcanes (C_nH_{2n+2}). Cette matière de couleur blanchâtre et de texture pâteuse à température ambiante (Fig.3.29) est utilisée dans le domaine médical, les autres catégories de vaselines généralement moins raffinées sont utilisées en industrie mais elles sont connues pour être cancérigènes. D'où l'intérêt que nous portons à la récupération des vaselines blanches sanitaires ayant dépassé la durée autorisée d'exploitation dans le domaine médicale.



Figure 3. 29 Image de la vaseline blanche utilisée

Les premières caractéristiques de changement de phase ont été identifiées en utilisant des thermocouples et un "data logger". Les mesures ont été lancées en journée estivale du 8 juillet 2016 à 11h : 30 min.

La figure 3.30 montre l'évolution des températures enregistrées par un thermocouple de type K à l'intérieur d'une masse de vaseline blanche exposée à un rayonnement solaire d'une journée estivale du mois de juillet à Tizi-Ouzou (Algérie).

La courbe enregistrée montre trois paliers d'évolution de la température en fonction du temps (a, b, c). Les paliers (a) et (c) correspondent au stockage sensible de la chaleur tandis que le palier (b) correspond au stockage latent de la chaleur.

La vaseline parvient à stocker de la chaleur tout en maintenant sa température stabilisée autour de 32.5 °C qui peut correspondre en effet à son point de fusion. Mais la DSC reste le moyen le plus efficace pour analyser le changement de phase mais aussi pour connaître la composition de cette substance en alcanes. Les mélanges d'alcanes présentent souvent plusieurs transitions de phase différentes.

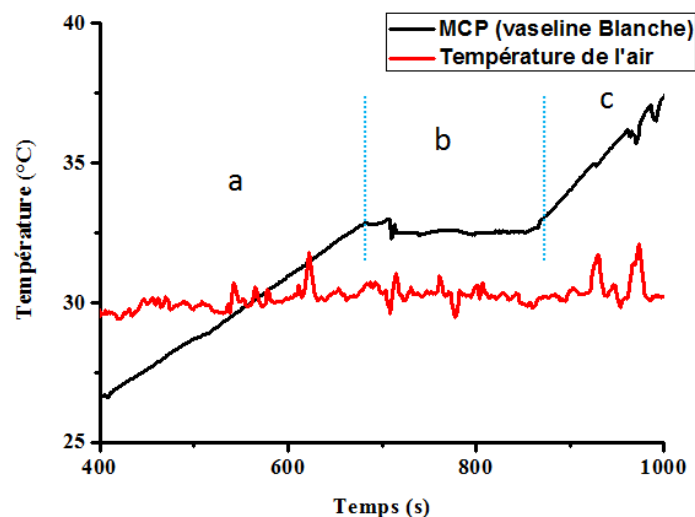


Figure 3. 30 Courbe de l'évolution de la température enregistrée par un thermocouple de type K et un data logger.

En plus des premières mesures au thermocouple « K », la vaseline a été caractérisées pas DSC et par FT-IR. Les résultats sont présentés dans les

sections « caractérisation des composites-MCPs » élaborés à partir de cette substance.

3.3.2.2 La graisse végétale de Coprah hydrogénée (Acide gras)

Des échantillons de graisse végétale de coprah hydrogénée récupérée du secteur agroalimentaire ont été testés dans le but d'analyser leur applicabilité dans le bâtiment en tant que MCP pour le stockage latent de l'énergie thermique à basse température. Cette substance (Fig.3.31) avait attiré notre attention en raison de sa composition en acides gras. Les acides gras sont des matières commercialisées en tant que MCP à des prix exorbitants, tandis que la graisse végétale de coprah est une matière récupérée à bas coût.

Le changement de phase de cette substance a d'abord été testé avec un thermocouple de type « k » afin d'identifier approximativement si son point de fusion se situe dans les plages de températures souhaitées. La figure 3.32 affiche le palier horizontal (b') correspondant à la fusion de l'MCP. Celui-ci se situe vers 23 °C, ce qui présente une température idéale pour des applications passives de stockage latent de l'énergie dans le domaine du bâtiment. Les paliers (a') et (c') correspondent au stockage sensible. Une analyse par DSC a été réalisée pour vérifier ces premiers résultats.



Figure 3. 31 Image de la graisse végétale de coprah

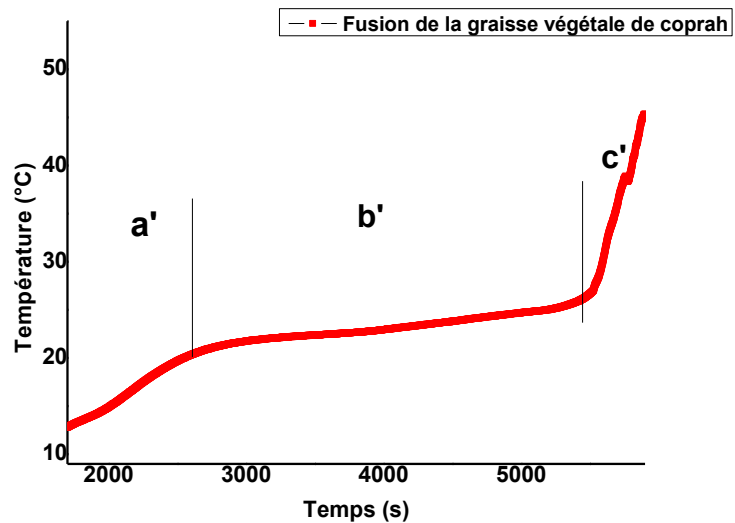


Figure 3. 32 Évolution des températures enregistrées par un thermocouple de type K à l'intérieur d'une masse de graisse végétale de coprah

3.3.2.3 La graisse végétale de Palmiste (Acide gras)

La graisse végétale de palmiste (GVP) est une matière grasse solide à température ambiante (20°C) différente de la graisse végétale de coprah (coco) mais récupérée du même secteur agroalimentaire. C'est un déchet issu des procédés de raffinement des huiles végétales liquides à (20°C) ; sa texture à température ambiante ainsi que sa composition riche en acide gras nous ont amenés à explorer la possibilité de l'intégrer dans des matériaux de construction traditionnelles afin d'expérimenter de nouveaux composites-MCP pour le stockage passif de la chaleur dans les bâtiments.

La figure 3.33 montre l'évolution des températures enregistrées à l'intérieur d'un échantillon de la GVP à l'aide d'un thermocouple de type « K » et d'un data logger. Les résultats montrent que la température de cette matière se stabilise plus au moins à 26°C (palier b''), ce qui peut correspondre au point de fusion de celle-ci. Les deux autres paliers (a'' et c'') observés sur la figure correspondent aux paliers de stockage sensible. Des analyses par DSC ont été réalisées pour une caractérisation thermique approfondie.

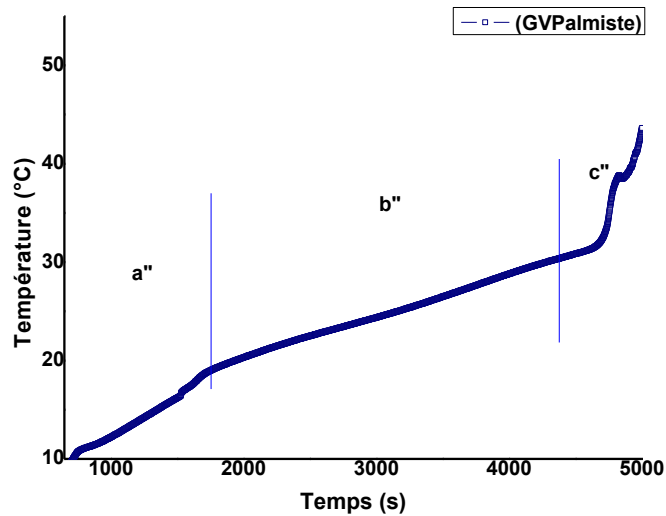


Figure 3. 33 Évolution des températures d'un échantillon de GVP en fonction du temps.

3.4 Identification des propriétés des nouveaux composites-MCPs élaborés

3.4.1 Caractérisation des composites (PP/FC/Gr/Paraffine)

Les premiers composites-MCPs préparés dans les premières phases du présent travail de thèse ont été élaborés à partir d'une matrice plâtrière dans laquelle sont intégrées des fibres de cellulose obtenues par recyclage du carton et du graphite pour améliorer la conductivité thermique. Ces matrices plâtrière ont été imprégnées d'une paraffine (MCP organique) récupérée à bas coût du secteur sanitaire (la vaseline blanche).

Les propriétés de ces nouveaux matériaux ont été explorées par différentes caractérisations : thermiques et physico-chimiques.

3.4.1.1 Caractéristiques de la microstructure des nouveaux composites-MCP1 (MEB)

Le meilleur candidat composite (PP/FC/Gr/Paraffine) retenu après les premiers tests (fuite de l'MCP à l'état liquide, perméabilité à l'eau...) réalisés au cours du processus d'élaboration a été observé par Microscopie Électronique à Balayage (MEB) afin d'identifier sa configuration et de vérifier si la distribution du MCP s'est faite de manière uniforme à l'intérieur de sa matrice.

La figure 3.34 montre des images MEB du nouveau composite (PP/FC/Gr) avant et après l'intégration de la paraffine. La matrice ainsi que le composite-MCP résultant ont été observés avec les mêmes grossissements (x 9500, x 2400, x100) afin de comparer les deux morphologies.

Les figures 3.34 a, 3.34 b et 3.34 c montrent des images de la morphologie de la matrice conteneur du MCP. Comme nous pouvons le constater sur les figures, la matrice présente une microstructure accidentée et rugueuse. L'adhésion des molécules de plâtre aux fibres de cellulose augmentent la rugosité de la microstructure de la matrice.

Les figures 3.34 d, 3.34 e, 3.34 f donnent des images de la microstructure du composite-MCP après intégration de la paraffine. Les résultats de l'analyse MEB révèlent que l'MCP a été intégré et retenu avec succès à l'intérieur de sa matrice d'une part et à l'intérieur même de la fibre de cellulose comme nous pouvons le voir clairement sur la figure 3.34d.

Les résultats de la caractérisation par MEB montrent que le MCP a été absorbé et retenu avec succès à l'intérieur de sa matrice, les images montrent qu'il est uniformément réparti dans sa matrice grâce à sa capillarité et aux forces d'attraction superficielle.

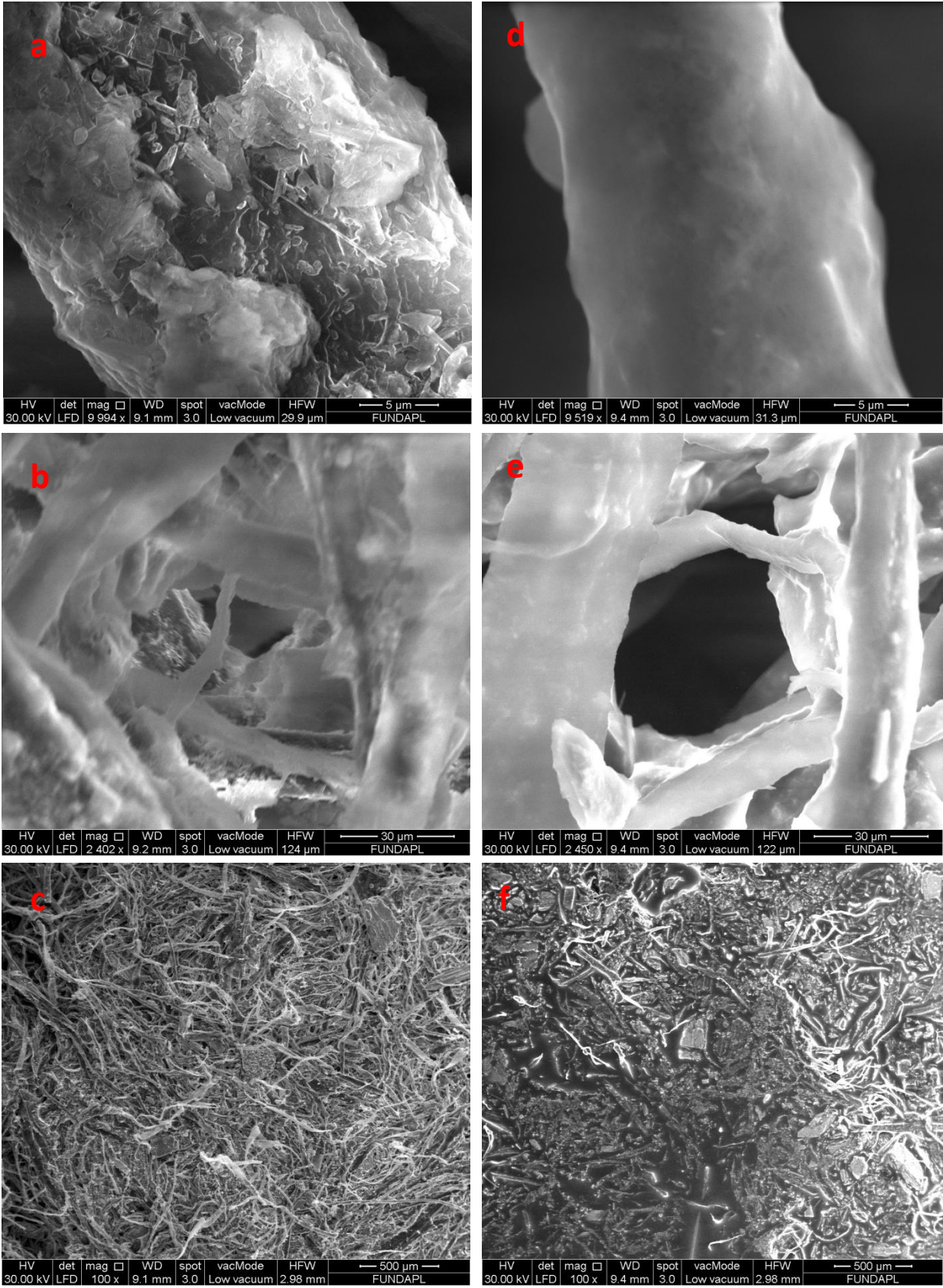


Figure 3. 34 Images MEB du composite (PP/FC/Gr/Paraffine)

3.4.1.2 Identification de la stabilité chimique du composite-MCP par FT-IR

La figure 3.35 affiche la superposition des spectres IR de chacun des constituants principaux du nouveau composite-MCP (PP/FC/Gr/Paraffine), ainsi que celui du composite-MCP résultant. L'objectif de cette caractérisation est de vérifier la compatibilité chimique entre les différents composés du nouveau matériau composite et de regarder s'il n'y a pas eu création d'un nouvel agent chimique qui serait responsable de la dégradation du nouveau matériau.

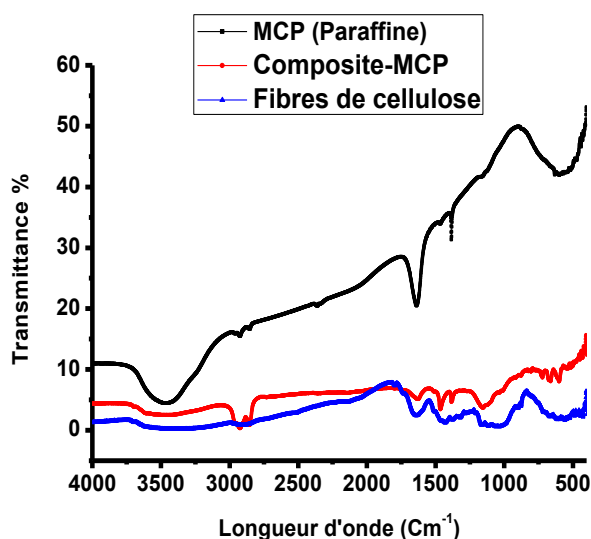


Figure 3. 35 Superposition des spectres IR des principaux composés du composite (PP/FC/Gr/Paraffine).

À partir de la figure 3.35 : le spectre IR des fibres de cellulose de formule chimique $(C_6H_{10}O_5)^{242}$ affiche la présence des pics des molécules $-CH_2$ à 1432 cm^{-1} . Le pic reporté à 1641 cm^{-1} correspond aux élongations C-O tandis que ceux enregistrés à 1100 cm^{-1} et 1500 cm^{-1} , sont liés aux vibrations d'élongations C-H^{243, 244, 245, 246}.

Le spectre IR de l'MCP utilisé dans cette expérience affiche des bandes d'absorption caractéristiques aux alcanes (C_nH_{2n+2}) à 2922 cm^{-1} et 2855 cm^{-1} . La bande caractéristique enregistrée à 1630 cm^{-1} correspond aux groupes CH_2 tandis que le pic qui apparaît à 1380 cm^{-1} revient au groupe méthyle qui est un radical alkyl hydrophobe²⁴⁷.

Le spectre IR du composite-MCP1 montre la présence des pics liés aux vibrations d'élongation C-H à 2847 cm^{-1} et 2914 cm^{-1} . Les mêmes pics ont été enregistrés sur le spectre IR de l'MCP à 2855 cm^{-1} et 2922 cm^{-1} ainsi que sur celui des fibres de cellulose. La comparaison entre les différents spectres obtenus, révèle qu'il n'y a pas eu changement dans la position des pics enregistrés sur le composite-MCP comparés à ceux de ses composés.

Ce résultat prouve qu'il n'y a pas eu d'interaction chimique destructrice entre l'MCP et sa matrice, la combinaison n'est alors que physique. Nous pouvons donc dire que le matériau est stable chimiquement.

3.4.1.3 Analyse cristallographique de la structure du nouveau composite MCP par DRX

La figure 3.36 montre les résultats de l'analyse par Diffraction des Rayons X du nouveau composite-MCP1. Le modèle DRX affiche l'apparition de pics réguliers à chaque 3° approximativement sur un intervalle allant de 20° à 32° . Ces pics sont reportés précisément à (21° , 24° , 26° , 29° , 32°) ; Ceci voudrait dire que le nouveau composite dispose d'une structure cristalline dont les molécules y sont arrangées de façon régulière.

Les pics deviennent moins distincts que les premiers à partir de 32° . Ceci pourrait être lié au fait que le taux de matière cristalline ait diminué à l'intérieur du composite-PCM en raison du passage de l'MCP de l'état solide à l'état liquide. Par conséquent les petits pics observés à 36° , 38° , 42° et 48° sont liés à la présence de molécules de plâtre dans l'échantillon testé.

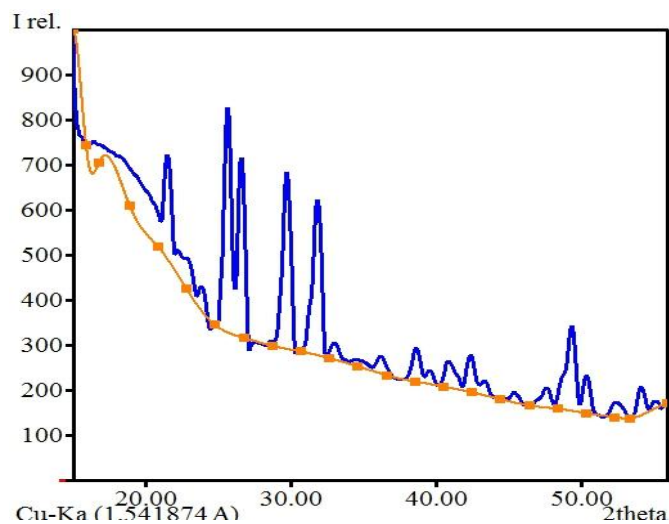


Figure 3. 36 modèle DRX du composite-MCP

3.4.1.4 Analyse de la dégradation thermique du composite par ATG

La figure 3.37 montre le résultat de la caractérisation de la dégradation thermique du nouveau composite-MCP1 en fonction de la température. La courbe ATG affiche l'évolution de la perte de masse d'un échantillon du composite-MCP d'environ 8 mg en fonction de l'évolution de la température.

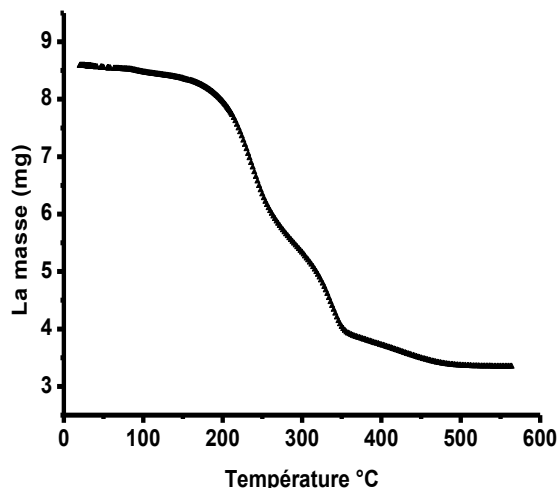


Figure 3. 37 Courbe ATG d'un échantillon du composite (PP/CL/Gr/Paraffine).

La figure 3.37 montre que la perte de masse reste insignifiante en dessous de 120 °C. Le peu de perte de masse enregistré à 100°C correspond à l'évaporation de la vapeur d'eau contenue dans la porosité de l'échantillon. Le premier palier de perte de masse se produit réellement entre 180 °C- 250 °C, il correspondrait à la dégradation thermique de la paraffine. Le second palier de dégradation thermique est visible entre 260 °C et 340 °C, celui-ci serait lié à la dégradation des fibres de cellulose. Le dernier palier qui correspondrait à la dégradation des molécules de plâtre est enregistré à plus de 400 °C.

Aucune perte de masse n'est enregistrée à des températures inférieures à 100 °C, ainsi nous pouvons conclure que le nouveau composite-MCP pourrait être utilisé dans des applications de bâtiment sans aucun risque de dégradation thermique dans les conditions normales d'exploitation d'un bâtiment. Le nouveau composite-MCP est donc stable thermiquement dans l'intervalle des températures de son utilisation.

3.4.1.5 Analyse des propriétés thermiques du composite pas DSC

La figure 3.38 montre la courbe DSC du cycle endothermique de l'échantillon composite-MCP. Comme nous pouvons le constater, la courbe affiche deux pics distincts. Le premier pic, moins important est visible entre 10 °C à 15 °C sur chacun des thermo-grammes de l'MCP et du composite-MCP, ceux-ci correspondent aux transitions solide-solide au sein de l'MCP et du composite-MCP²⁴⁸.

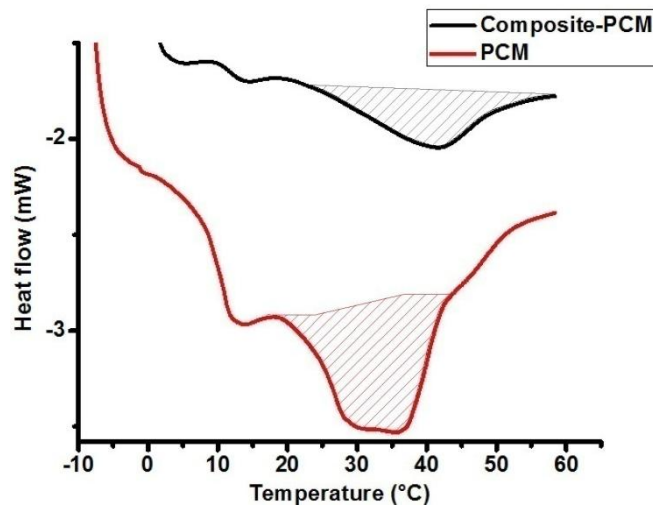


Figure 3. 38 Cycle endothermique de DSC du nouveau composite-MCP.

Les seconds pics plus importants que les premiers sont enregistrés entre 20 °C et 40 °C, ils correspondent au changement de phase (solide-liquide) des échantillons testés (paraffine et composite-MCP). Les pics DSC des échantillons analysés ne sont pas francs, ceci revient au fait que l'MCP utilisé ne soit pas une substance pure. La fusion de l'MCP débute alors à partir de 21.75 °C pour avoir lieu à environ 32.5 °C, sa chaleur latente de changement de phase correspond à 183.99 J/g.

La fusion du composite-MCP débute quand à elle à 23.05 °C et se produit aux environs de 36 °C avec une chaleur latente de fusion de 130.57J/g.

Le tableau 3.3 récapitule les caractéristiques thermiques obtenues par DSC de chacun de l'MCP et du composite-MCP. Le tableau 3.4 quand à lui compare les résultats obtenus dans la présente étude à ceux retrouvés dans la littérature.

Tableau 3. 3 : Propriétés thermique de l'MCP et du composite-MCP.

Échantillon	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (J/g)
La paraffine	32.5	183.9
Le composite-MCP	36	130.57

Tableau 3. 4 : Comparaison des propriétés thermiques du composite-MCP1 avec d'autres composites-MCPs tirés de la littérature.

L'échantillon	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de changement de phase J/g
Paraffine/Montmorillonite/Graphite ²⁴⁹	45.3	112.79
Panneau plâtre/acide gras ²⁵⁰	22.94	51.85
Dodécanol/ Montmorillonite ²⁵¹	44.1	74.29
Stéarate de Butyle/ Montmorillonite ²⁵²	26.5	79.25
Notre composite-MCP (cette étude)	32.5	130.57

3.4.1.6 Analyse des performances thermiques du composite-MCP1 avant et après intégration de l'MCP

La figure 3.40 donne les résultats d'une étude expérimentale (Fig. 3.39) comparative de l'évolution des températures à l'intérieur de deux échantillons composites avec et sans l'intégration de l'MCP1 (Paraffine). La figure 3.40 A correspond au graphe du composite-MCP, la figure 3.40 B présente la courbe du composite sans MCP.

Les mesures ont été réalisées aux thermocouples de type « K » placés dans les échantillons respectifs aux mêmes endroits. Les thermocouples (1 et 6) sont placés respectivement sur la face inférieure _ en contact direct avec la source de chaleur_ de chaque échantillon. Les thermocouples (2 et 5) sont placés au cœur de chacun des échantillons tandis que les thermocouples (3 et 4) sont placés sur les faces supérieures des échantillons.

Tous les thermocouples sont connectés à un data logger de type « PICOLOG TC-08 » qui à son tour est branché à un ordinateur (Fig.3.39).

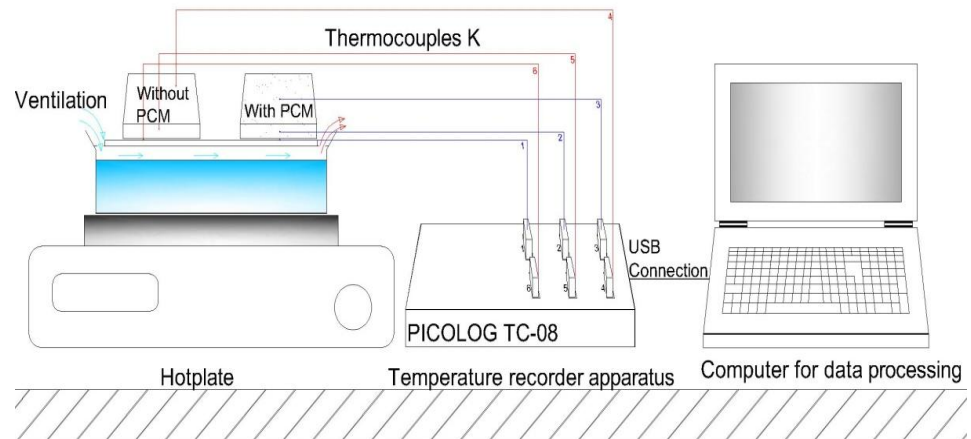


Figure 3. 39 Schéma du protocole expérimental de l'évolution des températures dans les échantillons avec et sans MCP.

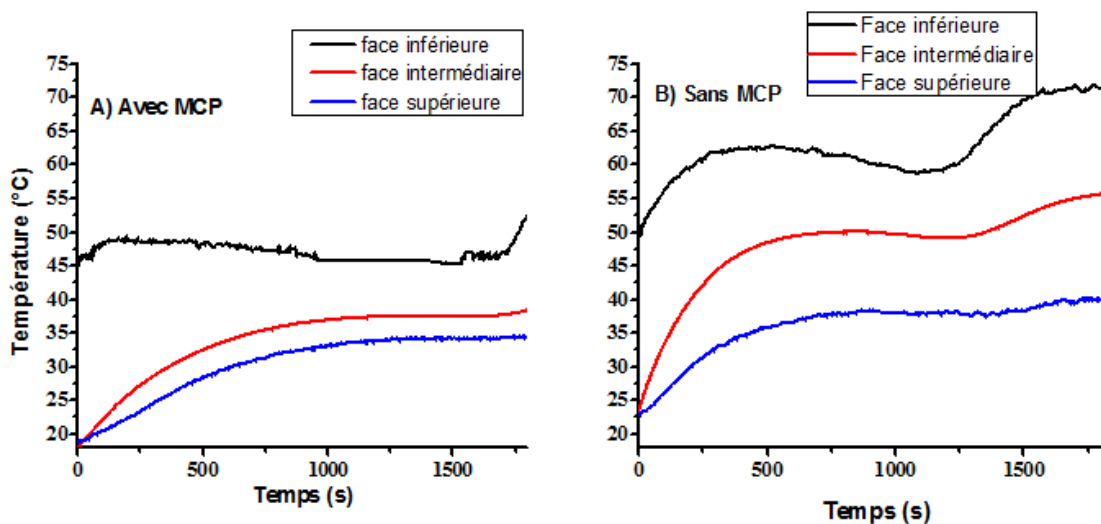


Figure 3. 40 : Comparaison de l'évolution des températures dans les composites sollicités par la même source de chaleur avec et sans MCP

À partir de la figure 3.40, il est constaté que les températures enregistrées sur les trois endroits du composite sans MCP sont plus élevées que celles enregistrées sur les trois endroits du composite-MCP. La différence est de près de 8 °C.

La température de l'échantillon A est inférieure à la température de l'échantillon B ; de plus, la température se stabilise entre 32 °C et 35 °C sur une bonne plage de temps. Ceci correspond au changement de phase dans le composite-MCP.

Contrairement au cas de l'échantillon A, la stabilisation de la température observée dans l'échantillon B à 50 °C est due au fait de la stabilisation de la température de la plaque chaude thermo-statée à 50 °C.

Les résultats de cette manipulation montrent que l'intégration de l' MCP dans le matériau composite améliore significativement son inertie thermique.

3.4.2 Caractérisation des composites à base d'argile naturelle (AN/FC/Gr/GVC)

Les résultats de la caractérisation des composites-MCP1 présentés précédemment, avaient révélé une bonne résistance à la dégradation thermique et une bonne stabilité chimique. Par contre, celui-ci perd vite ses propriétés thermiques initiales après quelques dizaines de cycles de fusion solidification. Les résultats du cycle thermique seront présentés dans les sections ci-dessous. De plus sa faible résistance mécanique visible à l'œil nu dans la phase fusion de l'MCP nous a conduits à explorer les caractéristiques des autres composites-MCP élaborés afin de vérifier leur applicabilité pour le stockage latent passif de la chaleur dans le bâtiment. Les résultats des différentes caractérisations (thermiques, physico-chimiques et mécaniques) du composite MCP2 (argile naturelle/ graisse végétale de coprah) sont présentés ci-dessous.

3.4.2.1 Caractérisation thermique par DSC du composite-MCP2

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) à été réalisée pour l' MCP pure ainsi que pour les meilleurs candidats composites-MCP2.

La figure 3.41 affiche les résultats de la caractérisation thermique par DSC et montre les pics de changement de phase (endothermiques et exothermique) du composites-MCP et de l'MCP pure.

À partir des quartes courbes (a-d) de la figure 3.41, la fusion et la solidification de l'MCP pure s'effectuent à 22.63 °C et 17.44 °C respectivement. Les valeurs respectives de la chaleur latente de changement de phase dans le cas de la fusion et de la solidification sont de 106.17 J/g et 107.34 J/g.

La figure 3.41 « a » affiche les propriétés thermiques du composite-MCP noté (E1). Les points de fusion et de solidification de cet échantillon ont été retrouvés respectivement à 23.73 °C et 19.91 °C pendant que leur chaleur latente de fusion et de solidification à 46.70 J/g et 47.29 J/g respectivement.

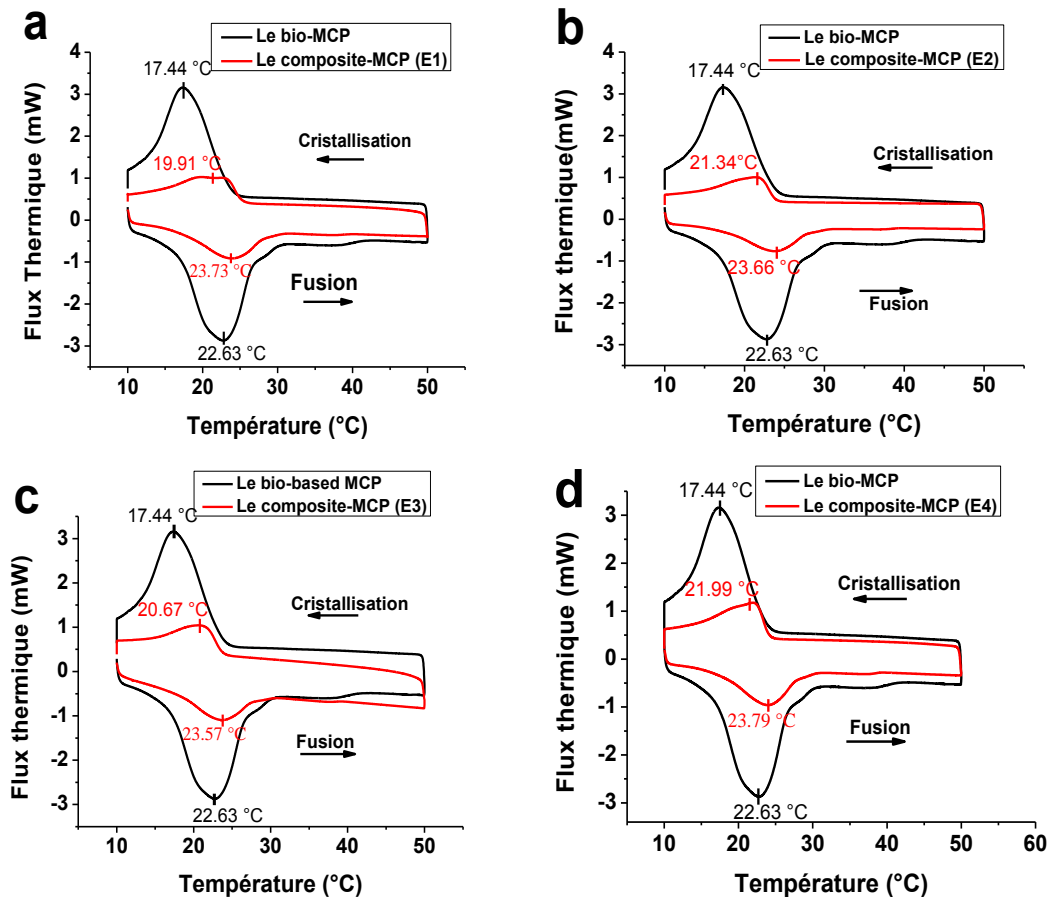


Figure 3. 41 Courbes de DSC de l'MCP1 pure et du composite-MCP1

La figure 3.41 b montre les résultats de la caractérisation thermique par DSC de l'échantillon composite-MCP noté (E2). Les résultats montrent que les points respectifs de fusion et de solidification pour cet échantillon sont de 23.66 °C et 21.34°C ; les chaleurs latentes de changement de phase sont de 48.39 J/g et 49.71 J/g respectivement.

Les caractéristiques thermiques de changement de phase du composite-MCP noté (E3) sont présentées dans la figure 3.40 c. les températures de fusion et de solidification pour cet échantillon sont de 23.79 °C et de 20.67 °C respectivement pendant que les valeurs respectives de chaleurs latentes de changement de phase sont de 58.03 J/g et 59.38 J/g.

La figure 3.41 d montre les températures de changement de phase du composite-MCP noté (E4), elles sont de 23.79 °C et de 21.99 °C pour les températures de fusion et de solidification respectivement et 59.10 J/g et 60.72 J/g pour les valeurs respectives de l'enthalpie de changement de phase.

À partir des résultats de la DSC nous pouvons conclure que les valeurs de l'enthalpie de changement de phase de l'MCP pure ont diminué de près de 50% lorsque celui-ci a été incorporé dans sa matrice tandis que les températures de changement de phase restent approximativement stabilisées. Parmi les quatre échantillons composites-MCPs testés, E4 montre les meilleures propriétés thermiques de stockage latent de l'énergie. Hormis sa capacité à contenir l'MCP sans fuite ni suintement, celui-ci présente des valeurs de chaleurs latentes de changement de phase les plus élevées.

Les propriétés thermiques de ce nouveau composite restent acceptables pour les applications passives de stockage latent de l'énergie thermique dans les enveloppes des bâtiments. Le tableau 3.5 compare les caractéristiques thermiques des échantillons expérimentés dans la présente étude avec certaines propriétés de certains composites-MCP retrouvés dans la littérature.

3.4.2.2 Caractérisation chimique par FT-IR du composite-MCP E4

La figure 3.42 montre les spectres IR de l'MCP2 et du composite-MCP E4 ayant montré les meilleures propriétés thermiques. Nous rappelons que le bio-MCP utilisé dans la présente étude est un produit de la récupération du secteur agroalimentaire. Il est essentiellement composé d'acides gras (acides alpha-linolénique ($C_{18}H_{30}O_2$)) que l'on trouve dans plusieurs huiles et graisses végétales.

Le spectre IR du bio-MCP affiche des bandes de vibration des groupes $-CH_3$ à 2950 cm^{-1} et 2850 cm^{-1} . Le pic observé à 1748 cm^{-1} correspond aux vibrations d'élongation C=O des acides gras contenus dans le bio-MCP. Les pics enregistrés à 1560 cm^{-1} , 1450 cm^{-1} , 1378 cm^{-1} et 722 cm^{-1} sont liés aux vibrations d'élongation des groupes $-CH_2$ et $-CH_3$.^{112, 113}.

À partir de la figure 3.42, les pics affichés sur le spectre du composite-MCP sont en parfaite accordance avec ceux enregistrés sur le spectre IR du bio-MCP pure. Ceci dit que les propriétés chimiques du matériau à changement de phase n'ont pas été affectées après son intégration dans la matrice argileuse.

Tableau 3. 5 : Comparaison des propriétés thermique de cette étude avec celles des autres études trouvées dans la littérature.

Composite-MCP	Point de fusion (°C)	Point de solidification (°C)	Enthalpie (J/g)
Cb-CMCP ²⁵³	21.13	17.90	41.78
E-Perlite/ Paraffine ²⁵⁴	27.60	23.56	67.13
MCP-brique ²⁵⁵	15.80	22.28	61.44
Paraffine/ Brique ²⁵⁶	52.73	55.80	41.32
PCMPC ²⁵⁷	58.07	52.75	28.27
FS-CMCPs ²⁵⁸	20.98	23.27	55.40
Diatomite/Paraffine ²⁵⁹	22.30	24.40	63.90
Bentonite/AC ²⁶⁰	30.07	26.16	74.08
(E1) Cette étude	23.73	19.91	47.29
(E2) Cette étude	23.66	21.34	49.71
(E3) Cette étude	23.57	2067	59.38
(E4) Cette étude	23.79	21.99	60.72

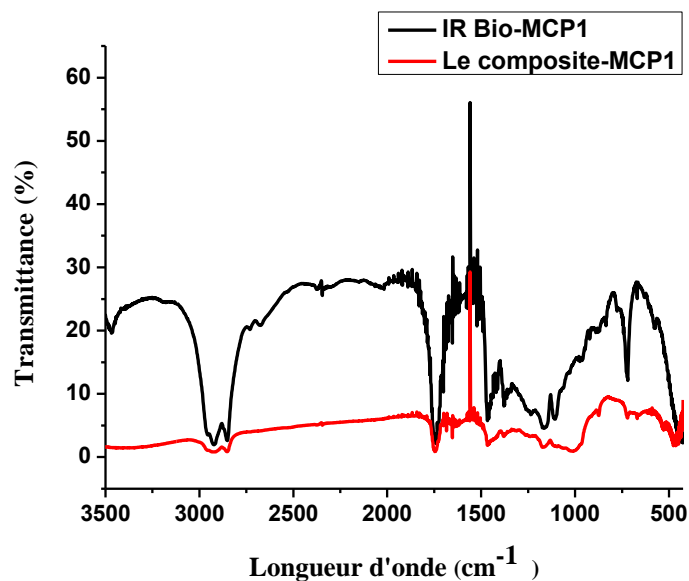


Figure 3. 42 Superposition des spectres IR du bio-MCP et du composite-MCP.

En conclusion, l'interaction entre le bio-MCP est sa matrice n'est que physique, le composite-MCP (E4) est stable chimiquement il peut être appliqué dans les enveloppes des bâtiments sans aucun risque de dégradation chimique.

3.4.2.3 Caractérisation physique par MEB du composite-MCP E4

La figure 3.43 montre des images MEB de l'échantillon E4 composite-MCP avant et après intégration du bio-MCP. Les deux types d'échantillons ont été observés avec les mêmes grossissements (x 1000, x 500, x 100) avant et après le processus d'intégration du bio-MCP.

Les images « a », « c » et « e » de la figure 3.43 montrent les résultats MEB de la microstructure de la matrice conteneur du bio-MCP sous les différentes magnifications précitées. L'échantillon observé est d'une microstructure accidentée et rugueuse.

La figure 3.43 « b », « d » et « e » montre la morphologie du composite-MCP (après intégration de l'MCP) sous les mêmes magnifications précédentes. Les images montrent que le bio-MCP1 a été convenablement incorporé à l'intérieur de sa matrice conteneur. La microstructure de la matrice observée en (a, c, e) est complètement remplie d'MCP et sa rugosité a été lissée par l'incorporation de celui-ci. De plus, les images MEB montrent que le bio-MCP1 est uniformément réparti dans la microstructure de sa matrice, il est retenu dans de bonnes conditions sans fuite notamment dans sa phase fusion grâce à la capillarité et aux forces de tension superficielles de sa matrice.

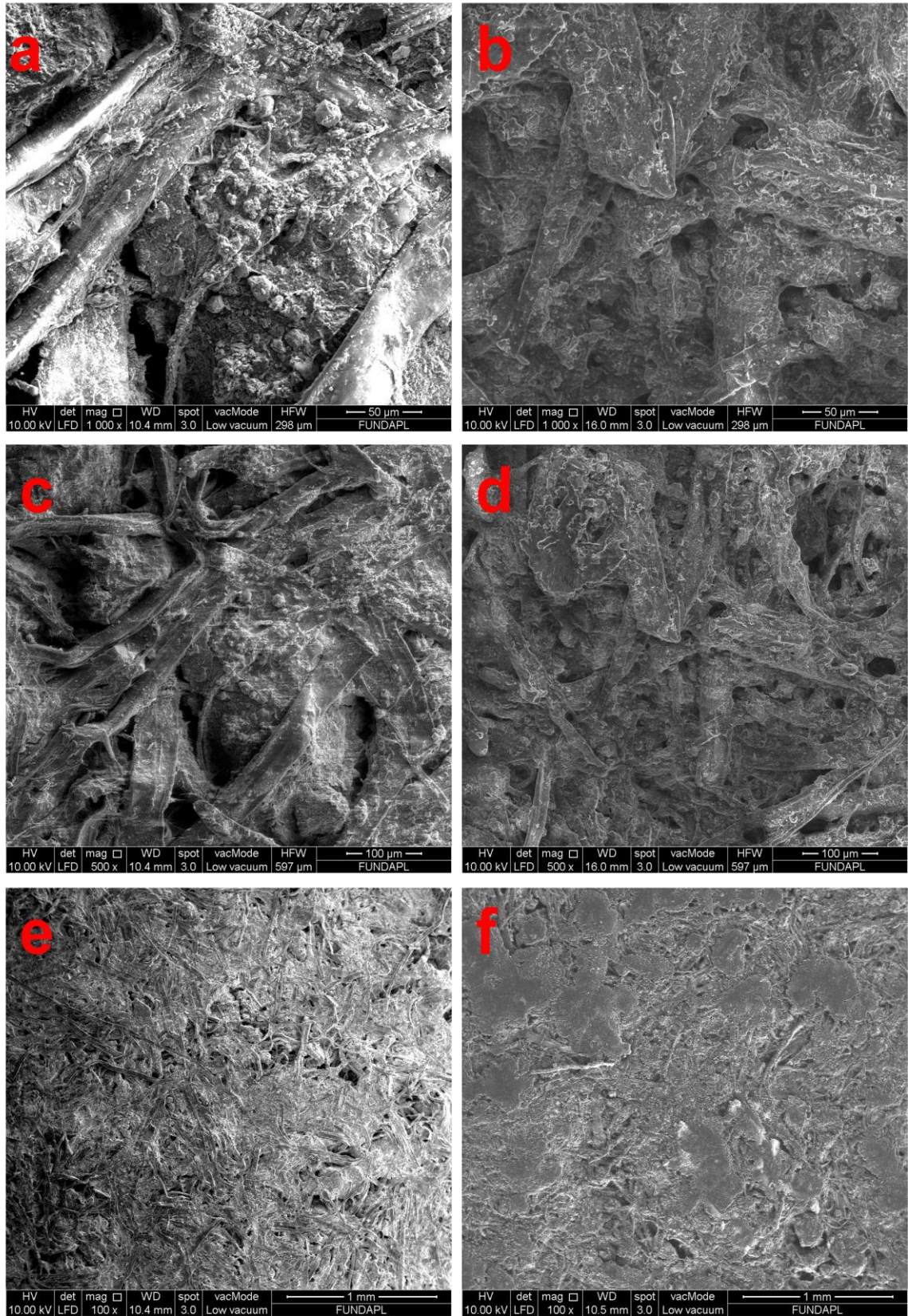


Figure 3. 43 Images MEB du composite E4. A,c,e le composite sans MCP. B,d,f le composite avec MCP ; sous différentes magnifications (x1000, x500, x100).

3.4.2.4 Caractérisation de la dégradation thermique du composite-MCP E4 par ATG

La figure 3.44 montre la courbe de la dégradation thermique du composite-MCP (E4). Nous rappelons que ce genre de test est effectué pour vérifier la stabilité thermique de l'échantillon à l'intérieur des intervalles des températures de son exploitation.

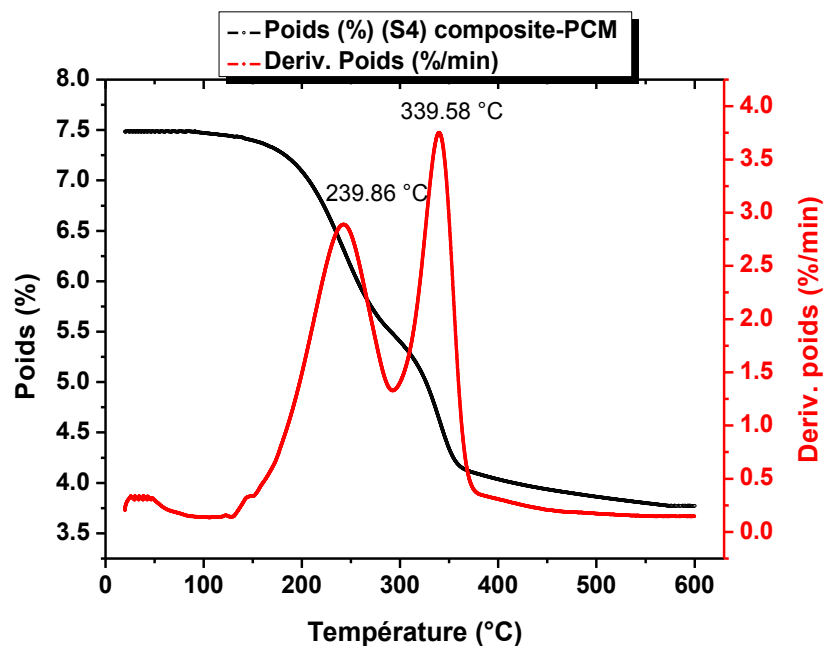


Figure 3. 44 Courbe ATG du composite-MCP1

Le graphe montre que le composite-MCP testé affiche deux paliers de dégradations thermiques. Comme nous pouvons le constater sur la courbe, le premier pic est marqué à 239.86 °C tandis que le second est à 339.58 °C. La différence entre les deux est de 99.72 °C. La dégradation thermique du composite-MCP (E4) n'a pas lieu à des températures inférieures à 200 °C, ce qui est quatre fois supérieur aux températures de changement de phase de l'MCP et du composite-MCP.

Les résultats de l'analyse thermogravimétrique montrent que le nouveau composite-MCP (E4) affiche une bonne fiabilité thermique en dessus des plages de température de son fonctionnement.

3.4.2.5 Mesure de la conductivité thermique du bio-MCP et des différents composites bio-MCP.

La conductivité thermique est l'un des paramètres clé à considérer lors du processus de sélection d'un composite-MCP pour une application passive de stockage de la chaleur dans le bâtiment²⁶¹. Les résultats de la mesure de la conductivité thermique de chacun des composite-MCP (E1, E2, E3, E4) et du bio-MCP sont représentés dans la figure 3.45.

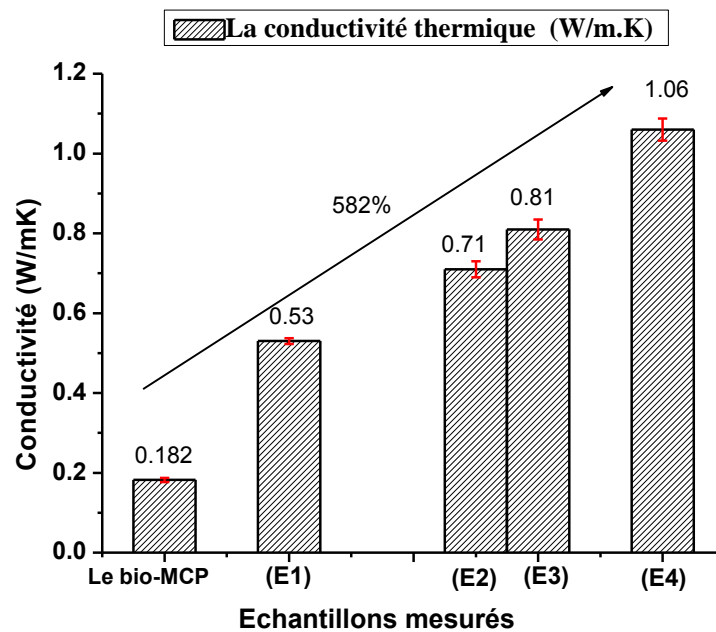


Figure 3. 45 Valeurs de la conductivité thermique du bio-MCP et des différents échantillons du composite-MCP1

La conductivité thermique du bio-MCP a été trouvée de 0.182 W/m.K tandis qu'elle s'élève à 0.53 w/m.K, 0.71 w/m.K, 0.81 w/m.K et à 1.06 w/m.K lorsque celui-ci est incorporé dans les matrices notées (E1), (E2), (E3) et (E4) respectivement. L'ajout du graphite a été très important dans l'amélioration de la conductivité thermique des échantillons composites-MCP.

La conductivité thermique du composite-MCP (E4) a été enregistrée comme la plus élevée comparée aux autres échantillons testés (E1), (E2), (E3). Ce résultat confirme que le composite-MCP (E4) peut-être considéré comme le plus adéquat aux applications passives de stockage de chaleur visées dans le présent travail de thèse. Le tableau 3.6 compare les résultats

des conductivités thermiques de la présente étude à ceux présentés dans d'autres études.

Tableau 3. 6 : Comparaison des conductivités thermiques de la présente étude avec celle des autres études de la littérature.

Le composite-MCP	Conductivité thermique (W/ m.K)
Acide stéarique/Poudre de grignon d'olive ²⁶²	de 0.23- à 0.34
Carbone dopé N/MA-SA ²⁶³	de 0.29- à 0.37
MWCNT/Graphene ²⁶⁴	de 0.39- à 0.84
GE/Paraffine ²⁶⁵	de 0.39- à 0.76
Graphite E/ Ester d'acide gras ²⁶⁶	de 0.28- à 1.26
HPCM ²⁶¹	de 0.19- à 0.66
Paraffine/Perlite ²⁶⁷	de 0.05- à 0.28
MCP/GE ²⁶⁸	de 0.37- à 1.4
paraffine-MCPs nanocomposite ²⁶⁹	de 0.26- à 0.7
Le composite-MCP1 ^{Cette étude}	de 0.18- à 1.06

3.4.3 Caractérisation des composites (AN/FC/Gr/GVP)

Les résultats précédents de caractérisation des composites-MCP (Argile naturelle/ graisse végétale de coprah), montrent qu'il est un bon candidat pour des applications passives de stockage de la chaleur à basse température. Par conséquent, nous avons exploré les propriétés de la Graisse Végétale de Palmiste (GVP) conditionnée dans la même matrice argileuse présentée précédemment. Les résultats de la caractérisation thermique et physico-chimique du nouveau composite-MCP sont présentés ci-dessous :

3.4.3.1 La calorimétrie différentielle à balayage du composite (AN/FC/Gr/GVP).

La figure 3.46 montre les résultats de la caractérisation thermique par DSC du composite-MCP préparé à partir de la Graisse végétale de Palmiste (produit de la récupération du secteur agroalimentaire) et de la matrice

argileuse ayant présenté les meilleures propriétés d'absorption et de rétention du MCP dans sa phase fusion.

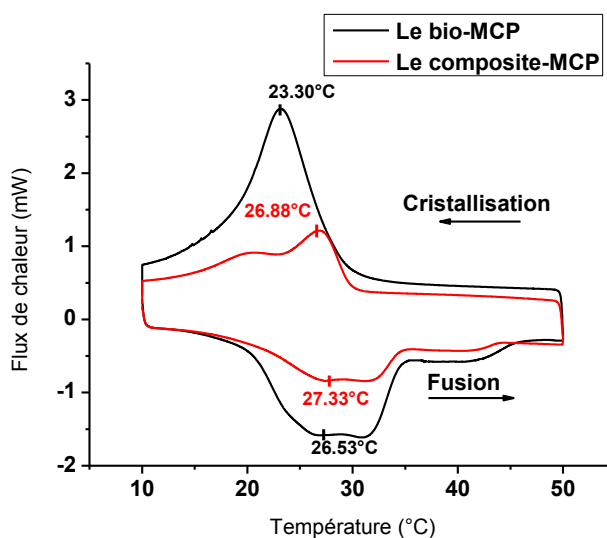


Figure 3. 46 Courbes de DSC du MCP (GVP) et du composite-MCP2

Les résultats de la DSC montrent que le bio-MCP fond à 26.53 °C et se solidifie à 23.30 °C ; l'MCP présente très peu de surfusion puisque la différence entre son point de fusion et de solidification n'est que de 3.23 °C.

La courbe du composite-MCP montre que celui-ci change de phase (solide/liquide) à 27.33 °C et (liquide/solide) à 26.88 °C respectivement. Les points de fusion et de solidification de chacun des échantillons caractérisés sont déterminés par les crêtes des bandes respectives de fusion et de solidification obtenues par DSC.

Les valeurs des capacités de chaleurs latentes de changement de phase de l'MCP et du composite-MCP sont obtenues en intégrant l'aire se trouvant sous les bandes de changement de phase (solide/liquide), (liquide/solide) ²⁷⁰. Cela est possible grâce aux logiciels de traitement de courbes de DSC intégrés à chaque calorimètre ; dans notre cas nous avons utilisé le logiciel « METTLER STAR_e Evaluation Software ». Les résultats montrent que 74.35 J/g et 75.24 J/g sont les valeurs respectives de la chaleur latente pour la fusion et la solidification de l'MCP tandis que 40.27Jg et 41.13 J/g sont celles du composite-MCP.

Le tableau 3.7 compare les résultats des caractéristiques thermiques obtenus dans la présente étude à celles retrouvées dans la littérature.

Tableau 3. 7 : Comparaison des propriétés de la présente recherche à celles retrouvées dans la littérature.

Le composite-MCP	Point de fusion (°C)	Point de solidification (°C)	Enthalpie (J/g)
GE/Paraffine ²⁶⁵	46.52	43.74	23.82
Perlite E/ Paraffine ²⁵⁴	27.60	23.56	67.06
Diatomite/Paraffine ²⁵⁹	22.30	24.40	63.90
FS-CMCPs ²⁵⁸	23.27	20.98	55.40
Ciment/ (AC-AM) ²⁵³	21.13	17.90	41.78
Paraffine/GE ²⁷¹	20.70	16.40	40.29
KO-AL (24 wt %) ²⁷²	19.14	-	48.08
Composite-MCP ^{Cette étude}	27.33	26.88	41.13

3.4.3.2 L'analyse thermogravimétrique du composite-MCP3 (ATG)

L'analyse thermogravimétrique du composite-MCP3 à été réalisée afin de vérifier sa stabilité thermique. Les figures 3.47 et 3.48 montrent les courbes ATG de l'MCP (GVP) et du composite-MCP respectivement.

La courbe ATG de l'MCP (Fig. 3.47), affiche un seul palier de dégradation entre 20°C et 550 °C. La perte de masse due à la dégradation thermique des acides gras contenus dans le bio-MCP ne débute qu'à partir de 260 °C.

La figure 3.48 montre la courbe ATG du composite-MCP, la dégradation thermique de celui-ci se produit à une température de 230 °C qui est inférieure à celle de la dégradation de l'MCP (GVP). Ceci peut-être dû au fait que la conductivité thermique du composite-MCP2 soit supérieure à celle de l'MCP (GVP) pure¹¹³.

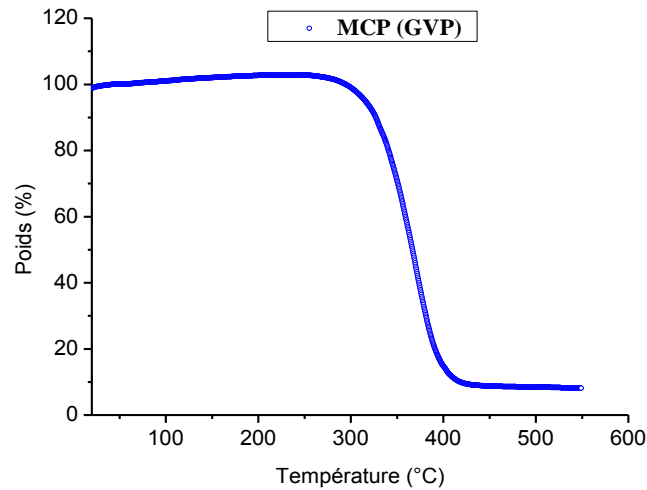


Figure 3. 47 Courbe ATG de l'MCP (GVP)

De plus, la courbe ATG du composite-MCP montre que l'échantillon testé n'a perdu que 53 % en poids de sa masse totale initiale, ce qui est juste équivalent au taux de MCP contenu dans la microstructure du composite.

Les résultats de l'ATG confirment que la dégradation du composite-MCP ne débute qu'à partir des températures supérieures à 200 °C. Ainsi nous pouvons conclure que le nouveau matériau composite peut être appliqué dans le domaine du bâtiment pour des fins de stockage latent de la chaleur sans aucun risque de dégradation thermique au cours de son processus d'exploitation.

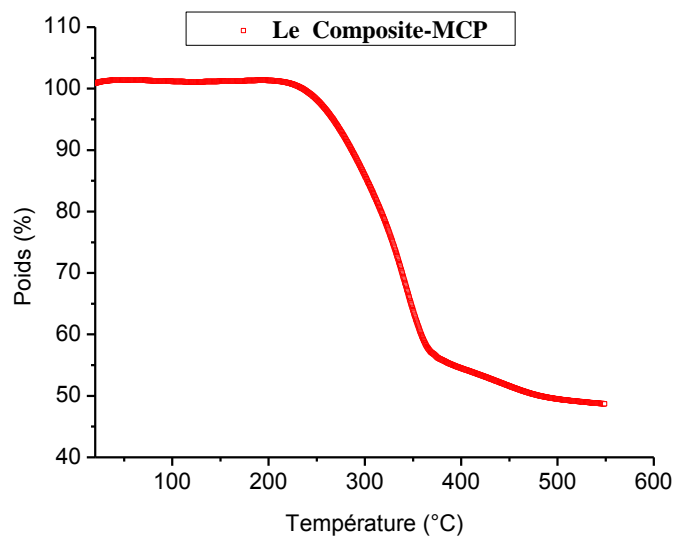


Figure 3. 48 Courbe ATG du composite-MCP

3.4.3.3 La FT-IR le l'MCP (GVP) et du composite-MCP3

La caractérisation chimique par FT-IR à été effectuée sur le l'MCP (GVP) et le composite-MCP2 afin de vérifier leur compatibilité chimique. La figure 3.49 montre les deux spectres IR de chacun des deux composés testés.

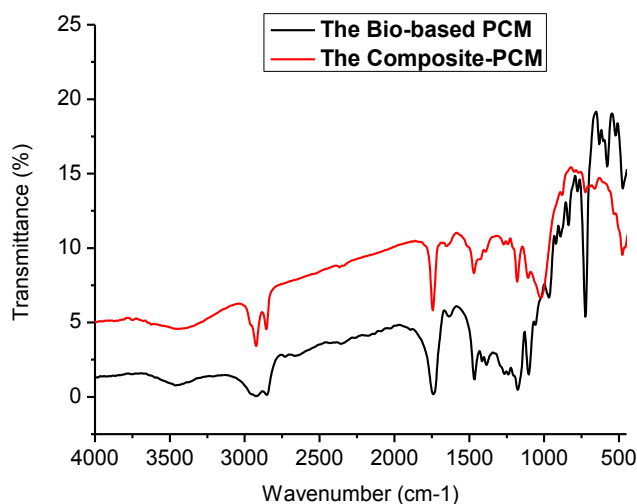


Figure 3. 49 spectres IR du bio-MCP (GVP) et du composite-MCP2

Le spectre IR du bio-MCP affiche des pics d'absorption à 2924 cm^{-1} et 2854 cm^{-1} qui sont liés au mode d'élongation des molécules C-H¹¹⁹. Les pics enregistrés à 1739 cm^{-1} et 1466 cm^{-1} correspondent aux étirements C=O tandis que la région qui se situe entre 725 cm^{-1} à 1238 cm^{-1} est associée aux déformations C-H et aux étirements C-O-C^{273, 274}.

Le spectre IR du composite-MCP3 montre que la forme des pics et leurs positions comparées à celles des pics du spectre IR de l'MCP (GVP) n'ont pas varié. Ce résultat confirme que l'interaction entre le bio-MCP et sa matrice n'est que physique, il n'y a pas eu une interaction chimique destructrice. Le nouveau matériau composite-MCP3 est chimiquement stable.

3.4.3.4 La Microscopie Électronique à Balayage

La microstructure de la matrice conteneur du MCP (GVP) (Fig. 3.50 a, 3.50 b, 3.50 c) ainsi que celle du composite-MCP3 (3.50 d, 3.50 e, 3.50 f) a été

observée avec le MEB en utilisant les mêmes grossissements (250x, 500x, 1000x) pour chacun des échantillons respectivement.

