



République algérienne démocratique et populaire
UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



N°D'ORDRE : D..... /2019

Thèse

Présentée pour l'obtention du

DIPLOME DE DOCTORAT 3^{ème} CYCLE

SPECIALITÉ : GENIE MECANIQUE

OPTION : Modélisation, simulation et calculs scientifiques appliqués.

Par

Mr. SOUCI Youcef Oussama

Étude de la convection naturelle dans une enceinte avec des parois contenant des matériaux à changement de phase

Soutenue le : 02/05/2019

Devant le Jury composé de :

| | | |
|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Président | Mr RETIEL Nouredine | Professeur Université de Mostaganem |
| Directeur de thèse | Mr HOUAT Samir | Professeur Université de Mostaganem |
| Examineur | Mr AZZI Abbès | Professeur USTO |
| Examineur | Mr DELLIL Ahmed Zineddine | Professeur Université d'Oran 2 |
| Examineur | Mr KHIAT M ^{ed} Amine | MCA Université de Mostaganem |

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2018 /2019

Remerciements

Louange à Dieu pour m'avoir donné la volonté et le courage pour la réalisation de cette thèse.

Toute ma gratitude et ma reconnaissance au Professeur Houat Samir pour m'avoir octroyé le savoir nécessaire pour l'accomplissement de ce travail et aussi pour son précieux encadrement.

Mes sincères remerciements à mes parents, à tous les enseignants qui m'ont accompagné durant mon cursus scolaire.

Je remercie chaleureusement ma famille pour son aide et son soutien moral et économique, qu'elle m'a apporté tout au long de mes études.

J'espère être à la hauteur de son espérance et me montrer digne de sa confiance et de son encouragement.

Mes remerciements s'adressent également à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse, en particulier, tout le personnel de l'université de Mostaganem sans oublier les doctorants avec lesquels j'ai fait ce parcours.

Une pensée à tous mes amis dont le souvenir des moments agréables, restera gravé à jamais.

Résumé

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) dans le domaine du bâtiment a connu un intérêt croissant au cours des dernières années. Cette solution est considérée comme une alternative afin d'améliorer le confort thermique des occupants. Ceci permettra de fournir à la fois une régulation des fluctuations de température intérieure des locaux et d'assurer une utilisation énergétique optimale.

Dans ce travail, une étude numérique des effets de l'intégration des MCP dans les matériaux de construction conventionnels a été présentée. Une proposition d'une paroi de brique creuse, souvent privilégiée en construction du bâtiment en Algérie, est chargée avec MCP et analysée numériquement du point de vue des propriétés thermo-physiques et énergétiques. Cette étude est présentée sous quatre étapes : La première est consacrée au calcul des propriétés thermo-physiques et l'estimation de la quantité d'énergie stockée par une brique creuse remplie avec un MCP. Les résultats ont montré clairement l'amélioration de l'inertie de la brique proposée, à savoir une diminution de la température de la surface intérieure et une augmentation de l'énergie thermique stockée par rapport au cas de référence (sans MCP).

La deuxième étape, est focalisée sur l'énergie stockée sous forme de chaleur latente par la brique et en la comparant à celle stockée par un bloc de parpaing. Les résultats révèlent que le MCP améliore l'inertie thermique en réduisant les fluctuations de la température au niveau de la surface intérieure. De plus, avec l'augmentation de la quantité du MCP, l'efficacité de l'isolation thermique du matériau devient plus efficace en stockant plus d'énergie sous forme de chaleur latente.

La troisième consiste à étudier l'influence des différents facteurs de conception. En l'occurrence, la quantité optimale, l'emplacement optimal et le type du MCP sur la performance thermique de cette paroi, sous contrainte des conditions extérieures réelles. Les résultats ont révélé que la performance thermique optimale de la paroi est obtenue lorsque le MCP est installé juste dans la rangée vide de la brique et non loin de l'espace intérieur. D'autre part, le choix approprié du type de MCP exige que sa température de changement de phase soit proche de celle de l'air ambiant.

La quatrième partie consiste à étudier numériquement l'influence de la paroi proposée dans les échanges thermiques au sein d'une enceinte fermée, simulant une habitation. Les conditions extérieures proposées durant cette simulation ont été sélectionnées en adéquation avec la nature du climat chaud en période d'été. Les résultats ont montré que la présence du MCP représente une solution efficace pour la rénovation énergétique des bâtiments. Sa fonction principale réside dans le maintien d'une température intérieure adaptée aux conditions d'un confort thermique. Cette situation se manifeste par une régression des gains thermiques vers l'intérieur, ce qui engendre la réduction de l'évolution de la température au niveau de la surface intérieure. Par conséquent, l'incorporation du MCP dans l'une des parois de l'habitat réduit les fluctuations de températures intérieures. Son efficacité est également dans sa capacité de conservation d'énergie dans le bâtiment, réduisant ainsi les échelles d'équipement de conditionnement d'air et les coûts d'investissement.

Mots clés : matériaux de construction, MCP, méthodes des éléments finis, convection naturelle.

Abstract

The application of phase change materials (PCMs) in the building sector has experienced a growing interest in recent years. This solution is considered as an alternative to improve the thermal comfort of the inhabitants. This will provide both regulation of interior temperature space fluctuations and ensure optimum use of energy.

In this work, a numerical study on the effects of the integration of PCM in conventional building materials is presented. A proposal for a hollow brick wall, often favored in building construction in Algeria, is loaded with PCM and analyzed numerically from the standpoint of thermos physical and energy properties. The study is presented in four stages: The first was devoted to the calculation of the thermos physical properties of the hollow brick incorporated with PCM and the estimate of the quantity of energy stored. The results clearly showed the improvement in the inertia of the proposed brick, namely a decrease in the temperature of the inner surface and an increase in the stored thermal energy compared to the reference case (without PCM).

The second part, focus on the energy storage by latent heat in two different building materials that has been selected according to their usual applying as construction materials for residential buildings. The numerical results have been checked and validated with an experimental model and the error is estimated. The results reveal the potential of PCM in the enhancement on the thermal inertia of the wall and effectively reduced the fluctuation of the interior surface temperature. In addition, with the increasing filling amount of PCM, the thermal response of the building material will be more effective through improving its thermal insulation and stored more of energy as a latent heat.

The third is to study the influence of different design factors such as, the optimal quantity, the optimal location and the type of the MCP on the thermal performance of this wall, under constraint of the real external conditions. The results revealed that the optimal thermal performance of the hollow brick wall is obtained when the PCM is installed just in the empty row of the brick and not far from the interior space. On the other hand, the proper choice of the type of MCP requires that its phase change temperature be close to that of the ambient.

The fourth part consists of studying numerically the influence of the proposed wall in thermal exchanges within a closed enclosure, simulating a dwelling. The external conditions proposed during this simulation have been selected in line with the nature of the hot climate during the summer period. The results showed that the addition of PCM represents an effective solution for the energy renovation of buildings. Its main function is to maintain an indoor temperature adapted to the conditions of thermal comfort. This situation is manifested by a regression of the thermal gains inward, which causes the reduction of the evolution of the inner surface temperature. Therefore, incorporation of PCM into one of the walls of building reduces indoor temperature fluctuations. Its efficiency is also in its ability to conserve energy, thus reducing the scales of air conditioning equipment and investment costs.

Key words: building construction materials, PCM, finite element method, natural convection.

لقد تطبق مواد متغيرة الطور (PCM) في قطاع البناء اهتماما متزايدا في السنوات الأخيرة. ويعتبر هذا الحل كبديل من أجل تحسين الراحة الحرارية للسكان. وهذا سيوفر كلا من تنظيم تقلبات درجات الحرارة في الداخل مما يضمن الاستخدام الأمثل للطاقة في هذا المجال. خلال هذا العمل، يتم عرض دراسة عددية لآثار دمج PCM داخل مواد البناء التقليدية.

من أجل ذلك تم دمج PCM داخل جدار من الطوب الاحمر المجوف، والذي غالبا ما يستعمل في بناء المباني في الجزائر، هذا النموذج تم دراسته من وجهة نظر خصائص الحرارية و الطاقية. مرت الدراسة على اربع مراحل: الأولى خصصت لحساب الخصائص الفيزيائية الحرارية للطوب المجوف المتضمن PCM وتقدير كمية الطاقة المخزنة من قبل الأخير. وأظهرت النتائج بوضوح تحسن في القصور الذاتي للطوب المقترح، حيث لاحظنا انخفاض درجة حرارة السطح الداخلي وزيادة في الطاقة الحرارية المخزنة وهذا بالمقارنة مع الحالة المرجعية (بدون PCM).

الجزء الثاني يهتم بمقارنة أداء نوعين مختلفين من مواد بناء في تخزين طاقة حرارية على هيئة طاقة كامنة. النتائج اظهرت قدرة PCM على تحسين العزل الحراري وذلك بتخفيض التقلبات الحرارية على مستوى المساحة الداخلية لكلا المادتين. إضافة الى ذلك لاحظنا ان زيادة كمية PCM تؤدي الى تقوية السعة الحرارية للحائط.

الجزء الثالث هو دراسة تأثير العوامل المختلفة من التصميم، مثل كمية والموقع ونوع PCM المستعمل على الأداء الحراري للجدار، في ظل ظروف خارجية حقيقية.

أظهرت النتائج أن الأداء الحراري الأمثل للجدار الطوب المجوف يتم الحصول عليه عندما يتم تثبيت PCM فقط في صف فارغ من الطوب وليس بعيدا عن المساحة الداخلية. من ناحية أخرى، فإن الاختيار الصحيح لنوع PCM يتطلب أن تكون درجة حرارة تغير الطور قريبة من درجة حرارة المحيط.

ويتألف الجزء الرابع من دراسة عددية لتأثير الجدار المقترح على التبادلات الحرارية داخل غرفة مغلقة وذلك من أجل محاكاة مبنى سكني. وقد تم اختيار الظروف الخارجية المقترحة خلال هذه المحاكاة تمشيا مع طبيعة المناخ الحار لمدينة تيميمون خلال فترة الصيف. وأظهرت النتائج أن وجود PCM يمثل حلا فعالا لتجديد الطاقة للمباني. وتتمثل وظيفتها الرئيسية في الحفاظ على درجة حرارة داخلية مع ظروف الراحة الحرارية. ويتضح هذا الوضع من خلال انخفاض التسربات الحرارية باتجاه الداخل، مما يؤدي إلى الحد من تطور درجة الحرارة على مستوى السطح الداخلي. ولذلك، فإن دمج PCM في واحد جدران المبنى يقلل من تقلبات درجات الحرارة في المساحة الداخلية حيث تنعكس كفاءته أيضا في قدرته على الحفاظ على الطاقة في المبنى، مما يقلل من استخدام معدات تكييف الهواء وايضا ينقص من تكاليف الاستثمار

الكلمات المفتاحية : مواد البناء، مواد تغيير الطور، الخواص الفيزيائية الحرارية، الحمل الحراري الطبيعي

Sommaire
Nomenclature
Liste des Figures
Liste des tableaux

| | |
|------------------------------------|----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| 1- L'objectif du Travail..... | 3 |
| 2- Présentation du Travail | 4 |

Chapitre I : Etat D'Art

| | |
|---|-----------|
| 1 ETAT DE L'ART | 6 |
| 1.1 Introduction | 6 |
| 1.2 Généralités sur les MCP : | 7 |
| 1.2.1 Propriétés des MCP | 8 |
| 1.2.2 Classifications des MCP | 9 |
| 1.2.2.1 Les MCP organiques | 10 |
| 1.2.2.2 MCP inorganiques | 14 |
| 1.2.2.3 Les MCP eutectiques | 14 |
| 1.3 Propriétés thermo physiques des MCP | 16 |
| 1.4 Le stockage d'énergie par chaleur latente dans les MCP : | 17 |
| 1.5 Incorporation des MCP dans le bâtiment : | 19 |
| 1.5.1 Les différentes techniques d'incorporation des MCP : | 20 |
| 1.5.1.1 Encapsulation | 20 |
| 1.5.2 Incorporation des MCP dans les matériaux de construction : | 23 |
| 1.5.2.1 L'intégration du MCP dans le plâtre : | 23 |
| 1.5.2.2 L'intégration du MCP dans le béton : | 25 |
| 1.5.2.3 L'intégration du MCP dans la brique : | 28 |
| 1.5.2.4 L'intégration du MCP avec d'autres matériaux : | 32 |
| 1.5.2.5 MCP à forme stabilisée | 35 |
| 1.5.3 L'emplacement du MCP intégré dans l'enveloppe du bâtiment | 36 |
| 1.5.3.1 Murs avec MCP : | 37 |
| 1.5.3.2 Les plafonds et les planchers de sol avec MCP : | 40 |
| 1.5.3.3 Les Fenêtres avec MCP : | 45 |
| 2 Méthodes de modélisation et de simulation | 53 |
| 2.1 Introduction | 53 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2 Formulation de base | 53 |
| 2.3 La modélisation des problèmes de changement de phase | 55 |
| 2.3.1 Méthodes d'enthalpies | 56 |
| 2.3.2 Méthode de la capacité thermique équivalent | 58 |
| 2.3.3 La méthode de source de chaleur | 59 |
| 2.4 Méthode numérique de solution : Méthode des éléments finis..... | 59 |
| 2.4.1 Eléments et fonctions de forme | 63 |
| 2.4.2 Solution Numérique..... | 67 |
| 2.4.3 La méthode de Galerkin | 69 |
| 2.4.4 Discrétisation temporelle..... | 70 |
| 2.4.4.1 Stabilité..... | 71 |
| 2.4.5 Assemblage des éléments | 71 |
| 2.4.6 Problème non linéaire..... | 72 |
| | |
| 3 Analyse numérique des propriétés et des performances thermiques des matériaux de construction avec MCP | 76 |
| 3.1 Hypothèses de travail | 76 |
| 3.2 Les équations de base utilisées..... | 76 |
| 3.3 Validation du modèle numérique | 77 |
| 3.4 Les propriétés thermos physiques d'une brique incorporée par un MCP..... | 79 |
| 3.4.1 Présentation du problème physique..... | 80 |
| 3.4.2 Méthode de solution | 81 |
| 3.4.3 Résultats et discussion..... | 81 |
| 3.4.3.1 Analyse préliminaire :..... | 82 |
| 3.4.3.2 Propriétés thermo physiques de la brique creuse avec MCP..... | 83 |
| 3.5 La capacité de stockage d'énergie par un MCP incorporé dans deux différents matériaux de construction..... | 85 |
| 3.5.1 Présentation du problème physique..... | 86 |
| 3.5.2 Méthode de solution | 86 |
| 3.5.3 Les conditions aux limites | 86 |
| 3.5.4 Résultats et discussion..... | 87 |
| 3.6 Performances thermiques d'un mur extérieur de briques creuses contenant du MCP | 90 |
| 3.6.1 Présentation du problème physique..... | 90 |
| 3.6.2 Les conditions aux limites | 92 |
| 3.6.3 Résultats et discussion..... | 92 |
| 3.6.3.1 L'effet de l'emplacement et de la quantité de MCP :..... | 92 |
| 3.6.3.2 L'effet de la quantité de MCP..... | 95 |

| | |
|--|----|
| 3.6.3.3 L'effet de type de MCP | 96 |
| 3.6.3.4 L'effet de l'épaisseur de la couche de lame d'air | 97 |
| 3.6.3.5 L'effet d'utilisation d'autres matériaux isolants au lieu de la couche de lame d'air : | 98 |

4 ETUDE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS UNE ENCEINTE AVEC DES PAROIS CONTENANT DES MCP 101

| | |
|--|------------|
| 4.1 Introduction sur la convection : | 101 |
| 4.1.1 Type de convection..... | 101 |
| 4.1.2 Convection naturelle..... | 101 |
| 4.1.3 Approximation de Boussinesq : | 102 |
| 4.1.4 Convection naturelle avec MCP : | 103 |
| 4.2 Présentation du problème physique..... | 103 |
| 4.3 Les Hypothèses..... | 105 |
| 4.4 Les équations gouvernantes | 106 |
| 4.5 Condition aux limites..... | 108 |
| 4.6 Etude des propriétés thermo physique | 108 |
| 4.7 L'élaboration de la simulation numérique..... | 112 |
| 4.8 Résultat et Discussion..... | 115 |
| 4.8.1 Validation du modèle numérique | 115 |
| 4.8.2 Etude de la variation de la température intérieure dans le temps en fonction du nombre de Rayleigh : | 118 |

5 Conclusion et Perspectives 137

| | |
|-------------------------------|------------|
| 5.1 Conclusion | 137 |
| 5.2 Perspectives | 139 |

Bibliographies

Nomenclature

Symboles latins :

C_p : Chaleur spécifique (kJ/kg.K)

e : Épaisseur (m)

f : Fraction liquide

h : Enthalpie (kJ/kg)

h_c : Coefficient du transfert de chaleur W/m².K

I : Rayonnement solaire (W)

L : Chaleur latente (kJ/kg)

R : Résistance thermique (m².K/W)

T : Température (°C)

t : Temps (h)

\vec{V} : Vitesse (m/s)

\vec{u} : Composantes de la vitesse dans le sens X (m/s)

\vec{v} : Composantes de la vitesse dans le sens Y (m/s)

x : Cordonnée cartésienne, ordonnée (m)

y : Cordonnée cartésienne, ordonnée (m)

Symboles grecs :

α : Coefficient d'absorption solaire

β : Coefficient de dilatabilité thermique (K⁻¹)

Δ : Variation

λ : Conductivité thermique (W/m. K)

μ : Viscosité dynamique (Pa.s)

ν : Viscosité cinématique (m²/s)

ρ : Densité (kg/m³)

δ : Range de changement de phase (K)

φ : Flux de chaleur (W/m²)

Nombres adimensionnels :

N_u : Nombre de Nusselt

P_r : Nombre de Prandtl

R_a : Nombre de Rayleigh

Indice :

b : Brique

cd : Chaud

cp : Changement de phase

eff : Effective

exp : Expérimental

f : Fusion

fd : Froid

fin : Final

i : Intérieur

int : Initial

liq : Liquide

num : Numérique

p : Paroi

Ref : Reference

s : Surface

sol : Solid

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure 1. Consommation d'énergie typique dans une maison..... | 1 |
| Figure 2. Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique..... | 2 |
| Figure 1.1. Distribution des publications par an..... | 7 |
| Figure 1.2. Répartition des pays dans la recherche du MCP dans le monde..... | 7 |
| Figure 1.3. Schéma comparatif des inerties thermiques..... | 8 |
| Figure 1.4. Changement de phase solide-liquide-gaz..... | 8 |
| Figure 1.5. Famille de matériaux des MCP..... | 10 |
| Figure 1.6. Enthalpie de fusion en fonction de la température de fusion pour divers MCP..... | 10 |
| Figure 1.7. Structure chimique des paraffines..... | 12 |
| Figure 1.8 Stockage de la chaleur comme chaleur latente..... | 18 |
| Figure 1.9 Stockage à une température constante..... | 18 |
| Figure 1.10 Stockage dans une plage de température..... | 19 |
| Figure 1.11 La macro-encapsulation du MCP..... | 21 |
| Figure 1.12. MCP micro encapsulé..... | 22 |
| Figure 1.13. Images MEB de la paraffine microencapsulée à différents cycles thermiques..... | 22 |
| Figure 1.14. Les plaques de plâtres avec et sans MCP..... | 23 |
| Figure 1.15. Chambre d'essai (plaque de plâtre avec MCP)..... | 24 |
| Figure 1.16. Les deux méthodes de distribution..... | 24 |
| Figure 1.17. Schéma des quatre Cavités de test..... | 25 |
| Figure 1.18. Schéma des cellules..... | 26 |
| Figure 1.19. Température de mur sud dans les deux cellules..... | 26 |
| Figure 1.20. Schéma des blocs de béton, avec des couches de construction et la chambre d'essai..... | 27 |
| Figure 1.21. Réduction moyenne de la charge de refroidissement..... | 27 |
| Figure 1.22. Détail de la température des murs orientés vers le sud avec des ouvertures..... | 27 |
| Figure 1.23. Courbes de température intérieure d'un mur en béton..... | 28 |
| Figure 1.24. Gauche : Brique creuse conventionnelle ; Droite : Brique alvéolaire..... | 28 |
| Figure 1.25. Quatre cellules testées dans PUGVERD LLEIDA en Espagne..... | 29 |
| Figure 1.26. Comparaison de la réduction d'énergie dans les quatre cellules..... | 30 |
| Figure 1.27. Effet du remplissage du MCP sur la réponse de la température du mur intérieur..... | 31 |
| Figure 1.28. Système de configuration..... | 32 |
| Figure 1.29. Domaines et les dimensions des modèles numériques..... | 32 |
| Figure 1.30. Section du prototype..... | 33 |
| Figure 1.31. Produit Energain® du Pont de Nemours..... | 33 |
| Figure 1.32. Schéma isométrique de la cellule de test avec 12 projecteurs..... | 34 |
| Figure 1.33. Plaque de MCP à forme stabilisé..... | 36 |
| Figure 1.34. L'intégration des MCP dans la structure du bâtiment..... | 36 |
| Figure 1.35. Intégration du panneau de MCP..... | 38 |
| Figure 1.36. Panneau de gypse amélioré avec MCP..... | 38 |
| Figure 1.37. (a) Panneau mural en gypse avec microcapsule du MCP et (b) plaques de plâtre avec MCP.... | 38 |
| Figure 1.38. Schéma du mur de Trombe conventionnel et du mur de Trombe amélioré par MCP..... | 40 |
| Figure 1.39. Coupe verticale du mur de Trombe avec MCP..... | 40 |
| Figure 1.40. Représentation schématique du toit avec des trous coniques remplis de MCP..... | 41 |
| Figure 1.41. Représentation schématique du toit avec des trous cylindriques remplis de MCP..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figure 1.42. Droite : le pourcentage de réduction du flux de chaleur pendant les heures de travail 12h-17h ; Gauche : la variation horaire du flux de chaleur sur la surface intérieure | 41 |
| Figure 1.43. Trois différentes toitures sélectionnées | 42 |
| Figure 1.44. Variation de l'interface et de la température de la surface du fond sur une journée le 15 juillet | 42 |
| Figure 1.45. Applications passives de systèmes de plafond amélioré par MCP | 43 |
| Figure 1.46. Applications actives de systèmes de plafond amélioré par MCP | 43 |
| Figure 1.47. Bâtiment avec panneau de plafond imprégné de paraffine | 44 |
| Figure 1.48. Test de cellules utilisées par l'Université de Twente, aux Pays-Bas | 45 |
| Figure 1.49. Echantillon avec MCP localisé | 47 |
| Figure 1.50. Mesure de la transmission spectrale directe de deux échantillons en MCP | 47 |
| Figure 1.51. Fenêtres en verre remplies de MCP | 47 |
| Figure 1.52. Energie transmise à travers un double | 48 |
| Figure 1.53. Schéma des systèmes de protection solaire avec et sans MCP | 50 |
| Figure 1.54. Représentation schématique du système de rideau en MCP et les conditions aux limites..... | 50 |
| Figure 1.55. Flux de chaleur à la surface intérieure de rideau pour différentes épaisseurs de MCP..... | 51 |
| Figure 2.1. La solidification d'un MCP..... | 54 |
| Figure 2.2. La fusion d'un MCP..... | 54 |
| Figure 2.3. Courbe de performance enthalpie-température (h-T) pour MCP idéaux et communs..... | 57 |
| Figure 2.4 Modèle numérique pour les calculs de transfert de chaleur | 61 |
| Figure 2.5 Maillage typique d'éléments finis : Éléments, nœuds et arêtes | 62 |
| Figure 2.6 Un élément triangulaire linéaire..... | 63 |
| Figure 2.7 Un élément quadrilatéral typique | 65 |
| Figure 2.8 Un simple élément rectangulaire..... | 65 |
| Figure 2.9 Un vecteur unitaire normal à une surface | 68 |
| Figure 2.10 Correspondance globale-locale des nœuds pour l'assemblage d'éléments..... | 72 |
| Figure 3.1. Comparaison entre le résultat numérique et expérimental | 78 |
| Figure 3.2. Température aux interfaces de la dalle..... | 79 |
| Figure 3.3. L'erreur maximale en fonction de la température | 79 |
| Figure 3.4. Deux types de brique creuse, gauche : type 1 ; droite : type 2..... | 80 |
| Figure 3.5. La variation des surfaces de température au cours du temps ; Gauche : type 1; Droite: type 2..... | 82 |
| Figure 3.6. La différence entre le flux de chaleur extérieur et interne; Gauche: type 1; Droite: type 2..... | 83 |
| Figure 3.7. La capacité thermique équivalente ; Gauche : type 1 ; Droite : type 2 | 84 |
| Figure 3.8. (a) Brique creuse; (b) Parpaing | 86 |
| Figure 3.9. Flux de chaleur à la surface intérieure pour les deux matériaux avec MCP | 88 |
| Figure 3.10. Énergie stockée par unité de surface en fonction du temps | 89 |
| Figure 3.11. Fraction liquide pour les deux matériaux avec MCP | 89 |
| Figure 3.12. Double couche d'une brique creuse séparée par un espace d'air | 90 |
| Figure 3.13. La température de l'air ambiant dans le sud de l'Algérie | 91 |
| Figure 3.14 L'effet de la quantité et de l'emplacement du MCP à l'intérieur du mur de brique creuse | 93 |
| Figure 3.15 Température moyenne de la surface interne dans les cinq cas étudiés | 94 |
| Figure 3.16. La température de surface interne de la configuration optimale dans chaque cas | 95 |
| Figure 3.17. La température à la surface intérieure pour différents types de MCP..... | 97 |
| Figure 3.18. La température moyenne de la surface interne pour différentes épaisseurs de lame d'air..... | 98 |
| Figure 3.19. La fraction liquide du MCP pour différentes épaisseurs de lame d'air..... | 98 |
| Figure 3.20. La température à la surface intérieure pour différents matériaux | 99 |

| | |
|---|-----|
| Figure 3.21. La fraction liquide à la surface intérieure pour différents matériaux | 99 |
| Figure 4.1. Schéma d'écoulement dans une cavité Verticale..... | 102 |
| Figure 4.2 Modèle physique | 105 |
| Figure 4.3. La capacité thermique spécifique du MCP utilisée dans la simulation..... | 112 |
| Figure 4.4. La capacité thermique équivalente de la paroi de brique avec MCP | 113 |
| Figure 4.5. Variation de Température en fonction du maillage..... | 114 |
| Figure 4.6. Exemple de maillage du modèle | 114 |
| Figure 4.7. Résultats DSC de la capacité thermique spécifique | 116 |
| Figure 4.8. Représentation schématique et positionnement | 116 |
| Figure 4.9. Comparaison entre le résultat expérimental et numérique | 118 |
| Figure 4.10. Les isothermes pour différents nombres de Rayleigh | 122 |
| Figure 4.11. La distribution de la température suivant l'axe « x » au milieu de la cavité..... | 125 |
| Figure 4.12. La distribution de la température suivant l'axe « Y » au milieu de la cavité..... | 126 |
| Figure 4.13. La distribution de la température le long de l'interface intérieure de la paroi | 127 |
| Figure 4.14. Les lignes de courants pour différents nombres de Rayleigh..... | 130 |
| Figure 4.15. Vitesses U_x suivant l'axe « y » en fonction du temps pour différentes Rayleigh..... | 131 |
| Figure 4.16. Vitesses U_y suivant l'axe « x » en fonction du temps pour différentes Rayleigh..... | 132 |
| Figure 4.17. La variation du Nusselt Local au cours du temps pour différents nombres de Rayleigh..... | 134 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 1.1. Caractéristiques générales des MCP..... | 9 |
| Tableau 1.2. propriétés thermo physiques des Paraffines | 13 |
| Tableau 1.3. Certaines propriétés thermiques de certains MCP..... | 15 |
| Tableau 1.4. Propriétés thermiques de MCP à base de paraffine et hydrates de sel [70]..... | 15 |
| Tableau 1.5. MCP disponibles dans le commerce pour la gamme de températures (10°C à 118°C)..... | 16 |
| Tableau 1.6. Les systèmes passifs de stockage de chaleur latente | 37 |
| Tableau 3.1. propriétés thermo physique du MCP et de la brique creuse | 80 |
| Tableau 3.2. Chaleur stockée durant 24 h | 84 |
| Tableau 3.3. La conductivité thermique effective des deux types de briques creuses | 85 |
| Tableau 3.4. Caractéristiques thermos physiques du MCP | 91 |
| Tableau 3.5. Caractéristiques des matériaux utilisés comme couche de séparation entre les deux parois de briques. | 98 |
| Tableau 4.1. Les paramètres utilisés lors de la simulation | 112 |
| Tableau 4.2. Optimisation du maillage..... | 113 |
| Tableau 4.3. Propriétés thermodynamiques des matériaux utilisés..... | 116 |

Introduction générale

Introduction générale

Dans de nombreux pays, les bâtiments consomment plus d'énergie que les transports et l'industrie. Dans l'Union européenne (UE), le secteur du bâtiment, est le principal consommateur d'énergie et constitue approximativement 40% des dépenses de l'énergie totale [1]. D'après une étude statistique [2], le système CVC (Chauffage, Ventilation, Climatisation) représente 60% de la consommation de l'énergie totale dans le bâtiment (figure 1). En Algérie et Selon une étude réalisée par l'Aprue, en 2012, la consommation d'énergie du secteur du bâtiment représente plus de 34% de la consommation globale nationale dont le chiffre a été évalué à l'équivalent de 30 millions tonnes d'équivalent de pétroles (TEP).

Cette demande croissante du confort thermique dans l'habitat exige un grand potentiel pour améliorer l'efficacité énergétique dans le bâtiment. Les principes de conception passive, y compris la masse thermique, l'ombrage externe, l'orientation du bâtiment, la ventilation et une meilleure isolation de l'enveloppe, conduisent à moins de recours aux systèmes mécaniques qui consomment plus d'énergie pour maintenir la température interne confortable.

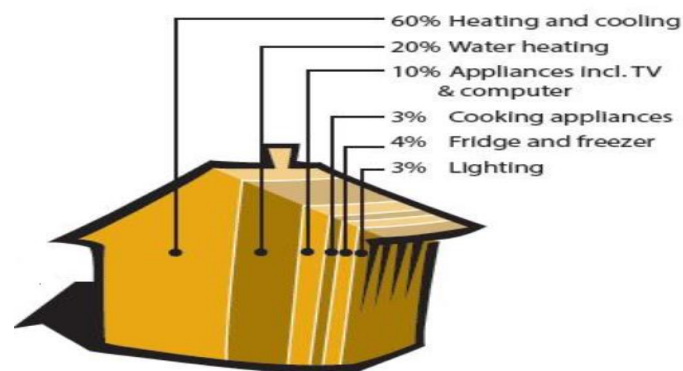


Figure 1. Consommation d'énergie typique dans une maison

La masse thermique en tant que forme de stockage d'énergie peut être utilisée pour réduire les fluctuations de température à l'intérieur des bâtiments [3]. Une grande variété d'études a prouvé que l'application de la masse thermique dans les structures bien isolées des bâtiments, fournit des économies d'énergie de chauffage et de refroidissement entre 5 à 30% [4].

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées sous différentes catégories et selon trois critères principaux (figure 2) à savoir la plage de température, la durée de stockage et l'état du matériau de stockage [5-7].