Les images MEB (a, b et c), montrent que la matrice conteneur du MCP (GVP) affiche une structure rugueuse et accidentée. La surface des fibres de cellulose à l'échelle microscopique semble recouverte de particules d'argile naturelle. L'ensemble (micro fibre/ argile) forment des micro-composés de tailles variées disposées de façon aléatoire à l'intérieur de la matrice. Par conséquent des petits vides et des espacements se sont formés à l'intérieur de la microstructure de celle-ci. Ces propriétés permettent de retenir l'MCP dans de bonnes conditions sans risque de fuite.

Les images d,e,f de la même figure 3.50 indiquent que le composite-MCP3 présente une microstructure différente de la première. La microstructure qui était à l'origine rugueuse et accidentée à été homogènement lissée après l'intégration du MCP (GVP) ; les vides ont été remplis et le MCP a bien adhéré à la microstructure de la matrice.

En conclusion, le bio-MCP a été intégré avec succès dans la microstructure de sa matrice et y est bien confiné dans de bonnes conditions. Toute la microstructure de la matrice à été bien remplie par le MCP grâce à sa capillarité et aux forces de tensions superficielles

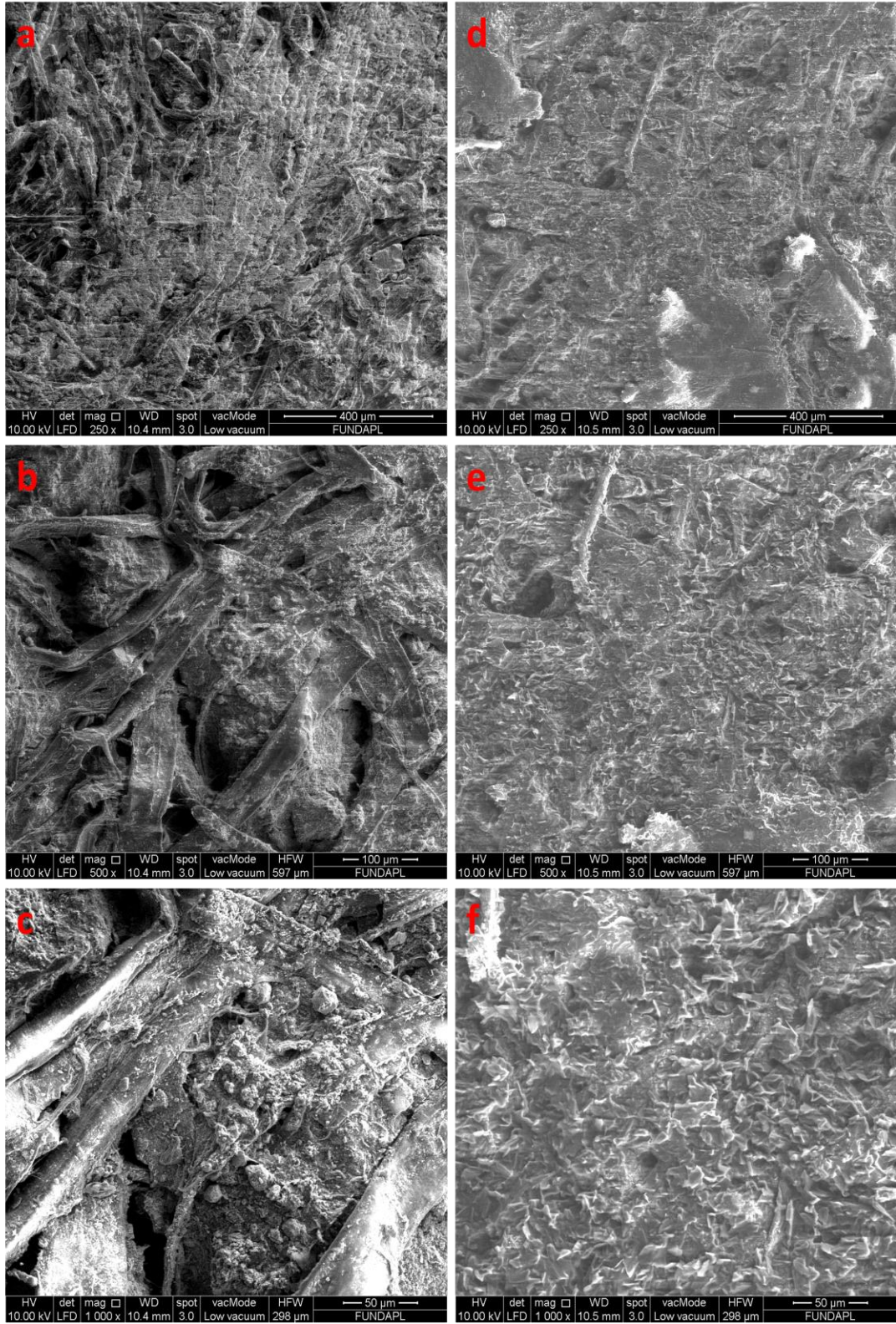


Figure 3. 50 Images MEB de la matrice et du composite-MCP2

3.4.3.5 Mesure de la conductivité thermique par Hot-Disk

Comme nous l'avons déjà expliqué précédemment, la conductivité thermique est un paramètre important aux composites-MCPs pour accélérer leurs processus de changement de phase et renforcer leur efficacité à stocker et à déstocker un flux de chaleur ^{275, 276}. La conductivité thermique de chacun des échantillons (bio-MCP, matrice composite sans graphite) sont très faibles, elles sont de l'ordre de $0.2 \text{ w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$. Raisons pour lesquelles le graphite a été ajouté avec différentes fractions massiques dans les échantillons préparés dans le but d'améliorer la conductivité thermique des nouveaux matériaux composites-MCP.

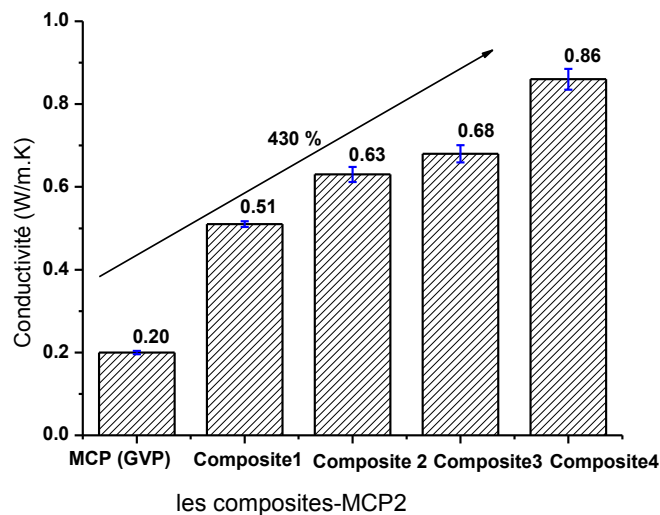


Figure 3. 51 Courbe de l'évolution de la conductivité thermique des composites-MCP2

3.4.3.6 Caractérisation mécanique à la compression simple des composites (AN/FC/GVP).

Les nouveaux composites-PCMs élaborés ne sont pas destinés à des applications structurelles de bâtiment. Ils sont proposés pour être appliqués à l'intérieur des enveloppes des bâtiments sans avoir à être sollicités par les forces dues aux actions de la descente des charges ou de la stabilisation des structures. Néanmoins, ceux-ci devraient supporter leur propre poids et garder un état de performance mécanique leur permettant de continuer à remplir leurs fonctions thermiques notamment dans la phase fusion des MCP.

Les applications envisagées des nouveaux composites-MCPs concernent plutôt les parois verticales des bâtiments. Ce qui fait que les tests de caractérisation mécaniques effectués ont plutôt pour objet de vérifier leur résistance à la compression simple. Les tests ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques sollicitées en compression simple avec et sans l'MCP.

Les figures 3.52 et 3.53 montrent les résultats de l'évolution de la charge appliquée en compression simple aux éprouvettes avant et après intégration de MCP.

La figure 3.52 montre que le composite sans MCP ne subit pas de rupture brutale lors du processus de compression simple, il présente dans ce cas un palier plus ou moins élastique que nous pouvons constater sur la figure. Cela peut être dû à la présence de fibres dans la matrice²⁷⁷.

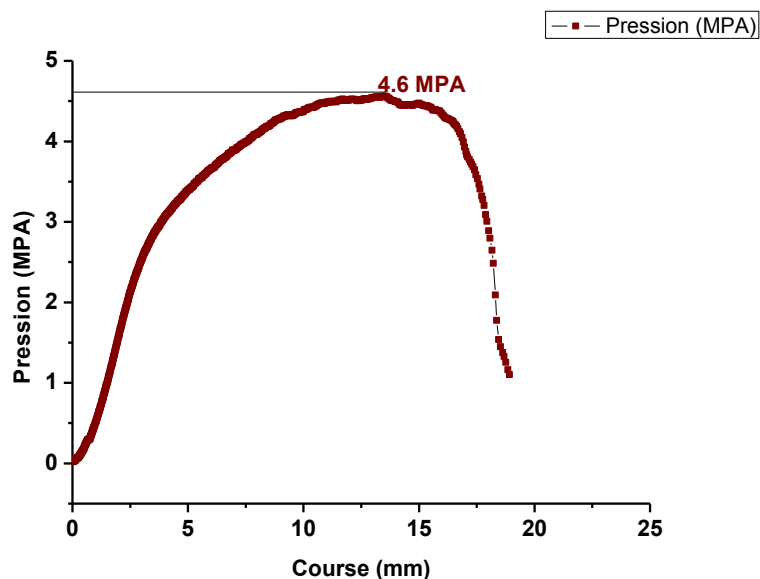


Figure 3. 52 Courbe de pression/déformation du composite sans le MCP en compression simple

La figure 3.53 montre que le composite avec MCP sollicité en compression simple affiche une rupture brutale et une baisse de la résistance à la compression. Ceci pourrait être dû à l'intégration du matériau à changement dans la microstructure du composite initial et au fait que les fibres de cellulose responsables de l'élasticité du matériau soient imbibées d'MCP.

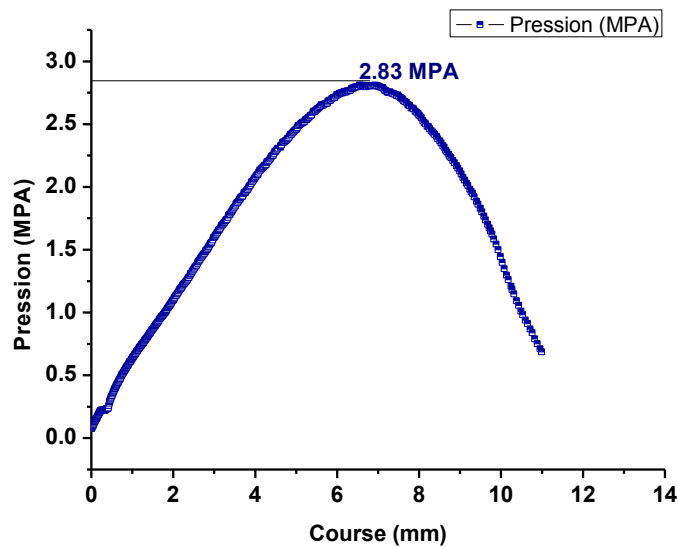


Figure 3. 53 Courbe (pression/déformation) du composite-MCP 2 en compression simple.

Tableau 3. 8 : Comparaison de la résistance mécanique du composite-MCP 3 préparés avec celle des autres études présentes dans la littérature.

Le composite-MCP	La résistance à la compression (MPa)
Ciment/ MCP ²⁷⁹	5
Béton de granulats légers/ Paraffine ²⁸⁰	8- 15
Graphite/Acide L'aurique-Myristique ²⁸¹	0.2- 5.39
Graphite/ MCP ²⁸²	0.3- 2.5
Perlite/ Paraffine ²⁸³	3.62- 7.53
Ciment/MCP micro-Encapsulés ²⁸⁴	3- 8
Nano palette graphite/Polyéthylène glycol ²⁸⁵	3- 6
Mousse de carbone/MCP ²⁸⁶	0.89
Composite-MCP ^{cette étude}	2.83- 4.6

En se référant à la littérature²⁷⁸ et aux standards internationaux des matériaux de construction, tel le standard chinois GB 50574-2010 ; la résistance du nouveau matériau reste acceptable pour les applications non structurelles. Le tableau 3.8 compare les résistances mécaniques de quelques

composites-MCPs trouvés dans la littérature avec celles des composites-MCP élaborés dans la présente étude.

3.4.4 Caractérisation des composites (PP/FC/Gr/ graisse végétale non hydrogénée)

La présente section résume les résultats de la caractérisation physico-chimique et thermique réalisée sur des nouveaux composites-MCPs préparés à partir de la matrice composite argileuse précédente et d'une graisse végétale non hydrogénés récupérée du secteur agroalimentaire. Celle-ci avait attiré notre attention par sa texture à température ambiante et son inertie chimique. La substance n'avait montré aucun signe de dégradation chimique malgré plus de deux années laissée à l'air libre dans les conditions du laboratoire.

3.4.4.1 La caractérisation par calorimétrie différentielle à balayage des nouveaux composites-MCP4

La figure 3.54 montre les résultats de la caractérisation par DSC du nouveau MCP récupéré ainsi que des échantillons composites-MCPs ayant justifié de bonnes propriétés d'absorption et de rétention de l'MCP dans sa phase liquide sans aucun risque de fuite ni de suintement. Les valeurs de la chaleur latente de changement de phase ont été obtenus par intégration numérique des surfaces des piques de changement phase (solide/liquide) et (liquide/ solide).

Les résultats montrent que le nouveau bio-MCPs change de phase à 32.98 °C pour la fusion et 20.59 °C pour la solidification. Nous constatons que la différence entre le point de fusion et de solidification pour ce MCP et de 12.39 °C, ce qui est relativement important par rapport aux premiers bio-MCPs étudiés. Son enthalpie de fusion est de 108.39 J/g et de 109.73 J/g pour la solidification ce qui présente les taux d'enthalpie les plus élevés par rapport aux premiers MCPs étudiés.

La courbe du composite-MCP noté Comp-MCP 0.3 Gr montre que le matériau affiche des températures de fusion et de solidification de 32.98 °C et

de 21.70 °C respectivement. Ses valeurs respectives d'enthalpie de changement de phase sont de 56.82 J/g et 57.29 J/g.

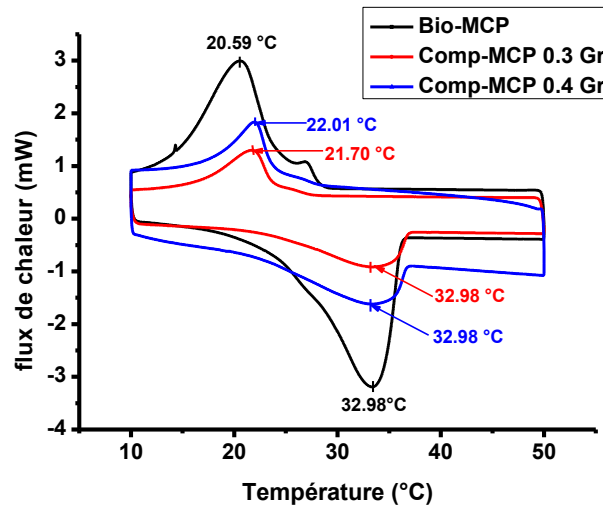


Figure 3. 54 Courbes de DSC du bio-MCP et des composites-MCPs 3

La courbe DSC du composite-MCP noté Comp-MCP 0.4 Gr montre que celui-ci change de phase à 32.98 °C et 22.01 °C pour la fusion et la solidification respectivement. Ses valeurs respectives de chaleur latente de changement de phase sont de 60.41 J/g et de 62.39 J/g.

À partir des résultats de la DSC nous pouvons conclure que les températures de changement de phase du composite-MCP ne diffèrent pas tellement de celles de l'MCP pure. Les valeurs de l'enthalpie de changement de phase de l'MCP pure sont par contre supérieures d'environ 40 % au composite-MCP. Ceci est dû à la quantité du MCP retenue sans fuite. Le tableau 3.9 montre les différents taux de MCPs retenus avec succès à l'intérieur de la microstructure des différentes matrices composites préparées.

Tableau 3. 9 : Les différents taux de MCP retenus par les différentes matrices argileuses.

Échantillon	Comp-MCP (0.1Gr)	Comp-MCP (0.25Gr)	Comp-MCP (0.3Gr)	Comp-MCP (0.4Gr)
Taux de MCP retenu (% massique)	45	49	55	55

3.4.4.2 La caractérisation par Microscopie Électronique à Balayage

La figure 3.55 montre les images de la microscopie électronique à balayage du composite sans MCP (Fig. 3.54 a) et du composite-MCP (Fig. 3.54 b). Comme nous l'avons mentionné précédemment³, le composite-sans MCP affiche une microstructure rugueuse qui par la suite a été lissée par l'intégration du matériau à changement de phase.

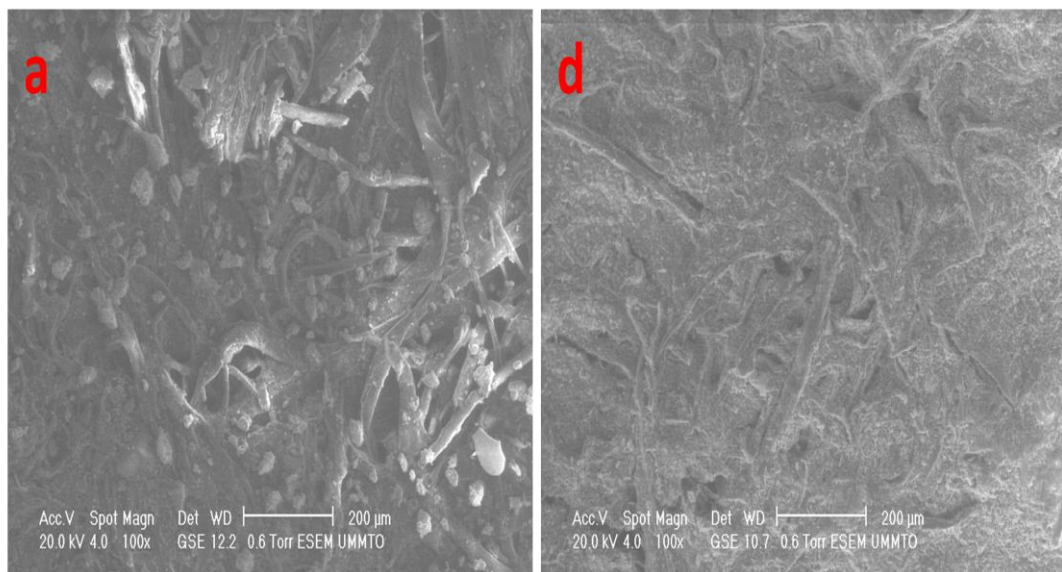


Figure 3. 55 Image MEB du composite-MCP3 : a) le composite sans MCP, d) le composite avec MCP.

Les résultats montrent que le bio-MCP est uniformément réparti dans la microstructure de sa matrice et est retenu avec succès. Cela permet de l'appliquer dans les enveloppes des bâtiments sans aucun risque de fuite ni de suintement dans sa phase liquide.

3.4.4.3 La caractérisation par FT-IR

La figure 3.56 montre les spectres IR du bio-MCP pure et du composite-MCP. Le spectre IR du bio-MCP affiche des bandes dues aux vibrations d'élongations des groupes -CH_3 à 2919 cm^{-1} et 2851 cm^{-1} . Le pic affiché à 1744 cm^{-1} est causé par les bandes C=O . les vibrations d'élongation des

³ "Supra" : pages 114, 126, 135

groupes $-CH_2$ font apparaitre les pics observés à 1561 cm^{-1} , 1460 cm^{-1} , 967 cm^{-1} et 723 cm^{-1} respectivement.

Le spectre IR du composite-MCP montre qu'il n'y a pas eu changement dans la position des pics enregistrés sur ce spectre par rapport à ceux affichés sur le spectre IR du bio-MCP. Ce résultat confirme qu'il n'y a pas eu interaction chimique entre l'MCP et sa matrice, comme dans le cas des autres composites-MCPs préparés précédemment, l'interaction n'est que physique. Cela nous amène à dire que le matériau est stable chimiquement.

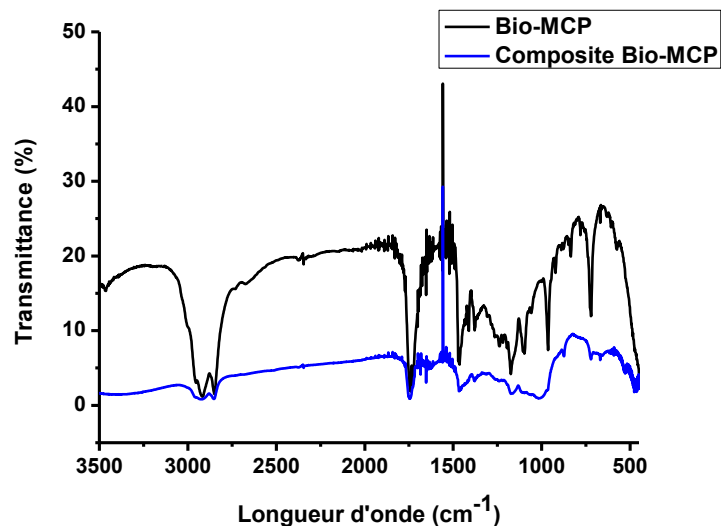


Figure 3. 56 Spectre IR du bio-MCP et du composite bio-MCP

3.4.4.4 La caractérisation de la conductivité thermique par Hot-disk

L'efficacité du stockage et du déstockage de la chaleur du nouveau composite-MCP repose entre autre sur sa conductivité thermique²⁸⁷. La graisse végétale utilisée ainsi que la matrice argileuse sans graphite ont des conductivités thermiques très faibles qui sont de l'ordre de 0.18 w/m.K .

Le graphite a été ajouté dans la préparation des composites dans le but d'améliorer la conductivité thermique du nouveau matériau. Par conséquent, plusieurs fractions massiques de graphite ont été ajoutées dans les composites, leurs conductivités thermiques respectives ont été ensuite mesurées par hot-disk.

La figure 3. 57 présente les conductivités thermiques mesurées des nouveaux matériaux composites-MCP3. Nous constatons que l'évolution cette grandeur est en relation directe avec le taux de graphite contenu dans la matrice composite. L'amélioration de la conductivité thermique est de 172.91% depuis le composite-MCP noté « Comp-MCP 0.1 Gr » jusqu'au composite-MCP noté « Comp-MCP 0.4 Gr ».

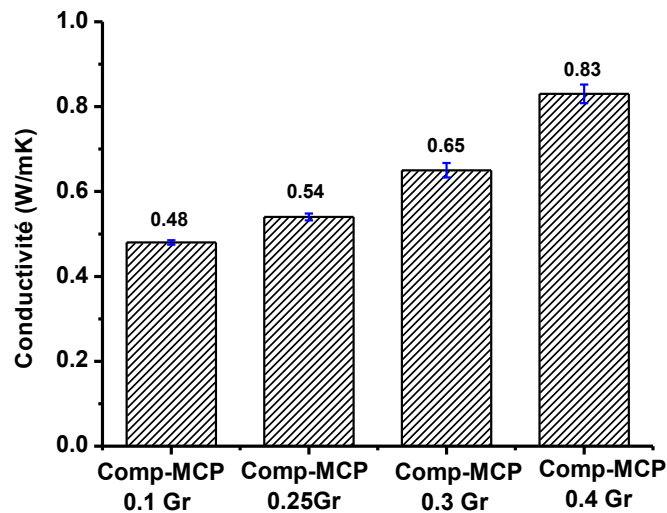


Figure 3. 57 Amélioration de la conductivité thermique des composites-MCP3.

3.5 Étude du vieillissement thermique des nouveaux matériaux composites-MCPs

L'étude du vieillissement thermique des nouveaux matériaux composites-MCP a été réalisée avec un dispositif à effet Peltier que nous avons décrit précédemment⁴. L'amélioration de la performance thermique des enveloppes des bâtiments par l'intégration des nouveaux matériaux de construction composites à changement de phase élaborés dans le cadre du présent travail de thèse est liée directement aux cycles répétitifs de stockage/déstockage de la chaleur. Par conséquent, il devient difficile pour nous de garantir la pérennité de leurs propriétés thermiques après plusieurs cycles répétitifs de stockage/ déstockage des flux de chaleurs. C'est pour cela que nous proposons d'étudier le vieillissement thermique de ces nouveaux matériaux de construction. L'objectif de ce type de caractérisation est de

⁴ "Supra" : page 92

révérer leur propriétés thermiques après plusieurs cycles répétitifs de stockage/ déstockage accélérés. La technique du vieillissement accéléré des matériaux composites à changement de phase a été adoptée par plusieurs auteurs afin d'étudier leurs fiabilité thermique après plusieurs cycles de travaux

288, 230, 289, 290, 291

3.5.1 Étude du vieillissement accéléré du composite-MCP (argile naturelle/GVC)

La figure 3.58 montre l'évolution des températures mesurées à l'aide d'une sonde à l'intérieur d'une pastille cylindrique ($\varnothing=28$ mm, $e=12$ mm) du nouveau matériau composite à changement de phase (argile naturelle/graisse végétale de coprah) durant les premières dizaines (fusion/solidification) du cycle thermique.

Pour rappel, l'échantillon est sollicité thermiquement à l'intérieur d'une enceinte contrôlée. Les courbes en traits noirs montrent les seuils des températures hautes et basses imposées au matériau par le dispositif de vieillissement accéléré. Les courbes en bleu montrent l'évolution des températures à l'intérieur de l'échantillon testé. La figure 3.59 montre le détail de la courbe d'évolution des températures dans le nouveau matériau sur un cycle complet (fusion/ solidification).

La température de chauffe du nouveau matériau est de 50 °C ; ce qui est suffisamment élevé par rapport à son point de fusion (22.63 °C). Le but est d'assurer la fusion totale du matériau. En l'occurrence, la température de refroidissement du matériau (5 °C) est suffisamment basse afin d'assurer la régénération totale de sa capacité à effectuer un second cycle de fusion.

La figure 3.59 montre que la température à l'intérieur du composite-MCP a tendance à se stabiliser entre 22 °C et 23 °C ce qui correspond au palier de changement de phase déterminé préalablement par DSC.

Le composite-MCP (argile/ GVCoprah) a subi 2000 cycles successifs qui se sont étalés sur 134 heures de test. La durée du test pour un même nombre de cycles peut varier d'un matériau à un autre en fonction de ses

propriétés thermiques (points de fusion et de solidification ainsi que son enthalpie de changement de phase et de sa conductivité thermique).

Le composite-MCP (argile naturelle/GVC) a montré des temps de cycle très réguliers et similaires sur toute la période du cyclage thermique. Le temps que prend un cycle complet est de l'ordre de 4 minutes.

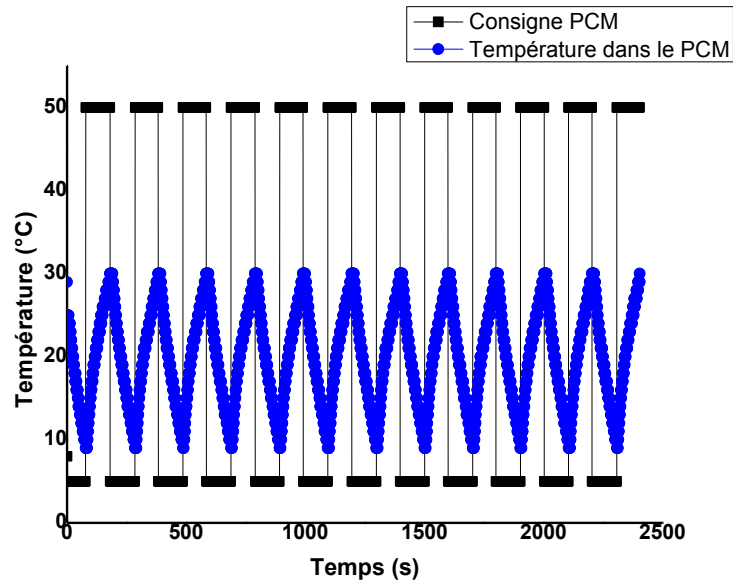


Figure 3. 58 Courbes des premières dizaines de cyclage thermique effectué sur le composite-MCP1

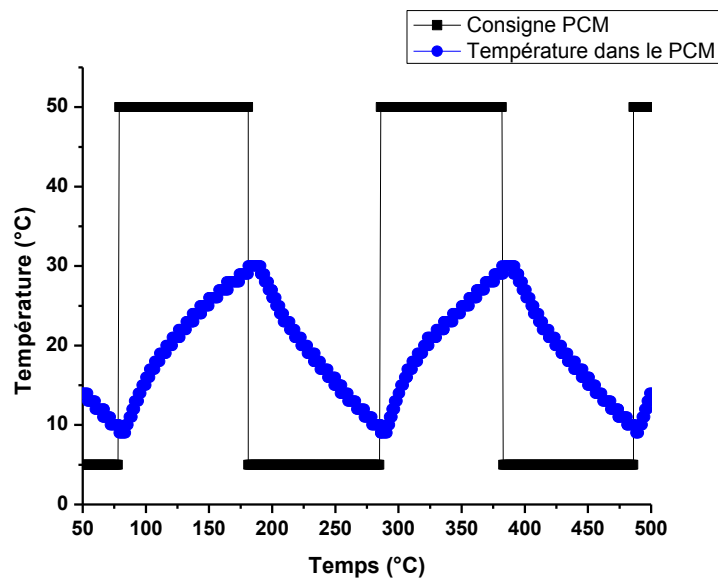


Figure 3. 59 Courbe du détail d'un cycle complet (fusion/ cristallisation).

Les figures 3.60 et 3.61 montrent la dernière dizaine des 2000 cycles de changement de phase qu'a subi le composite-MCP ainsi que le profil de température détaillé pendant un cycle complet.

Les profils de température obtenus à l'intérieur du nouveau composite-MCP pendant la première dizaine de cycles n'ont pas varié par rapport à ceux retracés pendant la dernière dizaine des 2000 cycles. Nous pouvons supposer dès à présent que les propriétés thermiques du nouveau matériau composite-MCP n'ont pas été affectées par les cycles accélérés de chauffage/refroidissement. Une caractérisation thermique par DSC s'avère importante pour confirmer ou infirmer cette hypothèse.

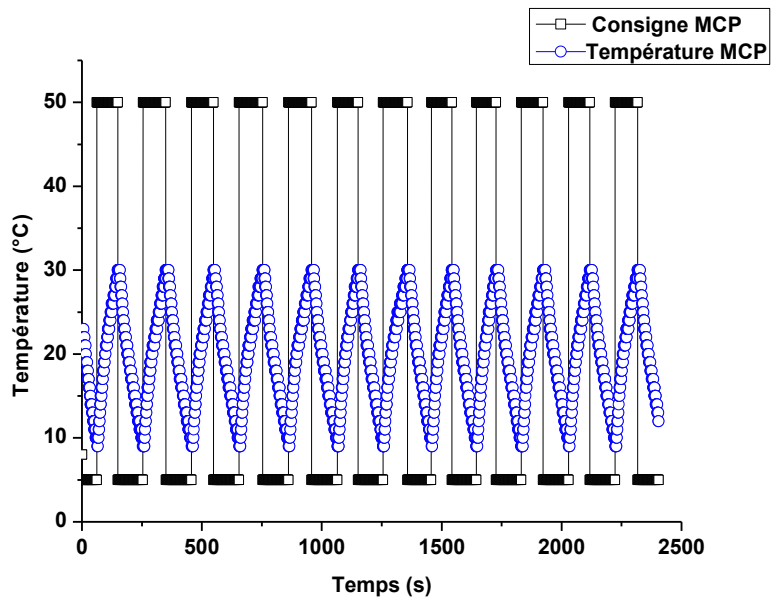


Figure 3. 60 Courbe de la dernière dizaine des 2000 cycles imposés au nouveau matériau composite-MCP.

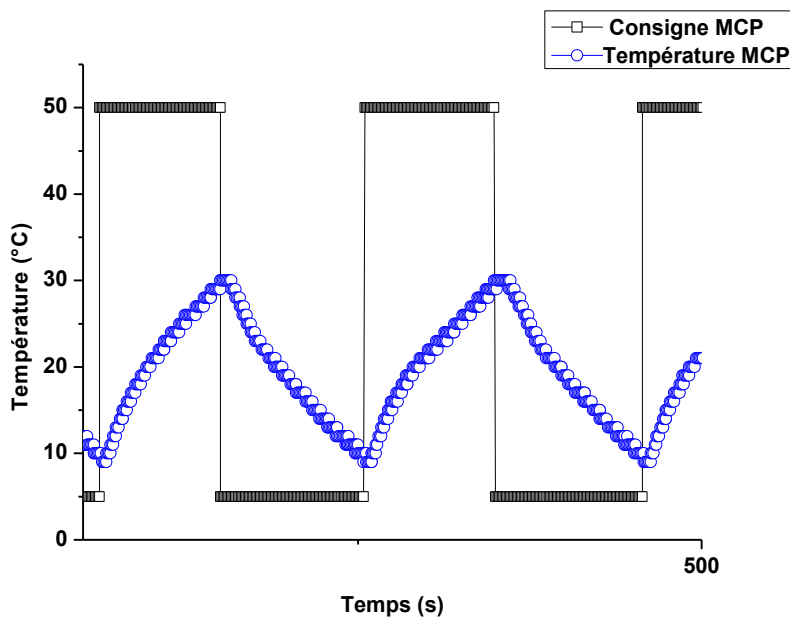


Figure 3. 61 Image du profil de température sur un cycle complet fusion/cristallisation après 2000 cycles.

Une re-caractérisation thermique par DSC de l'échantillon composite-MCP ayant subi le vieillissement accéléré a été réalisée sur un intervalle de température allant de 5°C à 50 °C et une vitesse de chauffe de 1°C/min. Les résultats sont comparés à ceux du même composite-MCP non sollicité thermiquement caractérisé par DSC sous les mêmes conditions de température et de vitesse de chauffe.

La figure 3.62 affiche les résultats de la caractérisation thermique par DSC de l'MCP pure (GVCoprah), du composite-MCP avant cyclage thermique et du composite-MCP après cyclage thermique. L'MCP (GVC) change de phase à 23.51 °C pour la fusion et à 17.37 °C pour la solidification pour des enthalpies respectives de 106.67 J/g et 107.31 J/g.

La courbe DSC de couleur noir représente celle du composite-MCP n'ayant pas subi d'opération de vieillissement accéléré, les résultats montrent que cet échantillon change de phase à 23.42 °C et 19.74 pour les cycles de fusion et de solidification respectivement. Leurs valeurs respectives de chaleur latente de changement de phase sont de 43.44 J/g et de 44.39 J/g.

La courbe de couleur magenta montre les résultats DSC du composite-MCP ayant subi 2000 cycles successifs de vieillissement accéléré. Les

résultats montrent que le matériau change de phase à 23.50 °C pour la fusion et à 16.23 °C pour la solidification pour des valeurs d'enthalpie de changement de phase égales à 42.44J/g et 41.35 J/g respectivement.

Le cycle chauffage des deux composites n'a montré aucune différence dans les points de fusion avant et après cyclage. Un déplacement du pic de solidification de 3.51 °C vers des valeurs inférieures est observé sur la courbe du composite-MCP après cyclage.

Les valeurs de l'enthalpie de changement de phase du matériau sollicité restent stables par rapport au composite-MCP non sollicité. On remarque une baisse insignifiante de 1J/g dans le cas de l'enthalpie de fusion et de 3.04 J/g dans le cas de l'enthalpie de solidification après le vieillissement.

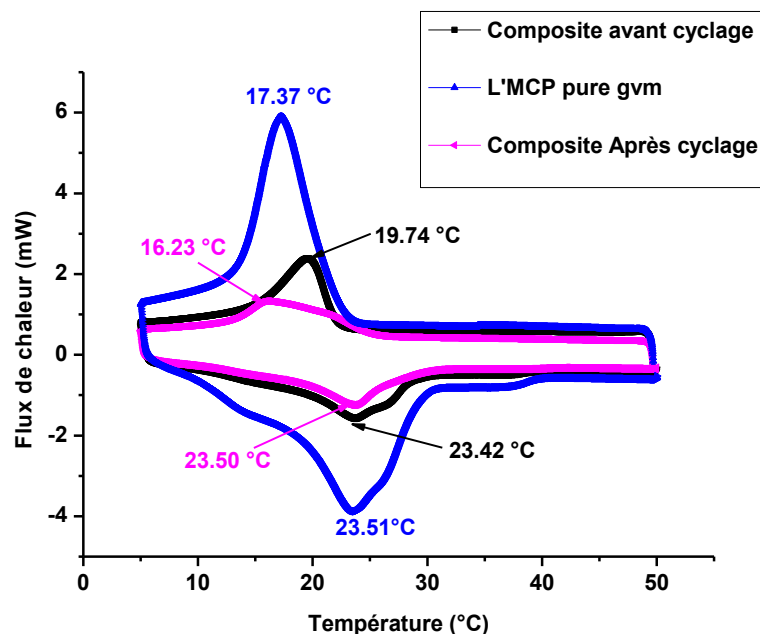


Figure 3. 62 Courbe DSC du MCP (GVC), composite-MCP1 avant cyclage thermique et du composite-MCP1 après cyclage thermique.

En conclusion, le nouveau composite-MCP garde ses propriétés thermiques après vieillissement. Les caractéristiques lui permettant d'assurer le confort thermique dans les ambiances des bâtiments ne sont pas modifiées au cours de la vie du matériau.

3.5.2 Étude du vieillissement accéléré du composite-MCP (Argile naturelle/ GVP)

Le composite (Argile naturelle/ Graisse végétale de Palmiste) a été élaboré à partir d'un MCP bio-sourcé issu de la récupération du secteur agroalimentaire. La caractérisation effectuée préalablement avait révélé que celui-ci peut être un bon candidat pour des applications passives de stockage latent de la chaleur dans les enveloppes des bâtiments ; mais la question qui se pose une nouvelle fois repose sur la possibilité de garantir l'efficacité thermique de ce matériau après plusieurs cycles de stockage/ déstockage des flux de chaleur.

Pour y répondre, nous avons fait subir des cycles accélérés de vieillissement thermique au composite-MCP en se servant de la valise de cyclage thermique décrite précédemment et en se basant sur le même protocole expérimental appliqué au premier composite-MCP du moment que leurs propriétés thermiques de changement de phase sont presque similaires.

Une température de chauffe de 50 °C et une température de refroidissement de 5 °C ont été imposées afin de garantir la fusion totale du composite-MCP pendant le cycle de stockage et sa solidification complète pendant le cycle de déstockage.

La durée d'un cycle complet (fusion/solidification) dure plus longtemps comparé au test précédent ; elle est de l'ordre de 8 minutes/ cycle. Ceci peut-être dû au fait que la conductivité thermique de ce matériau (0.86 w/m.K) soit nettement inférieure à celle du composite-MCP testé précédemment (1.06 w/m.K). Par conséquent nous n'avons réalisé que 1000 cycles qui se sont étalés sur 134 heures de test afin de ne pas affecter le Peltier de la valise calorimétrique.

La figure 3.63 retrace les premiers cycles accélérés imposés au matériau composite MCP, la figure 3.64 montre le détail du profil de température sur un cycle complet pendant les premières opérations.

Il est important de noter qu'au bout du 15^{ème} cycle, en raison d'un bug produit sur le Peltier ou son logiciel de pilotage, la température de l'enceinte thermique dans laquelle était insérée le composite-MCP avait monté jusqu'à 100 °C et y est restée pendant 15 minutes.

En revanche, le cyclage thermique n'a pas été interrompu. En plus de la vérification des propriétés de ce matériau après le vieillissement accéléré, Il est devenu indispensable de regarder si les propriétés thermiques de celui-ci n'ont pas été affectées par cette montée brutale en température.

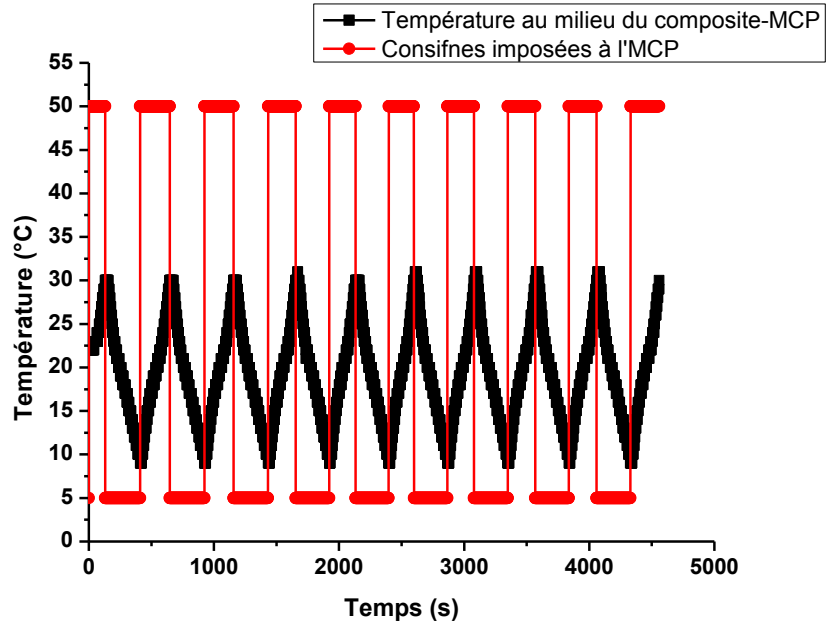


Figure 3. 63 Premières dizaine de cycles effectués sur le composite-MCP2

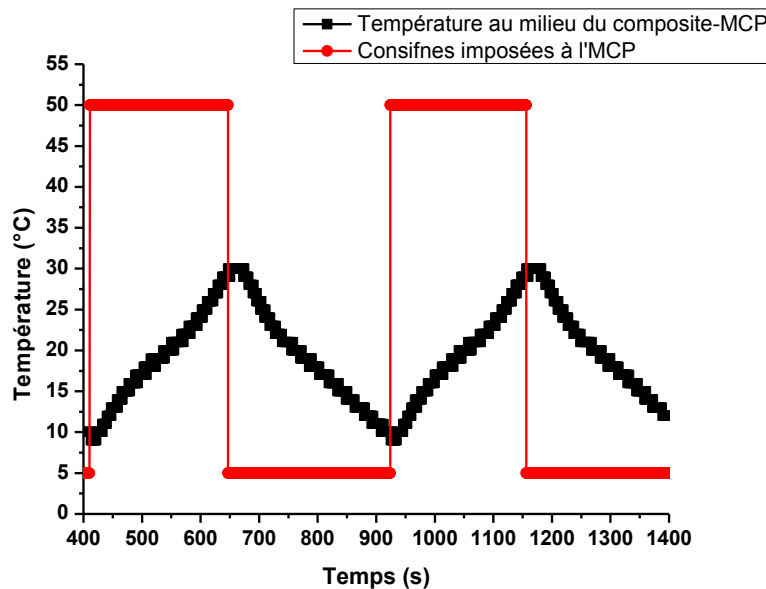


Figure 3. 64 Profil de température sur deux premiers cycles thermiques.

La figure 3.65 retrace les dernières dizaines des 1000 cycles imposés au matériau. La figure 3.66 vérifie quand à elle le détail du profil de

température sur deux derniers cycles de la dernière dizaine de cyclage thermique.

Nous pouvons conclure après comparaison des deux courbes de début et de fin de cyclage thermique que le composite-MCP3 n'a pas été affecté par les sollicitations thermiques qui lui sont imposées. Le matériau a donc bien résisté aux cycles thermiques. Une vérification des propriétés thermiques par DSC a été réalisée.

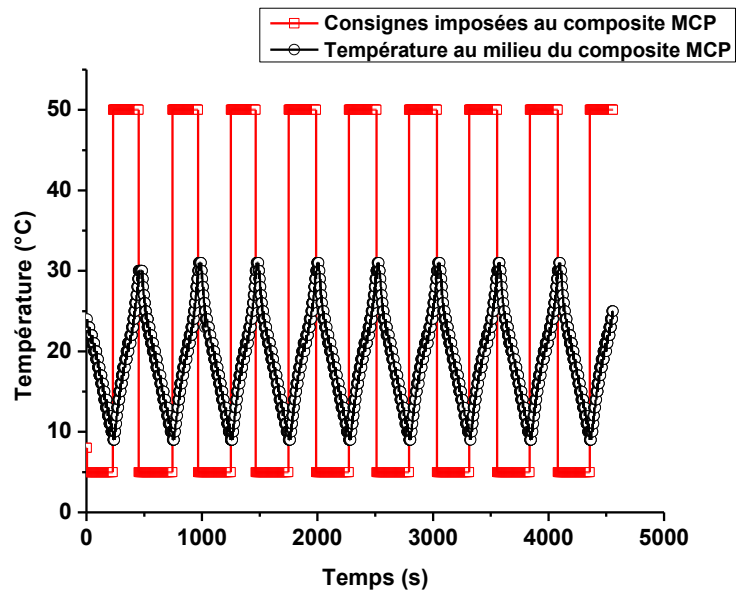


Figure 3. 65 Dernière dizaine de cycles effectués sur le composite-MCP3.

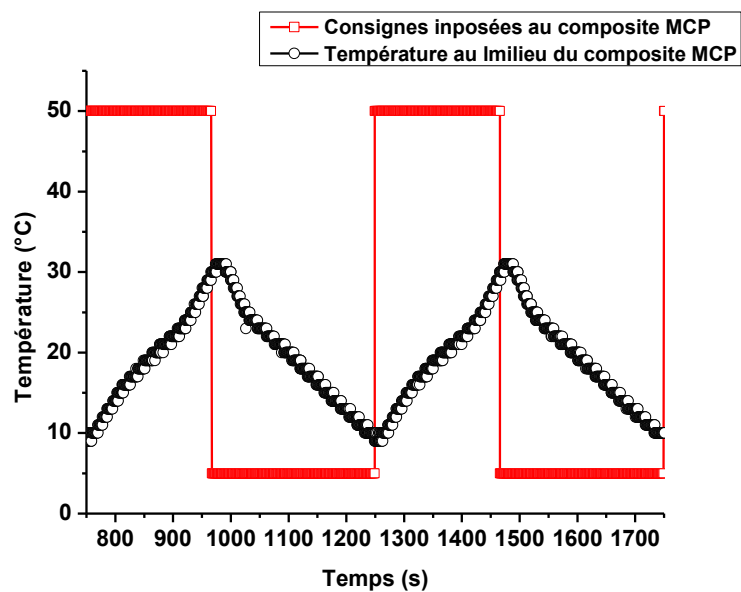


Figure 3. 66 Profil de température sur les derniers cycles thermiques.

La figure 3.67 montre les résultats de la caractérisation par DSC effectuée sur le composite-MCP avant et après cyclage ainsi que sur le MCP (GVP) pure sur un intervalle de température de 5 °C à 50 °C et une vitesse de 1°C/minute.

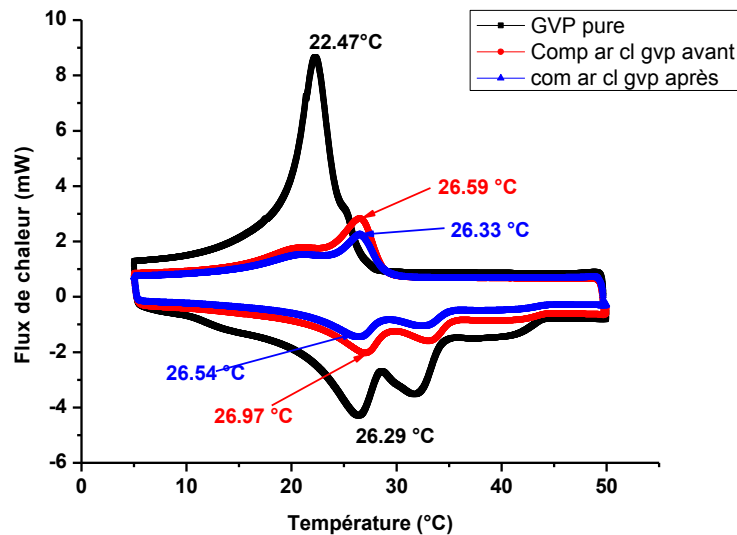


Figure 3. 67 Courbes de DSC de l'MCP (GVP), du composite-MCP2 avant cyclage thermique et du composite-MCP2 après cyclage thermique.

La courbe DSC de l'MCP (GVP) est représentée en noir, celle-ci montre que la substance change de phase à 26.29 °C pour la fusion et à 22.47 °C pour la solidification pour des enthalpies respectives de changement de phase égales à 119.84 J/g et 118.37 J/g.

La courbe du composite-MCP avant cyclage est représentée en rouge. Le matériau change de phase à 26.97 °C pour une chaleur latente de fusion de 44.66 J/g. Il se solidifie à 26.59 °C pour une enthalpie de solidification égale à 45.32 J/g.

La courbe en bleu représente le thermographe DSC du composite-MCP ayant subi les 1000 cycles thermiques de vieillissement accéléré. Les propriétés thermiques de celui-ci n'ont pas changé par rapport à sa situation initiale puisqu'il change de phase à 26.60 °C pour une enthalpie de fusion de 44.32 J/g et se solidifie à 26.38 °C pour une enthalpie de solidification de 43.06 J/g.

Les températures de changement de phase n'ont pas varié avant et après cyclage. Tandis que les valeurs des chaleurs latentes de changement de phase ont baissé de manière insignifiante. En conclusion, le composite-MCP a bien résisté aux sollicitations thermiques qu'il a subies.

3.5.3 Étude du vieillissement accéléré du composite-MCP4

Les résultats des caractérisations réalisées sur le composite-MCP (Argile naturelle/ graisse végétale non hydrogénée) montrent que les propriétés de ce composite font de celui-ci un bon candidat pour des applications d'amélioration de l'inertie thermique des bâtiments des climats secs et chauds ou les écarts de température sont importants entre le jour et la nuit.

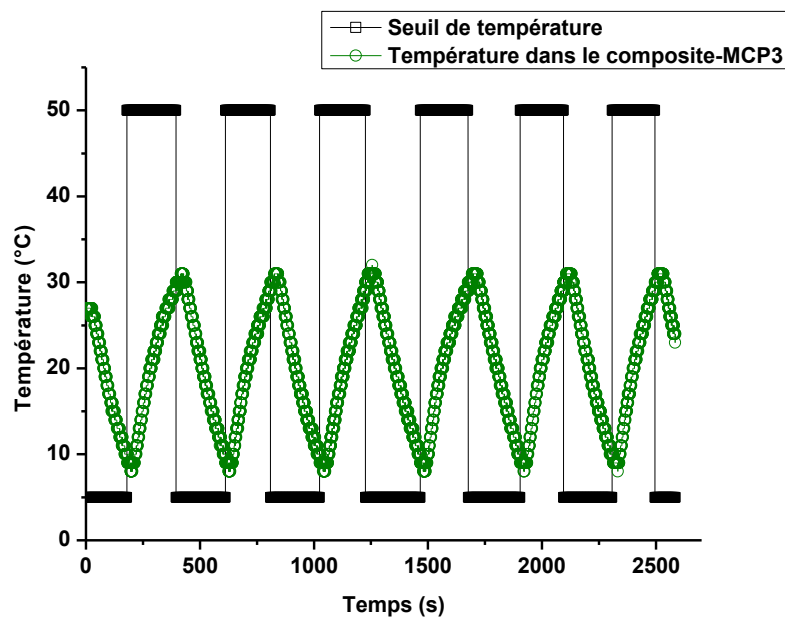


Figure 3. 68 Profil des tout premiers cycles sur 1000 de vieillissement thermique accéléré

La température de fusion de celui-ci (≈ 34 °C) dépasse largement sa température de solidification (≈ 20 °C), c'est le phénomène de surfusion.²⁹³ Comme tout autre matériau composite-MCP, il convient de vérifier les propriétés de celui-ci après plusieurs cycles accélérés de vieillissement thermique imposé.^{292, 294, 295, 296}

Le nouveau composite-MCP avait subi 1000 cycles de fusion cristallisation suivant le même protocole appliqué aux autres composites-MCPs en se servant du même dispositif expérimental décrit. La courbe 3.68 retrace les résultats des premiers cycles effectués sur ce matériau. La figure 3.69 permet d'observer en détail l'évolution du profil de température sur un cycle complet de (fusion/solidification). À partir de la figure 3.69, nous confirmons le phénomène de surfusion révélé par la première caractérisation DSC. La température du composite-MCP descend après une période de retard par rapport au déclenchement du cycle de refroidissement. La durée d'un cycle complet de fusion cristallisation est de 7minutes et 14 secondes.

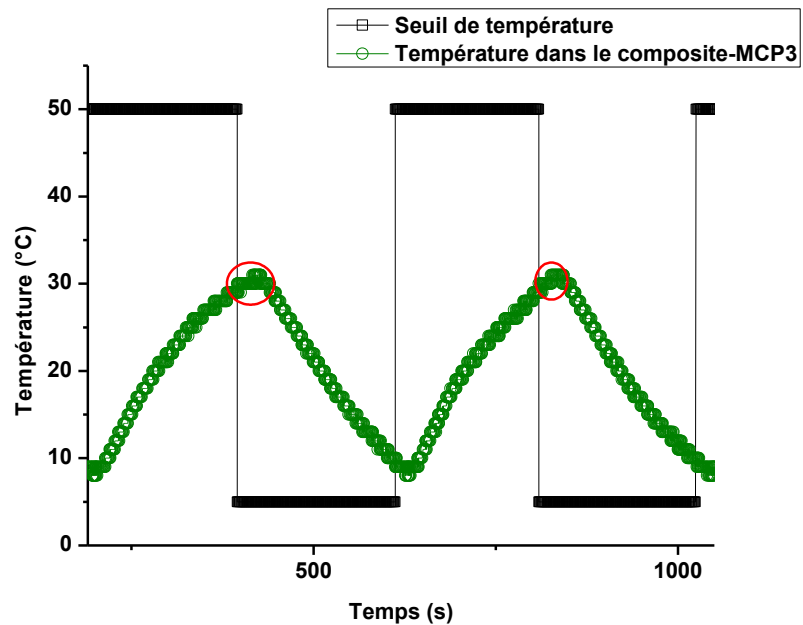


Figure 3. 69 Détail de l'évolution des températures lors d'un cycle complet de fusion cristallisation (premiers cycles).

La figure 3.70 retrace quelques uns des derniers cycles de vieillissement accéléré sur les 1000 imposés à ce matériau. Les cycles semblent identiques à ceux enregistrés au début de l'opération, mais la figure 3.71 qui détaille le profil de température avec précision pendant le cycle thermique révèle une légère modification dans la forme des pics due à une baisse du temps de retard de refroidissement enregistré lors des premiers cycles (de 45 secondes au début du cyclage, à 33 secondes à la fin du

cyclage). Ces résultats ont été vérifiés par calorimétrie différentielle à balayage.

La figure 3.72 affiche les résultats de la caractérisation par DSC avant et après vieillissement accéléré du composite-MCP. L'expérience a été réalisée sur une plage de température allant de 5 °C à 50 °C et une vitesse de 1°C/min.

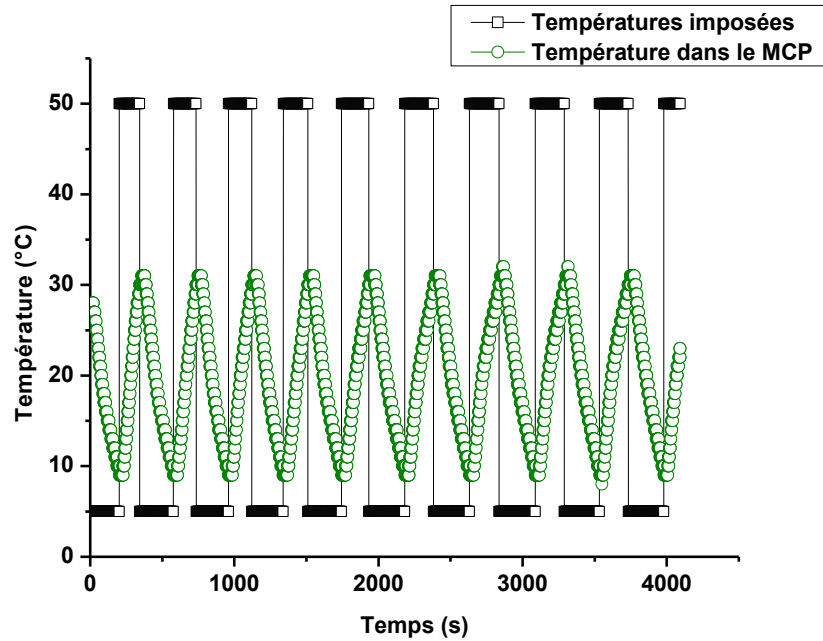


Figure 3. 70 Profil de température des derniers cycles de vieillissement accéléré.

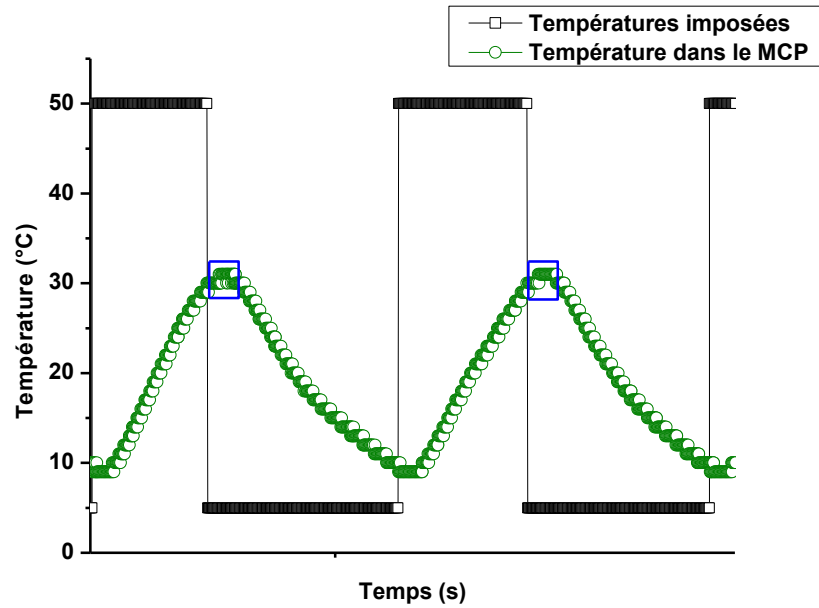


Figure 3. 71 Détail du profil de l'évolution des températures sur un cycle complet de (fusion/cristallisation) (derniers cycles)

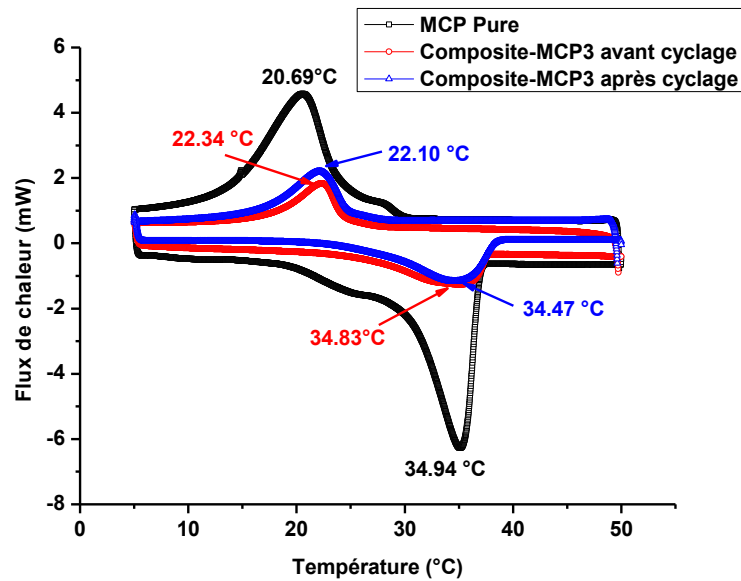


Figure 3. 72 Résultats de la DSC du composite-MCP3 avant et après le vieillissement thermique accéléré.

La courbe de couleur noir correspond au matériau à changement de phase pure avant qu'il ne soit intégré à l'intérieur de sa matrice. Les résultats montrent que celui-ci change de phase à 34.94 °C pour la fusion et 20.69 °C pour la solidification. La différence de température entre la fusion et la solidification est de 14.25 °C. Ce qui présente une surfusion qui peut être due

au fait que l'MCP ne soit pas une substance pure mais un mélange d'acide gras^{297, 298, 299}. Les valeurs de chaleur latente de changement de phase de cette substance sont de 108.83 J/g pour le stockage et de 102.14 J/g pour le déstockage.

La courbe de couleur rouge montre les résultats de DSC du nouveau composite-MCP avant de subir les 1000 cycles successifs de vieillissement thermique accéléré. Les résultats montrent que les valeurs des températures de changement de phase de celui-ci sont de 34.83 °C pour la fusion et de 22.34 °C pour la solidification. On remarque une différence de température de 12.49 °C entre le cycle de fusion et refroidissement, ce qui révèle une surfusion. Les valeurs respectives d'enthalpie de changement de phase sont de 44.87 J/g et de 40.67 J/g.

La courbe de couleur bleu présente les résultats de la DSC du nouveau matériau composite-MCP ayant subi le vieillissement thermique accéléré. Les résultats montrent que celui-ci change de phase à 34.47 °C pour la fusion et à 22.10 °C pour la solidification pour des valeurs respectives d'enthalpie de changement de phase de 45.30 J/g et de 42.66 J/g. La différence entre la fusion et la cristallisation est de 12.37 °C ce qui montre une baisse de surfusion qui peut être due au fait que certaines impuretés auraient pu être éliminées au cours du cycle thermique, en revanche la valeur de la chaleur latente de solidification a légèrement augmenté de 1.99 J/g pour le matériau après cyclage.

Les résultats montrent que le nouveau matériau composite-MCP n'a pas connue de fatigue thermique après plusieurs cycles répétitifs de vieillissement accéléré.

3.6 Conclusion

Dans le présent chapitre, les résultats de la caractérisation thermique, physico-chimique et mécanique des nouveaux MCPs bio-sourcés ainsi que des nouveaux composites-MCP élaborés à partir de composés issus du recyclage, bon marché et respectueux de l'environnement ont été présentés.

Les résultats des caractérisations réalisées sur plusieurs échantillons ayant différentes compositions en MCP et en graphite ont révélé que les matériaux dénommés composite-MCP (Argile naturelle/ graisse végétale) peuvent être de bons candidats pour des applications passives de stockage latent de la chaleur dans les enveloppes des bâtiments sous des conditions climatiques différentes.

Les propriétés thermiques des composites MCP (argile/ GVC) et (argile/GVP) sont presque similaires. Ils peuvent de la même manière assurer le stockage latent de la chaleur pour stabiliser les températures des parois autour de 25 °C sur une plage de temps. Ces deux composites ne présentent pas de surfusion.