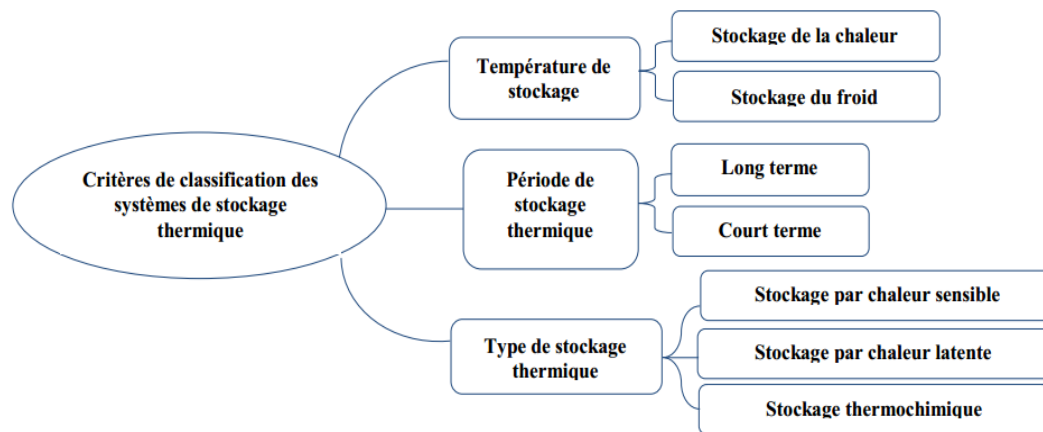


Figure 2. Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique

Concernant le stockage par chaleur sensible, la température des matériaux de stockage varie en fonction de la quantité d'énergie stockée. Par contre, le stockage par chaleur latente consiste à utiliser l'énergie emmagasinée ou restituée lors du changement d'état (solide, liquide, gaz), quant à la troisième technologie « stockage par chaleur thermochimique », elle vise à stocker la chaleur des réactions endothermiques réversibles. Ce dernier type, reste toujours à l'état de recherche dont le niveau de maturité est encore estimé faible.

Dans les bâtiments actuels, on s'efforce de diminuer l'épaisseur des parois pour diminuer les coûts tout en respectant les normes pour limiter les pertes thermiques. Cependant, de telles structures ne permettent pas d'avoir une inertie thermique suffisante capable d'amortir les fluctuations de la température extérieure. C'est pourquoi, il est plus favorable de renforcer l'inertie thermique du bâtiment en s'intéressant à des matériaux de stockage qui possèdent des petites dimensions par rapport aux matériaux traditionnels. Ce dans le but d'assurer un stockage d'énergie thermique plus grand que celui stocké par la chaleur sensible.

Dans ce contexte, le stockage par chaleur latente offre un regain d'intérêt dans le domaine du bâtiment en raison de sa capacité à fournir une densité de stockage élevée. Ceci peut être réalisé en y incorporant des Matériaux à

Changement de Phase (MCP) en profitant de leur chaleur latente qui permet de stocker/déstocker une grande quantité d'énergie. Les MCP ont trouvé des applications dans de nombreux domaines, y compris le stockage d'énergie solaire, l'efficacité énergétique du bâtiment, le refroidissement des produits alimentaires, l'emballage, le transport, les systèmes thermiques à vaisseaux spatiaux, les centrales solaires et les équipements électroniques [8-10].

L'objectif du Travail

L'objectif de ce présent travail, est d'étudier numériquement l'influence d'un système de stockage thermique passif sur l'évolution des échanges thermiques au sein d'une enceinte fermée, simulant une habitation. Cette solution est basée sur l'incorporation des MCP dans les matériaux de construction constituant les parois. Ces derniers permettront de renforcer l'inertie thermique avec une augmentation de leur capacité de stockage d'énergie et une minimisation des fluctuations de la température dans l'espace intérieur. De ce fait, le travail pourra être résumé comme suit :

- Une analyse des propriétés thermo physiques de la brique creuse avec MCP et la quantité de chaleur stockée lors de la fusion.
- Une application d'une paroi de brique avec MCP ainsi qu'une étude paramétrique qui va permettre par la suite de formuler différentes recommandations pour la mise en œuvre de cette paroi dans le bâtiment sous des conditions climatiques réelles.
- La construction d'un modèle numérique pour évaluer l'influence du phénomène de changement de phase sur le transfert de chaleur par convection naturelle à l'intérieur d'une cavité fermée (simulant une habitation), dont l'une de ses parois est incorporée d'un MCP. Cette dernière étape, va permettre d'estimer la réduction des fluctuations thermiques à l'intérieur et ce par rapport au cas de référence (Le même mur sans MCP).

Présentation du Travail

Le premier chapitre se consacre à une étude bibliographique sur les matériaux à changement de phase et leurs applications dans le domaine du bâtiment. Sa structure a été effectuée en deux parties dont la première s'intéresse à l'incorporation des MCP à l'intérieur des matériaux de constructions et la deuxième à leurs emplacements dans les éléments structuraux du bâtiment.

Le deuxième chapitre est réservé à une partie théorique qui cible le phénomène du changement de phase et les méthodes numériques appliquées pour résoudre les problèmes physiques.

Le troisième chapitre porte sur une modélisation numérique de paroi en brique creuse contenant un MCP. Ce chapitre a été divisé en trois sous chapitres. La première partie présente une analyse numérique des propriétés thermo physiques de deux types de briques creuses incorporées par MCP et la quantité d'énergie stockée par chaleur latente. Quant au deuxième sous chapitre, deux différents matériaux de construction souvent utilisés comme composantes dans les parois extérieures de bâtiment résidentiels ont été incorporés par MCP pour améliorer l'inertie thermique. D'autre part, le troisième sous chapitre se base sur une application passive d'une paroi extérieure de briques avec MCP sous des conditions climatiques réelles et sous différents facteurs qui peuvent influencer la performance thermique de cette paroi.

Le quatrième chapitre se consacre à l'évaluation du transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité fermée simulant une habitation, dont l'une de ses parois est incorporée par le MCP. Dans ce chapitre on ne s'intéresse qu'au processus de fusion du MCP. La première partie est une introduction générale sur la théorie de la convection naturelle et quelques études bibliographiques sur son déroulement en présence du MCP. Quant à la deuxième, elle expose la méthodologie de travail et l'analyse des résultats obtenus. Enfin, la conclusion est une synthèse des résultats avec présentation de quelques perspectives pour une éventuelle recherche future.

Chapitre I : Etat de L'art

1 ETAT DE L'ART

1.1 Introduction

Depuis le mi- vingtième siècle, la chaleur latente de la glace ainsi qu'un grand groupe de matériaux possédant une capacité de stockage de la chaleur pendant le changement de phase ont été utilisés avec succès dans les bâtiments. La première documentation sur le MCP a été élaborée à l'institut de technologie de Massachusetts (MIT) par le Dr. Maria Telkes en 1947, aux États-Unis [11]. Dans ce bâtiment, Dr Telkes a construit une maison contenant environ 4m³ de sels de Glauber (MCP) qui ont été emballés dans des fûts en acier. Ces derniers ont été placés derrière un vitrage orienté vers le sud. La chaleur générée par ce système passif a été transportée vers l'espace intérieur à l'aide de ventilateurs. En été, le stockage thermique avec MCP a permis de refroidir les pièces environnantes [12,13]. Mais pendant la troisième saison hivernale, les sels de Glauber ont cessé de fonctionner du fait que le sel de Glauber se désintègre pendant une courte période et perd sa capacité de changement de phase lorsqu'il n'est pas bien scellé et chimiquement amélioré. Cependant, Dr. Telkes est resté optimiste sur l'avenir du MCP dans les applications de chauffage solaire. En 1951, elle écrit : « L'énergie soleil sera tôt ou tard utilisée comme source d'énergie. Pourquoi attendre ? ».

Suite à ceci, de nombreux travaux ont étudié l'application du MCP dans le bâtiment et ont montré que celui-ci peut considérablement améliorer sa performance énergétique. Par contre, des difficultés ont été rencontrées, notamment en ce qui concerne la réalisation à grande échelle sur le terrain. Al-Saadi et Zhai [14], Baetens et al. [15], Derradji et al. [16], Khudhair et Farid [17], Kuznik et al [18] et d'autres, ont mené plusieurs tests sur l'utilisation des MCP dans le bâtiment pour le stockage de l'énergie et le confort thermique intérieur. Ceux-ci ont clairement montré que l'intérêt des recherches sur les MCP est en progression dans le monde entier. Selon les articles publiés sur l'application des MCP dans le bâtiment, la figure 1.1 offre les informations sur l'évolution des publications de 2003 à 2016. Il a été constaté que le nombre d'articles publiés entre 2012 et 2015 est fortement supérieur à celui enregistré lors des années 2003 à 2007. Ceci explique l'intérêt des chercheurs sur les MCP dont les études ont pris une plus grande ampleur ces dernières années.

La figure 1.2 présente la répartition des pays dans le monde sur le plan de la recherche au niveau des MCP. Le nombre d'articles examinés est d'environ 114 dont la moitié provient de Chine, des États-Unis et d'Italie. En outre, près de la moitié des pays qui étudient l'application du MCP dans le bâtiment sont situés dans la région méditerranéenne [19].

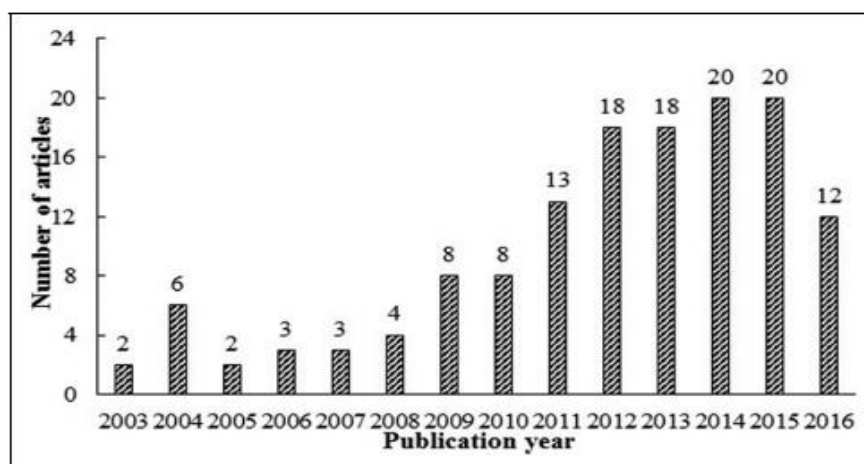


Figure 1.1. Distribution des publications par an

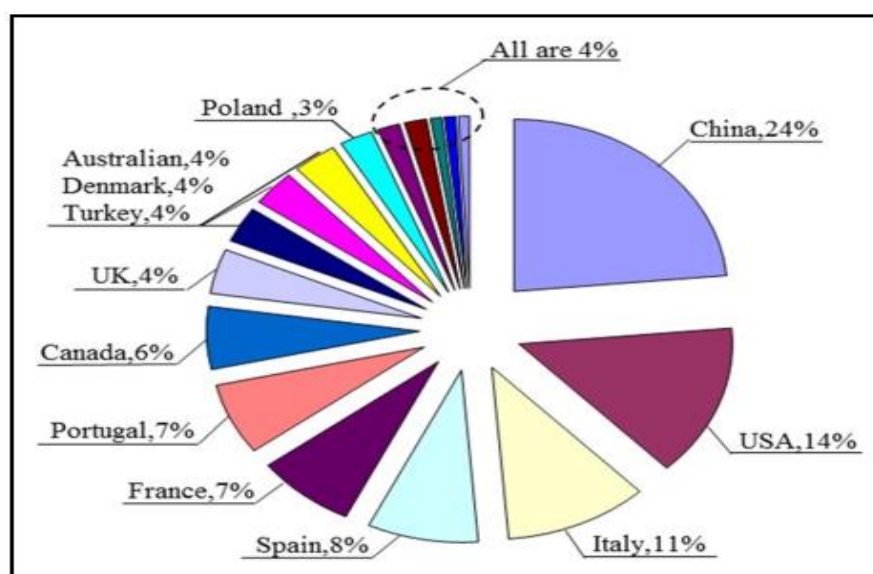


Figure 1.2. Répartition des pays dans la recherche du MCP dans le monde

1.2 Généralités sur les MCP :

D'après le fabricant du MCP, BASF [20], une paroi contenant 2 cm de produit Micronal® possède la même performance en termes d'inertie thermique qu'une brique d'épaisseur de 36 cm, d'un mur en béton d'épaisseur de 24 cm ou d'un bois massif d'épaisseur 38 cm (figure 1.3).

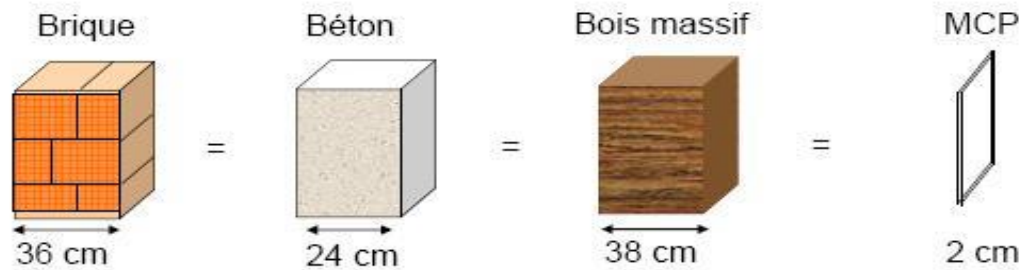


Figure 1.3. Schéma comparatif des inerties thermiques

Les MCP possédant une chaleur latente élevée sont capables de stocker et de libérer une grande quantité d'énergie grâce à une transformation solide-solide, solide-liquide, solide-gaz et liquide-gaz, comme illustré dans la figure 1.4 [21,22].



Figure 1.4. Changement de phase solide-liquide-gaz

1.2.1 Propriétés des MCP

Les principales fonctions associées aux MCP diffèrent d'un fabricant à un autre. Les propriétés économiques, chimiques, physiques et thermiques illustrées dans le tableau 1.1 jouent un rôle essentiel qui permet l'utilisation du MCP comme système de stockage thermique performant [23,24].

| | |
|--|---|
| <p>Propriétés thermiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Température de changement de phase appropriée • Haute capacité thermique spécifique • Haute chaleur latente pendant le changement de phase • Conductivité thermique élevée en phase liquide et solide | <p>Propriétés physiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Haute densité • Effet de sous-refroidissement négligeable • Faible pression de vapeur • Petite variation de volume • Taux de cristallisation suffisant |
| <p>Propriétés chimiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stabilité chimique prolongée • Compatibilité avec les matériaux du conteneur • Non toxique, non inflammable et non explosif • Pas de séparation de phase | <p>Propriétés économiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abondant • Peu coûteux |

Tableau 1.1. Caractéristiques générales des MCP

1.2.2 Classifications des MCP

Dans l'année 1983, Abhat [25] a donné une classification détaillée sur les substances utilisées pour le stockage de l'énergie thermique. La figure 1.5 présente cette classification. Cette figure montre que les MCP solide-liquide sont principalement divisés en deux catégories : les matériaux organiques qui sont composés principalement d'acides gras et de paraffines ainsi que les matériaux inorganiques composés principalement d'hydrates de sel. Chaque groupe possède ses propres intervalles de température de fusion et de chaleur latente qui dépendent des effets moléculaires, en termes de liaison chimique. La figure 1.6 montre la gamme de l'enthalpie de fusion et la température de fusion des MCP communs [26].

Dans le cas de l'utilisation d'un matériau à changement de phase solide/solide, l'absence de la phase liquide empêche tout risque de fuite sans besoin d'encapsulation. Mais sa chaleur latente est généralement très faible comparée à celle du matériau de stockage thermique solide-liquide, ceci constitue un inconvénient majeur [27].

Parmi les matériaux organiques et inorganiques, les MCP sont largement mis en œuvre dans diverses applications. Lane [28] a identifié 210 matériaux organiques, inorganiques et eutectiques appropriés pour réguler la température du bâtiment. Ces matériaux ont montré un changement de phase sans aucune ségrégation.

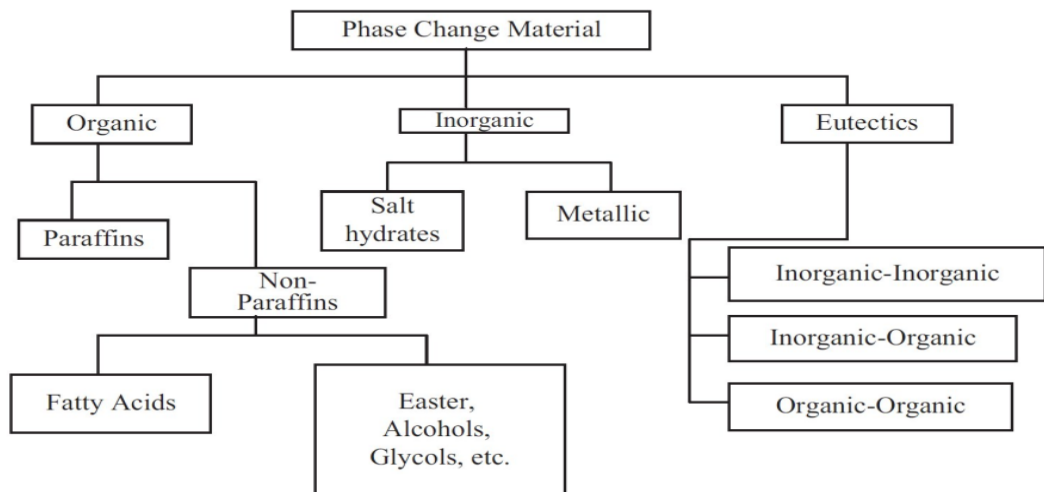


Figure 1.5. Famille de matériaux des MCP

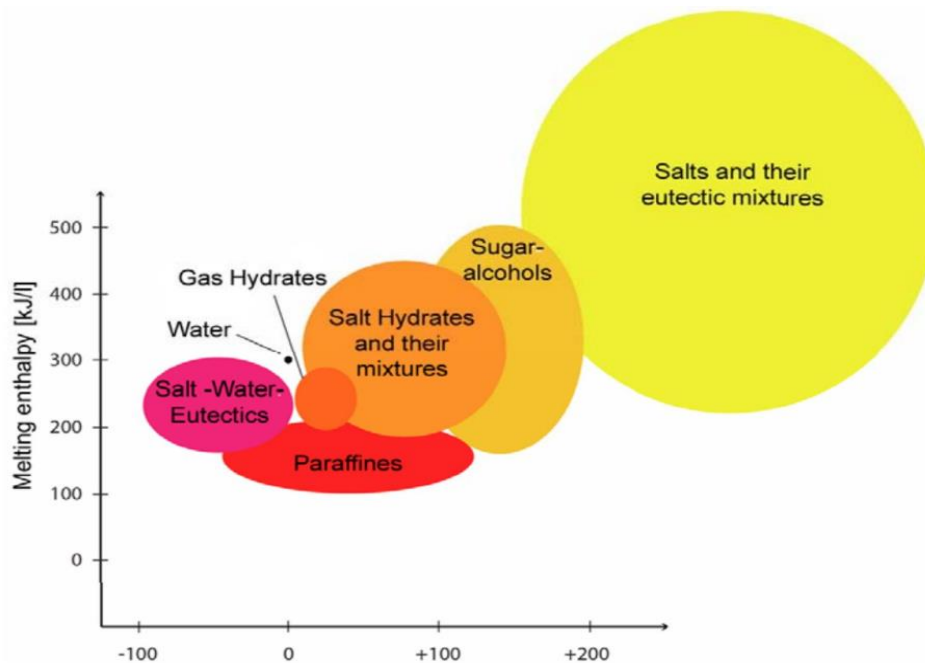


Figure 1.6. Enthalpie de fusion en fonction de la température de fusion pour divers MCP

1.2.2.1 Les MCP organiques

Plusieurs MCP organiques ont été découverts et classés au cours de ces dernières années [29, 30]. Hale et al [31] a présenté 500 MCP organiques d'ingénierie, significatifs pour une conception thermique efficace dans les dispositifs de stockage. Les cires de paraffine, le polyéthylène glycol, les acides gras et leurs dérivés sont les principaux types de MCP organiques. Ils subissent une transition de phase solide-liquide pendant le chauffage et ver-versa pendant le refroidissement.

Les polyalcools et le polyéthylène sont les autres classes de MCP organiques, qui révèlent une transformation en phase solide-solide à une température fixe en absorbant / libérant d'énormes quantités de chaleur latente.

Les matériaux organiques à changement de phase sont la paraffine et la non-paraffine. Cette dernière inclue les acides gras, les esters, les alcools, les glycols, etc. Par ailleurs, ces matériaux organiques possèdent certaines propriétés qui les rendent bénéfiques au stockage de la chaleur latente dans les bâtiments. Généralement, les MCP organiques présentent un grand nombre d'avantages à savoir une large température, chimiquement stable, non corrosifs, non toxique, peu de sous-refroidissement, pas de ségrégation, une haute température de fusion latente et un taux de nucléation élevé. Malgré plusieurs avantages des MCP organiques, leur faible conductivité thermique entraînant la réduction du taux de charge / décharge, un effet de surfusion dans les cycles de solidification et les fuites dans les conteneurs sont les principaux défauts à surmonter [32-34]. Les points de fusion de ces MCP couvrent comparativement un petit intervalle de température (5 à 150 °C), suffisant pour les applications de bâtiment [35, 36]. De même, ces matières organiques peuvent être modifiées au niveau de leur point de fusion et ceci par un mélange entre elles. Généralement, leur densité est inférieure à 1 g / cm³.

1.2.2.1.1 Paraffine

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont des alcanes de formule générale C_nH_{2n+2} . Elles sont soit fabriquées à partir du pétrole brut ou soit synthétisées à l'aide du procédé Fischer-Tropsch. Les molécules de ces hydrocarbures saturés peuvent se présenter soit sous la forme de chaînes rectilignes (hydrocarbures n-paraffinées) soit en plusieurs branches (hydrocarbures iso-paraffinées) (figure 1.7) [37].

Pour des applications de stockage thermique les n-paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante. L'augmentation du nombre d'atomes le long de la chaîne carbonée augmente le poids moléculaire, ce qui conduit à une température de fusion et à une chaleur latente plus élevée [38-40]. Par exemple, l'augmentation du nombre des atomes de carbones de C1 à C100 augmente la température de fusion de 90,68 à 388,40 K et la chaleur de fusion de 58 à 285 kJ/kg. La paraffine qui se compose d'une faible quantité d'atomes de C (par exemple, le propane C₃H₈, l'éthane C₂H₆ et le méthane CH₄) est gazeuse dans les conditions ambiantes.

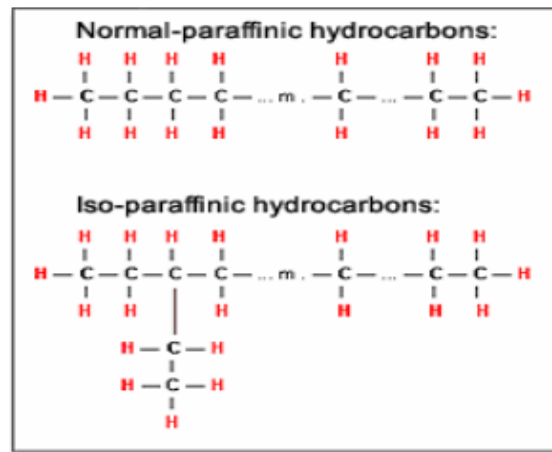


Figure 1.7. Structure chimique des paraffines

Le plus petit n-alcane, qui peut fondre au-dessus de 0 °C, est Tétradécane. Des études ont montré que les cires de paraffine sont capables d'absorber, de stocker et de libérer une grande quantité de chaleur sur un grand nombre de cycles de changement de phase [41]. Ce sont d'excellents matériaux de construction pour le stockage de l'énergie ayant une capacité thermique comprise entre 2,14-2,4 kJ/kg.K et une chaleur latente entre 200-220 kJ / kg. Aucune ségrégation de phase ne se produit dans la paraffine malgré de nombreux cycles de transition de phase. Elle présente de nombreuses propriétés positives, elle est chimiquement inerte, non corrosive, la surfusion est négligeable, incolore, durable, peu coûteuse, abondante et non toxique [42].

Les principaux inconvénients de la paraffine sont [43] :

- Une très faible conductivité thermique (0,18-0,25 W/m K), qui représente la moitié de celle des hydrates de sel
- Elles sont facilement inflammables
- L'augmentation du volume ≈ 10 vol. % ce qui est identique à celui de divers composants inorganiques. Cependant en raison de sa souplesse il est impossible de créer d'énormes forces après l'expansion

Pour résoudre le problème de faible conductivité thermique des paraffines, différentes particules avec des conductivités thermiques élevées comme le carbone, le graphite ou les métaux peuvent être mélangées avec le MCP [44,45].

Sari et al. [46] ont testé la performance des composites entre la paraffine (la n-docosane) avec du graphite expansé. Les conductivités thermiques du MCP mélangé

avec différentes fractions massiques de graphite expansé à savoir 2%, 4%, 7% et 10% indiquent que la conductivité thermique de la paraffine (0,22 W / m K) a été augmenté respectivement de 81,2%, 136,3%, 209,1% et 272,7 %. Sari [47] a étudié aussi les composites paraffine / polyéthylène à haute densité où la paraffine agit comme matériau de stockage de chaleur latente et le polyéthylène à haute densité agit comme matériau de support conférant une résistance structurelle pour empêcher la fuite de la paraffine fondue. Une amélioration de 24% de la conductivité thermique a été obtenue. Des exemples de paraffines avec leurs propriétés thermo physiques sont présentés dans le tableau 1.2 [45,48].

| | Paraffines | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Tétradécane | Hexadécane | Octadécane | Eicosane |
| Formule | C ₁₄ H ₃₀ | C ₁₆ H ₃₄ | C ₁₈ H ₃₈ | C ₂₀ H ₄₂ |
| Température de fusion [°C] | 5.5 | 16.7 | 28 | 36.7 |
| Enthalpie de fusion [kJ/kg] | 226 | 237 | 244 | 247 |
| Conductivité thermique [W/m. °C] | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| Capacité thermique massique [kJ/kg. °C] | 2.07 | 2.11 | 2.16 | 2.21 |
| Masse volumique solide [kg/m³] | 825 | 835 | 814 | 856 |
| Masse volumique liquide [kg/m³] | 771 | 776 | 774 | 778 |
| Retard à la solidification [°C] | Aucun | Négligeable | Négligeable | Aucun |
| Pression de vapeur [Pa] | 133 à 75 °C | 133 à 105 °C | 133 à 75 °C | 133 à 100 °C |
| Tension superficielle [N/m] | 0.0274 | 3.4 | 0.0274 | - |
| Viscosité [cp] | 2.1 | - | 3.4 | - |

Tableau 1.2. propriétés thermo physiques des Paraffines

1.2.2.1.2 Les acides gras

Les acides gras ont une formule générale de (CH₃ (CH₂)_{2n}COOH), ils proviennent de sources animales et végétales ; et sont qualifiés comme non polluants [49]. Ils sont classés en six catégories : stéarique, palmitique, myristique, laurique, caprique et caprylique [50]. De même, ils sont des MCP prometteurs qui sont attrayants pour diverses architectures du bâtiment éco énergétique. Ils ont de nombreuses caractéristiques souhaitables, y compris une forte densité de stockage d'énergie, une bonne réversibilité de changement de phase, solidification fusion avec congruence, sous-refroidissement restreint, sans ségrégation de phase, un petit changement volumétrique entre la phase solide et liquide, chimiquement et thermiquement stable, non toxique, biodégradable et non corrosif [51].

Les propriétés thermiques des acides gras lors de changement de phase sont très étudiées par plusieurs auteurs [52-54]. Les températures de fusion des acides gras varient entre 5 et 70 ° C et celle de la chaleur latente de 45 à 210 kJ / kg [55].

Cependant, leur faible conductivité thermique les limite pour une application répandue. Ils sont trois fois plus chers par rapport à la paraffine [56], légèrement corrosif, possèdent une odeur désagréable et sont de nature combustible [57]. Fauzi et al. [58] a amélioré la conductivité de l'acide myristique / l'acide palmitique en ajoutant 10% pd de lauréat de sodium. Karaipekli et al. [59] a modifié la conductivité thermique de l'acide stéarique en incorporant du graphite expansé (EG) et de la fibre de carbone. L'addition d'EG dans la fraction de masse de 2%, 4%, 7% et 10% augmente la conductivité thermique de l'acide stéarique à 27,6%, 58,6%, 179,3% et 279,3%, respectivement. À l'inverse, l'incorporation de fibres de carbone dans les mêmes fractions de masse que EG a été observée une amélioration de la conductivité thermique de 24,1%, 106,9%, 162,1% et 217,2%, respectivement.

1.2.2.2 MCP inorganiques

Les MCP inorganiques couvrent un intervalle de température étendu. Bien qu'ils contiennent une chaleur latente similaire, par unité de masse que celle des MCP organiques, mais leur densité élevée et à l'origine de leur grande capacité de chaleur latente par unité volumétrique [60].

Dans cette catégorie on cite Les hydrates de sel. Ils sont caractérisés par une grande chaleur de fusion par unité de volume, une grande conductivité thermique (environ le double de celle des paraffines organiques), une faible variation de volume pendant le changement de phase d'environ 10 % V, une bonne compatibilité avec le plastique, une certaine toxicité, une certaine corrosivité, et un coût variable [61]. Les hydrates de sel présentent certains inconvénients tels que le sous-refroidissement, la ségrégation et la corrosion [62]. L'application d'agents épaississants, par exemple, l'argile de bentonite ainsi que l'agent de nucléation, comme le Borax qui permettent de contrôler le sous-refroidissement. Cependant, ils diminuent le taux de transfert thermique, en réduisant la conductivité thermique [63,64]. Concernant les MCP métalliques, ils ne sont pas dans la plage de température conforme aux applications du bâtiment [65].