Le dernier composite-MCP préparé travaille quand à lui sur des plages de température beaucoup plus élevées. Ses propriétés thermiques conviennent aux applications des bâtiments des climats chauds et secs, à l'instar des bâtiments des villes du sud de l'Algérie où la différence de température entre le jour et la nuit est importante. Ce matériau stocke la chaleur à plus de 30 °C et montre un phénomène de surfusion.

L'étude de la caractérisation mécanique en compression simple des éprouvettes cubiques de 50 mm x 50 mm x 50 mm du nouveau composite-MCP a révélé que le matériau ne peut être utilisé pour des applications structurelles. Celui-ci a montré une bonne tenue au cours du processus de changement de phase mais ne peut assurer aucune fonction structurelle hormis de supporter son poids propre. Sa résistance mécanique à la compression se situe dans la fourchette des valeurs de résistance à la compression admissibles des composites-MCPs retrouvées dans la littérature. Les autres résultats de caractérisation montrent que ces nouveaux matériaux de construction sont thermiquement et chimiquement stables.

Nous rappelons que l'un des plus gros défis à relever lors de la validation d'un nouveau matériau de construction composite-MCP pour n'importe quelle application de stockage latent de la chaleur doit répondre à quelques critères importants notamment : le coût du matériau, fiabilité de ses propriétés thermiques pour l'application visée (point de fusion, enthalpie,

surfusion, conductivité thermique) et enfin son aptitude à maintenir ses propriétés thermiques après plusieurs cycles de stockage déstockage de la chaleur.

Tous les composites-MCPs (Argile/ Graisse végétale) élaborés ont subi des tests de vieillissement thermique accélérés afin de vérifier leurs résistances aux cycles répétitifs (fusion/solidification). Les résultats ont prouvé que les composites-MCPs n'ont pas montré de changement de propriétés après plusieurs cycles successifs de vieillissement accéléré imposé. L'efficacité de ces nouveaux matériaux pour le stockage latent passif dans un mûr a été testée à l'échelle réelle sur un banc d'essais. Les résultats de cette étude sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

Étude du protocole d'application du nouveau matériau composite-MCP dans l'enveloppe des bâtiments

4.1 Introduction

L'identification des propriétés thermo physiques, chimiques et mécaniques des nouveaux matériaux de construction élaborés nous permet désormais de proposer un protocole d'application dans les enveloppes des bâtiments et de vérifier leur efficacité d'amélioration de la performance thermique de celles-ci. Le présent chapitre concerne la présentation des résultats des expériences menées au laboratoire sur une cellule test représentant une partie d'un mûr en brique de terre cuite dans lequel est intégré une plaque du nouveau matériau de construction composite-MCP élaboré. Les testes ont été réalisés avec les deux composites (Argile/ GVC) et (Argile/ GVP).

L'objectif est d'étudier leurs comportements thermiques respectifs à l'échelle réelle, en étant intégrés dans un bâtiment ou une partie d'un bâtiment. Par manque de matière première pour l'élaboration des plaques composites-MCPs d'une taille importante et par la non disponibilité des appareils de mesure nous permettant de travailler à l'échelle d'un bâtiment, nous avons réalisé un banc d'essais à petite échelle afin de tester expérimentalement la performance thermique d'une partie d'un mûr dans lequel est intégré le nouveau matériau composite-MCP.

Les mesures de température et de flux ont été réalisées au moyen de thermocouples de type « K » et de fluxmètre connectés à un enregistreur de données, couplé à un ordinateur. Les détails des expériences et les résultats obtenus sont développés dans le présent chapitre.

4.2 Principe de conception du protocole d'application du nouveau matériau dans l'enveloppe des bâtiments

Le nouveau matériau de construction composite-MCP a été testé à l'intérieur de la lame d'air d'une paroi double cloison de brique de terre cuite. Notre choix s'est orienté vers l'application du nouveau matériau de construction sur ce type de structures en raison de leur utilisation très répandue à travers l'ensemble des territoires méditerranéens et en particulier dans toute l'Algérie, à travers l'ensemble de ses zones climatiques.

Ce système constructif est adopté en Algérie sans aucune prise en compte de son impact sur les ambiances thermiques intérieures des bâtiments et des consommations d'énergie liées au maintien d'un niveau de confort acceptable.

Des études ont montré que ce type de constructions est responsable de plus de 70 % de consommation d'énergie due à la climatisation en saison estivale notamment dans le sud de l'Algérie et que le maintien des conditions de confort thermique à l'intérieur de ces constructions revient à l'installation des systèmes de climatisation dans chaque local d'une même maison¹⁰.

Face à ces problèmes non sans importance, la prise en charge de ce type d'enveloppes de bâtiments est une priorité qui apparaît donc comme un enjeu majeur d'un développement urbain durable des villes algériennes et des économies d'énergie dans le bâtiment.

Les travaux scientifiques ayant traité de l'amélioration de la performance thermique de ce type d'enveloppes proposent d'améliorer l'isolation thermique pour y remédier, mais cette technique a malheureusement connu ses limites. Car si l'isolation thermique est connue pour limiter les déperditions de chaleur liées au chauffage en période hivernale, elle est souvent responsable des surchauffes et des montées en température dans les ambiances intérieures en saisons estivales^{300, 301}.

Afin de remédier à cette situation, il convient donc d'agir sur l'inertie thermique des enveloppes³⁰². Ceci est rendu possible grâce à l'intégration des MCPs dans les matériaux des enveloppes de bâtiments. La majeure partie des

travaux de recherche qui traitent de l'amélioration de la performance thermique des structures en brique de terre cuite par l'intégration des MCPs propose de remplir les cavités de ces briques perforées de MCP dont les coûts peuvent parfois être exorbitants^{304, 305, 306, 307}.

Ce travail de thèse se propose de regarder le comportement d'une paroi en briques de terre perforées non modifiées par l'intégration des MCPs, la plaque du nouveau matériau composite-MCP est placée à l'intérieur de la lame d'air sur la face de la cloison intérieure de la brique. C'est sur cette base que nous avons construit le banc d'essais qui nous permettra par la suite de réaliser des mesures de profils de températures.

4.2.1 Les transferts de chaleur dans les parois en brique de terre cuite

L'enveloppe du bâtiment est la partie que doit réfléchir un architecte dès les premiers traits de ses esquisses, de sorte à ce qu'elle réponde aux sollicitations climatiques et aux impératifs de confort des occupants d'une part, et de durabilité de la construction d'autre part. En effet, comme tout autre type d'enveloppes de bâtiments, la paroi en brique de terre cuite très répandue dans les constructions des pays méditerranéens tels : l'Algérie, l'Espagne...etc. est le siège des transferts de chaleur qui déterminent le niveau de performance énergétique des bâtiments^{308,382} pour lesquels elles constituent des enveloppes.

La figure 4.1 montre la configuration de la paroi en brique de terre cuite avec et sans l'intégration du composite-MCP ainsi que les transferts de chaleur qui se produisent à l'intérieur des parois dans le cas des deux configurations.

La performance thermique de la paroi classique (Fig.4.1 a), très répandue dans l'industrie de la construction, dépend de la résistance thermique notée « R » de chacune des couches qui la composent. Dans ce cas, la résistance thermique est en relation directe avec l'épaisseur (e) et la conductivité (λ en W/m.K) de chaque matériau de la paroi. Son inertie thermique dépend de la masse des matériaux (m) qui la composent et de leurs chaleurs spécifiques (C_p).

$$\Phi = m \cdot C_p \cdot \Delta. \quad \dots\dots\dots(1)$$

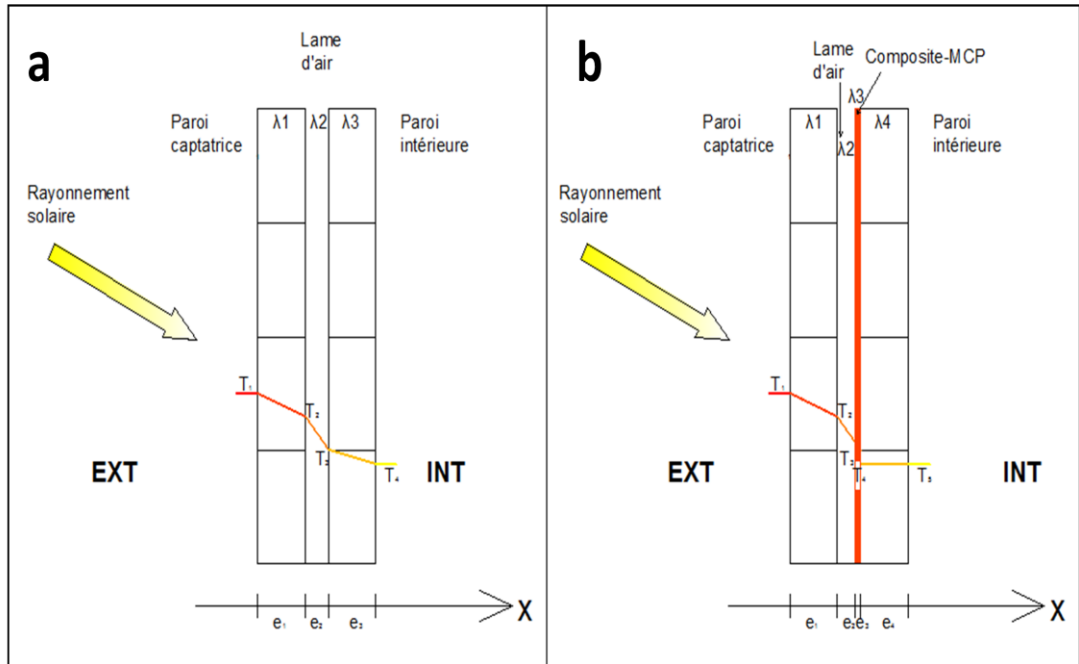


Figure 4. 1 : Transferts de chaleur dans la paroi de brique double cloison : a) sans MCP, b) avec MCP

Dans le cas de la figure 4.1 b, l’inertie thermique de la paroi dépend non seulement de la masse et de la chaleur spécifique des matériaux qui la composent, mais essentiellement de l’enthalpie (L) de changement de phase du composite-MCP intégré dans sa lame d’air.

$$\Phi = m.Cp.\Delta T + m.L \dots\dots\dots(2)$$

L’intégration du composite-MCP ne contribue guère à l’amélioration de la résistance thermique de la paroi, puisque celui-ci est d’une faible épaisseur et d’une conductivité thermique assez élevée par rapport aux isolants. Mais ces matériaux contribuent significativement à l’amélioration de l’inertie thermique par le stockage latent du flux thermique à température constante.

4.2.1.1 La paroi captatrice

La paroi captatrice est la première cloison de l’enveloppe directement exposée aux conditions climatiques extérieures, notamment au rayonnement solaire. Le rendement des matériaux à changement de phase dépend dans ce cas du flux de chaleur capté par cette paroi et conduit dans l’épaisseur de celle-ci pour solliciter le composite-MCP. Les matériaux ne pourraient donc

effectuer les cycles de stockage/ déstockage du flux de chaleur sans qu'il y ait un flux de chaleur déclencheur du changement de phase. C'est pour cela que nous proposons de l'appliquer sur les parois Sud, Est et Ouest des bâtiments. Ce sont celles qui reçoivent le plus de rayonnement solaire et celles qui influencent significativement les variations de température dans les ambiances intérieures.

4.2.1.2 La lame d'air

La lame d'air a une incidence majeure sur le processus de stockage et de déstockage du composite-MCP. C'est pour cela que nous avons proposé d'intégrer le composite-MCP dans les enveloppes des bâtiments à double cloison de brique en gardant la configuration initiale de la paroi à lame d'air.

Les chercheurs ont prouvé que la configuration de la lame d'air elle-même peut influencer le fonctionnement du composite-MCP. Une lame d'air ventilée permet de restituer de manière instantanée l'énergie stockée par le MCP vers les ambiances intérieures³⁰⁹. Par contre, une lame d'air non ventilée permet la restitution de la chaleur stockée avec un déphasage par rapport à la période d'ensoleillement^{308, 310, 311,312}.

La seconde configuration de lame air non ventilée est plus susceptible de répondre à nos objectifs de recherche. C'est pour ces raisons que nous proposons de construire notre banc d'essais suivant cette configuration, nous mettons en perspectives de tester d'autres.

4.2.1.3 La paroi de stockage

La paroi de stockage a pour rôle de stocker les flux de chaleur excédentaires pendant les périodes de surchauffe et de les restituer au moment où ils sont le plus utiles. Son efficacité dépend du flux de chaleur conduit par la paroi captatrice, de la chaleur sensible de la matrice et de la chaleur latente du composite-MCP, qui à son tour dépend de la quantité de MCP qui s'y trouve dans le matériau ainsi que de ses propriétés thermo physiques. C'est pour cela que nous avons retenu pour le test les composites-

MCPs ayant justifié une enthalpie de changement de phase élevée et une bonne quantité de rétention de MCP.

4.3 Description du dispositif expérimental

Le banc d'essais (Fig.4.2) consiste en une portion d'un mûr en brique de terre cuite (8 trous, $e = 10$ cm) construit en double cloison avec une lame d'air de 5 cm séparant les deux parois. Un flux de chaleur constant est envoyé sur cette partie du mur sur une période de 8h en utilisant une lampe d'une puissance de 75 W. (Fig.4.2).

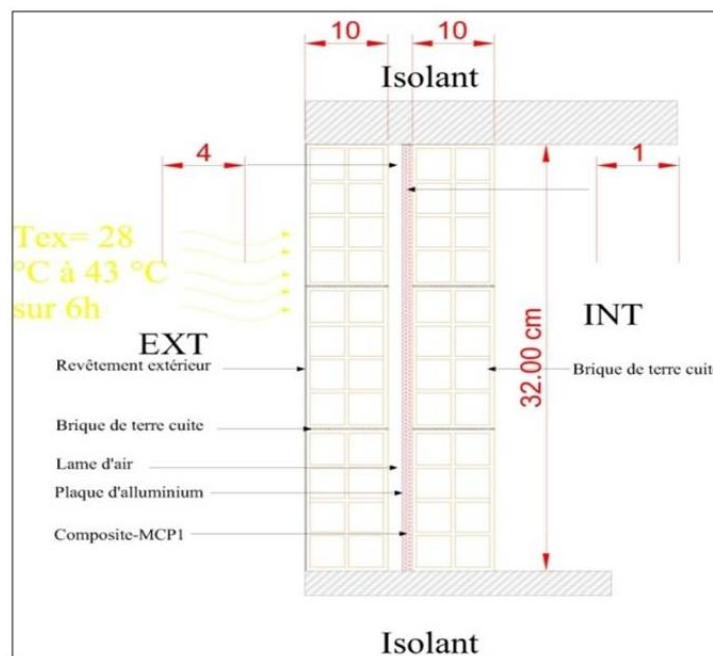


Figure 4. 2 : Configuration de la paroi en brique de terre cuite double cloison.

La figure 4.3 donne un aperçu général du banc d'essais, les expériences se déroulent dans un environnement parfaitement isolé des conditions du laboratoire. Le boîtier dans lequel se produisent les mesures est conçu avec des panneaux sandwich en bois et polystyrène expansé (Fig. 4.4 a) qui à son tour est isolé par une autre coque de polystyrène recouverte de feuilles d'aluminium (Fig. 4.4 b) pour éviter tout transfert surfacique par rayonnement entre l'environnement du laboratoire et l'environnement de la simulation. Tous les joints ont été recouverts de fibres de coton pour éviter les pertes par les ponts thermiques linéaires.

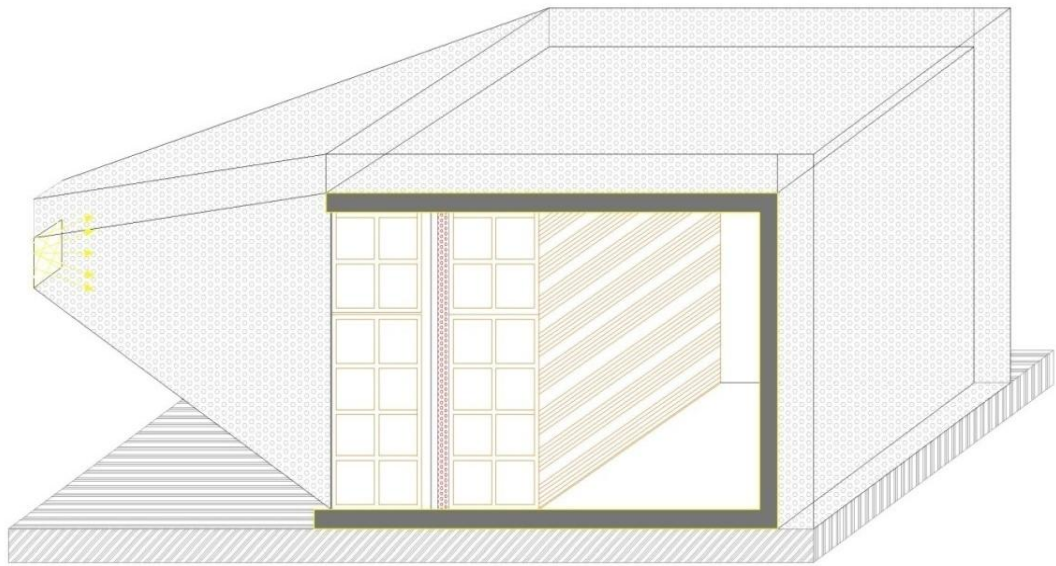


Figure 4. 3 : Schéma de principe du banc d'essais



Figure 4. 4 : Image du banc d'essai monté : a) sans la double coque d'isolation, b) avec la double coque d'isolation.

Les parois intérieures du banc d'essais sont elles aussi recouvertes de film en aluminium afin d'éviter les transferts de chaleur par rayonnement du milieu intérieur vers le milieu extérieur (Fig. 4.5).



Figure 4. 5 : Image des parois intérieures du banc d'essais

La paroi captatrice est sollicitée par un flux de chaleur dégagé par une lampe de 75 W fixée au sommet d'une pyramide tronquée renversée dont la base constitue la paroi de brique de terre cuite captatrice du flux de chaleur. Les parois intérieures de la pyramide sont recouvertes elles aussi de film aluminium afin de réfléchir et recentrer le rayonnement vers la paroi captatrice.

Il existe dans la littérature des travaux qui portent sur des cellules tests de vérification de la performance thermique des parois verticales intégrant des MCPs par le recours à des bancs d'essais équipés de lampes émettrices de flux de chaleur semblables à celui que nous avons monté^{213, 214, 215, 377}.



Figure 4. 6 : Image du dispositif émetteur du flux de chaleur sur la paroi de brique de terre cuite

La lampe est fixée à l'intérieur d'un boîtier isolé recouvert de feuilles d'aluminium. Elle est conçue de sorte à rayonner à travers un diaphragme de 30 mm de diamètre. L'objectif est de réduire la surface de rayonnement de la lampe et donc la puissance du rayonnement afin d'éviter les risques de surchauffe sur la paroi captatrice d'une part, et que la température de celle-ci ne dépasse les températures normales obtenues sur les parois de bâtiments.

La paroi de stockage constituée du matériau composite-MCP est elle aussi recouverte d'un film en aluminium afin de mieux conduire le flux de chaleur vers l'intérieur de celle-ci et faciliter les phénomènes de stockage et de déstockage de la chaleur. La partie de la paroi de stockage faisant face à la paroi captatrice (Fig. 4.7b) est peinte en noir afin d'absorber au maximum le rayonnement incident vers l'intérieur de la paroi de stockage. La partie de la paroi de stockage orientée vers la chambre représentative de l'ambiance thermique est une face réfléchissante qui permet de renvoyer vers l'intérieur le flux de chaleur sortant par échange radiatif (Fig. 4.7a).

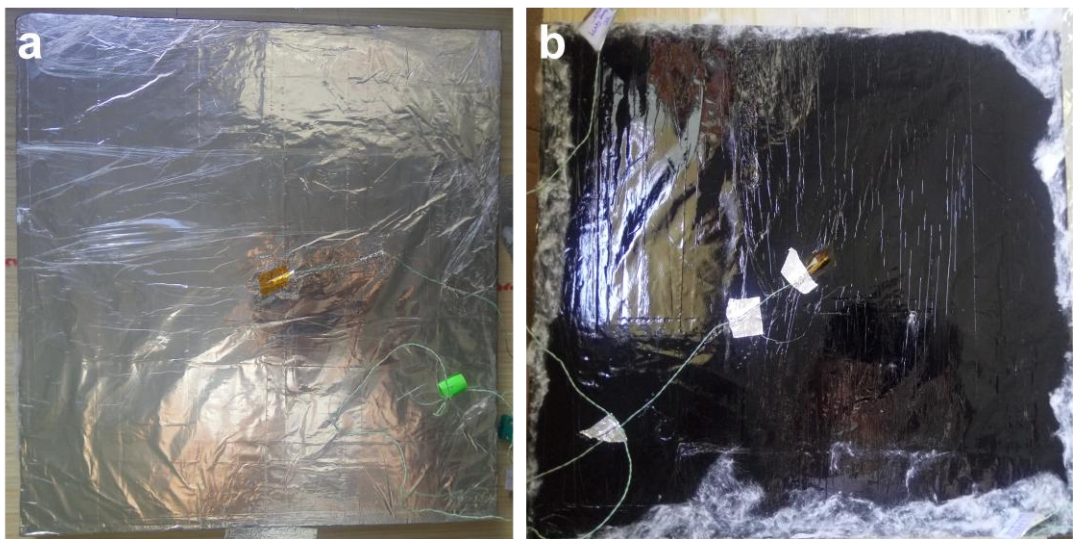


Figure 4. 7 : Image de la paroi de stockage intégrée dans le banc d'essais: a) face intérieure, b) face extérieure

La figure 4.8 donne une image de la paroi double cloison en brique de terre cuite intégrant la paroi de stockage composite-MCP à l'intérieur du banc d'essais. C'est sur cette paroi que toutes les mesures ont été réalisées.

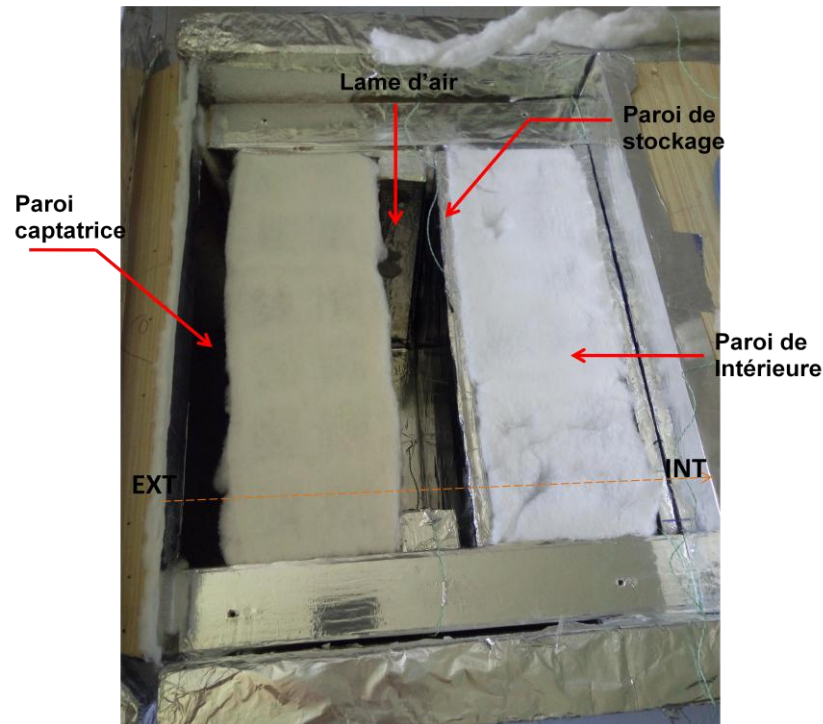


Figure 4. 8 : Image de la paroi de brique de terre cuite dans le banc d'essai.

4.4 Description des instruments de mesure

Les mesures de températures et de flux de chaleur ont été prises à différents points de la paroi testée avec et sans l'intégration de la paroi de stockage composite-MCP. L'objectif est de connaître l'impact de l'intégration de cette paroi-MCP sur la performance thermique de ce type d'enveloppes.

Les mesures de températures ont été réalisées au moyen de thermocouples type « K » tandis que la mesure du flux de chaleur à la surface de la paroi captatrice s'est faite à l'aide d'un fluxmètre. Les thermocouples et le fluxmètre sont connectés à un enregistreur de données PICO TECHNOLOGY de type PICOLOG TC-08, qui à son tour est connecté à un ordinateur. L'acquisition et le traitement des données s'est faite avec le logiciel « PICOLOG DATA LOGGING SOFTWARE ».

4.4.1 L'enregistreur de données PICOLOG TC-08

C'est un appareil d'acquisition et d'enregistrement de haute résolution (Fig.4.9) des données de thermocouples. Il est équipé de 8 entrées dont il peut traiter les données simultanément. Les mesures se font de manière très rapide

et précise. C'est un appareil qui permet de détecter des variations de température infiniment petites de l'ordre de $0.025\text{ }^{\circ}\text{C}$ grâce à sa haute résolution 20 bits. Les données enregistrées peuvent être visualisées instantanément en mode tableau ou graphique grâce au lecteur « PLW » du logiciel « PICOLOG DATA LOGGER » en connectant l'appareil à un micro-ordinateur par connexion USB.

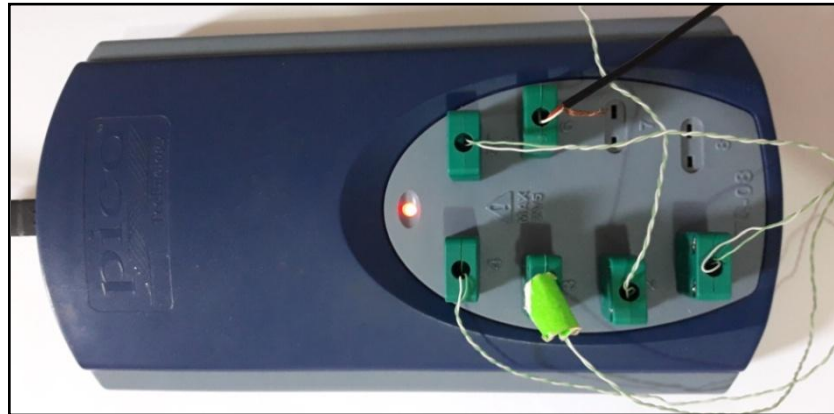


Figure 4. 9 : Image de l'enregistreur de données Thermocouples PICOLOG TC-08

4.4.2 Les thermocouples

Les thermocouples utilisés dans la présente étude sont des thermocouples à fil de type K dont le diamètre de la sonde est de 1.5 mm et le temps de réponse de l'ordre de 0.7 s. Ce type de thermocouple travaille sur des plages de température allant de $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ils ont été utilisés comme capteurs de températures sur les différents points de la paroi multicouches de brique de terre cuite.

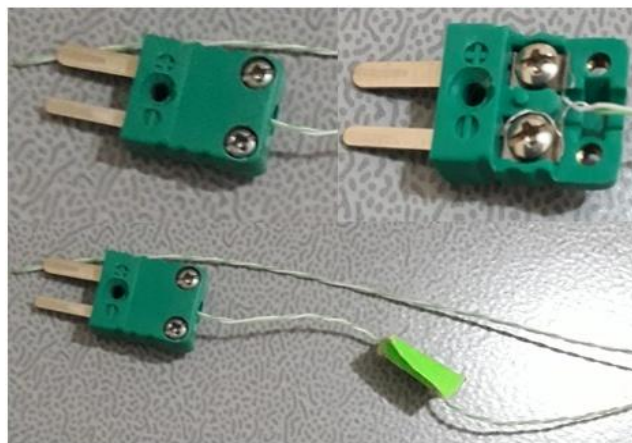


Figure 4. 10 Image des thermocouples type "K" utilisés.

4.4.3 Le fluxmètre thermique

Le fluxmètre thermique (Fig. 4.11a) est un capteur de flux de chaleur qui traverse une surface. C'est un dispositif très fin en forme de plaque dont l'utilisation très simple consiste à le coller sur la face sur laquelle doit s'effectuer la mesure (Fig. 4.11b). Celui-ci mesure tout simplement le flux de chaleur qui le traverse. Le fluxmètre thermique utilisé dans le banc d'essais que nous avons construit a été plaqué contre la paroi captatrice faisant face à la lampe émettrice du flux. L'objectif étant d'estimer le flux de chaleur à la surface de la première cloison du banc d'essais.

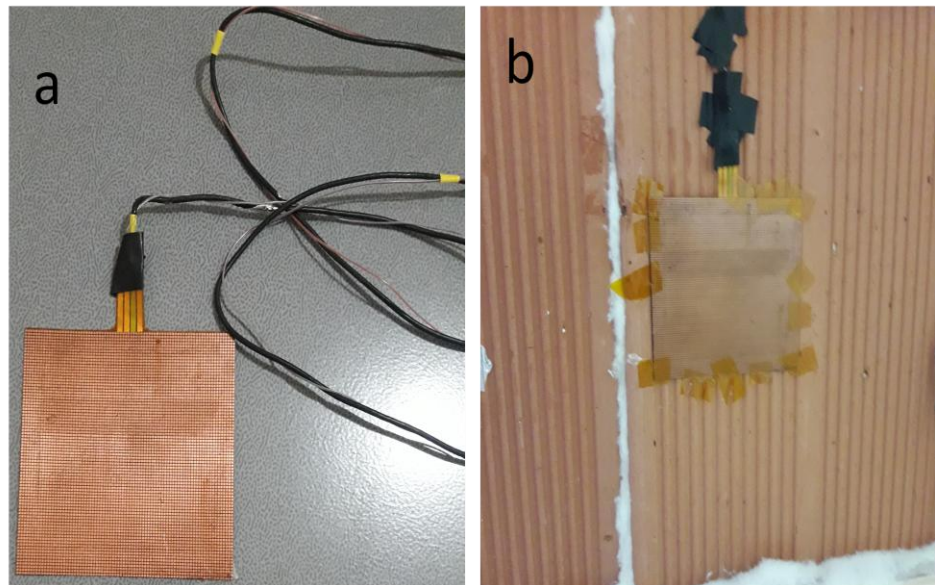


Figure4. 11 a) Image du fluxmètre thermique, b) fluxmètre thermique sur la paroi à mesurer

4.5 Mesures effectuées sur le banc d'essais

4.5.1 Étalonnage des thermocouples

Les mesures effectuées sur le banc d'essais ont été réalisées sur une succession de points alignés de la paroi sollicitée afin de suivre le flux de chaleur traversant et comparer le comportement thermique des différentes couches avant et après l'intégration de la paroi de stockage composite-MCP (Fig. 4.13).

Avant de commencer les mesures, une opération d'étalonnage des thermocouples a d'abord été réalisée au laboratoire à l'aide d'un bain thermostaté ; tous les thermocouples ont été numérotés et étiquetés puis fixés autour d'un tube PVC de 18 mm de diamètre de sorte à ce que leurs extrémités ne se touchent pas (Fig. 4.12).

Le tube porteur des thermocouples est ensuite plongé à l'intérieur d'un bain thermostaté dont la température de l'eau est réglée à 31.2 °C. Par mesure de vérification, la température de l'eau a été prise également avec un thermomètre à mercure. Le tube a été fixé à l'aide d'un porte-burette pour éviter tout mouvement de l'eau qui risque de créer de la convection et fausser les mesures d'une part, et pour s'assurer que les thermocouples soient tous placés à la même hauteur d'autre part.

Le tableau 4.1 donne les résultats des mesures de la température de l'eau prise par chacun des thermocouples. Les thermocouples 1, 4, 5 et 6 affichent des différences de température d'environ 1 °C par rapport à la température du fluide contenu dans le bain thermostaté. Les thermocouples 2 et 3 affichent un écart de l'ordre de 2°C.



Figure 4. 12 Protocole expérimental d'étalonnage des thermocouples.

Tableau 4. 1: Les différentes températures mesurées par les thermocouples

Thermocouple	Température mesurée (°C)	Différence de température (°C)
1	32.14	+0.94
2	33.31	+2.11
3	32.24	+1.04
4	32.12	+0.92
5	32.33	+1.13
6	32.22	+1.02

4.5.2 Résultats des mesures de température effectuées sur le banc d'essais

Les expériences ont été réalisées sur la paroi de la cellule test dans trois cas différents : dans le cas de la paroi sans MCP (Fig. 4.13b), dans le cas de la paroi avec le composite-MCP (argile/GVC) et dans le cas de la paroi avec le composite-MCP (argile/GVP). Les mesures de températures ont été prises aux points indiqués sur la figure 4.13. Les 5 thermocouples ayant affiché des petits écarts par rapport à la température attendue ont été retenus pour être utilisés dans le processus de mesure. Le thermocouple N° 02 n'a pas été utilisé en raison du gros écart de température qu'il a enregistré par rapport à la température de l'eau.

Le thermocouple et le fluxmètre placés au point P1, mesurent respectivement l'évolution de la température de la paroi exposée directement à la source de chaleur ainsi que le flux de chaleur à la surface de la paroi (flux traversant).

Le thermocouple placé au point P2 de la figure 4.13 mesure la température de la lame d'air avec le composite-MCP intégré, tandis que ceux placés aux points P3 et P4 de la même figure mesurent les températures à l'intérieur de la paroi de stockage composite-MCP sur la face exposée à la paroi captatrice ainsi que sur la face en contact avec la paroi intérieure.

Le thermocouple placé au point P5 de la figure 4.13a donne la température de la surface intérieure de la paroi interne qui a une incidence directe sur les températures des ambiances intérieures.

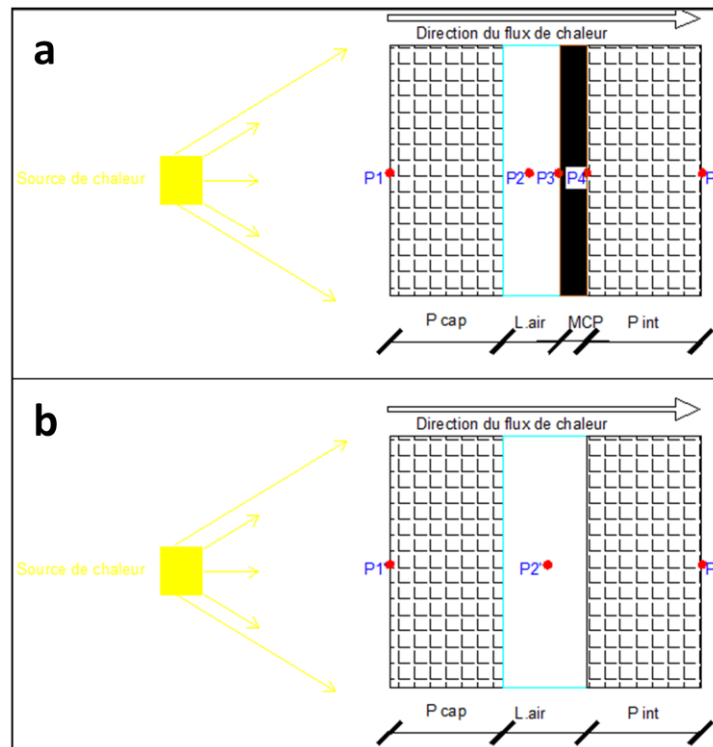


Figure4. 13 Schéma des différents points de mesure.

4.5.2.1 Les mesures de température au point (P1)

La figure 4.14 montre l'évolution des températures enregistrées à la surface de la paroi captatrice dans les deux cas de figure a et b. L'expérience a été menée de sorte à porter la température de cette paroi à des températures que l'on enregistre sur les parois les plus exposées au rayonnement solaire estival dans les bâtiments localisés sous des climats chauds (sud de l'Algérie) ou sous des climats méditerranéens en journée caniculaire. Les expériences ont été réalisées sur une durée de 8h, ce qui peut représenter sur la réalité une période estivale de fort ensoleillement qui peut s'étaler de 9h :00 à 17h :00.

Les températures au point P1 aux premières heures de l'envoi du flux de chaleur varient entre 25 °C et 35 °C, celles-ci montent progressivement vers 40 °C durant la seconde plage de temps pour enfin atteindre des températures de 45°C à 50 °C. Ce résultat a été comparé à ceux obtenus par des chercheurs ayant mesuré les températures de parois de bâtiments réels exposées au rayonnement solaire naturel en saison estival sous le climat du

sud algérien ainsi que sous le climat de la ville d'Alger en journée caniculaire du mois de juillet^{315, 316, 317, 318, 319}.

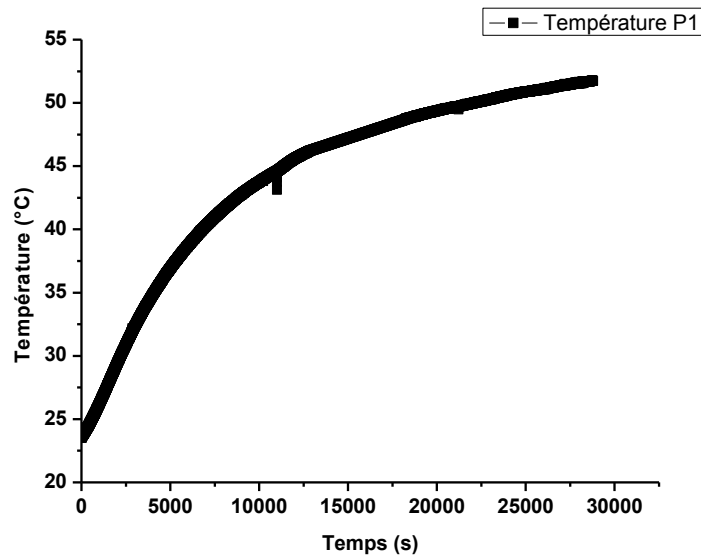


Figure4. 14 Évolution de la température extérieure à la surface de la paroi captatrice.

4.5.2.2 Les mesures de température au point P2 avec et sans la paroi de stockage composite-MCP

La figure 4.15 montre l'évolution des températures à l'intérieur de la lame d'air (aux points dénommés, P2 et P2') dans les trois cas de figure d'expérimentation énumérés ci-dessous : sans MCP, avec une paroi de stockage construite à partir du composite-MCP(GVC) et avec une paroi de stockage construite avec le composite-MCP(GVP).

Les conditions de flux et de température imposés sont ceux enregistrés sur la face extérieure de la paroi captatrice⁵. Les trois mesures ont été effectuées sous les mêmes conditions expérimentales.

Les températures enregistrées dans la lame d'air intégrant le composite-MCP1(GVC) et celles enregistrées avec une lame d'air intégrant le composite-MCP2(GVP) sont pratiquement similaires, les courbes respectives correspondantes observées sur la figure 4.16 en noir et en rouge sont presque superposées. Ce résultat est dû au fait que les deux composites-MCP élaborés

⁵ "Supra" : page 174

à partir d'une même matrice argileuse et deux MCPs différents (deux graisses végétales) aient des propriétés thermiques presque similaires. Cela a préalablement été montré par les résultats de la caractérisation thermique par DSC.

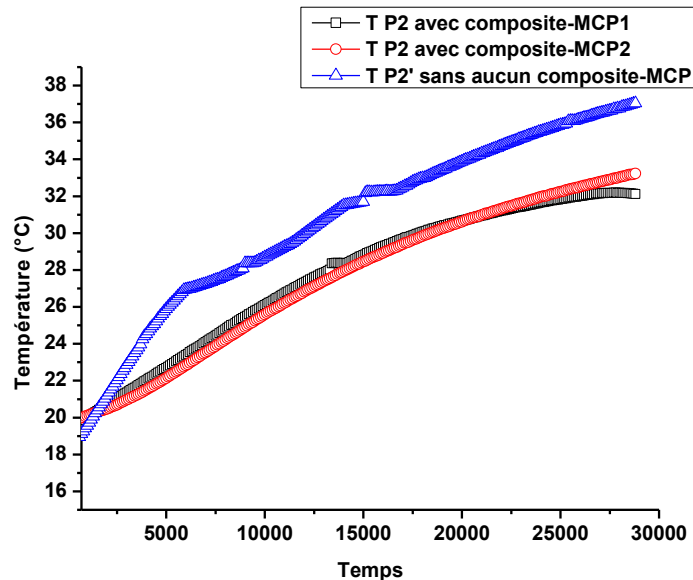


Figure4. 15 Comparaison de l'évolution des températures à l'intérieur de la lame d'air avec le composite-MCP1, le composite-MCP2 et sans MCP.

Les températures enregistrées dans la lame d'air sans composite-MCP sont supérieures à celles enregistrées dans le cas de l'intégration de la paroi de stockage composite-MCP de 5 °C. Cela signifie que la paroi composite-MCP a réellement stocké une partie du flux de chaleur transmis à travers la paroi captatrice.

4.5.2.3 Les mesures de température aux points P3 et P4 des parois de stockage

Les figures 4.16 et 4.17 donnent l'évolution des températures à l'intérieur des parois de stockage conçues respectivement à partir des composite-MCP1 et composite-MCP2. Les résultats montrent que les températures dans les deux points de mesure (P1 et P2) sont identiques pour chaque paroi, par conséquent les courbes se superposent.

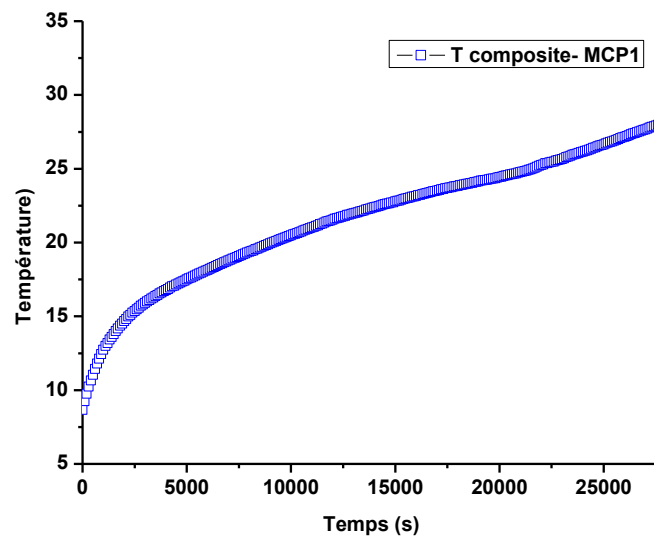


Figure4. 16 Évolution des températures dans le composite-MCP1

Il est important de noter que les mesures de température ont été effectuées en saison estivale où les conditions de température du laboratoire, sont presque égales aux points de fusion respectifs des parois de stockage et ne nous permettaient pas d'observer le palier de stockage latent. C'est pour cela que nous avons fait descendre les températures de ces parois en dessous de leurs points de fusion avant de les réinsérer dans le banc d'essais pour la prise des mesures.

La figure 4.16 montre que la température de la paroi de stockage est montée de plus de 5 °C en l'espace de 2h. Ce qui correspond au premier palier de stockage sensible du matériau. À $T \approx 20$ °C, la température de ce matériau s'est plus ou moins stabilisée car elle s'approche de la température de début de fusion du composite-MCP1. Entre 20 et 25 °C, l'augmentation de la température s'est faite progressivement sur une période de près de 5 h. Ainsi nous pouvons dire que la température a été stabilisée autour des températures de confort de l'être humain sur une plage de temps assez importante. Cette étape correspond au palier de changement de phase du composite-MCP. À partir de $t=22000$ s, l'augmentation rapide de la température reprend pour atteindre les 29.5 °C, ce qui correspond au second palier de stockage sensible qui se place après le palier de changement de phase.

En conclusion, la paroi composite-MCP1 a une bonne capacité de stockage de chaleur qui permet de stabiliser les températures des enveloppes des bâtiments autour des zones de confort.

La figure 4.17 montre l'évolution des températures à l'intérieur de la paroi de stockage composite-MCP2.

Pour les mêmes raisons précitées dans le cas de la paroi de stockage composite-MCP1, la température de celle-ci a été apportée en dessous du point de fusion (15 °C) avant de l'intégrer dans le banc d'essais pour la prise de mesure.

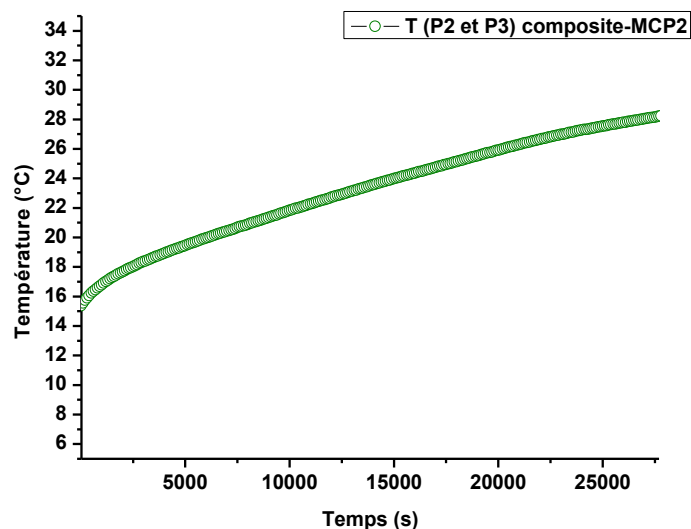


Figure4. 17 Évolution des températures à l'intérieur du composite-MCP2

La température initiale de la paroi de stockage étant presque égale à celle du début de fusion du composite-MCP2, le premier palier de stockage sensible n'est pas très visible.

La température de la paroi de stockage reste plus ou moins stabilisée autour de 24 °C sur une période assez importante (5000s à 22000s), elle varie de $21\text{ à }27\text{ °C}$, ce qui correspond au palier de changement de phase de celle-ci.

Malgré un flux de chaleur important transmis à travers la paroi captatrice, la température de la paroi de stockage composite-MCP2 reste stabilisée autour des températures de confort sur une période de plus de 6 h

pour atteindre une température de 28.5 °C au bout de 8h de sollicitation thermique par un flux de chaleur constant.

4.5.2.4 Les mesures de températures sur les faces internes des parois intérieures

La figure 4.18 montre l'évolution des températures enregistrées à la surface interne de la paroi intérieure ayant une incidence directe sur les ambiances intérieures avec et sans l'intégration de la paroi composite-MCP.

Il est important de noter que cette paroi a été sollicitée par le flux de chaleur enregistré à la surface extérieure de la paroi externe⁶. La température initiale de la face interne de la paroi mesurée est de 26 °C avant le début de la sollicitation thermique dans les deux cas (sans la paroi de stockage composite-MCP et avec la paroi de stockage composite-MCP).

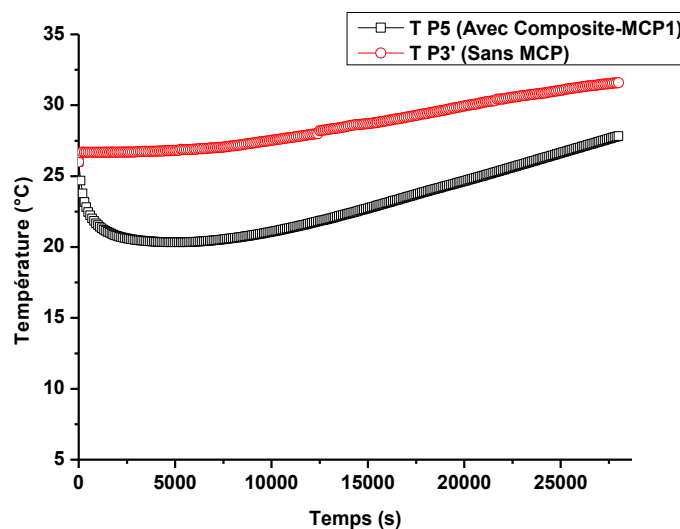


Figure 4. 18 Évolution des températures sur la face interne de la paroi intérieure

La courbe en rouge montre que la température de la paroi sans le composite-MCP augmente progressivement sur la période de mesure (de 0 à 28800s) de 26 °C pour atteindre les 32.5 °C. Il est important de noter que contrairement à ce qui est réalisé sur les chantiers de construction, la lame

⁶ "Supra" : page 175

d'air ($e = 5 \text{ cm}$) a été conçue sur le banc d'essais de sorte à remplir pleinement son rôle de couche d'air immobilisé pour l'isolation.

La courbe de couleur noire montre quand à elle l'évolution des températures de la surface interne de la paroi intérieure intégrant la paroi de stockage composite-MCP. Une baisse de température de la paroi intérieure initialement à 26 °C a été observée. Celle-ci atteint les 22.5 °C pour varier plus ou moins entre 23 °C et 25 °C entre 5000 s et 22000 s . Ce palier correspond au changement de phase de la paroi de stockage. Cela signifie qu'il y a eu un transfert de chaleur de la paroi intérieure vers la paroi de stockage. À partir de $t=22000\text{s}$ l'augmentation de la température de la paroi se fait plus rapidement pour atteindre les 27 °C vers la fin du test. C'est la seconde phase du stockage sensible.

En comparant les températures en fin du test, nous observons que la température de la paroi sans composite-MCP a atteint les 32.5 °C tandis que celle intégrant la paroi de stockage composite-MCP atteint les 27 °C . On observe une différence de 5.5 °C entre les deux parois. Ce résultat prouve qu'une partie du flux de chaleur traversant a été stockée dans la paroi de stockage composite-MCP. L'intégration de la paroi du composite-MCP a donc contribué à l'amélioration de la performance thermique du mûr testé.

La figure 4.29 montre l'évolution des températures à la face intérieure de la paroi sollicitée thermiquement avec le flux de chaleur⁷

⁷ "Supra" : page 175

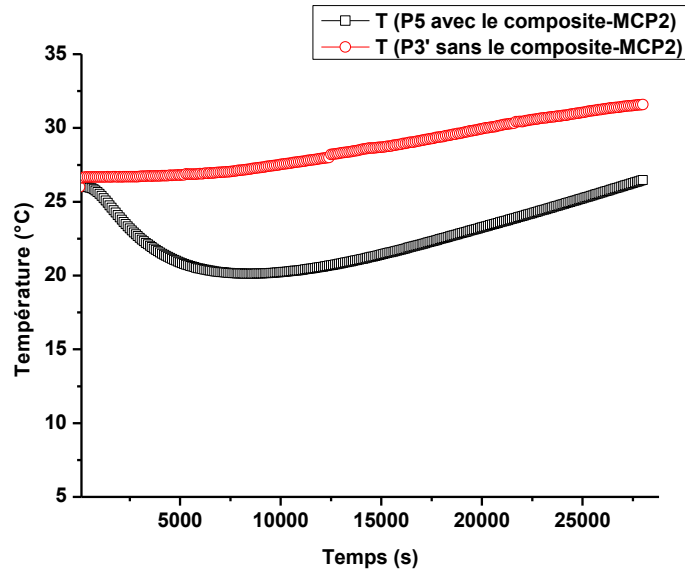


Figure4. 19 Évolution des températures de la paroi intérieure avec et sans le composite-MCP2

Comme dans le cas discuté précédemment dans le cas de l'application du composite-MCP1, les mêmes phénomènes se produisent dans le cas de l'intégration de la paroi de stockage composite-MCP2. Il est important de noter que les températures initiales des parois intérieures dans les deux cas étaient de 26 °C (avec et sans le composite-MCP).

La courbe en rouge montre une augmentation continue de la chaleur mesurée sur la face interne de la paroi sans MCP de 26 °C à 32.5 °C sur la plage de temps de mesure.

La courbe de couleur noire, montre quant à elle une baisse de la température de la paroi interne à partir de $t=5000$ s, ceci est dû au déclenchement du processus de stockage de la chaleur à l'intérieur de la paroi de stockage composite-MCP2. Ce qui signifie qu'il y a eu transfert de chaleur de la paroi interne vers la paroi de stockage (car la température initiale de cette paroi était supérieure à la température de changement de phase du composite-MCP).

L'augmentation de la température de la paroi interne reste dans ce cas insignifiante. Elle varie entre 23 °C et 26 °C pour atteindre les 27 °C à la fin du temps de mesure, ce qui correspond à la zone de confort. Une différence de température de plus de 5 °C a été enregistrée entre la paroi sans MCP et la paroi intégrant le composite-MCP2.

La paroi interne affiche un comportement thermique similaire dans le cas de l'application du composite-MCP1 et du composite-MCP2 car ces deux composites ont des propriétés thermiques presque similaires.

4.5.2.5 Superposition des profils de température de la paroi multicouche composite-MCP

Les figures 4.21 et 4.22 montrent les profils de température de chacune des couches composant la paroi composite brique de terre cuite testée au laboratoire en intégrant respectivement la paroi de stockage composite-MCP1 et composite-MCP2 dans leurs lames d'air de 50 mm d'épaisseur.

Il est important de noter que les températures initiales des parois aux points (P1) et (P5) sont déterminées par les conditions thermiques du laboratoire (26 °C) en période estivale. La lame d'air (50 mm) affiche quant à elle une température initiale différente car celle-ci a été isolée des conditions du laboratoire en. (Fig.4.20).

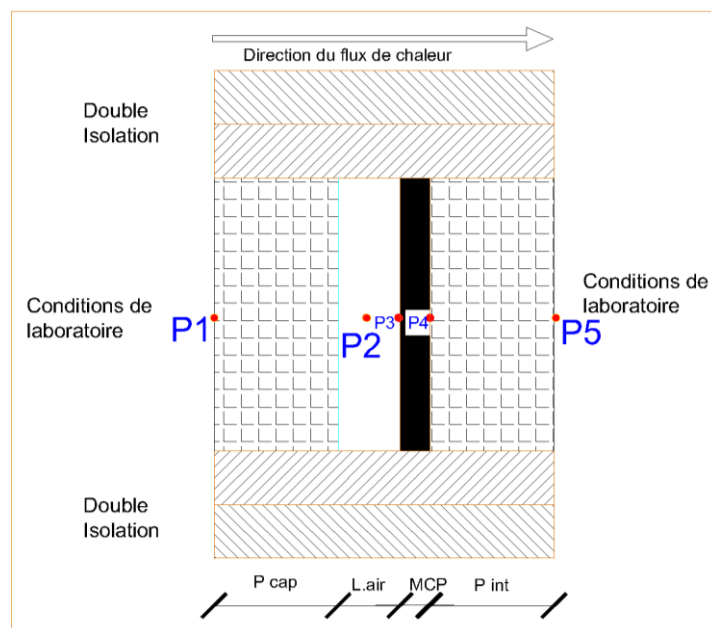


Figure4. 20 La paroi multicouche avant début des tests dans le banc d'essais.

On considère que le flux de chaleur imposé est unidirectionnel et que les températures des parois sont complètement isolées des autres influences thermiques après le début des mesures à l'intérieur du banc d'essais.

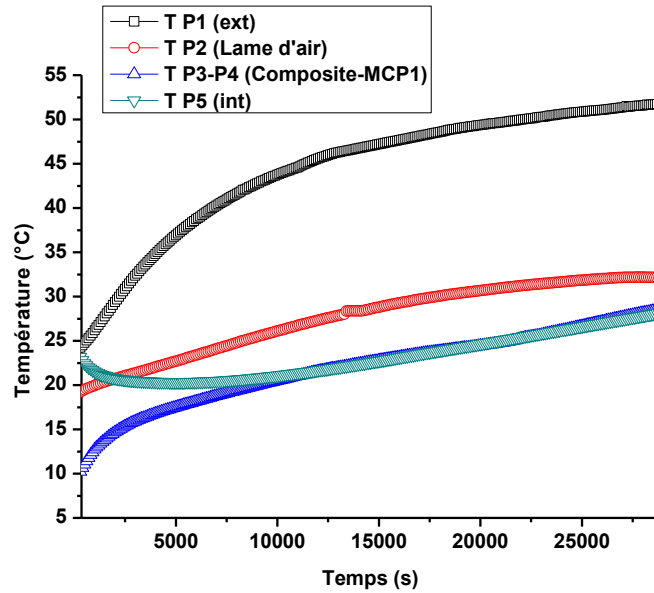


Figure 4. 21 Superposition des profils des températures des différentes couches de la paroi intégrant le composite-MCP1

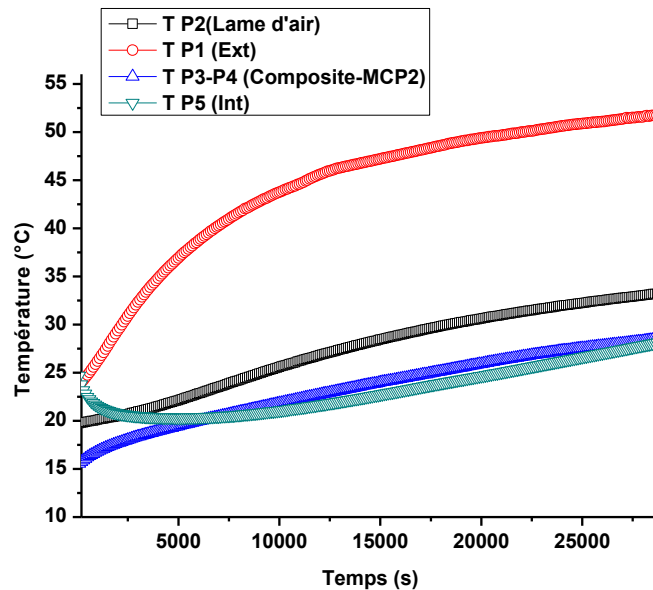


Figure4. 22 Superposition des profils de température des différentes couches de la paroi intégrant le composite-MCP2

Les températures des parois de stockage composite-MCP ont été baissées artificiellement en dessous des températures de début de fusion afin de régénérer 100 % de leur capacité de stockage et estimer leur capacité maximale de stockage latent de la chaleur exprimé par la durée de stabilisation des températures autour de leurs points de fusion sur une période journalière

estivale de fort ensoleillement (8h), représentée artificiellement sur le banc d'essais.

Les figures ci-dessus montrent que la température de la paroi dénommée P1, exposée directement à la source de chaleur, monte en température de 26 °C (sa température initiale déterminée par les conditions thermiques du laboratoire) pour atteindre les 50 °C sous l'influence d'un rayonnement artificielle constant imposé sur une période de 8 h. La température de la lame d'air de 50 mm monte pour atteindre près de 35 °C.

Les parois de stockage composite-MCP1 et composite-MCP2 ont été intégrées respectivement en étant parfaitement collées à la paroi intérieure en brique de terre cuite. À partir des courbes de température retracées en figure 4.22 et 4.23, les parois composite-MCP stockent la chaleur tout en maintenant stable leurs propres températures autour de leurs zones respectives de changement de phase. Les parois intérieures voient leur température descendre sous l'influence des parois de stockage placées derrière chacune d'elles pour maintenir des températures stabilisées autour des températures de changement de phase des parois de stockage composite-MCP.

4.5.3 Résultats des mesures de flux effectuées sur le banc d'essais

Des mesures de flux ont été réalisées aux points (P1) de la paroi extérieure pour estimer le flux de chaleur reçu par la paroi captatrice, et aux points (P5) et (P3') respectivement dans les trois cas de figure cités précédemment : sans MCP, avec intégration du composite-MCP1 et avec intégration du composite-MCP2.

4.5.3.1 Mesure du flux de chaleur au point (P1)

La figure 4.23 montre l'évolution du flux de chaleur enregistré par le fluxmètre placé à la surface extérieure de la paroi captatrice. Une première estimation du flux émis par la lampe a d'abord été calculée en se basant sur la règle des surfaces rayonnantes. Si la lampe d'une surface de 120,12 cm² émet un rayonnement d'une puissance de 75 W, le rayonnement que l'on obtient à travers le diaphragme de 3 cm de diamètre serait alors de 18 w. ça serait donc

une puissance de 18 W qui frapperait la surface de (0.32 x 0.3) de la paroi expérimentale en brique de terre cuite, ce qui vaut un flux surfacique de 187.5 W/m².

La lampe a été conçue pour rayonner à travers un diaphragme car on a enregistré des montées en températures qui dépassent la normale atteinte dans les parois de bâtiments même en saison de fort ensoleillement et de canicule.

Une partie du rayonnement émis par la lampe est sans doute perdu puisqu'on ne retrouve pas exactement la même quantité du flux sur la face de la paroi captatrice, malgré une configuration du banc d'essai permettant de renvoyer la majorité du flux émis par la lampe sur la paroi.

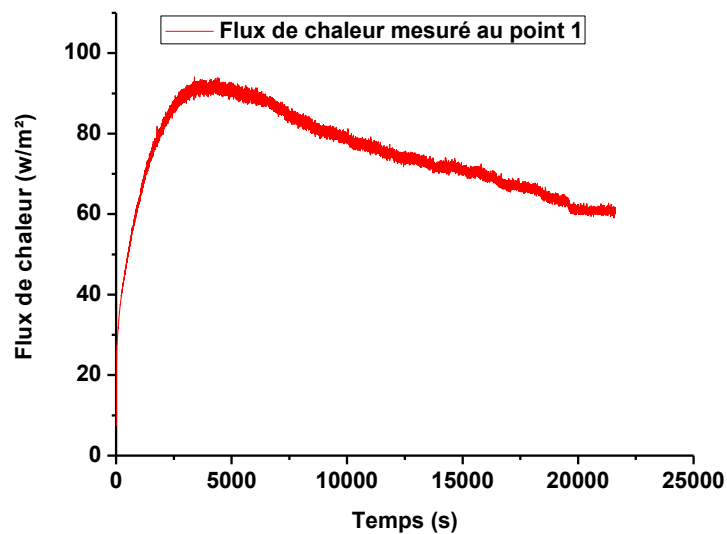


Figure4. 23 Mesure du flux de chaleur à la surface extérieures de la paroi captatrice.

4.5.3.2 Mesure du flux de chaleur incident aux points (P5) et (P3') avec le composite-MCP1 et sans MCP

Le fluxmètre thermique a été positionné sur la face intérieure de la paroi multicouche afin de mesurer le flux incident sans la paroi de stockage et avec l'intégration de la paroi de stockage composite-MCP1. Le test s'est étalé sur une période de temps de 6h. Un autre test de 24 h a été effectué sur la paroi

dans le but d'observer le flux de chaleur incident avec le composite-MCP en provoquant un cycle complet de fusion/ cristallisation sur 24h.

Après analyse des premiers résultats de mesures au fluxmètre, nous déduisons que le flux obtenu en réalité est la différence du flux incident de ce qui est considéré milieu extérieur et le flux sortant de l'intérieur vers l'extérieur³²⁰.

La figure 4.24 montre que dans le cas de la paroi sans MCP, une augmentation continue du flux incident est enregistrée sur toute la période de mesure, cela signifie qu'il y a eu transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur.

La courbe de couleur noire qui suit la différence de flux sur la paroi intérieure montre que entre $t=0$ et $t=5000s$ la courbe est décroissante, ce qui signifie un transfert de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur dû à l'action de la paroi de stockage composite-MCP1 sur la paroi intérieur (la température initiale de paroi intérieure dépasse la température de fusion de la paroi de stockage)⁸. À partir de $t=5000s$ une baisse de transfert du flux de chaleur vers l'extérieur est observée au fur et à mesure que la température de la paroi intérieur s'approche de la température de fusion de la paroi de stockage. C'est l'équilibre thermique.

Le transfert de chaleur vers l'intérieur à été insignifiant sur cette période de mesure. Ce test à déjà été effectué par plusieurs chercheurs qui travaillent sur l'intégration des MCP dans les parois de bâtiment³²¹.

⁸ "Supra" : page 183

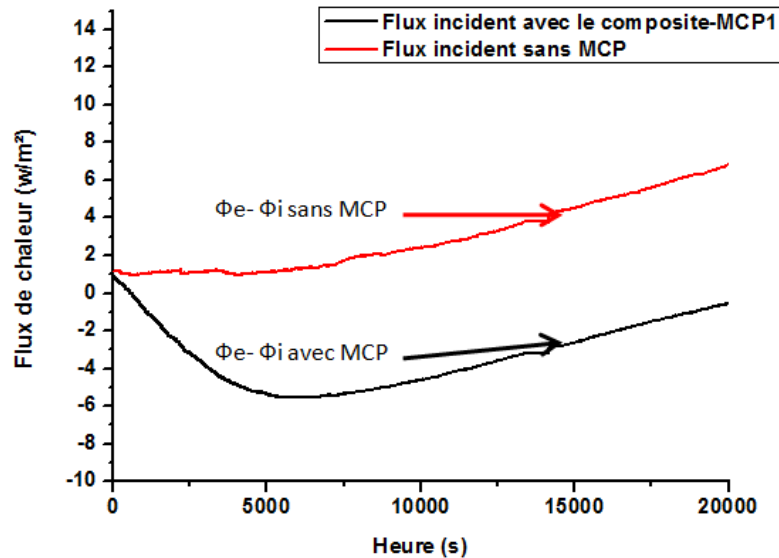


Figure4. 24 Comparaison de la différence de flux incident et sortant sur la face interne de la paroi intérieure de la paroi multicouche avec et sans MCP.

La figure 4.25 montre les résultats de la même expérience menée sur la même configuration de paroi intégrant le composite-MCP2.

La courbe résultant de la différence entre le flux de chaleur entrant et celle du flux sortant semble avoir le même profil que celle enregistrée dans le cas de l'application du composite-MCP1. Cela confirme que les mêmes phénomènes de transfert de chaleur s'y sont produits dans le cas de l'application du composite-MCP2. Cela revient sans doute au fait que le composite-MCP1 et le composite-MCP2 aient des propriétés thermiques similaires.

Le flux de chaleur sortant dans ce cas est inférieur au premier cas, ceci est dû au fait que le point de fusion de ce composite-MCP se rapproche plus de la température initiale de la paroi.

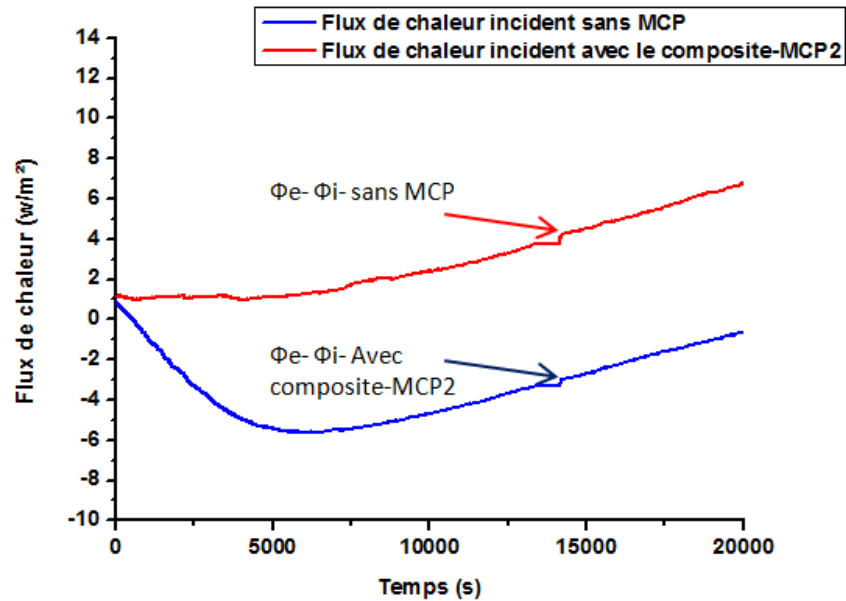


Figure4. 25 Comparaison de la différence de flux incident et sortant sur la face interne de la paroi intérieure de la paroi multicouche avec et sans MCP.

4.5.3.3. Mesure des flux de chaleurs au point (P5) avec le composite-MCP1 puis le composite-MCP2 sur un cycle complet de fusion/solidification

Les figures 4.26 et la figure 4.27 retracent la différence entre le flux de chaleur incident et le flux de chaleur sortant mesurés sur la face interne de la paroi sollicitée thermiquement à l'intérieur du banc d'essais en intégrant respectivement le composite-MCP1 et le composite-MCP2 pour lesquels on provoque un cycle de fusion /solidification complet. Le but est d'observer la courbe de flux sur la face interne de la paroi intérieure pendant le changement de phase.

Le cycle fusion à été provoqué en utilisant la lampe émettrice du flux de chaleur décrite précédemment, tandis que le cycle refroidissement s'est fait naturellement en dévissant le cône qui porte la lampe de chauffage et en disposant le banc d'essai sur la baie du laboratoire, en veillant que la paroi captatrice soit face à l'extérieur. Le cycle refroidissement c'était fait de 00 :00 jusqu'à 7h : 30 ou les températures nocturnes étaient autour de 17 °C.

Chaque expérience a été réalisée deux fois pour vérifier les résultats obtenus.

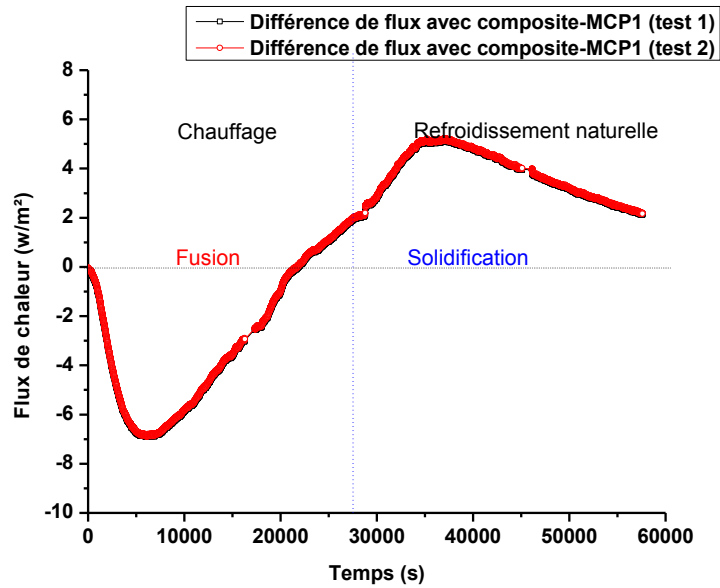


Figure4. 26 Control du flux de chaleur incident en fusion et solidification du composite-MCP1.

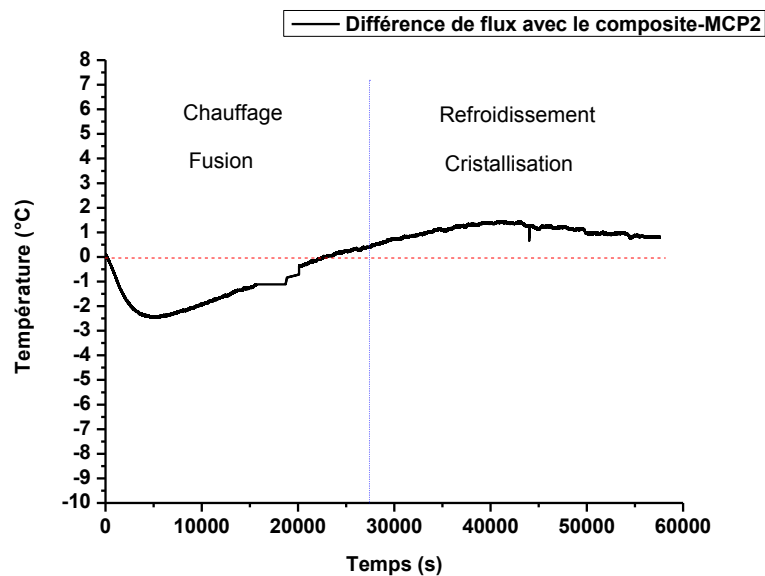


Figure4. 27 Control du flux de chaleur incident en fusion et solidification du composite-MCP2.

Les deux figures montrent que les profils des flux ont la même allure, cela s'explique par le fait que les deux composites expérimentés aient des propriétés de changement de phase presque similaires.

Entre $t=0$ s et $t=15000$ s, les courbes de flux sont décroissantes, cela signifie que le flux de chaleur se déplace de l'intérieur vers l'extérieur, ce

phénomène à déjà été expliqué précédemment⁹, il est dû au fait que les températures initiales des parois intérieures dépassent les températures de changement de phase du composite-MCP. La différence observée entre les deux cas, c'est que le flux sortant dans le cas de l'intégration de la paroi composite-MCP2 est inférieur à celui enregistré dans le cas de l'intégration de la paroi composite-MCP1. Cela s'explique par le fait que la température de fusion du composite-MCP2 soit supérieure à celle de la paroi composite-MCP1 d'une part, et au fait que la capacité de stockage de la paroi composite-MCP2 soit inférieure à la capacité de stockage composite-MCP1.

En raison de sa faible capacité de stockage, la quantité du flux incident dans le cas du composite-MCP2 (qui est égale au flux déstocké par le composite-MCP2) est inférieure à celle enregistrée dans le cas du composite-MCP1.

4.6 Conclusion

Le présent chapitre avait pour objet de tester la performance thermique des parois double cloison en brique de terre cuite intégrant des nouveaux matériaux composites-MCPs bio sourcés élaborés à cet effet. Ce type de parois est très répandu dans les bâtiments des villes méditerranéennes à l'instar des villes d'Algérie ou ce système constructif n'a pas toujours montré de bonnes propriétés thermiques notamment en saison estivale.

Un bref rappel des phénomènes de transfert de chaleur qui peuvent se produire dans ce type de paroi a été abordé dans le but d'expliquer la différence entre le phénomène de stockage thermique et de l'isolation thermique.

Un protocole expérimental a été conçu et mis en place pour tester la performance thermique de ce type de paroi en intégrant respectivement le composite-MCP1 et le composite-MCP2 élaborés. L'objectif est de vérifier leur influence sur la performance thermique de la paroi multicouche. Les mêmes mesures ont été réalisées sur la même paroi sans l'intégration des composites-MCP.

⁹ "Supra" : page 185

La paroi a été sollicitée de sorte à observer son comportement en période de forte chaleur. Les résultats des mesures de températures ont révélé qu'une différence de température de plus de 5 °C avait été enregistrée sur la face intérieure de la paroi sans MCP. La paroi sans MCP est montée en température de façon linéaire tandis que celles intégrant les composites-MCP gardaient leurs températures respectives stabilisées autour des températures de changement de phase des parois de stockage ce qui correspond aux températures de la zone de confort de l'être humain.

Il est important de noter que la majeure partie des mesures avaient été prises pendant la phase de fusion (stockage) des parois composites-MCP. Les expériences menées en saison estivale rendaient les mesures en phase de refroidissement (déstockage) difficiles dans les conditions normales du laboratoire. Celles-ci devraient être effectuées à l'intérieur d'une enceinte climatique, un appareil dont nos laboratoires ne disposent pas.

Des mesures de flux de chaleur avaient été menées pour un cycle complet de stockage/déstockage pour chacune des parois de stockage composite-MCP1 et composite-MCP2. La fusion avait été provoquée artificiellement tandis que la solidification se fait naturellement en période nocturne ou le mercure affiche des températures qui avoisinent les 17 °C à partir de minuit.

CHAPITRE 5

Simulation numérique du comportement thermique d'un exemple de bâtiment intégrant les nouveaux matériaux de construction

5.1 Introduction

Le présent chapitre a pour objet de présenter les résultats de toutes les analyses numériques menées dans le cadre de ce projet de thèse pour simuler le comportement thermique d'un exemple de paroi de bâtiment avant et après l'intégration des nouveaux composites-MCP d'une part, ainsi que du confort thermique et des consommations énergétiques d'un exemple de bâtiment avec et sans l'intégration des nouveaux matériaux de construction dans son enveloppe d'autre part.

La première partie de ce chapitre présente les résultats des simulations numériques effectuées sur le logiciel COMSOL Multiphysics 3.5a ®. Cette étude avait pour objet de vérifier numériquement les résultats des mesures expérimentales de la cellule test avec et sans l'intégration du nouveau matériau de stockage latent de la chaleur. Les résultats obtenus numériquement ont été superposés aux résultats expérimentaux. Les propriétés des matériaux de construction constitutifs de la paroi étudiée ont été identifiées par caractérisation de ceux-ci au laboratoire. Les résultats obtenus ont été introduits dans le code de calcul.

Dans la seconde partie de ce chapitre nous présentons les résultats de la simulation numérique du comportement thermique d'une partie de bâtiment avant et après l'intégration du nouveau matériau de construction. La simulation a été réalisée sur le logiciel de calcul thermique des bâtiments Energy-Plus Version 8.7.0 qui est un logiciel gratuit fiable et reconnu pour la recherche scientifique.

Les simulations numériques sur Energy-Plus ont été réalisées sur une partie d'un bâtiment sous les conditions climatiques de la ville d'Alger. Les calculs ont été effectués pour chaque zone thermique sur 3 jours de chacun des mois de l'année partant de Janvier à Décembre. Le but est de regarder l'influence de l'application du nouveau matériau de construction élaboré sur les conditions de température à l'intérieur des bâtiments ainsi que sur les consommations énergétiques.

5.2 Simulation numérique du banc d'essais testé expérimentalement sous Comsol Multi-Physics 3.5a

Le logiciel de simulation numérique COMSOL Multiphysics 3.5a ® a été utilisé pour simuler le comportement thermique du modèle de paroi étudiée expérimentalement pour confronter les résultats des mesures de température avec des thermocouples avant et après l'intégration des nouveaux matériaux de construction MCP aux résultats numériques.

Il était question de travailler sur un seul et unique code de simulation thermique des bâtiments qui est Energy-Plus. Il s'est avéré que celui-ci ne peut malheureusement pas nous fournir les détails des profils de température en tout point voulu à l'intérieur des couches de la paroi étudiée. Les résultats expérimentaux ne peuvent pas être vérifiés tout à fait par ce logiciel puisque ceux-ci ont pour objet de suivre un flux de chaleur à l'intérieur même de l'épaisseur de la paroi multicouche intégrant le composite-MCP. Néanmoins, COMSOL Multiphysics a de fortes performances de simulation numérique de différents phénomènes physiques des bâtiments³²². La licence COMSOL Multiphysics 3.5a ® N°= 123456789 utilisée dans ce travail de thèse appartient au laboratoire de recherche « LIED » de l'université Paris Diderot.

5.2.1 Description du modèle physique et des propriétés des matériaux

Un mur multicouche comportant deux parois en brique de terre cuite d'une épaisseur de 100 mm séparées d'une lame d'air de 50 mm à l'intérieur de laquelle est intégrée une paroi mince de stockage composite-MCP d'une épaisseur de 12 mm. Tout comme les expérimentations, les simulations elles

aussi ont été effectuées sur la paroi multicouche avant et après l'intégration de la paroi de stockage composite-MCP (Fig. 5.1).

Les simulations numériques ont été réalisées sur des modèles 2D d'une dimension de 100mm x 250 mm x 300 mm sur une période de temps de 8h avec et sans MCP (Fig.5.2). Les propriétés des matériaux de construction introduites dans le logiciel de simulation sont celles obtenues par caractérisation.

La brique de terre cuite est un matériau hétérogène composé d'argile et de cavités d'air, sa conductivité thermique dépend de celles de ces deux matières. C'est pour cela que nous avons procédé au calcul de la conductivité équivalente de la brique sur COMSOL Multiphysics 3.5a ®. Les résultats sont présentés ci-dessous.

La détermination de la chaleur spécifique (C_p) des composites-MCPs utilisés a été réalisée par Calorimétrie Différentielle à Balayage, la méthode de mesure et de calcul est présentée ci-dessous.

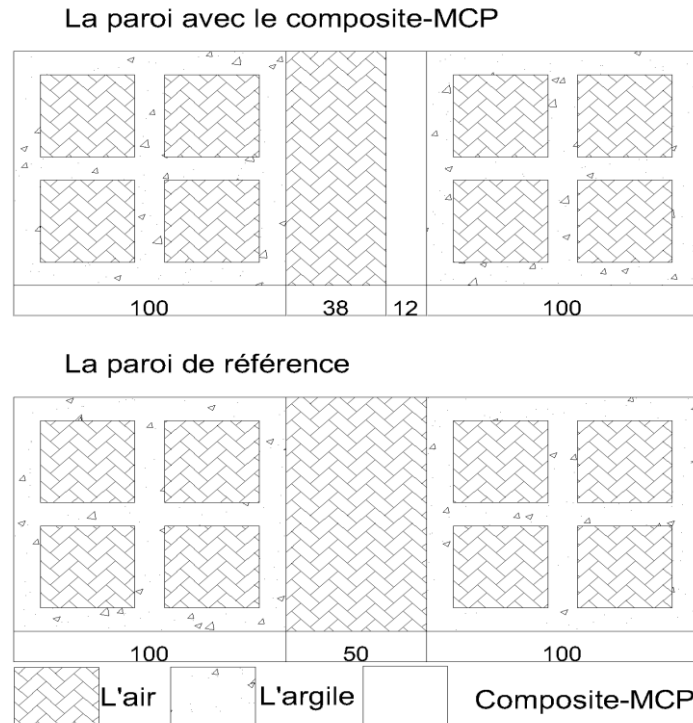


Figure 5. 1 Configuration et Composition du modèle physique.

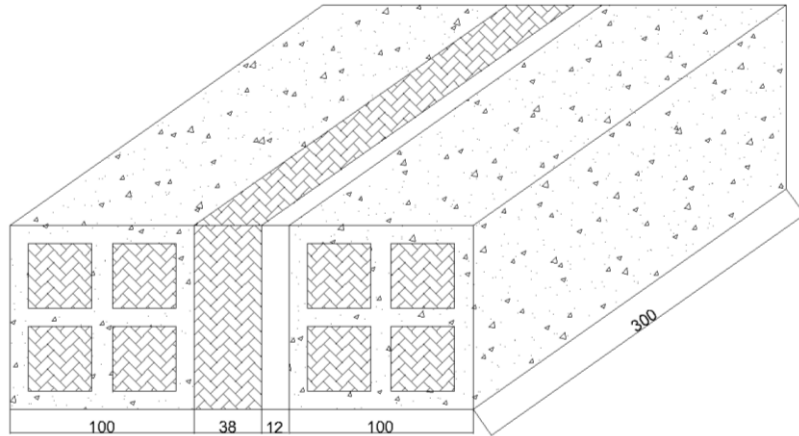


Figure 5. 2 Configuration 3D du modèle simulé sur COMSOL Multiphysics 3.5a

5.2.1.1 Détermination de la chaleur spécifique (C_p) des composites-MCP

Dans cette section, nous décrivons la méthode de calcul de la chaleur spécifique (C_p) des nouveaux composites-MCP intégrés dans la paroi de bâtiment testée expérimentalement et numériquement. La chaleur spécifique C_p est une grandeur physique importante dans le processus de simulation. Elle a été mesurée par DSC³²³.

Les principaux thermo grammes (Fig. 5.3) classiques de la DSC pouvant être obtenus après étude des échanges de chaleur d'un matériau sollicité linéairement par une température en chauffage ou en refroidissement sont les suivants³²⁴ :

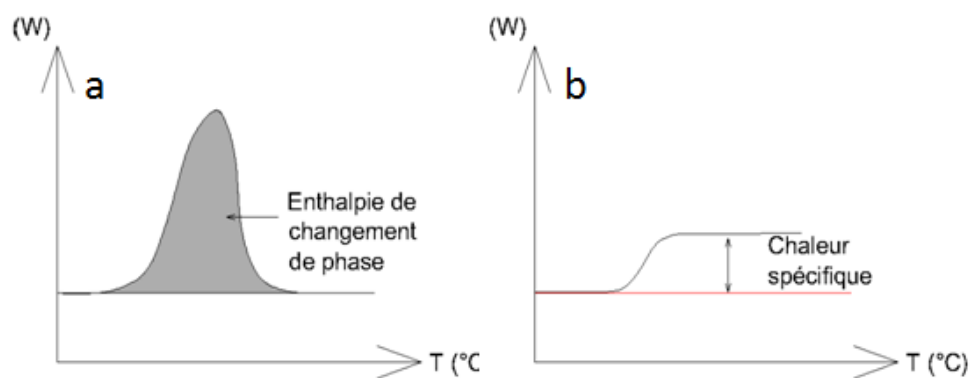


Figure 5. 3 Thermo grammes classiques de DSC

Le thermo gramme (a) affiche un pic dont l'aire correspond à la valeur de la chaleur latente de changement de phase du matériau étudié (sa capacité de stockage latent). La courbe (b) montre la formation d'une ligne droite qui

s'éloigne de la ligne de base tracée en rouge. Cette différence correspond à la valeur de la chaleur spécifique (C_p) du matériau analysé.

La détermination de la chaleur spécifique des composites-MCPs élaborés dans le présent travail de thèse s'est effectuée en passant par trois principales étapes de manipulation par DSC.^{325, 181} Les mesures ont été réalisées sur des échantillons de 20.10 mg analysés sur une plage de température allant de 3 à 43 °C à une vitesse de 1°C/min.

- Le premier test s'est fait sur deux creusets de DSC vides. l'objectif de ce test est de déterminer la position de la ligne de base. La différence de puissance enregistrée ($\Delta\Phi_1$) lors de ce test s'exprime comme suit : $\Delta\Phi_1 = V_{DSC} \cdot (m_{cv}C_{cv} - m_0C_0)$(1).
- Le second test s'est effectué sur le creuset de test rempli d'un matériau de référence qui dans notre cas est l'eau. La différence de puissance enregistrée s'exprime comme suit :

$$\Delta\Phi_2 = V_{DSC} \cdot (m_{cv}C_{cv} + m_{eau}C_{eau} - m_0C_0)$$
.....(2).

Le troisième test consiste en le creuset de test rempli du composite-MCP étudié, la différence de puissance résultante s'exprime : $\Delta\Phi_3 =$

$$V_{DSC} \cdot (m_{cv}C_{cv} + m_{mcp}C_{mcp} - m_0C_0)$$
.....(3).

V_{DSC} correspond à la vitesse des tests DSC (1°C/min), les indices : V, eau, 0, mcp correspondent respectivement au vide, à l'eau prise pour matériau de référence, au creuset de référence et enfin au matériau composite-MCP étudié.

La chaleur spécifique du matériau résulte de la combinaison des équations précédentes (1), (2) et (3).

$$C_{mcp} = \frac{\Delta\Phi_3 - \Delta\Phi_1}{\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1} \cdot \frac{m_{eau} \cdot C_{eau}}{m_{mcp}}$$
.....(4)

Les résultats des mesures révèlent que les valeurs moyennes respectives des C_p du composites-MCP1 et composite-MCP2 sont de l'ordre de 1715 J/g.°C et 1896 J/g.°C.

5.2.1.2 Détermination de la conductivité équivalente de la brique

La conductivité thermique équivalente de la brique dépend de la conductivité thermique de chacun de ses deux composants (Argile/ air). Celle-ci a été calculée avec le logiciel COMSOL Multiphysics 5.3a ®. L'objectif de cette opération est d'utiliser cette valeur lors du processus de simulation Energy-Plus. Contrairement à COMSOL Multi-physics, la conductivité thermique de la brique sur EP devrait être introduite comme une seule valeur équivalente.

La paroi de brique a donc été simulée en 2D en imposant une condition de température de première espèce de part et d'autre de la paroi et en considérant les deux autres parois latérales isolées (Fig.5.4). Le calcul s'effectue à l'état d'équilibre. Cette méthode de calcul a été vérifiée par d'autres auteurs^{306, 326}.

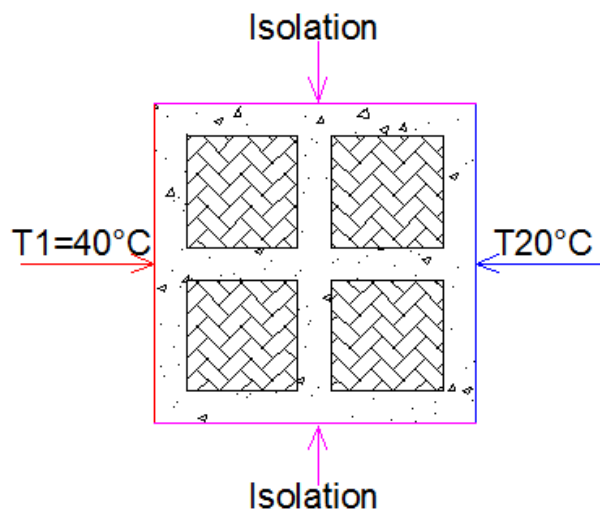


Figure 5. 4 Conditions limites posées pour retrouver la conductivité équivalente.

Les mêmes tests de simulation ont été ré effectués sur plusieurs portions différentes de parois ayant des hauteurs différentes (Fig.5.5) en posant exactement les mêmes conditions aux limites illustrées dans la figure 5.4. L'objectif est de retrouver le flux total traversant. Celui-ci est déduit à la fin de chaque simulation grâce à l'option post-traitement de COMSOL. La conductivité équivalente (k) est obtenue à partir du flux total (Φ) grâce à la formule mathématique suivante :

$$\Phi = \frac{k.S}{e} \Delta T \dots \dots \dots (5)$$

- Φ : Le flux total traversant la paroi
- k : la conductivité équivalente de la paroi simulée.
- S : la surface de la paroi perpendiculaire au flux traversant.
- ΔT : La différence de température entre les deux faces de la paroi.

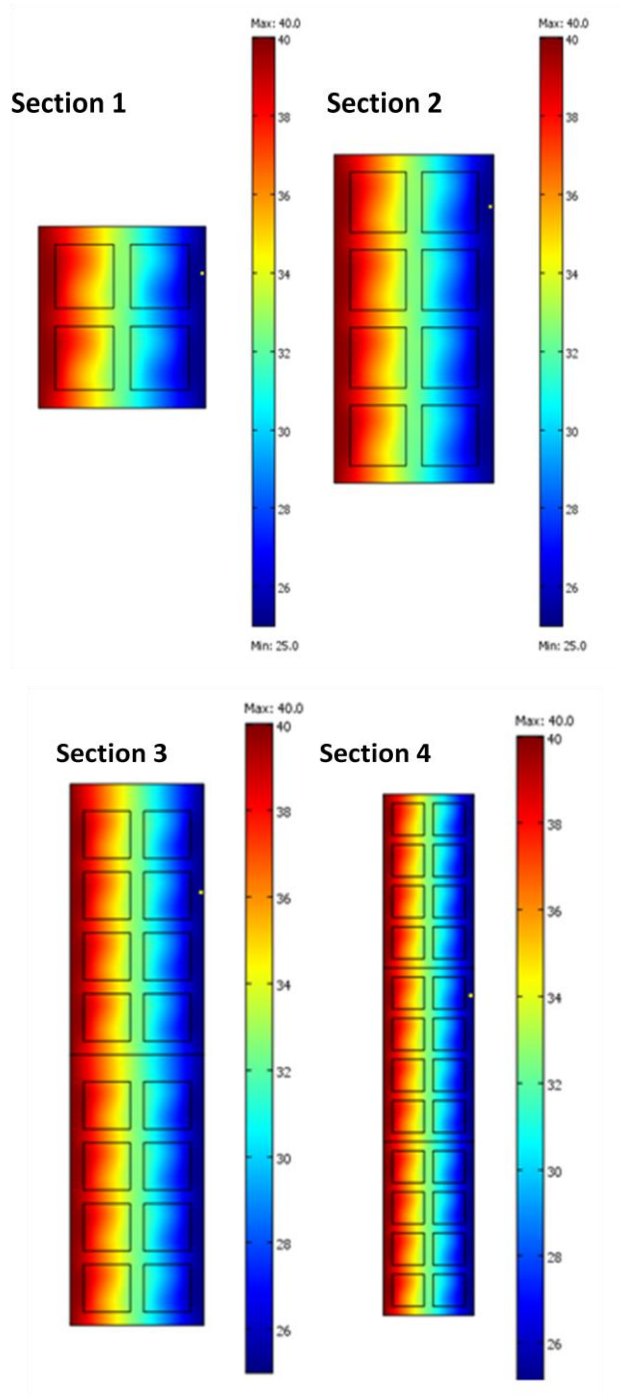


Figure 5. 5 Simulation numérique sur plusieurs portions de mur pour retrouver la conductivité équivalente de la brique.

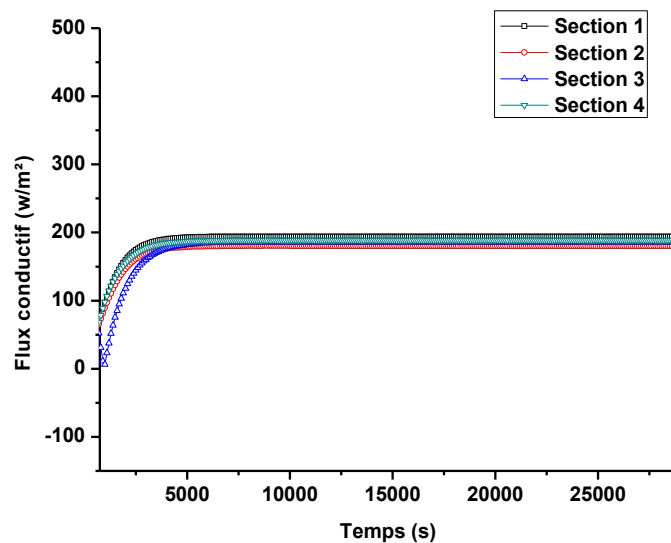


Figure 5. 6 Courbe des flux de chaleur enregistrés aux surfaces des différentes sections de paroi de brique simulées

La figure 5.6 montre les résultats des flux de chaleur mesurés sur les faces des différentes sections des briques creuses. Cela sert à calculer la conductivité thermique équivalente du matériau hétérogène (argile+air). Le flux de chaleur résultant est égal à 185 W/m^2 ($\pm 5 \text{ W/m}^2$). La conductivité équivalente du matériau serait de 0.46 W/m.K ($\pm 0.01 \text{ W/m.K}$). Cette valeur est importante à introduire dans les processus de simulation Energy-Plus.

5.2.2 Description du modèle numérique COMSOL Multiphysics 5.3a et des conditions aux limites

La simulation numérique du modèle physique¹⁰ s'est effectuée en 2D sur COMSOL Multiphysics 3.5a ®³²⁷.

Le traitement numérique temporel du problème 2D s'est fait sur une période de 28800 (s) (8h). L'équation mathématique qui régit le processus de transfert de chaleur dans ce modèle intégrant une paroi de stockage-MCP est : l'équation de convection et de conduction (Convection and conduction)^{328,380}. Cependant, l'effet de la convection à l'intérieur de la paroi de stockage composite-MCP est négligé car le volume du MCP contenu à l'intérieur de

¹⁰ "Supra" : page 198.

chaque micropore du matériau élaboré est infiniment petit. Observé dans sa phase de fusion à l'échelle macroscopique, le composite-MCP ne change pas d'aspect physique sous l'effet des températures supérieures à sa plage de changement de phase. Le MCP piégé à l'intérieur de ce matériau ne fuit pas et le composite-MCP ne suinte pas malgré la fusion du MCP ^{329, 330}.

La convection est donc négligée dans la paroi de stockage ainsi qu'à l'intérieur de l'argile de terre cuite de la brique, par conséquent l'équation apparait comme suit :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla(k \nabla T) \dots \dots \dots (6)$$

" ρ " est la densité du matériau, C_p est sa chaleur spécifique et k est sa conductivité thermique.

Pour rappel, il existe plusieurs méthodes numériques pour résoudre numériquement les problèmes de transfert de chaleur avec changement de phase à savoir : la méthode enthalpique ainsi que les méthodes de la capacité calorifique ^{331, 332}.

La méthode utilisée dans le présent travail de simulation pour modéliser le changement de phase est celle de la capacité calorifique apparente. La chaleur spécifique ($C_p(T)$) du matériau composite-MCP et son enthalpie ont été calculées précédemment par DSC. L'équation utilisée pour modéliser le comportement du composite-MCP pendant le changement de phase est :

$$C_{app} = C_p(T) + LAT/DT \dots \dots \dots (7)$$

LAT est la chaleur latente de changement de phase que nous avons nommé « LAT » pendant le processus de modélisation.

L'air contenu dans les cavités de la brique de terre cuite creuse ainsi que dans la lame d'air est régi par l'équation de Navier-Stokes des fluides incompressibles. L'écoulement de l'air à l'intérieur des cavités de la brique de terre creuse ainsi que dans la lame d'air est considéré laminaire et incompressible. Alors qu'en réalité tous les gaz sont compressibles.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) - \Delta \cdot [\eta (\Delta u + (\Delta u) T)] + \rho \cdot (u \cdot \Delta) u + \Delta p = F \dots (8)$$

$$\Delta \cdot u = 0 \dots \dots \dots (9)$$

En physique des bâtiments, la viscosité de l'air contenu à l'intérieur des cavités des composés poreux ou creux reste suffisamment faible pour que l'hypothèse d'un débit incompressible soit largement acceptée^{333, 334, 335, 336}. Dans ce modèle la viscosité dynamique de l'air a été considérée de 10^{-5} Pa.s.

Le modèle a été maillé suivant un maillage triangulaire de 1850 éléments (Fig.5.7).

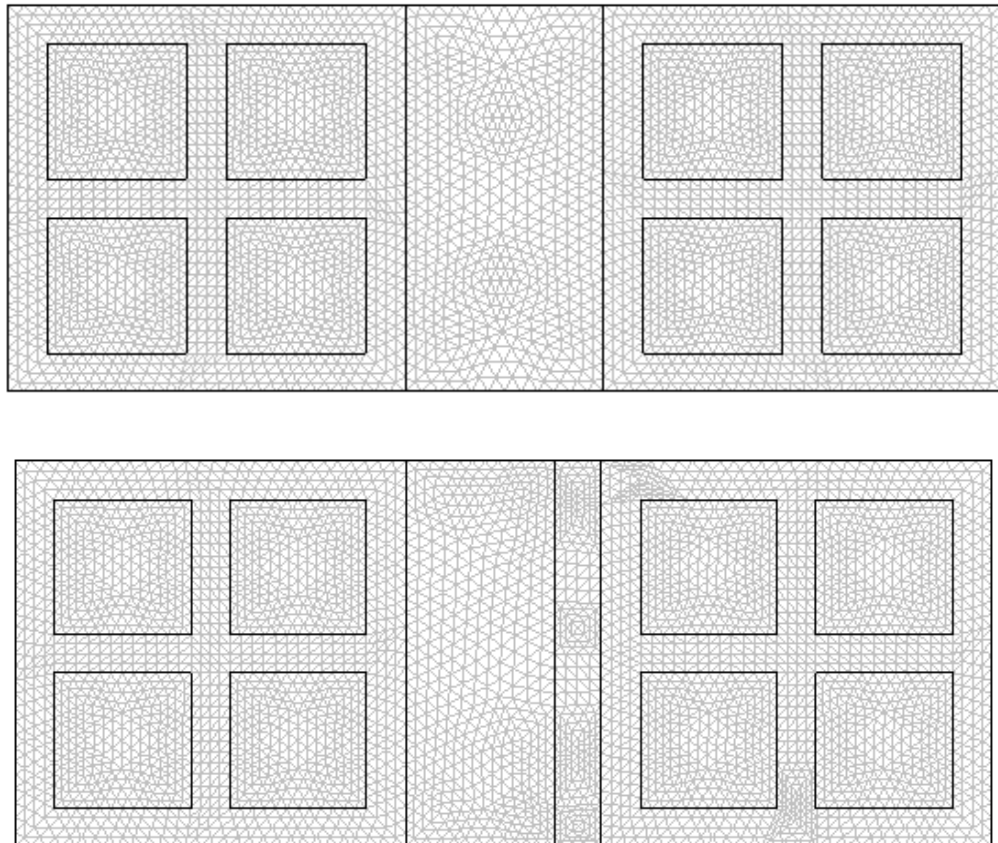


Figure 5. 7 Géométrie et maillage du modèle simulé : haut) sans MCP, bas) avec MCP.

La figure 5.8 résume les conditions aux limites considérées lors du processus de simulation numérique d'une partie du mur intégrant le MCP.

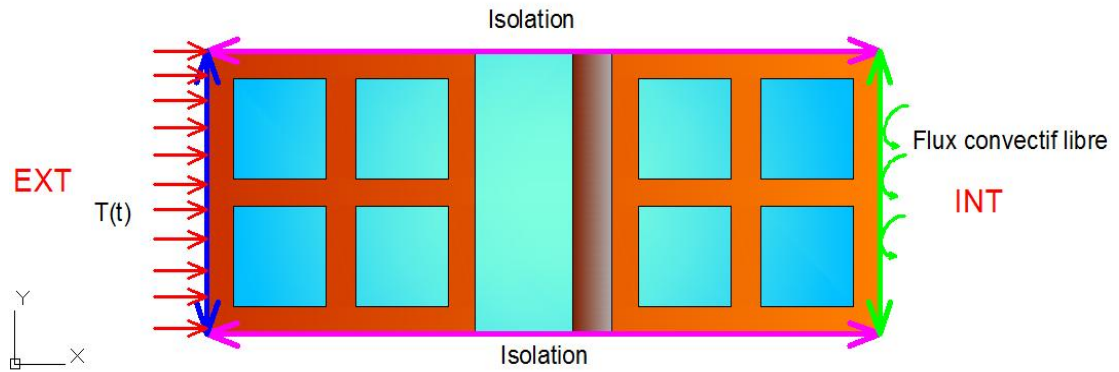


Figure 5. 8 Les conditions aux limites du modèle simulé numériquement

C'est les mêmes conditions aux limites qui ont été imposées à la paroi de référence (mur en brique de terre cuite sans la paroi de stockage composite-MCP) afin de comparer les résultats.

À partir de la figure 5.8, les parois latérales (côté haut et bas) de la partie du mûr simulé sont isolées. L'objectif est d'assurer un transfert unidirectionnel du flux de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur du mûr et éviter toute déperdition par les surfaces latérales d'une part, et de reproduire les mêmes conditions d'expérimentation appliquées à la cellule test présentée dans le chapitre précédent d'autre part.

Une condition de température de première espèce a été appliquée sur toute la hauteur de la paroi captatrice. Cette condition initiale de température $T(t)$ est obtenue expérimentalement avec un thermocouple plaqué à cette surface et ayant enregistré cette température.

La courbe $T(t)$ ¹¹ a été introduite dans COMSOL comme condition limite. Une condition de continuité du flux a été posée à l'intérieur de la paroi multicouche simulée : entre l'argile et les cavités d'air de la brique, entre la première paroi de brique et la lame d'air, entre la lame d'air et la paroi de stockage composite-MCP ainsi qu'entre la paroi de stockage composite-MCP et la cloison interne en brique de terre cuite. La surface intérieure du mûr simulé est soumise à une condition limite de flux convectif libre³³⁷.

Les températures initiales introduites dans le modèle numérique sont celles enregistrées expérimentalement au temps $t = 0$ s sur le banc d'essais.

¹¹ "Supra" : page 174

Les propriétés thermophysiques des matériaux de la paroi simulée sont présentées dans le tableau 5.1.

Les propriétés thermophysiques de la paroi de stockage composite-MCP intégrées dans le modèle numérique sont obtenues par caractérisation, tandis que les propriétés de l'air qui se trouve dans les cavités de la brique ainsi que dans la lame d'air ont été tirées de la littérature^{338, 339}. La capacité calorifique massique de la brique de terre cuite a été prise du ASHRAE Handbook of materials³⁴⁰.

Tableau 5. 1 : Récapitulatif des Propriétés thermo physiques des matériaux du mûr simulé sous des conditions de température ambiante (20 °C) et de pression égale à Pr=1atm.

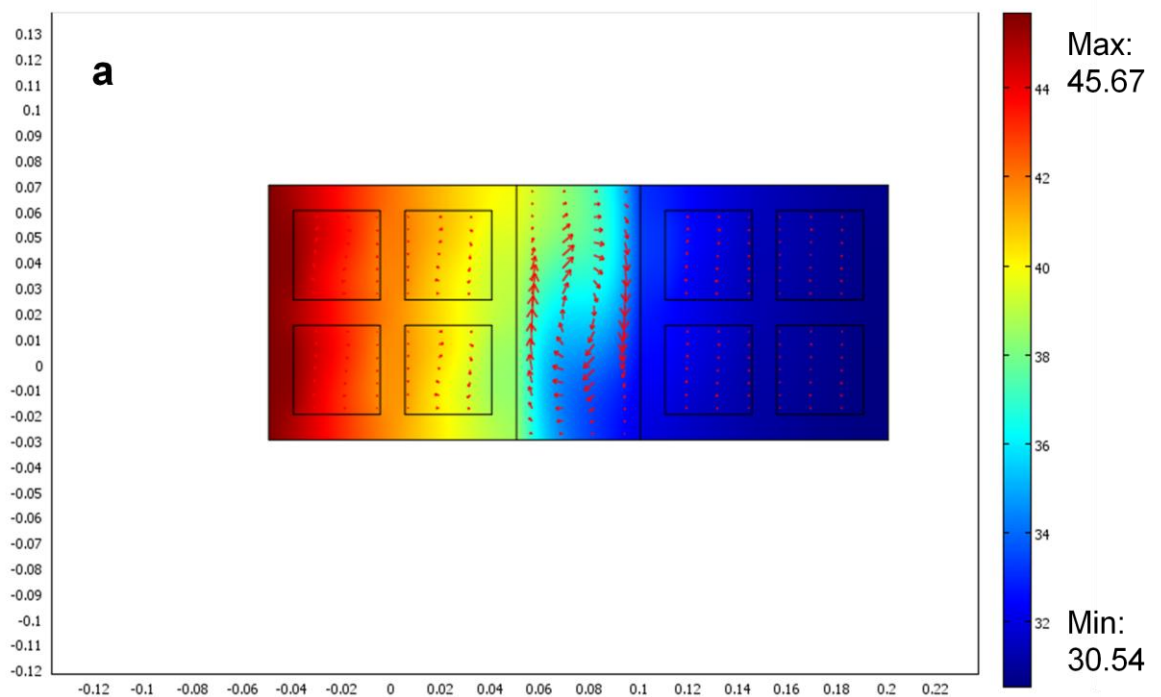
Air (cavités+ lame d'aire)	
C_p^{341}	1007 J/kg.K
K^{341}	0.02514 W/m.K
ρ^{341}	1.204 kg/m ³
Argile cuite (Brique)	
C_p^{340}	770 J/kg.K
K	0.46 W/m.K
ρ	1437 kg/m ³
Composite-MCP1	
C_p	1715 J/g
k	1.06 W/m.K
ρ	1250 kg/m ³
T_f	23.42 °C
T_c	19.74 °C
L_f	43.44 J/g
L_c	44.36 J/g
Composite-MCP2	
C_p	1896 J/g
k	0.86 W/m.K
ρ	1223 kg/m ³
T_f	23.50 °C
T_c	16.35 °C
L_f	42.44 J/g
L_c	41.35 J/g

5.2.3 Résultats de la simulation numérique sur Comsol et discussion

Les figures 5.9 (a, b, c) et 5.10 (A, B, C) affichent les thermographes des profils 2D des parois simulées numériquement sur COMSOL sur des périodes de 6 heures et de 8 heures de test respectivement. L'objectif est de comparer les résultats de la simulation à ceux obtenus expérimentalement.

De la même manière que les expérimentations, les simulations ont été réalisées sur une paroi de référence sans MCP, puis sur les parois intégrant respectivement le composite-MCP1 puis le composite-MCP2. Les diagrammes à flèche du mouvement de l'air contenu dans la lame d'air ainsi que dans les cavités des briques perforées ont été superposés au plan de la propagation de la chaleur du modèle 2D des parois simulées.

Time:21600 Surface: Temperature [°C] Arrow: Velocity field



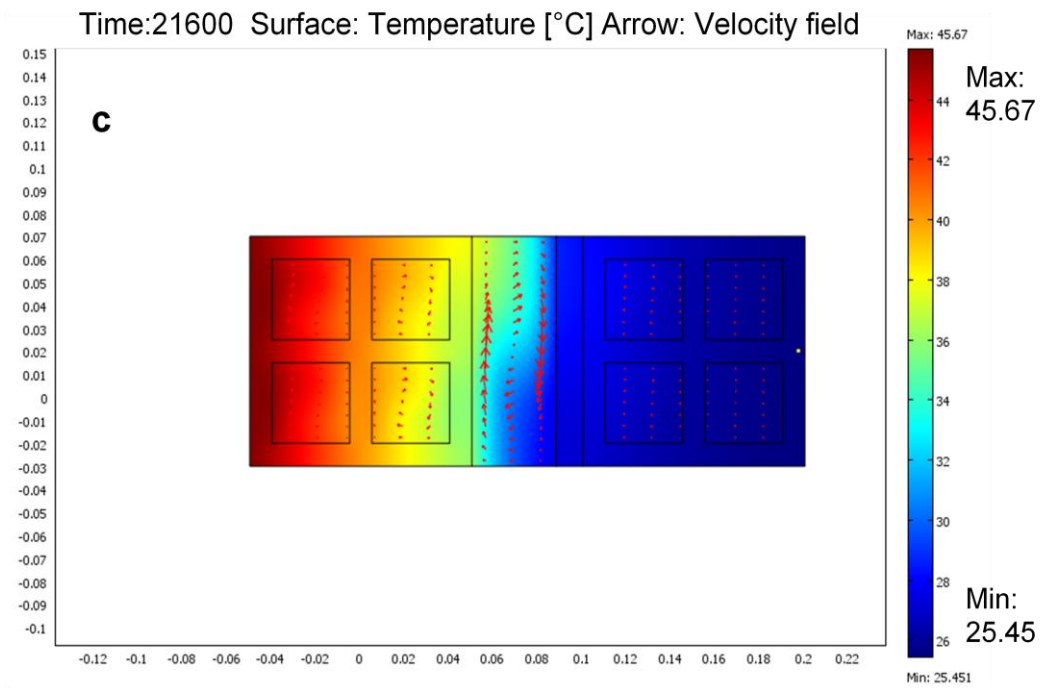
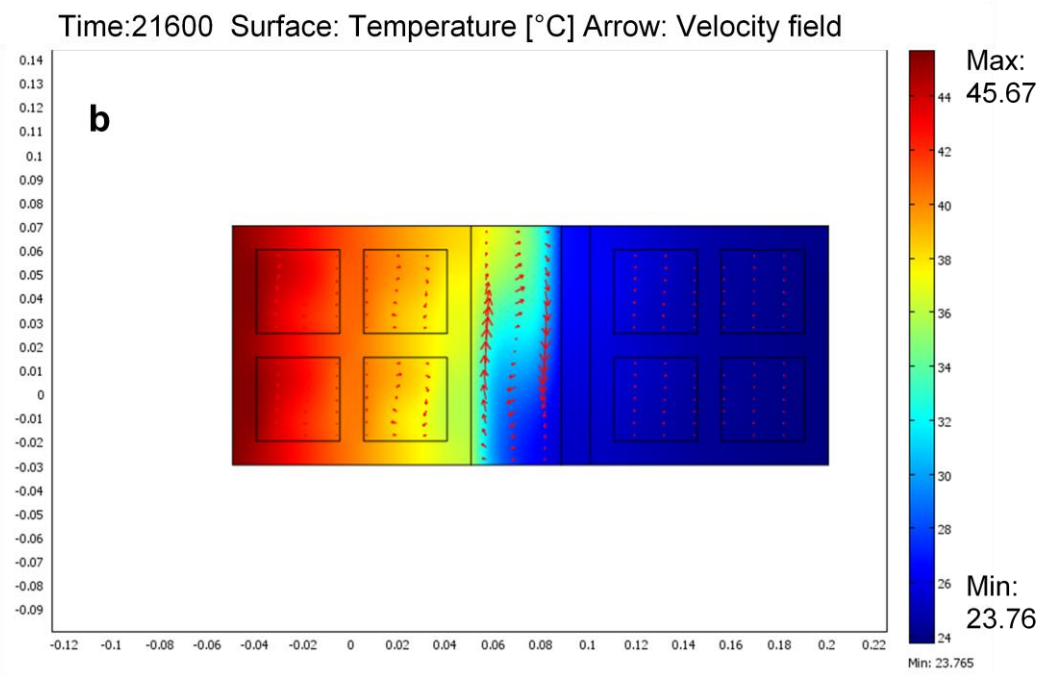
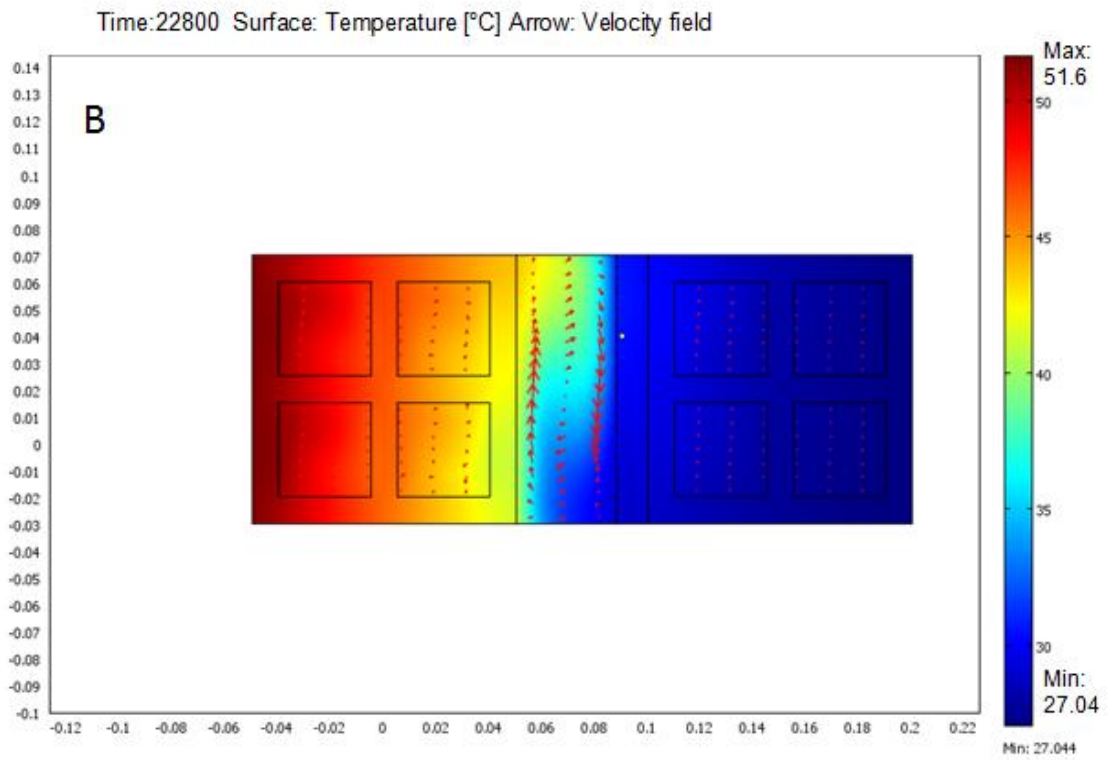
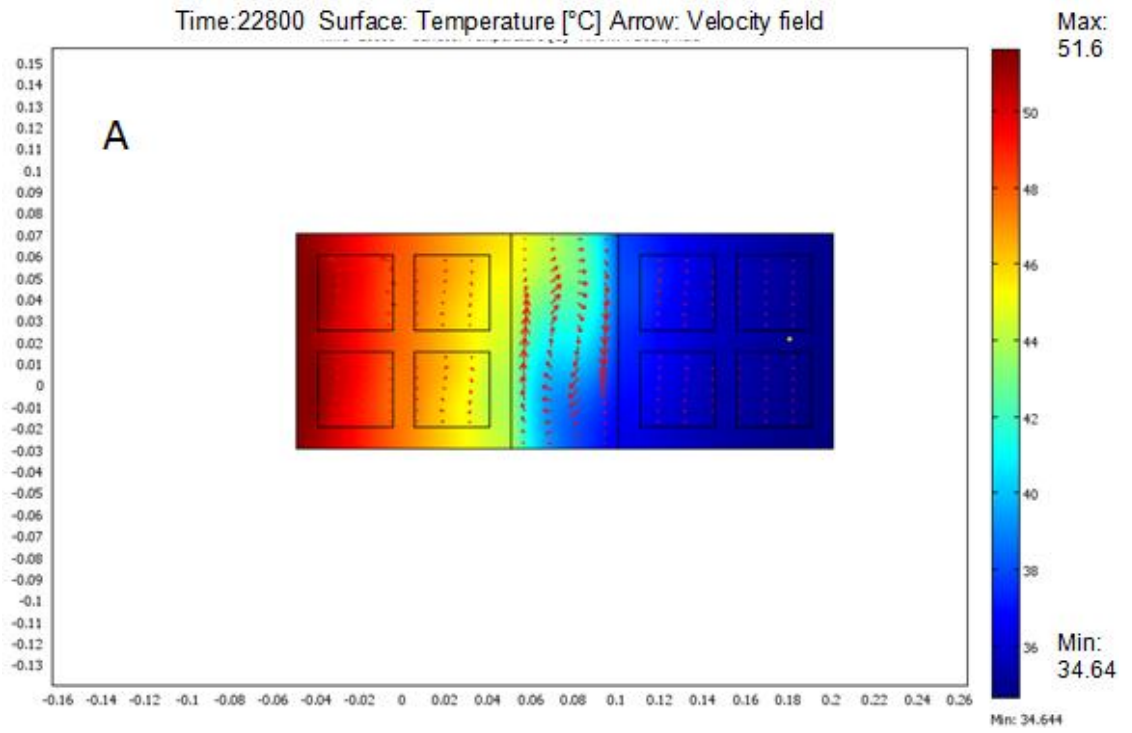


Figure 5. 9 Distribution de la température pendant 6 h de test : a)sans MCP, b) avec le composite-MCP1, c) avec le composite-MCP.



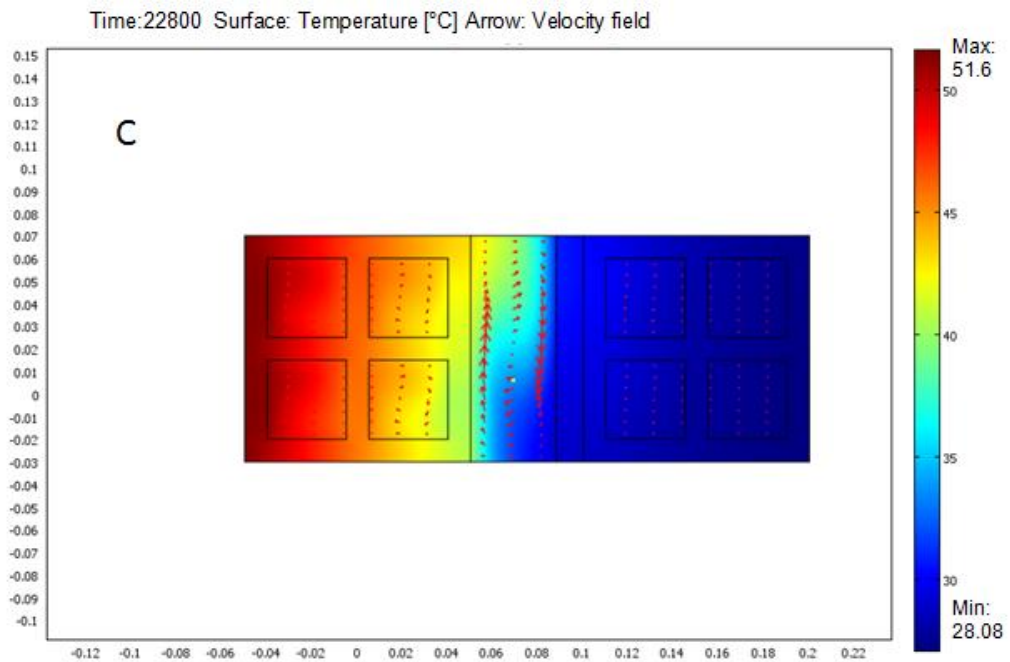


Figure 5. 10 Distribution de la température sur la paroi 2D simulé après 8h de test : A) sans MCP, B) avec le composite-MCP1, C) avec le composite-MCP2

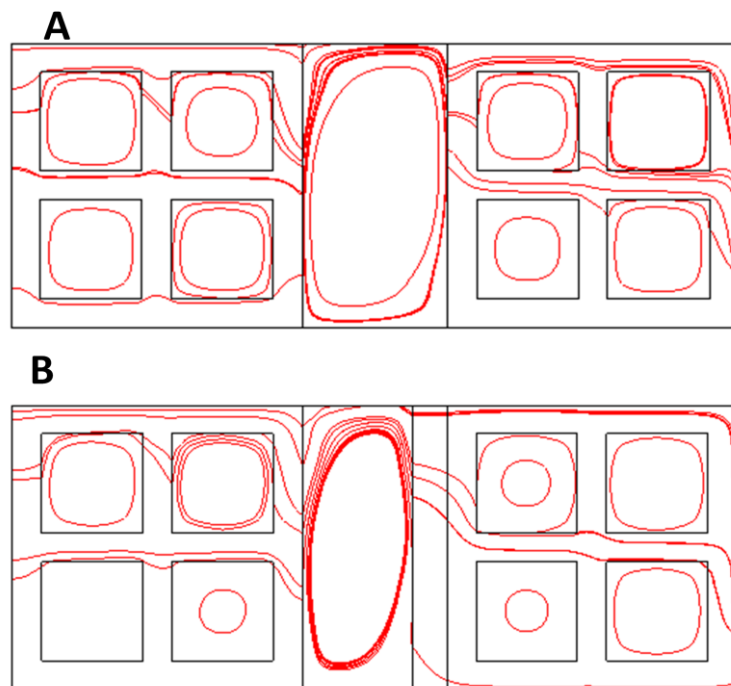


Figure 5. 11 Diagramme à traits continus de la circulation de l'air à l'intérieur de la paroi simulée

Les résultats de la simulation montrent que le fluide (air) contenu dans les cavités des briques creuses ainsi que dans la lame d'air se met en mouvement naturellement sous l'effet de la différence de température (ΔT) aux

faces de la paroi simulée (Fig.5.11) ^{336, 342}. Malgré la faible vitesse de l'air à l'intérieur de ces zones, celui-ci permet quand même de conduire le flux de chaleur traversant la paroi.

Plusieurs autres références donnent des détails plus précis sur le mouvement de l'air à l'intérieur des cavités des parois de bâtiments en fonction de la géométrie, de la vitesse, de la température...etc ^{338, 339}.

Les résultats du modèle COMSOL qui tient compte de la convection à l'intérieur des cavités d'air de la brique et de la lame d'air sont ceux qui se rapprochent le plus des résultats expérimentaux. Les résultats de la simulation du modèle qui ne tient pas compte du mouvement de l'air à l'intérieur de ces cavités ne correspondent pas à ceux obtenus expérimentalement. Les figures 5.12 et 5.13 présentent respectivement le thermographe du modèle 2D sans convection ainsi que la trajectoire du flux de chaleur dans le même cas.

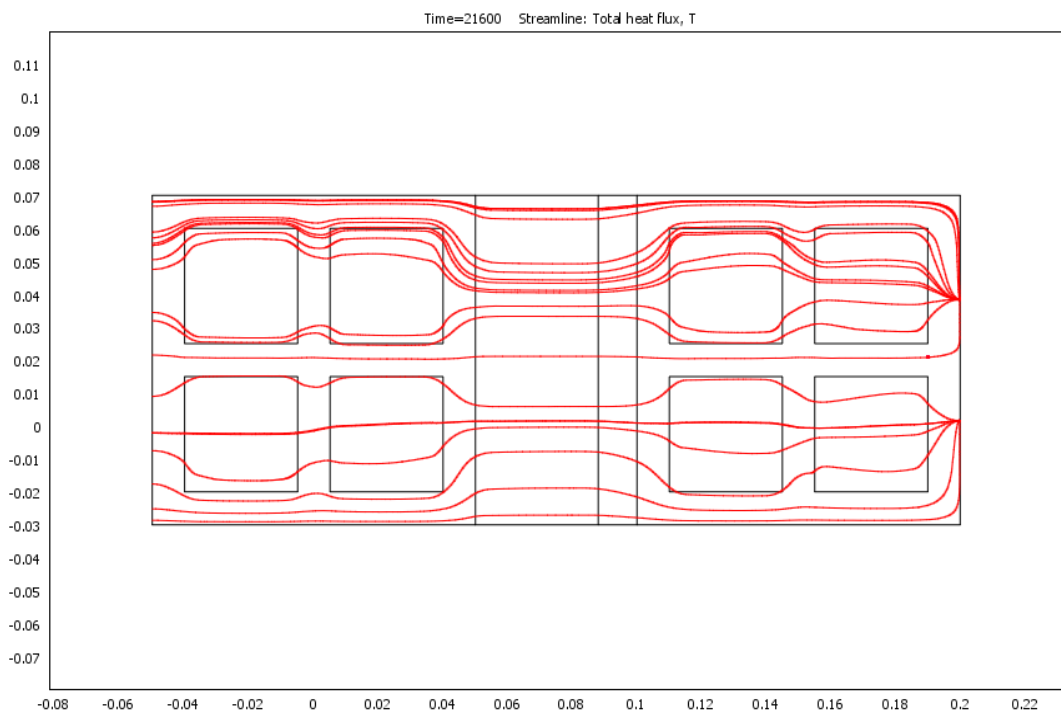


Figure 5. 12 Trajectoire du flux de chaleur traversant la paroi simulée sans convection.