1.2.2.3 Les MCP eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique) [66,67]. Ils présentent deux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs

chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs [68]. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on possède peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels [69]. Les Tableaux 1.3 et 1.4 représentent certaines propriétés thermiques de certains MCP.

| Matériaux | | Température de fusion (°C) | Enthalpie de fusion (KJ/kg) |
|------------------|---|----------------------------|-----------------------------|
| MCP Organiques | Eau | 0 | 333.6 |
| | Stéarate de butyle | 19 | 140 |
| | L'acide caprique-laurique | 21 | 143 |
| MCP Inorganiques | KF.4H ₂ O | 18.5 | 231 |
| | Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O | 25.8 | 125.9 |
| | Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O | 32 | 251 |
| MCP Eutectiques | 66,6% CaCl ₂ .6H ₂ O+33,3% MgCl ₂ .6H ₂ O | 25 | 127 |
| | 48% CaCl ₂ +4,3% NaCl+47,3% H ₂ O | 26.8 | 188 |
| | 47% Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53% Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O | 30 | 136 |

Tableau 1.3. Certaines propriétés thermiques de certains MCP

| Matériaux | | Température de fusion (°C) | Enthalpie de fusion (kJ/kg) | Conductivité thermique (W/m.k) | Densité (kg/m ³) |
|-----------------------------|--|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| MCP à base d'hydrate de sel | Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O 60% | 32 | 251 | / | / |
| | Na(CH ₃ COO).3H ₂ O+40% CO(NH ₂) ₂ | 30 | 200.5 | | |
| | CaCl ₂ .6H ₂ O | 29 | 171 | 0.54 (liquide 61.2 °C) | 1562 (liquide 32 °C) |

Tableau 1.4. Propriétés thermiques de MCP à base de paraffine et hydrates de sel [70]

Au début des années 90 seules quelques compagnies, principalement basées aux états unis commercialisaient des produits de stockage de chaleur tels que les sels hydratés et les paraffines. De nos jours plusieurs entreprises ont fait leur apparition sur le marché des matériaux de changement de phase telles que Cristopia (en France), TEAP Energy (en Australie), Rubitherm GmbH (en Allemagne), EPS Ltd. (En Angleterre), PCM Thermal solution (aux Etats unis), Climator (en Suède)etc. Tableau 1.5 présenté quelques MCP disponibles dans le commerce pour la gamme de températures comprise entre 10°C à 118°C [71].

| Nom | Température de fusion (°C) | Densité (KJ/kg) | Chaleur latente (KJ/kg) | Fabricant |
|------------|----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------------|
| E 13 | 13 | 1780 | 140 | EPSLtd. (www.epsLtd.co.uk) |
| E 21 | 21 | 1480 | 150 | EPS Ltd. (www.epsLtd.co.uk) |
| C 24 | 24 | 1480 | 216 | Climator (www.climator.com) |
| C 32 | 32 | 1450 | 302 | Climator (www.climator.com) |
| S 27 | 27 | 1470 | 207 | Cristopia (www.cristopia.com) |
| A 22 | 22 | 770 | 220 | EPS Ltd. (www.epsLtd.co.uk) |
| RT 20 | 22 | 870 | 172 | Rubitherm (www.rubitherm.com) |
| RT 26 | 25 | 880 | 131 | Rubitherm (www.rubitherm.com) |
| RT 42 | 43 | 880 | 174 | Rubitherm (www.rubitherm.com) |
| Witco 45 A | 26.3 | N.C | 167.2 | Witco |
| STL 27 | 27 | 1090 | 213 | Mitsubishi Chemical |
| STL 47 | 47 | 1340 | 221 | Mitsubishi Chemical |
| TH 25 | 29 | 1540 | 188 | TEAP (www.teappcm.com) |
| TH 58 | 58 | 1290 | 226 | TEAP (www.teappcm.com) |

Tableau 1.5. MCP disponibles dans le commerce pour la gamme de températures (10°C à 118°C)

1.3 Propriétés thermo physiques des MCP

Les propriétés thermo physiques sont l'aspect le plus important lorsqu'il s'agit de choisir le meilleur MCP pour le stockage d'énergie. Les principales propriétés de chaque MCP sont :

- Température de fusion dans une plage de température appropriée
- Chaleur latente par unité de volume
- Chaleur spécifique
- Conductivité thermique
- Densité

Pour déterminer les propriétés physiques, quatre méthodes principales sont utilisées [72,73] :

- Calorimétrie conventionnelle,
- Analyse thermique différentielle (DTA),
- Calorimétrie à balayage différentiel (DSC) et
- Méthode de T-History.

L'analyse thermique différentielle (DTA) et la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) [74] sont les méthodes les plus développées et les plus utilisées pour déterminer les propriétés thermo physiques [75]. Cependant, ces méthodes ont des inconvénients (les tailles d'échantillon

sont faibles, allant de 10 à 150 mg (DTA) et de 1 à 50 mg (DSC)), celles-ci ont révélé une apparition de divergences lorsque le volume de MCP était plus important [76]. En outre, ces méthodes ne peuvent pas déterminer les propriétés de plusieurs échantillons de MCP en même temps.

Une autre méthode populaire est la méthode T-History. Contrairement aux méthodes DSC et DTA, cette méthode permet de déterminer les propriétés des échantillons de plus grande taille pouvant atteindre 15 000 mg de MCP. En outre, il permet de tester plusieurs échantillons du MCP en même temps. Comparée aux autres méthodes, la méthode T-History est beaucoup moins chère, facile à maintenir et peut être construite avec des appareils de laboratoire de base [75–78]. Le dispositif expérimental comprend un bain thermostatique, des tubes à échantillon, des capteurs de température, un enregistreur de données et un PC pour l'analyse et la collecte de données [76].

1.4 Le stockage d'énergie par chaleur latente dans les MCP :

Le principe de fonctionnement des systèmes de chaleur latente LHS repose sur l'absorption où la libération de la chaleur latente pendant la transformation de phase du solide au liquide ou vice versa. Sur la base du processus de transformation de phase, la capacité de stockage par chaleur latente est obtenue grâce à une transformation en phase solide-solide, solide-liquide, gaz-solide et liquide-gaz [79-83]. Il existe plusieurs options avec des avantages et des inconvénients distincts. Le changement de phase solide-liquide par fusion et solidification peut stocker de grandes quantités de chaleur si un matériau approprié a été sélectionné. Lors de la fusion, pendant que la chaleur est transférée au matériau de stockage, le matériau garde sa température constante à la température de fusion, également appelée température de changement de phase (figure 1.8). Si la fusion est terminée, un autre transfert de chaleur entraîne de nouveau un stockage de chaleur sensible. La chaleur fournie lors de la fusion est donc appelée chaleur latente.

$$\Delta Q = \Delta H = m \times \Delta h \quad (1.1)$$

Les champs d'application potentiels du MCP peuvent être trouvés directement à partir de la différence fondamentale entre le stockage de chaleur sensible et latente. Ils peuvent être divisés en un stockage à une température constante ou par un stockage de chaleur avec un petit changement de température.

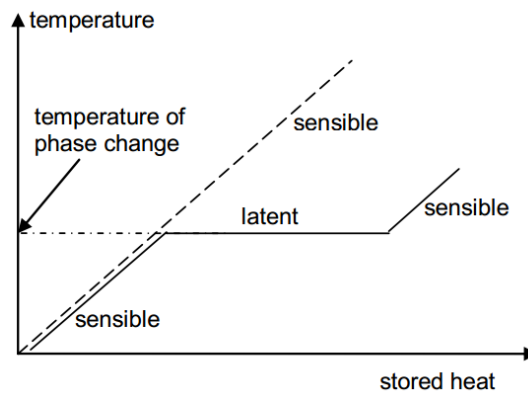


Figure 1.8 Stockage de la chaleur comme chaleur latente dans le cas du changement de phase solide-liquide

- **Stockage de chaleur à une température constante**

Comme l'indique la figure 1.9, la chaleur peut être fournie ou extraite d'un matériau à changement de phase sans changement de sa température. Par conséquent, le MCP peut être utilisé pour stabiliser la température dans une application comme par exemple, l'utilisation de la glace pour garder les boissons et les aliments froids où dans la stabilisation de la température intérieure dans un bâtiment.

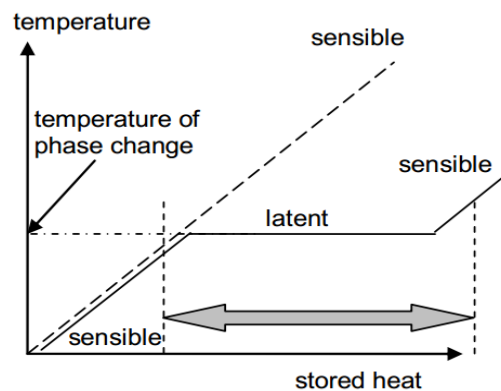


Figure 1.9 Stockage à une température constante

- **Stockage de chaleur à une plage de température**

D'un autre point de vue, la figure 1.10 illustre le stockage d'une grande quantité de chaleur ou de froid par le MCP avec des variations de température relativement faibles.

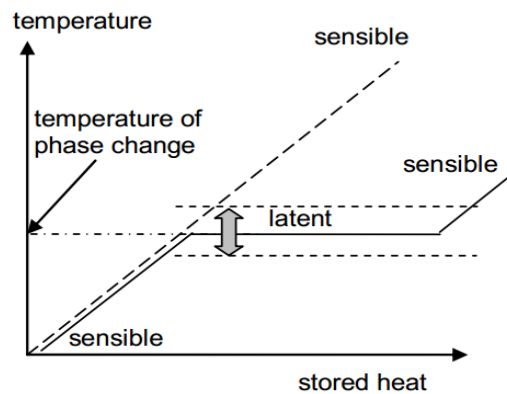


Figure 1.10 Stockage dans une plage de température

1.5 Incorporation des MCP dans le bâtiment :

Certains auteurs [84,85] ont classé les applications de systèmes passifs de l'enveloppe du bâtiment en deux catégories principales :

- **MCP intégré aux matériaux de construction :**

Quand ils sont incorporés à un matériau de construction tel que le plâtre, le béton, les briques, les panneaux sous forme stabilisée [84] et un mélange de MCP avec d'isolants thermiques.

- **MCP en tant que « composant » :**

La principale différence entre les composants de bâtiment équipés de MCP et ceux intégrés dans les matériaux de construction est qu'un composant est fabriqué avant d'entamer la construction du bâtiment. On peut citer comme exemple : les panneaux muraux, les plafonds suspendus et les stores avec MCP [86]

L'application des MCP dans les bâtiments solaires actifs et passifs a débuté dès les années 1940. Son utilisation a été faite dans le but d'économiser l'énergie et d'améliorer le confort thermique en la stockant dans le bâtiment. Pour le système passif, l'objectif recherché est d'offrir un confort thermique avec une exploitation minimale d'énergie CVC [87-102]. Dans cette technologie, le bâtiment n'exige pas un outil mécanique dans l'application de ses trois fonctions tel que la collecte, le stockage et la libération de la chaleur. Quant au système actif, il fait appel à d'autres moyens mécaniques comme les pompes ou les ventilateurs pour véhiculer le fluide caloporteur.

1.5.1 Les différentes techniques d'incorporation des MCP :

Darkwa et Kim [105], ont révélé que l'avancement du transfert de chaleur pendant la récupération d'énergie et la valeur de la conductivité thermique globale sont influencés par la technique utilisée dans l'intégration des MCP.

Étant donné que les MCP changent de phase à plusieurs reprises, de solide à liquide au cours du processus de stockage de chaleur, ils doivent être conservés dans des récipients ou des matrices. Dans le cas de l'intégration de MCP dans le bâtiment, ils peuvent parfois être contenus dans une matrice poreuse telle que la pierre, la brique, le bois, le béton ou tout autre matériau de construction. Le principal inconvénient de ce type de confinement est qu'il est difficile de maintenir un MCP dans la matrice lorsque ce dernier est à l'état liquide [106,107]. On citera plusieurs approches sur la façon d'intégrer les MCP dans les matériaux et les structures de construction :

- Incorporation directe [108-120]
- Imprégnation de matériaux de construction poreux [121]
- Macro encapsulation - les MCP sont fermés hermétiquement dans un conteneur
- Micro encapsulation - Les MCP sont enfermés dans une petite capsule
- Les MCP sous forme stabilisée pour une installation directe

1.5.1.1 Encapsulation

Comme la plupart des MCP conçus pour les applications de construction passent par une phase liquide, une encapsulation est nécessaire pour éviter des problèmes tels que des fuites de MCP à la surface et la diffusion de de liquides peu visqueux dans le matériau [122]. Par conséquent, des méthodes telles que l'incorporation directe et l'immersion de MCP dans les matériaux de construction ne conviennent pas aux applications à long terme [123]. L'incorporation directe et l'immersion étant des techniques peu répandues pour les MCP destinés à des applications de bâtiment, elles ne seront pas abordées dans ce travail.

Il existe deux principaux moyens d'encapsulation [124-129]. La première méthode est la macro-encapsulation, dans laquelle le MCP est scellé dans une certaine forme de conteneurs tels que des tubes, des sachets et des panneaux. La deuxième est la micro-encapsulation, dans laquelle les petites particules sont enfermées dans une mince enveloppe en tant que capsule.

1.5.1.1.1 Macro-encapsulation

La macro-encapsulation est le type le plus commun pour encapsuler le MCP sous certaines formes d'emballages tels que les tubes, les sacs, les sphères, les panneaux ou d'autres conteneurs avec différentes tailles et formes dont le diamètre est généralement supérieur à 1 mm [130]. Ceci sert à retenir le MCP liquide, améliorer la compatibilité du matériau avec l'environnement, réduire les changements de volume, et améliorer la stabilité mécanique d'une structure, surtout lorsque le conteneur est très solide. Quelques produits utilisés dans la macro-encapsulation du MCP par différents fabricant et commercialisés sont représentés dans la figure 1.11 [110,131]. Les conteneurs de MCP doivent répondre aux exigences suivantes [132] : Résistance, flexibilité, résistance à la corrosion et stabilité thermique, surface suffisante pour le transfert de chaleur, stabilité structurelle et une manipulation facile.

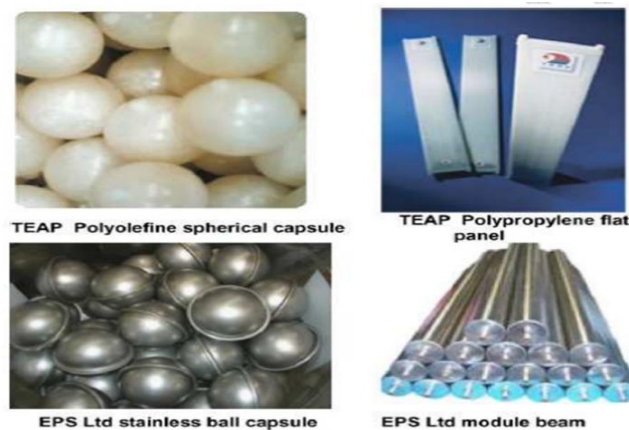


Figure 1.11 La macro-encapsulation du MCP

1.5.1.1.2 Micro-encapsulation

Les microcapsules peuvent être décrites comme des particules contenant un matériau central entouré d'un revêtement ou d'une enveloppe et dont le diamètre varie de 1 à 1000 μm . Cette méthode est largement utilisée dans les applications commerciales, notamment les textiles, les adhésifs, les cosmétiques, les produits pharmaceutiques et le bâtiment [57].

La micro-encapsulation est la méthode la plus adaptée à l'intégration des MCP dans la structure du bâtiment. Dans cette méthode, les particules du MCP sont enveloppées dans un film polymère mince, scellé et "de poids moléculaire élevé" qui les aident à conserver la forme et à prévenir les fuites pendant le processus de transition de phase. Il est plus facile et moins coûteux d'intégrer les MCP micro encapsulés dans les matériaux de construction. Les microcapsules représentées sur la figure 1.12 ont

généralement une forme sphérique avec de très petits diamètres [133,134]. La micro-encapsulation partage les mêmes avantages que celles mentionnés ci-dessus pour la macro-encapsulation, mais de plus [135] :

- L'amélioration de la stabilité du cycle est dû au fait que la séparation des phases soit limitée aux distances microscopiques (figure 1.13).
- La possibilité à travers ce mode de confinement est de mélanger les capsules du MCP avec d'autres matériaux de constructions à savoir le plâtre, le béton ou brique).

Les effets de la géométrie des capsules sont également signalés. La géométrie est déterminée comme un paramètre significatif pour améliorer la performance thermique des MCP. Des géométries régulières telles que le carré, le cylindre et la sphère ont été intensément testées. Cependant, la recherche sur les géométries irrégulières, à l'image de trapézoïdale et triangulaire n'est pas très répandue. Hawlader et al. [136] ont effectué des essais de cycles de chaleur sur la paraffine micro encapsulée et ont découvert que la capacité de stockage d'énergie et le profil géométrique restent stable même après 1000 cycles comme illustré dans la figure 1.26.



Figure 1.12. MCP micro encapsulé

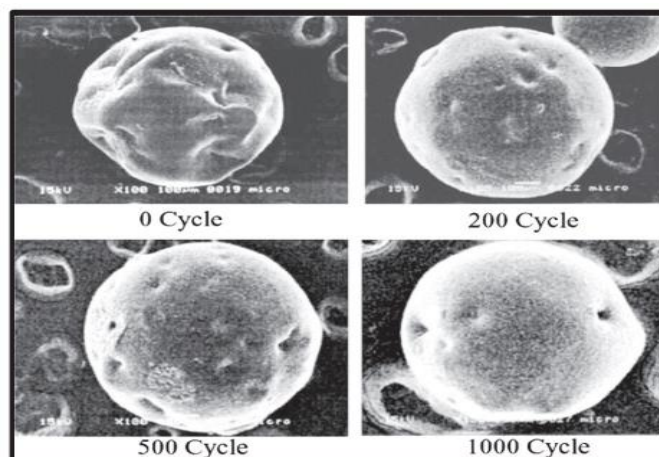


Figure 1.13. Images MEB de la paraffine microencapsulée à différents cycles thermiques

Les deux principaux inconvénients de la micro-encapsulation lorsque le MCP est mélangé avec d'autres matériaux de construction sont [137] :

- La faible conductivité thermique de la plupart des matériaux utilisés comme microcapsules
- La fraction de masse du MCP doit être réduite à cause des exigences liées aux propriétés mécaniques du matériau, ce qui conduit à une faible capacité de stockage de chaleur.

1.5.2 Incorporation des MCP dans les matériaux de construction :

L'incorporation de MCP dans les matériaux de construction peut potentiellement augmenter la masse thermique de ces composants de l'enveloppe, ce qui ne pourrait pas ralentir les taux de transfert de chaleur pendant les heures de pointe, mais aussi réduire les fluctuations de température intérieure relativement importantes. Par conséquent, les systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente atténuent les effets de la fluctuation de la température ambiante sur l'enveloppe du bâtiment. La température ambiante devrait donc fluctuer dans la plage de confort thermique.

1.5.2.1 L'intégration du MCP dans le plâtre :

Les MCP sont incorporés dans le plâtre soit en micros-encapsulés, soit par immersion ou par ajout lors de la fabrication. La majorité des études faites sur les plaques de plâtre pour évaluer les performances passives s'appuient en général sur une méthode comparative entre l'une dotée d'un système avec MCP et l'autre sans MCP (figure 1.14) [138].

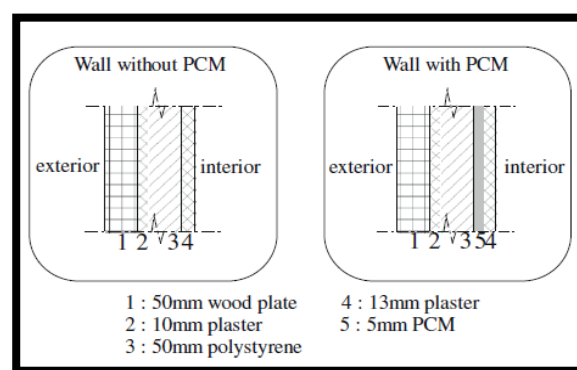


Figure 1.14. Les plaques de plâtres avec et sans MCP

Selon la référence [139], des agrégats minéraux et quelques adjuvants ont été additionnés à une plaque de plâtre déjà micro encapsulée par les MCP. Ceci a été élaboré dans le but d'améliorer sa performance thermique. Les MCP incorporés possèdent une plage de fusion entre 25 °C et 28 °C. La chaleur sensible et latente du

matériau a été mesurée expérimentalement par (DSC). Et ainsi de même ils ont utilisé un instrument (flash laser) pour déterminer la conductivité thermique du composite MCP/plâtre. Ces panneaux de plâtres avec MCP ont été testés dans deux petites cavités d'essais identiques et mitoyennes (figure 1.15). Les murs de la première ont été couverts par des panneaux du plâtre avec MCP et la deuxième avec des plaques de plâtre ordinaires. L'épaisseur de la plaque a été variée entre 1 à 3 cm. les tests ont été effectués dans des conditions variables contrôlées. Il a été constaté, que lors des journées chaudes une réduction de la température maximale pouvait atteindre environ 3 K par rapport à la cavité sans MCP.

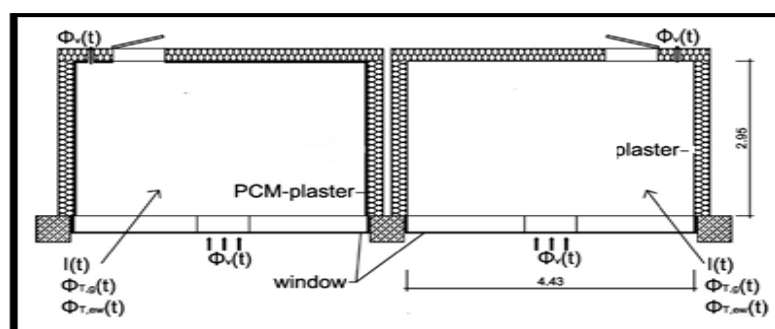


Figure 1.15. Chambre d'essai (plaque de plâtre avec MCP)

Des études expérimentales et numériques ont été effectuées en comparant entre deux différentes techniques utilisées lors de la distribution du MCP dans un mur en plâtre [140]. La première technique consiste en une distribution stratifiée du MCP et dans la deuxième, celui-ci est distribué aléatoirement (figure 1.16). D'après les résultats obtenus dans le cas appliqué au système stratifié, les auteurs ont constaté une réduction d'environ 17% du temps pendant la récupération de chaleur avec une augmentation maximale de 20 à 50% de flux de chaleur. De même, pour la température ambiante minimale pendant la nuit, ils ont enregistré une augmentation d'environ 17% de plus par rapport au système aléatoire.

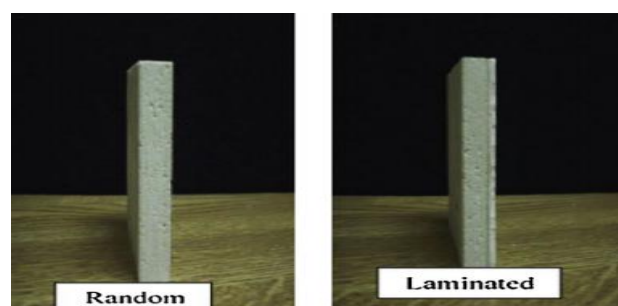


Figure 1.16. Les deux méthodes de distribution

1.5.2.2 L'intégration du MCP dans le béton :

L'objectif général de la combinaison des MCP dans les matériaux en béton est d'accroître beaucoup plus le stockage de la chaleur par des matériaux de constructions lourds [141,142]. L'ajout de MCP directement dans le béton a donné des résultats prometteurs grâce à une conductivité thermique plus basse et à une augmentation de la masse thermique à des températures spécifiques. Cependant, le béton avec MCP a montré certaines propriétés indésirables telles qu'une résistance moindre, une résistance incertaine de la stabilité à long terme et moindre résistance au feu [143]. Plusieurs études ont été menées sur le béton PCM et ont montré des effets positifs en réduisant les températures intérieures dans les climats chauds.

Au cours de ces dernières décennies, plusieurs études sur le MCP béton ont été faites et parmi elles certaines sont représentées ici. Une étude expérimentale sur la performance du composite béton a été réalisée à grande échelle dans la référence [144]. Cette dernière a étudié l'utilisation des MCP dans le plancher en béton. Quatre cavités de même dimension ont été construites, dont deux avec plancher en béton plus MCP et deux autres avec plancher en béton ordinaire. La seule source de chaleur dans chaque chambre est le rayonnement solaire à travers les fenêtres (figure 1.17). Dans cet essai, le MCP dans le plancher a été bien exposé au rayonnement solaire qui représente un cas très rare à trouver dans la réalité du fait que les planchers en béton sont toujours couverts avec le bois, le vinyle ou les tuiles qui abritent le MCP du rayonnement solaire direct. Par conséquent, bien que la recherche ait indiqué que cette technologie pourrait réduire les fluctuations de température dans les cavités, il serait très difficile de les mettre en œuvre sur une plus grande échelle dans la réalité.



Figure 1.17. Schéma des quatre Cavités de test

Des recherches similaires à celles-ci ont été présentées par la référence [145]. Le dispositif expérimental proposé est composé de deux cellules identiques. L'une construite en béton classique et l'autre en béton mélangé avec 5% en MCP micro

encapsulé (figure 1.18). Les résultats obtenus ont révélé une diminution de la fluctuation de la température dans la cellule de béton avec MCP (figure 1.19) et un décalage du pic de température de 2 heures a été observé.



Figure 1.18. Schéma des cellules

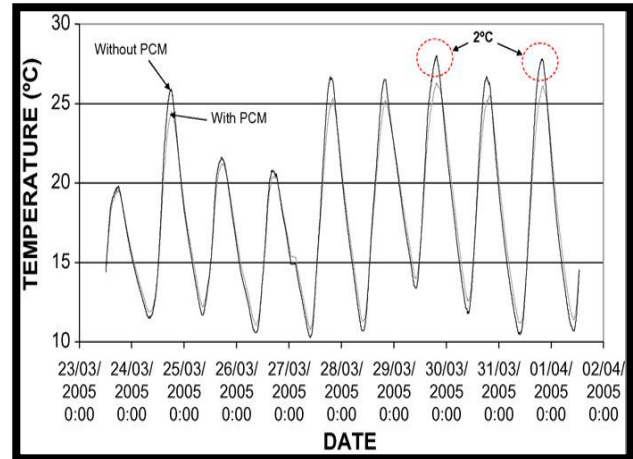


Figure 1.19. Température de mur sud dans les deux cellules

Les références [144] et [145] n'ont pas déterminé nettement si la quantité de diminution de la fluctuation de la température est due à la réduction de la conductivité thermique ou bien à l'augmentation de la capacité de stockage de la chaleur dans le béton avec MCP. En outre, dans [144] et [145] la température diurne varie d'une très faible à une très haute température. Ces grandes variations de température ne pourraient pas être acceptables dans un bâtiment réel et donc la masse thermique des cellules ne serait activée que dans un cadre expérimental présenté ci-dessus. Hasan et al. [146], ont étudié expérimentalement dans un climat extrêmement chaud l'effet du point de fusion et de l'emplacement de MCP, introduit dans un bloc de béton isolé sur la performance de refroidissement, par rapport à un bloc standard sans MCP (figure 1.20). Le MCP RT42 commercial à base de paraffine a été fondu et rempli dans un conteneur en polymère. Les résultats montrent que l'utilisation de blocs de béton avec MCP réduit les charges de refroidissement. L'emplacement du MCP et la couche d'isolation dans le côté intérieur a montré une meilleure performance par comparaison avec celle située près du côté extérieur où la réduction du gain de chaleur était de 44% par le bloc B et de 10,5% par le bloc C sur 24 heures par rapport au bloc A (figure 1.21).



Figure 1.20. Schéma des blocs de béton, avec des couches de construction et la chambre d'essai

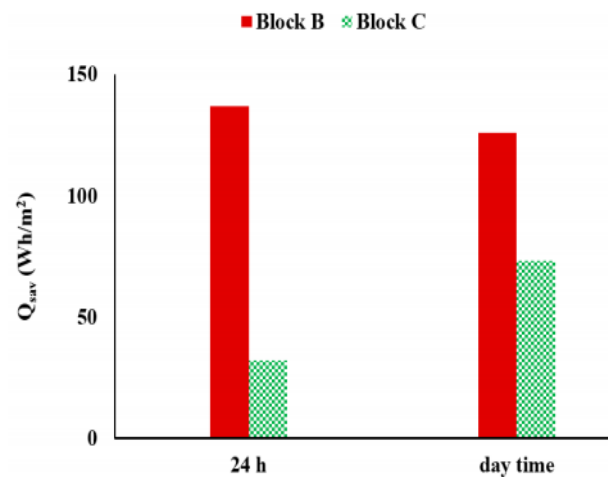


Figure 1.21. Réduction moyenne de la charge de refroidissement obtenue par le bloc « B » et le bloc « C » par rapport au bloc de référence « A » pendant 24 heures

L'objectif principal du travail présenté dans [147] était de surmonter le problème en augmentant le temps de fonctionnement des MCP et en améliorant le confort thermique. Des ouvertures conçues ont été placées dans les cabines d'essais pour diminuer les températures élevées. Les résultats trouvés ont montré que les températures ont été légèrement réduites et que les MCP sont restés actifs pendant au moins 4% de plus du temps (figure 1.22). Ce problème de température élevée n'a pas été résolu.

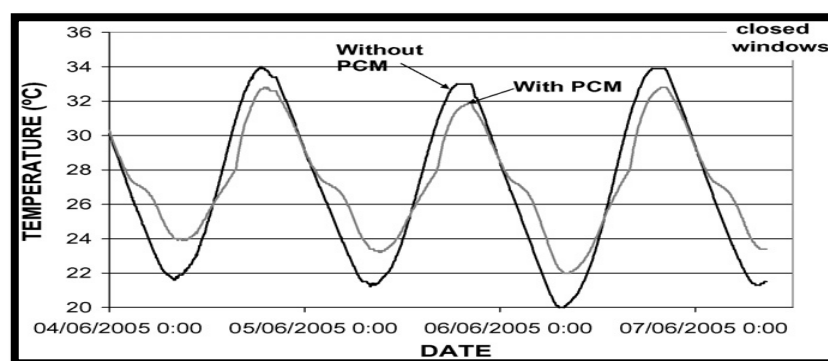


Figure 1.22. Détail de la température des murs orientés vers le sud avec des ouvertures

Shi et al. [148] ont étudié l'influence de MCP dans les murs de béton sur la température intérieure et l'humidité relative, par des modèles de pièces en conditions réelles. Ils ont conclu que l'incorporation du MCP dans les murs de béton pourrait ajuster la température intérieure et les niveaux d'humidité, alors que l'efficacité

dépendait grandement de la position du MCP dans les murs. Lorsque le MCP a été stratifié dans le mur de béton, il a montré une meilleure capacité de régulation de la température et était efficace pour réduire la température maximale de 1.1-4.1°C pendant la journée et augmenter la température minimale de 0.3-0.8 à 1° C pendant la nuit (figure 1.23). En outre, le modèle avec MCP placé sur le côté intérieur des murs en béton présentait un meilleur contrôle de l'humidité relative, ce qui réduit l'humidité relative jusqu'à 19,7%.

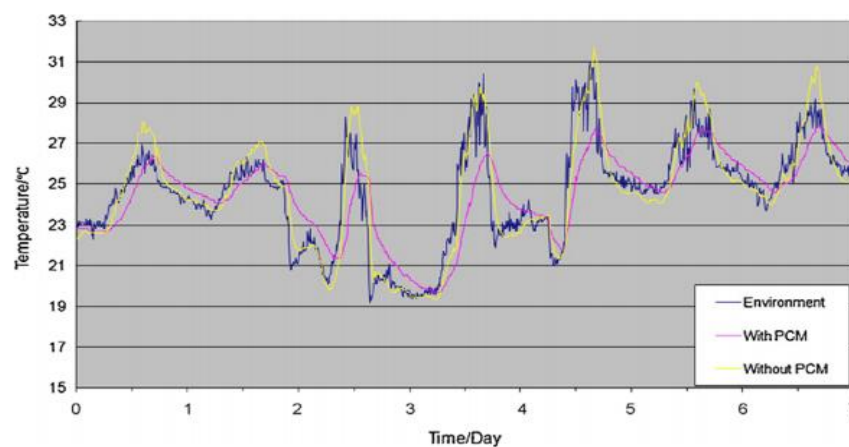


Figure 1.23. Courbes de température intérieure d'un mur en béton

1.5.2.3 L'intégration du MCP dans la brique :

Presque aucun travail n'a été fait sur les solutions constructives en briques jusqu'à 2008 la seule étude est présentée dans [149]. L'incorporation des MCP dans la brique a été étudiée numériquement et les résultats obtenus indiquent la réduction du flux de chaleur en été dans l'espace ambiant. Cependant, ce modèle numérique n'a pas été validé et aucun travail expérimental effectué jusqu'à celui-ci mentionné dans [125] dans lequel plusieurs cellules ont été construites de briques conventionnelles et de briques alvéolaires (figure 1.24). Deux types de MCP (RT27 et SP25 A8) macro encapsulée ont été ajoutés respectivement dans une brique classique et une brique alvéolaire en étudiant leur comportement thermique.

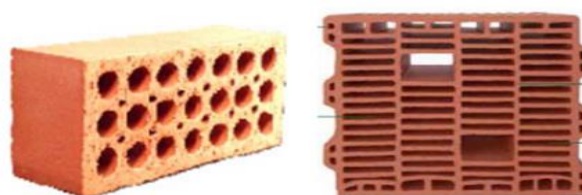


Figure 1.24. Gauche : Brique creuse conventionnelle ; Droite : Brique alvéolaire

Quatre cellules ont été construites dans PUGVERD LLEIDA en Espagne (climat continental typiquement espagnol avec des hivers froids, des étés chauds et d'importantes variations de températures entre le jour et la nuit).

- Cellule de référence (figure 1.25.a) : brique creuse ordinaire sans isolation
- Cellule polyuréthane (P.U) (figure 1.25.b) : 5cm de polyuréthane pulvérisé entre deux couches de briques.
- Cellule MCP (RT27 +PU) (figure 1.25.c) : 5cm de polyuréthane pulvérisé entre deux couches de briques plus une couche supplémentaire de paraffine RT27.
- Cellule MCP (SP25+brique alvéolaire) (figure 1.25.d) : panneau CSM avec hydrate de sel SP25 A8 situé à l'intérieur de la cabine entre les briques alvéolaires et les plaques en plâtre.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 1.25. Quatre cellules testées dans PUGVERD LLEIDA en Espagne

Les MCP testés ont été conçus pour des applications de refroidissement pendant l'expérience, deux configurations différentes ont été réalisées :

- Température libre : une cellule non dotée d'un système de refroidissement avec étude comparative de la température (avec et sans MCP)

- Température contrôlée : une cellule dotée d'une pompe à chaleur pour garder la température à l'intérieur constante 24 °C et une étude comparative entre la consommation d'énergie nécessaire pour le fonctionnement de la pompe à chaleur avec et sans MCP.

Pour la première expérience (température libre) : Les résultats montrent que la température maximale a été réduite de 1°C avec des conditions plus constantes dans les cellules avec MCP. L'effet de MCP est clairement visible dans toutes les configurations constructives, mais surtout dans la cellule avec brique alvéolaire où la résistance thermique est plus élevée. Dans les deux cellules, MCP (RT-27 et SP-25A8), ils ont trouvé que la température se situe presque dans la plage de fusion pendant toute l'expérience. Cependant, certains problèmes ont été observés avec la solidification du MCP pendant la nuit, puisque aucun système de ventilation pour le MCP n'a été installé. Ainsi, il en résulte que la stratégie du refroidissement (naturelle ou mécanique) doit être définie pour améliorer les performances des MCP. Quant à la deuxième expérience avec température contrôlée, l'énergie accumulée par la pompe à chaleur a été significativement plus élevée dans la cellule de référence par rapport aux trois autres restantes. La cellule RT27 plus PU a atteint une réduction de 15% par rapport à la cellule de PU, tandis que la cellule de MCP SP25 A8 plus la brique alvéolaire a enregistré 17% d'économie par rapport à celle de référence (figure 1.26).

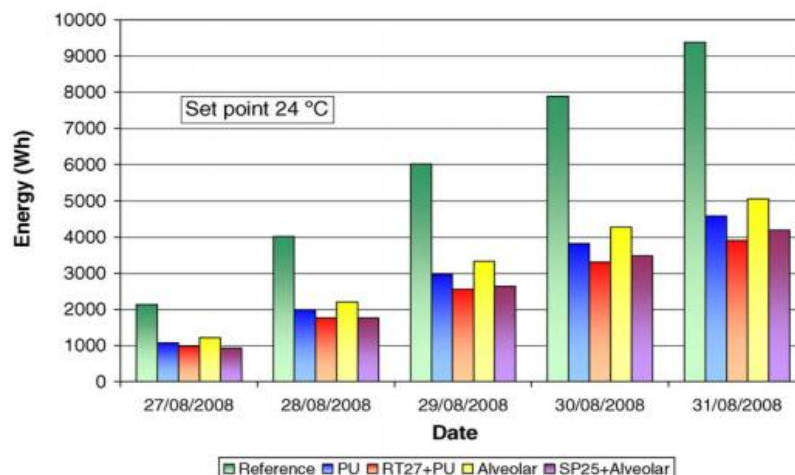


Figure 1.26. Comparaison de la réduction d'énergie dans les quatre cellules

Une analyse numérique de la réponse thermique d'un mur de briques avec MCP sous une température extérieure fluctuante a été réalisée à l'aide d'un modèle de conduction thermique accompagné de procédés de solidification et de fusion basé sur la technique enthalpie-porosité [150]. La température intérieure a été simulée en

fonction des températures extérieures données dans différents cas. Il a été conclu que la capacité de stockage thermique du mur avec MCP était élevée par rapport au mur de briques massives commun (figure 1.27). Alawadhi [151] a effectué une analyse bidimensionnelle sur une brique creuse de dimensions 0,25 m x 0,15 m x 0,15 m avec plusieurs trous cylindriques remplis de MCP organiques, soit : n-octadécane, n-eicosane et P116. Il a observé que le n-eicosane rempli dans trois trous cylindriques a contribué à une réduction de 17,55% du flux de chaleur à la surface intérieure de la brique. L'augmentation de la quantité de MCP a amélioré les résultats, mais des précautions sont à prendre dans la quantité du MCP à ajouter afin de ne pas diminuer la résistance de la brique.

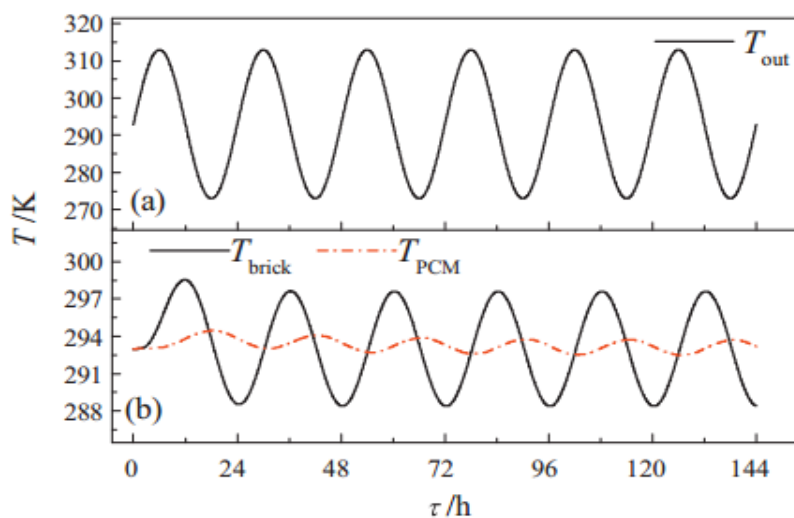


Figure 1.27. Effet du remplissage du MCP sur la réponse de la température du mur intérieur : (a) la fluctuation de la température extérieure, (b) la réponse de la température intérieure pour le mur de briques solides et avec MCP

Récemment [152] a effectué et élaboré des tests expérimentaux sur la brique creuse avec MCP. L'objectif de la recherche était de dévoiler la possibilité des MCP comme solution passive, en diminuant les variations des températures internes. Les résultats expérimentaux ont été aussi utilisés pour valider le modèle numérique développé. Le MCP choisi dans l'expérience a été la paraffine RT18 avec température de fusion 18 °C. Deux échantillons de mur en brique d'argile classique le premier construit avec MCP macro encapsulé et le deuxième sans MCP (figure 1.28). Ces deux échantillons de mur ont été testés en utilisant une chambre climatique dont un côté de spécimen a été soumis aux conditions externes et l'autre côté a été laissé à l'état libre (figure 1.29). Un décalage de diffusion de la chaleur de 3 heures dans le mur avec

MCP par rapport au deuxième mur a été enregistré. La deuxième constatation, l'amplitude thermique a été réduite de 10 °C (mur sans MCP) à 5 °C (mur avec MCP). Bien que les recherches expérimentales aient prouvées que le MCP aide à réduire les fluctuations de température intérieure et à augmenter le déphasage du temps dû à son application dans les murs en briques, le défi pour activer efficacement les MCP dans ces murs serait leur conductivité thermique relativement faible. Les surfaces vides dans les briques sont remplies presque toujours d'air ce qui offre une excellente propriété d'isolation. En outre l'application de cette technologie serait plutôt recommandée dans les climats chauds (climats méditerranéens ou aucune isolation externe supplémentaire n'est appliquée sur les côtés externes).

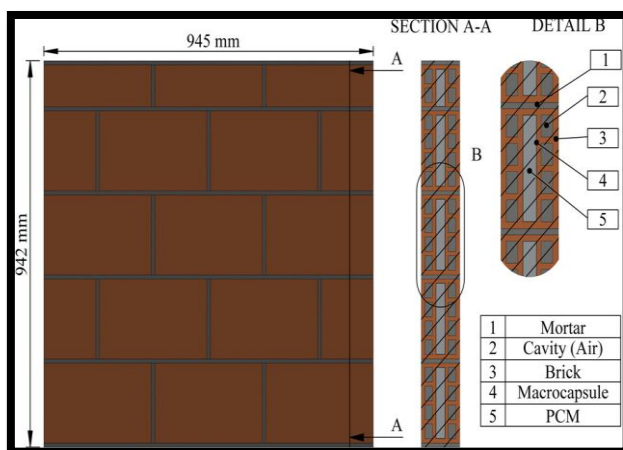


Figure 1.28. Système de configuration

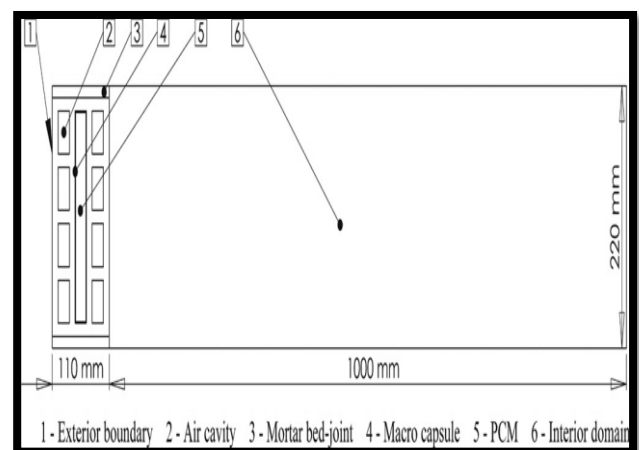


Figure 1.29. Domaines et les dimensions des modèles numériques

1.5.2.4 L'intégration du MCP avec d'autres matériaux :

Deux conséquences découlent du mixage entre le MCP et d'autres matériaux qui ne représentent que la chaleur sensible. D'une part si les matériaux composites ont une forte conductivité thermique, l'activation de la masse thermique est plus rapide et plus efficace ce qui avantage le stockage de l'énergie thermique. D'autre part la capacité volumétrique du stockage de la chaleur est réduite en raison du remplacement d'une partie de stockage de la chaleur sensible par les MCP. Par conséquent, la conception du mélange entre la proportion de nouveau composite avec le MCP doit toujours être adaptée à leur application et à leur conception en respectant l'économie de l'énergie [153].

Une tuile avec MCP pour l'application dans le bâtiment a été testée expérimentalement par [154] (figure 1.30). L'article présente la conception et le

développement de la tuile et la méthode expérimentale pour tester ces performances. Les tuiles développées ont été expérimentées sur une période de 60 jours placées sur un seul côté d'une maison solaire située à Madrid en Espagne et dont la porte fenêtre se trouve vers le sud. Il a été observé que les résultats les plus performants ont été obtenus par les tuiles les plus proches de la porte fenêtre là où ils étaient le plus exposés au rayonnement solaire. Par contre leurs emplacements plus loin de la fenêtre présentait un effet très faible. Pour conclure on peut avancer que l'emplacement des tuiles devrait être limité à la partie du plancher exposé au rayonnement solaire direct.

Référence [155] présente des essais expérimentaux sur un produit composite MCP/polymère fabriqué par la société Energain® du Pont de Nemours (figure 1.31) qui contient 60% de paraffine micro encapsulée. La conductivité a été mesurée en utilisant un appareil de plaque chaude graduée, sa valeur à l'état liquide était de 0.22 W/m.K et à l'état solide 0.18 W/m.K. L'enthalpie de ce produit composite a été mesurée par la méthode DSC.

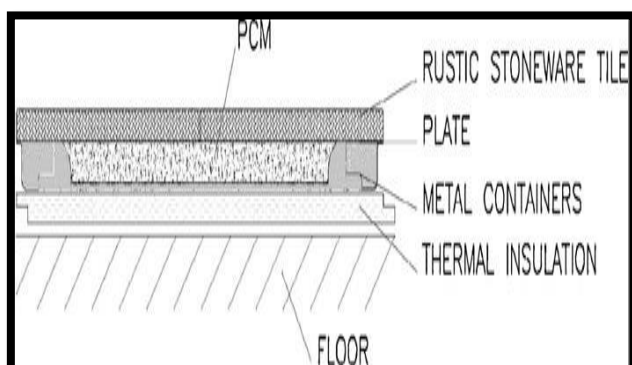


Figure 1.30. Section du prototype

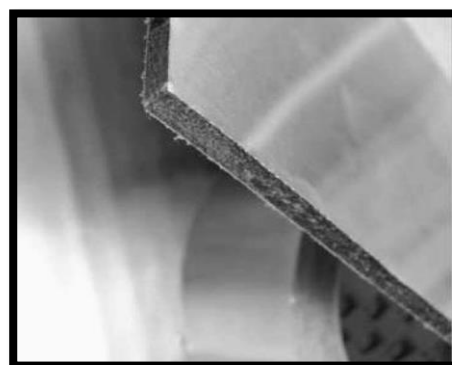


Figure 1.31. Produit Energain® du Pont de Nemours

Le pic de température de fusion a été enregistré à 22.2 °C et le pic de solidification à 17.8 °C. Les panneaux composites ont été placés dans des cavités d'essais spécialement conçues. La salle d'essai était équipée par des thermocouples avec une température stabilisée à 22 °C par un simulateur solaire situé dans la chambre climatique et qui a été attaché à la pièce d'essai afin de simuler les conditions thermiques externes. Cette chambre climatique a été séparée de la salle d'essai par une façade en verre (figure 1.32). La température à l'intérieure de celle-ci peut varier entre 10 °C et 40 °C, et peut être contrôlée de manière dynamique de sorte que toute évolution peut être générée. Au niveau de cette recherche trois types de tests ont été

réalisés. Pour une journée d'été la température dans la chambre climatique varie entre 15 °C et 30 °C avec un refroidissement nocturne pour améliorer les effets de stockage/déstockage dans les MCP. Pour une journée mi saison la température dans la chambre climatique varie entre 10 °C et 18 °C. Pour une journée d'hiver dans la chambre climatique la température varie entre 5 °C et 15 °C. Un système de chauffage dans la salle de test a été activé lorsque la température chutait en dessous de 20 °C. Dans tous ces cas testés le flux solaire est resté constant. Sur la base des résultats obtenus, les chercheurs ont conclu que le composite MCP présente une solution efficace pour la construction dans le but d'améliorer le confort thermique humain pour les trois raisons suivantes :

- Les MCP inclus dans les murs ont réduit l'effet de sur chauffage et l'énergie stockée a été libérée dans la salle lorsque la température était minimale.
- Les pics de température dans la surface de la paroi ont été amoindris.
- La variation de la température ambiante dans les chambres avec MCP n'a pas été observée par rapport à celle de référence (sans MCP).

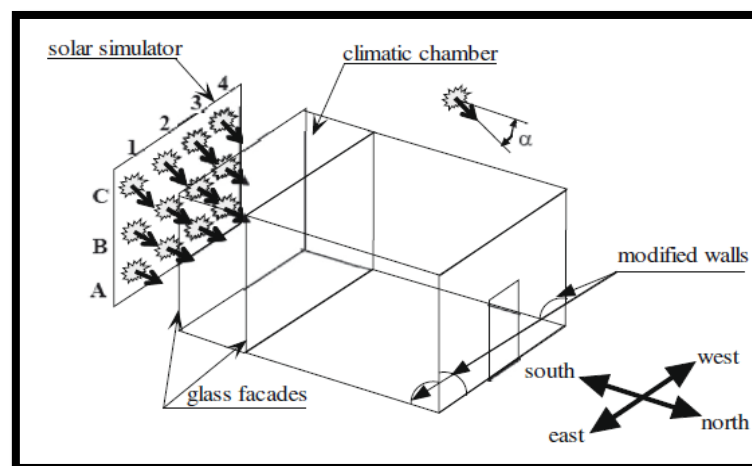


Figure 1.32. Schéma isométrique de la cellule de test avec 12 projecteurs – les localisations des parois modifiées

Récemment, Sari et al. [156] ont créé un type de MCP composite et ont déterminé ses propriétés de chaleur. Cela englobe le polyéthylène glycol (PEG 600) servant de base MCP avec de l'argile naturelle et du gypse. Le taux d'absorption optimal pour le PEG 600 dans les composites à base d'argile naturelle et de gypse était de 22% pd. % et 18% pd. Le test de cycle thermique indique que la stabilité chimique et thermique du matériau est excellente. En outre, le matériau a présenté des performances remarquables en termes de chauffage et de refroidissement. Yan et al.

[157] ont étudié les performances thermiques d'un panneau de mortier en ciment incorporé par un composite HDPE / paraffine avec différents pourcentages massiques à savoir 0, 5%, 10% et 15%. Il a été souligné que le décrétement de température ainsi que le flux de chaleur augmentent significativement avec l'addition croissante du MCP composite. Une autre approche pour incorporer le MCP dans les murs consiste en un mélange avec des matériaux d'isolation. Ce concept a été examiné par Yang et al. [158], qui ont montré que les avantages conjoints de la capacité de stockage du MCP et les performances d'isolation des mousses polyuréthanes présentent un grand potentiel pour promouvoir l'efficacité énergétique dans les bâtiments, mais des recherches sont encore nécessaires pour améliorer ce composite.

1.5.2.5 MCP à forme stabilisée

Dans un MCP de forme stable, l'idée principale est d'améliorer la surface de contact du MCP avec l'espace extérieur en moulant le MCP dans une forme requise où le rapport surface/volume est plus élevé ce qui augmente le taux de transfert de chaleur sans avoir à utiliser l'encapsulation. Kuznik et al. [159] expliquent que la préparation du MCP à forme stabilisée se compose d'un mélange de MCP liquide et d'un matériau de support, jusqu'à ce qu'il devienne solide. Les matériaux de support les plus courants utilisés dans la littérature sont le polyéthylène à haute densité (HDPE) et le styrène butadiène-styrène (SBS). Zhang, Lin, Yang, Di et Jiang [160] rapportent que le MCP se mélange mieux dans le SBS que dans le HDPE, mais le MCP à forme stabilisé rend plus rigide lors de l'utilisation de HDPE. Ce qui favorise ce type de MCP à forme stabilisée est leur capacité à effectuer efficacement plusieurs cycles de chaleur dans une longue durée, la capacité de maintenir la forme de MCP stabilisée dans le processus de transition de phase et la conductivité thermique idéale [161]. Selon Zhang et al. [162], le MCP à forme stabilisée peut être utilisé comme système de stockage thermique effectif, car il peut être préparé facilement sans inclure d'autres gadgets spéciaux ou conteneurs pour l'encapsulation du MCP comme indiqué dans la figure 1.33. Ahmet [163] a montré qu'aucune fuite du MCP n'a été observée lorsqu'on utilise HDPE en tant que matériau de support. Ces avantages communs pour le MCP à forme stabilisée les rendent bénéfiques pour les bâtiments à énergie intelligente, ou à revêtements intérieurs, par exemple, le plancher, le plafond et les murs intérieurs. Cependant, la conductivité thermique du MCP à forme stabilisée est faible, ce qui constitue toujours un problème majeur pour les systèmes de stockage de chaleur

latente. Zhou et al. [164] ont démontré la performance de la chaleur pour une « salle à gain direct » en utilisant les plaques de MCP à forme stabilisée comme garnitures intérieures. De nombreux aspects influents sur la performance thermique du MCP à forme stabilisée, ainsi que l'épaisseur du panneau, son emplacement, sa chaleur latente et sa température de fusion ont été évalués. Les résultats ont montré que les plaques à MCP sont utiles dans les bâtiments solaires passifs à gain direct. Le MCP à forme stabilisée pour la performance thermique, à l'image de l'épaisseur du panneau, l'emplacement, la chaleur de fusion et la température de fusion sont évalués. Leurs résultats ont montré que les plaques à MCP sont utiles dans des bâtiments solaires passifs à gain direct.

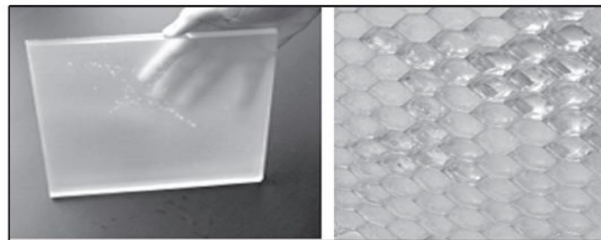


Figure 1.33. Plaque de MCP à forme stabilisé

1.5.3 L'emplacement du MCP intégré dans l'enveloppe du bâtiment

Dans la construction du bâtiment, l'intégration des MCP peut se faire au niveau des murs, du plancher, du sol, des plafonds, et des fenêtres (figure 1.34 et le tableau 1.6 ci-dessous).

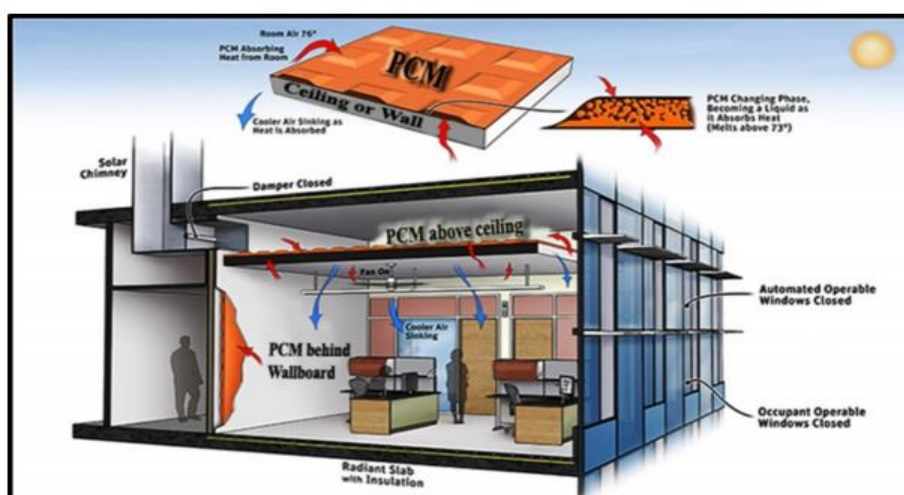


Figure 1.34. L'intégration des MCP dans la structure du bâtiment




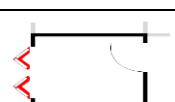
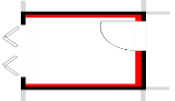

| | |
|---|---|
| Plancher | |
|  | Plancher Chauffant avec MCP : Une couche contenant du matériau à changement de phase est insérée entre le plancher chauffant et la pièce. Le MCP stocke, pendant la période creuse, de la chaleur apportée par le chauffage au sol, et la restitue durant la journée. |
| Parois verticales en contact avec l'extérieur | |
|  | Murs extérieurs avec MCP : MCP ajouté dans les murs du bâtiment peut faire des murs à haute capacité de stockage d'énergie et contribue ainsi à réduire les fluctuations de température intérieure, à réduire les charges de chauffage et de refroidissement et à réduire la consommation d'énergie. De plus, la construction moderne a tendance à être légère. Il serait avantageux d'intégrer les MCP dans les murs du bâtiment |
|  | Mur de Trombe avec MCP : La paroi est constituée de 4 couches, en partant de l'extérieur : un isolant transparent, une lame d'air, le matériau à changement de phase et une couche d'isolant. Pendant la journée, la lame d'air est isolée de la pièce et le rayonnement solaire chauffe le matériau à changement de phase. Pendant la nuit, on ouvre les orifices qui se trouvent en haut et en bas de la paroi. Le MCP crée alors un écoulement convectif qui alimente en air chaud la pièce |
|  | Volets : Le MCP stocke de la chaleur pendant la journée alors que les volets sont ouverts. Une partie de cette chaleur est rayonnée pendant la nuit dans la pièce à travers les fenêtres. |
| Parois verticales intérieures | |
|  | Parois légères : Les parois intérieures verticales de la pièce sont multicouches. L'une de ces couches, disposée au plus proche de l'ambiance intérieure, contient le MCP. |
| Plafond | |
|  | MCP incorporé dans le plafond : Les panneaux constituant le plafond contiennent des MCP. Des réflecteurs peuvent être placés dans les ouvertures de la pièce pour diriger les rayons du soleil vers le plafond. |

Tableau 1.6. Les systèmes passifs de stockage de chaleur latente

1.5.3.1 Murs avec MCP :

Les murs sont très adaptés à l'incorporation de MCP, en raison de leur faible coût et de leur utilisation répandue dans les bâtiments. L'idée d'améliorer le confort thermique intérieur en intégrant les MCP dans les panneaux muraux a toujours été intéressante. Les MCP dans les murs, peuvent être intégrés sous deux formes, soit par leurs incorporations dans les blocs de construction (déjà détaillé au-dessus), soit sous forme de panneaux muraux. La deuxième solution consiste à installer le panneau de MCP comme une ou plusieurs couches qui appartient au mur (figure 1.35). Dans ce cas, le MCP est considéré uniquement comme un panneau mural au lieu d'un mur principal et donc il peut être appliqué comme faisant partie du travail de décoration intérieure après la construction des enveloppes du bâtiment. L'avantage présenté par cette deuxième solution réside dans son efficacité par l'utilisation de certains panneaux

produits en séries par des entreprises tels que les panneaux de gypse avec MCP et également le coût global réduit pour son application [165] (figure 1.36).

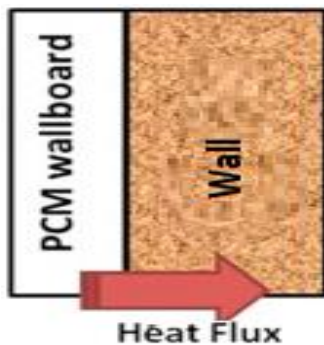


Figure 1.35. Intégration du panneau de MCP Figure 1.36. Panneau de gypse amélioré avec MCP

Récemment, National Gypsum a produit des panneaux muraux ayant un MCP mirconal, similaire à ceux fabriqués par BASF [20]. Ces panneaux connus sous le nom de « National Gypsum Thermal CORE Panel » contiennent une capacité latente de 22 BTU/ft² et un point de fusion de 23 ° C comme illustré dans la figure 1.37.

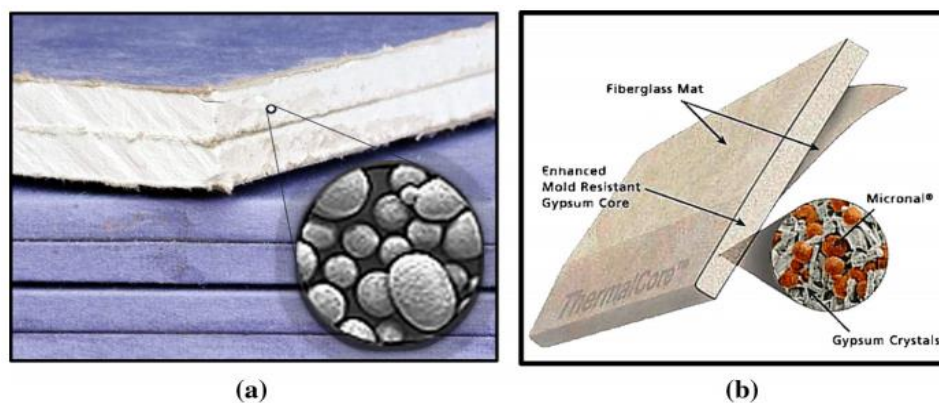


Figure 1.37. (a) Panneau mural en gypse avec microcapsule du MCP (BASF) et (b) plaques de plâtre avec MCP (National Gypsum)

Gowreesunker et Tassou [166] ont construit une cellule de tests pour étudier les performances thermiques des panneaux muraux avec MCP pendant les mois d'été. Leurs résultats ont montré que, comparativement à la plaque de plâtre conventionnelle, la température ambiante pourrait être réduite jusqu'à 3°C dans la température maximale et le sur chauffage pendant les mois d'été a été minimisé. Izquierdo-Barrientos et al [167] ont examiné numériquement le transfert thermique transitoire, sur une paroi extérieure d'un bâtiment ayant une couche MCP pour deux périodes séparées (6 jours en été et 6 jours en hiver). Dans les deux scénarios et afin de déterminer les paramètres optimaux qui conduisent à réduire les fluctuations d'énergie, ils ont varié la température

de transition de phase, la position du MCP dans la paroi et l'orientation du mur. Les résultats de ce travail ont révélé qu'il n'y a pas de température optimale définie qui minimise la charge thermique à travers le mur. Dans les conditions utilisées dans ce travail, cette température est comprise entre 5 ° C et 35 ° C, selon la saison, l'orientation de la paroi et l'emplacement de la couche de MCP. De plus, les résultats ont révélé qu'il n'y a pas de réduction significative de la perte totale de chaleur en hiver, quelle que soit l'orientation du mur ou la température de transition du MCP. Des différences plus élevées ont été observées dans la chaleur acquise durant la période estivale, en raison des flux élevés au rayonnement solaire. L'inertie thermique élevée du mur implique que l'inclusion d'une couche de MCP augmente la charge thermique pendant la journée et la diminue pendant la nuit. L'emplacement du MCP dans le bâtiment est d'une grande importance pour la performance optimale du système. Il affectera le cycle thermique de changement de phase et l'amélioration des performances thermiques du système [168,169]. Les MCP intégrés dans les murs sont généralement placés à proximité de l'espace intérieur [170-175].

Le mur de Trombe est un exemple de gains indirects du chauffage passif qui a été testé expérimentalement et théoriquement avec l'intégration de MCP. Le principe de fonctionnement d'un mur de Trombe est basé sur le stockage de chaleur sensible. Un simple ou double vitrage est habituellement placé sur la surface extérieure du module de stockage de chaleur massive avec une mince couche de lame d'air séparant ces deux matériaux. La surface extérieure de la partie de stockage de chaleur est généralement peinte en noir de manière à absorber l'énergie solaire, qui est ensuite stockée et conduite à travers le mur au cours de la journée. Lorsque la température interne se dégrade en hiver ou bien pendant la nuit, la demande en énergie augmente-en besoin de chauffage et c'est à ce niveau que la chaleur du stockage mural se libère en diminuant les charges de chauffage. À l'origine, les murs Trombe ont été construits en utilisant de la maçonnerie ou de l'eau pour fournir la capacité de stockage de chaleur sensible appropriée. Cela nécessite de grandes surfaces pour construire les murs. Pour cette raison, le plus grand stockage de chaleur par unité de masse fournie par les MCP est considéré comme la propriété idéale qui peut être incorporée dans les systèmes existants et optimiser l'espace pour d'autres utilisations pratiques (figure 1.38). Les parois minces de MCP sont également beaucoup plus légères en comparaison avec les matériaux traditionnels de béton et de maçonnerie. Ces facteurs offrent une commodité

et des réductions intéressantes des coûts de construction associés à la construction de nouveaux bâtiments et à leurs applications de rénovation [176].