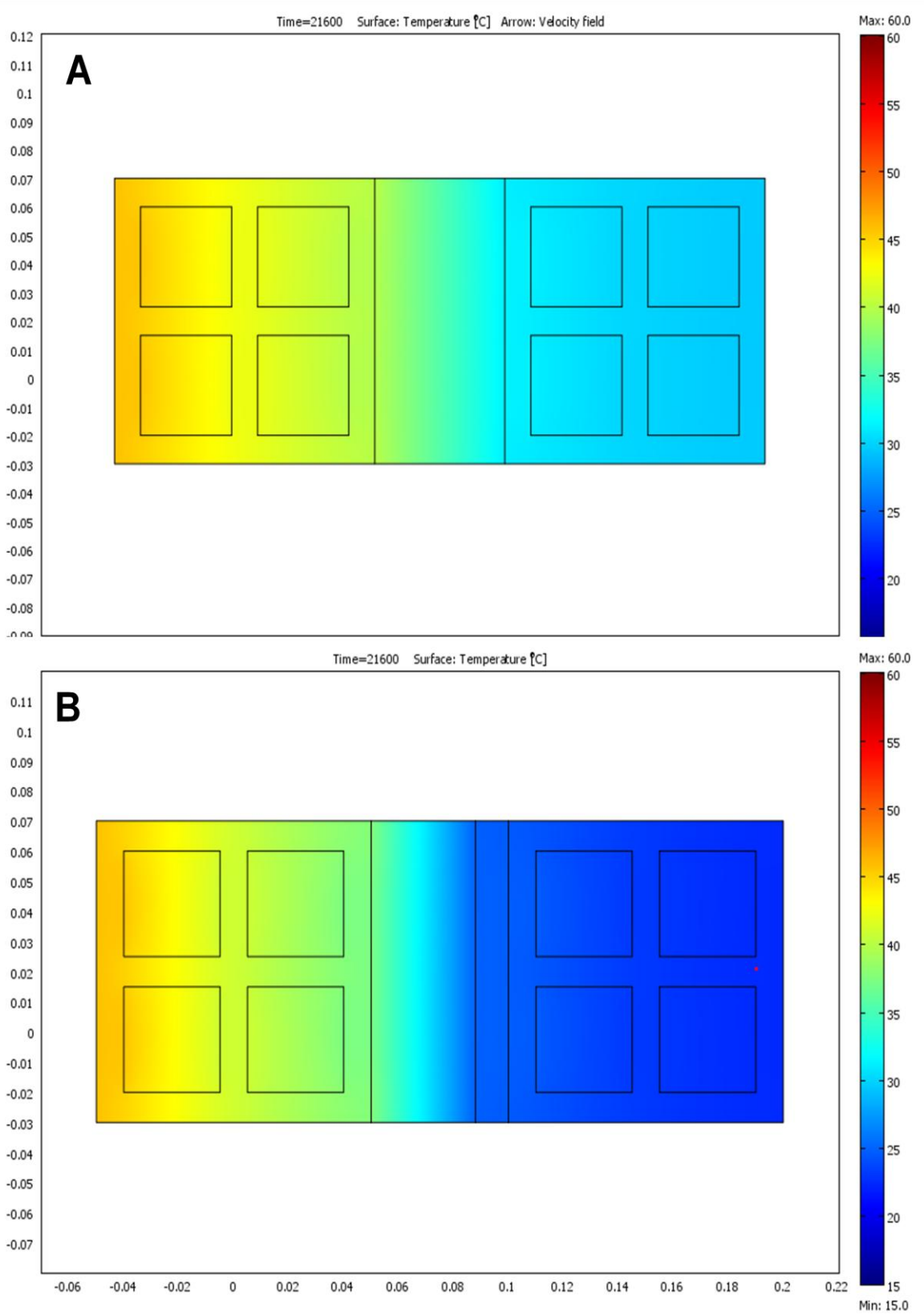


Figure 5. 13 Modèle de transfert du flux de chaleur sans convection : A) sans MCP, B) Avec MCP

Les figures 5.12 et 5.13 montrent que le transfert de chaleur dans la paroi sans convection est unidirectionnel et que la propagation de la chaleur de la paroi captatrice vers la paroi intérieure est presque insignifiante du moment que les températures sur la face extérieure de la paroi captatrice dépassent les 55 °C tandis qu'à l'intérieur elles restent entre 15 °C et 20 °C.

5.2.4 Confrontation des résultats numériques aux résultats expérimentaux

Les résultats de la simulation numérique du comportement thermique de la partie du mur testé en intégrant respectivement les parois de stockage composite-MCP1 et composite-MCP2 ont été confrontés aux résultats expérimentaux pour comparaison et validation des résultats.

Les courbes obtenues expérimentalement sur le banc d'essais pendant la phase de stockage de la chaleur ont été superposées à celles obtenues numériquement. Les résultats sont présentés ci-dessous :

5.2.4.1 Résultats de l'étude numérique de la phase de stockage (fusion)

Les figures 5.14, 5.15 et 5.16 montrent la superposition des résultats expérimentaux et numériques des profils de température enregistrés respectivement à l'intérieur de : la lame d'air intégrant le composite-MCP1, de la paroi de stockage composite-MCP1 ainsi que sur la face interne de la paroi intérieure du modèle intégrant le composite-MCP1.

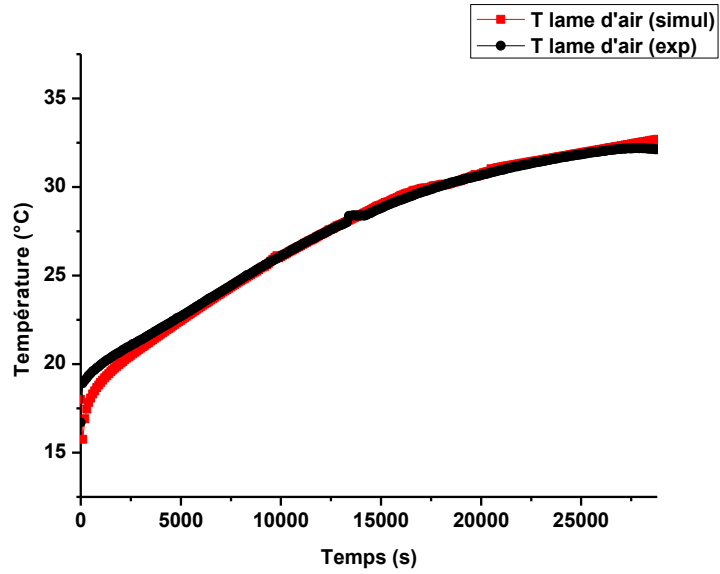


Figure 5. 14 Courbe du profil de température (simulée/ expérimentée) à l'intérieur de la lame d'air intégrant la paroi de stockage composite-MCP1.

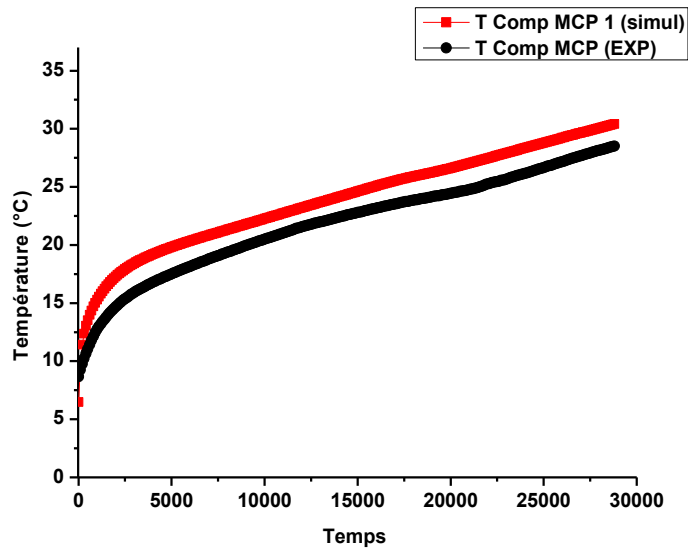


Figure 5. 15 Courbe du profil de température à l'intérieur de la paroi de stockage composite-MCP1 (simulation expérimentation)

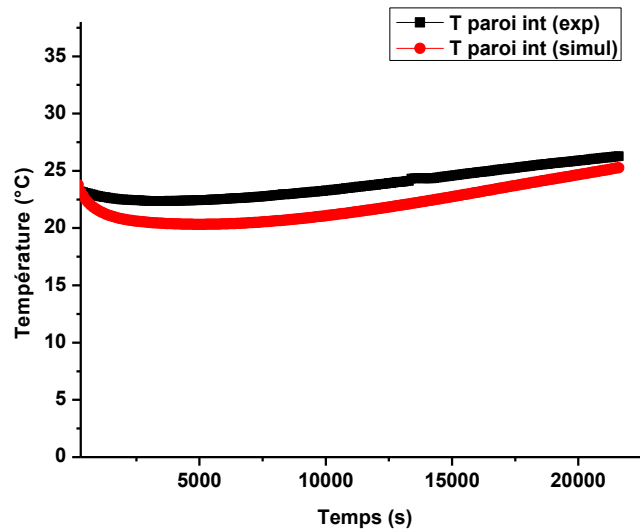


Figure 5. 16 Courbe du profil de température (simulée/ expérimentée) sur la face interne de la paroi intérieure.

Les courbes de couleur rouge présentent les résultats de la simulation tandis que les courbes de couleur noire présentent les résultats expérimentaux. Nous constatons que les profils de température à l'intérieur de la lame d'air se superposent, ce qui justifie une parfaite concordance entre le modèle numérique et le modèle expérimental. Les profils de températures enregistrés à l'intérieur de la paroi de stockage composite-MCP1 ainsi que sur la face interne de la paroi intérieure présentent les mêmes allures respectivement mais une différence de température de près de 1°C est enregistrée dans chaque cas entre le modèle simulé et le modèle testé expérimentalement, cela peut-être dû à plusieurs facteurs :

- La méthode numérique retenue pour modéliser le changement de phase tient compte dans le processus de calcul d'une valeur constante de l'enthalpie de fusion(L_f) alors qu'en réalité c'est une grandeur qui varie en fonction de la température.
- La courbe de C_p (C_p en fonction de la température) de la paroi de stockage composite-MCP1 a été introduite dans le modèle tandis que la masse volumique a été considérée comme une constante.
- Le modèle numérique ne tient pas compte des éventuelles déperditions thermiques qui peuvent exister entre l'intérieur du banc

d'essais qui est considéré isolé de l'ambiance du laboratoire théoriquement alors qu'en pratique des défauts d'isolation peuvent exister.

Les figures 5.17, 5.18 et 5.19 présentent les profils de température superposés (simulation/expérimentation) enregistrés sur la même configuration du mur intégrant un autre type de paroi de stockage (le composite-MCP2).

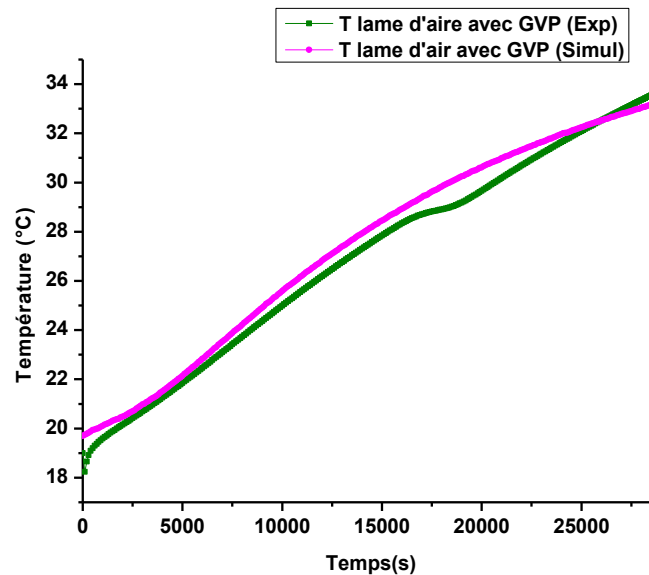


Figure 5. 17 Profils de température (simulé/ expérimenté) à l'intérieur de la lame d'air intégrant le composite-MCP2.

Les courbes de couleur magenta présentent les résultats de la simulation numérique tandis que celles de couleur vert olive présentent les courbes obtenues expérimentalement.

Les profils de température illustrés dans la figure 5.17 enregistrés à l'intérieur de la lame d'air dans le modèle expérimental et numérique atteignent les mêmes seuils de température à la fin du test. Pour chaque temps (t) il existe une petite différence de température de l'ordre de (0.25 °C à 0.65 °C) entre les deux courbes. Ceci est dû au fait que nous n'avons pas forcément placé le thermocouple « K » sur le banc d'essais exactement au même point (P) de la lame d'air ou nous avons retracé numériquement la courbe de l'évolution des températures et que sous l'effet de la convection, la température peut varier légèrement d'un point à un autre de la lame d'air ^{375,376}.

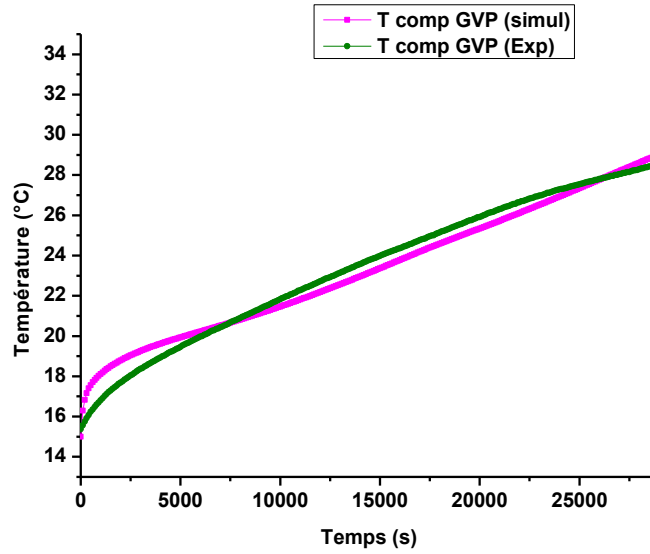


Figure 5. 18 Profil de température à l'intérieur de la paroi de stockage composite-MCP2

La figure 5.18 retrace les résultats expérimentaux et numériques des profils de température enregistrés à l'intérieur de la paroi de stockage composite-MCP2.

Pour les mêmes raisons énoncées précédemment dans le cas de la paroi de stockage composite-MCP1, les deux courbes ne peuvent pas se superposer complètement, d'où les petites différences de température de l'ordre (± 0.5 °C) entre les températures simulées et celles obtenues expérimentalement.

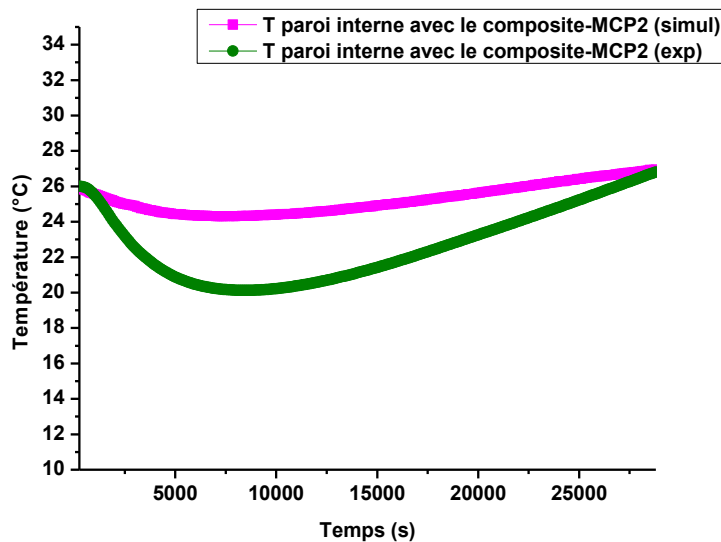


Figure 5. 19 Profil de température sur la face interne de la paroi intérieure du mur intégrant le composite-MCP2.

La figure 5.19 illustre les résultats de la superposition des courbes de températures (simulation/ expérimentation) obtenues sur la face interne de la paroi étudiée. Nous constatons que les températures du modèle numérique ne se superposent pas à celles du modèle expérimental, ceci peut s'expliquer comme suit :

La température initiale de la paroi testée est de 26.5 °C, celle-ci dépasse la température de changement de phase du composite-MCP2 testé dans ce cas. Numériquement, nous avons considéré que la paroi de stockage composite-MCP change de phase à 26 °C comme l'indique les résultats de la caractérisation par DSC ; alors qu'en réalité le changement de phase de ce composite-MCP débute vers 15 °C¹². C'est pour cela que le profil des températures simulées a tendance à se stabiliser autour de 26 °C sur la période de mesure, alors que le profil des températures mesurées expérimentalement montre que sous l'effet du changement de phase de la paroi de stockage placée derrière la paroi mesurée, la température initiale de celle-ci descend pour se rapprocher des températures du début de fusion du composite-MCP2 (22 à 24 °C) pour atteindre les 26 °C à la fin du test.

La figure 5.20 montre les résultats de la superposition des profils des températures (simulées/expérimentales) de la face interne de la paroi intérieure sans l'application d'aucune paroi de stockage composite-MCP. L'objectif est de vérifier si les profils allaient se superposer dans ce cas, afin de vérifier que l'hypothèse précédente, qui prétend que la différence enregistrée entre le profil de température de la face interne du modèle numérique et expérimental était due à la modélisation du changement de phase des parois de stockage placées derrière la paroi mesurée.

Le résultat montre que le profil de température du modèle simulé et celle du modèle expérimental se superposent. Entre $t = 0$ s et $t \approx 7500$ s, les températures restent stabilisées autour de leurs températures initiales. Cela montre que le flux de chaleur traversant la paroi n'a pas encore atteint cette couche intérieure de la paroi testée. À partir de $t > 7500$ s, les températures

¹² "Supra" : page 214

augmentent progressivement d'une façon linéaire pour atteindre les 33.5 °C au bout de 28800 s de test.

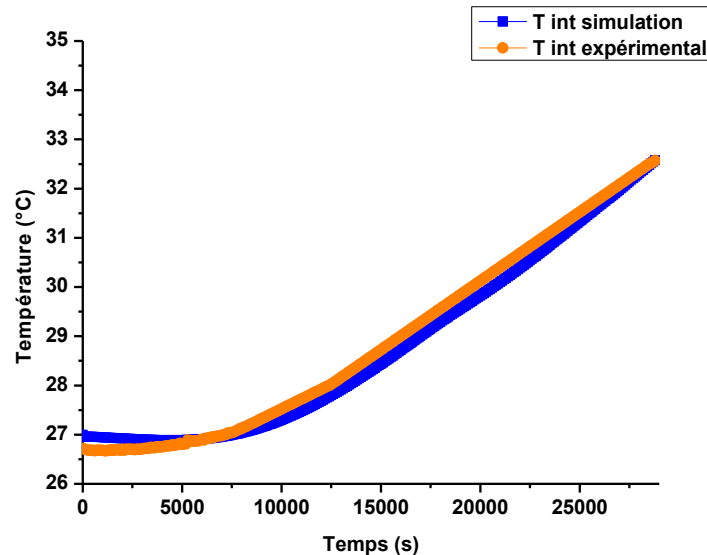


Figure 5. 20 Températures (simulée/ expérimentée) de la face interne de la paroi intérieure sans la paroi de stockage composite-MCP

À partir des résultats précédents, nous pouvons conclure que la complexité de simuler numériquement les phénomènes de changement de phase ^{344,345} dans les matériaux du bâtiment est à l'origine des petits écarts de température obtenus entre les modèles numériques et les modèles expérimentaux ³⁴³.

Les différences entre la simulation et l'expérimental enregistrées dans le présent travail de thèse sont insignifiantes. Nous pouvons à cet effet dire que le modèle numérique développé sur COMSOL Multiphysics 3.5a ® correspond au modèle expérimental du banc d'essais.

5.2.4.2 Résultats de l'étude numérique de la phase de déstockage (solidification)

La phase de déstockage n'a été étudiée que numériquement sur une période de 16h. Les températures initiales des éléments de la paroi considérée dans la simulation sont celles enregistrées à la fin du cycle (stockage). L'étude

numérique du déstockage a été réalisée sur trois modèles physiques différents : la paroi multicouche intégrant le composite-MCP1, la paroi multicouche intégrant le composite-MCP2, ainsi que la paroi multicouche sans aucun composite-MCP. Les figures suivantes montrent les thermographes respectifs des modèles ainsi que les schémas du champ de vitesse et de la trajectoire du flux de chaleur.

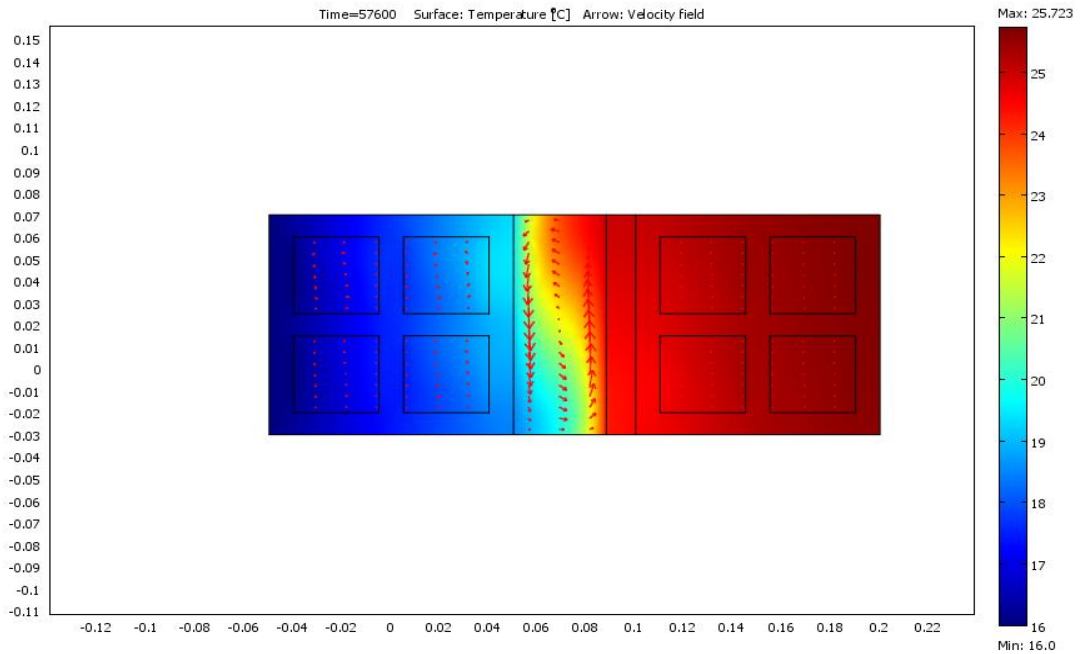


Figure 5. 21 Distributions des températures sur le modèle 2D de la paroi multicouche intégrant le composite-MCP1 pendant le refroidissement.

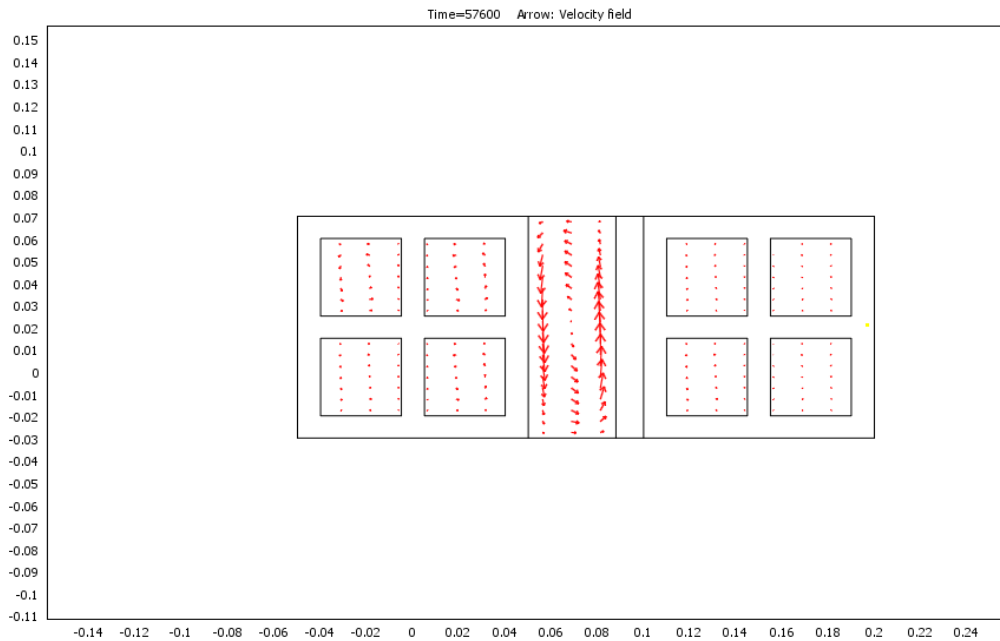


Figure 5. 22 Digramme à flèches du champ de vitesse de l'air dans le modèle 2D de la paroi multicouche intégrant le composite MCP1 pendant le refroidissement

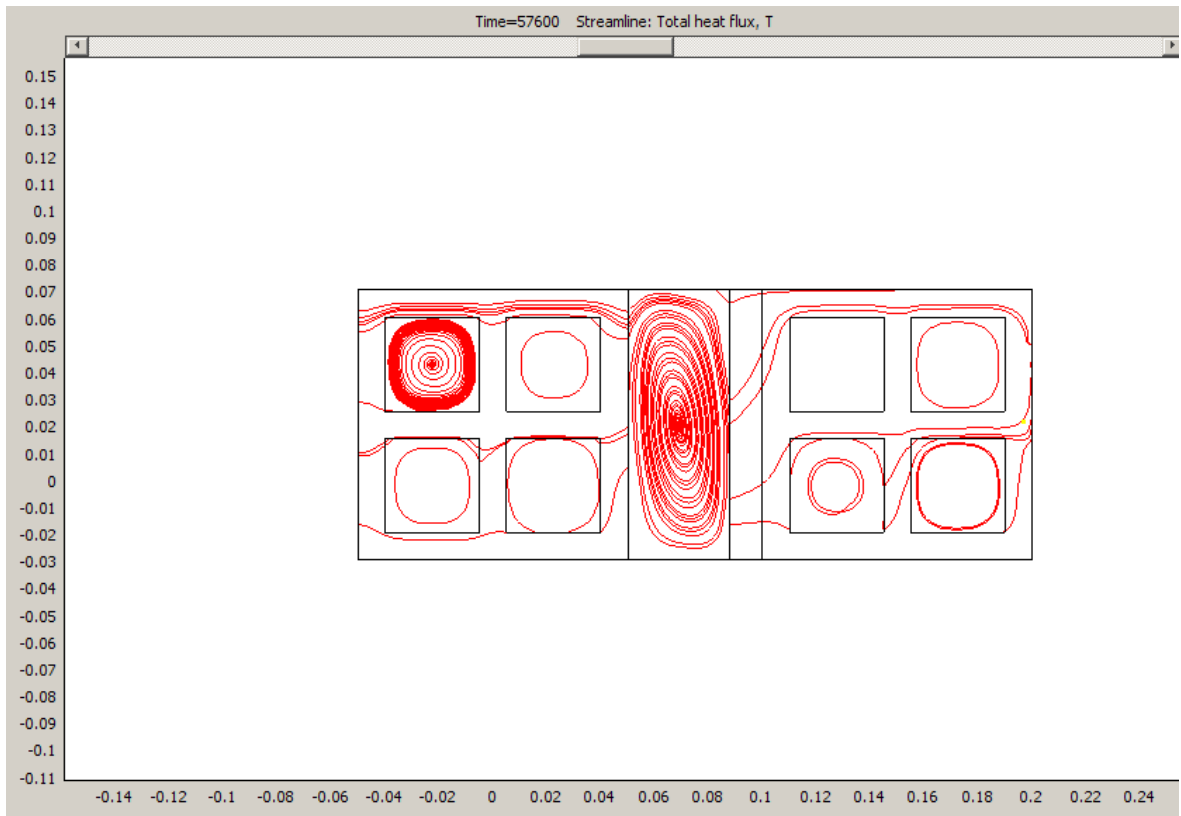


Figure 5. 23 Trajectoire du flux de chaleur dans le modèle 2D intégrant le composite-MCP1 pendant le refroidissement.

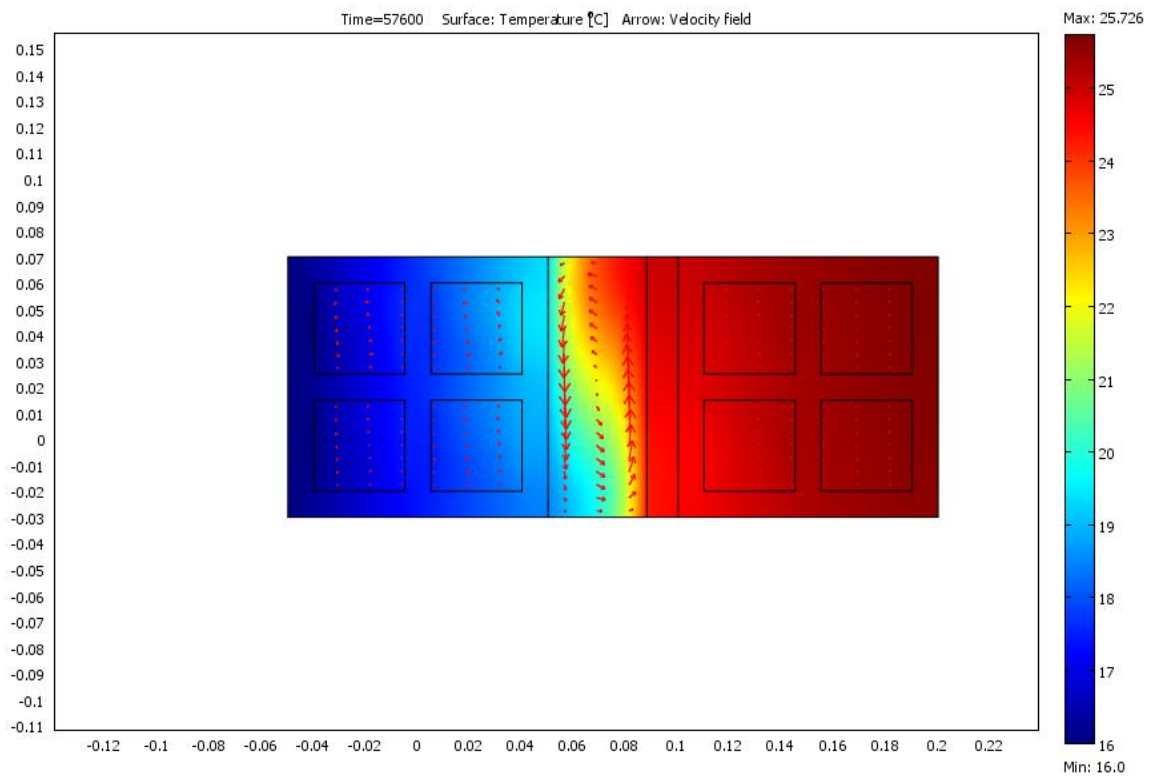


Figure 5. 24 Distribution de la température dans le modèle 2D de la paroi multicouche intégrant le composite-MCP2 pendant le refroidissement

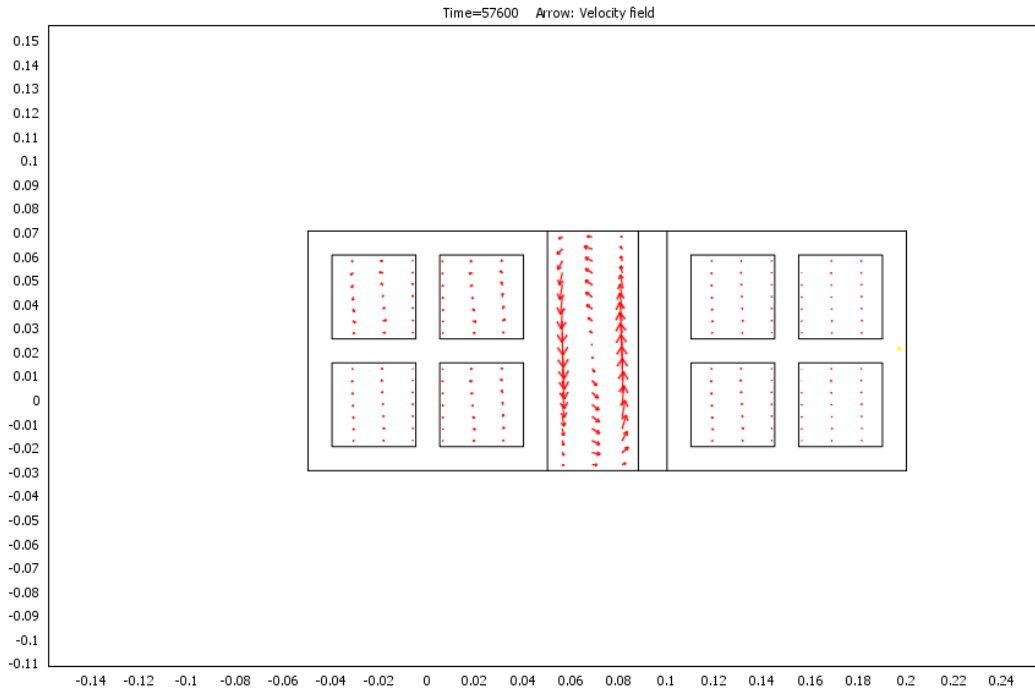


Figure 5. 25 Diagramme à flèche du champ de vitesse de l'air dans le modèle 2D de la paroi multicouche intégrant le composite-MCP2 pendant le refroidissement.

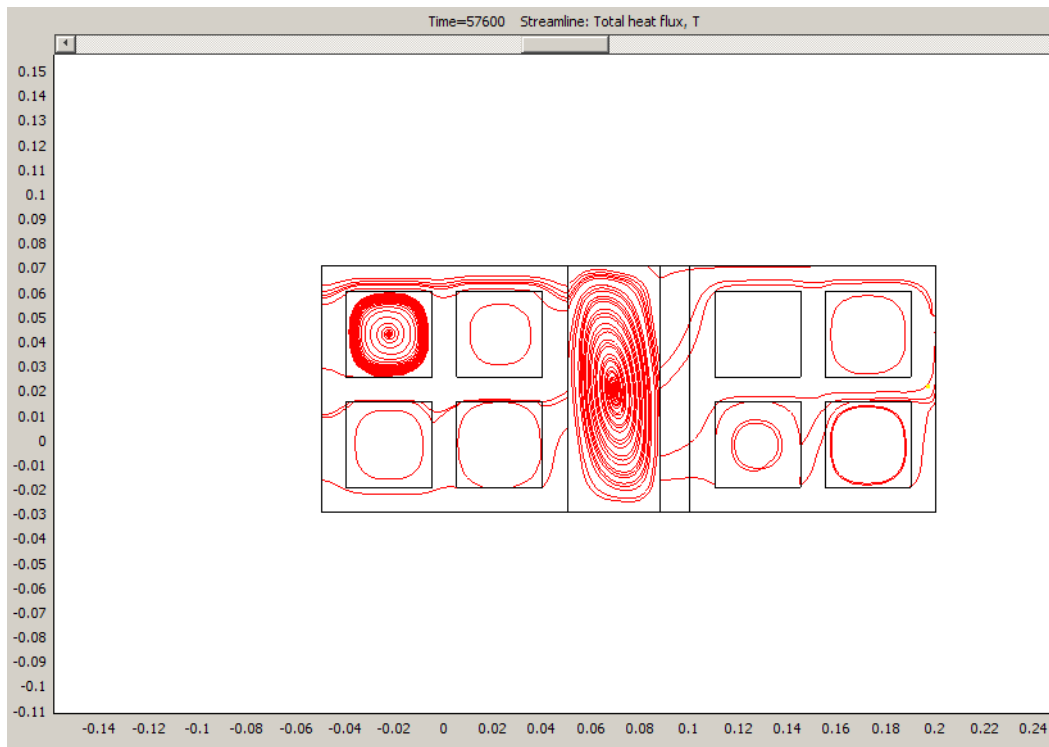


Figure 5. 26 Trajectoire du flux de chaleur total dans le modèle 2D intégrant le composite-MCP2

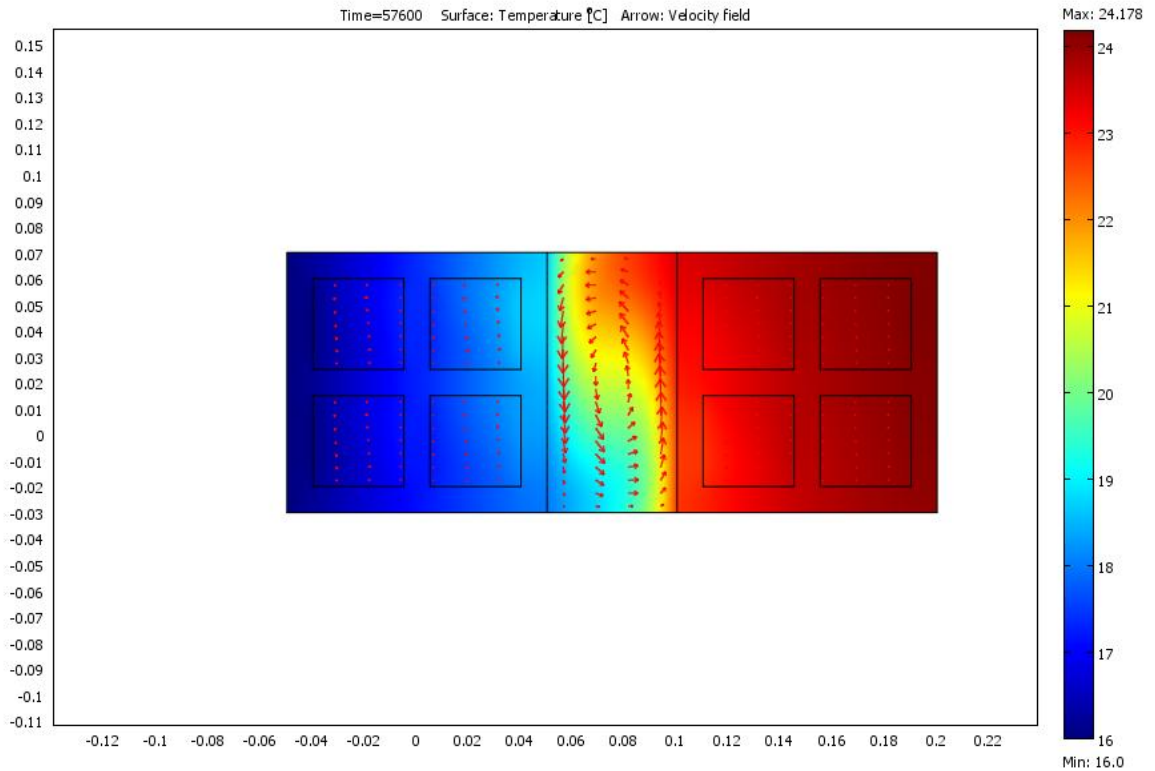


Figure 5. 27 Distribution de la température sur le modèle 2D de a paroi multicouche sans l'intégration d'aucun composite-MCP.

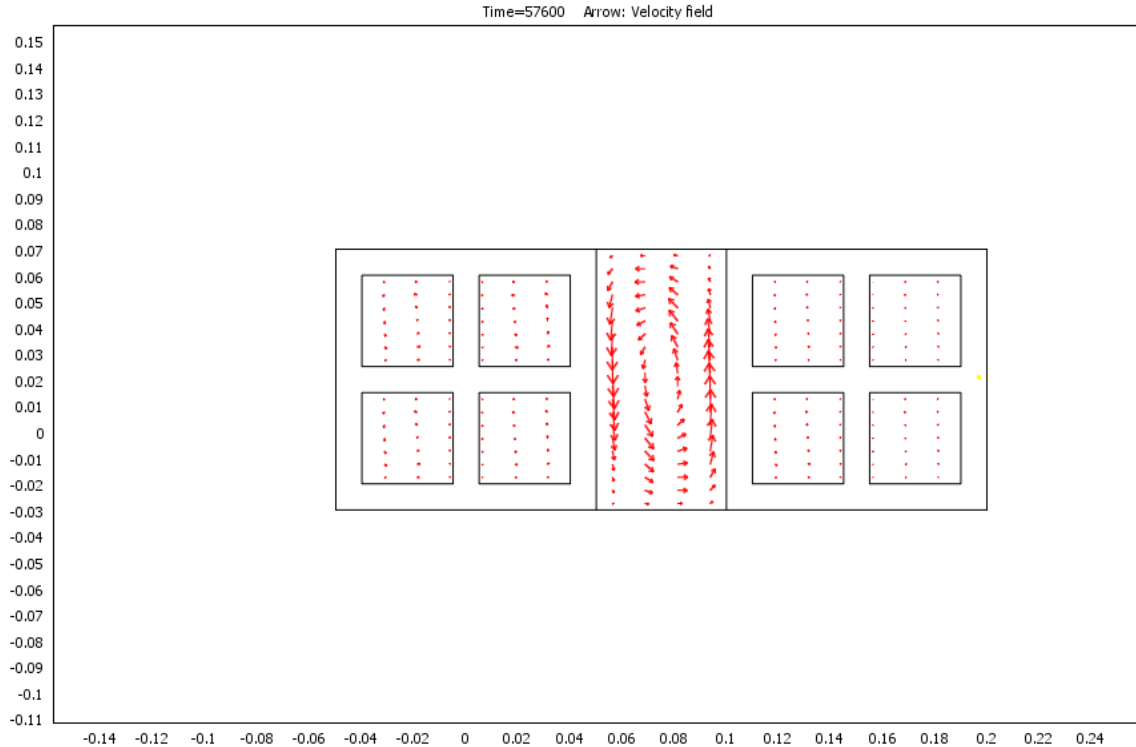


Figure 5. 28 Diagramme à flèche du champ de vitesse de l'air dans le modèle 2D de la paroi multicouche sans aucun composite-MCP.

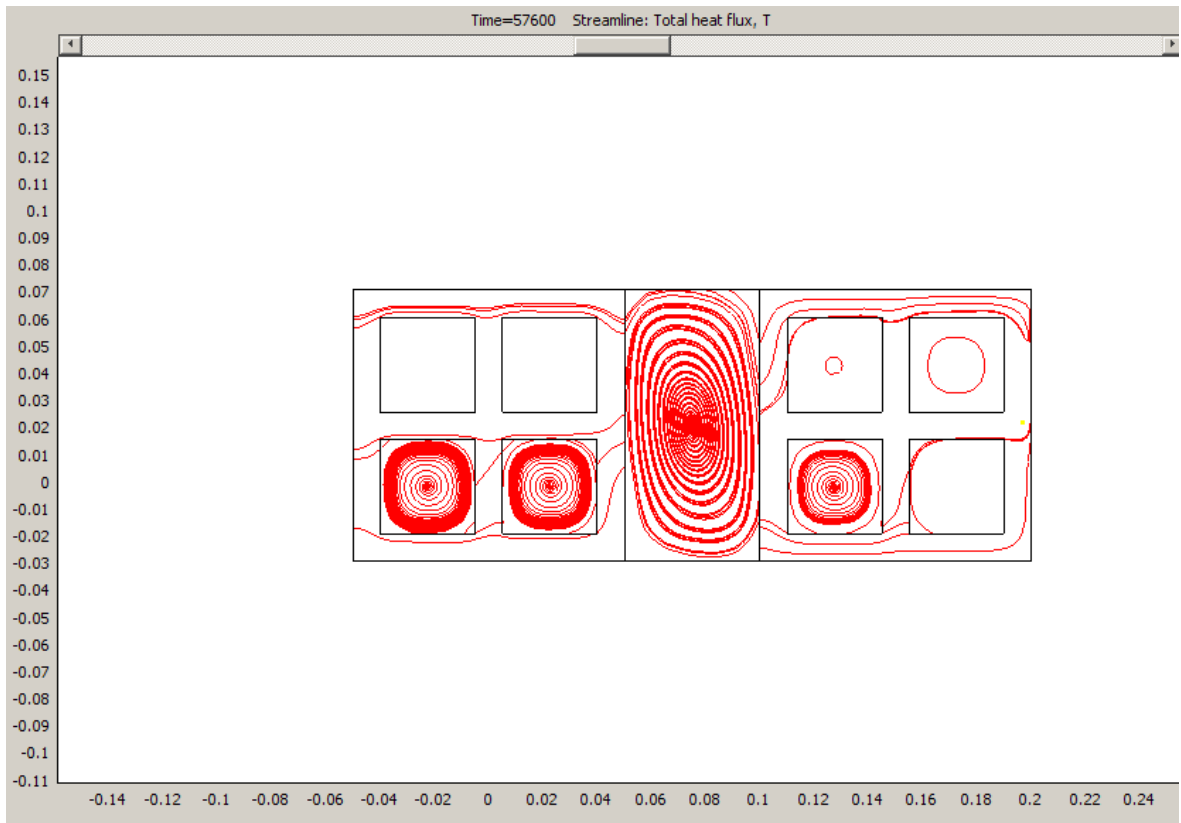


Figure 5. 29 Trajectoire du flux de chaleur total sur le modèle 2D de la paroi multicouches sans aucun composite-MCP.

Les mesures de température ont été prises aux mêmes points (P1), (P2), (P3) et (P4) pour chaque modèle, dont les coordonnées cartésiennes sont les suivantes dans tous les modèles : P1 (0.042, 0.021), P2 (0.069, 0.021), P3 (0.094, 0.021), P4 (0.197, 0.021). La figure 5.30 affiche la position des différents points de mesure sur le modèle 2D.

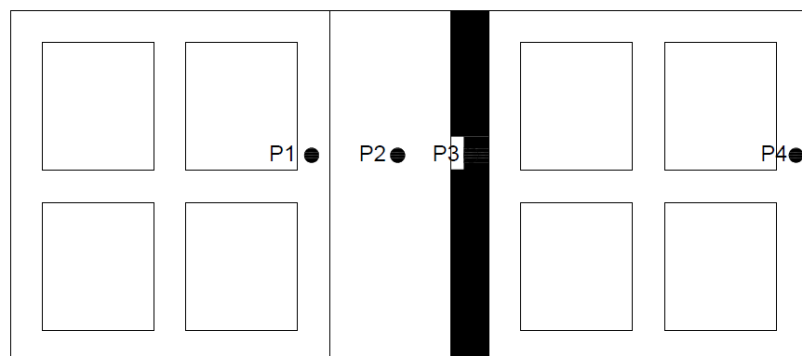


Figure 5. 30 : schéma des positions des différents points de mesure pendant le processus de cristallisation.

La figure 5.32 affiche la courbe de l'évolution des températures aux points (P1) des trois modèles des parois représentatives des murs extérieurs exposés directement aux sollicitations thermiques qui déclenchent le déstockage de la chaleur. Les résultats montrent que les trois courbes se superposent, cela signifie que la température de cette première paroi dépend uniquement des conditions de température qui la sollicitent.

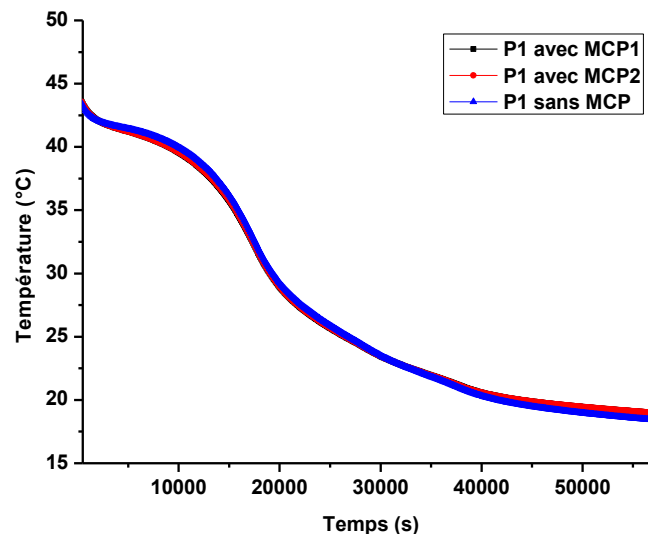


Figure 5. 31 : Évolution des températures aux points (P1) dans les trois modèles

Ces températures correspondent dans la réalité aux conditions climatiques extérieures. La température de cette paroi est aussi liée aux propriétés thermiques des matériaux qui la composent. L'intégration ou la non intégration de la paroi de stockage composite-MCP n'a pas d'incidence sur la température de cette première couche.

La figure 5.33 affiche les résultats numériques de l'évolution des températures au point (P2) sur les trois modèles étudiés numériquement (la paroi multicouche intégrant le composite-MCP1, la paroi multicouche intégrant le composite-MCP2 et la paroi multicouche sans aucun composite-MCP).

Les résultats montrent que entre $t = 0$ s et $t = 28000$ s, la température au point P2 (représentée par la courbe bleue) du modèle sans aucun composite-MCP est supérieure à celle mesurée au même point P2 des modèles intégrant respectivement le composite-MCP1 et le composite-MCP2.

La température au point (P2) du modèle sans MCP a augmenté par rapport à sa température initiale entre $t = 0$ s et $t = 13300$ s avant de redescendre par la suite.

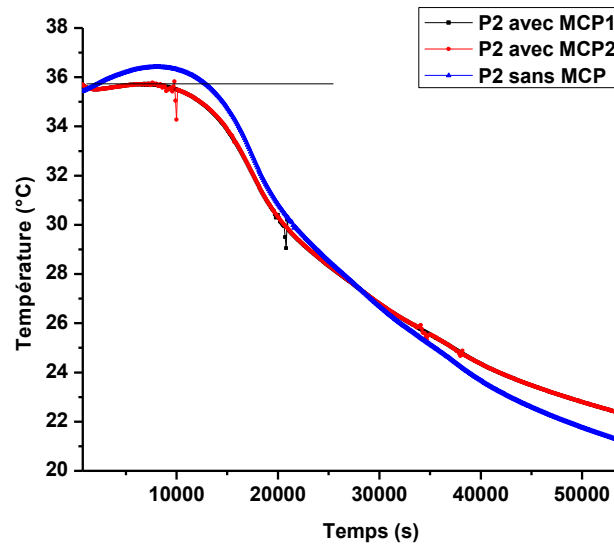


Figure 5. 32 : évolution des températures au point « P2 » dans les trois modèles simulés.

Les courbes des températures aux points P2 dans le cas des modèles intégrant les composites-MCP1 et composite-MCP2 respectivement restent quant à elles stabilisées entre $t = 0$ s et $t = 9600$ s avant de se mettre à redescendre.

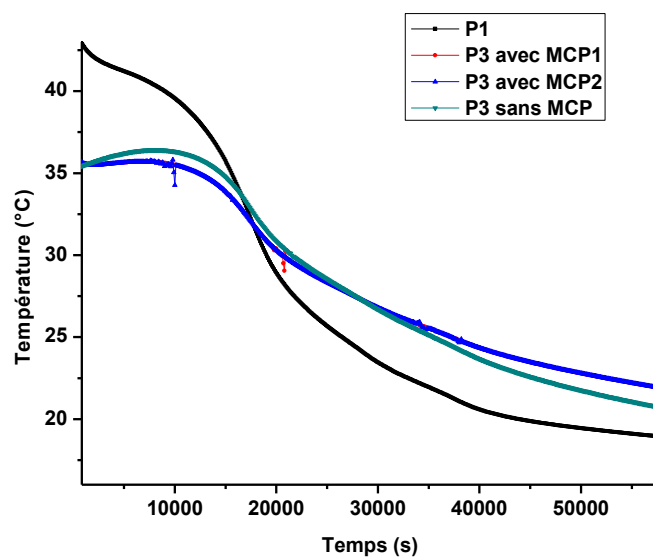


Figure 5. 33 Superposition des profils de température au point P1 (de la paroi extérieure) et celles du point (P3) des trois modèles avec et sans MCP.

La figure 5.33 montre que les températures au point P3 du modèle sans MCP descendent plus vite par rapport à celles enregistrées aux mêmes points (P3) des modèles intégrant respectivement le composite-MCP1 et le composite-MCP2.

À partir des figures 5.31, 5.32, 5.33 nous pouvons tirer un certain nombre de conclusions :

L'augmentation de la température au point (P2) entre $t = 0$ s et $t = 13300$ s dans le modèle sans MCP est liée au déplacement du flux de chaleur stocké préalablement de manière sensible dans la paroi extérieure de la brique (paroi captatrice) sous l'effet du refroidissement. La température de surface de cette paroi captatrice a dépassé les 42 °C à la fin du processus de chauffe.

Les températures au point (P2) restent stables entre $t = 0$ s et $t \approx 10000$ s dans les modèles intégrant respectivement les composites-MCP1 et composite-MCP2. Cela signifie que le flux de chaleur transmis par la paroi extérieure (responsable de l'augmentation des températures au même point en l'absence des composites-MCP) a été stocké par les composites-MCP.

Les résultats précédents montrent que l'intégration des parois de stockage composite-MCP dans les parois multicouches a une influence sur la température de la lame d'air au cours du processus de refroidissement.

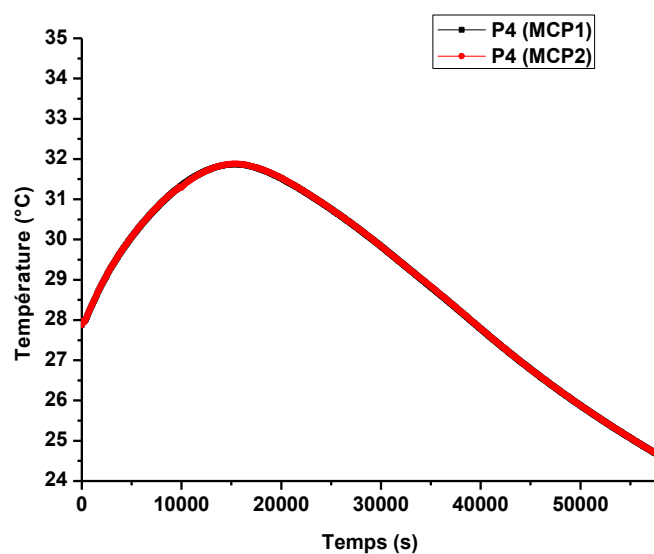


Figure 5. 34 : Évolution des températures dans les : composite-MCP1 et composite-MCP2

La figure 5.34 montre les résultats de l'évolution des températures à l'intérieur des parois de stockage composite-MCP1 et composite-MCP2 pendant toute la période de simulation (16h).

Ce résultat confirme que l'excédent de chaleur enregistré dans la lame d'air de la paroi multicouches sans le MCP a été effectivement stocké par les parois de stockage composite-MCP1 et composite-MCP2 dans le cas des parois multicouches intégrant les parois de stockage composite-MCP. Cependant, la chaleur a été emmagasinée par stockage sensible à l'intérieur des composite-MCP1 et composite-MCP2. La courbe montre que le stockage de la chaleur s'accompagne d'une augmentation de la température des composites-MCPs, cela signifie que les matériaux avaient atteint leurs capacités maximales de stockage latent à température constante pendant la phase de chauffe.

La figure 5.35 affiche l'évolution des températures au point (P5) dans les trois modèles simulés sur la couche qui correspond à la paroi intérieure ayant une incidence directe sur les conditions de température à l'intérieur du bâtiment.

Les résultats de cette étude numérique montrent que la température de la paroi intérieure est fortement influencée par l'intégration des parois de stockage composite-MCP. L'augmentation de la température de la paroi intérieure mesurée au point (P4) se fait plus rapidement et de façon plus

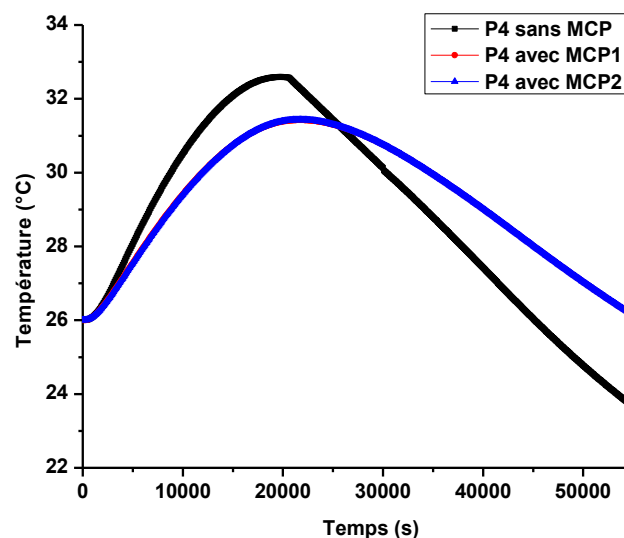


Figure 5. 35 Évolution des températures au point P5 dans les trois modèles.

Significative entre $t = 0$ s et $t = 20700$ s en l'absence des parois de stockage composite-MCP par rapport aux cas où les parois de stockage y étaient intégrées. Cela indique que le flux de chaleur résultant de la décharge thermique sensible de la paroi extérieure atteint plus rapidement les ambiances intérieures en l'absence des parois de stockage composite-MCP.

À partir de $t > 20700$ s, la température de la paroi intérieure descend plus rapidement et de manière plus significative par rapport aux modèles intégrant les parois de stockage composite-MCP.

À partir des résultats précédents, nous pouvons conclure que l'intégration des nouveaux composites-MCP dans la paroi en brique de terre cuite améliore son inertie thermique. En plus de leur capacité à stabiliser les températures des parois par stockage latent, les nouveaux composites-MCP ont une bonne capacité de stockage sensible malgré leur faible épaisseur car celles-ci ont un (C_p) important.

Les profils de température du modèle intégrant le composite-MCP1 se superposent à ceux obtenus avec le composite-MCP2 car les propriétés thermiques des deux parois de stockage composite-MCP1 et composite-MCP2 sont presque similaires.

L'intégration passive des matériaux à changement de phase à l'intérieur des parois verticales améliore le confort thermique dans les ambiances intérieures en période de fortes chaleurs. L'intégration passive des matériaux à changement de phase dans les enveloppes des bâtiments peut engendrer la non solidification totale de ces substances pendant le processus de refroidissement ; ce qui réduit leurs capacités de stockage latent à température constante pour le cycle suivant. Ce problème a déjà été soulevé par plusieurs chercheurs^{346, 347, 348}.

Le comportement thermique d'un exemple de bâtiment en brique de terre cuite a été étudié numériquement pour vérifier l'influence de l'intégration du nouveau matériau sur tous les mois de l'année.

5.3 Simulation numérique sur Energy-Plus du comportement thermique d'un bâtiment avec et sans l'intégration du composite-MCP1

La simulation numérique sur Energy-Plus a été effectuée pour étudier le comportement thermique d'un exemple de bâtiment à l'échelle réelle avec et sans l'intégration du nouveau composite-MCP1.

Nous avons choisi de travailler numériquement par manque de matériel de mesure et de matière première pour l'élaboration des composites-MCP grandeur réelle pour une application sur un exemple de bâtiment existant.

Le logiciel gratuit Energy-Plus version 8.7.0 a été utilisé pour sa capacité à prendre en compte dans le processus de calcul les phénomènes de transfert de chaleur avec changement de phase dans les enveloppes des bâtiments^{349, 350, 351}. C'est aussi un logiciel gratuit reconnu pour la recherche.

La simulation numérique a été réalisée sur un exemple de bâtiment intégrant le composite-MCP1 dans son enveloppe côté Sud, Est et Ouest (parois les plus exposées au rayonnement solaire). La structure de l'enveloppe extérieure du bâtiment étudié est en brique de terre cuite (modèle très répandu dans les pays méditerranéens notamment en Algérie). Des chercheurs ont démontré l'efficacité de l'intégration des MCPs à basse température de fusion dans ce type de parois verticales^{353, 354, 378} notamment dans le contexte espagnol³⁵².

5.3.1 Localisation des bâtiments simulés sur Energy-Plus

Le travail de simulation numérique des bâtiments a été considéré sous le climat de la capitale Algérienne « Alger » (longitude : 3.25°, Latitude : 36.72°, élévation : 25 m, fuseau horaire : GMT+1). Les premières raisons ayant motivé notre choix sont : la disponibilité des fichiers météo pour cette ville nord Africaine sur Energy-Plus³⁵⁵ ; l'abondance des bâtiments qui ne tiennent pas en compte des conditions de confort thermique et des consommations énergétiques (anciens soient-ils, nouveaux ou en cours de construction). Le recours aux systèmes énergivores de conditionnement d'air et de chauffage

dans tous les bâtiments résidentiels et commerciaux construits en double cloison de brique de terre cuite.

5.3.2 Configuration des modèles de bâtiment simulés sur EP

Les simulations ont été effectuées dans un premier temps sur une petite pièce de (7m x 6m x 3m) d'un bâtiment orienté plein sud sous le climat de la ville d'Alger en se basant sur les fichiers météo de l'année 2009 (dernière mise à jour) disponible sur le site officiel Energy-Plus³⁵⁵.

Les figures 5.36 et 5.37 présentent respectivement les modèles 2D et 3D de la partie du bâtiment étudiée. Une seule zone thermique est considérée dans le processus de calcul pour ce modèle.

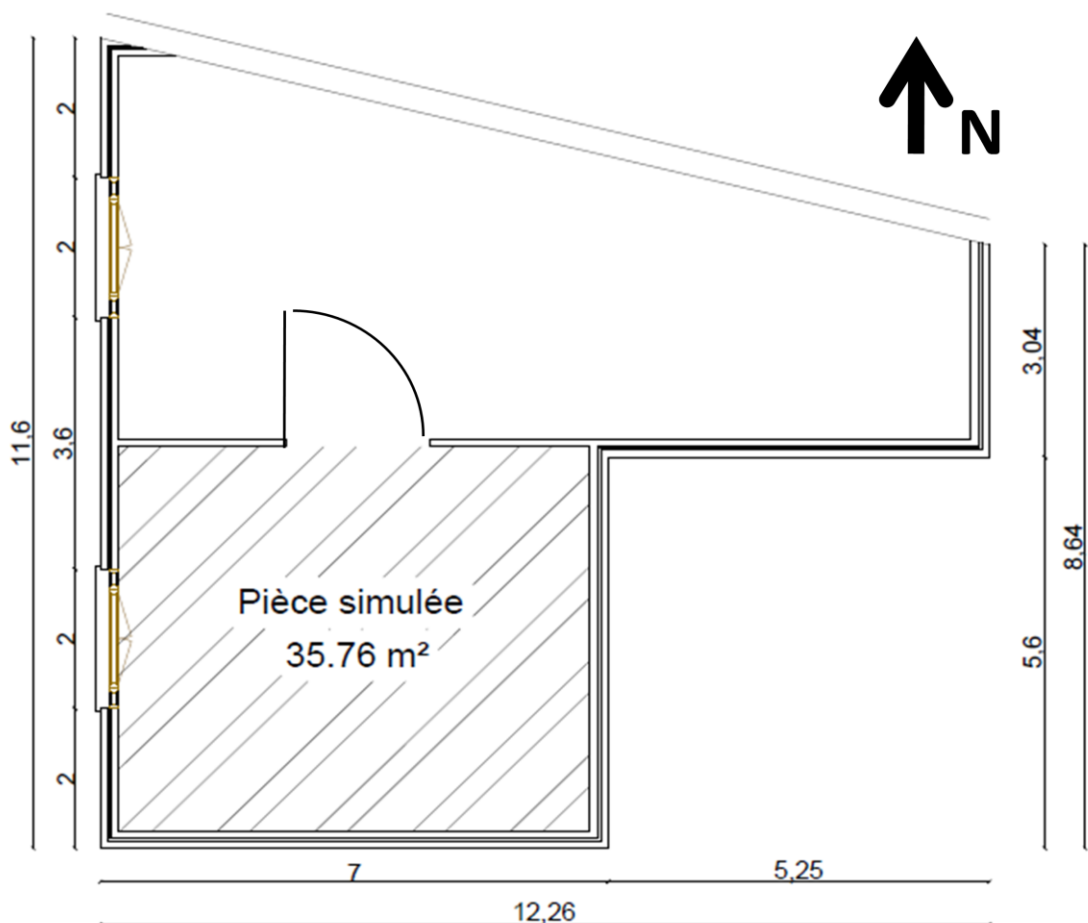


Figure 5. 36 Modèle 2D de la partie de bâtiment simulée avec et sans le composite-MCP1.

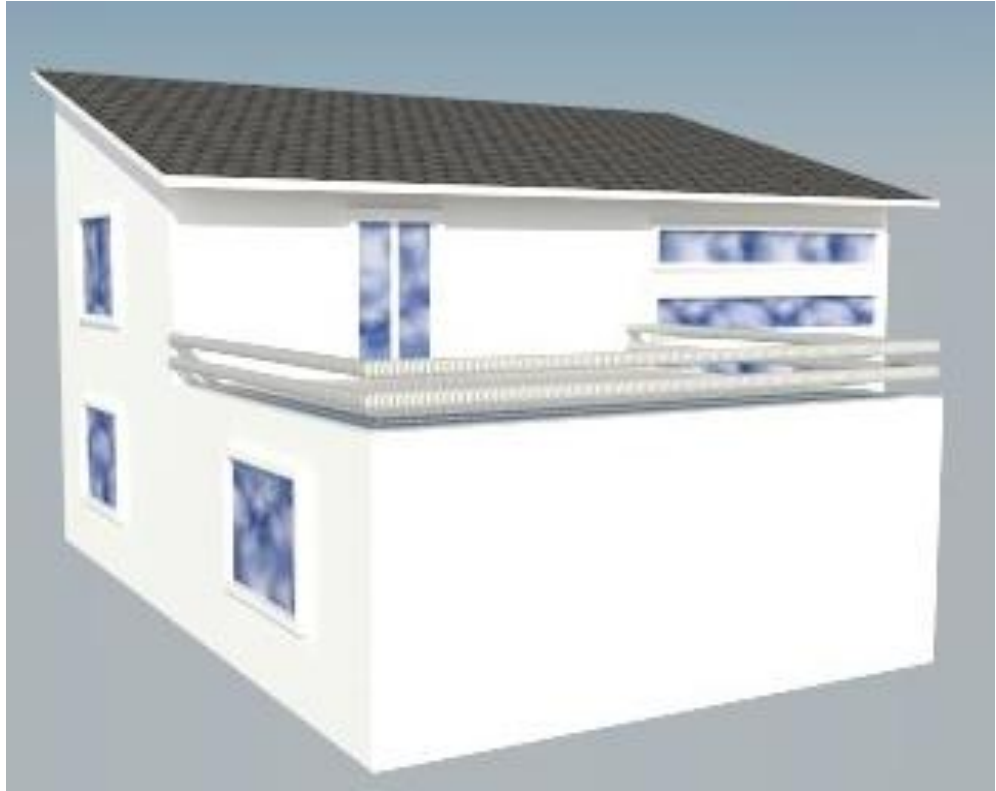


Figure 5. 37 Modèle 3D du bâtiment simulé

Dans un second temps, les simulations se sont effectuées sur un modèle de bâtiment plus complexe. Il s'agit d'un espace de 80 m² comportant cinq zones thermiques. Chaque zone thermique correspond à une pièce ou à un groupement de pièces ayant la même orientation.

La figure 5.38 montre la configuration 2D du deuxième modèle simulé tandis que la figure 5.39 affiche le schéma des différentes zones thermiques qui composent le modèle étudié.

Le composite-MCP1 est intégré dans toutes les parois de l'enveloppe extérieure exposées au rayonnement solaire. Les parois qui constituent la façade nord n'étant pas exposées au rayonnement solaire, ne sont pas concernées par l'application du nouveau composite-MCP1 élaboré dans le cadre de ce travail de thèse.

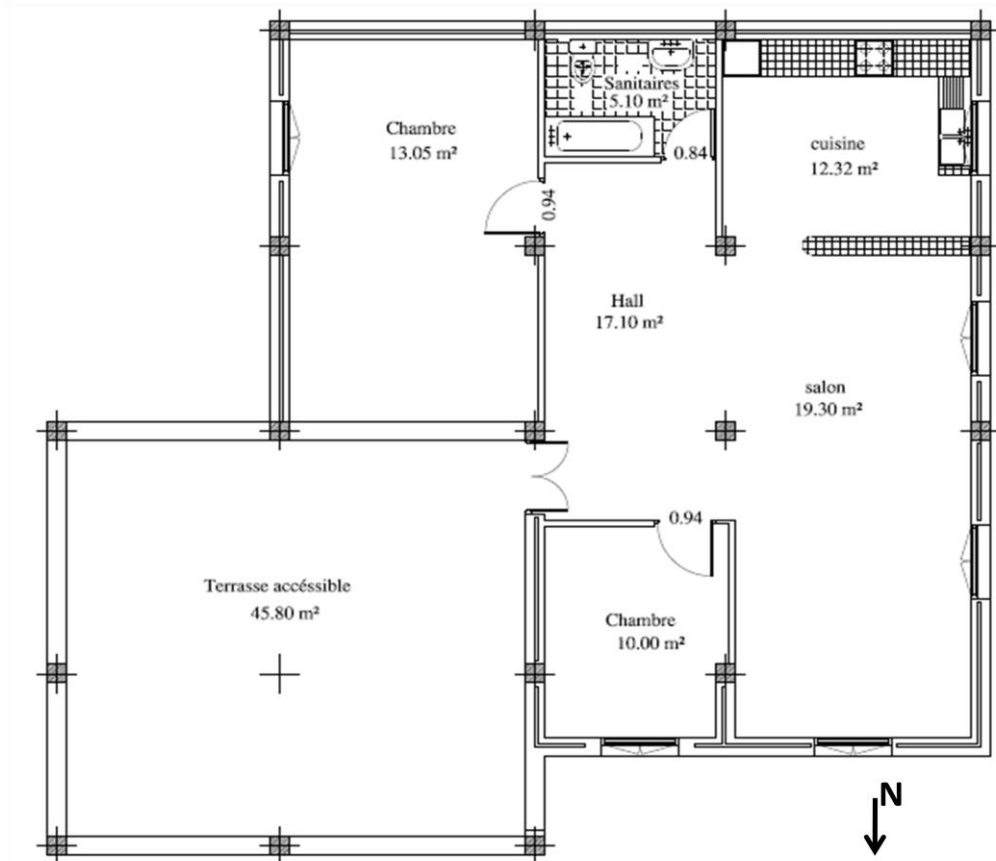


Figure 5. 38 Configuration 2D du modèle de la maison simulée

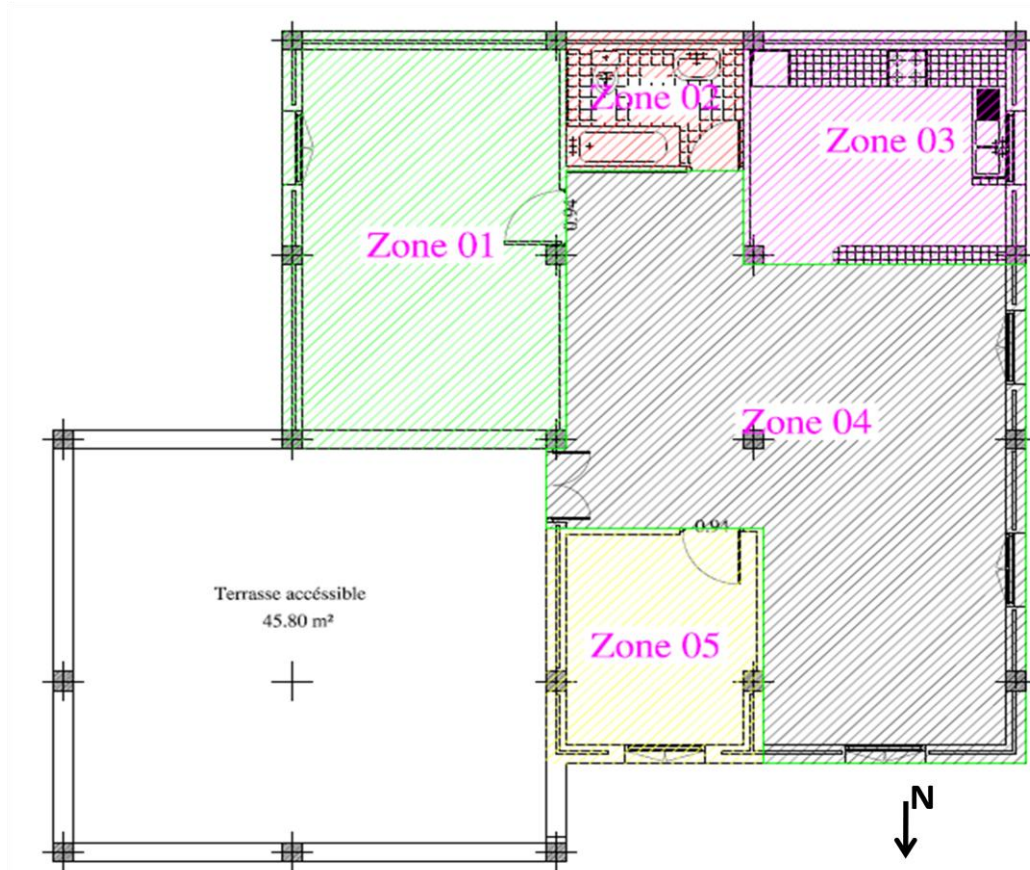


Figure 5. 39 les différentes zones climatiques qui constituent le modèle 2D étudié

5.3.3 Description du modèle numérique implanté sur Energy-Plus

Généralement, les transferts de chaleur à travers les parois de bâtiment sur EP sont considérés unidirectionnels et sont traités comme étant un problème 1D. La méthode conventionnelle adoptée pour traiter ce genre de problème est la « fonction de transfert par conduction » (Conduction Transfer Function) ³⁵⁶.

Les principaux avantages de cette méthode sont sa rapidité et sa simplicité. Le calcul s'effectue avec des fonctions linéaires simples qui ne tiennent compte que de coefficients constants. Par conséquent, cette méthode ne pourrait pas traiter des problèmes liés à des propriétés thermiques qui varient en fonction de la conductivité ou du changement de phase ³⁵⁷.

Pour modéliser les transferts de chaleur dans les parois de bâtiment avec changement de phase, Energy-Plus utilise l'algorithme des différences finies (Conduction finite difference algorithm) en se basant sur un schéma implicite de différences finies ^{358, 188}. C'est donc la seconde méthode de calcul que nous adoptons dans notre modèle Energy-Plus.

La description des modèles simulés sous Energy-Plus se fait par l'introduction des données dans l'application « IDF editor » qui permet de simplifier la construction du modèle. Les données introduites sont qualifiées de « inputs », les résultats collectés sont des outputs.

5.3.3.1 Les Inputs introduits sous Energy-Plus

Les inputs introduits dans Energy-Plus dans le cas des modèles développés dans le présent travail de thèse peuvent être répartis en trois grandes catégories : les inputs généraux, les inputs relatifs aux propriétés des matériaux utilisés dans la composition de l'enveloppe étudiée ainsi que les inputs relatifs aux apports thermiques internes et aux infiltrations considérées à l'intérieur des espaces simulés.

Les inputs généraux ainsi que ceux relatifs aux propriétés des matériaux de construction utilisés dans la composition des enveloppes des deux modèles sont les mêmes puisqu'ils ont la même situation géographique, le même

climat, la même orientation ainsi que les mêmes matériaux de construction et configuration des enveloppes. Les différences dans les inputs résident dans les apports internes, les infiltrations ainsi que le nombre de zones thermiques à considérer dans le processus de simulation. Il est important de noter que plus la taille du bâtiment est importante, plus grand sera le nombre des zones thermiques qui le composent.

5.3.3.1.1 Les inputs généraux (General inputs)

Les inputs généraux comprennent les données relatives à :

- **La version Energy-Plus** : la version du fichier d'édition des données (IDF editor) est introduite par l'utilisateur, elle doit être compatible avec la version du programme EP installé sur l'ordinateur. Il est important de savoir que les versions antérieures à la V 5.0.0 ne tiennent pas en compte du comportement des MCPs dans les enveloppes des bâtiments. Dans notre cas nous avons utilisé la version 8.7.0 car nombreux sont les articles qui parlent de l'efficacité de cette version dans la prise en considération des MCPs dans le processus de simulation.^{384, 385, 386, 387.}
- **Le contrôle de simulation** : Ce champ s'intéresse à la définition des commandes de calcul requises pour effectuer les simulations envisagées (Fig.5.40).

Field	Units	Obj1
Do Zone Sizing Calculation		No
Do System Sizing Calculation		No
Do Plant Sizing Calculation		No
Run Simulation for Sizing Periods		Yes
Run Simulation for Weather File Run Periods		Yes
Do HVAC Sizing Simulation for Sizing Periods		No

Figure 5. 40 : Figure résumant les différents inputs du champ « Contrôle de la simulation ».

- **Le bâtiment (building)** : Cette commande décrit le bâtiment, sa géolocalisation, son orientation par rapport au nord, le terrain

(urbain ou non), les valeurs de tolérance de convergence pour le calcul du bâtiment (prises par défaut).

- **Algorithme de convection de surface (intérieur/ extérieur) (Surface Convection Algorithm : inside and outside)** : il a été pris comme « détaillé » autrement nommé (TARP) dans les versions récentes de Energy-Plus. Il permet d'établir une corrélation entre le coefficient de transfert de chaleur des surfaces et la différence de température pour différentes orientations du bâtiment^{359, 360}.
- **Algorithme du bilan thermique (Heat Balance Algorithm)** : Cette commande permet de définir l'algorithme de résolution de l'équation de chaleur. Dans cette étude nous avons sélectionné l'algorithme des « différences finis de conduction » (conduction finite difference) pour résoudre l'équation de transfert de chaleur dans chacun des modèles sans MCPs et avec MCP³⁶¹.

5.3.3.1.2 Les inputs relatifs aux propriétés des matériaux de construction et de la construction des éléments des bâtiments simulés

Cette section résume les inputs relatifs aux propriétés des matériaux utilisés dans les bâtiments simulés (matériaux de l'enveloppe, de la toiture, du plancher, des fenêtres, des portes ainsi que ceux des matériaux à changement de phase). La section construction quant à elle donne la configuration de chaque élément du bâtiment en fonction des différentes couches de matériaux qui les composent de l'extérieur vers l'intérieur. Les propriétés des matériaux sont soit tirées des résultats des différentes caractérisations effectuées soit de l'ASHRAE HANDBOOK OF MATERIALS³⁴⁰.

5.3.3.1.3 Les inputs relatifs aux zones thermiques et à la géométrie globale du bâtiment

Les inputs relatifs à la géométrie et à la détermination des zones thermiques nous permettent de définir l'architecture du bâtiment définitif à

considérer par le logiciel dans son processus de calcul. EP n'a pas d'interface graphique qui permettrait d'introduire le bâtiment en 3D, c'est pour cette raison que chaque élément du modèle de bâtiment est introduit sous forme de coordonnées cartésiennes (x, y, z) .

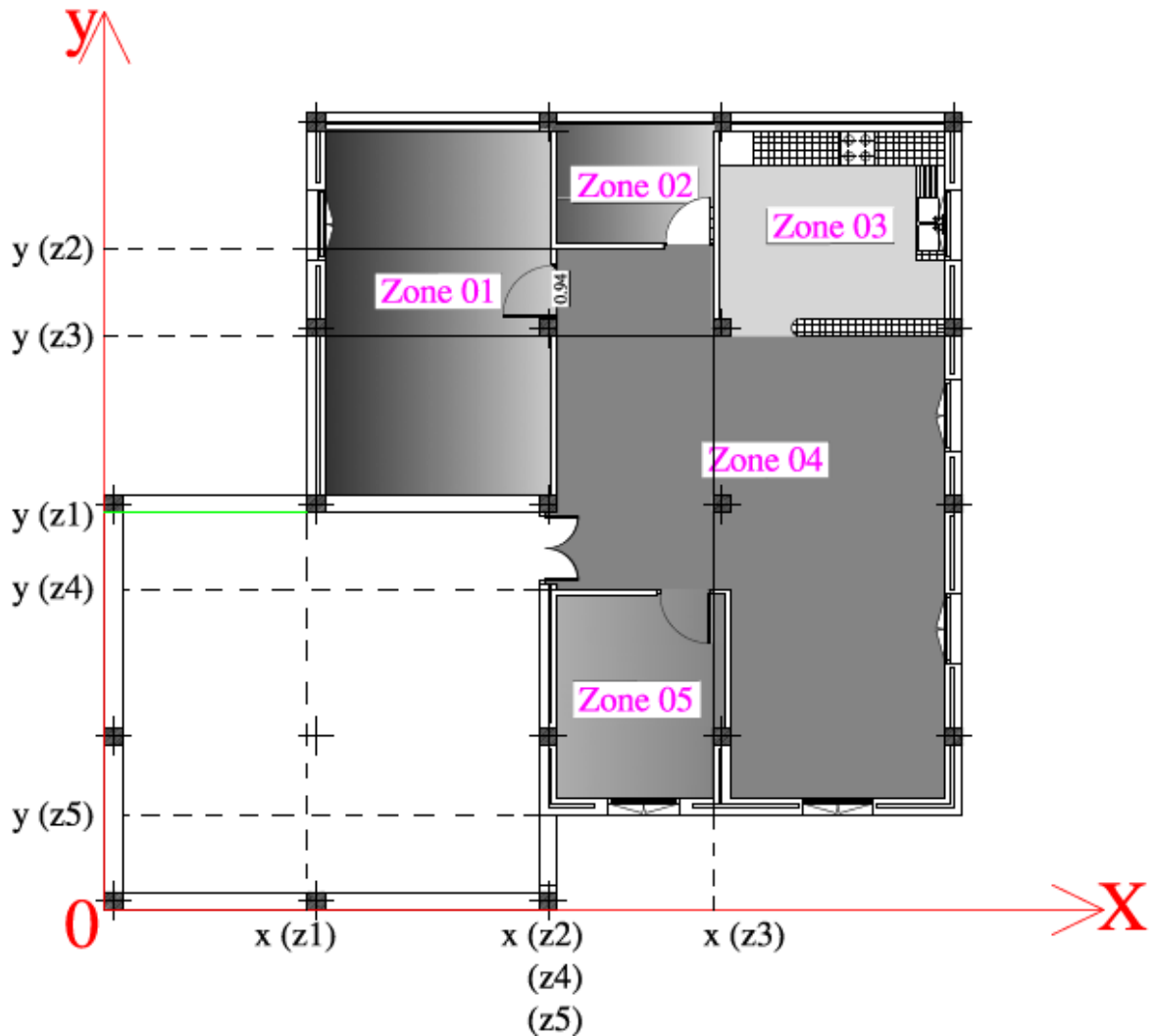


Figure 5. 41 : Positionnement du plan 2D d'un exemple de maisons simulées pour définir un sens conventionnel de lecture et déterminer l'architecture du modèle.

À partir du schéma présenté sur la figure 5.41 et de la dimension du bâtiment considéré, de l'orientation de ses différents espaces, nous définissons les zones thermiques qui le composent ainsi que leurs positions respectives sur le repère orthonormé prédéfini.

Avant d'introduire les coordonnées cartésiennes des éléments dans EP ; un sens conventionnel de lecture est préalablement défini (Fig.5.42).

Dans le présent modèle nous avons choisi de commencer la définition de tous les éléments du bâtiment par le point haut gauche de chacun des éléments. Pour passer à la définition du point suivant, il convient de tourner dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Fig.5.42). Tous les éléments sont introduits point par point (Fig.5.43).

Field	Units	Obj1
Starting Vertex Position		UpperLeftCorner
Vertex Entry Direction		Counterclockwise
Coordinate System		World
Daylighting Reference Point Coordinate System		
Rectangular Surface Coordinate System		

Figure 5. 42 Définition du sens conventionnel d'introduction des coordonnées cartésiennes des points de chaque élément du bâtiment.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Mur west Z4 2	Mur sud Z4 2	Plafond Z2	Mur west Z2	Mur nord Z2	Mur sud Z2
Surface Type		Wall	Wall	Roof	Wall	Wall	Wall
Construction Name		Wall	Wall	Plafond	Wall	Wall	Wall
Zone Name		ZONE 4	ZONE 4	ZONE 2	ZONE 2	ZONE 2	ZONE 2
Outside Boundary Condition		Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object							
Sun Exposure		SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed
Wind Exposure		WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed
View Factor to Ground		0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	3.95	3.95	4.25	7.2	4.25	4.25
Vertex 1 Y-coordinate	m	10.93	3.98	9.68	9.68	9.68	11.98
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	0	3	0	0	0
Vertex 2 X-coordinate	m	3.95	6.9	7.2	7.2	7.2	7.2
Vertex 2 Y-coordinate	m	13.23	3.98	9.68	11.98	9.68	11.98
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	3	0	0	0
Vertex 3 X-coordinate	m	3.95	6.9	7.2	7.2	7.2	7.2
Vertex 3 Y-coordinate	m	13.23	3.98	11.98	11.98	9.68	11.98
Vertex 3 Z-coordinate	m	3	3	3	3	3	3

Figure 5. 43 Capture EP montrant comment les différents éléments du bâtiment sont définis à partir de leurs coordonnées cartésiennes.

Il en est de même pour l'introduction des données relatives aux portes et aux fenêtres par rapport à leurs positions sur la paroi qui à son tour appartient à une zone thermique.

5.3.3.1.4 Les inputs relatifs aux infiltrations et aux apports internes

Les infiltrations de l'air sont l'ensemble des flux d'air incontrôlés et non intentionnels qui s'infiltrent depuis l'environnement extérieur vers l'intérieur des zones thermiques (intérieur du bâtiment) à travers les ponts thermiques, les ouvertures (portes et fenêtres) ainsi que les éléments constructifs notamment l'enveloppe extérieure des bâtiments ^{262, 263}. Le modèle utilisé dans le présent

travail de thèse pour le calcul les infiltrations non intentionnelles de l'air vers l'intérieur des zones thermiques est celui des « zones de fuite effectives » (Zone infiltration : Effective Leakage Area). Ce choix s'est basé sur le travail de Sherman et Grimsrud (1980)³⁶⁴ ayant démontré que le modèle en question est approprié pour modéliser les infiltrations d'air dans les bâtiments résidentiels de petite dimension. L'équation utilisée par Energy Plus pendant le processus de calcul est :

$$\text{Infiltrations} = \frac{A_l}{1000} \sqrt{C_s \Delta T + C_w (\text{WindSpeed})^2} \dots \dots \dots (10)^{365}$$

A_l : La surface effective en contact avec l'extérieur

ΔT : c'est la différence de température entre la zone thermique et l'extérieur

C_s : 0.000145 (L/s)²/(cm⁴.K) (pour les maisons en plein pied)

C_w : 0.000319 (L/s)²/[cm⁴.(m/s)²] (Pour les fenêtres des maisons en plein pied sans blindage local).

Wind Speed : Vitesse de l'air.

Il n'y a pas que les infiltrations de l'air qui influencent les consommations énergétiques à l'intérieur des bâtiments, d'autres facteurs tels : les conditions d'occupation par les personnes, le nombre de personnes dans les pièces, l'éclairage, le type d'équipements disponibles dans le bâtiment...etc. Au même titre que les infiltrations, les facteurs précités peuvent être pris en considération par Energy-Plus dans le processus de calcul des consommations énergétiques.

L'objectif de cette étude est de voir l'influence de l'enveloppe extérieure sur le confort thermique et les consommations énergétiques dans les zones thermiques des modèles simulés. Hormis les infiltrations, les autres facteurs précités n'ont pas été introduits dans le processus de calcul EP.

5.3.4 Résultats et discussion des simulations réalisées sur Energy-Plus

La programmation des outputs est la dernière étape importante qui nous permet de tirer les résultats visés, autrement dit : ce que l'utilisateur demande au logiciel de lui calculer après lui avoir fourni toutes les données nécessaires et décrit le bâtiment dans les Inputs.

Cette section présente les résultats de la simulation obtenus sur Energy-Plus sur les deux exemples de modèles simulés. Le premier étant une partie de maison avec une seule zone thermique orientée plein Sud et le second modèle étant une maison complète avec cinq zones thermiques orientées différemment.

La description du modèle numérique développé sous Energy-Plus 8.7.0 a été effectuée dans les sections précédentes (les inputs). Les mêmes outputs ont été programmés sur les mêmes modèles de maison avant et après l'intégration des nouveaux matériaux composites-MCPs afin d'étudier leur impact sur le confort thermique et les consommations énergétiques de ces structures.

5.3.4.1 La résistance thermique des murs intégrant le nouveau composite-MCP1

L'amélioration de la performance thermique des enveloppes des bâtiments par l'intégration des matériaux à changement de phase ne se fait pas par le renforcement de la résistance thermique de celles-ci³⁶⁶.

L'intégration du composite-MCP1 élaboré et caractérisé dans ce travail de thèse aurait que très peu ou pas d'incidence sur le renforcement de la résistance thermique des parois des bâtiments dans lesquels il est intégré. La résistance thermique du nouveau matériau composite-MCP est de l'ordre de $0.23 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$. Cette caractéristique a été déterminée mathématiquement à

partir de la formule classique de la résistance thermique : $R = \frac{e}{\lambda}$. L'épaisseur

« e » du composite-MCP1 a été mesurée avec précision par un pied à coulisse électronique tandis que sa conductivité thermique a été obtenue par caractérisation au hot-disk.

5.3.4.2 Calcul de la température moyenne à l'intérieur des bâtiments étudiés avec et sans l'intégration du nouveau composite-MCP1

Les simulations numériques ayant pour objet le calcul des températures moyennes de l'air à l'intérieur des modèles considérés ont été réalisées dans deux cas différents : dans le cas où les enveloppes de ceux-ci n'intègrent aucun matériau composite-MCP, dans le cas où les enveloppes intègrent le composite-MCP1 élaboré à l'intérieur de la lame d'air (voir la configuration des parois à MCP dans les sections précédentes).

Les températures opératives à l'intérieur de chaque zone thermique du modèle simulé ont été calculées sur 72h (3 jours consécutifs) pour chaque mois de l'année sous les conditions climatiques de la ville d'Alger.

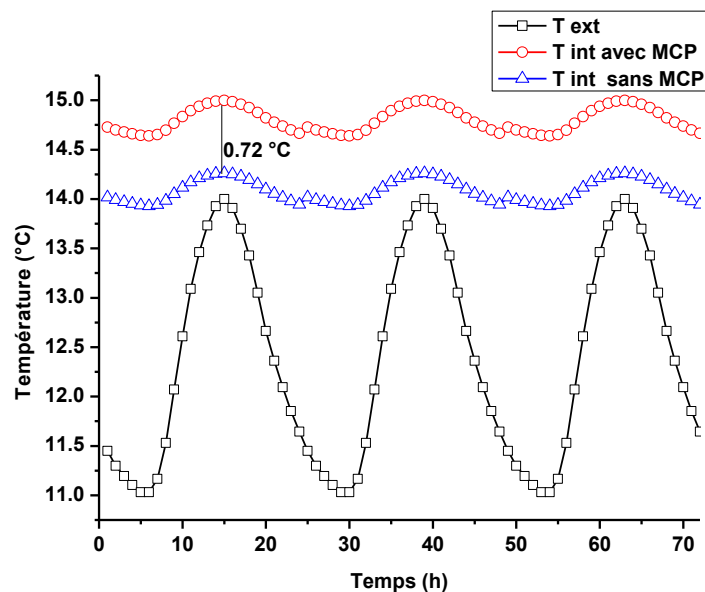


Figure 5. 44 Évolution des températures opérative à l'intérieur de la zone thermique unique avec et sans MCP (Janvier).

Les figures 5.44 et 5.45 montrent l'évolution des températures opératives à l'intérieur de la zone thermique unique du premier modèle et de la zone 4 (la partie la plus importante) du deuxième modèle sur trois jours du mois de janvier avec et sans l'intégration du composite-MCP1.

À partir des figures précédentes, on constate que la différence des températures intérieures avec et sans MCP dans les modèles 1 et 2 est insignifiante : elle est de l'ordre de 1 °C (Fig.5.44 et 5.45).

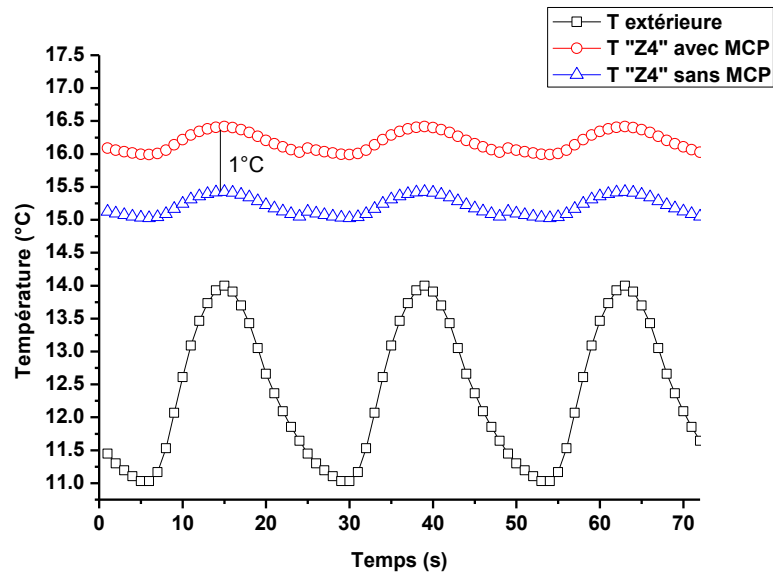


Figure 5. 45 Évolution des températures à l'intérieur de la zone thermique 4 avec et sans MCP (Janvier).

Les températures intérieures dans les modèles intégrant le composite-MCP1 sont plus élevées de 1°C. Ceci est dû à la résistance thermique du composite-MCP1 (0.23 m².K/W) et non pas à sa capacité de stockage latent.

Les températures des zones thermiques (zone 1, zone 2, zone3, zone 5) restent plus au moins constantes sur toute la période de mesure. Ceci peut-être dû au fait que ces espaces ne soient pas trop importants et que les échanges de température avec l'extérieur ainsi que les apports internes sont insignifiants. Les températures moyennes à l'intérieur de ces zones avec et sans MCP sur tous les mois de l'année sont présentées dans le tableau 5.44.

Les figures 5.46 et 5.47 affichent les résultats de l'évolution des températures intérieures sur trois jours du mois de février dans les deux modèles de bâtiments étudiés avec et sans l'intégration du composite-MCP1 dans leurs enveloppes respectives.

Les résultats obtenus au mois de février sont semblables à ceux obtenus au mois de janvier. Les températures des zones thermiques intégrant le composite-MCP1 sont supérieures à celles obtenues dans les zones thermiques n'intégrant aucun composite-MCP de l'ordre de 1°C. Ceci est dû à

un léger renforcement de la résistance thermique des parois intégrant les composite-MCP1.

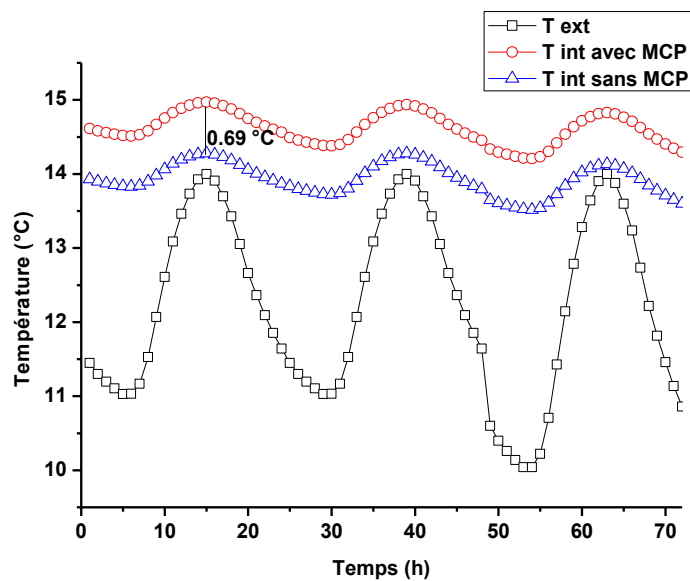


Figure 5. 46 Évolution des températures de l'air à l'intérieur de la zone thermique unique avec et sans MCP (Février).

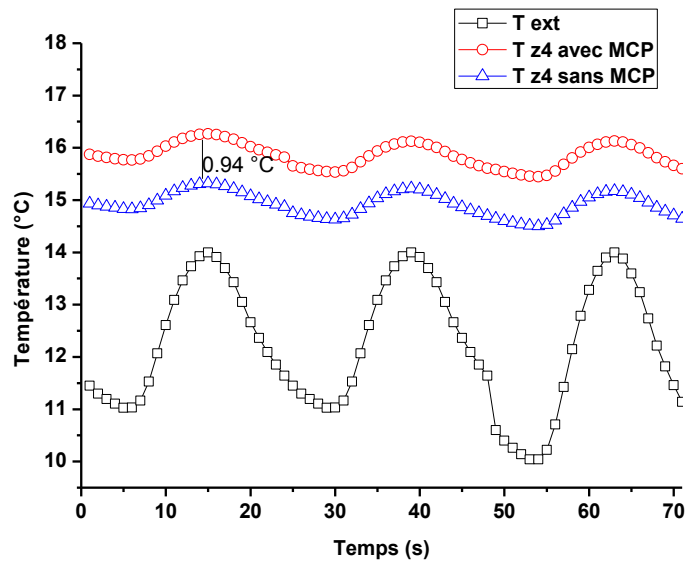


Figure 5. 47 Évolution des températures de l'air intérieur de la zone 4 avec et sans MCP (Février).

Les figures 5.48 et 5.49 affichent les résultats de l'évolution des températures intérieures sur trois jours du mois de mars dans les deux modèles de bâtiments simulés avec et sans le composite-MCP1.

Les résultats montrent que les profils de température des zones thermiques qui n'intègrent pas le composite-MCP1 dans leurs parois extérieures n'affichent pas de grande différence par rapport à celles des zones

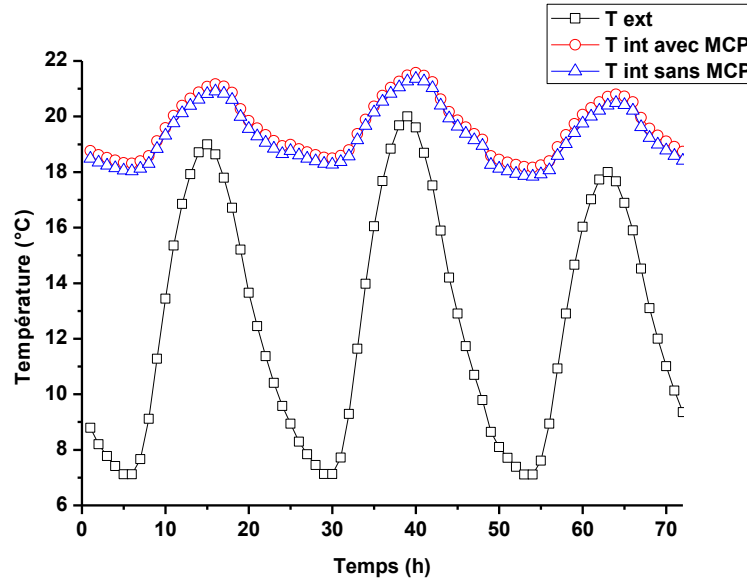


Figure 5. 48 Évolution des températures intérieures de la zone unique avec et sans le composite-MCP1 (Mars).

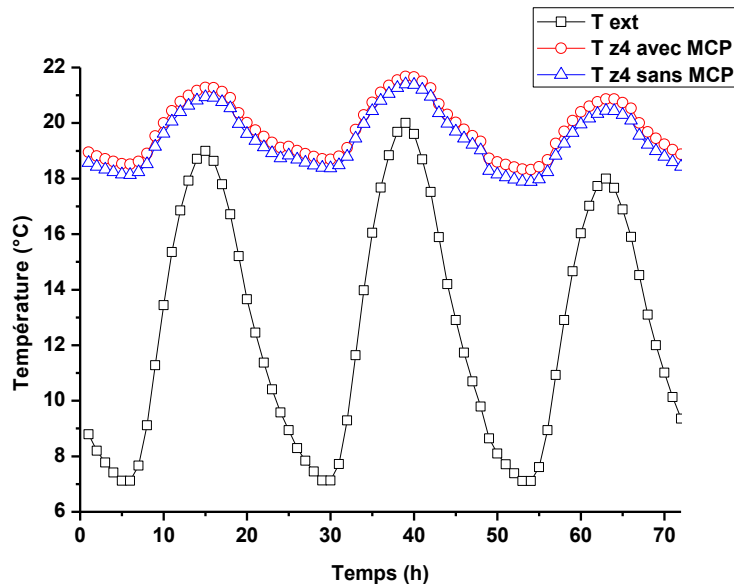


Figure 5. 49 Évolution des températures intérieures de la zone thermique 4 sur trois jours avec et sans MCP (Mars).

Thermiques intégrant le composite-MCP1. La différence de température enregistrée est insignifiante, elle est de l'ordre de 0.3 °C. Cela indique que le composite-MCP1 intégré dans l'enveloppe des bâtiments n'a aucune influence sur

les conditions de température intérieure sous les conditions climatiques du mois de Mars.

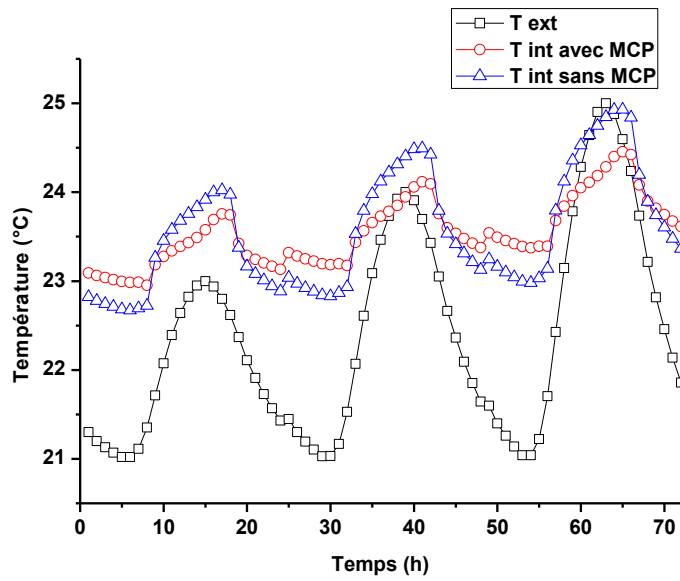


Figure 5. 50 Évolution des températures de la zone thermique unique avec et sans le composite-MCP1 sur trois jours (Avril).

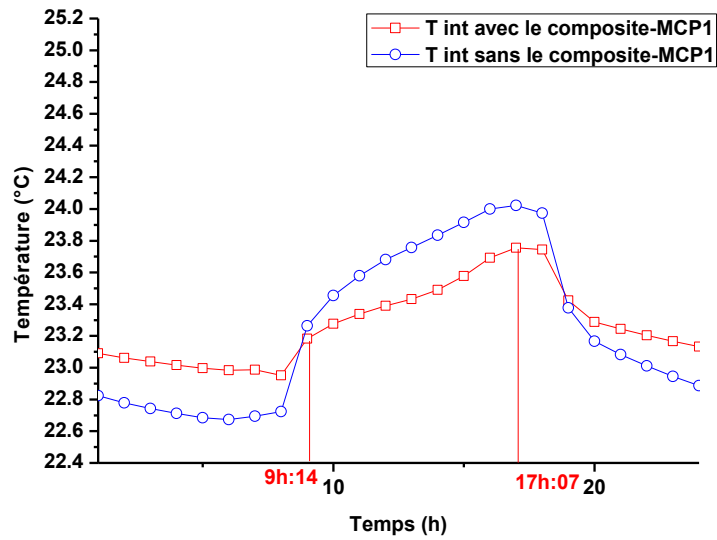


Figure 5. 51 Évolution des températures intérieures de la zone unique sur 24h avec et sans le composite-MCP1. (Avril).

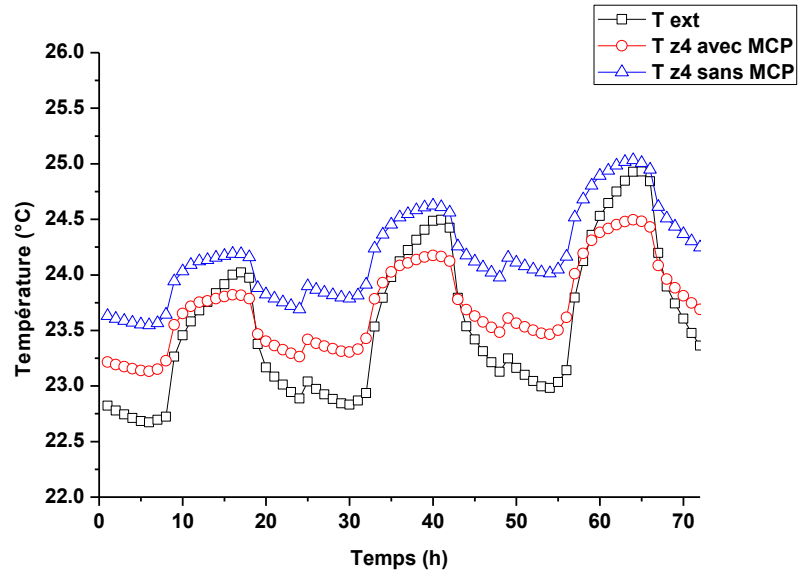


Figure 5. 52 Évolution des températures intérieures de la zone 4 sur trois jours avec et sans MCP (Avril).

Les figures 5.50, 5.51 et 5.52 affichent les résultats de la simulation numérique des températures intérieures des bâtiments considérés en fonction des conditions de température extérieures sur trois jours du mois d’avril.

Les résultats de la simulation montrent que contrairement aux résultats du mois de mars, les températures intérieures des zones thermiques étudiées

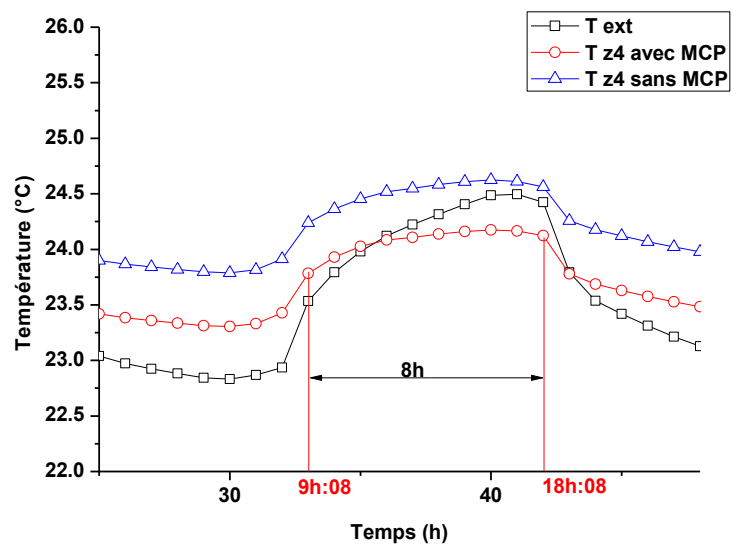


Figure 5. 53 Évolution des températures moyennes de l’air intérieur de la zone thermique 4 sur une période de 24h (Avril)

Sont influencées par l'intégration du composite-MCP1 dans les enveloppes extérieures pendant le mois d'avril.

Les températures intérieures opératives des zones thermiques simulées sans MCP sont supérieures à celles obtenues avec l'intégration du composite-MCP1. Les températures intérieures des zones thermiques intégrant le composite-MCP1 se stabilisent entre 23.40 °C et 23.60 °C sur une plage de temps de 8h pendant la journée (Fig.5.51 et Fig.5.53) ; pendant que les températures extérieures continuent d'augmenter sur cette même plage de temps. Cela indique que le composite-MCP1 dont le point de fusion se situe vers 23 °C a été sollicité par les conditions de températures extérieures qui dépassent les températures de changement de phase. Pendant le processus de changement de phase l'excédent de chaleur est stocké sous forme de chaleur latente à température constante.

Les figures 5.54 et 5.55 affichent l'évolution des températures intérieures respectives de la zone unique et de la zone 4 simulées dans le présent travail de thèse.

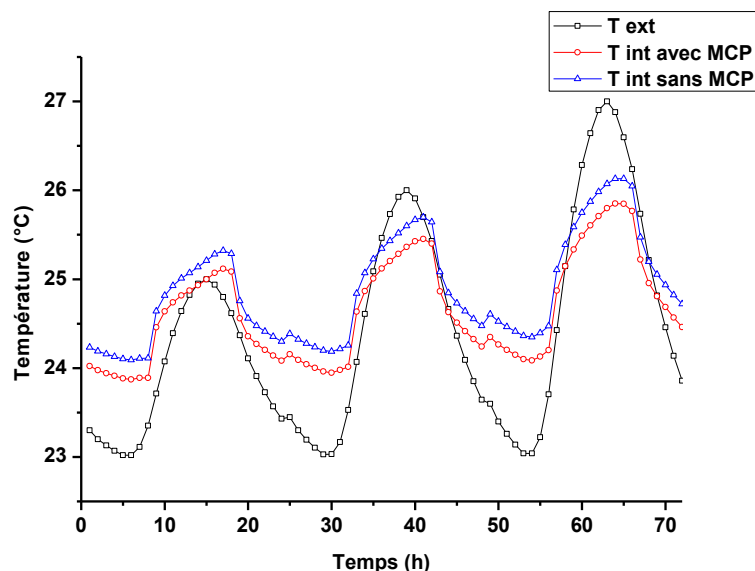


Figure 5. 54 : Évolution des températures intérieures de la zone unique simulée sur 72 h avec et sans le composite-MCP (Mai).

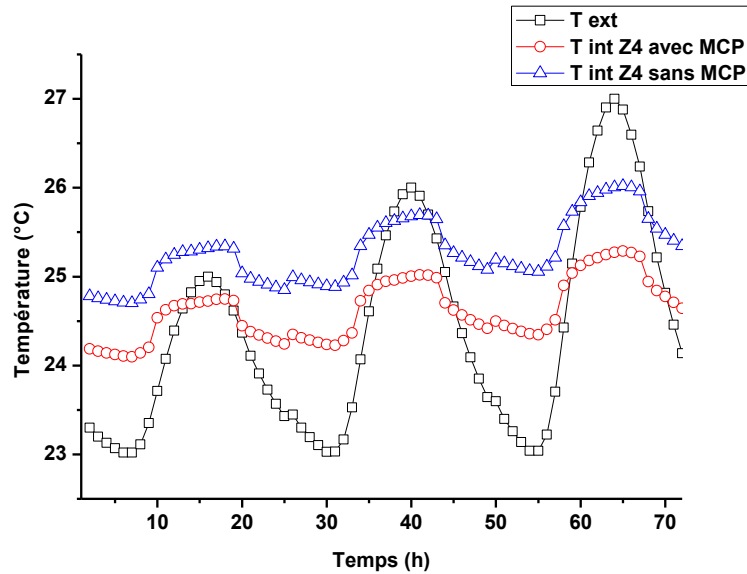


Figure 5. 55 : Évolution des températures intérieures de la zone 4 sur 72 h avec et sans le composite-MCP1 (Mai).

Les températures intérieures enregistrées dans les zones thermiques intégrant le composite-MCP1 se stabilisent autour des températures de changement de phase du nouveau matériau. Cela signifie que le processus de stockage latent du matériau a été déclenché par les conditions de température extérieure.

Les figures 5.56 et 5.57 montrent les résultats de l'évolution des températures intérieures des zones thermiques simulées dans le présent travail de thèse sur une période de 72h du mois de juin.

L'intégration du matériau composite-MCP dans les enveloppes extérieures contribue à la réduction des températures intérieure de 2 °C par rapport aux modèles sans MCP. L'intégration du nouveau matériau composite-MCP est à l'origine de l'effacement des pics de température à l'intérieur en stockant la chaleur excédentaire sous forme de chaleur latente.

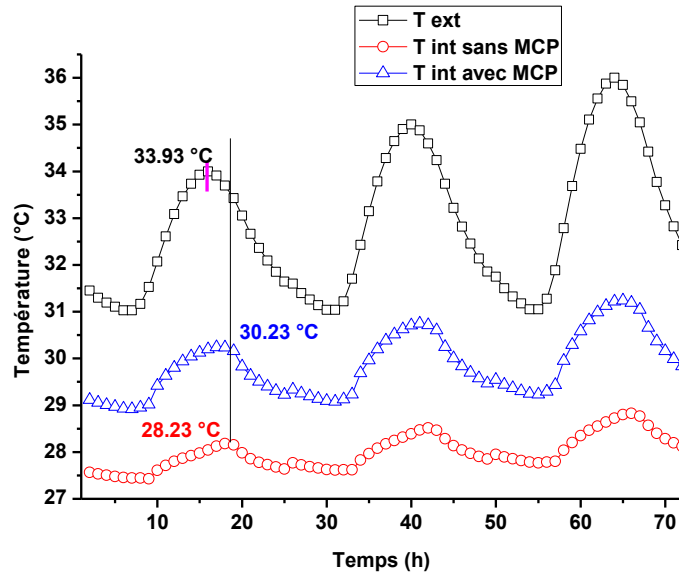


Figure 5. 56 Évolution des températures moyennes intérieures de la zone unique sur trois jours avec et sans MCP (Juin).

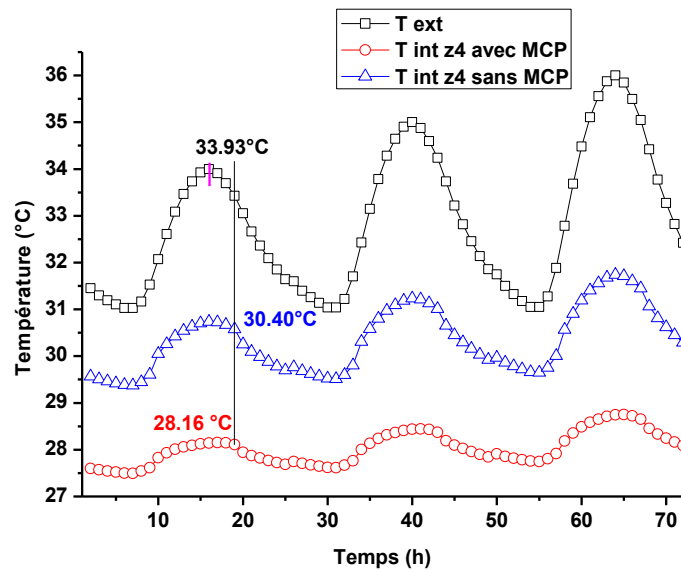


Figure 5. 57 : Évolution des températures intérieures de la zone 4 avec et sans MCP sur trois jours (Juin).

Les figures 5.58, 5.59, 5.60 et 5.61 affichent les résultats de la simulation numérique EP du comportement thermique des bâtiments considérés dans le présent travail de thèse avec et sans l'intégration du composite-MCP1 sur une période de 72 h des deux mois les plus chauds de la saison estivale (Juillet et Août).

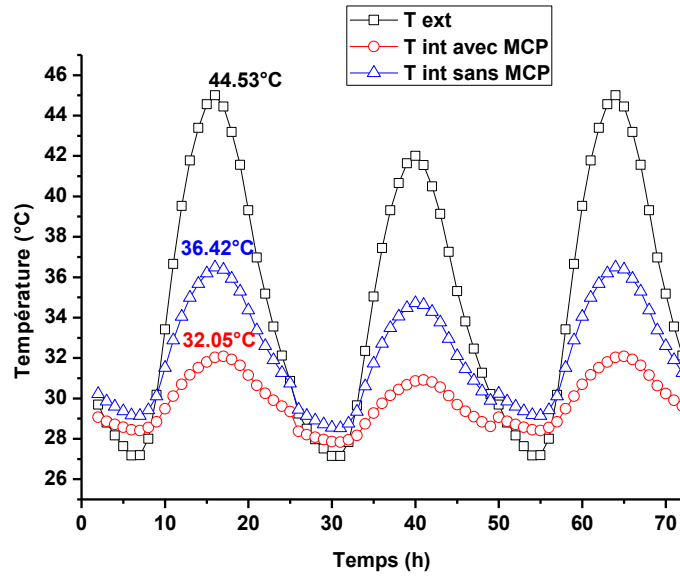


Figure 5. 58 Évolution des températures intérieures de la zone thermique simulée sur une période de 72 h avec et sans le composite-MCP1 (Juillet).

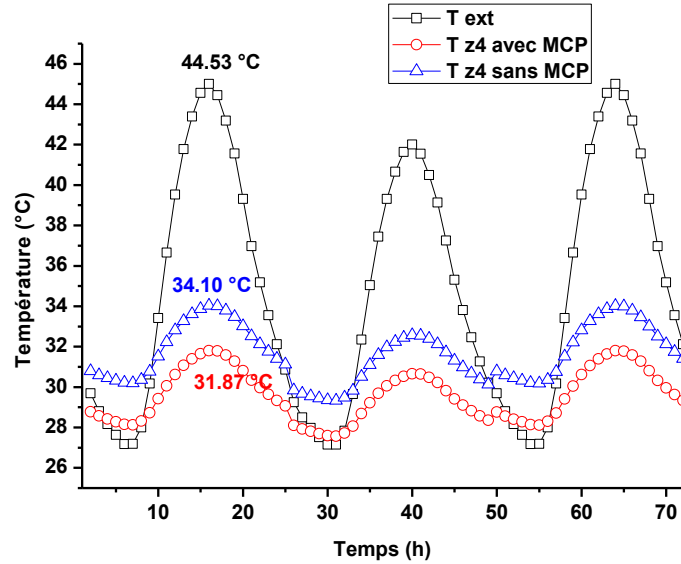


Figure 5. 59 Évolution des températures intérieur de la zone thermique 4 sur une période de 72h avec et sans le composite-MCP1 (Juillet).

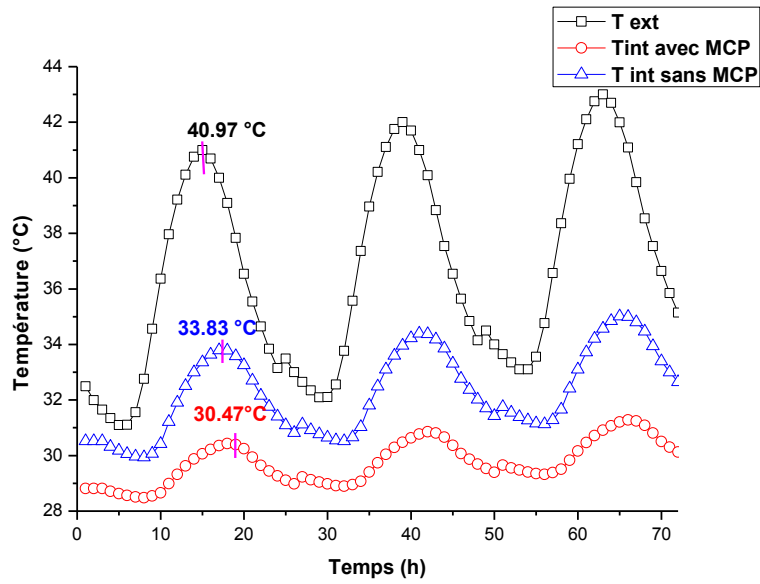


Figure 5. 60 Évolution des températures intérieures de la zone thermique unique sur 72h avec et sans MCP (Août).

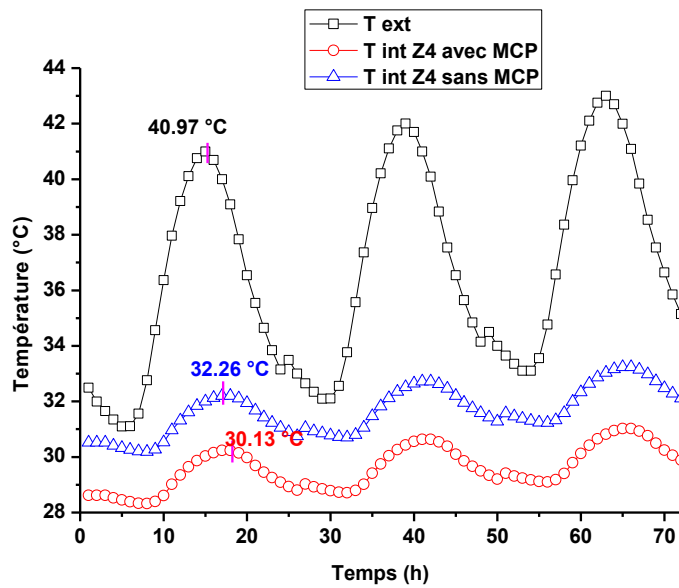


Figure 5. 61 Évolution des températures intérieures dans la zone 4 sur une période de 72h avec et sans le composite-MCP1 (Août).

Le mois de juillet affiche des températures estivales caniculaires (Fig.5.58, Fig.5.59) qui varient de 32°C pour atteindre des pics qui avoisinent les 44°C. Les températures intérieures des zones thermiques des modèles considérés atteignent des pics proches de 34 °C en l’absence du composite-MCP1. Les pics de température des modèles intégrant le composite-MCP1 ont enregistré 3°C de moins que les modèles sans le composite-MCP1.

Les températures extérieures enregistrées au mois d'août (Fig.5.62, 5.63) affichent des températures saisonnières habituelles de la ville d'Alger. Celles-ci varient de 32 °C pour atteindre des pics de 40 °C à la mi-journée sur une période de 24h. Les températures du modèle à une seule zone thermique atteignent un pic de 33.83 °C en l'absence du composite-MCP1, tandis qu'elles descendent à 30.47 °C dans le même modèle intégrant le composite-MCP1. De plus, le pic de température est enregistré avec un déphasage de 1h 30 min par rapport au modèle sans le composite-MCP et de 3h 30 min par rapport aux températures extérieures.

Les profils de températures obtenus dans la zone thermique 4 (la zone la plus importante du deuxième modèle considéré) simulée sous les mêmes conditions que le modèle précédent avec et sans l'intégration du composite-MCP1, affichent le même comportement thermique. Une différence de température de près de 3 °C a été enregistrée avec un déphasage dans le temps de 1h 30 min par rapport au modèle sans MCP et de 3h 30 par rapport aux conditions de température extérieures.

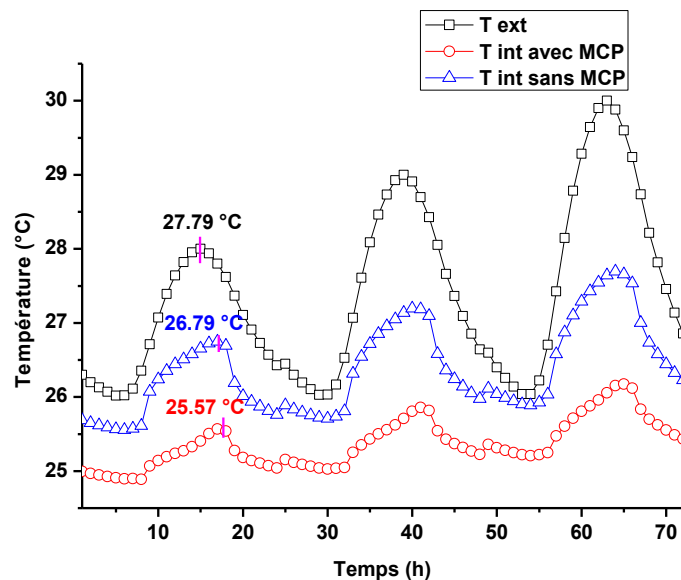


Figure 5. 62 Évolution des températures intérieures de la zone unique simulée avec et sans le composite-MCP1 sur une période de 72h (Septembre)

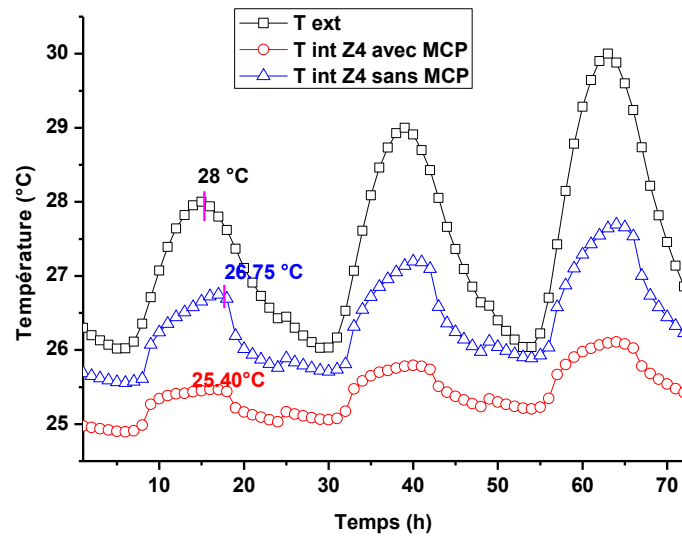


Figure 5. 63 Évolution des températures intérieures de la zone unique simulée avec et sans le composite-MCP1 sur une période de 72h (Septembre).

Les figures 5.62 et 5.63 affichent les résultats de l'évolution des températures moyennes à l'intérieur des zones thermiques des bâtiments considérés dans la présente étude. Les températures extérieures enregistrées au mois de septembre dépassent les températures de changement de phase du composite-MCP1, par conséquent les profils de température des zones thermiques intégrant le composite-MCP1 se stabilisent plus ou moins autour de 25 °C, cela indique que le composite-MCP1 a été sollicité par les conditions de température extérieures.

Les profils de température des modèles n'intégrant pas le composite-MCP1 affichent des pics de température à 26.75 °C et 26.79 °C respectivement pour chacune des zones thermiques simulées. Néanmoins la différence de température entre les modèles avec MCP et les modèles sans MCPs n'est que d'environ 1°C.

Les figures 5.64 et 5.65 affichent les résultats de la simulation numérique obtenus dans les zones thermiques les plus importantes des deux modèles décrits précédemment avec et sans l'intégration du composite-MCP1.

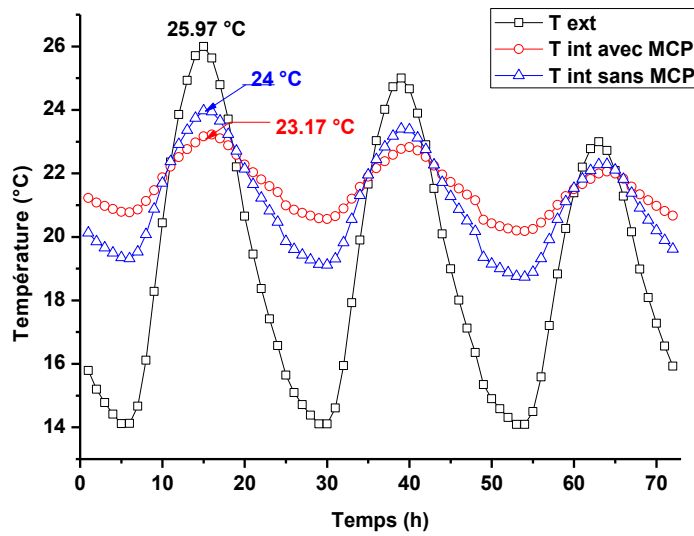


Figure 5. 64 Évolution des températures intérieures de la zone unique sur une période de 72 h avec et sans MCP (Octobre).