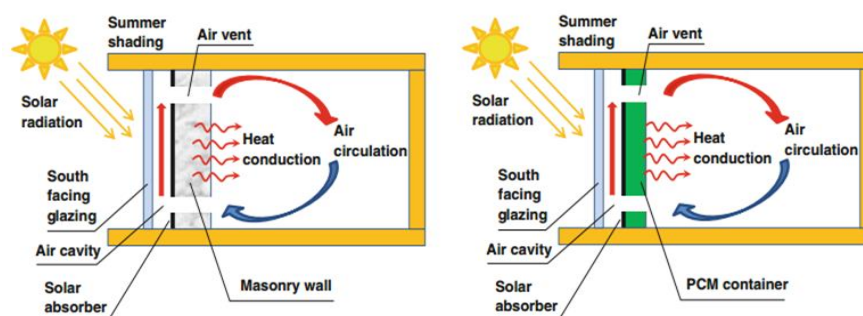


Figure 1.38. Schéma du mur de Trombe conventionnel et du mur de Trombe amélioré par MCP

A propos du mur de trombe, Zalewski et al. [177] ont testé la capacité de stockage thermique et le comportement dynamique d'une paroi solaire composite à petite échelle de Trombe, avec des sels hydratés sous forme de MCP, sous la forme d'un emballage en forme de brique, dans les conditions météorologiques réelles (figure 1.39). Les mesures de la température et du flux de chaleur ont démontré que le MCP pouvait stocker plus de chaleur que le même volume de béton et le libérer pendant la nuit avec un décalage horaire.

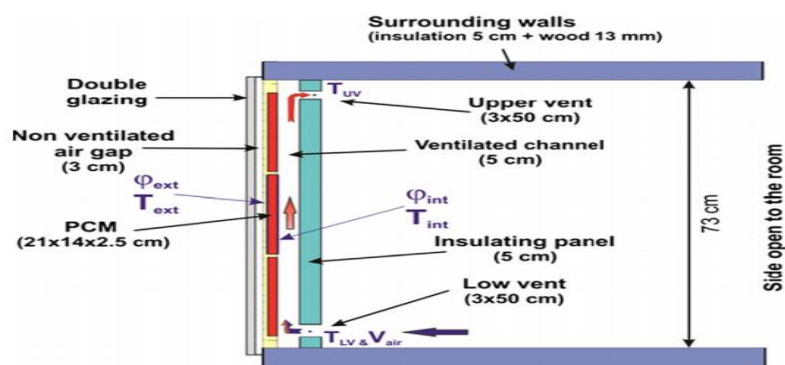


Figure 1.39. Coupe verticale du mur de Trombe avec MCP

1.5.3.2 Les plafonds et les planchers de sol avec MCP :

Bien que l'intégration des MCP dans les composants de bâtiment soit étudiée dans de nombreuses études, ces composants ont été essentiellement consacrés aux murs. Selon les informations recueillies, l'intégration dans les planchers ou les plafonds a rarement été étudiée [178-181]. Les panneaux de plafond sont une partie importante de la toiture, ils sont utilisés pour le chauffage et le refroidissement dans un bâtiment et peuvent être utilisés dans un système de stockage passif ou un système de stockage

actif. On peut également utiliser une toiture de bâtiment contenant du MCP qui permet à ce dernier de se dilater lors de la fusion sans affecter la structure du toit. EM Alawadhi et HJ Alqallaf [182], ont étudié un toit de bâtiment avec des trous coniques contenant du MCP pour réduire les charges de refroidissement en absorbant l'énergie pénétrante à travers la toiture par le processus de fusion (figure 1.40). Les résultats indiquent que le flux de chaleur à la surface intérieure du toit peut être réduit jusqu'à 39% lorsque le MCP est introduit. Les mêmes auteurs ont effectué une autre analyse thermique sur une toiture de bâtiment conventionnel en béton mais cette fois ci avec des trous cylindriques remplis de MCP (figure 1.41). L'objectif recherché est de réduire le flux de chaleur de l'extérieur vers l'espace intérieur en augmentant la masse thermique du toit [183].

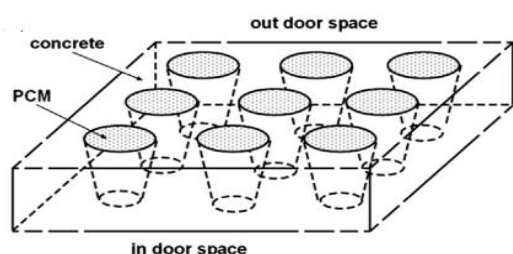


Figure 1.40. Représentation schématique du toit avec des trous coniques remplis de MCP

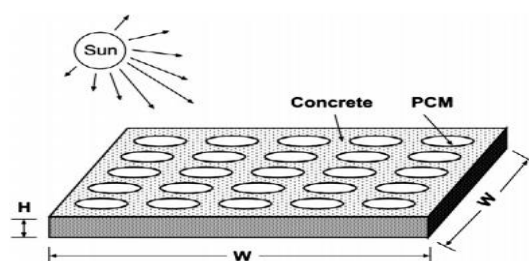


Figure 1.41. Représentation schématique du toit avec des trous cylindriques remplis de MCP

Les résultats dans ce cas ont montré que le flux de chaleur à la surface intérieure du toit est réduit entre 9% et 17,26%, en fonction du MCP sélectionné, des heures de travail et du mois d'exploitation (figure 1.42).

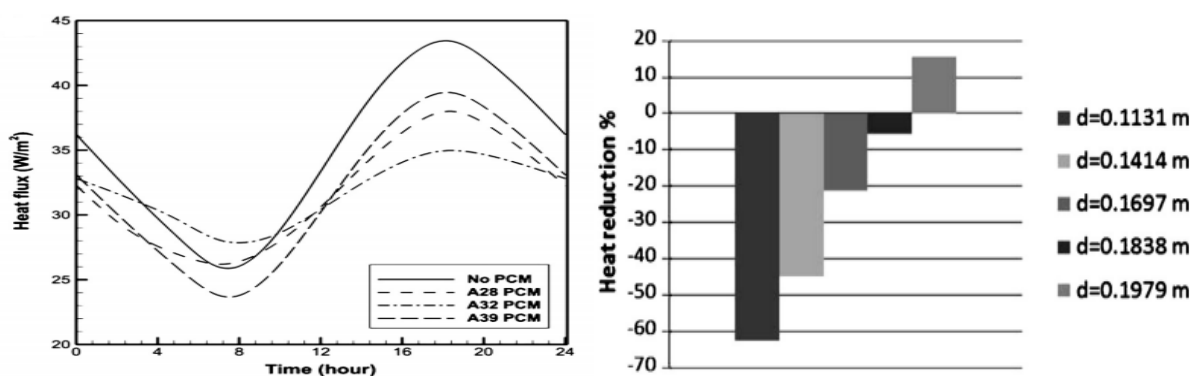


Figure 1.42. Droite : le pourcentage de réduction du flux de chaleur pendant les heures de travail 12h-17h ; Gauche : la variation horaire du flux de chaleur sur la surface intérieure pour différents diamètres de cylindres MCP, pour le mois de juillet et pour le MCP de type A39

Le transfert de chaleur à travers la toiture avec MCP est analysé numériquement par Ravikumar et Srinivasan [184]. Trois différentes toitures ont été sélectionnées dans cette étude (figures 1.43).

- Toiture en béton armé
- Toit en béton armé plus une couche pour résister aux intempéries
- Toit en béton armé plus une couche avec MCP

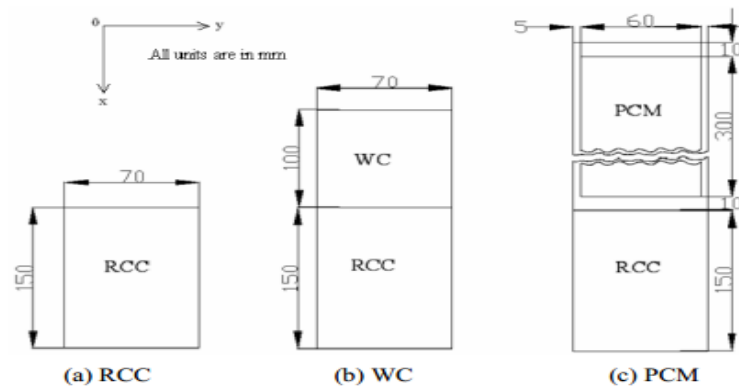


Figure 1.43. Trois différentes toitures sélectionnées

Grâce à un meilleur amortissement fourni par le MCP, le toit avec MCP offre la température de surface la plus basse tout au long de l'année par rapport aux toitures WC et RCC. Sur une base annuelle, environ 56% de réduction de la transmission de la chaleur dans la pièce est obtenue dans le cas de MCP par rapport aux autres toitures traditionnelles (figure 1.44).

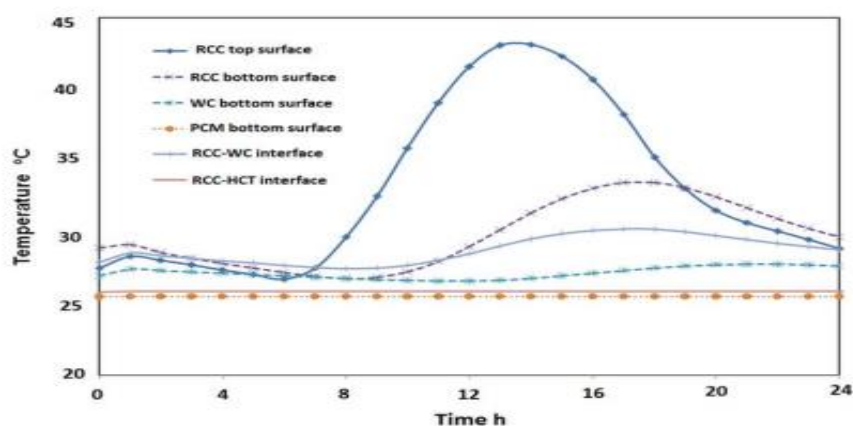


Figure 1.44. Variation de l'interface et de la température de la surface du fond sur une journée du 15 juillet

Du point de vue de la conception, les applications de refroidissement de MCP dans les plafonds sont soit un système passif naturel (figure 1.45), soit à l'aide d'un

système actif par l'intermédiaire de systèmes de conditionnement d'air dynamique plus complexe à savoir les systèmes hydrauliques, les échangeurs de chaleur à micro-tubes et les canaux d'air (figure 1.46). Pasupathy et al. [185] ont réalisé l'étude théorique et expérimentale sur la performance thermique d'un toit de bâtiment incorporé avec MCP, pour la conservation de l'énergie thermique basée sur le climat de la ville de Chennai. La salle d'essai avec des panneaux MCP sur le toit a été construite et ses performances thermiques ont été mesurées. L'introduction de MCP a contribué à réduire la fluctuation de la température dans la pièce MCP et à atteindre une température constante au plafond de décembre à avril ; Néanmoins, il a eu un effet négatif (Augmentation de la température de la toiture) pendant l'été. Une optimisation a été effectuée par la suite, en incorporant un autre panneau supplémentaire aux MCP avec une température de fusion plus élevée (6-7 °C) [186]. Selon les résultats, le MCP à double couche était utile pour maintenir une température confortable et constante tout au long de la journée et pour toutes les saisons.

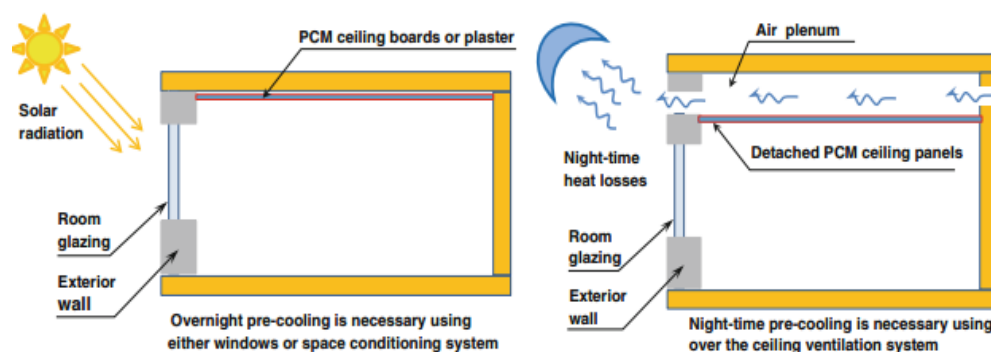


Figure 1.45. Applications passives de systèmes de plafond amélioré par MCP

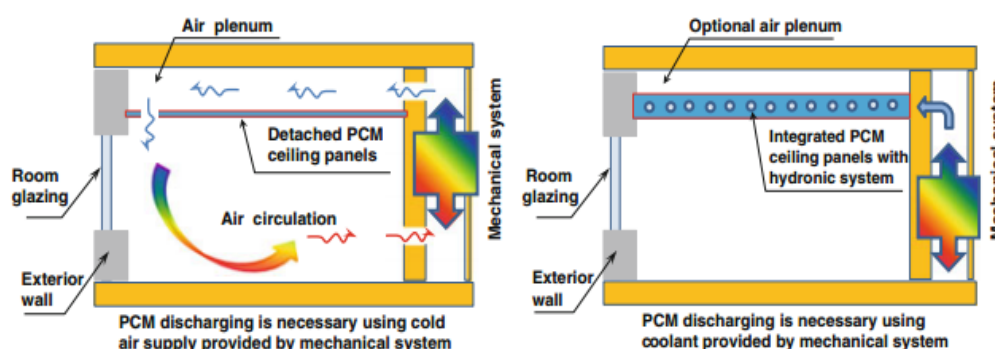


Figure 1.46. Applications actives de systèmes de plafond amélioré par MCP

Stritih et Butala [187] ont mené une expérience qui a analysé le refroidissement d'un bâtiment en utilisant un plafond imprégné de paraffine (avec un point de fusion de 22 °C), comme l'illustre la figure 1.47. Le refroidissement du MCP pendant la nuit a été surveillé pendant une semaine et il a été constaté que pendant cette durée, la quantité d'air frais provenant du MCP est calculée de 0 à 300 min. Le système semble idéal pour fournir des conditions de refroidissement dans les bâtiments. Les systèmes de chauffage du plancher au sol sont en mesure de donner des avantages économiques importants car ils peuvent être chargés en utilisant de l'électricité nocturne et déchargent la chaleur stockée pendant la journée pour atteindre un changement de consommation d'électricité de la période de pointe vers la période hors pointe. Dans le cadre d'un projet de recherche réalisé par l'Université de Twente, aux Pays-Bas, une série d'expériences a été axée sur l'addition du MCP dans un plancher de sol en béton (figure 1.48) [188]. Le résultat de cette étude a démontré que les planchers de sol améliorés par MCP peuvent perfectionnés considérablement par le confort thermique intérieur dans les pièces orientées vers le sud. Il a été enregistré durant l'été que dans les sols en béton contenant du MCP, la température maximale du plancher était réduite jusqu'à $16\text{ °C} \pm 2\%$ par rapport à des assemblages similaires sans MCP. Pour les mois d'hiver, une augmentation des températures minimales du plancher jusqu'à $7\text{ °C} \pm 3\%$ a été signalée.

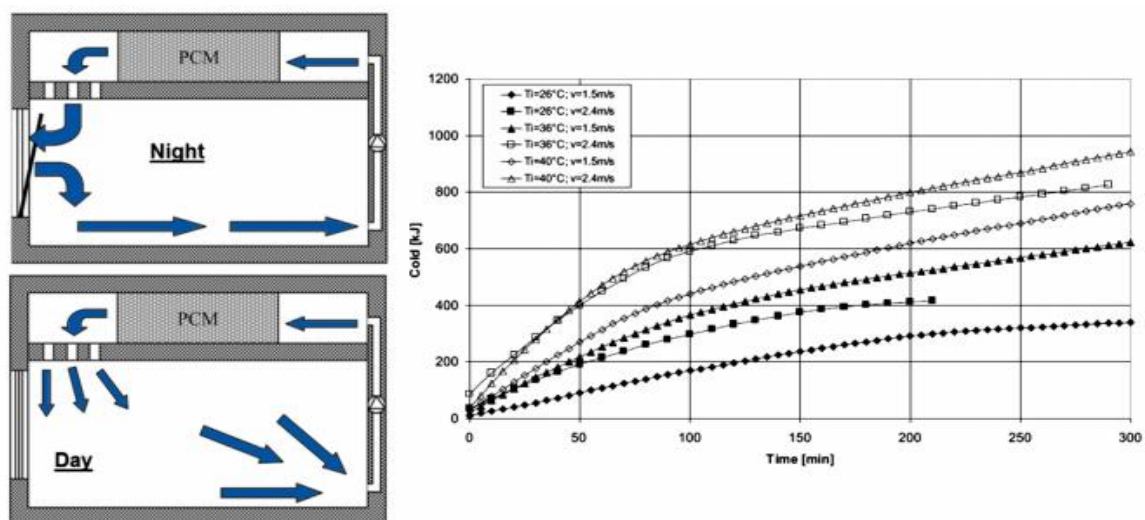


Figure 1.47. Bâtiment avec panneau de plafond imprégné de paraffine



Figure 1.48. Test de cellules utilisées par l'Université de Twente, aux Pays-Bas, pour tester le plancher de sol avec MCP

Jin et al. [189] ont présenté un nouveau plancher à MCP à double couche (deux couches de MCP entre la couche de revêtement et la couche de béton), qui a été utilisé pour stocker de l'énergie thermique ou froide pendant la période hors pointe et la relâcher en période de pointe. Leurs analyses numériques ont confirmé que les fluctuations des températures de la surface du sol et les flux de chaleur ont été réduites. De même le système pourrait encore fournir une certaine quantité de chaleur ou d'énergie froide, pendant une longue période après que la pompe à chaleur ou le refroidisseur soit éteint. L'énergie libérée par le sol en période de pointe pourrait être augmentée de 41,1% et de 37,9% pendant le chauffage et le refroidissement en raison des couches incorporées de MCP. Ye et al. [190] ont noté que la température intérieure de la pièce avec le sol MCP était d'environ 15.1°C plus basse pendant la journée et 10°C plus élevée la nuit que celui de la pièce sans MCP pendant les jours ensoleillés. Stamatiadou et al [191] a étudié une dalle de sol améliorée par MCP qui représente un système solaire passif dans le climat d'Athènes, Grèce. Il a été démontré que l'ajout de MCP (paraffine d'une capacité calorifique spécifique de 110 kJ / kg) aux dalles de sol conventionnelles ont un impact positif sur la charge de chauffage, en cas d'exposition directe au rayonnement solaire.

1.5.3.3 Les Fenêtres avec MCP :

La plupart des études et des applications ont porté sur la partie "opaque" de l'enveloppe du bâtiment, tels que les murs, les plafonds et les planchers. Cependant, on devrait s'intéresser encore à la partie « transparente », c'est-à-dire les vitrages de fenêtre. A partir de l'utilisation de l'énergie de la perspective thermique, les fenêtres et les vitrages ne représentent qu'un faible lien entre les conditions internes et externes dans le bâtiment (une résistance thermique beaucoup plus faible que les autres parties

des enveloppes). Dans les climats froids, les fenêtres sont responsables de pertes importantes de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur. Par contre dans les climats chauds, la chaleur expressive qui pénètre à travers les vitrages exige une consommation d'énergie considérable pour le refroidissement. Par conséquent afin de maintenir un ratio élevé de vitrage aux zones opaques, ces types d'enveloppes externes devraient être en mesure de changer leurs propriétés thermiques et optiques et de fournir la meilleure réponse possible aux différentes conditions extérieures. Également les gains solaires, qui doivent être bloqués pour pénétrer dans le bâtiment à travers les enveloppes transparentes pendant les journées d'été, devraient être maximisés en hiver.

Une des technologies récemment étudiées consiste à combiner les MCP avec les constructions de vitrage et avec les composants d'ombrage. Les MCP présentent une grande capacité de chaleur latente et au moment où le rayonnement solaire les expose, il peut surmonter la transition de phase des MCP, qui absorbent une partie de la chaleur solaire, avant qu'elle ne pénètre dans l'enveloppe externe. En outre certains MCP sont translucides et donc la lumière peut être transmise à l'espace intérieur. Une recherche expérimentale et numérique sur un système de chauffage solaire par une paroi extérieure qui a été composée d'un matériau d'isolation transparent et d'un MCP translucide a été publiée dans [192].

Le MCP utilisé (un hydrate de sel disponible dans le marché) a un intervalle de température de fusion de 24 °C à 29 °C. Ce dernier a été emballé dans un récipient en verre. Bien que les chercheurs pensent que les gains d'énergie obtenus par la paroi de prototype soient encourageants, il y aurait une absence de résultats sur la paroi de référence qui pourrait indiquer la performance de la paroi de prototype. Par ailleurs dans [192], les chercheurs présentent une analyse assez profonde sur les propriétés optiques des MCP localisés entre deux couches de verre (figure 1.49). Tous d'abord, une technique de Monte-Carlo a été utilisée pour simuler les comportements optiques des MCP. L'analyse informatique a été suivie par des mesures de transmission spectrale dans l'état solide et liquide du MCP par un spectrophotomètre. Les résultats mesurés ont indiqué que la transmission des MCP à l'état solide est faible par rapport à l'état liquide et cela peut être observé en particulier au niveau des longueurs d'ondes visibles (figure 1.50) tandis que pour les autres longueurs d'ondes la transmission est presque identique pour les deux états des MCP. Les chercheurs ont conclu que l'inconvénient du MCP choisi était une rétrodiffusion du rayonnement solaire à l'état

solide qui provoque une réduction de gain de chaleur et de lumière dans l'espace intérieur. Cependant, pour certains climats cela ne doit pas représenter nécessairement un inconvénient. Ismail et al [193] ont proposé un concept efficace pour les fenêtres en se basant sur l'écoulement du MCP liquide (figure 1.51). La fenêtre est en double vitrage séparé par une lame d'air avec un évent dans le coin supérieur. Les côtés et le fond sont scellés à l'exception de deux trous en bas, qui sont reliés à une pompe et au réservoir du MCP par un tube en plastique. La pompe à son tour est reliée au réservoir qui contient le MCP liquide.



Figure 1.49. Echantillon avec MCP localisé

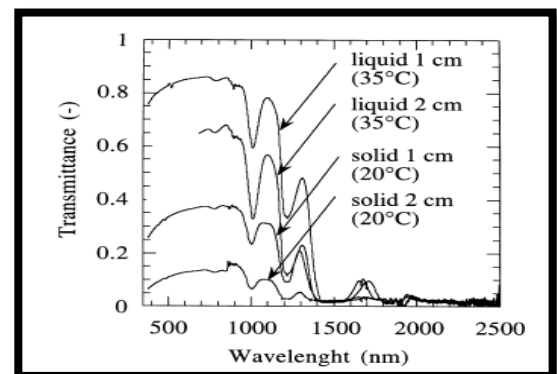


Figure 1.50. Mesure de la transmission spectrale directe de deux échantillons en MCP d'épaisseurs différentes à deux températures

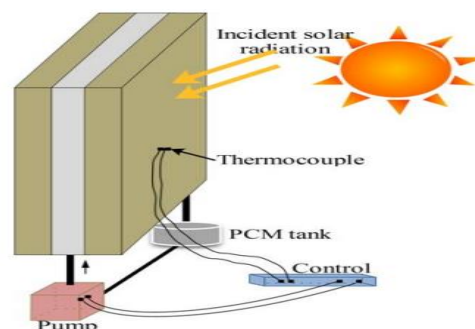


Figure 1.51. Fenêtres en verre remplies de MCP

Le fonctionnement de la pompe est contrôlé par un capteur de température. Lorsque la différence de température atteint une valeur prédéfinie, la pompe est actionnée et le MCP liquide est pompé hors du réservoir pour remplir l'espace entre les vitres. En raison de la température plus basse à la surface externe, le MCP commence à se solidifier, formant une couche solide qui augmente en épaisseur avec le temps et empêche ainsi la température de l'ambiance interne de diminuer. Ce processus continue jusqu'à ce que le MCP devienne solide. Un système de fenêtre avec une bonne

conception assurera que la température externe commencera à augmenter avant la solidification complète du MCP inclus. Ce concept du système de fenêtres est fiable et thermiquement efficace. Le remplissage avec MCP conduit à filtrer le rayonnement thermique et réduit le gain ou les pertes de chaleur car la plus grande partie de l'énergie transférée est absorbée pendant le changement de phase du MCP (figure 1.52). La réduction de l'énergie transmise est de l'ordre de 50%. Ils ont également remarqué que l'augmentation de l'épaisseur de la couche MCP a un effet marginal sur l'énergie transmise du point de vue optique.

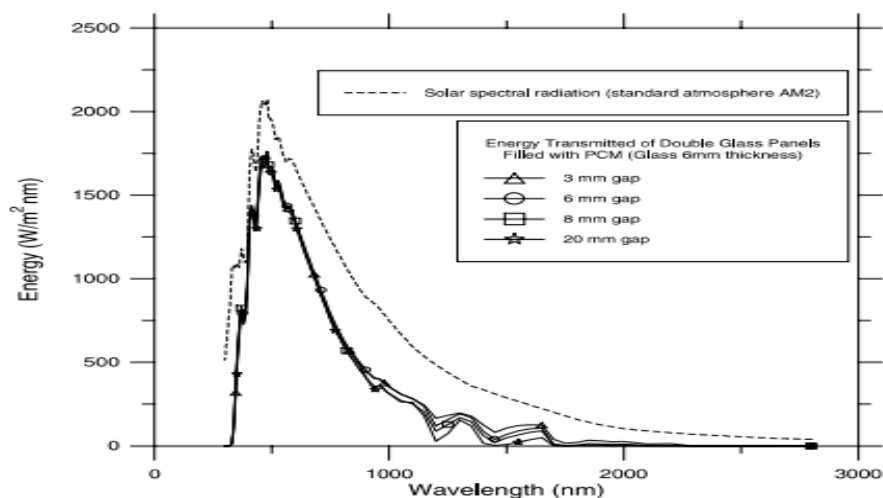


Figure 1.52. Energie transmise à travers un double

Les auteurs de [194] ont fait une recherche expérimentale et numérique sur l'efficacité thermique entre une paroi qui se compose d'un double vitrage avec MCP et une autre paroi avec de l'air. Le nombre de feuilles en verre de différentes épaisseurs et les écarts entre eux ont aussi été étudiés. Les résultats ont révélé que moins d'énergie a été transmise entre les fenêtres avec MCP et celles sans MCP. D'autre part la valeur de U (W/m².K) pour les fenêtres avec MCP était plus élevée que celles des fenêtres aérées, ce qui pourrait entraîner des pertes de chaleurs très élevées dans les climats froids. Dans les panneaux en verre, une double influence de MCP par rapport au remplissage d'air a été détectée pour une longueur d'onde supérieure à 1000 nm. Par contre les MCP purs colorés ont eu la transmission mesurée la plus élevée. Les MCP bleus et verts ont eu significativement le plus faible facteur de transmission pour une longueur d'onde environ 400 à 700 nm. Dans l'article il n'a pas été indiqué si les mesures faites ont été menées pour les deux états des MCP (solide/liquide) ce qui pourrait avoir une influence décisive sur les résultats obtenus. Une comparaison

numérique entre le rendement thermique de deux fenêtres en verre, une remplie avec MCP et l'autre avec un gaz absorbant a été présenté par [195]. Ces fenêtres ont été exposées au rayonnement solaire dans un climat chaud (Brésil). Les résultats indiquent que le MCP filtre le rayonnement solaire et à l'aide du processus de changement de phase, il réduit la quantité de la chaleur pénétrante jusqu'à ce qu'elle soit totalement fondue. Comme dans [193], la valeur de U (W/m.K) augmenté a été en raison de l'addition de MCP dans l'espace entre les vitres.

Les auteurs de [196] ont effectué une étude analytique et expérimentale des façades d'un panneau en verre avec MCP pour l'éclairage de jour et pour le chauffage de la pièce. Les fenêtres à double vitrage combiné avec MCP ont été observées et comparées à une fenêtre de référence. Les pertes de chaleur à travers les panneaux ont été inférieures à 30% dans l'orientation du sud et les gains de chaleur solaire ont été réduits d'environ 50% par rapport à la fenêtre classique. Contrairement aux résultats présentés dans [194] et [195], le calcul de la valeur U (W/m.K) de la fenêtre avec MCP a été plus faible que pour la fenêtre sans MCP et ceci est dû au fait que le panneau avec MCP est ajouté en tant que couche supplémentaire dans la fenêtre au lieu de remplacer le vide d'air entre les deux couches de verres. Les tests ont été effectués sur des fenêtres avec trois types de MCP : RT25, S 27 et L30. Il a été conclu que les panneaux des MCP sont de bons suppléments aux fenêtres classiques dans des endroits où aucun contact visuel avec l'environnement n'est nécessaire. Dans l'article, il a été mentionné qu'ils ont remarqué une fuite dans les conteneurs, en particulier lorsque les sels d'hydrates ont été utilisés. Le MCP utilisé dans le système de protection solaire est très approprié pour être utilisé sous des climats chauds en été, en particulier dans les zones aux fluctuations de température diurnes et nocturnes importantes [197] (figure 1.53). La journée quand les températures sont élevées (par rapport à la valeur de confort thermique), la face du store interne intégrée avec MCP est tournée pour qu'elle soit exposée au rayonnement solaire afin qu'elle puisse stocker plus d'énergie à l'aide du MCP, atténuant les fluctuations de température à l'intérieur de la pièce. Par ailleurs, la nuit lorsque les températures sont relativement basses (par rapport à la température valeur de confort), la face du store interne intégrée par MCP reprend sa position initiale vers le côté intérieur de la pièce pour libérer l'énergie stockée, évitant ainsi une sur-réduction de la température ambiante en dessous de la valeur du confort thermique.

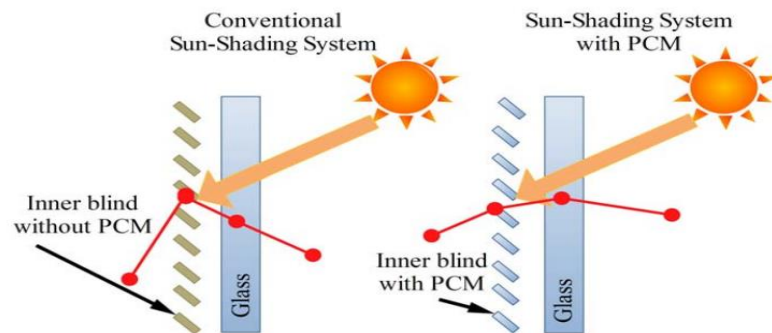


Figure 1.53. Schéma des systèmes de protection solaire avec et sans MCP

Une étude paramétrique numérique sur l'utilisation des MCP dans les rideaux des fenêtres (figure 1.54) pour réduire le gain de la chaleur solaire a été présentée par [198]. Le rideau de référence a été fait en aluminium rempli de mousse. Les résultats indiquent que l'amplitude de température de fusion et la quantité du MCP dans le rideau ont une influence considérable sur sa performance thermique. La température de fusion des MCP dans le rideau devrait être proche de la température maximale des fenêtres pendant la journée. Le MCP ne devrait pas fondre complètement durant les heures creuses et sa quantité devrait être suffisante pour absorber une grande quantité de chaleur pendant la journée. Les résultats numériques indiquent que les gains de chaleur ont été réduits d'environ 23% pour un rideau avec MCP dont l'épaisseur est de 3cm et ce par rapport aux rideaux en mousse et en aluminium (figure 1.55).

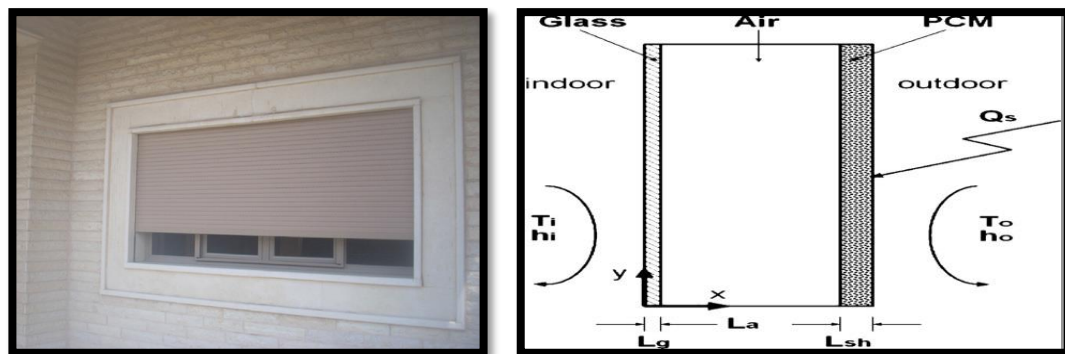


Figure 1.54. Représentation schématique du système de rideau en MCP et les conditions aux limites

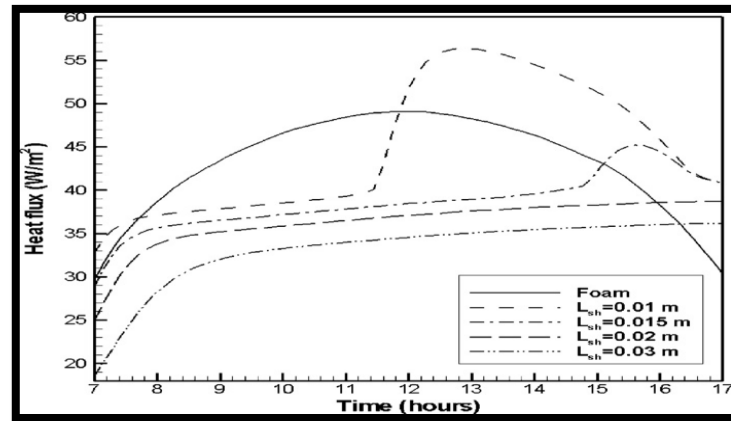


Figure 1.55. Flux de chaleur à la surface intérieure de rideau pour différentes épaisseurs de MCP

Chapitre II : Méthodes de Modélisation et simulation

2 Méthodes de modélisation et de simulation

2.1 Introduction

Le premier travail sur la diffusion de la chaleur dans un milieu avec un changement de phase a été publié par les mathématiciens français Gabriel Lamé et Benoît Paul Émile Clapeyron en 1831 [199].

Le problème posé était de refroidir un liquide et de déterminer l'épaisseur de la croûte solide générée. Ils ont découvert que l'épaisseur de la croûte est proportionnelle à la racine carrée de temps, mais le coefficient proportionnel était inconnu. Après 60 ans, cette question a été reprise sous une forme plus générale par le physicien et mathématicien autrichien Joseph Stefan [200]. Celui-ci a publié quatre articles décrivant des modèles mathématiques pour des problèmes physiques réels avec un changement de phase. C'est la première étude générale de ce type de problèmes de frontières libres. Ce qui justifie leur appellation de « problème de Stefan ».

L'analyse des problèmes de transfert de chaleur dans les procédés de fusion et de solidification est particulièrement compliquée du fait que la frontière solide-liquide se déplace en fonction de la vitesse à laquelle la chaleur latente est absorbée ou libérée. Ce qui signifie que l'interface de changement de phase n'est pas connue et il représente une partie de la solution. Certains auteurs désignent le cas d'une frontière mobile (associée à un problème dépendant du temps) comme un « problème de frontière mobile » [201].

Ce chapitre vise à donner un aperçu sur les approches modernes de la modélisation du matériau à changement de phase (MCP). Plus précisément, on se focalise sur la modélisation dite macro, dans laquelle il existe des phases solides et liquides distinctes, séparées par une région définie comme l'interface solide-liquide, ou le front fusion / solidification.

2.2 Formulation de base

Bien que les mécanismes de transfert de chaleur dominants soient la conduction et la convection naturelle en phase liquide. Le problème le plus fondamental ne tient compte que de la conduction de la chaleur et ne concerne donc que l'équation d'énergie. Dans ce dernier cas, la température est la seule variable dépendante et la forme de

l'équation est identique à celle communément utilisée dans les textes de conduction de la chaleur (et appelée « équation de la chaleur » dans les textes mathématiques).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (2.1)$$

Où ρ est la densité, C_p est la chaleur spécifique, λ est la conductivité thermique et T est la température.

Dans la figure 2.1, une couche de MCP est refroidie à sa surface gauche et s'étend à l'infini. Après un certain moment, le front de solidification a précédé une distance « s » de la surface comme indiqué sur la figure droite. Ce problème de transfert de chaleur est appelé problème de Stefan. De même, la figure 2.2 représente le cas de la fusion.

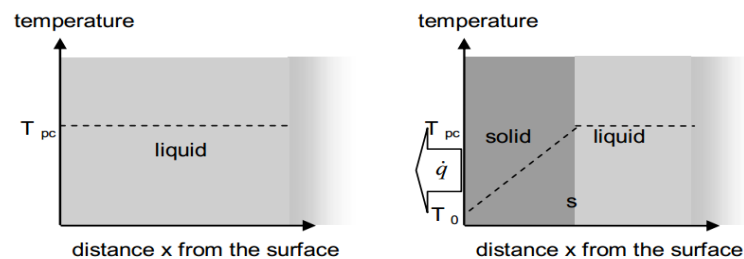


Figure 2.1. La solidification d'un MCP

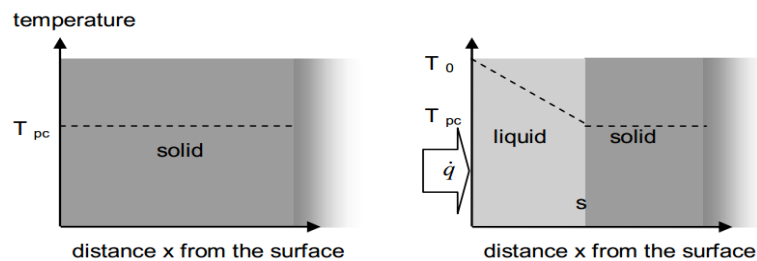


Figure 2.2. La fusion d'un MCP

L'équation (2.1) doit être écrite séparément pour les régions solides (s) et liquides (l), impliquant les propriétés thermiques correspondantes. Comme par exemple dans le cas de la solidification, on peut écrire les équations de la chaleur de la méthode suivante :

- $0 < x < s(t); \quad t > 0; \quad \rho_{sol} C_{p,sol} \frac{\partial T_{sol}}{\partial t} = \lambda_{sol} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.2)$

- $s(t) \leq x; \quad t > 0; \quad \rho_{liq} C_{p,liq} \frac{\partial T_{liq}}{\partial t} = \lambda_{liq} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.3)$

$s(t)$ Représente l'interface solide-liquide.

Contrairement à d'autres applications de l'équation de la chaleur, afin d'assurer la conservation de l'énergie, la balance thermique au niveau de l'interface mouvante solide-liquide où la chaleur est absorbée ou libérée à la température de changement de phase est donnée [202] par :

$$\text{Pour } t > 0 ; \lambda_{\text{sol}} \left. \frac{\partial T_{\text{sol}}}{\partial x} \right|_{x=s(t)} - \lambda_{\text{liq}} \left. \frac{\partial T_{\text{liq}}}{\partial x} \right|_{x=s(t)} = \rho L \frac{ds(t)}{dt} \quad (2.4)$$

Il est important de noter que la densité ρ dans l'équation (2.4) égale à la densité solide dans le cas de la solidification et elle égale à la densité liquide pour le cas de la fusion. Pour obtenir une solution unique à ce problème, il faut deux conditions aux limites, l'une pour déterminer la position de l'interface et l'autre est comme d'habitude une condition appropriée sur la frontière fixe. En 1860, le physicien et mathématicien allemand Franz Ernst a proposé une solution analytique, nommée la solution de Neumann [203], pour décrire la distribution transitoire de température dans un produit pur au cours d'un changement de phase liquide-solide dans un système unidirectionnel.

2.3 La modélisation des problèmes de changement de phase

En raison de la non-linéarité inhérente du bilan énergétique à l'interface du changement de phase, peu de solutions analytiques d'intérêt sont disponibles [203] donnant lieu au développement d'un grand nombre d'algorithmes numériques pour résoudre ces problèmes [204-209]. Toutes ces méthodes peuvent être classées en deux groupes principaux, les méthodes de front mobile [210,211] et les méthodes de domaine fixe [212-217].

Dans la méthode de front mobile (front tracking method), le front de changement de phase discret est suivi en continu et traité comme une frontière mobile entre la phase liquide et solide. La chaleur latente impliquée dans le changement de phase est traitée explicitement comme une condition limite interne. Le changement de taille et de forme du domaine du calcul consiste à remailler l'espace à chaque mouvement de l'interface liquide-solide. Ce qui implique un transfert/projection de champ de température de l'ancien au nouveau maillage. Il est recommandé d'avoir une séparation distincte entre les deux phases pour appliquer cette méthode. Ainsi, cette approche est adaptée en particulier aux cas où l'on considère la fusion ou la solidification d'un matériau pur, pour lequel le changement d'état se produit à une température bien déterminée.

La méthode de domaine fixe (fixed grid) est proposée par de nombreux auteurs en raison du fait qu'elle permette de capter l'interface si le maillage est suffisamment fin et adapté à l'échelle des températures du changement de phase. Cette méthode est également connue sous le nom de méthode à domaine unique car la même équation différentielle peut être utilisée pour la région solide et liquide. De plus, cette méthode s'avère être facile d'implémentation, flexible et donne une bonne description de la phase pâteuse. Celle-ci contient implicitement les conditions de déplacement de l'interface de changement de phase via les équations aux dérivées partiales [218]. Dans cette méthode, l'évolution de la chaleur latente est traitée soit par l'utilisation d'un coefficient de capacité thermique apparente, soit par l'utilisation d'un terme de source de chaleur. Ces approches sont connues sous le nom de méthode d'enthalpie, car elles peuvent être dérivées de l'équation d'énergie écrite en termes d'enthalpie, qui est la somme de la chaleur apparente et latente.

2.3.1 Méthodes d'enthalpies

Le modèle d'enthalpie introduit le concept d'enthalpie et l'adopte avec la température comme paramètres de résolution. La caractéristique de cette méthode est que, bien que la courbe de température dans l'interface de changement de phase soit discontinue, la courbe d'enthalpie est continue. Ainsi, il n'est pas nécessaire de suivre l'interface de changement de phase lors de la détermination de la distribution d'enthalpie, ce qui permet d'établir une équation unifiée à l'état solide, à l'état liquide et à l'état solide-liquide. Après que les distributions d'enthalpie et de température soient connues, l'emplacement de l'interface de changement de phase peut être déterminé [219-221], Pour le transfert de chaleur par conduction dominée, l'équation (2.1) peut être reformulée en équation où la chaleur latente est absorbée dans le terme d'enthalpie comme suit :

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (2.5)$$

Où h est l'enthalpie par unité de masse,

Pour un calcul numérique avec la méthode d'enthalpie, il est nécessaire de connaître l'enthalpie h en fonction de la température. La figure 2.3 montre la courbe de performance enthalpie-température (h - T) pour deux scénarios :

- Matériaux purs où la fusion se produit à la température isotherme

- Cas non-isotherme où le changement de phase se produit à une gamme de température de fusion.

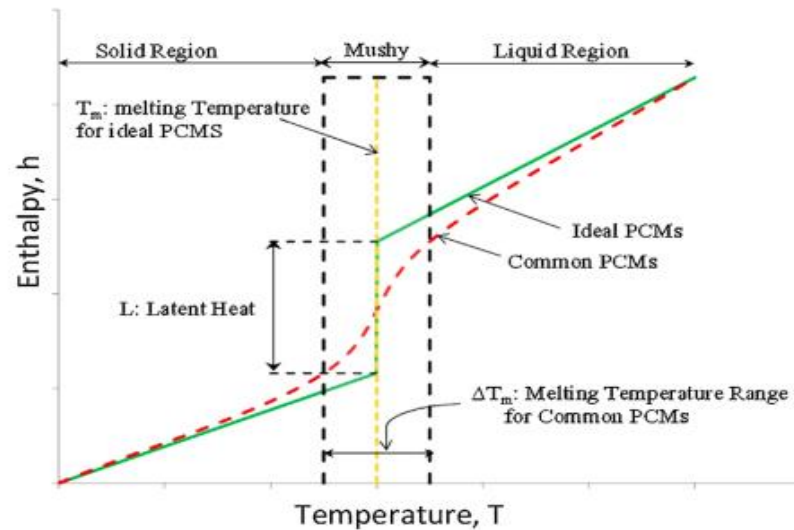


Figure 2.3. Courbe de performance enthalpie-température (h-T) pour MCP idéaux et communs

Pour traiter la discontinuité de la température dans les substances pures, on suppose que le changement de phase se produise sur un intervalle de température. L'enthalpie peut être calculée à partir des valeurs littérales de la capacité thermique c_p de la phase solide et liquide et de l'enthalpie de changement de phase L_{cp} .

En tant que température de référence T_{ref} il est pratique d'utiliser une température où le MCP est soit solide ou liquide. Etant donné que dans une simulation numérique, seuls les changements d'enthalpie sont utilisés, le choix de la température de référence n'a cependant aucune influence sur le résultat. Pour les substances de MCP pure $T_{sol} = T_{liq} = T_{cp}$, l'enthalpie est déterminée par :

$$h(T) = \begin{cases} c_{p,sol}(T - T_{ref}) & \Rightarrow T < T_{cp} \\ c_{p,sol}(T - T_{ref}) + fL_{cp} & \Rightarrow T = T_{cp} \\ c_{p,sol}(T - T_{ref}) + L_{cp} + c_{p,liq}(T - T_{cp}) & \Rightarrow T > T_{cp} \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec f est la fraction volumique de solide ou de liquide lors de changement de phase.

L'existence d'une zone pâteuse a également une influence sur le front de changement de phase. La méthode d'enthalpie nécessite un maillage fin près du front de changement de phase afin de capturer le grand gradient d'enthalpie dans la région pâteuse. Plus l'intervalle de changement de phase est petit, plus la région pâteuse est étroite et plus le maillage doit être raffiné.

L'un des inconvénients essentiels de cette approche est d'utiliser un maillage raffiné partout lorsque le front de changement de phase traverse le domaine entier. Bien qu'il ne soit requis que près du front de changement de phase et près des frontières de domaine. Ce problème peut être résolu par l'application d'un raffinement de maillage adaptatif [222-226]. L'idée de la méthode du maillage mobile n'est qu'un raffinement de maillage local qui est appliqué uniquement là où et quand il est requis. Le nombre total d'éléments et leur connectivité restent constants tout au long du processus de solution. Selon la solution donnée par l'étape précédente, un nouveau maillage est généré à chaque pas de temps. La méthode est basée sur la formulation de domaine unique bien que la grille ne soit pas fixée. La méthode n'est pas celle du front mobile puisque la technique du maillage mobile ne garantit pas que les nœuds de l'élément reposent sur l'isotherme de changement de phase et le suivent consécutivement.

2.3.2 Méthode de la capacité thermique équivalent

La méthode de la capacité thermique effective a été introduite par Hashemi et Sliepcevic [227] pour résoudre un transfert de chaleur unidimensionnel avec changement de phase dans une région pâteuse. L'équation de transfert de chaleur dominée par la conduction utilisant la capacité thermique effective peut s'écrire comme suit :

$$\rho \cdot C^{\text{eff}}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (2.7)$$

Cette approche introduit le concept de capacité thermique effective ou équivalente et considère que la chaleur latente est une grande chaleur sous forme sensible dans l'intervalle de température de transition de phase. En vertu du modèle de la capacité thermique effective, le problème de transfert de chaleur du MCP, décrit par trois équations (phase solide, phase liquide et phase pâteuse solide-liquide), peut être transformé en un seul problème de conduction non linéaire dans toute la région de calcul. L'emplacement de l'interface de changement de phase peut être déterminé lorsque la distribution de température est obtenue.

Les équations suivantes peuvent être utilisées pour estimer la capacité thermique effective d'un MCP en utilisant une simple relation directe avec une gamme de température à changement de phase ($2\delta T$) [228] :

$$C^{\text{eff}}(T) = \begin{cases} c_{p,\text{sol}} & \Rightarrow T \leq T_{\text{cp}} - \delta T & \text{(phase solide)} \\ \frac{c_{p,\text{sol}} + c_{p,\text{liq}}}{2} + \frac{L_{\text{cp}}}{2\delta T} & \Rightarrow T = T_{\text{cp}} & \text{(phase pâteuse)} \\ c_{p,\text{liq}} & \Rightarrow T \geq T_{\text{cp}} + \delta T & \text{(phase liquide)} \end{cases} \quad (2.8)$$

δT Est la moitié de la plage de changement de phase.

La convergence peut être un problème lors de la résolution de l'équation. (2.8), si la plage de changement de phase est trop petite ou si le pas de temps est trop important. Il y a un risque possible de manquer la contribution de chaleur latente dans un pas de temps important. Par conséquent, les résultats des tests DSC peuvent être utilisés pour former une expression empirique pour approximer la capacité thermique [229].

2.3.3 La méthode de source de chaleur

Dans une approche commune proposée par Swaminathan et Voller [230] pour traiter les MCP dans les régions pâteuses, l'enthalpie totale est divisée en chaleur spécifique et chaleur latente agissant comme une source de chaleur. Ainsi, l'équation gouvernante dans ce cas devient :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \rho L \left(\frac{\partial f_l}{\partial t} \right) \quad (2.09)$$

Dans les schémas populaires, le front de changement de phase est suivi par l'évaluation d'un champ de fraction liquide qui prend une valeur de « 0 » pour le solide et « 1 » pour le liquide et une valeur dans l'intervalle de (0-1) pour la région pâteuse. Avec cette approche, la fraction solide/liquide est linéarisée et l'équation peut être résolue itérativement avec la température. La fraction liquide peut être résolue en utilisant l'équation auxiliaire suivante :

$$f_l = \begin{cases} 0 & \text{Si } T \leq T_{\text{cp}} - \delta T \\ \frac{(T - T_{\text{sol}})}{(T_{\text{liq}} - T_{\text{sol}})} & \text{Si } T_{\text{cp}} - \delta T < T < T_{\text{cp}} + \delta T \\ 1 & \text{Si } T \geq T_{\text{cp}} + \delta T \end{cases} \quad (2.10)$$

2.4 Méthode numérique de solution : Méthode des éléments finis

Les méthodes analytiques classiques prennent en compte un élément différentiel et développent les équations de base, généralement sous la forme d'équations aux dérivées partielles. Quant à la situation réelle, il est souvent difficile d'obtenir une

solution exacte à ces équations compte tenu de la complexité géométrique et des conditions aux limites. On est donc conduit à chercher une solution approchée par une méthode numérique. Parmi les diverses méthodes numériques qui ont évolué au fil des ans, les techniques les plus couramment utilisées sont la méthode des différences finies, des volumes finis et des éléments finis.

La différence finie est une méthode bien établie et conceptuellement simple qui nécessite une approximation point par point des équations de base. Le modèle, formé en écrivant l'équation différentielles pour un réseau de nœuds, peut être améliorée en augmentant le nombre de points. Bien que de nombreux problèmes de transfert de chaleur puissent être résolus à l'aide de la méthode de différences finies [231], dès que des géométries irrégulières ou une spécification inhabituelle des conditions aux limites sont rencontrées, cette technique devient difficile à utiliser. La méthode des volumes finis est une version plus raffinée de la méthode des différences finies et est devenu populaire dans la dynamique des fluides [232]. Le vertex centré La technique des volumes finis est très similaire à la méthode des éléments finis linéaires [233].

La plupart des schémas de différences finies utilisés dans les problèmes de dynamique des fluides et de transfert de chaleur peuvent être considérés comme des cas particuliers dans un cadre résiduel pondéré. Pour les procédures résiduelles pondérées, l'erreur dans la solution approximative des équations de conservation n'est pas fixée à zéro, mais son intégrale, par rapport aux « pondérations » sélectionnées, doit disparaître. Au sein de cette famille, la méthode de collocation reproduit les équations classiques aux différences finies, alors que l'algorithme de volume fini est obtenu à l'aide de pondérations constants.

La méthode des éléments finis [234-242] considère que la région de la solution comprend de nombreuses petites sous-régions ou éléments interconnectés et donne une approximation par morceaux des équations principales, c'est-à-dire les complexes équations différentielles partielles sont réduites à des équations simultanées linéaires ou non linéaires. Ainsi, la procédure de la discrétisation par éléments finis (c'est-à-dire en divisant la région en un certain nombre de régions plus petites) réduit le problème continue, qui comporte un nombre infini d'inconnues, à un avec un nombre fini d'inconnues à des points spécifiés, appelés nœuds.

La méthode des éléments finis est un outil numérique permettant de déterminer des solutions approximatives à un large éventail de problèmes d'ingénierie. La méthode a été initialement développée pour étudier les contraintes dans les structures mécaniques complexes [243] et a ensuite été étendue au domaine général de la mécanique continue [244]. De nombreux articles sur l'histoire des éléments finis ont été écrits par de nombreux auteurs aux opinions divergentes sur les origines de la technique [245-247]. La méthode des éléments finis fait l'objet d'une attention considérable dans l'enseignement de l'ingénierie et dans l'industrie en raison de sa diversité et de sa flexibilité en tant qu'outil d'analyse. Il est souvent nécessaire d'obtenir des solutions numériques approximatives pour des problèmes industriels complexes, dans lesquels des solutions exactes sous forme fermée sont difficiles à obtenir. Un exemple d'une situation aussi complexe peut être trouvé dans le refroidissement des équipements électroniques (ou des puces). En outre, dispersion des polluants dans des conditions atmosphériques non uniformes, problèmes de refroidissement dans les moteurs électriques, divers changements de phase problèmes, et cetera, sont quelques exemples de problèmes aussi complexes. Un modèle numérique pour un problème de transfert de chaleur commence par le modèle physique du problème, dont un exemple est présenté à la figure 2.4.

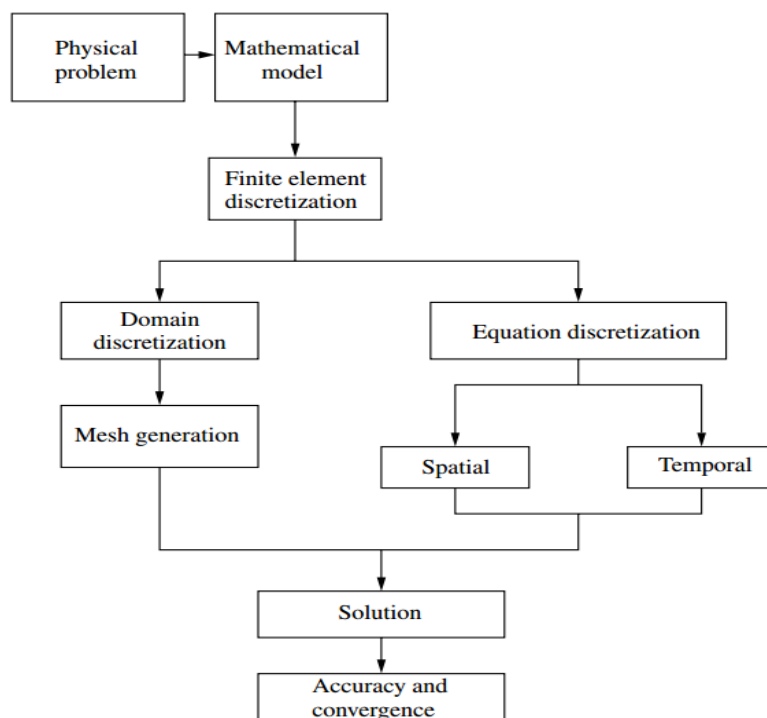


Figure 2.4 Modèle numérique pour les calculs de transfert de chaleur

Comme on peut le constater, une partie du modèle traite de la discrétisation du domaine et l'autre effectue l'approximation discrète des équations aux dérivées partielles. Enfin, en combinant les deux, la solution numérique au problème est obtenue. La solution d'un problème continue par la méthode des éléments finis est approchée par le processus suivant :

- **La discrétisation du domaine continu :**

En Divisant la région de la solution en éléments ou en sous-régions qui ne se chevauchent pas. La discrétisation par éléments finis permet une variété de formes d'éléments, par exemple des triangles, des quadrilatères. Chaque élément est formé par la connexion d'un certain nombre de nœuds (figure 2.5). Le nombre de nœuds employés pour former un élément dépend du type d'élément (ou de la fonction d'interpolation).

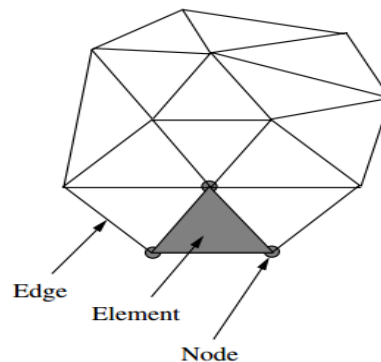


Figure 2.5 Maillage typique d'éléments finis : Éléments, nœuds et arêtes

- **La sélection des fonctions d'interpolations :**

Cette étape consiste à choisir le type de fonction d'interpolation qui représente la variation de champ de la variable dans un élément.

- **Formulation des équations d'éléments :**

Nous devons déterminer les équations matricielles qui expriment les propriétés des éléments individuels en formant une matrice élémentaire et un vecteur de forces.

- **Assemblage des équations d'éléments :**

Pour trouver les propriétés du système global, nous devons assembler toutes les équations de chaque élément, c'est-à-dire combiner les équations matricielles de chaque élément de manière appropriée de telle sorte, la matrice résultante représente le comportement de toute la région de solution du problème. Les conditions aux limites doivent être incorporées après l'assemblage des contributions de chaque élément.

- **Résoudre le système d'équations :**

L'ensemble d'équations algébriques résultant, peut maintenant être résolu pour obtenir les valeurs nodales de la variable de champ, par exemple la température.

- **Calcule les quantités secondaires :**

À partir des valeurs nodales de la température, nous pouvons ensuite calculer les quantités secondaires, par exemple les flux de chaleur spatiale.

2.4.1 Éléments et fonctions de forme

Les fonctions utilisées pour représenter la nature de la solution dans chaque élément sont appelées fonctions de forme, ou fonctions d'interpolation, ou fonctions de base. Elles sont appelées fonctions d'interpolation car elles permettent de déterminer la valeur de la variable de champ dans un élément en interpolant les valeurs nodales. Ils sont également appelés fonctions de base car ils forment la base de la méthode de discrétisation. Les fonctions de type polynomiales ont été le plus largement utilisées car elles peuvent être intégrées, ou différenciées, facilement et la précision des résultats peut être améliorée en augmentant l'ordre du polynôme.

- **Éléments triangulaires bidimensionnels :**

Dans cette section, nous introduisons pour la première fois un élément à deux dimensions. Le triangle est la forme géométrique la plus simple qui puisse être utilisée pour approximer des surfaces irrégulières. Il s'agit de l'un des éléments couramment utilisés dans les calculs par éléments finis. Ceci est en partie dû aux progrès réalisés récemment sur les techniques de génération de maillage non structurées et adaptatives [248]. L'élément triangulaire linéaire bidimensionnel, également appelé élément simple, est représenté par :

$$T = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \tag{2.11}$$

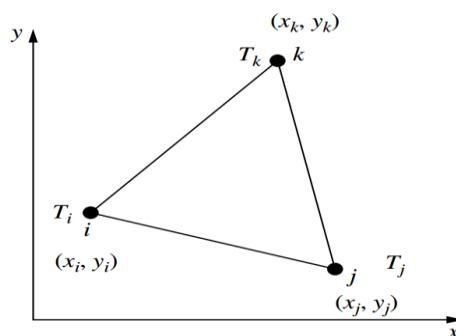


Figure 2.6 Un élément triangulaire linéaire

Comme un triangle linéaire a trois nœuds (figure 2.6), les valeurs de α_1 , α_2 et α_3 sont déterminées à partir de :

$$\begin{aligned} T_i &= \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i \\ T_j &= \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j \\ T_k &= \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 y_k \end{aligned} \tag{2.12}$$

D'où :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2A} \left[(x_j y_k - x_k y_j) T_i + (x_j y_k - x_k y_j) T_j + (x_i y_j - x_j y_i) T_k \right] \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2A} \left[(y_j - y_k) T_i + (y_k - y_i) T_j + (y_i - y_j) T_k \right] \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2A} \left[(x_k - x_j) T_i + (x_i - x_k) T_j + (x_j - x_i) T_k \right] \end{aligned} \tag{2.13}$$

« A » représente la surface de l'élément et elle est donnée par :

$$2A = \det \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} = (x_i y_j - x_j y_i) + (x_k y_i - x_i y_k) + (x_j y_k - x_k y_j) \tag{2.14}$$

De même :

$$T = N_i T_i + N_j T_j + N_k T_k = \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} \tag{2.15}$$

Avec :

$$\begin{cases} N_i = \frac{1}{2A} (a_i + b_i x + c_i y) \\ N_j = \frac{1}{2A} (a_j + b_j x + c_j y) \\ N_k = \frac{1}{2A} (a_k + b_k x + c_k y) \end{cases} \tag{2.16}$$

Et :

$$\begin{cases} a_i = x_j y_k - x_k y_j & \begin{cases} b_i = y_j - y_k \\ b_j = y_k - y_i \\ b_k = y_i - y_j \end{cases} & \begin{cases} c_i = x_k - x_j \\ c_j = x_i - x_k \\ c_k = x_j - x_i \end{cases} \end{cases} \tag{2.17}$$

Ainsi, nous voyons que les fonctions de forme ont une valeur d'unité au sommet désigné et zéro à tous les autres sommets. Il est possible de montrer que partout dans l'élément, y compris les frontières que :

$$N_i + N_j + N_k = 1 \tag{2.18}$$

Les gradients de la température T sont donnés par :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial N_i}{\partial x} T_i + \frac{\partial N_j}{\partial x} T_j + \frac{\partial N_k}{\partial x} T_k = \frac{b_i}{2A} T_i + \frac{b_j}{2A} T_j + \frac{b_k}{2A} T_k$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial N_i}{\partial y} T_i + \frac{\partial N_j}{\partial y} T_j + \frac{\partial N_k}{\partial y} T_k = \frac{c_i}{2A} T_i + \frac{c_j}{2A} T_j + \frac{c_k}{2A} T_k \quad (2.19)$$

D'où :

$$\{g\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} = [B]\{T\} \quad (2.20)$$

Il convient de noter que $\frac{\partial T}{\partial x}$ et $\frac{\partial T}{\partial y}$ sont des constantes dans un élément comme b_i , b_j et b_k ainsi que c_i , c_j et c_k sont des constantes pour un triangle donné. Par conséquent, les flux thermiques q_x et q_y sont également des constantes dans un élément triangulaire linéaire.