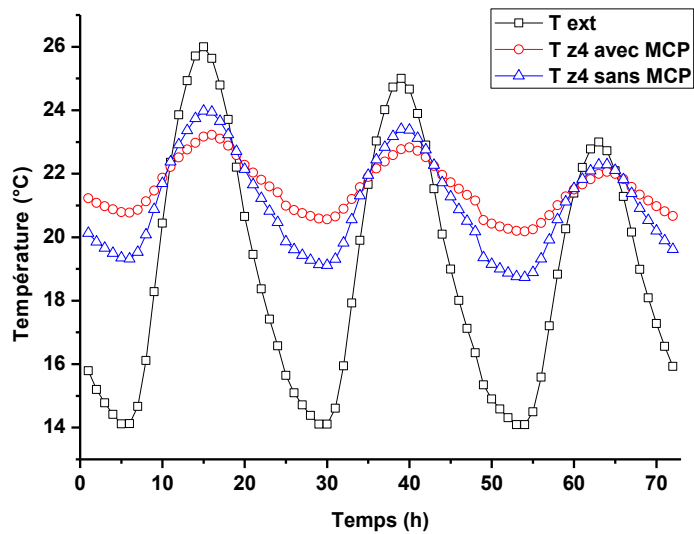


Figure 5. 65 Évolution des températures intérieures de la zone 4 avec et sans le composite-MCP1 sur une période de 72h (Octobre).

Les températures extérieures enregistrées au mois d'octobre dépassent à peine les températures de changement de phase du composite-MCP1.

Le profil de température des modèles intégrant le composite-MCP1 montre que le matériau a été sollicité par les conditions de température pendant les deux premiers jours. Cela signifie que le composite-MCP1 avait

débuté son processus de stockage latent de la chaleur à près de 23 °C néanmoins, celui-ci n'a pas dû atteindre sa capacité maximale de stockage.

Les profils de température des zones thermiques obtenus au troisième jour avec et sans l'intégration du composite-MCP1 dans le processus de calcul se superposent. Cela signifie que le composite-MCP1 n'a pas été sollicité par les conditions de température extérieures.

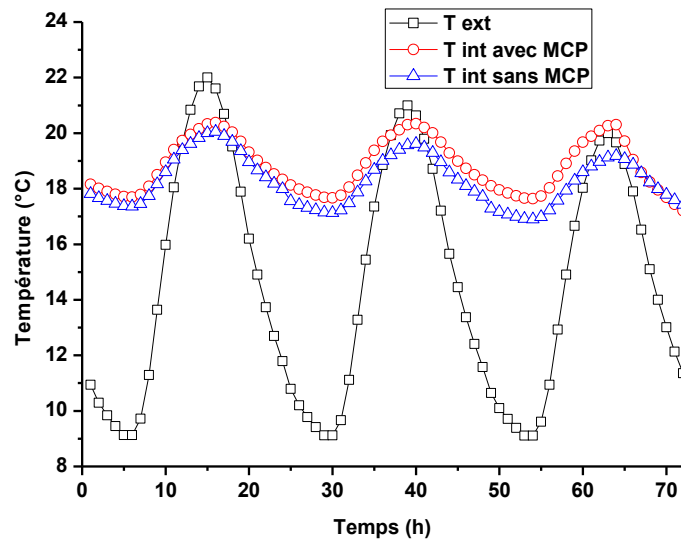


Figure 5. 66 Évolution des températures moyennes à l'intérieur de la zone unique simulée sur une période de 72h avec et sans le composite-MCP1 (Novembre)

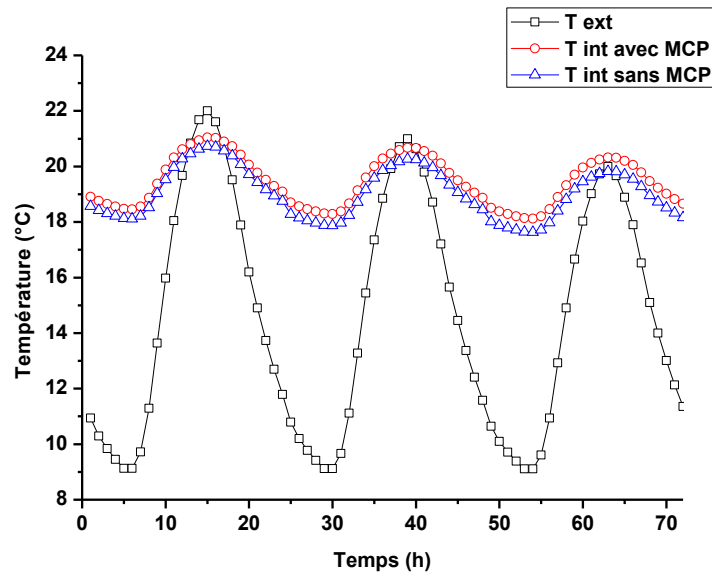


Figure 5. 67 Évolution des températures moyennes à l'intérieur de la zone 4 avec et sans le composite-MCP1 sur une période de 72h. (Novembre).

Les figures 5.66 et 5.67 affichent les résultats de la simulation numérique des mêmes zones thermiques considérées précédemment sur trois jours successifs du mois de novembre. Les températures enregistrées pendant le mois de novembre sont inférieures ou égales aux températures de changement de phase du composite-MCP1, c'est pour cela que les profils de température des zones thermiques calculées avant et après l'intégration du composite-MCP1 se superposent pratiquement.

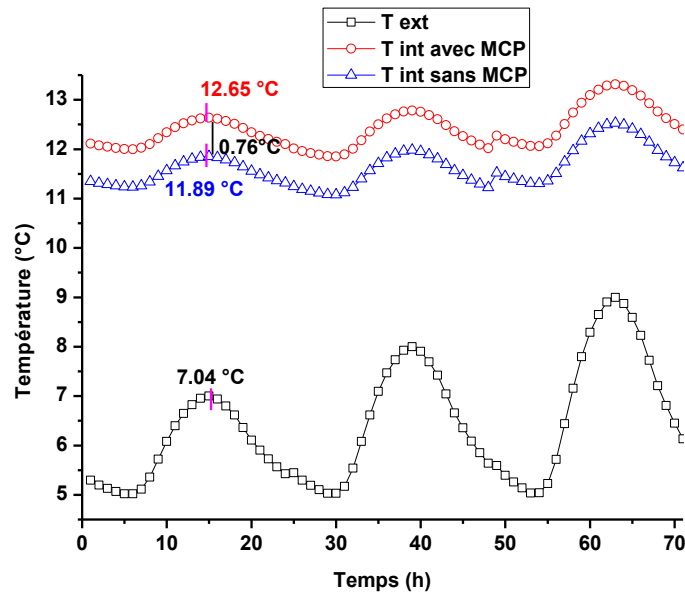


Figure 5. 68 Évolution des températures intérieures de la zone thermique unique sous 72h du mois de décembre avec et sans le composite-MCP1 (Décembre).

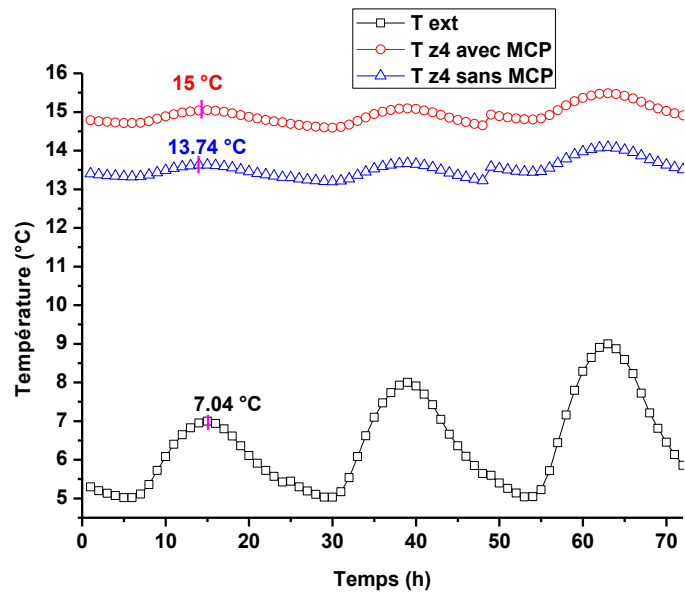


Figure 5. 69 Évolution des températures intérieures dans la zone 4 sur une période de 72h du mois de décembre avec et sans le composite-MCP1 (Décembre).

Les figures 5.68 et 5.69 affichent les profils de température respectifs sur trois jours du mois de décembre à l'intérieur des zones thermiques considérées dans le présent travail de thèse avant et après l'intégration du composite-MCP1.

Les résultats montrent qu'une différence de température de $0.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ a été enregistrée entre les deux profils de température de la zone thermique unique du premier modèle (avant et après intégration du composite-MCP), tandis qu'une différence de température de $1.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ a été enregistrée dans le cas de la zone thermique la plus importante (zone 4) du second modèle.

Ce sont les températures des zones thermiques intégrant le composite-MCP1 qui se rapprochent le plus des températures du confort thermique, cela n'est pas dû à sa capacité de stockage latent mais à la résistance thermique supplémentaire ($0.23\text{ m}^2.\text{K/W}$) ajoutée à la paroi en appliquant le composite-MCP1, celle-ci est sans doute insignifiante néanmoins elle montre un impact minime sur les conditions de température intérieures.

Pour conclure, il convient de rappeler que les simulations numériques ont été réalisées sur deux modèles différents de maisons orientées de la même façon et sollicitées par les mêmes conditions de température avant et après l'intégration du composite-MCP1 à l'intérieur de leurs parois. Les calculs numériques ont été effectués sur tous les mois de l'année sur une période de 72h pour chaque mois.

Les résultats montrent que le composite-MCP1 ne travaille que 6 mois sur l'année s'étalant du mois d'avril jusqu'au mois de septembre. Son efficacité est étroitement liée aux conditions de température extérieures par lesquelles il est sollicité, de la géométrie et de l'orientation du bâtiment dans lequel il est intégré ainsi que de la configuration de la zone thermique considérée lors du processus de calcul.

L'intégration du composite-MCP1 contribue à l'écrêtement des pics de température intérieure d'environ $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ par rapport au modèle n'intégrant aucun composite-MCP. Un déphasage de 3h 30mn du pic de température intérieur a été enregistré par rapport aux pics de températures extérieures, ce déphasage n'a pas été visible en journée caniculaire.

Lorsque les températures extérieures dépassent les températures de changement de phase du composite-MCP1, les températures intérieures se stabilisent autour de ces valeurs (température de changement de phase) sur une plage de temps d'environ 8 h. (voir résultats Derradji, Biswas et al^{379, 381}).

Tableau 5. 2 : Les températures moyennes de l'air à l'intérieur des différentes zones climatiques du deuxième modèle considéré dans le processus de simulation.

Zone thermique	Zone 1		Zone2		Zone 3		Zone 5	
	Avec MCP	Sans MCP	Avec MCP	Sans MCP	Avec MCP	Sans MCP	Avec MCP	Sans MCP
Janvier (°C)	18.63 ±0.05	17.63	18.14 ±0.03	16.96	3.64 ±0.02	15.50 ± 0.02	16.84	15.70
Février (°C)	18.59 ± 0.03	17.63± 0.07	18.21± 0.02	17.01 ±0.02	3.71 ± 0.05	15.60 ±0.05	16.91 ±0.06	15.84± 0.05
Mars (°C)	21.77± 0.17	21.38± 0.22	21.87 ±0.05	21.45 ±0.17	1.92±0.7	21.62± 0.17	21.98 ±0.24	21.98± 0.24
Avril (°C)	23.97± 0.21	24 ±0.12	23.11 ±0.3	23.54 ±0.45	3.56 ±0.4	24.07± 0.53	23.47± 0.5	23.98 ±0.54
Mai (°C)	21.31± 0.05	21± 0.03	20.62 ±0.2	20.04 ±0.17	3.64 ±0.17	19.17± 0.29	19.64 ± 0.3	18.97 ± 0.37
Juin (°C)	25.84± 0.22	27.31± 0.16	25.45 ±0.23	27.14 ±0.18	26.47± 0.27	28.14± 0.39	26.06 ±0.15	27.50 ±0.15
Juillet (°C)	26.39± 0.54	28.55± 0.6	26.08 ±0.5	28.78 ±0.15	27.16± 0.54	29.78± 0.7	26.62 ±0.6	29.78 ±0.8
Août (°C)	26.86± 0.2	28.59 ±0.28	26.19± 0.18	28.78 ±0.32	27.24± 0.25	29.44± 0.36	27.08 ±0.10	29.38 ±0.33
Sept. (°C)	24.64± 0.15	25.69± 0.15	23.89± 0.15	25.26 ±0.23	24.45 ±0.19	25.81 ± 0.24	24.44 ±0.2	25.92 ±0.25
Octo. (°C)	23.07± 0.14	23.31± 0.2	22.63± 0.05	23.02 ±0.19	22.57± 0.25	23.36± 0.29	23.31 ±0.17	23.90 ±0.19
Novem. (°C)	21.70± 0.16	21.70± 0.25	21.19 ±0.17	20.74 ±0.23	20.85 ±0.28	20.46 ±0.28	21.36 ±0.17	21.36± 0.17
Déc. (°C)	18.20 ±0.1	16.83± 0.14	18.35 ±0.15	16.73 ±0.1	16.78 ±0.18	15.35 ±0.02	17.04 ±0.09	15.26 ±0.23

5.4 Simulation numérique sur Energy-Plus des consommations énergétiques d'un bâtiment avec et sans l'intégration du composite-MCP1

Les consommations énergétiques dues au chauffage et à la climatisation dans le modèle de bâtiment à zone thermique unique a été rendu possible sur Energy-Plus grâce à la fonction « Méthode du bilan thermique » (Heat Balance Method) ³⁶⁸. C'est la méthode la plus précise pour l'estimation des charges énergétiques d'un bâtiment car elle tient compte dans son processus de calcul des variations des propriétés du modèle par pas de temps ³⁶⁹.

La description du modèle et de ses charges internes pour le bilan thermique réalisé dans la présente étude est maintenue aussi simple que possible pour éviter une modélisation trop complexe qui nécessiterait des temps de calcul beaucoup trop longs ³⁷⁰. Il convient de souligner que l'objectif de la présente modélisation est d'estimer avec une incertitude raisonnable les besoins énergétiques de l'un des bâtiments étudiés avant et après l'intégration du nouveau matériau composite-MCP1 en se basant sur les propriétés des éléments de ce bâtiment et sa configuration (donnés en Input) d'une part, et sur les données climatiques disponibles sur EP d'autre part.

Les variables climatiques clés de la ville d'Alger ayant une incidence sur la thermique du modèle de bâtiment étudié et de son système de consommation d'énergie ont été prises en considération dans le processus de calcul des charges dues au chauffage et à la climatisation à savoir : la température sèche, la température humide, la vitesse du vent, la direction du vent, la radiation solaire globale. Il est nécessaire de souligner que les fichiers météo de la ville d'Alger sont disponibles sur le site officiel Energy-Plus (Weather file) ³⁵⁵.

La description du modèle 1 à zone thermique unique d'une surface de 42 m² (configuration du bâtiment, propriétés des matériaux des éléments constructifs, dimensions, orientation) a été introduite dans Energy-Plus grâce à Energy-Plus « Input Data File editor »¹³.

¹³ "Supra" : page 232

Un scénario d'occupation de l'espace par 4 personnes a été introduit (Fig.5.70). Le fonctionnement des équipements électriques à l'intérieur de l'espace pendant le calcul a été négligé.

Field	Units	Obj1
Name		ZONE UNIQUE OthEq1
Fuel Type		None
Zone or ZoneList Name		ZONE UNIQUE
Schedule Name		Sch 1
Design Level Calculation Method		EquipmentLevel
Design Level	W	200
Power per Zone Floor Area	W/m2	
Power per Person	W/person	
Fraction Latent		0
Fraction Radiant		0.6
Fraction Lost		0

Figure 5. 70 : Scénario d'occupation journalière de l'espace par 4 personnes.

Pour chaque cas étudié (le modèle 01 sans MCP et le modèle 01 avec MCP), nous avons estimé la quantité d'énergie nécessaire/jour (heure par heure) pour maintenir la température de l'espace stabilisée à 24°C pendant les saisons chaudes et à 20 °C pendant les saisons froides sur une période de 24 heures. (Fig. 5.71).

Field	Units	Obj1
Name		Zone thermostat
Zone or ZoneList Name		ZONE UNIQUE
Control Type Schedule Name		ALWAYS 4
Control 1 Object Type		ThermostatSetpoint: DualSetpoint
Control 1 Name		Office thermostat Duel SP Control

Field	Units	Obj1
Name		Office thermostat Duel SP Control
Heating Setpoint Temperature Schedule Name		ALWAYS 20
Cooling Setpoint Temperature Schedule Name		ALWAYS 24

Figure 5. 71 : Configuration du control des températures de consigne de l'espace simulé pour le chauffage et la climatisation

L'évolution des besoins en énergie pour le chauffage et la climatisation ont été estimés en se fixant une consigne de température de l'espace à maintenir stabilisée sur 24 heures pour un jour type de chaque mois de l'année et pour chaque modèle (avec et sans MCP).

Les figures 5.72, 5.73, 5.74 et 5.75 montrent l'évolution des besoins énergétiques pour le chauffage afin de maintenir la température de la pièce simulée stabilisée à 20 °C sur une période de 24 h pour un jour type du mois de novembre, décembre, janvier et février respectivement. Les besoins ont été estimés avec et sans l'intégration du composite-MCP, les résultats ont été superposés et comparés.

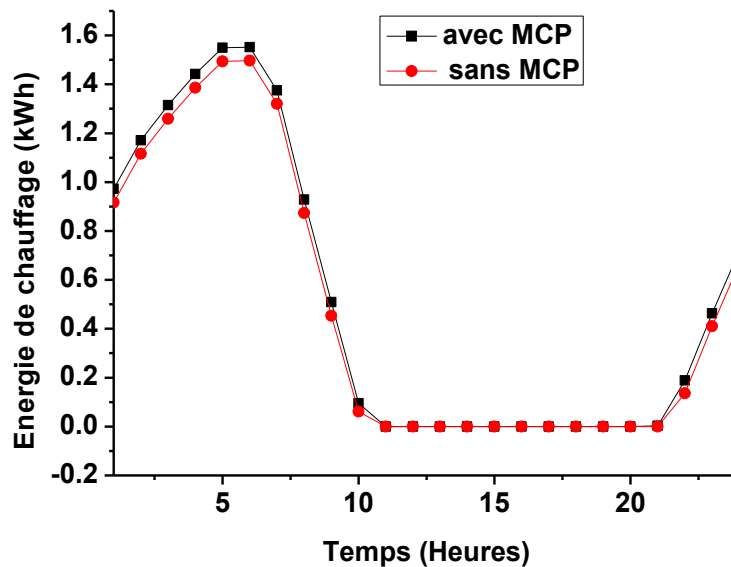


Figure 5. 72 : Énergie de chauffage nécessaire pour maintenir à 20°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois de novembre.

À partir de la figure 5.72, on constate que les besoins de chauffage sont très faibles au mois de novembre. Ils sont complètement nuls en journée à partir de 10 h et existants mais faibles pendant la nuit à partir de 20h 30mn. La courbe des besoins sans MCP se superpose à celle avec MCP, ce qui signifie que l'intégration du nouveau composite n'a aucun impact sur les consommations d'énergie pendant ce mois.

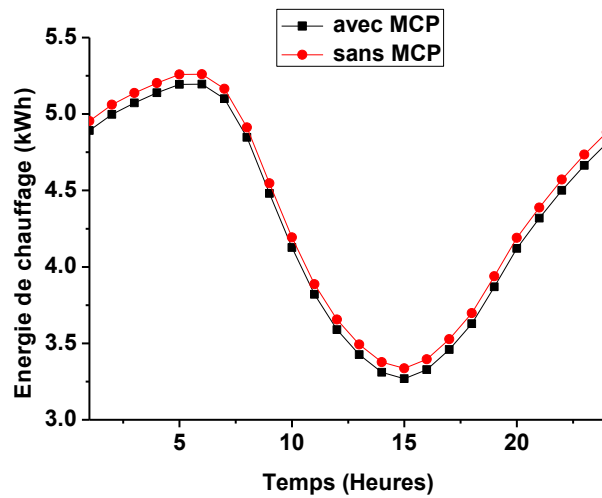


Figure 5. 73 : Énergie de chauffage nécessaire pour maintenir à 20°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois de Décembre.

La figure 5.73 montre l'évolution des besoins de chauffage sur 24 h pendant une journée type du mois de décembre dans le modèle simulé avant et après l'intégration du composite-MCP1. La superposition des résultats montrent que la différence entre les besoins de chauffage sans et avec le composite-MCP1 est inférieure à 2 kWh/jour. Le pic des consommations le plus haut est enregistré à 5h 30mn (5.25 kWh) tandis que le plus bas est à 15h (3.20 kWh). L'intégration du composite-MCP à une influence minime sur la réduction des consommations d'énergie pendant le mois de décembre.

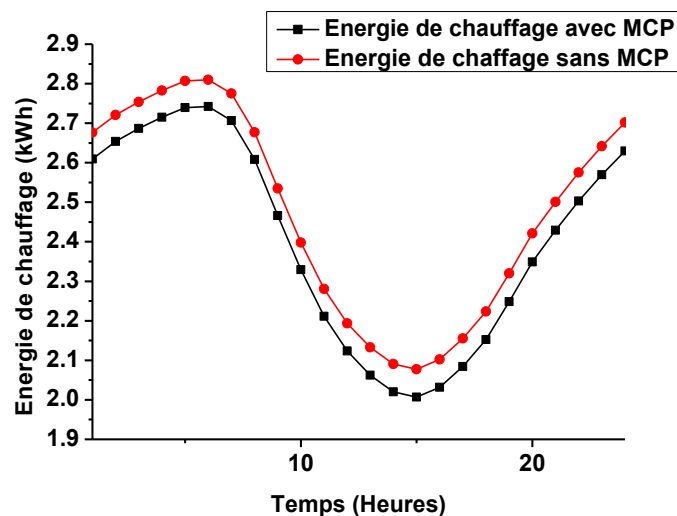


Figure 5. 74 : Énergie de chauffage nécessaire pour maintenir à 20°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois de Janvier.

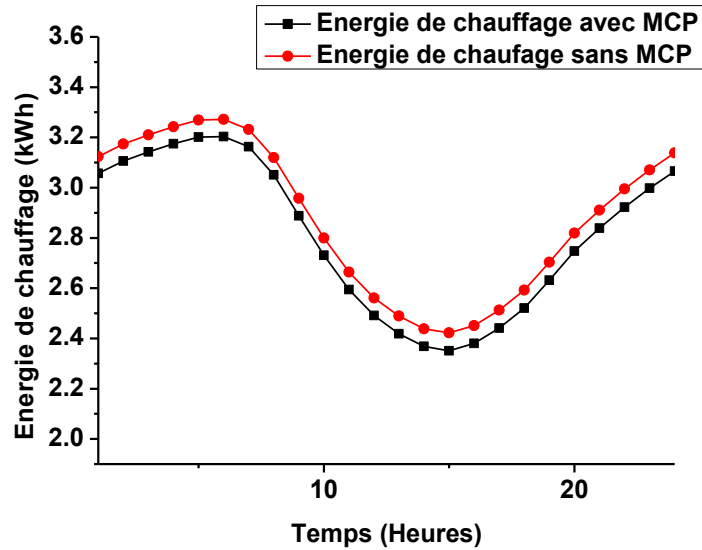


Figure 5. 75 : Énergie de chauffage nécessaire pour maintenir à 20°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois de février.

Les figures 5.74 et 5.75 montrent l'évolution des besoins énergétiques pour le chauffage sur 24 heures pour une journée type du mois de janvier et du mois de février respectivement. Pour chaque journée type considérée, l'estimation des besoins s'est faite avant et après l'intégration du composite-MCP. Les résultats montrent que la différence des besoins énergétiques de chauffage est de près de 3 kWh/jour aux mois de janvier et février. L'impact de l'intégration du composite-MCP sur les économies d'énergie due au chauffage n'est pas énorme, mais non sans importance.

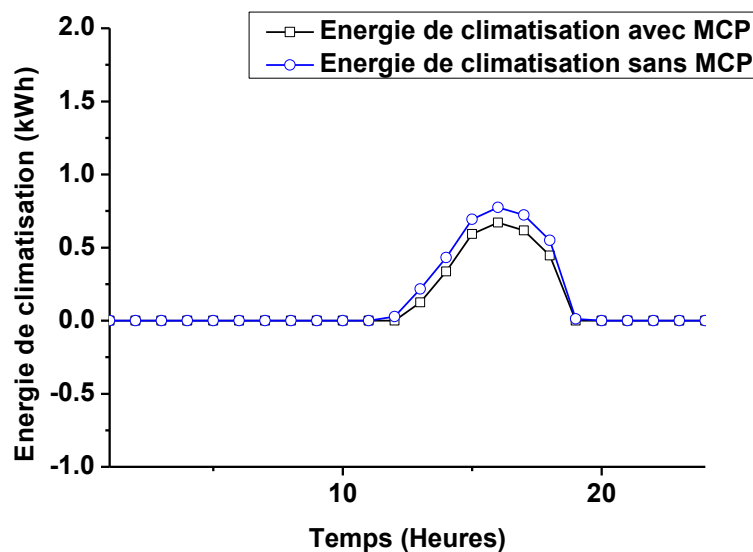


Figure 5. 76 : Énergie de climatisation nécessaire pour maintenir à 24°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois de mars.

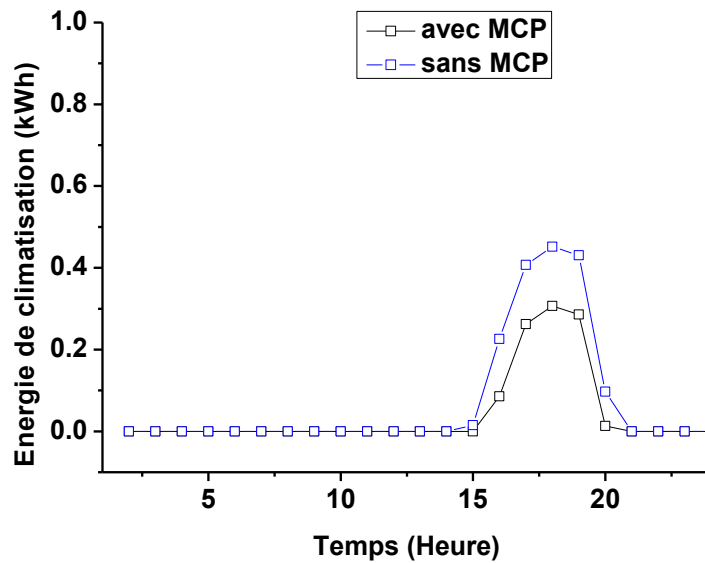


Figure 5. 77 : Énergie de climatisation nécessaire pour maintenir à 24°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois d'avril.

Les figures 5.76 et 5.77 montrent les besoins de climatisation estimés pour apporter la température de la pièce simulée à 24 °C sur une période de 24h pendant une journée type du mois de mars et du mois d'avril respectivement. Les besoins de chauffage sont nuls pendant les journées des mois de mars et avril puisque les températures intérieures dépassent naturellement les 20 °C sans recourir à aucun système actif énergivore.

Les besoins de climatisation qui permettent d'apporter les températures de la pièce à 24 °C sans insignifiants. Ils se situent autour de 1.6 kWh/ jour pour le mois d'avril et autour de 2.5 kWh/jour pendant le mois de mars. L'impact de l'intégration du composite-MCP1 sur les économies d'énergie de climatisation est autour de 0.75 kWh/jour. Les températures à l'intérieur du modèle se situent dans la zone de confort sans recourir à aucun système de chauffage ni de climatisation.

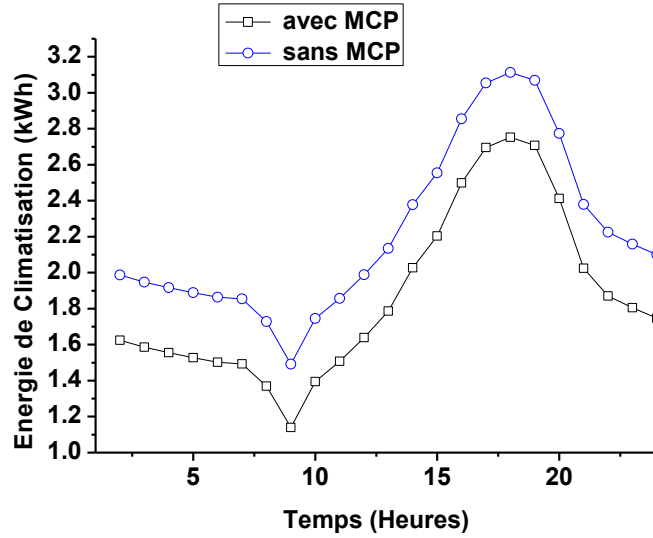


Figure 5. 78 : Énergie de climatisation nécessaire pour maintenir à 24°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois mai.

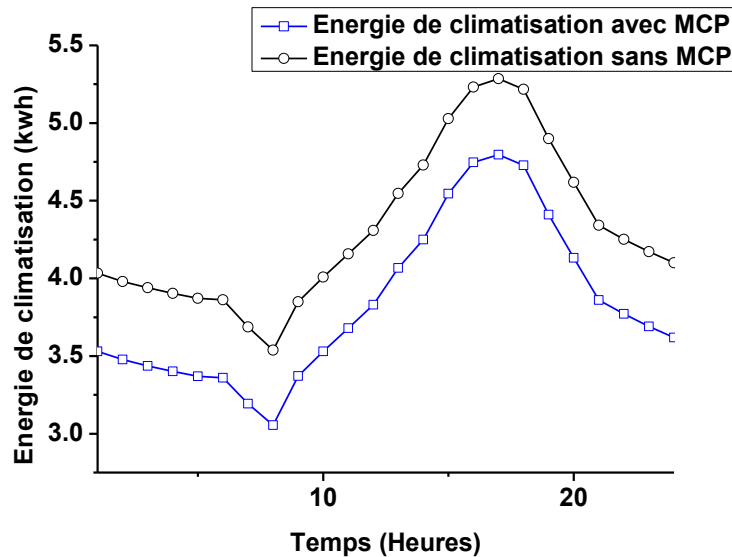


Figure 5. 79 : Énergie de climatisation nécessaire pour maintenir à 24°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois de juin.

Les figures 5.78 et 5.79 affichent les courbes des besoins énergétiques de climatisation nécessaires pour maintenir la température du modèle simulé à 24 °C sur une période de 24h pour chaque journée type des mois de mai et juin respectivement. Les calculs ont été effectués pour chaque modèle avant et après l'intégration du composite-MCP1. Les résultats montrent que l'intégration du composite-MCP1 est à l'origine d'une économie d'énergie de 8.55 kWh/jour pour le moi de mai et de 11.5 kWh/ jour pour le mois de juin. Les consommations les plus importantes ont été enregistrées pour chacun de mois

ces deux mois entre 10 :00h et 20 :00h. Les besoins énergétiques de climatisation sont plus importants au mois de juin comparé au mois de mai.

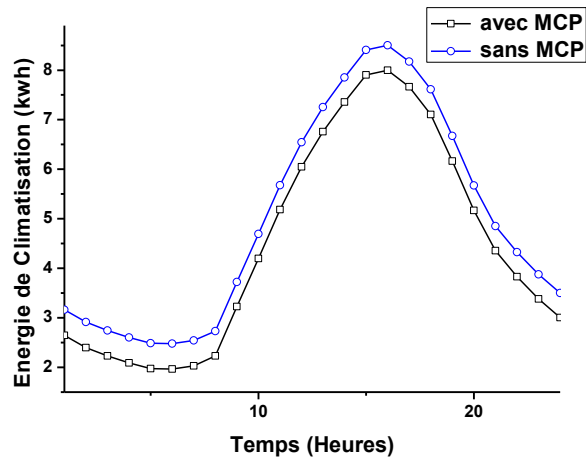


Figure 5. 80 : Énergie de climatisation nécessaire pour maintenir à 24°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois de Juillet.

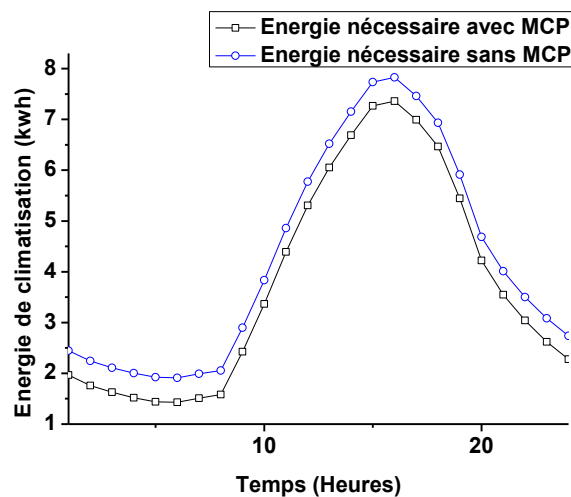


Figure 5. 81 : Énergie de climatisation nécessaire pour maintenir à 24°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois d'août.

Les figures 5.80 et 5.81 affichent les profils journaliers des besoins en énergie pour maintenir à 24 °C la température à l'intérieur du modèle étudié sur 24 h pendant une journée type du mois de juillet et du mois d'août respectivement, avant et après l'intégration du composite-MCP1. Une économie d'énergie de 12.10 kWh/jour a été estimée pour le mois de juillet et à 11.31 kWh/ jour pour le mois d'août en intégrant le composite-MCP1. Les besoins d'énergie les plus élevés ont été enregistrés entre 10h et 20 h pour ces mois-ci.

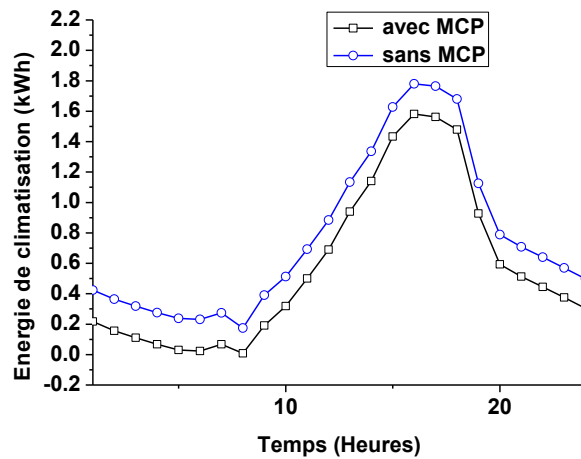


Figure 5. 82 : Énergie de climatisation nécessaire pour maintenir à 24°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois de septembre.

La figure 5.82 montre les courbes de l'estimation de l'énergie nécessaire pour maintenir stabilisée à 24 °C la température à l'intérieur du modèle simulé avant et après l'intégration du composite-MCP pendant une journée type du mois de septembre. Les résultats montrent que les besoins de climatisation ne sont pas importants pour ce mois-ci. L'intégration du composite-MCP1 contribue à une économie d'énergie d'environ 4 kwh/jour.

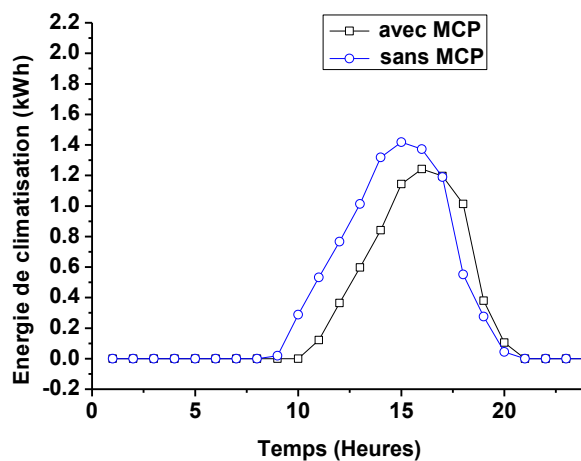


Figure 5. 83 : Énergie de climatisation nécessaire pour maintenir à 24°C sur une période de 24h la température du local simulé en journée typique du mois d'octobre.

La figure 5.83 montre les résultats de l'estimation des consommations d'énergie nécessaires pour maintenir stabilisée à 24 °C les températures à l'intérieur du modèle simulé avant et après l'intégration du composite-MCP1 sur une journée type du mois d'octobre. Les résultats montrent que les besoin de chauffage sont quasiment nuls ; les besoins de climatisation sont nuls pendant toute la nuit à partir de 20h et en journée jusqu'à 10h dans le modèle

intégrant l'MCP et jusqu'à 9h dans le modèle sans MCP. À partir de ces résultats, nous constatons qu'une faible consommation d'énergie de climatisation est nécessaire pour apporter les températures intérieures à 24 °C. La différence marquée entre le modèle sans MCP et le modèle avec MCP est de l'ordre de 1.5 kWh/jour pour ce mois

En conclusion, les températures intérieures pendant le mois d'octobre se situent dans la zone de confort, ainsi tout dispositif de chauffage ou de climatisation pourrait être évité pendant ce mois-ci.

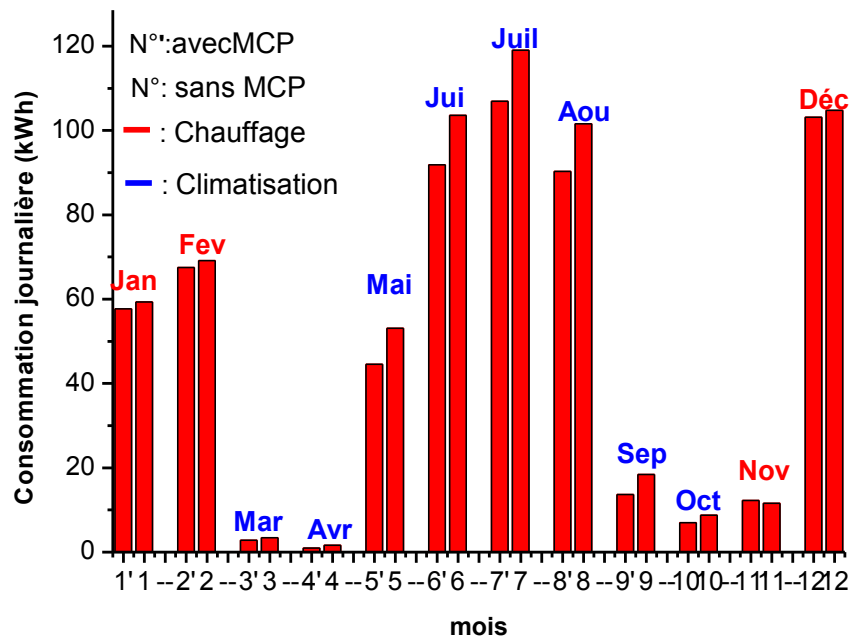


Figure 5. 84 : Comparaison des bilans journaliers pour les consommations d'énergie de chauffage et de climatisation pour un jour type de chaque mois de l'année.

La figure 5.84 montre les comparaisons des bilans journaliers des consommations d'énergie avec et sans l'intégration du composite MCP1 pour un jour type de chaque mois de l'année. Les résultats montrent que la période de climatisation est plus importante que la période de chauffage, ainsi les consommations dues à la climatisation sont plus élevées.

L'intégration du nouveau composite-MCP1 dans l'enveloppe du modèle1 de bâtiment simulé a un impact important sur les économies d'énergie dues à la climatisation pendant la saison chaude (Mai, Juin, Juillet,

Août, septembre). L'impact de l'intégration de ce nouveau matériau sur les économies d'énergie due au chauffage est faible pendant la saison froide (décembre, janvier, février), ainsi que pendant la demi-saison. Le tableau 5.3 montre la consommation totale journalière en chauffage ou en climatisation pour les jours types de chaque mois étudié avec et sans le composite-MCP.

Tableau 5. 3 : Estimation des besoins journaliers de chauffage et de climatisation pour chaque jour type de chaque moi de l'année avec et sans l'intégration du composite-MCP1.

1j/mois de l'année	Type de besoin/ jour (kWh)	Avec MCP kWh/jour	Sans MCP kWh/jour	Différence Avec-sans MCP kWh/jour
Novembre	Chauffage à 20°C	12.28	11.58	0.7
Décembre	Chauffage 20 °C	103.15	104.76	1.61
Janvier	Chauffage 20 °C	57.67	59.35	1.68
Février	Chauffage 20 °C	67.48	69.16	1.68
Mars	Climatisation à 24 °C	2.78	3.42	0.64
Avril	Climatisation 24 °C	0.95	1.62	0.67
Mai	Climatisation 24 °C	44.56	53.11	8.55
Juin	Climatisation 24 °C	91.85	103.56	11.71
Juillet	Climatisation 24 °C	106.91	119.01	12.10
Août	Climatisation 24 °C	90.30	101.61	11.31
Septembre	Climatisation 24 °C	13.67	18.43	4.76
Octobre	Climatisation 24 °C	7.00	8.78	1.78

Les résultats montrent que les économies d'énergie dues à la climatisation sont importantes après l'intégration du composite-MCP1. Si l'on considère l'exemple du mois de juillet où nous économisons 12.10 kWh/jour, ce qui vaut 363 kWh/mois qui est équivalent à 1513.17 Dinars Algériens d'économie sur la facture d'électricité/mois en considérant le prix du kWh à 4.17 da (tarification de la tranche 2 des consommations d'énergie)^{371, 372}. Les résultats de cette simulation des besoins énergétiques du modèle 1 de bâtiment avec et sans l'intégration du composite-MCP1 confirment ceux obtenus lors de la première phase de la simulation de son comportement thermique.

5.5 Conclusion

Le présent chapitre fait suite aux résultats expérimentaux obtenus par les mesures effectuées au laboratoire sur le banc d'essais. Une simulation numérique sur Comsol Multiphysics 3.5a du comportement thermique du nouveau composite-MCP intégré à l'intérieur d'une partie d'un mur en brique de terre cuite en double cloison monté sur le banc d'essais à été réalisée. Le changement de phase a été modélisé suivant la méthode de la capacité thermique massique apparente.

Les résultats numériques obtenus en tout point de la paroi se superposent aux résultats expérimentaux. Une différence de près de 1 °C a été enregistrée entre le modèle numérique et expérimental dans le nouveau matériau composite-MCP. La simulation numérique du changement de phase est un phénomène particulièrement compliqué, c'est pour cela que les résultats de la modélisation numérique restent toujours acceptables avec une marge d'erreur raisonnable par rapport aux résultats expérimentaux^{373, 374}.

L'intégration des nouveaux composites-MCP a prouvé son efficacité dans l'amélioration de la performance thermique de la paroi testée expérimentalement à l'échelle de la cellule test. La seconde étape consiste à vérifier l'impact de l'intégration du nouveau matériau sur les conditions de confort thermique et les économies d'énergie à l'échelle d'un bâtiment. Il était question d'élaborer le nouveau matériau à grande échelle afin de l'appliquer sur un exemple d'un bâtiment existant à la ville d'Alger ou de Blida. Le manque de matière première pour l'élaboration du matériau ainsi que la non disponibilité des équipements de mesure nécessaires pour mener à bien les campagnes de mesures à cette échelle, nous a amenés à travailler cette partie numériquement.

La simulation thermique et énergétique d'un bâtiment avant et après l'intégration du nouveau matériau élaboré a été réalisée sous Energy-Plus V 8-7-0. Les résultats de la simulation ont montré que l'intégration du composite-MCP1 dans le bâtiment étudié sous les conditions climatiques de la ville d'Alger contribue plus efficacement à l'amélioration du confort d'été par rapport au confort d'hiver.

Le fonctionnement du matériau est optimal pendant les mois de : mai, juin, juillet, août et septembre. Il est faible voir insignifiant pendant le reste des mois de l'année. L'intégration du composite-MCP1 a un impact sur la réduction des besoins de climatisation pendant la saison chaude. La réduction des besoins énergétiques pour le chauffage pendant la saison froide reste faible. Les résultats de la simulation énergétique (estimation des besoins en énergie) correspondent à ceux de la simulation thermique (estimation de l'évolution des températures moyennes à l'intérieur du bâtiment).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail de thèse a été réalisé en réponse à un souci de réduction des consommations énergétiques dans le secteur du bâtiment tout en améliorant les conditions de confort thermique par la recherche d'une solution passive innovante et non coûteuse. Cette solution devrait s'appliquer tant bien sur le neuf que pour les opérations de réhabilitation thermique.

Aujourd'hui, les opérations de construction et de renouvellement du bâti existant touchent la quantité sans se soucier de la qualité thermique et énergétique ³⁸³. Les seuls progrès réalisés dans ce sens concernent le renforcement de l'isolation thermique de quelques nouveaux bâtiments, or que nous pouvons constater que contrairement à ce qui est attendu, les bâtiments isolés perdent en confort thermique d'été sous les conditions climatiques de la plupart des villes Algériennes. L'isolation est à l'origine du non activation de la masse thermique des bâtiments (élimination de l'inertie thermique).

Dans ce cadre, l'intégration des matériaux à changement de phase couplés à des matériaux de construction traditionnels à l'intérieur des enveloppes des bâtiments a été explorée afin d'étudier leur impact sur le renforcement de l'inertie thermique et sur les conditions de confort thermique ainsi que des consommations d'énergie sous les conditions climatiques de la capitale (Alger) comme exemple de ville Algérienne.

Les recherches bibliographiques menées au début du travail de thèse nous ont permis de mettre en évidence les différentes substances MCPs susceptibles de répondre aux applications visées ainsi que les différents matériaux de construction traditionnels pouvant être couplés aux MCPs dans le but de les contenir sans risque de fuite dans leur phase fusion.

Les principales conclusions tirées à l'issue de l'étude bibliographique en réponse à nos objectifs (élaboration d'un nouveau matériau respectueux de l'environnement et de la qualité sanitaire, à bas coût, suivant un processus d'élaboration simple et non coûteux) nous ont conduits à nous pencher sur : l'exploration des bio-MCPs (substances organiques issues de la récupération),

de privilégier des matrices issues de matériaux locaux ou du recyclage des déchets pour y intégrer les bio-MCPs suivant un processus d'intégration directe reconnus comme étant les moyens les plus simples et les moins coûteux.

Plusieurs échantillons de nouveaux matériaux composite-MCPs ont été élaborés au laboratoire en s'appuyant sur les conclusions de la littérature scientifique. En plus des conditions précitées, les nouveaux matériaux devraient aussi satisfaire à certaines autres exigences notamment : la stabilité et la fiabilité thermique, la stabilité chimique, la résistance mécanique, la résistance au vieillissement thermique.

Une longue opération de caractérisation thermique, mécanique et physico-chimique nous a permis d'identifier les meilleurs candidats potentiels retenus pour l'application visée. Trois nouveaux composite-MCP élaborés à partir de la même matrice argileuse ont été retenus ; la matrice composite ayant montré les meilleures caractéristiques de rétention des MCPs a été élaborée à partir d'argile naturelle, de fibres de cellulose obtenues par recyclage de papier et des particules de graphite recyclé pour renforcer la conductivité thermique. Les bio-MCP ayant justifié de bonnes propriétés thermiques sont des graisses végétales issues de récupération du secteur agroalimentaire. Leurs températures de fusions respectives sont de (23 °C pour le bio-MCP1, de 26 °C pour le bio-MCP2 et 33 °C pour le bio-MCP3).

Hormis le bio-MCP3 ayant une enthalpie de changement de phase assez importante, l'enthalpie des autres substances étudiées restent moyennement faible. Néanmoins, leurs propriétés restent acceptables pour les applications visées. En dépit de son importante enthalpie, le bio-MCP3 est un matériau qui se caractérise par une surfusion. Par conséquent, l'étude de son protocole d'application nécessite une attention particulière.

Des tests de vieillissement thermique accéléré des nouveaux matériaux composite-MCP ont révélé que les propriétés thermiques de ceux-ci n'ont pas été affectées après plus de 1000 cycles consécutifs imposés sur un intervalle de température balayant leurs températures respectives de changement de phase.

Des panneaux composites-MCP obtenus à partir du bio-MCP1 et du bio-MCP2 ont été fabriqués pour étudier leur comportement thermique à l'échelle d'une cellule test comportant une partie d'un mur en brique de terre cuite double cloison. Le choix de ce type de la structure de l'enveloppe à l'intérieur de laquelle sera intégré le nouveau matériau a été commandé par le fait que ce type d'enveloppe très répandu n'a pas donné satisfaction thermique dans plusieurs villes algériennes.

Les résultats expérimentaux obtenus sur le banc d'essais avec le composite-MCP1 et le composite-MCP2 révèlent que les deux matériaux améliorent avec la même efficacité la performance thermique du mur testé.

La simulation numérique du comportement thermique du banc d'essais dans l'environnement Comsol Multiphysics 3.5a révèle aussi un même comportement thermique des deux nouveaux matériaux dans l'enveloppe en brique de terre cuite. Le changement de phase a été modélisé suivant la méthode simplifiée de la capacité thermique massique apparente. Les résultats numériques se superposent aux résultats expérimentaux avec une marge d'erreur raisonnable de l'ordre de 1°C due à la modélisation du changement de phase qu'est un phénomène particulièrement complexe à modéliser.

Par manque de matière pour l'élaboration des nouveaux composites à l'échelle d'un bâtiment grandeur réelle et pour non disponibilité du matériel de mesure approprié à cette échelle, nous étions contraints d'étudier numériquement dans l'environnement Energy-Plus V8-7-0 l'impact de l'intégration du nouveau matériau sur le confort thermique et les consommations énergétiques à l'échelle d'un bâtiment sous les conditions climatiques de la capitale algérienne « Alger ».

Les résultats révèlent que le rendement du nouveau matériau est optimal pendant la saison chaude (mai, juin, juillet, août, septembre), il devient faible ou presque inexistant pendant la saison froide et la demi saison.

Les résultats de la simulation des consommations d'énergie confirment les résultats de la simulation thermique. L'intégration du nouveau matériau contribue plus efficacement à la réduction des besoins énergétiques dus à la climatisation.

Cette thèse a permis de répondre de manière partielle ou quelque part totale à la problématique identifiée au début du travail. Des perspectives nombreuses s'ouvrent à partir de ces premiers résultats que nous apportons.

Tout d'abord, un travail expérimental sur un bâtiment grandeur réelle pourrait être réalisé en intégrant le composite-MCP pour vérifier les résultats numériques.

Des essais supplémentaires de vieillissement thermique accéléré sont nécessaires pour confirmer la fiabilité thermique du matériau sur une période parfaitement égale à la durée de vie d'un bâtiment.

Le modèle numérique et expérimental de la cellule test pourrait être affiné tout en expérimentant d'autres protocoles d'intégration du nouveau matériau dans la paroi double cloisons en brique de terre cuite.

Le comportement thermique du nouveau matériau peut être testé lorsqu'il est couplé à d'autres types d'enveloppes de bâtiment à l'instar des enveloppes en béton armé très répandues aujourd'hui en conséquence de la mise en œuvre des coffrages tunnels.

Le comportement thermique du nouveau matériau peut faire l'objet de plusieurs autres études sous les conditions climatiques d'autres villes algériennes en dehors de la capitale ou sous les conditions climatiques des villes d'autres pays.

Le nouveau composite-MCP élaboré à partir du bio-MCP3 a fait l'objet d'un processus complet de caractérisation, mais la révélation du phénomène de surfusion ($T_f=33^{\circ}\text{C}$, $T_s= 21^{\circ}\text{C}$) nécessite une étude d'application dans les bâtiments des climats chauds et arides ou les écarts de température entre le jour et la nuit sont importants. L'étude de son application peut faire l'objet d'un autre travail de recherche.

RÉFÉRENCES

1. Nörtershäuser, D., Masson, S. L., and Ringnet, A. "Utilisation de matériaux à changement de phase micro-encapsulés pour doper l'inertie thermique des bâtiments: Un pas vers les Green Data centers," https://www.researchgate.net/profile/Stephane_Masson2/publication/267966504.
Re consulté : 26/02/2020
2. Youni, Z., Joulin, A., Zalewski, L., Lassue, S., Rouse, D., "Analyse numérique de la fusion des matériaux à changement de phase dans une enceinte rectangulaire chauffée par une paroi latérale," n.d. IX Colloque international Franco-Québécois sur la thermique des systèmes. https://www.researchgate.net/profile/Zohir_Younsi/publication/308279282.
Re-consulté : 26/02/2020
3. Seddiki, M., and Anouche, K. "Evaluation multicritère pour la rénovation thermique," *Revue des énergies renouvelables* [online], 19(1), pages 29-40. Available from: <https://www.cder.dz/spip.php?article2893>. Re-consulté: 26/02/2020
4. Belkacem, N., Loukarfi, L., Khelil, A., et al. "Simulation des charges thermiques dans une habitation pilote à plancher réversible," *Nature et Technologie, C-Science de l'environnement*, N° 13, 2015, pp. 17-22.
5. Abouelkhatrat, B., Hamza, H., Lahjomri, J., et al. "Comportement thermique d'une toiture à double couches de matériaux à changement de phase en période estivale et hivernale," XXI Congrès Français de Mécanique, <http://hdl.handle.net/2042/52430>. Mis à jour : 26/02/2020.
6. Bontron, J.C., "L'empreinte énergétique des modèles d'urbanisation et d'habitat," *Pour, V. N° 218, No. 2, 2013, pp. 71-79.* <https://www.cairn.info/revue-pour-2013-2-page-71.htm>. Re-consulté : 26/02/2020
7. Derradji, L., Errebai, F. B., Amara, M., et al. "Etude expérimentale du comportement thermique," *Revue des Énergies Renouvelables*, V.16, N°4, 2013, pp.709-719.
8. DTR C3-2, 'Réglementation Thermique des Bâtiments d'Habitation, Règle de Calcul des Déperditions Calorifiques', CNERIB, Alger, décembre 1997.
9. DTR C3-4, 'Règles de Calcul des Apports Calorifiques des Bâtiments, Climatisation', CNERIB, Alger, Août 1998
10. Fezzioui, N., Droui, B., Benyamine, M., Larbi, S., Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique au sud Algérien, *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 11 N°1, 2008, pp. 25 – 34.
11. Roulet, A., "Ventilation and airflow in building: Methods for diagnosis and evaluation" *International Journal of Environmental Studies*, V.65, N°4, 2018, pp.627-628.
12. Tyagi, V. V., and Buddhi, D. "PCM thermal storage in buildings: A state of art," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 11, No. 6, 2007, pp. 1146–66.

13. Karim,L., Bontemps,A., Grados,A., Royon,L., Amélioration du confort thermique par intégration de Matériau à Changement de Phase (MCP) dans les planchers/plafonds de bâtiment à structure légère, 16èmes Journées Internationales de Thermique (JITH 2013). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00940341/>. Re-consulté le : 26/02/2020.
14. Al-Homoud, D. M. S. "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Building and Environment*, V. 40, No. 3, 2005, pp. 353–366.
15. Bonrderon, J., "Intégration des Matériaux à Changement de Phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique." thèse de doctorat, École nationale supérieure des travaux publics, Université de Lyon, Science de l'habitat et bâtiment, 2012, pp205.
16. Drissi, S. "Développement de nouveaux bétons accumulateurs d'énergie": investigations expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique," Thèse de doctorat, École d'ingénieur de Tunis, Université Paris Est, Génie civil, 2012, pp. 235.
17. Verbeke, S., and Audenaert, A. "Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 82, 2018, pp. 2300–18.
18. Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., et al. "A review on phase change energy storage: materials and applications," *Energy Conversion and Management*, V. 45, No. 9, 2004, pp. 1597–615.
19. Voelker, C., Kornadt, O., and Ostry, M. "Temperature reduction due to the application of phase change materials," *Energy and Buildings*, V. 40, No. 5, 2008, pp. 937–44.
20. Berroug, F., Lakhal, E. K., El Omari, M., et al. "Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall," *Energy and Buildings*, V. 43, No. 11, 2011, pp. 3027–35.
21. Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., et al. "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 15, No. 3, 2011, pp. 1675–1695.
22. Wahid, M. A., Hosseini, S. E., Hussen, H. M., et al. "An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region," *Applied Thermal Engineering*, V. 112, 2017, pp. 1240–1259.
23. Pincemin, S., Py, X., Olives, R. "Composites graphite/PCM pour procédés solaires concentrés aux moyennes et hautes températures," Congrès Français de thermique SFT, île des Embiez, Mai 2007. http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user3775/documents/actes/Congres_2007/communications/128.pdf. Re consulté : 26/02/2020
24. Laurent, R., and Karim, L. "Amélioration énergétique de dalles alvéolées par l'intégration d'un MCP stable mécaniquement," XXX^{ème} rencontre AUG-IBPSA Chambéry Savoie, 2012. https://www.researchgate.net/profile/L_Royon/publication/264891577. reconsulté: 26/02/2020
25. Veggi, M., Virgone, J., and Giroux-Julien, S. "Modélisation d'une façade active comportant un Matériau à Changement de Phase, p. 8. http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user3775/documents/actes/Congres_2014/Communications/8851.pdf. re consulté: 26/02/2020

26. Moukarzel, J., "L'Architecture, un art qui embrasse la science ", *Hermes la revue*, V.2, N°.2, 2015, pp.226-231.
27. Alaiselvam, S., Parameshwaran, R., "Thermal energy storage technologies for sustainability: Systems design, Assessment and Applications". Elsevier, Amsterdam, 2014, pp 427. ISBN: 978-0-12-417291-3.
28. Roulet, C.A., "Building, Energy and Solar technology". Earthscan, London, 2008, pp211. ISBN: 978-1-84407-451-8.
29. Colman-Sander, M., "Green building and phase change materials, Characteristics, energy implications and environmental impact". Nova science publisher, new york, 2015, pp 181. ISBN: 978-1-63482-749-2.
30. Zhang, X.R, "Energy solution to combat global warming". Springer, Switzeland, 2017, pp 852. ISBN: 978-3-319-269504-4.
31. Özcan, Z., Dişli, G. "Refrigeration Technology in Anatolian Seljuk and Ottoman Period Hospitals," *Gazi University Journal of Science*, V. 27, No. 3, 2014, pp. 1015–21.
32. Baird, G., R.Donn, M., Pool, F., D.S Brander, W., Aun, C.S., " Energy performance Buildings". Taylor et Francis, Flodida, 1984, pp 217. ISBN: 978-1-351-07169-7.
33. González-Espada, W. J., Bryan, L. A., and Kang, N.-H. "The intriguing physics inside an igloo," *Physics Education*, V. 36, No. 4, 2001, pp. 290–2.
34. Güémez, J., Fiolhais, C., and Fiolhais, M. "Revisiting Black's experiments on the latent heats of water," *The Physics Teacher*, V. 40, No. 1, 2002, pp. 26–3
35. Koşney, J., "PCM enhanced building components, an application of Phase Change Materials in building envelopes and internal structures". Springer, Bonston, 2015, pp 281. ISBN: 978-3-319-14285-2.
36. Barber, A.D., "The world solar energy project". Grey Room, N° 51, Springer, 2013. pp 64-93.
37. Ghoneim, A. A., Klein, S. A., and Duffie, J. A. "Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials," *Solar Energy*, V. 47, No. 3, 1991, pp. 237–42.
38. Balcomb, J. D., Hedstrom, J. C., and McFarland, R. D. "Simulation analysis of passive solar heated buildings—Preliminary results," *Solar Energy*, V. 19, No. 3, 1977, pp. 277–82.
39. Balcomb, J.D., McFarland, R.D., and Moore, S.W. Passive testing at Los Alamos. United States. National passive solar conference, Philadelphia, PA, USA, 15 Mar 1978.
40. Denzer, A., "The solar house: pioneering sustainable design". Rizzoli International publisher, 2013, pp 256. ISBN: 978-0-8478-4005-2.
41. Hawes, D. W., Banu, D., and Feldman, D. "Latent heat storage in concrete," *Solar Energy Materials*, V. 19, No. 3, 1989, pp. 335–48.
42. Hawes, D. W., Banu, D., and Feldman, D. "Latent heat storage in concrete. II," *Solar Energy Materials*, V. 21, No. 1, 1990, pp. 61–80.
43. Lee, T., Hawes, D. W., Banu, D., et al. "Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 62, No. 3, 2000, pp. 217–37.

44. Feldman, D., Banu, D., Hawes, D., et al. "Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard," *Solar Energy Materials*, V. 22, No. 2, 1991, pp. 231–42.
45. Hawes, D. W., and Feldman, D. "Absorption of phase change materials in concrete," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 27, No. 2, 1992, pp. 91–101.
46. Garg, H.P., Mullick, S. C., Bhargava, A. K., "Solar Thermal Energy Storage". D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1985, pp 659, ISBN : 978-94- 010-8841-1.
47. Dincer, I., Colpan, C.O., Kizilkan, O., Ezan, M.A., "Progress in Clean Energy, Volume 2: Novel Systems and Applications". Springer, Switzerland, 2015, pp 1160.
48. Fleischer, A.S., « Thermal energy storage using phase change materials: Fundamental and applications », Springer, New York, 2015, pp97.
49. <https://www.khanacademy.org/humanities/ap-art-history/indigenous-america/a/mesa-verde-cliff-dwellings>. reconsulté : le 26-02-2020
50. Hasnain, S. M. "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," *Energy Conversion and Management*, V. 39, No. 11, 1998, pp. 1127–38.
51. Pasupathy, A., Velraj, R., "Phase change material based thermal storage for Energy conservation in building architecture", *International Energy Journal*, V. 7, N°.2, 2006, pp.147-161.
52. Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C. R., et al. "Review on thermal energy Storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 13, No. 2, 2009, pp. 318–345.
53. Dincer, I. "On thermal energy storage systems and applications in buildings," *Energy and Buildings*, V. 34, No. 4, 2002, pp. 377–88.
54. Nazir, H., Batool, M., Bolivar Osorio, F. J., et al. "Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V. 129, 2019, pp. 491–523.
55. Soupart caron, A., « stockage de chaleur dans les matériaux à changement de Phase » thèse de doctorat, université de Grenoble, mécanique énergétique et Procédés, 2006, pp.291.
56. Umair, M.M., Zhang, Y., Iqbal, K., et al. "Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage—A review," *Applied Energy*, V. 235, 2019, pp. 846–73.
57. De Gracia, A., and Cabeza, L. F. "Phase change materials and thermal energy storage for buildings," *Energy and Buildings*, V. 103, 2015, pp. 414–9.
58. Suppes, G.J., Goff, M.J., and Lopes, S. "Latent heat characteristics of fatty acid derivatives pursuant phase change material applications," *Chemical Engineering Science*, V. 58, No. 9, 2003, pp. 1751–63.
59. Rozanna, D., Chuah, T.G., Salmiah, A., et al. "Fatty Acids as Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage: A Review," *International Journal of Green Energy*, V. 1, No. 4, 2005, pp. 495–513.