- **Éléments quadrilatéraux en deux dimensions :**

L'élément quadrilatéral a quatre nœuds situés aux sommets, comme illustré à la figure 2.7. Le maillage quadrilatéral ressemble à un maillage de différences finies. Cependant, dans le cas d'un maillage par différences finies, le maillage doit être orthogonal, c'est-à-dire que toutes les lignes se coupent à angle droit, alors que dans le maillage d'éléments finis, chaque élément peut avoir une forme unique et chaque côté peut avoir une pente différente. Dans sa forme la plus simple, l'élément quadrilatère devient un élément rectangulaire (figure 2.8), ses limites étant parallèles à un système de coordonnées. La température dans un quadrilatère est représentée par :

$$T = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy \quad (2.21)$$

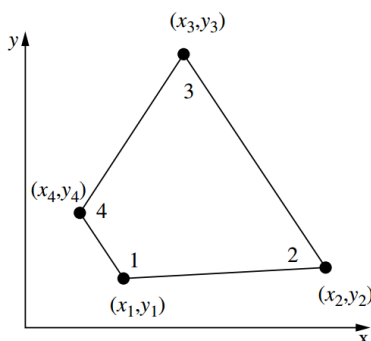


Figure 2.7 Un élément quadrilatéral typique

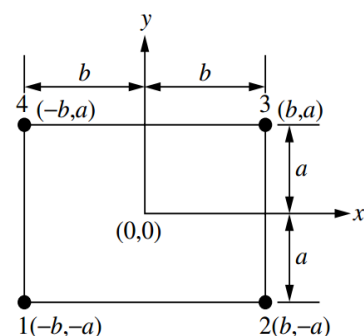


Figure 2.8 Un simple élément rectangulaire

Et ainsi les gradients de température peuvent être écrits comme :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 + \alpha_4 y \quad ; \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_3 + \alpha_4 x \quad (2.22)$$

Par conséquent, le gradient varie au sein de l'élément de manière linéaire. En substituant les valeurs de T_1 , T_2 , T_3 et T_4 dans l'équation 2.21 pour les nœuds $(x_1, y_1) \dots (x_4, y_4)$ et en résolvant, on obtient les valeurs de α_1 , α_2 , α_3 et α_4 . En substituant ces relations dans l'équation 2.21 et en rassemblant les coefficients de $T_1, T_2 \dots T_4$, nous obtenons :

$$T = N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 + N_4 T_4 = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

Pour un élément rectangulaire :

$$N_1 = \frac{1}{4ab} (b-x)(a-x)$$

$$N_2 = \frac{1}{4ab} (b+x)(a-x) \quad (2.24)$$

$$N_3 = \frac{1}{4ab} (b+x)(a+x)$$

$$N_4 = \frac{1}{4ab} (b-x)(a+x)$$

Les fonctions de forme peuvent également être obtenues à l'aide des fonctions d'interpolation de Lagrange :

$$N_k^e(x) = \prod_{i=1}^n \frac{x-x_i}{x_k-x_i} \quad (2.25)$$

Comme les fonctions de forme sont linéaires dans les directions x et y , elles sont appelées configuration bilinéaire. Les dérivés peuvent être exprimés comme suit :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial N_1}{\partial x} T_1 + \frac{\partial N_2}{\partial x} T_2 + \frac{\partial N_3}{\partial x} T_3 + \frac{\partial N_4}{\partial x} T_4 = \frac{1}{4ab} [-(a-y)T_1 + (a-y)T_2 + (a+y)T_3 - (a+y)T_4] \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial N_1}{\partial y} T_1 + \frac{\partial N_2}{\partial y} T_2 + \frac{\partial N_3}{\partial y} T_3 + \frac{\partial N_4}{\partial y} T_4 = \frac{1}{4ab} [-(b-x)T_1 - (b+x)T_2 + (b+x)T_3 + (b-x)T_4]$$

La matrice de gradient peut être écrite :

$$\{g\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{4ab} \begin{bmatrix} -(a-y) & (a-y) & (a+y) & -(a+y) \\ -(b-x) & -(b+x) & (b+x) & (b-x) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{Bmatrix} = [B]\{T\} \quad (2.27)$$

2.4.2 Solution Numérique

Les solutions disponibles pour les géométries ordinaires [249] ne permettent pas de trouver des solutions de conduction thermique pour de nombreuses formes géométriques présentant un intérêt pratique. En raison des conditions dépendantes du temps, ou des conditions d'interface, prévalant dans de nombreux problèmes de conduction de chaleur transitoires, les solutions analytiques sont également difficiles à obtenir. Dans de telles situations complexes, il est essentiel de mettre au point des procédures approximatives pour déterminer la distribution transitoire de la température.

Considérons le problème de détermination de la distribution de la température dans un régime transitoire en deux dimensions Ω , avec la frontière Γ . On suppose que les axes du matériau coïncident avec les coordonnées du problème et qu'il n'y a pas de transfert de chaleur perpendiculaire au plan du solide. Un système cartésien rectangulaire est utilisé pour décrire le problème physique.

L'équation régissant la distribution de la température sur le volume Ω est donnée par la formule suivante :

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) + Q = \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.28)$$

Où λ_x et λ_y sont les conductivités thermiques respectivement dans les directions x et y et Q est la source de chaleur interne connue par unité de surface.

Outre, les coefficients du matériau, ρ , C_p , λ , peuvent être en fonction de la température, ce qui rend le problème non linéaire.

L'équation (2.28) s'écrit sous forme vectorielle :

$$\nabla(\lambda(T)\nabla T) + Q = \rho C_p(T)\dot{T} \quad (2.29)$$

$$\text{Où : } \dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

Et ∇ est l'opérateur de gradient :

$$\nabla = e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} \quad (2.30)$$

Avec e_x et e_y désignent les vecteurs unitaires dirigés respectivement le long des axes x et y .

L'équation (2.28) doit être résolue conjointement avec les conditions aux limites et initiales spécifiques du problème. Les deux types suivants de conditions aux limites sont supposés dans le développement suivant :

$$T = T_b \quad \text{Sur } \Gamma_b \quad (2.31)$$

$$\lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} n_y + q + q_{cnv} = 0 \quad \text{Sur } \Gamma_q \quad (2.32)$$

(n_x, n_y) désignent les cosinus de direction du vecteur unité normale sur la frontière (figure 2.9).

$$\hat{\mathbf{n}} = n_x \hat{e}_x + n_y \hat{e}_y = \cos\alpha \hat{e}_x + \sin\alpha \hat{e}_y \quad (2.33)$$

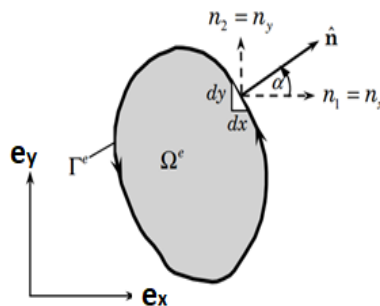


Figure 2.9 Un vecteur unitaire normal à une surface

Où Γ_b et Γ_q sont des parties disjointes de la frontière totale Γ telles que $\Gamma = \Gamma_b \cup \Gamma_q$ et $\Gamma_b \cap \Gamma_q = \emptyset$. De plus, q représente le flux de chaleur sur la frontière et q_{cnv} désigne la composante de flux de la chaleur convective.

$$D'où : q_{cnv} = h_c(T - T_\infty) \quad (2.34)$$

h_c désigne le coefficient de transfert de chaleur par convection et T_∞ est la température ambiante.

La condition initiale sur la température est donnée par :

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y) \quad (2.35)$$

Les conditions aux limites de transfert de chaleur par radiation ne sont pas prises en compte dans le développement actuel. Il est maintenant possible de résoudre le système ci-dessus, à condition que les discrétisations spatiales et temporelles appropriées soient disponibles. Avant de traiter de la discrétisation temporelle, nous introduisons dans la sous-section suivante la forme résiduelle standard pondérée par Galerkin pour les équations transitoires.

2.4.3 La méthode de Galerkin

Dans cette sous-section, l'application de la méthode de Galerkin aux équations transitoires soumises à des conditions limites et initiales appropriées est abordée. La température est discrétisée dans l'espace comme suit :

$$T(x, y, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y)T_i(t) \quad (2.36)$$

Où N_i sont les fonctions de forme, n est le nombre de nœuds d'un élément et $T_i(t)$ représente la température nodale dépendante du temps. La représentation de Galerkin de l'équation 2.28 est :

$$\int_{\Omega} N_i \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q - \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega = 0 \quad (2.37)$$

En utilisant l'intégration par parties sur les deux premiers termes de l'équation 2.37, on obtient :

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \left[\lambda_x(T) \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_y(T) \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} - N_i Q + N_i \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega + \oint_{\Gamma_q} N_i \lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} n_x d\Gamma_q + \\ & \oint_{\Gamma_q} N_i \lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} n_y d\Gamma_q = 0 \end{aligned} \quad (2.38)$$

D'après l'équation (2.32)

$$\oint_{\Gamma_q} N_i \lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} n_x d\Gamma_q + \oint_{\Gamma_q} N_i \lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} n_y d\Gamma_q = - \oint_{\Gamma_q} N_i q d\Gamma_q - \oint_{\Gamma_q} N_i q_{cnv} d\Gamma_q \quad (2.39)$$

En substituant l'approximation spatiale de l'équation 2.36, l'équation 2.38 devient finalement :

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \left[\lambda_x(T) \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} T_j(t) + \lambda_y(T) \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} T_j(t) \right] d\Omega + \int_{\Omega} \left[N_i Q - N_i \rho C_p(T) N_j \frac{\partial T_j}{\partial t} \right] d\Omega - \\ & \oint_{\Gamma_q} N_i q d\Gamma_q - \oint_{\Gamma_q} N_i h_c (T - T_{\infty}) d\Gamma_q = 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

Où i et j représentent les nœuds. L'équation 2.40 peut être écrite sous une forme plus pratique :

$$[C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{F\} \quad (2.41)$$

$$\text{Ou : } [C_{ij}] \left\{ \frac{\partial T_j}{\partial t} \right\} + [K_{ij}] \{T_j\} = \{F_i\} \quad (2.42)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [C_{ij}] &= \int_{\Omega} \rho C_p(T) N_i N_j d\Omega \\ [K_{ij}] &= \int_{\Omega} \left[\lambda_x(T) \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} T_j(t) + \lambda_y(T) \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} T_j(t) \right] d\Omega + \oint_{\Gamma_q} h_c N_i N_j d\Gamma_q \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$\{F_i\} = \int_{\Omega} N_i Q d\Omega - \oint_{\Gamma_q} N_i q d\Gamma_q + \oint_{\Gamma_q} N_i h_c T_{\infty} d\Gamma_q$$

Sous la forme matricielle :

$$[C] = \int_{\Omega} \rho C_p(T) [N]^T [N] d\Omega$$

$$[K] = \int_{\Omega} [B]^T [D] [B] d\Omega + \oint_{\Gamma_q} h_c [N]^T [N] d\Gamma_q \quad (2.44)$$

$$\{F\} = \int_{\Omega} Q [N]^T d\Omega - \oint_{\Gamma_q} q [N]^T d\Gamma_q + \oint_{\Gamma_q} h_c T_{\infty} [N]^T d\Gamma_q$$

Avec D représente la matrice de conductivité thermique et elle est donnée pour un problème bidimensionnel comme suit :

$$[D] = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ 0 & \lambda_y \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

2.4.4 Discrétisation temporelle

Comme le montre la forme semi-discrète de l'équation 2.41, l'opérateur différentiel impliquant le terme dépendant du temps reste encore à discrétiser. Dans cette section, une approximation numérique des termes transitoires, en utilisant la méthode des différences finies (MDF), est considérée.

En utilisant une série de Taylor, nous pouvons écrire la température au $n + 1$:

$$T^{n+1} = T^n + \Delta t \frac{\partial T^n}{\partial t} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 T^n}{\partial t^2} + \dots \quad (2.46)$$

Si les termes qui sont supérieures ou égales au 2ème ordre de l'équation ci-dessus sont négligés, alors :

$$\frac{\partial T^n}{\partial t} \approx \frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} + O(\Delta t) \quad (2.47)$$

Qui est précis au premier ordre dans le temps. Si nous introduisons maintenant un paramètre θ

$$\text{tel que : } T^{n+\theta} = \theta T^{n+1} + (1 - \theta) T^n \quad (2.48)$$

En remplaçant (2.48) dans l'équation 2.41, puis avec les équations 2.47, on obtient :

$$[C] \left\{ \frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} \right\} + [K] \{T\}^{n+\theta} = \{F\}^{n+\theta} \quad (2.49)$$

D'où :

$$[C] \left\{ \frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} \right\} + [K] \{\theta T^{n+1} + (1 - \theta) T^n\} = \theta \{F\}^{n+1} + (1 - \theta) \{F\}^n \quad (2.50)$$

L'équation ci-dessus peut être modifiée comme suit :

$$([C] + \theta \Delta t [K]) \{T\}^{n+1} = ([C] - (1 - \theta) \Delta t [K]) \{T\}^n + \Delta t (\theta \{F\}^{n+1} + (1 - \theta) \{F\}^n) \quad (2.51)$$

L'équation 2.51 donne les valeurs nodales de la température au niveau $n + 1$. Ces valeurs de température sont calculées à l'aide des valeurs de temps au niveau n . Cependant, les deux valeurs dans le temps au niveau $n + 1$ et n du vecteur de force $\{F\}$ doivent être connues. En faisant varier le paramètre θ , différents schémas transitoires peuvent être construits, comme indiqué dans le tableau 2.1.

| θ | Nom du schéma | Commentaires |
|----------|-----------------------------|----------------------------|
| 0.0 | Schéma totalement explicite | Forward difference method |
| 1.0 | Schéma totalement implicite | Backward difference method |
| 0.5 | Schéma semi implicite | Crank–Nicolson method |

Tableau 2.1 Différents schémas de pas du temps

2.4.4.1 Stabilité

La stabilité d'un schéma numérique peut être obtenue à l'aide d'une analyse de Fourier [250].

Différence arrière (Backward Euler) : C'est un schéma implicite avec une approximation de différence en arrière pour le terme de temps. Ce schéma est inconditionnellement stable et son exactitude est régi par la taille du pas de temps.

Différence avant (Forward Euler) : Il s'agit d'un schéma explicite avec une approximation différentielle vers l'avant du terme. Le schéma est conditionnellement stable et la limite de stabilité pour le pas de temps est donnée par :

$$\Delta t < \Delta t_{cr} = \frac{2}{(1-2\alpha)\lambda_{max}} \quad (2.52)$$

Soit λ_{max} la plus grande valeur propre de $[C]^{-1}[K]$ et α représente la diffusivité thermique.

Différence centrale : L'approximation de différence centrale du terme de temps, avec un traitement explicite pour les autres termes, est inconditionnellement instable, et ce schéma n'est pas recommandé.

Schéma Crank – Nicolson (semi-implicite) : En raison du comportement oscillatoire de ce régime semi implicite à des pas de temps plus grand, il est souvent appelé comme un régime légèrement stable.

2.4.5 Assemblage des éléments

L'assemblage d'éléments finis pour obtenir les équations de tout le domaine est basé sur les deux règles suivantes :

- Continuité de la variable primaire (c.-à-d. Temperature)
- Balance des variables secondaires (c'est-à-dire le flux de la chaleur).

On illustre la procédure d'assemblage en considérant un maillage d'éléments finis constitué d'un élément triangulaire et d'un élément quadrilatéral.

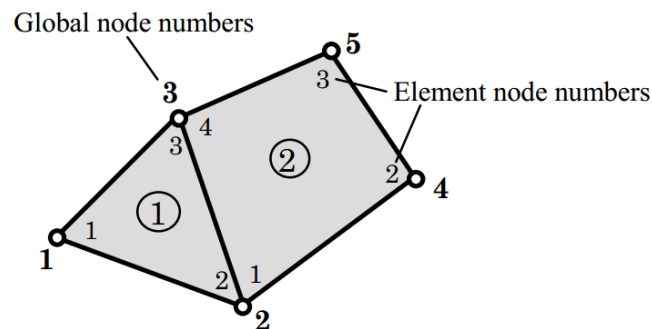


Figure 2.10 Correspondance globale-locale des nœuds pour l'assemblage d'éléments

Soit K_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) la matrice conductive correspondant à l'élément triangulaire, et $K_{ij}(2)$ ($i, j = 1, 2, 3, 4$) la matrice conductive correspondant à l'élément quadrilatéral. Les nœuds du maillage d'éléments finis sont appelés nœuds globaux.

D'après le maillage présenté à la figure 2.10, il apparaît clairement que la correspondance suivante existe entre les nœuds global et d'élément : nœuds 1, 2 et 3 de l'élément 1 correspondent respectivement aux nœuds globaux 1, 2 et 3. Les nœuds 1, 2, 3 et 4 de l'élément 2 correspondent respectivement aux nœuds globaux 2, 4, 5 et 3. Par conséquent, la correspondance entre les valeurs nodales locale et globale de la température est

$$T_1^1 = T_1 ; T_2^1 = T_1^2 = T_2 ; T_3^1 = T_4^2 = T_3 ; T_2^2 = T_4 ; T_3^2 = T_5 \quad (2.53)$$

Ce qui revient à imposer la continuité des variables primaires aux nœuds communs aux éléments 1 et 2. Notons que la continuité des variables primaires aux nœuds inter-éléments garantit la continuité de la variable primaire sur toute la frontière inter-éléments.

En générale, On peut symboliser cet assemblage par :

$$[K] = \sum_e [K^e] ; [C] = \sum_e [C^e] ; [F] = \sum_e [F^e] \quad (2.54)$$

2.4.6 Problème non linéaire

Dans la plupart des cas, les équations non linéaires sont d'abord linéarisées puis résolues, souvent, via une méthode directe (par exemple, l'élimination de Gauss), qui est adapté à la formulation d'éléments finis [251-254]. Les méthodes sont appelées méthodes directes car elles apportent une solution au système matriciel en un nombre d'étapes multiplié. La solution serait exacte si une arithmétique de précision infinie était possible. Cependant, malgré la popularité historique des méthodes directes, les méthodes itératives suscitent un intérêt renouvelé et croissant.

Les méthodes itératives fournissent une approximation solution au problème matriciel qui s'améliore généralement avec une itération continue. Le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre une précision spécifiée n'est pas connu a priori. Pour les problèmes indépendants du temps, l'équation matricielle (2.41) est simplifiée sous la forme suivante :

$$K(\mathbf{T})\{\mathbf{T}\} = F(\mathbf{T}) \quad (2.55)$$

Quand l'équation (2.55) est non linéaire (par exemple, en raison de propriétés dépendantes de la température), elle doit être linéarisée. Pour de nombreux problèmes de conduction légèrement non linéaire, un schéma simple d'itérations par substitution successives, également connu sous le nom de méthode de Picard, convient. Le schéma Picard est donné par :

$$K(\mathbf{T}^n)\{\mathbf{T}^{n+1}\} = F(\mathbf{T}^n) \quad (2.56)$$

Où exposant n désigne le numéro d'itération. En évaluant la matrice conductive K et le vecteur droite F en utilisant la solution \mathbf{T}^n de l'itération précédente, nous avons donc linéarisé le problème.

Le problème linéarisé est résolu pour \mathbf{T}^{n+1} (en utilisant n'importe quelle méthode de solution matricielle), qui est ensuite utilisé pour évaluer la matrice conductive et le vecteur droite pour la prochaine itération. Cette procédure est poursuivie jusqu'à ce que la valeur racine-moyenne de la différence entre les vecteurs de solution à deux itérations consécutives (normalisée par rapport à la solution actuelle) soit réduite à une valeur inférieure à une tolérance prédéfinie, ε^2 :

$$\frac{(\mathbf{T}^{n+1} - \mathbf{T}^n)^T (\mathbf{T}^{n+1} - \mathbf{T}^n)}{(\mathbf{T}^{n+1})^T (\mathbf{T}^{n+1})} < \varepsilon^2 \quad (2.57)$$

On peut prendre la valeur de ε^2 dans l'intervalle de 10^{-2} à 10^{-4} .

Pour un problème de conduction transitoire, on utilise l'équation sous forme matricielle (2.41).

L'équation 2.50 qui a été évaluée à $\mathbf{T}^{n+\theta}$ est réécrit sous la forme suivante :

$$\frac{1}{\Delta t} [C(\mathbf{T}^\mu)](\mathbf{T}^{n+1} - \mathbf{T}^n) + \theta [K(\mathbf{T}^\mu)]\mathbf{T}^{n+1} = F(\mathbf{T}^\mu) - (1 - \theta)[K(\mathbf{T}^\mu)]\mathbf{T}^n \quad (2.58)$$

Avec : $\mu = n + \theta$

Lorsque $\theta = 1$, l'équation 2.58 réduit à :

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C(\mathbf{T}^{n+1})] + [K(\mathbf{T}^{n+1})] \right) \mathbf{T}^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} [C(\mathbf{T}^{n+1})]\mathbf{T}^n + F(\mathbf{T}^{n+1}) \quad (2.59)$$

Dans le cas général non linéaire, le problème de matrice présenté dans l'équation (2.59) nécessite une solution itérative pour \mathbf{T}^{n+1} à chaque pas de temps. Le cas linéaire peut être résolu

sans itération non linéaire, bien qu'une solution matricielle soit toujours requise. Le schéma de Picard serait un choix acceptable pour résoudre de façon itérative, l'équation (2.59) à l'instant t_{n+1} .

Dans le traitement de la forme non linéaire de l'équation (2.59), l'utilisation de schémas prédicteurs, méthodes d'extrapolation et quasi-linéarisation peut souvent réduire l'effort de calcul à chaque étape sans réduire de manière significative la précision de la méthode. Pour les non-linéarités légères et les pas de temps modestes, une quasi-linéarisation de l'équation (2.59) donne :

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C(T^n)] + [K(T^n)]\right) T^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} [C(T^n)] T^n + F(T^n) \quad (2.30)$$

Qui est maintenant une méthode non itérative en une étape pour la solution de T^{n+1} .

Une procédure d'extrapolation du formulaire :

$$T^\Psi = \frac{3}{2} T^n - \frac{1}{2} T^{n-1} \quad (2.31)$$

En conjonction avec :

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C(T^\Psi)] + [K(T^\Psi)]\right) T^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} [C(T^\Psi)] T^\Psi + F(T^\Psi) \quad (2.32)$$

Cette approche produira souvent une meilleure solution que (2.30) et permettra un plus grand pas de temps. Cette forme est attrayante en tant que fausse procédure transitoire pour des problèmes non linéaires.

Chapitre III :

Analyse numérique des propriétés
et des performances thermiques des
matériaux de construction avec MCP

3 Analyse numérique des propriétés et des performances thermiques des matériaux de construction avec MCP

Pour étudier numériquement les propriétés et la performance thermique d'un matériau de construction incorporé par MCP, on propose dans cette section les hypothèses et les formules utilisées dans le but de résoudre nos problèmes physiques.

3.1 Hypothèses de travail

Les principales hypothèses considérées dans les sous chapitres qui suivent sont :

- Le transfert de chaleur à travers le matériau de construction avec MCP est transitoire et bidimensionnel.
- Le matériau MCP utilisé est homogène et isotrope.
- Toutes les propriétés thermo physiques des matériaux de construction ont été maintenues constantes, sauf que la conductivité et la chaleur spécifique de MCP peuvent être différentes dans la phase liquide et solide.
- La chaleur latente étant très sensible au processus de transition de phase du MCP est modélisée sur une gamme de températures, où C_p est considéré comme uniforme pendant le changement de phase.
- La convection naturelle du MCP pendant le processus de fusion et l'effet de surfusion pendant le processus de solidification peuvent être négligées (L'épaisseur de MCP considérée est suffisamment petite) [255].
- Les couches d'interfaces entre la brique et le MCP sont homogènes avec un contact parfait, ce qui signifie que la résistance de contact est négligée.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est ignoré sauf pour celui du solaire.

3.2 Les équations de base utilisées

Une approche numérique basée sur la méthode de la capacité thermique effective qui a été mentionnée dans le chapitre 2, a été choisi dans ce travail pour résoudre nos problèmes physiques. Dans ce problème où le changement de phase est bidimensionnel et la conductivité thermique est constante.

Pour les couches sans MCP, l'enthalpie est donnée uniquement par l'enthalpie sensible (équation 3.1) et pour la couche avec MCP, elle est calculée comme somme de l'enthalpie sensible et de la chaleur latente (équation 3.2).

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p \partial T \quad (3.1)$$

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p \partial T + fL \quad (3.2)$$

3.3 Validation du modèle numérique

Deux travaux expérimentaux ont été proposés dans cette section pour valider le modèle numérique utilisé dans ce chapitre. Dans cette étude, l'erreur maximale calculée par l'équation (3.3) est utilisée pour évaluer la différence entre les résultats expérimentaux et numériques.

$$\text{Maximum Error (\%)} = \max_{1,2..n} \left\{ \left| \frac{T_{\text{exp}} - T_{\text{num}}}{T_{\text{exp}}} \times 100 \right| \right\} \quad (3.3)$$

En premier, le code numérique a été validé par comparaison avec une solution expérimentale disponible dans la littérature [256]. L'installation expérimentale dépend du test d'une dalle creuse en béton composée de huit trous cylindriques incorporée par MCP. Ce dernier est la paraffine avec un pic de point de fusion égal à 27,5 ° C et une chaleur latente de 110 ± 11 kJ / kg. Une étude sur le type et la taille du maillage a été effectuée pour cette validation. Il a été sélectionné un maillage triangulaire avec un nombre d'élément égal à 2428 et le critère de convergence pour la température utilisée est de 10⁻⁴.

Dans la première phase, la surface inférieure de la dalle est imposée à une augmentation linéaire de température de 20 °C à 35 °C pendant une heure (taux d'élévation= 1,25 °C / h) puis on maintient la température à 35 °C pendant 6 heures. Leur côté supérieur est en contact direct avec l'atmosphère de la salle de laboratoire à T_i = 20°C. La figure 3.1 montre la comparaison entre nos résultats numériques et les résultats obtenus dans l'expérimentation sur la variation de la température des surfaces inférieures et supérieures des dalles.

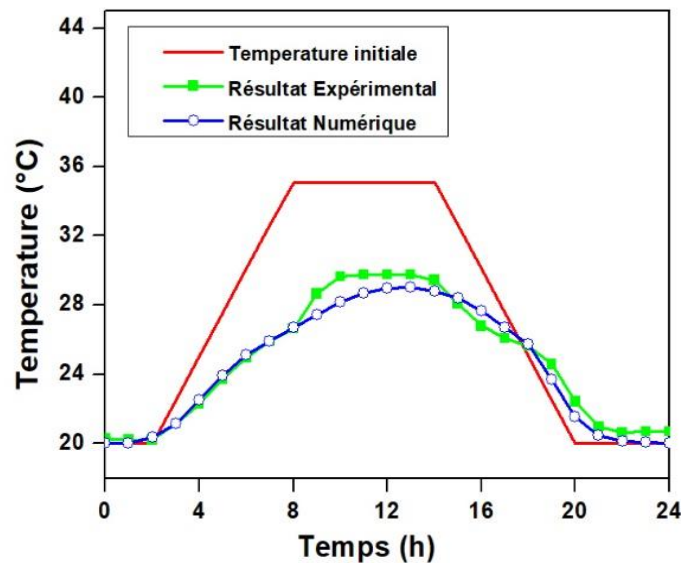


Figure 3.1. Comparaison entre le résultat numérique et expérimental

La figure 3.1 révèle que le résultat numérique est en harmonie avec les mesures expérimentales où l'erreur maximale est estimée par une valeur de (5%).

La deuxième phase de cette validation est basée sur les mêmes procédures que la précédente. Mais cette fois la surface inférieure de la dalle est soumise à une variation linéaire de la température entre 20 ° C et 33 ° C, pour une période de chauffage-refroidissement de 24 heures en utilisant un échangeur de chaleur, alimenté par un flux d'eau thermo régulé. La durée du cycle de chauffage-refroidissement a été estimée à environ 58 minutes afin de tenir compte la dimension de la dalle. Cette fois, la température ambiante de la pièce est $T_i = 18,5^{\circ}\text{C}$. La figure 3.2 montre la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, où la température à la surface supérieure de la dalle a été évaluée au cours de sept cycles successifs de chauffage-refroidissement. Comme la montre dans la figure 3.2, le résultat numérique s'accorde bien avec les tests expérimentaux avec une erreur maximale de (6%).

Pour les deux phases de validation, quatre raisons peuvent expliquer cette légère distinction entre les données expérimentales et celles de la simulation. D'abord, l'efficacité des matériaux isolants qui ont été placés sur les faces latérales des matériaux de construction utilisés dans l'expérience n'est pas parfaite. Par conséquent, cela ne peut pas induire la même réponse thermique que celle considérée dans la simulation numérique. Ensuite, la présence de la troisième dimension dont on a négligé son effet

dans notre simulation numérique à deux dimensions. De plus, la possibilité que l'effet de la convection naturelle dans le cas expérimental ne soit pas négligé et qu'il puisse être intégré à l'état liquide du MCP, ce qui est différent des hypothèses retenues dans le modèle de simulation numérique. Enfin, l'étude expérimentale a montré que la température de fusion et la température de solidification du MCP sont différentes puisque dans la réalité on ne peut pas obtenir un MCP pure à 100%. Dans l'étude numérique, ce facteur est pris en compte en testant différentes valeurs de δT (zone de transition de phase). Comme par exemple, dans la deuxième validation, on a essayé de tester la valeur de l'erreur maximale en fonction de la variation de δT qui représente la zone de changement de phase. Dans la figure 3.3, on constate que le cas optimal de l'erreur est obtenu par une zone de transition de phase plus large $\delta T = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ avec une erreur autour de (5%).

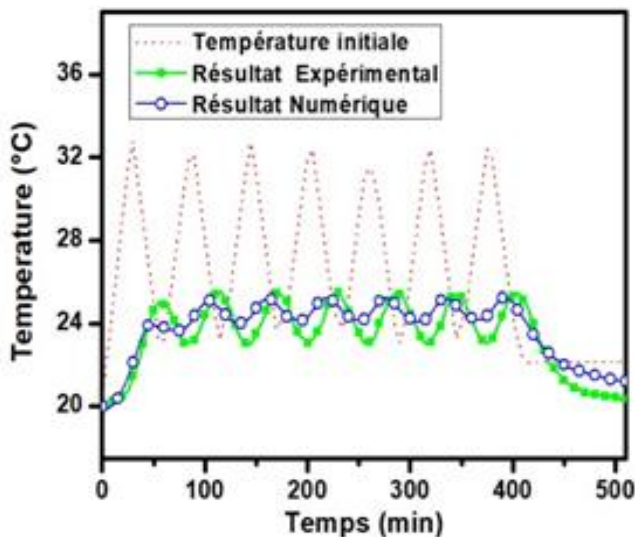


Figure 3.2. Température aux interfaces de la dalle

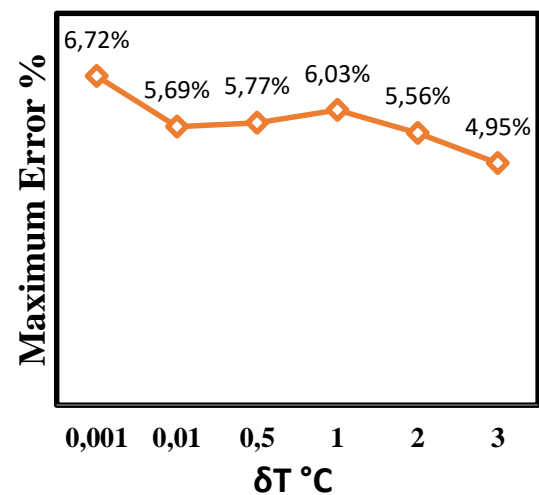


Figure 3.3. L'erreur maximale en fonction de la température

3.4 Les propriétés thermos physiques d'une brique incorporée par un MCP

Dans cette section, on présente une étude numérique des propriétés thermo physiques d'un nouveau matériau utilisé dans le bâtiment. Le matériau proposé est la brique creuse avec deux types de dimension, remplis par un MCP de type paraffine. Ce dernier peut augmenter l'inertie thermique des murs extérieurs dans les bâtiments. Le calcul numérique effectué est basé sur la méthode des éléments finis où on essaiera de déterminer les propriétés thermo physique pour le matériau proposé, telles que la conductivité thermique effective et la capacité thermique équivalente. De plus, cette

étude numérique permet une approche sur l'évaluation du flux de chaleur et la fluctuation de température dans la surface intérieure de la paroi. L'efficacité thermique du système brique-MCP proposé est évaluée en comparant les résultats obtenus avec un autre matériau de référence (sans MCP)

3.4.1 Présentation du problème physique

La brique creuse rouge utilisée est la forme parallélépipédique avec deux types de taille :

- La brique de type 1 est constituée de huit trous vides internes d'une épaisseur totale de 10cm, de largeur de 20cm et de longueur égale 30cm.
- Le type 2 est composé de douze trous vides internes d'épaisseur de 15cm, de largeur de 20cm et de longueur égale 30cm.