60. Li, C., Yu, H., Song, Y., et al. "Novel hybrid microencapsulated phase change materials incorporated wallboard for year-long year energy storage in buildings," *Energy Conversion and Management*, V. 183, 2019, pp. 791–802.
61. Wang, X., Yu, H., Li, L., et al. "Experimental assessment on the use of phase change materials (PCMs)-bricks in the exterior wall of a full-scale room," *Energy Conversion and Management*, V. 120, 2016, pp. 81–9.
62. Gounni, A., and El Alami, M. "The optimal allocation of the PCM within a composite wall for surface temperature and heat flux reduction: An experimental Approach," *Applied Thermal Engineering*, V. 127, 2017, pp. 1488–94.
63. Ö. Paksoy, H., "Thermal energy storage for sustainable energy Consumption: fundamentals, case studies and design ", Springer, Netherlands, 2007, pp 440, ISBN: 1-4020-5290-1.
64. Sarbu, I., Dorca, A., "Review on heat transfer analysis in thermal energy Storage using latent heat storage systems and phase change materials" – 2019 - International Journal of Energy Research - Wiley Online Library." Available At: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/er.4196>. Accessed July 30, 2019.
65. Wang, F., Lin, W., Ling, Z., Fang, X., "A comprehensive review on phase Change material emulsions: Fabrication, characteristics, and heat transfer Performance", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 191, 2019, pp. 218_234.
66. Kumar, N., Hirschev, B., LaClaira, T., Gluesenkamp, K., Graham, S., "Review of Stability and thermal conductivity enhancements for salt hydrates", *Journal of Energy Storage*, V. 24, 2019, pp.100794.
67. Liu, M., Saman, W., Bruno, F., "Review on storage materials and thermal Performance Enhancement techniques for high temperature phase change Thermal storage Systems», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V.16, 2012, pp.2118_2132.
68. Baetens, R., Jelle, B. P., and Gustavsen, A. "Phase change materials for Building Applications: A state-of-the-art review," *Energy and Buildings*, V. 42, No. 9, 2010, pp.1361–8.
69. Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., et al. "Review on thermal energy storage with Phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Applied Thermal Engineering*, V. 23, No. 3, 2003, pp. 251–83.
70. Mehling, H., Cabeza, L.F., "Heat and cold storage with PCM: an up to date Introduction into basics and application", Springer, Berlin, 2008, pp.308, ISBN: 978-3-540-68557-9.
71. Veerappan, M., Kalaiselvam, S., Iniyan, S., Goic, R.,b "Phase change Characteristic Study of spherical PCMs in solar energy storage", *Solar Energy*, V. 83, 2009, Pp.1245-1252.
72. Seong, Y.B., Lim, J.H., "Energy saving potentials of PCMs applied to Lightweight building envelopes", *Energies*, V. 6, 2013, 5219-5230.
73. Roualt, F., "Système intégré de rafraîchissement d'air pour le bâtiment à base de MCP », Thèse de Doctorat en Énergétique, école nationale supérieure des arts et Métiers, Paris, 2014.

74. Agyenim, F. & all, 2009. "A review of materials. Heat transfer and phase change problem formulation of latent heat thermal energy storage systems (LHES)". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 615–628.
75. Akeiber, H., et al., "A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 60, 2016, 1470-1497.
76. Waqas, A., Ud Din, Z., "Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings: a review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 18, 2013, pp. 607-625.
77. Tatsidjodoung, P., Le Pierrès, N., Luo, L., "A review of potential materials for thermal energy storage in building applications" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 18, 2013, pp. 327-349.
78. Haillot, D., Bauer, T., Kröner, U., Tamme, R., "Thermal analysis of phase change materials in the temperature range 120–150 °C" *Thermochimica Acta*, V. 513, 2011, pp. 49-59.
79. Yuan, Y., Zhang, N., Tao, W., Cao, X., He, Y., "Fatty acids as phase change materials: a review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 29, 2014, pp. 482-498.
80. Patnaik, P., "Handbook of inorganic chemicals", McGraw-Hill, 2003.
81. Cunha, J.P Da, Eames, P., "Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials: A review", *Applied Energy*, V. 177, 2016, pp. 227-238.
82. Rathod, M. K., Banerjee, J. "Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 18, 2013, pp. 246–58.
83. Pillai, KK. Brinkworth, BJ. "The storage of low grade thermal energy using phase change materials", *Applied Energy*, V.3, 1976, pp. 205-216.
84. Nikolic, R., Marinovic-Cincovic, M., Gadzuric, S., Zsigrai, IJ. "New materials for solar thermal storage solid/liquid transitions in fatty acid esters", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 79 (2003), pp. 285-292.
85. Castellón, C., Martorell, I., Cabeza, L. F., et al. "Compatibility of plastic with phase change materials (PCM)," *International Journal of Energy Research*, V. 35, No. 9, 2011, pp. 765–71.
86. Castellón, C., Günther, E., Mehling, H., et al. "Determination of the enthalpy of PCM as a function of temperature using a heat-flux DSC—A study of different measurement procedures and their accuracy," *International Journal of Energy Research*, V. 32, No. 13, 2008, pp. 1258–65.
87. Cabeza, L. F., Castellón, C., Nogués, M., et al. "Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings," *Energy and Buildings*, V. 39, No. 2, 2007, pp. 113–9.
88. Medrano, M., Yilmaz, M. O., Nogués, M., et al. "Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems," *Applied Energy*, V. 86, No. 10, 2009, pp. 2047–55.
89. Website of Rubitherm GmbH. Rubitherm GmbH; 2016. <<http://www.rubitherm.eu/>>. Consulté le: 30 Juillet 2019

90. Memon, S. A. "Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 31, 2014, pp. 870–906.
91. Kalnæs, S. E., and Jelle, B. P. "Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities," *Energy and Buildings*, V. 94, 2015, pp. 150–76.
92. Arteconi, A., Hewitt, N. J., and Polonara, F. "State of the art of thermal storage for demand-side management," *Applied Energy*, V. 93, 2012, pp. 371–89.
93. Milián, Y. E., Gutiérrez, A., Grágeda, M., et al. "A review on encapsulation techniques for inorganic phase change materials and the influence on their thermo physical properties," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 73, 2017, pp. 983–99.
94. Khan, Z., Khan, Z., and Ghafoor, A. "A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility," *Energy Conversion and Management*, V. 115, 2016, pp. 132–58.
95. Mohamed, S. A., Al-Suleiman, F. A., Ibrahim, N. I., et al. "A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 70, 2017, pp. 1072–89.
96. Mohseni, E., Tang, W., and Wang, Z. "Structural-functional integrated concrete with macro-encapsulated inorganic PCM," *AIP Conference Proceedings*, V. 1884, No. 1, 2017, p. 030002.
97. Jaguemont, J., Omar, N., Van den Bossche, P., et al. "Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review," *Applied Thermal Engineering*, V. 132, 2018, pp. 308–20.
98. Abdolmaleki, L., Sadrameli, S. M., and Pirvaram, A. "Application of Environmental friendly and eutectic phase change materials for the efficiency Enhancement of household freezers," *Renewable Energy*, V. 145, 2020, pp. 233–41.
99. Ma, G., Sun, J., Zhang, Y., et al. "A novel low-temperature phase change material based on stearic acid and hexanamide eutectic mixture for thermal energy storage," *Chemical Physics Letters*, V. 714, 2019, pp. 166–71.
100. Sari, A. "Eutectic mixtures of some fatty acids for latent heat storage: Thermal properties and thermal reliability with respect to thermal cycling," *Energy Conversion and Management*, V. 47, No. 9, 2006, pp. 1207–21.
101. Fauzi, H., Metselaar, H. S. C., Mahlia, T. M. I., et al. "Thermo-physical stability of fatty acid eutectic mixtures subjected to accelerated aging for thermal energy storage (TES) application," *Applied Thermal Engineering*, V. 66, No. 1, 2014, pp. 328–34.
102. Tang, Y., Alva, G., Huang, X., et al. "Thermal properties and morphologies of MA–SA eutectics/CNTs as composite PCMs in thermal energy storage," *Energy and Buildings*, V. 127, 2016, pp. 603–10.
103. Sari, A. "Eutectic mixtures of some fatty acids for low temperature solar heating applications: Thermal properties and thermal reliability," *Applied Thermal Engineering*, V. 25, No. 14, 2005, pp. 2100–7.

104. Lane, D. G. A. "Low temperature heat storage with phase change materials," *International Journal of Ambient Energy*, V. 1, No. 3, 1980, pp. 155–68.
105. Guyer, E. C. "Handbook of Applied Thermal Design," CRC Press, 1999, pp.710.
106. Karlsson, J., "Possibilities of using thermal mass in buildings to save energy, cut power consumption peaks and increase the thermal comfort. Division of Building Materials", 2012, LTH, Lund University.
107. Shukla, A., Buddhi, D., Sawhney, R.L., "Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials", *Renewable Energy*, V. 33, 2008, pp. 2606-2614.
108. Pomianowski, M., Heiselber, P., Zhang, Y., "Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings". *Energy and Buildings*, V. 67, 2013, pp. 56–69.
109. Cabeza, L. F., Barreneche, C., Martorell, I., et al. "Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part1. Thermo physical properties, «Renewable and Sustainable Energy Reviews, V. 43, 2015, pp. 1399–414.
110. Delgado, J. M.P.Q., Martinho, J.C., Vaz Sá, A., Guimarães, A.S., Abrantes, V., "Thermal Energy Storage with Phase Change Materials_ A Literature review of applications for building materials", *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, pp.80. ISBN: 978-3-319-97498-9.
111. Zhang, N., Yuan, Y., Du, Y., Cao, X., Yuan, Y., "Preparation and properties of palmitic-stearic acid eutectic mixture/expanded graphite composite as phase change material for energy storage", *Energy*, V. 78, 2014, pp. 950-956.
112. Jeong, S.G., Chung, O., Yu, S., Kim, S., Kim, S., "Improvement of the thermal properties of Bio-based PCM using exfoliated graphite nanoplatelets", *Solar Energy Materials and Solar Cells*", V. 117, 2013, pp. 87-92.
113. Jeong, S.G., J.H. Lee, J. Seo, S. Kim"Thermal performance evaluation of Bio-based shape stabilized PCM with boron nitride for energy saving" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71 (2014), pp. 245-250.
114. Fabiani, C., Pisello, A. L., Barbanera, M., et al. "Assessing the Potentiality of Animal Fat Based-Bio Phase Change Materials (PCM) for Building Applications: An Innovative Multipurpose Thermal Investigation," *Energies*, V. 12, No. 6, 2019, p. 1111.
115. Heidari, M. D., Mathis, D., Blanchet, P., et al. "Streamlined Life Cycle Assessment of an Innovative Bio-Based Material in Construction: A Case Study of a Phase Change Material Panel," *Forests*, V. 10, No. 2, 2019, p.160.
116. Biswas, K., Abhari, R., "Low-cost phase change material as an energy storage medium in building envelopes: experimental and numerical analyses" *Energy Conversion and Management*, V. 88, 2014, pp. 1020-1031.
117. Chen, F., Wolcott, M., "Polyethylene/paraffin binary composites for phase change material energy storage in building: a morphology, thermal properties, and paraffin leakage study", *Solar Energy Materials and Solar cells*, V. 137, 2015, pp. 79-85.
118. Rao, V. V., Parameshwaran, R., and Ram, V. V. "PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends," *Energy and Buildings*, V. 158, 2018, pp. 95–122.

119. Cellat, K., Beyhan, B., Güngör, C., et al. "Thermal enhancement of concrete by adding bio-based fatty acids as phase change materials," *Energy and Buildings*, V. 106, 2015, pp. 156–63.
120. Yu, S., Jeong, S.-G., Chung, O., et al. "Bio-based PCM/carbon nanomaterials composites with enhanced thermal conductivity," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 120, 2014, pp. 549–54.
121. Kosny, J., Kossecka, E., Brzezinski, A., et al. "Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs)," *Energy and Buildings*, V. 52, 2012, pp. 122–31.
122. Fang, Y., Kuang, S., Gao, X., et al. "Preparation and characterization of novel nanoencapsulated phase change materials," *Energy Conversion and Management*, V. 49, No. 12, 2008, pp. 3704–7.
123. Salunkhe, P. B., and Shembekar, P. S. "A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 16, No. 8, 2012, pp. 5603–16.
124. De Matteis, V., Cannavale, A., Martellotta, F., et al. "Nano-encapsulation of phase change materials: From design to thermal performance, simulations and toxicological assessment," *Energy and Buildings*, V. 188–189, 2019, pp. 1–11.
125. Lazaro, A., Dolado, P., Marín, J. M., et al. "PCM–air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Experimental results of two real-scale prototypes," *Energy Conversion and Management*, V. 50, No. 3, 2009, pp. 439–43.
126. Raj, V. A. A., and Velraj, R. "Review on free cooling of buildings using phase change materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 14, No. 9, 2010, pp. 2819–29.
127. Sari, A., Alkan, C., and Altıntaş, A. "Preparation, characterization and latent heat thermal energy storage properties of micro-nanoencapsulated fatty acids by polystyrene shell," *Applied Thermal Engineering*, V. 73, No. 1, 2014, pp. 1160–8.
128. Lee, S. H., Yoon, S. J., Kim, Y. G., et al. "Development of building materials by using micro-encapsulated phase change material," *Korean Journal of Chemical Engineering*, V. 24, No. 2, 2007, pp. 332–5.
129. Tatsidjodoung, P., Le Pierrès, N., and Luo, L. "A review of potential materials for thermal energy storage in building applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 18, 2013, pp. 327–49.
130. Park, S.-J., Kim, K.-S., and Hong, S.-K. "Preparation and Thermal Properties of Polystyrene Nanoparticles Containing Phase Change Materials as Thermal Storage Medium," *Polymer Korea*, V. 29, No. 1, 2005, pp. 8–13.
131. Salyer, I. O., and Sircar, A. K. "Development of PCM wallboard for heating and cooling of residential buildings," USDOE Assistant Secretary for Conservation and Renewable Energy, Washington, DC (United States). Office of Energy Management; Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States); Oak Ridge National Lab., TN (United States), 1989.
132. Rathore, P. K. S., and Shukla, S. K. "Potential of macroencapsulated pcm for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review," *Construction and Building Materials*, V. 225, 2019, pp. 723–44.

133. Pielichowska, K., and Pielichowski, K. "Phase change materials for thermal energy storage," *Progress in Materials Science*, V. 65, 2014, pp. 67–123.
134. Zhu, N., Hu, N., Hu, P., et al. "Experiment study on thermal performance of building integrated with double layers shape-stabilized phase change material wallboard," *Energy*, V. 167, 2019, pp. 1164–80.
135. Gao, J., Yan, T., Xu, T., et al. "Development and experiment validation of variable-resistance-variable-capacitance dynamic simplified thermal models for shape-stabilized phase change material slab," *Applied Thermal Engineering*, V. 146, 2019, pp. 364–75.
136. Boussaba, L., Foufa, A., Makhlof, S., et al. "Elaboration and properties of a composite bio-based PCM for an application in building envelopes," *Construction and Building Materials*, V. 185, 2018, pp. 156–65.
137. Shilei, L., Guohui, F., Neng, Z., et al. "Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards," *Energy and Buildings*, V. 39, No. 10, 2007, pp. 1088–91.
138. Kuznik, F., Virgone, J., and Roux, J.-J. "Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation," *Energy and Buildings*, V. 40, No. 2, 2008, pp. 148–56.
139. Evers, A. C., Medina, M. A., and Fang, Y. "Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator," *Building and Environment*, V. 45, No. 8, 2010, pp. 1762–8.
140. Navarro, L., de Garcia, A., Solé, C., et al. "Thermal loads inside buildings with phase change materials: Experimental results," *Energy Procedia*, V. 30, 2012, pp. 342–9.
141. Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., et al. "Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material," *Energy and Buildings*, V. 38, No. 6, 2006, pp. 673–81.
142. Guichard, S. "The use of Phase Change Materials in the Complex Walls: Modelisation, Experimentation and an overall study of energetic performance." These, physique du bâtiment, Université de La Réunion, 2013.
144. Berthou, Y. "Étude de parois de bâtiments passifs associant un Matériau à Changement de Phase (MCP) et une super isolation transparents." these, Paris, ENMP, 2011.
145. Gowreesunker, B. L., and Tassou, S. A. "Effectiveness of CFD simulation for the performance prediction of phase change building boards in the thermal environment control of indoor spaces," *Building and Environment*, V. 59, 2013, pp. 612–25.
146. Jin, X., Zhang, S., Xu, X., et al. "Effects of PCM state on its phase change performance and the thermal performance of building walls," *Building and Environment*, V. 81, 2014, pp. 334–9.
147. Ahmad, M. "Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires." these, Grenoble 1, 2004.
148. Jelle, B. P., and Kalnæs, S. E. "Chapter 3 - Phase Change Materials for Application in Energy-Efficient Buildings." In: Pacheco-Torgal, F., Granqvist,

- C.-G., Jelle, B. P. et al., eds. *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting*. Woodhead Publishing, 2017. pp. 57–118.
149. Ango, S. E. "Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase," Thèse de doctorat en énergétique, Arts et métiers Paris Tech, 2011, pp.180.
 150. Ismail, K. A. R., and Henríquez, J. R. "Thermally effective windows with moving phase change material curtains," *Applied Thermal Engineering*, V. 21, No. 18, 2001, pp. 1909–23.
 151. Stritih, U., and Novak, P. "Solar heat storage wall for building ventilation," *Renewable Energy*, V. 8, No. 1, 1996, pp. 268–71.
 152. Bykalyuk, A. "Contribution à l'étude des échanges convectifs à l'interface fluide paroi en présence de matériaux à changement de phase : Application au bâtiment," _Thèse Génie civil. INSA de Lyon, 2014, pp.155.
 153. Lopez, J.P.A, *Méthodologie de conception des matériaux architecturés pour le stockage latent dans le domaine du bâtiment. Thèse Architecture, aménagement de l'espace. INSA de Lyon, 2013. Français, pp.165.*
 154. Iten, M., Liu, S., and Shukla, A. "A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 61, 2016, pp. 175–86.
 155. Souayfane, F., Fardoun, F., and Biwole, P.-H. "Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review," *Energy and Buildings*, V. 129, 2016, pp. 396–431.
 156. Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., et al. "Free-cooling of buildings with phase change materials," *International Journal of Refrigeration*, V. 27, No. 8, 2004, pp. 839–49.
 157. Butala, V., and Stritih, U. "Experimental investigation of PCM cold storage," *Energy and Buildings*, V. 41, No. 3, 2009, pp. 354–9.
 158. Marín, J. M., Zalba, B., Cabeza, L. F., et al. "Improvement of a thermal energy storage using plates with paraffin-graphite composite," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V. 48, No. 12, 2005, pp. 2561–70.
 159. Koschenz, M., and Lehmann, B. "Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings," *Energy and Buildings*, V. 36, No. 6, 2004, pp. 567–78.
 160. Arkar, C., Vidrih, B., and Medved, S. "Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building," *International Journal of Refrigeration*, V. 30, No. 1, 2007, pp. 134–43.
 161. Arkar, C., and Medved, S. "Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system," *Solar Energy*, V. 81, No. 9, 2007, pp. 1078–87.
 162. Saman, W., Bruno, F., and Halawa, E. "Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system," *Solar Energy*, V. 78, No. 2, 2005, pp. 341–9.
 163. Li, J., Xue, P., He, H., et al. "Preparation and application effects of a novel form-stable phase change material as the thermal storage layer of an electric floor heating system," *Energy and Buildings*, V. 41, No. 8, 2009, pp. 871–80.
 164. Agyenim, F., and Hewitt, N. "The development of a finned phase change material (PCM) storage system to take advantage of off-peak electricity tariff

- for improvement in cost of heat pump operation,” *Energy and Buildings*, V. 42, No. 9, 2010, pp. 1552–60.
164. Mankibi, M. E., Stathopoulos, N., Rezaï, N., et al. “Optimization of an Air-PCM heat exchanger and elaboration of peak power reduction strategies,” *Energy and Buildings*, V. 106, 2015, pp. 74–86.
165. Mazo, J., Delgado, M., Marin, J. M., et al. “Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump,” *Energy and Buildings*, V. 47, 2012, pp. 458–66.
166. Promoppatum, P., Yao, S.-C., Hultz, T., et al. “Experimental and numerical investigation of the cross-flow PCM heat exchanger for the energy saving of building HVAC,” *Energy and Buildings*, V. 138, 2017, pp. 468–78.
167. BELTZUNG Q., BERY P., DE SOUSA L.J., LECAS S., NAUDE P., « Conception des bâtiments à basse consommation d’énergie BBC: les matériaux à changement de phase MCP », Challenge académique des technologies durables, Projet de créativité et d’innovation technologique, pp.36.
168. <https://www.loiret.fr/localiser-nos-services>. Consulté le : 30-06-2019
169. <http://www.lqe.fr/prix-lqe>. Consulté le : 30-06-2019
170. Shrestha , S., Miller , M., Stovall, T., Desjarlais, A., Childs, K., Porter , W., Bhandari, M., Coley, S., “Modeling PCM-enhanced Insulation System and Benchmarking Energyplus Against Controlled Field Data, Proceedings of Building Simulation 2011, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November.
171. <https://pdxlivingllc.wordpress.com/completed-projects/trekhaus/>. consulté le : 22-06-2019
172. <http://www.allmannsattlerwappner.de/en/>. Consulté le : 22-06-2019
173. Virgone, J., Noël, J., Reisdorf R., “Numerical Study of the Influence of the Thickness and Melting Point on the Effectiveness of Phase Change Materials: Application to the Renovation of a Low Inertia School”, *Building simulation 2009, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009*
174. Zwanzig, S. D., Lian, Y., and Brehob, E. G. “Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope,” *Energy Conversion and Management*, V. 69, 2013, pp. 27–40.
175. Al-Saadi, S. N., and Zhai, Z. (John). “Systematic evaluation of mathematical methods and numerical schemes for modeling PCM-enhanced building enclosure,” *Energy and Buildings*, V. 92, 2015, pp. 374–88.
176. Jaworski, M., Łapka, P., and Furmański, P. “Numerical modelling and experimental studies of thermal behaviour of building integrated thermal energy storage unit in a form of a ceiling panel,” *Applied Energy*, V. 113, 2014, pp. 548–57.
177. Kylili, A., and Fokaides, P. A. “Numerical simulation of phase change materials for building applications: a review,” *Advances in Building Energy Research*, V. 11, No. 1, 2017, pp. 1–25.
178. Swaminathan, C. R., and Voller, V. R. “On The Enthalpy Method,” *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 1993.

179. Kong, X., Lu, S., Li, Y., et al. "Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application," *Energy and Buildings*, V. 81, 2014, pp. 404–15.
180. Kuznik, F., Virgone, J., and Johannes, K. "Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM," *Energy and Buildings*, V. 42, No. 7, 2010, pp. 1004–9.
181. Günther, E., Hiebler, S., Mehling, H., et al. "Enthalpy of Phase Change Materials as a Function of Temperature: Required Accuracy and Suitable Measurement Methods," *International Journal of Thermophysics*, V. 30, No. 4, 2009, pp. 1257–69.
182. Atthey, D. R. "A Finite Difference Scheme for Melting Problems," *IMA Journal of Applied Mathematics*, V. 13, No. 3, 1974, pp. 353–66.
183. Hunter, L. W., and Kuttler, J. R. "The Enthalpy Method for Heat Conduction Problems With Moving Boundaries," *Journal of Heat Transfer*, V. 111, No. 2, 1989, pp. 239–42.
184. Šarler, B. "Stefan's work on solid-liquid phase changes," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, V. 16, No. 2, 1995, pp. 83–92.
185. Alexiades, V. "Mathematical Modeling Of Melting And Freezing Processes," Routledge, 2018.
186. Sá, A. V., Azenha, M., de Sousa, H., et al. "Thermal enhancement of plastering mortars with Phase Change Materials: Experimental and numerical approach," *Energy and Buildings*, V. 49, 2012, pp. 16–27.
187. Biwole, P. H., Eclache, P., and Kuznik, F. "Phase-change materials to improve solar panel's performance," *Energy and Buildings*, V. 62, 2013, pp. 59–67.
188. Tabares-Velasco, P. C., Christensen, C., and Bianchi, M. "Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies," *Building and Environment*, V. 54, 2012, pp. 186–96.
189. Zwanzig, S. D., Lian, Y., and Brehob, E. G. "Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope," *Energy Conversion and Management*, V. 69, 2013, pp. 27–40.
190. Barreneche, C., Solé, A., Miró, L., et al. "Study on differential scanning calorimetry analysis with two operation modes and organic and inorganic phase change material (PCM)," *Thermochimica Acta*, V. 553, 2013, pp. 23–6.
191. Idelsohn, S. R., Storti, M. A., and Crivelli, L. A. "Numerical methods in phase- change problems," *Archives of Computational Methods in Engineering*, V. 1, No. 1, 1994, pp. 49–74.
192. Hu, H., and Argyropoulos, S. A. "Mathematical modelling of solidification and melting: a review," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, V. 4, No. 4, 1996, pp. 371–396.
193. Yang, H., and He, Y. "Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, V. 37, No. 4, 2010, pp. 385–92.
194. Heim, D. "Isothermal storage of solar energy in building construction," *Renewable Energy*, V. 35, No. 4, 2010, pp. 788–96.

195. Poirier, D., and Salcudean, M. "On Numerical Methods Used in Mathematical Modeling of Phase Change in Liquid Metals," *Journal of Heat Transfer*, V. 110, No. 3, 1988, pp. 562–70.
196. Civan, F., and Sliepcevich, C.M., "International Journal of Heat and Mass Transfer", V 27, 1984, pp. 1428-1430.
197. Borreguero, A. M., Carmona, M., Sanchez, M. L., et al. "Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with an optimal core/coating mass ratio," *Applied Thermal Engineering*, V. 30, No. 10, 2010, pp. 1164–9.
198. Lazaro, A., Peñalosa, C., Solé, A., et al. "Intercomparative tests on phase change materials characterisation with differential scanning calorimeter," *Applied Energy*, V. 109, 2013, pp. 415–20.
199. Fang, Y., and Medina, M. A. "Proposed Modifications for Models of Heat Transfer Problems Involving Partially Melted Phase Change Processes," *Journal of ASTM International*, V. 6, No. 9, 2009, pp. 1–20.
200. Sadasivam, S., Almeida F., Zhang D., Fung, A.S., "An iterative enthalpy method to overcome the limitations in ESP-r's PCM solution algorithm" *ASHRAE Trans* 117, 2011, 100–107.
201. Dai, X., Wu, X., and Tian, F. "Heat transfer study of building envelopes with phase change materials," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, V. 490, 2019, p. 022011.
202. El Ouali, A., El Rhafiki, T., Kousksou, T., et al. "Heat transfer within mortar containing micro-encapsulated PCM: Numerical approach," *Construction and Building Materials*, V. 210, 2019, pp. 422–33.
203. Souguir, S., Boukadida, N., and Lajimi, N. "Impact of the integration of phase change materials on the thermal behavior of the building envelope during the summer period of Tunisia." 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC). 2018. pp. 1–5.
204. Kheradmand, M., Azenha, M., de Aguiar, J. L. B., et al. "Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings," *Energy*, V. 94, 2016, pp. 250–61.
205. Li, D., Zheng, Y., Liu, C., et al. "Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building," *Energy Conversion and Management*, V. 100, 2015, pp. 147–56.
206. Émile O., "Technologie des matériaux de construction", Tome II. Edition : entreprise moderne d'édition, paris, 1976, pp.250.
207. Etienne, S., Laurent, D., Gaudry, E., Lagrange, P., Lediau, J., Steinmetz, J., "Les matériaux de A à Z", DUNOD, Belgique, 2008, pp.312.
208. Hegger, M., Auch-Schwelk, V., Fuchs, M., Rosenkranz, T., "Cons Construire, atlas des matériaux", Presse polytechniques et universitaires romandes, France, 2009, pp. 280.
209. Dupeux, M., "Science des matériaux", DUNOD, 2ème édition, France, 2008, pp.208.
210. Couasnet, Y., "Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction", Lemoniteur, 2ème édition, Paris, 2011, pp.369.

211. Lemaitre, C., "Mise en œuvre et emploi des matériaux de construction", Eyrolles, Paris, 2012, pp. 263. ISBN: 978-2-212-13393-6.
212. Conseil Architecture Urbanisme et Environnement, guide des matériaux isolants, http://www.cg43.fr/sites/cg43/IMG/pdf/guide_des_materiaux_isolants.pdf. Consulté le : 14-02-2018
213. Ashby, M.F., Jones, D.R.H., "Matériaux : propriétés et applications", Edition : DUNOD, Paris 1998, pp.278.
214. Bailon, J.P., Dorlot, J.M., "Des matériaux", presse internationale polytechnique, Montréal, 2000, pp.736.
215. Meille, S. "Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure," Thèse: Matériaux. INSA de Lyon, 2001, Français, 218.
216. Ebanda, F. B. "Etude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales," Thèse en Génie Mécanique, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2012, Français, 2012, pp.190.
217. Vangelisti, R., and Herold, A. "Observations macroscopiques et microscopiques des produits d'insertion du graphite avec le trichlorure d'or," Carbon, V. 15, No. 5, 1977, pp. 327–33.
218. Vangelisti, R., and Herold, A. "Observations macroscopiques et microscopiques des produits d'insertion du graphite avec le trichlorure d'or," Carbon, V. 15, No. 5, 1977, pp. 327–33.
219. Berger, D., and Maire, J. "Propriétés physiques du graphite expansé recomprimé," Materials Science and Engineering, V. 31, 1977, pp. 335–9.
220. Fuzellier, H., Melin, J., and Herold, A. "Une nouvelle variété de nitrate de graphite," Materials Science and Engineering, V. 31, 1977, pp. 91–4.
221. Eun, T.-H., Song, H.-K., Hun Han, J., et al. "Enhancement of heat and mass transfer in silica-expanded graphite composite blocks for adsorption heat pumps: Part I. Characterization of the composite blocks," International Journal of Refrigeration, V. 23, No. 1, 2000, pp. 64–73.
222. Khemissa, M. "Recherches Expérimentales sur les Propriétés Mécaniques d'une Argile Molle Naturelle. (Argile de Guiche, VALLEE DE L'ADOUR)," Thèse de doctorat présentée à l'école Nationale des ponts et chaussées, 1992.
223. Vicat, L. J. "Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires...", Didot, 1818, pp. 186.
224. Olivier, M., Mesbah, A., « Le matériau terre: Essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terres compressées » Bull Liaison Labo P et Ch, 146 (1986), pp. 37-43.
225. Douglas, J., "Building Adaptation", Heriot-Watt University, Elsevier, Edinburgh, UK, Second edition 2006, pp 678. ISBN : 978-0-7506-6667-1.
226. Wang, E., Kong, X., Rong, X., et al. "A Study on a Novel Phase Change Material Panel Based on Tetradecanol/Lauric Acid/Expanded Perlite/Aluminium Powder for Building Heat Storage," Materials, V. 9, No. 11, 2016, p. 896.
227. Lee, K. O., Medina, M. A., Raith, E., et al. "Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat

- transfer reduction and management,” *Applied Energy*, V. 137, 2015, pp. 699–706.
228. Cheng, W., Zhang, R., Xie, K., et al. “Heat conduction enhanced shape-stabilized paraffin/HDPE composite PCMs by graphite addition: Preparation and thermal properties,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 94, No. 10, 2010, pp. 1636–42.
229. Xia, L., Zhang, P., and Wang, R. Z. “Preparation and thermal characterization of expanded graphite/paraffin composite phase change material,” *Carbon*, V. 48, No. 9, 2010, pp. 2538–48.
230. Merlin, K. “Caractérisation thermique d’un matériau à changement de phase dans une structure conductrice.” these de doctorat en thermique, Nantes, 2016, pp.198.
231. Lv, P., Liu, C., and Rao, Z. “Review on clay mineral-based form-stable phase change materials: Preparation, characterization and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 68, 2017, pp. 707–26.
232. Sari, A. “Composites of polyethylene glycol (PEG600) with gypsum and natural clay as new kinds of building PCMs for low temperature-thermal energy storage,” *Energy and Buildings*, V. 69, 2014, pp. 184–92.
233. Worden, R. H., Needham, S. J., and Cuadros, J. “The worm gut; a natural clay mineral factory and a possible cause of diagenetic grain coats in sandstones,” *Journal of Geochemical Exploration*, V. 89, No. 1, 2006, pp. 428–31.
234. Monvisade, P., and Siriphannon, P. “Chitosan intercalated montmorillonite: Preparation, characterization and cationic dye adsorption,” *Applied Clay Science*, V. 42, No. 3, 2009, pp. 427–31.
235. Nayak, P. S., and Singh, B. K. “Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR,” *Bulletin of Materials Science*, V. 30, No. 3, 2007, pp. 235–8.
236. Chafik, T., Harti, S., Cifredo, G., et al. “Easy extrusion of honeycomb-shaped monoliths using Moroccan natural clays and investigation of their dynamic adsorptive behavior towards VOCs,” *Journal of Hazardous Materials*, V. 170, No. 1, 2009, pp. 87–95.
237. Madejová, J. “FTIR techniques in clay mineral studies,” *Vibrational Spectroscopy*, V. 31, No. 1, 2003, pp. 1–10.
238. Baraldi, P., Bonazzi, A., Giordani, N., et al. “Analytical Characterization of Roman Plasters of the ‘Domus Farini’ in Modena*,” *Archaeometry*, V. 48, No. 3, 2006, pp. 481–99.
239. Mahmoud, H. H. M., Ali, M. F., Pavlidou, E., et al. “Characterization of Plasters from Ptolemaic Baths: New Excavations Near the Karnak Temple Complex, Upper Egypt*,” *Archaeometry*, V. 53, No. 4, 2011, pp. 693–706.
240. Han, J. H., Cho, K. W., Lee, K.-H., et al. “Porous graphite matrix for chemical heat pumps,” *Carbon*, V. 36, No. 12, 1998, pp. 1801–10.
241. Du, W., Lu, J., Sun, P., et al. “Organic salt-assisted liquid-phase exfoliation of graphite to produce high-quality graphene,” *Chemical Physics Letters*, V. 568–569, 2013, pp. 198–201.
242. Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.-P., et al. “Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material,” *Angewandte Chemie International Edition*, V. 44, No. 22, 2005, pp. 3358–93.

243. Hinterstoisser, B., Åkerholm, M., and Salmén, L. "Effect of fiber orientation in dynamic FTIR study on native cellulose," *Carbohydrate Research*, V. 334, No. 1, 2001, pp. 27–37.
244. Alamri, H., and Low, I. M. "Mechanical properties and water absorption behaviour of recycled cellulose fibre reinforced epoxy composites," *Polymer Testing*, V. 31, No. 5, 2012, pp. 620–8.
245. Méndez, A., Fidalgo, J. M., Guerrero, F., et al. "Characterization and pyrolysis behaviour of different paper mill waste materials," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, V. 86, No. 1, 2009, pp. 66–73.
246. Mohkami, M., and Talaeipour, M. "Investigation of the Chemical Structure of Carboxylated and Carboxymethylated Fibers from Waste Paper via XRD and FTIR Analysis" *BioResources*, V. 6, No. 2, 2011, pp. 1988–2003.
247. Petersson, M., Gustafson, I., and Stading, M. "Comparison of microstructural and physical properties of two petroleum waxes," *Journal of Materials Science*, V. 43, No. 6, 2008, pp. 1869–79.
248. Srivastava, S. P., Handoo, J., Agrawal, K. M., et al. "Phase-transition studies in n-alkanes and petroleum-related waxes—A review," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, V. 54, No. 6, 1993, pp. 639–70.
249. Kao, H., Li, M., Lv, X., et al. "Preparation and thermal properties of expanded graphite/paraffin/organic montmorillonite composite phase change material," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, V. 107, No. 1, 2011, pp. 299–303.
250. Feldman, D., Banu, D., and Hawes, D. W. "Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 36, No. 2, 1995, pp. 147–57.
251. Fang, X., and Zhang, Z. "A novel montmorillonite-based composite phase change material and its applications in thermal storage building materials," *Energy and Buildings*, V. 38, No. 4, 2006, pp. 377–80.
252. Fang, X., Zhang, Z., and Chen, Z. "Study on preparation of montmorillonite-based composite phase change materials and their applications in thermal storage building materials," *Energy Conversion and Management*, V. 49, No. 4, 2008, pp. 718–23.
253. Sari, A., Bicer, A., Karaipekli, A., et al. "Preparation, characterization and thermal regulation performance of cement based-composite phase change material," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 174, 2018, pp. 523–9.
254. Yao, C., Kong, X., Li, Y., et al. "Numerical and experimental research of cold storage for a novel expanded perlite-based shape-stabilized phase change material wallboard used in building," *Energy Conversion and Management*, V. 155, 2018, pp. 20–31.
255. Li, L., Yu, H., and Liu, R. "Research on composite-phase change materials (PCMs)-bricks in the west wall of room-scale cubicle: Mid-season and summer day cases," *Building and Environment*, V. 123, 2017, pp. 494–503.
256. Khedache, S., Makhlof, S., Djefel, D., et al. "Preparation and thermal characterization of composite 'Paraffin/Red Brick' as a novel form-stable of phase change material for thermal energy storage," *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 40, No. 39, 2015, pp. 13771–6.
257. Suttaphakdee, P., Dulsang, N., Lorwanishpaisarn, N., et al. "Optimizing mix proportion and properties of lightweight concrete incorporated phase change

- material paraffin/recycled concrete block composite,” *Construction and Building Materials*, V. 127, 2016, pp. 475–83.
258. Karaipekli, A., and Sarı, A. “Development and thermal performance of pumice/organic PCM/gypsum composite plasters for thermal energy storage in buildings,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 149, 2016, pp. 19–28.
259. Li, X., Sanjayan, J. G., and Wilson, J. L. “Fabrication and stability of form-stable diatomite/paraffin phase change material composites,” *Energy and Buildings*, V. 76, 2014, pp. 284–94.
260. Sarı, A. “Thermal energy storage characteristics of bentonite-based composite PCMs with enhanced thermal conductivity as novel thermal storage building materials,” *Energy Conversion and Management*, V. 117, 2016, pp. 132–41.
261. Tang, Y., Lin, Y., Jia, Y., et al. “Improved thermal properties of stearyl alcohol/high density polyethylene/expanded graphite composite phase change materials for building thermal energy storage,” *Energy and Buildings*, V. 153, 2017, pp. 41–9.
262. Djefel, D., Makhlof, S., Khedache, S., et al. “Preparation and characterization of stearic acid/olive pomace powder composite as form-stable phase change material,” *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 40, No. 39, 2015, pp. 13764–70.
263. Atinafu, D. G., Dong, W., Huang, X., et al. “Introduction of organic-organic eutectic PCM in mesoporous N-doped carbons for enhanced thermal conductivity and energy storage capacity,” *Applied Energy*, V. 211, 2018, pp. 1203–15.
264. Zou, D., Ma, X., Liu, X., et al. “Thermal performance enhancement of composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V. 120, 2018, pp. 33–41.
265. Cheng, F., Wen, R., Huang, Z., et al. “Preparation and analysis of lightweight wall material with expanded graphite (EG)/paraffin composites for solar energy storage,” *Applied Thermal Engineering*, V. 120, 2017, pp. 107–14.
266. Wi, S., Seo, J., Jeong, S.-G., et al. “Thermal properties of shape-stabilized phase change materials using fatty acid ester and exfoliated graphite nanoplatelets for saving energy in buildings,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, V. 143, 2015, pp. 168–73.
267. Karaipekli, A., Biçer, A., Sarı, A., et al. “Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes,” *Energy Conversion and Management*, V. 134, 2017, pp. 373–81.
268. Ling, Z., Chen, J., Xu, T., et al. “Thermal conductivity of an organic phase change material/expanded graphite composite across the phase change temperature range and a novel thermal conductivity model,” *Energy Conversion and Management*, V. 102, 2015, pp. 202–8.
269. Fan, L.-W., Fang, X., Wang, X., et al. “Effects of various carbon nanofillers on the thermal conductivity and energy storage properties of paraffin-based

- nanocomposite phase change materials," *Applied Energy*, V. 110, 2013, pp. 163–72.
270. Zhang, N., Yuan, Y., Wang, X., et al. "Preparation and characterization of lauric–myristic–palmitic acid ternary eutectic mixtures/expanded graphite composite phase change material for thermal energy storage," *Chemical Engineering Journal*, V. 231, 2013, pp. 214–9.
271. Guo, X., Zhang, S., and Cao, J. "An energy-efficient composite by using expanded graphite stabilized paraffin as phase change material," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, V. 107, 2018, pp. 83–93.
272. Ali Memon, S., Yiu Lo, T., Shi, X., et al. "Preparation, characterization and thermal properties of Lauryl alcohol/Kaolin as novel form-stable composite phase change material for thermal energy storage in buildings," *Applied Thermal Engineering*, V. 59, No. 1, 2013, pp. 336–47.
273. Manaf, M. A., Man, Y. B. C., Hamid, N. S. A., et al. "Analysis of Adulteration of Virgin Coconut Oil by Palm Kernel Olein Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy," *Journal of Food Lipids*, V. 14, No. 2, 2007, pp. 111–21.
274. Rohman, A., and Man, Y. B. C. "Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for analysis of extra virgin olive oil adulterated with palm oil," *Food Research International*, V. 43, No. 3, 2010, pp. 886–92.
275. Qian, Z., Shen, H., Fang, X., et al. "Phase change materials of paraffin in h-BN porous scaffolds with enhanced thermal conductivity and form stability," *Energy and Buildings*, V. 158, 2018, pp. 1184–8.
276. Fang, Y., Niu, J., and Deng, S. "Numerical analysis for maximizing effective energy storage capacity of thermal energy storage systems by enhancing heat transfer in PCM," *Energy and Buildings*, V. 160, 2018, pp. 10–8.
277. Bories, C., Borredon, M.-E., Vedrenne, E., et al. "Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review," *Journal of Environmental Management*, V. 143, 2014, pp. 186–96.
278. Xu, B., and Li, Z. "Paraffin/diatomite composite phase change material incorporated cement-based composite for thermal energy storage," *Applied Energy*, V. 105, 2013, pp. 229–37.
279. Li, M., Wu, Z., and Tan, J. "Heat storage properties of the cement mortar incorporated with composite phase change material," *Applied Energy*, V. 103, 2013, pp. 393–9.
280. Memon, S. A., Cui, H. Z., Zhang, H., et al. "Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete," *Applied Energy*, V. 139, 2015, pp. 43–55.
281. He, Y., Zhang, X., Zhang, Y., et al. "Utilization of lauric acid-myristic acid/expanded graphite phase change materials to improve thermal properties of cement mortar," *Energy and Buildings*, V. 133, 2016, pp. 547–58.
282. Alrashdan, A., Mayyas, A. T., and Al-Hallaj, S. "Thermo-mechanical behaviors of the expanded graphite-phase change material matrix used for thermal management of Li-ion battery packs," *Journal of Materials Processing Technology*, V. 210, No. 1, 2010, pp. 174–9.

283. Ramakrishnan, S., Sanjayan, J., Wang, X., et al. "A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites," *Applied Energy*, V. 157, 2015, pp. 85–94.
284. Li, H., Chen, H., Li, X., et al. "Development of thermal energy storage composites and prevention of PCM leakage," *Applied Energy*, V. 135, 2014, pp. 225–33.
285. Zhang, L., Zhu, J., Zhou, W., et al. "Thermal and electrical conductivity enhancement of graphite nanoplatelets on form-stable polyethylene glycol/polymethyl methacrylate composite phase change materials," *Energy*, V. 39, No. 1, 2012, pp. 294–302.
286. Jana, P., Fierro, V., and Celzard, A. "Sucrose-based carbon foams with enhanced thermal conductivity," *Industrial Crops and Products*, V. 89, 2016, pp. 498–506.
287. Sari, A., and Karaipekli, A. "Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material," *Applied Thermal Engineering*, V. 27, No. 8, 2007, pp. 1271–7.
288. Hadjieva, M., Stoykov, R., and Filipova, T. "Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage," *Renewable Energy*, V. 19, No. 1, 2000, pp. 111–5.
289. Wi, S., Yang, S., Lee, J., et al. "Dynamic heat transfer and thermal performance evaluation of PCM-doped hybrid hollow plaster panels for buildings," *Journal of Hazardous Materials*, V. 374, 2019, pp. 428–36.
290. Sari, A., Bicer, A., Al-Sulaiman, F. A., et al. "Diatomite/CNTs/PEG composite PCMs with shape-stabilized and improved thermal conductivity: Preparation and thermal energy storage properties," *Energy and Buildings*, V. 164, 2018, pp. 166–75.
291. Kyriaki, E., Konstantinidou, C., Giama, E., et al. "Life cycle analysis (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA) of phase change materials (PCM) for thermal applications: A review," *International Journal of Energy Research*, V. 42, No. 9, 2018, pp. 3068–77.
292. Mathis, D. "Développement de nouveaux matériaux de haute inertie thermique à base de bois et matériaux à changement de phase biosourcés," Rhèse de doctorat, Univesité LAVAL, Quebec, Canada, 2019. pp. 123.
293. Morimoto, T., Kawana, Y., Saegusa, K., et al. "Supercooling characteristics of phase change material particles within phase change emulsions," *International Journal of Refrigeration*, V. 99, 2019, pp. 1–7.
294. Wijesuriya, S., Brandt, M., and Tabares-Velasco, P. C. "Parametric analysis of a residential building with phase change material (PCM)-enhanced drywall, precooling, and variable electric rates in a hot and dry climate," *Applied Energy*, V. 222, 2018, pp. 497–514.
295. Muthuvelan, T., Panchabikesan, K., Munisamy, R., et al. "Experimental investigation of free cooling using phase change material-filled air heat exchanger for energy efficiency in buildings," *Advances in Building Energy Research*, V. 12, No. 2, 2018, pp. 139–49.
296. Zeinelabdein, R., Omer, S., Mohamed, E., et al. "Free cooling using phase change material for buildings in hot-arid climate," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, V. 13, No. 4, 2018, pp. 327–37.

297. Yang, L., Cao, X., Zhang, N., et al. "Thermal reliability of typical fatty acids as phase change materials based on 10,000 accelerated thermal cycles," *Sustainable Cities and Society*, V. 46, 2019, p. 101-380.
298. Noël, J. A., Kreplak, L., Getangama, N. N., et al. "Supercooling and Nucleation of Fatty Acids: Influence of Thermal History on the Behavior of the Liquid Phase," *The Journal of Physical Chemistry B*, V. 122, No. 51, 2018, pp. 12386–95.
299. Rathod, M. K. "Thermal Stability of Phase Change Material," *Phase Change Materials and Their Applications*, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.75923. consulté: 28/08/2018
300. McLeod, R. S., Hopfe, C. J., and Kwan, A. "An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings," *Building and Environment*, V. 70, 2013, pp. 189–209.
301. Faye, M. "Structure interne et propriétés thermiques macroscopiques, application aux matériaux de construction," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Français, 2016, pp.187.
302. Mounir, S., abdelhamid, K., and Maaloufa, Y. "Thermal Inertia for Composite Materials White Cement-cork, Cement Mortar-cork, and Plaster-cork," *Energy Procedia*, V. 74, 2015, pp. 991–9.
303. Castell, A., Martorell, I., Medrano, M., et al. "Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling," *Energy and Buildings*, V. 42, No. 4, 2010, pp. 534–40.
304. Zhang, C., Chen, Y., Wu, L., et al. "Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures," *Energy and Buildings*, V. 43, No. 12, 2011, pp. 3514–20.
305. Silva, T., Vicente, R., Soares, N., et al. "Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution," *Energy and Buildings*, V. 49, 2012, pp. 235–45.
306. Principi, P., and Fioretti, R. "Thermal analysis of the application of pcm and low emissivity coating in hollow bricks," *Energy and Buildings*, V. 51, 2012, pp. 131–42.
307. Soares, N., Gaspar, A. R., Santos, P., et al. "Experimental evaluation of the heat transfer through small PCM-based thermal energy storage units for building applications," *Energy and Buildings*, V. 116, 2016, pp. 18–34.
308. Fgaier, F. E. "Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue," Thèse de doctorat en génie civil, école centrale de Lille, 2013, pp.122.
309. Athienitis, A. K., Liu, C., Hawes, D., et al. "Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage," *Building and Environment*, V. 32, No. 5, 1997, pp. 405–10.
310. Evola, G., Marletta, L., and Sicurella, F. "Simulation of a ventilated cavity to enhance the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings," *Energy and Buildings*, V. 70, 2014, pp. 480–9.
311. Jin, X., Medina, M. A., and Zhang, X. "On the placement of a phase change material thermal shield within the cavity of buildings walls for heat transfer rate reduction," *Energy*, V. 73, 2014, pp. 780–6.

312. De Gracia, A., Navarro, L., Castell, A., et al. "Experimental study of a ventilated facade with PCM during winter period," *Energy and Buildings*, V. 58, 2013, pp. 324–32.
313. Gowreesunker, B. L., Stankovic, S. B., Tassou, S. A., et al. "Experimental and numerical investigations of the optical and thermal aspects of a PCM-glazed unit," *Energy and Buildings*, V. 61, 2013, pp. 239–49.
314. Guo, W., Qiao, X., Huang, Y., et al. "Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone," *Energy and Buildings*, V. 50, 2012, pp. 196–203.
315. Kuznik, F., and Virgone, J. "Experimental assessment of a phase change material for wall building use," *Applied Energy*, V. 86, No. 10, 2009, pp. 2038–46.
316. Bekkouche, S., Benouaz, T., Cherier, M., et al. "Influence of building orientation on internal temperature in saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria)," *Thermal Science*, V. 17, No. 2, 2013, pp. 349–64.
317. Imessad, K., Derradji, L., Messaoudene, N. A., et al. "Impact of passive cooling techniques on energy demand for residential buildings in a Mediterranean climate," *Renewable Energy*, V. 71, 2014, pp. 589–97.
318. Hamdani, M., Bekkouche, S. M. E. A., Benouaz, T., et al. "Minimization of indoor temperatures and total solar insolation by optimizing the building orientation in hot climate," *Engineering Structures and Technologies*, V. 6, No. 3, 2014, pp. 131–49.
319. Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Cherier, M. K., et al. "Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region," *Construction and Building Materials*, V. 52, 2014, pp. 59–70.
320. Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., et al. "Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material," *Energy and Buildings*, V. 38, No. 4, 2006, pp. 357–66.
321. Ahmed, M., Meade, O., and Medina, M. A. "Reducing heat transfer across the insulated walls of refrigerated truck trailers by the application of phase change materials," *Energy Conversion and Management*, V. 51, No. 3, 2010, pp. 383–92.
322. Baghban, M. H., Hovde, P. J., and Gustavsen, A. "Numerical Simulation of a Building Envelope with High Performance Materials," Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Paris., pp. 5.
323. Kousksou, T., Jamil, A., and Zeraouli, Y. "Nouvelle technique pour la détermination des capacités thermiques massiques par calorimétrie à balayage," pp.6. URL:http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user3775/documents/ctes/congres_2009/Communications/152.pdf. Re-consulté le : 26-02-2020
324. Dumas, J. P., Zeraouli, Y., and Strub, M. "Heat transfer inside emulsions. Determination of the DSC thermograms. Part 1. Crystallization of the undercooled droplets," *Thermochimica Acta*, V. 236, 1994, pp. 227–37.
325. Karim, L. "Optimisation des transferts d'énergie thermique par l'utilisation du matériaux à changement de phase (MCP): application aux bâtiments." these, Paris 7, 2014. pp.170.

326. Fioretti, R., and Principi, P. "Thermal Performance of Hollow Clay Brick with Low Emissivity Treatment in Surface Enclosures," *Coatings*, V. 4, No. 4, 2014, pp. 715–31.
327. www.comsol.com
328. Foong, C. W., Hustad, J. E., Løvseth, J., et al. "Numerical Study of a High Temperature Latent Heat Storage (200-300 0C) Using Eutectic Nitrate Salt of Sodium Nitrate and Potassium Nitrate," Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Paris, p. 8.
329. Groulx, D., and Ogoh, W. "Solid-Liquid Phase Change Simulation Applied to a Cylindrical Latent Heat Energy Storage System," Proceedings of the COMSOL Conference 2009 Boston., p. 7.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.476.3369&rep=rep1&type=pdf>. Consulté le 10/0/2019
330. Lacroix, M. "Contact melting of a phase change material inside a heated parallelepipedic capsule," *Energy Conversion and Management*, V. 42, No. 1, 2001, pp. 35–47.
331. Lamberg, P., Lehtiniemi, R., and Henell, A.-M. "Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage," *International Journal of Thermal Sciences*, V. 43, No. 3, 2004, pp. 277–87.
332. Zhang, D., Fung, A. S., and Siddiqui, O. "Numerical Studies of Integrated Concrete With a Solid-Solid Phase Change Material," 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, June 10 – 14, 2007 2007.
333. Belleudy, C., Woloszyn, M., Chhay, M., et al. "A 2D model for coupled heat, air, and moisture transfer through porous media in contact with air channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V. 95, 2016, pp. 453–65.
334. Chu, S.-S., Fang, T.-H., and Chang, W.-J. "Modelling of coupled heat and moisture transfer in porous construction materials," *Mathematical and Computer Modelling*, V. 50, No. 7, 2009, pp. 1195–204.
335. Liu, F., Jia, B., Chen, B., et al. "Moisture transfer in building envelope and influence on heat transfer," *Procedia Engineering*, V. 205, 2017, pp. 3654–61.
336. Salat, J., Xin, S., Joubert, P., et al. "Experimental and numerical investigation of turbulent natural convection in a large air-filled cavity," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, V. 25, No. 5, 2004, pp. 824–32.
337. Royon, L., Karim, L., and Bontemps, A. "Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings," *Energy and Buildings*, V. 63, 2013, pp. 29–35.
338. Malkawi, A. M. "Advanced Building Simulation," New York, Routledge, 2004, 272 pp.
339. Clarke, J. "Energy Simulation in Building Design," Routledge, 2007.
340. Owen, S.M., et al "ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2017", I-P Edition, Ashrae research, pp.1014.
341. Landau, L., and Lifchitz, E. "Physique Théorique: Mécanique des Fluides," Moscou; Paris, Ellipses Marketing, 1994, pp.752.
342. Gagliano, A., Nocera, F., and Aneli, S. "Thermodynamic analysis of ventilated façades under different wind conditions in summer period," *Energy and Buildings*, V. 122, 2016, pp. 131–9.

343. Vicente, R., and Silva, T. "Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach," *Applied Thermal Engineering*, V. 67, No. 1, 2014, pp. 24–34.
344. Arnault, A. "Simulation et optimisation de l'intégration de matériaux à changement de phase dans une zone thermique," Thèse université de LAVAL, Quebec, 2012, pp.80.
345. Bianchi, A.-M., Fautrelle, Y., and Etay, J. "Transferts thermiques," PPUR presses polytechniques, 2004, pp. 575.
346. Alam, M., Sanjayan, J., Zou, P. X. W., et al. "Evaluating the passive and free cooling application methods of phase change materials in residential buildings: A comparative study," *Energy and Buildings*, V. 148, 2017, pp. 238–56.
347. Osterman, E., Tyagi, V. V., Butala, V., et al. "Review of PCM based cooling technologies for buildings," *Energy and Buildings*, V. 49, 2012, pp. 37–49.
348. Marin, P., Saffari, M., de Gracia, A., et al. "Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions," *Energy and Buildings*, V. 129, 2016, pp. 274–83.
349. Lei, J., Yang, J., and Yang, E.-H. "Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore," *Applied Energy*, V. 162, 2016, pp. 207–17.
350. Baniassadi, A., Sailor, D. J., and Bryan, H. J. "Effectiveness of phase change materials for improving the resiliency of residential buildings to extreme thermal conditions," *Solar Energy*, V. 188, 2019, pp. 190–9.
351. Zhou, D., and Eames, P. "Phase Change Material Wallboard (PCMW) melting temperature optimisation for passive indoor temperature control," *Renewable Energy*, V. 139, 2019, pp. 507–14.
352. Izquierdo-Barrientos, M. A., Belmonte, J. F., Rodríguez-Sánchez, D., et al. "A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM)," *Applied Thermal Engineering*, V. 47, 2012, pp. 73–85.
353. Sun, X., Jovanovic, J., Zhang, Y., et al. "Use of encapsulated phase change materials in lightweight building walls for annual thermal regulation," *Energy*, V. 180, 2019, pp. 858–72.
354. Wang, A.-H., Liang, X.-G., and Ren, J.-X. "Constructal Enhancement of Heat Conduction with Phase Change," *International Journal of Thermophysics*, V. 27, No. 1, 2006, pp. 126–38.
355. <https://energyplus.net/weather>. consulté : 03-01-2018
356. Goffart, J., Rabouille, M., and Mendes, N. "Uncertainty and sensitivity analysis applied to hygrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate," *Journal of Building Performance Simulation*, V. 10, No. 1, 2017, pp. 37–57.
357. C. O. Pedersen, "Advanced Zone Simulation in EnergyPlus: Incorporation of Variable Properties and Phase Change Material (PCM) Capability", *Proceedings: Building Simulation*, 2007, pp5. URL : http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p506_final.pdf. Consulté le: 14/02/2019
358. Tabares-Velasco, P. C., and Griffith, B. "Diagnostic test cases for verifying surface heat transfer algorithms and boundary conditions in building energy

- simulation programs,” *Journal of Building Performance Simulation*, V. 5, No. 5, 2012, pp. 329–46.
359. Mateus, N. M., Pinto, A., and Graça, G. C. da. “Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell,” *Energy and Buildings*, V. 75, 2014, pp. 511–22.
360. Kim, D.-W., and Park, C.-S. “Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus,” *Energy and Buildings*, V. 43, No. 12, 2011, pp. 3635–45.
361. Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., et al. “EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program,” *Energy and Buildings*, V. 33, No. 4, 2001, pp. 319–3.
362. Ng, L. C., Persily, A. K., and Emmerich, S. J. “Improving infiltration modeling in commercial building energy models,” *Energy and Buildings*, V. 88, 2015, pp. 316–23.
363. Ng, L. C., Musser, A., Persily, A. K., et al. “Multizone airflow models for calculating infiltration rates in commercial reference buildings,” *Energy and Buildings*, V. 58, 2013, pp. 11–8.
364. Sherman, M. H., and Grimsrud, D. T. “Measurement of infiltration using fan pressurization and weather data,” *NASA STI/Recon Technical Report N*, V. 81, 1980.
365. “EnergyPlus Web-Based Documentation | Big Ladder Software.” Available at: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/>. Accessed August 18, 2019.
366. Alawadhi, E. M. “Thermal analysis of a building brick containing phase change material,” *Energy and Buildings*, V. 40, No. 3, 2008, pp. 351–7.
367. Eskin, N., and Türkmen, H. “Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey,” *Energy and Buildings*, V. 40, No. 5, 2008, pp. 763–73.
368. US Doe, 2005. ENERGYPLUS™, Input–Output Reference.
369. Strand, R., Buhl, F. W. F., Huang, J., et al. “Enhancing and Extending the Capabilities of the Building Heat Balance Simulation Technique for use in EnergyPlus.” in *Proceedings of Building Simulation '99, Volume II*. 1999. pp. 653–660.
370. Zhao, H., and Magoulès, F. “A review on the prediction of building energy consumption,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 16, No. 6, 2012, pp. 3586–92.
371. Salmi, M. “Contribution à la quantification de l’irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques.” *These de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif*, 2014, pp 97.
372. <https://www.sonelgaz.dz/>. consulté le 04/04/2019
373. Garg, H., Pandey, B., Saha, S. K., et al. “Design and analysis of PCM based radiant heat exchanger for thermal management of buildings,” *Energy and Buildings*, V. 169, 2018, pp. 84–96.
374. Saxena, R., Rakshit, D., and Kaushik, S. C. “Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution,” *Solar Energy*, V. 183, 2019, pp. 276–84.

375. Oliver, A. "Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat," *Energy and Buildings*, V. 48, 2012, pp. 1–7.
376. Panayiotou, G. P., Kalogirou, S. A., and Tassou, S. A. "Evaluation of the application of Phase Change Materials (PCM) on the envelope of a typical dwelling in the Mediterranean region," *Renewable Energy*, V. 97, 2016, pp. 24–32.
377. Mehdaoui, F., Hazami, M., Messaouda, A., et al. "Thermal testing and numerical simulation of PCM wall integrated inside a test cell on a small scale and subjected to the thermal stresses," *Renewable Energy*, V. 135, 2019, pp. 597–607.
378. Plytaria, M. T., Tzivanidis, C., Bellos, E., et al. "Thermal Behavior of a Building with Incorporated Phase Change Materials in the South and the North Wall," *Computation*, V. 7, No. 1, 2019, p. 2.
379. Derradji Lotfi, Hamid Abdelkader, Zeghmati Belkacem, et al. "Experimental Study on the Use of Microencapsulated Phase Change Material in Walls and Roofs for Energy Savings," *Journal of Energy Engineering*, V. 141, No. 4, 2015, p. 04014046.
380. Van Schijndel, A. W. M. "Integrated modeling of dynamic heat, air and moisture processes in buildings and systems using SimuLink and COMSOL," *Building Simulation*, V. 2, No. 2, 2009, pp. 143–55.
381. Biswas, K., Lu, J., Soroushian, P., et al. "Combined experimental and numerical evaluation of a prototype nano-PCM enhanced wallboard," *Applied Energy*, V. 131, 2014, pp. 517–29.
382. Fraine, Y., Seladji, C., and Aït-Mokhtar, A. "Effect of microencapsulation phase change material and diatomite composite filling on hygrothermal performance of sintered hollow bricks," *Building and Environment*, V. 154, 2019, pp. 145–54.
383. Kebir, B., and Zeghiche, A. "Le renouvellement de la ville algérienne par la démolition-reconstruction du vieux bâti. De la sanction à la recherche de légitimité, Cas de la ville d'Annaba," *Cybergeog: European Journal of Geography*, 2014.
384. Arehart, J. "Energy Performance Analysis of Transparent Wood Composite-Based Glazing Systems in Commercial Buildings," *Civil Engineering Graduate Theses & Dissertations*, 2017.
385. Saffari, M., Piselli, C., de Gracia, A., et al. "Thermal stress reduction in cool roof membranes using phase change materials (PCM)," *Energy and Buildings*, V. 158, 2018, pp. 1097–105.
386. Baek, S., and Kim, S. "Analysis of Thermal Performance and Energy Saving Potential by PCM Radiant Floor Heating System based on Wet Construction Method and Hot Water," *Energies*, V. 12, No. 5, 2019, p. 828.
387. Baek, S., and Kim, S. "Determination of Optimum Hot-Water Temperatures for PCM Radiant Floor-Heating Systems Based on the Wet Construction Method," *Sustainability*, V. 10, No. 11, 2018, p. 4004.
388. Jaffrin, A., and Cadier, P. "Latent heat storage applied to horticulture," *Solar Energy*, V. 28, No. 4, 1982, pp. 313–21.

389. Berthou, Y., Biwole, P. H., Achard, P., et al. "Full scale experimentation on a new translucent passive solar wall combining silica aerogels and phase change materials," *Solar Energy*, V. 115, 2015, pp. 733–42.
390. Souayfane, F., Biwole, P. H., Fardoun, F., et al. "Energy performance and economic analysis of a TIM-PCM wall under different climates," *Energy*, V. 169, 2019, pp. 1274–91.