Dans les deux types, chaque cavité a une section parallélépipédique ($3,5 \times 3,5 \text{ cm}^2$) et 30 cm de longueur.

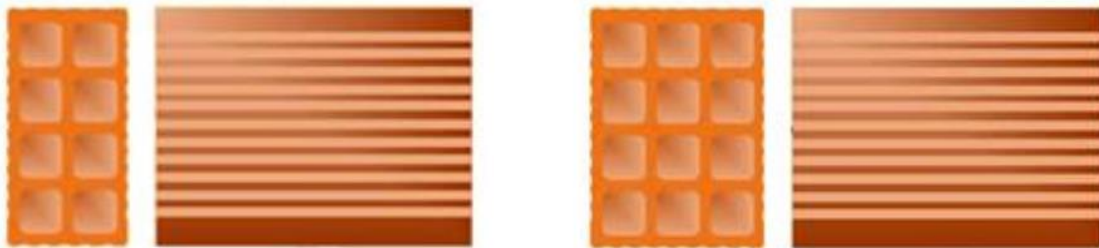


Figure 3.4. Deux types de brique creuse, gauche : type 1 ; droite : type 2

Il est proposé d'insérer le MCP en particulier la paraffine (n-octadécane) dans les cavités internes. Ce MCP a été choisi en raison de sa compatibilité avec un récipient fermé en plastique afin d'éviter sa fuite à l'état liquide et aussi parce qu'ils sont considérés comme non corrosifs et chimiquement inertes. Pour la phase de fusion, la température de début de processus est de 26°C , la température au pic est de $27,6^\circ \text{C}$ et la chaleur latente de fusion est de $243,5 \text{ kJ / kg}$. Ces valeurs sont cohérentes avec les résultats déjà obtenus et ceux de la littérature [257].

| Matériaux | Densité (kg/m ³) | Conductivité thermique (W/m.K) | Capacité thermique (J/kg.K) |
|---------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| MCP solide | 865 | 0.358 | 1934 |
| MCP liquide | 780 | 0.148 | 2196 |
| Brique creuse | 1600 | 0.7 | 840 |

Tableau 3.1. propriétés thermo physique du MCP et de la brique creuse

3.4.2 Méthode de solution

Pour les deux types de briques creuses avec et sans MCP, la formule (3.4) est utilisée pour trouver la chaleur stockée totale pendant la période de la simulation :

$$Q = m(h_{fin} - h_{int}) = m\Delta h \quad (3.4)$$

La chaleur stockée uniquement par MCP peut être évaluée avec une soustraction entre la chaleur totale stockée dans la brique creuse remplie par MCP et la chaleur totale stockée par le cas de référence (la chaleur stockée par l'air a été négligée en raison de sa faible valeur en capacité thermique).

Pour déterminer la conductivité thermique dans l'état solide, il est nécessaire d'imposer une différence de température entre deux faces du matériau jusqu'à atteindre l'état de repos [258,259].

Les relations ci-dessous permettent un accès plus rapide à la valeur de la conductivité effective à l'état solide et liquide :

$$\lambda_{eff,Sol} = \frac{\varphi \times e}{\Delta T_{sol}} ; \lambda_{eff,Liq} = \frac{\varphi \times e}{\Delta T_{liq}} \quad (3.5)$$

Où e représente l'épaisseur de matériau et ΔT_{sol} est la différence de température entre la surface extérieure et intérieure $(T_{se} - T_{si})$ lorsque $T_{se}, T_{si} < T_f$; de même pour ΔT_{liq} mais cette fois lorsque $T_{se}, T_{si} > T_f$.

3.4.3 Résultats et discussion

Dans cette section, l'espace intérieur est toujours considéré maintenu à une température constante $T_i = 20$ °C.

Sur la face extérieure de la paroi, on impose une augmentation linéaire de la température de 20 ° C à 50 ° C pendant 15 heures (vitesse = 2 ° C/ h) puis la température de l'extérieur est maintenue à 50 ° C pendant 9 heures. Le résultat de la comparaison numérique entre le cas où les deux types de brique creuses sont incorporés avec MCP et le cas de référence (sans MCP) est bien illustré dans la figure 3.5. Pour le calcul, nous notons que la convergence de la méthode numérique est également testée en faisant varier les effets des mailles et aussi l'étape relative de temps et analyser leurs effets sur les résultats. Un maillage quadrilatère est adopté avec 800 éléments pour la brique de type 1 et 1200 éléments pour le type 2. La fonction

utilisée pour l'interpolation de la température à l'intérieur d'un élément fini est celle d'un élément linéaire quadratique. Le critère de convergence pour la température est de 10^{-4} .

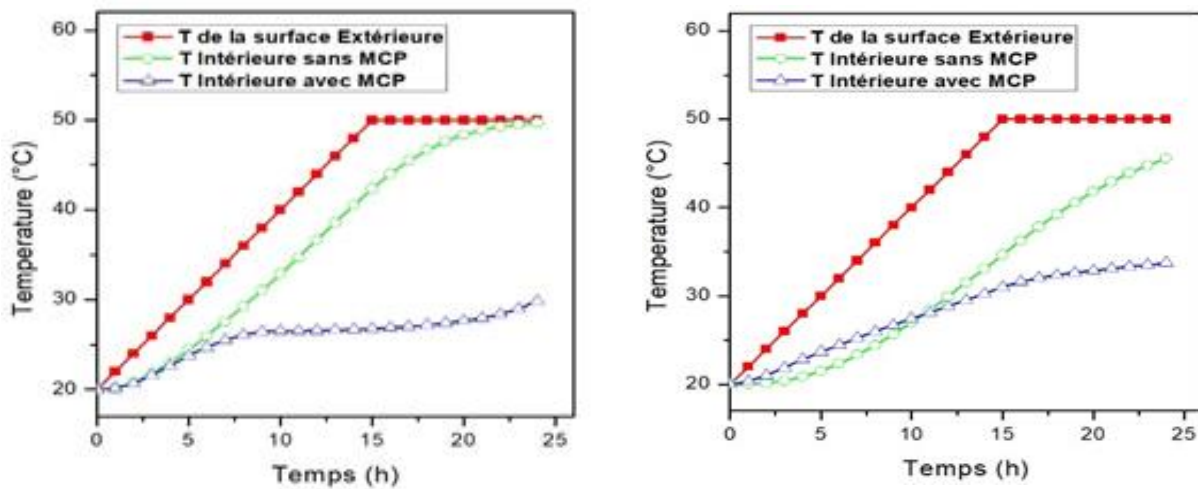


Figure 3.5. La variation des surfaces de température au cours du temps ;
Gauche : type 1; Droite: type 2

3.4.3.1 Analyse préliminaire :

On trouve dans les deux types de briques que le niveau de température atteint dans le cas de référence est plus élevé que celui des matériaux avec MCP pour des conditions aux limites similaires. Cette étude numérique démontre clairement l'effet de MCP sur l'inertie thermique de ces parois, la variation de température dans le matériau avec MCP est beaucoup plus lente. Il est bien clair que la température de la surface intérieure de la brique creuse atteint un niveau plus faible dans le cas où le MCP est incorporé, cela est dû à la grande quantité de chaleur absorbée lors de la fusion du MCP. De même, pour une durée de 24 heures, il est également observé que la température dans la surface intérieure de la brique creuse de type 1 avec MCP a atteint une valeur de 30°C par une contribution légèrement différente à la brique creuse de type 2 avec MCP, dont la température atteinte est égale à 33°C . Cette petite différence de température révèle que le MCP dans les deux types de briques a absorbé presque la même quantité de chaleur, ce qui signifie que le processus de changement de phase n'est pas encore terminé dans le deuxième type de la brique creuse.

Selon la figure 3.5, on peut observer que pendant la période entre 10 et 20 h, le MCP inséré dans la brique creuse de type 1 modère les oscillations de température de la surface intérieure et la rapproche de la température de fusion. Cela peut être expliqué par le début du processus de fusion qui permet le stockage d'une grande quantité

d'énergie avec moins de variation de température dans la brique creuse. Par conséquent, ce phénomène créera une grande différence entre les deux profils de température à la surface extérieure et intérieure. À la fin de cette mesure, on constate que le profil de température de la surface intérieure commence à prendre un autre chemin vers le haut. Cette variation de pente peut être utilisée comme indicateur de la fin du processus. Par contre, dans le type 2, la température de surface intérieure de la brique creuse avec MCP a pris plus de temps (environ 16 h) pour atteindre la température de fusion, ce qui signifie que dans ce cas, il y a un retard dans le début de la fusion.

3.4.3.2 Propriétés thermo physiques de la brique creuse avec MCP

Afin de confirmer ces analyses préliminaires, il est nécessaire de déterminer les propriétés thermo physiques dans les deux types de briques creuses. En premier, pour les deux briques creuses, on étudie la différence entre le flux de chaleur dans les surfaces externe et interne des parois avec et sans MCP. Leurs résultats sont présentés dans la figure 3.6. Les résultats indiquent que la diminution de la chaleur transmise est très importante dans les deux briques creuses avec MCP par rapport au cas de référence et ceci est dû à la forte accumulation de chaleur.

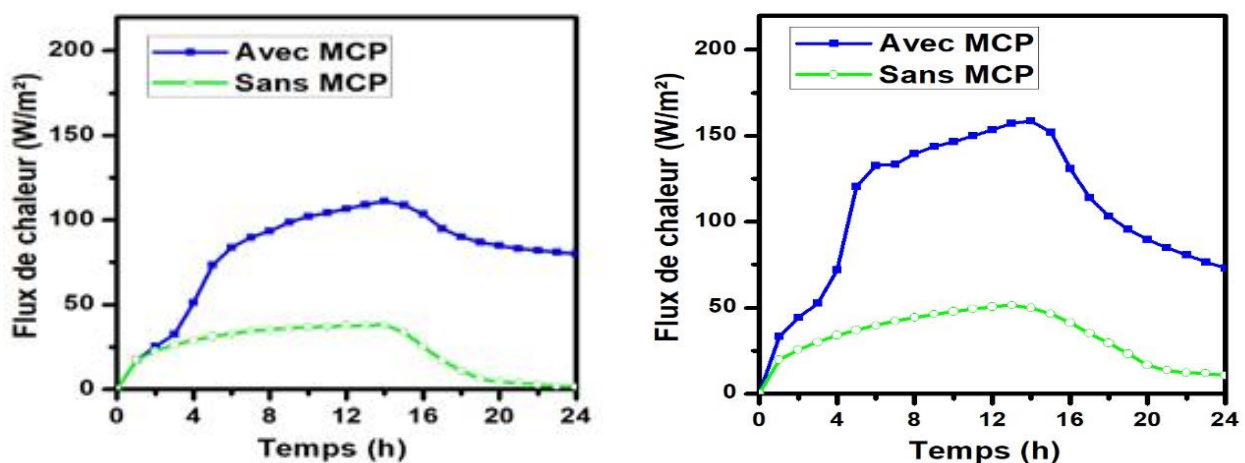


Figure 3.6. La différence entre le flux de chaleur extérieur et interne;
Gauche: type 1; Droite: type 2

La différence de flux de chaleur entre les deux types peut être expliquée en raison de la différence entre la quantité de MCP insérée dans les briques creuses ; la brique creuse de type 2 contient 1/3 de la quantité de MCP par rapport à celle de type 1, ce qui augmente l'énergie requise pour le processus de changement de phase.

Pour estimer la valeur de chaleur stockée par MCP, une soustraction entre la brique creuse avec MCP et de référence est effectuée, en négligeant la chaleur stockée par l'air dans la paroi sans MCP. Le tableau 3.2 résume les résultats de la chaleur stockée en 24 heures par les deux types de briques avec et sans MCP.

| | Brique creuse Type 1 | Brique creuse Type 2 |
|--|-------------------------|-------------------------|
| La chaleur totale stockée KJ (avec MCP) | 734.36 | 748.9 |
| La chaleur totale stockée KJ (sans MCP) | 77.72 | 89.29 |
| La chaleur stockée par MCP KJ | 656.64 | 659.62 |

Tableau 3.2. Chaleur stockée durant 24 h

Il est clairement montré que la quasi-totalité de la chaleur est stockée sous forme de chaleur latente, ce qui explique la raison pour laquelle les fluctuations de température dans la surface interne de la paroi avec MCP sont beaucoup plus lentes.

La capacité thermique équivalente des parois de briques creuses pour les deux types avec MCP est calculée avec l'équation (3.6). Leurs valeurs sont représentées dans la figure 3.7.

$$C'_{pe} = C_p \pm L_f \frac{\partial f}{\partial T} \quad (3.6)$$

On observe une forte augmentation de C'_{pe} dans les deux types de briques creuses pendant le processus de fusion. Pour le premier type, la valeur de C'_{pe} varie de 27 ° C à 30 ° C et de 30 ° C à 34 ° C pour le deuxième type.

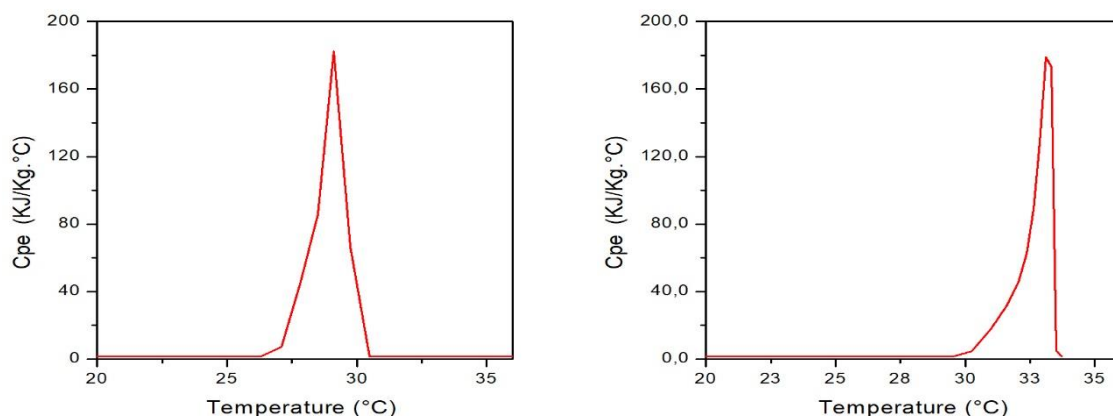


Figure 3.7. La capacité thermique équivalente ; Gauche : type 1 ; Droite : type 2

Lorsque la brique creuse de type 1 est utilisée, le MCP sera complètement à l'état liquide après 24 heures. Ce changement de phase peut évidemment augmenter la chaleur spécifique équivalente du matériau dans l'intervalle de la température de fusion. Cependant, dans le cas de brique de type 2 et après une même période, la quantité du MCP incorporée est plus grande, ce qui nécessite plus d'énergie à absorber pour pouvoir changer de phase. Ceci provoque un retardement pour atteindre l'intervalle de température où la chaleur spécifique équivalente sera modifiée dans la brique de type 2.

La conductivité thermique effective des deux types de briques creuses est déduite par l'équation (3.5) et les résultats pour les deux phases sont présentés dans le tableau 3.3. La faible différence entre la valeur effective de la conductivité thermique de la brique creuse de type 1 et celle de type 2 s'expliquent par le fait que les deux types de briques creuses contiennent pratiquement la même fraction de volume de MCP en phase solide. Lorsque le MCP atteint sa phase liquide, sa conductivité thermique diminuera, ce qui entraînera une réduction de la conductivité thermique effective de la composite brique creuse- MCP.

| | Brique creuse Type 1+MCP | Brique creuse Type 2+MCP |
|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| La phase Solide | 0.5 | 0.47 |
| La phase Liquide | 0.33 | 0.35 |

Tableau 3.3. La conductivité thermique effective des deux types de briques creuses

3.5 La capacité de stockage d'énergie par un MCP incorporé dans deux différents matériaux de construction

Afin de déterminer l'influence de l'utilisation du système d'énergie thermique dans les applications de construction, une étude numérique basée sur la méthode des éléments finis a été réalisée dans ce travail. Pour atteindre cet objectif, deux matériaux de construction différents, généralement utilisés dans plusieurs régions, ont été sélectionnés. Le but est d'évaluer le stockage énergétique total de ces deux matériaux, lorsqu'ils sont remplis par MCP, en analysant et en comparant leurs performances énergétiques

3.5.1 Présentation du problème physique

Deux matériaux de construction remplis par MCP ont été sélectionnés à savoir la brique creuse de type 1 et un bloc de parpaing illustrés par la figure 3.8. Le bloc de parpaing se compose de 6 trous parallélépipédiques (7 x 14 cm²) avec des dimensions totales de 20 cm d'épaisseur, 50 cm de largeur et 20 cm de longueur. Pour ses propriétés thermos physiques, il se caractérise par une densité de 865 Kg/m³, une capacité thermique égale à 1934 (KJ/kg K) et une conductivité thermique de 0.358 (W/m².K).

Quant à la brique creuse de type 1 et le MCP, on maintient les mêmes caractéristiques géométriques et thermos physiques utilisées dans la section 3.4.1.

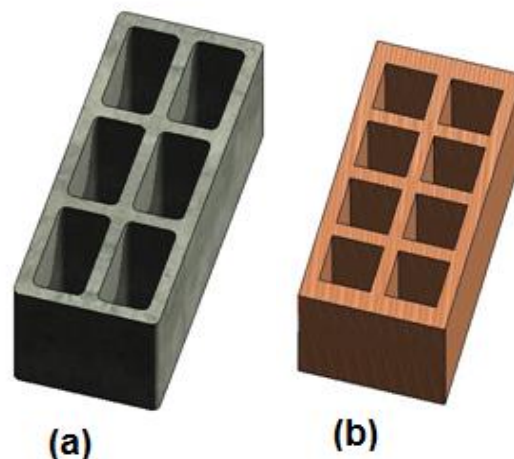


Figure 3.8. (a) Brique creuse; (b) Parpaing

3.5.2 Méthode de solution

Pour les deux matériaux de construction avec et sans MCP, la formule (3.7) est utilisée pour calculer l'énergie stockée par unité de surface :

$$E(t) = \int_0^t (\varphi_{si} - \varphi_{se}) dt \quad (3.7)$$

Avec φ_{si} et φ_{se} sont respectivement, le flux de chaleur à l'intérieur et à l'extérieur.

3.5.3 Les conditions aux limites

Les conditions aux limites dans la surface intérieure et extérieure sont données par :

$$-\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial x} = h_{c,j} (T_j - T_{s,j}) \quad (3.8)$$

L'indice « b » représente le matériau de construction et h_c est le coefficient de transfert de chaleur par convection.

$$\text{Avec : } \begin{cases} h_{c,j} = h_{c,i}, T_j = T_i, T_{s,j} = T_{s,i} & ; & x = 0 \\ h_{c,j} = h_{c,e}, T_j = T_e, T_{s,j} = T_{s,e} & ; & x = e_b \end{cases} \quad (3.9)$$

Les valeurs numériques du coefficient de transfert de chaleur par convection peuvent être supposées comme dans [260] :

$$h_{c,e} = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \text{ et } h_{c,i} = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}).$$

Suivant l'axe y, on considère que les parois latérales sont adiabatiques d'où :

$$\left. \frac{\partial T_b}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T_b}{\partial y} \right|_{y=H} = 0 \quad (3.10)$$

Avec H représente la dimension du matériau de construction (brique ou parpaing) selon l'axe y

- Les conditions aux limites aux interfaces matériau de construction/MCP :

$$\lambda_{mcp} \frac{\partial T_{mcp}}{\partial n} = -\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial n} \quad (3.11)$$

Avec « n » est la coordonnée normale à la surface de la cavité remplie par MCP.

3.5.4 Résultats et discussion

La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre le problème physique. Pour les deux matériaux de construction, un élément quadrilatéral « quatre-nodal » a été sélectionné pour mailler le domaine informatique. Après plusieurs tests de maillage, un nombre d'élément égal à 800 a été adopté pour la brique creuse et 4 000 éléments pour le bloc de parpaing. Les deux matériaux sélectionnés sont soumis à une température ambiante externe durant une journée. Par ailleurs, La température intérieure a été maintenue constante.

Comme le montre la figure 3.9, une comparaison de flux de chaleur à la surface intérieure entre les deux matériaux de construction a été effectuée. D'après les résultats obtenus, le niveau de flux de chaleur atteint par la brique creuse est supérieur à celui du bloc de parpaing. L'une des causes peut être expliquer par la différence entre la quantité de MCP insérée dans les deux matériaux.

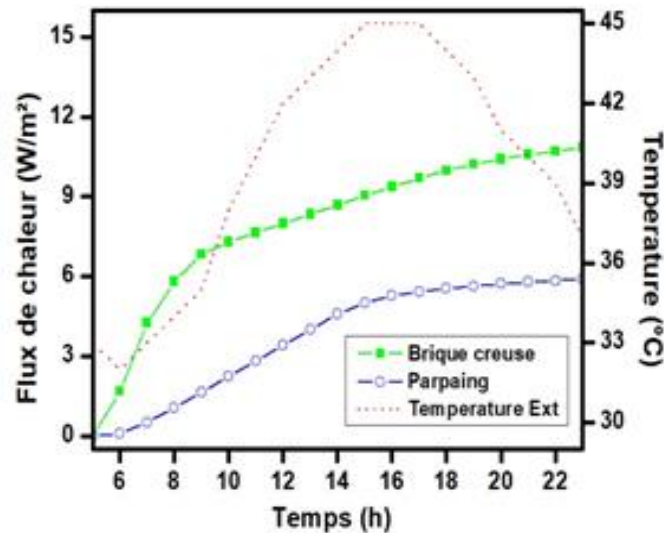


Figure 3.9. Flux de chaleur à la surface intérieure pour les deux matériaux avec MCP

La quantité de MCP dans le bloc de parpaing est d'environ supérieure de 75% à celle utilisée dans la brique creuse vu les différences de géométrie entre les deux matériaux. Par conséquent, le système de brique creuse-MCP ne bénéficie pas beaucoup d'une importante absorption de chaleur latente. Du fait que l'utilisation d'une petite quantité de MCP permet d'accélérer le processus de changement de phase et donc rendre le MCP dans la plupart du temps inactif avec un stockage de chaleur uniquement sous forme sensible. D'autre part, pour le bloc de parpaing avec MCP, la plus grande partie de la chaleur est stockée sous forme de chaleur latente en raison de la grande énergie requise par le MCP pour compléter son processus de changement de phase. Par conséquent, plus d'énergie va être absorbée par le matériau au lieu d'être transmise vers le côté intérieur. La figure 3.10 représente la quantité de chaleur calculée par unité de surface en fonction du temps, en utilisant l'équation (3.7).

On peut constater que l'énergie thermique stockée dans le parpaing avec MCP est plus grande que celle de la brique creuse. À la fin de la journée, il a été observé que l'énergie stockée sous forme de chaleur latente par le MCP placé à l'intérieur du parpaing est d'environ 2.29×10^6 KJ/m². Alors que le MCP à l'intérieur de la brique creuse n'a stocké qu'une faible quantité de chaleur latente autour de 10^6 KJ/m². Ce résultat est compatible avec ce qui a été mentionné ci-dessus. Comme il a été observé à partir des valeurs obtenues, plus la quantité de MCP augmente, plus la demande de stockage de la chaleur latente devient plus importante pour compléter le processus de changement de phase.

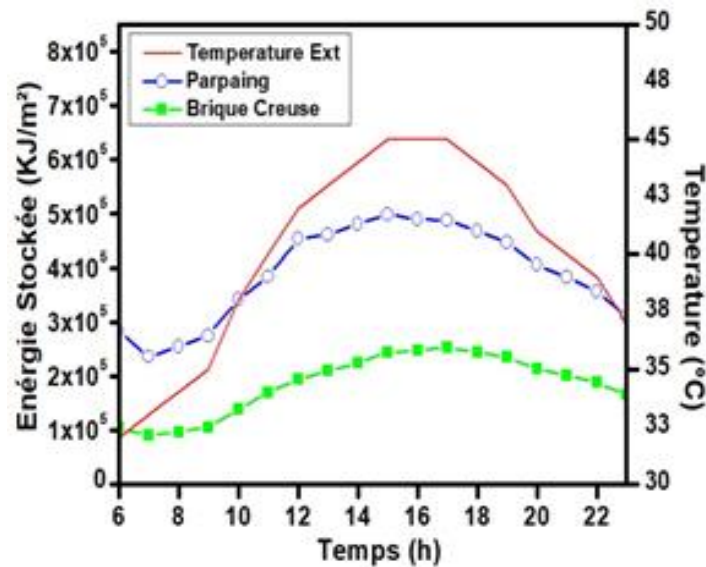


Figure 3.10. Énergie stockée par unité de surface en fonction du temps

Pour une meilleure compréhension de ces résultats, on a évalué la fraction liquide comme le montre la figure 3.11. On peut voir que plus de 50% du MCP inséré dans la brique creuse a été converti à l'état liquide, alors que seulement 25% du MCP dans le parpaing a changé de phase. Cette constatation révèle que la plus grande partie de l'énergie est stockée sous forme de chaleur sensible dans le bloc de parpaing à cause de la grande quantité du MCP. Ceci offre au parpaing la possibilité de stocker plus de chaleur latente qui conduit à réduire la chaleur transmise dans l'espace intérieur. De ce fait, l'utilisation d'un matériau de construction capable de contenir une plus grande quantité de MCP est plus efficace pour atténuer l'effet des fluctuations de la température extérieure sur l'environnement thermique intérieur et cela en améliorant son effet d'isolation.

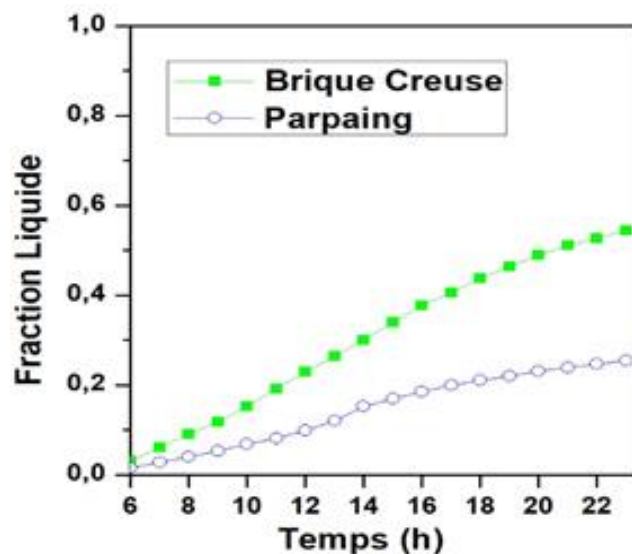


Figure 3.11. Fraction liquide pour les deux matériaux avec MCP

3.6 Performances thermiques d'un mur extérieur de briques creuses contenant du MCP

Dans ce travail, l'objectif est d'évaluer l'étude de la performance thermique des matériaux de construction remplis d'un MCP. La paroi extérieure proposée du bâtiment se compose de deux couches de briques creuses avec MCP et séparées par une lame d'air. Ce système est utilisé pour stocker de l'énergie pendant la période de chaleur et l'utiliser pour la nécessité d'un confort thermique. Une simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis est utilisée pour évaluer l'efficacité thermique du système proposé (brique-MCP) et le comparer avec un mur de référence (sans MCP) pendant la journée. Selon le modèle numérique conçu dans cette section, les performances thermiques de la paroi proposée sont analysées sous l'influence de divers facteurs en particulier : la quantité et le type de MCP, son emplacement ainsi que l'épaisseur de la couche de lame d'air.

3.6.1 Présentation du problème physique

La forme géométrique de la paroi de brique creuse proposée est présentée dans la figure 3.12. Elle est composée d'une double couche de briques creuses séparées par une couche de lame d'air et remplies par MCP dans les cavités vides de la brique. La couche de la paroi qui est en contact avec l'extérieur se compose d'une brique creuse de douze trous par contre celle qui est en contact avec l'espace intérieur se compose d'une brique creuse de huit trous. La géométrie de briques creuses utilisées dans les deux couches a été déjà décrite dans la section 3.4.1.

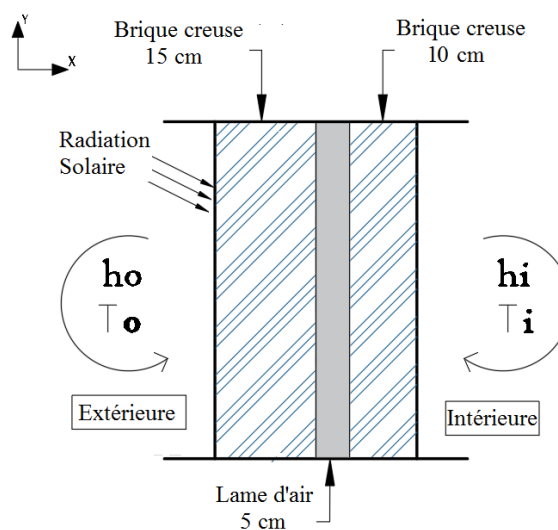


Figure 3.12. Double couche d'une brique creuse séparée par un espace d'air

Dans cette étude, on a choisi la paraffine comme matériau de stockage d'énergie thermique pratique en raison de sa grande capacité de stockage, de l'absence de phénomène de ségrégation et de sous-refroidissement ainsi que leur stabilité chimique et non corrosive [261-263]. La paraffine choisie est un MCP commercial (RT42). La température de changement de phase de MCP au pic principal est de $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ et la chaleur latente est d'environ $165 \pm 7,5\text{ kJ / kg}$. Les caractéristiques thermos physiques du MCP utilisé sont présentées dans le tableau 3.4 [264].

| Matériau | Densité (Kg/m ³) | Conductivité thermique (W/m.K) | Capacité thermique (KJ/kg.K) |
|----------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| MCP | 880 (solide) ; 760 (liquide) | 0.2 (solide, liquide) | 2 (solide, liquide) |

Tableau 3.4. Caractéristiques thermos physiques du MCP

La surface extérieure du mur de briques creuses est exposée à un rayonnement de flux solaire et à une température d'air externe, tandis que la surface intérieure est soumise à une condition de convection libre. Des données réelles ont été appliquées pour définir les conditions extérieures. L'un des facteurs importants qui permet une meilleure exploitation du système de stockage d'énergie thermique est l'oscillation de la température pendant différentes périodes de la journée. Durant cette période, le processus de solidification de MCP se produit la nuit sous une température plus basse tandis que le processus de fusion nécessite une température élevée qui est presque couplée à l'intensité du rayonnement solaire pendant la matinée. La figure 3.13 montre les variations horaires moyennes mesurées de la température de l'air ambiant dans le sud Algérien pendant une période de trois jours [265]. D'après les informations météorologiques, on a constaté que la consommation d'énergie atteint son pic au mois de juin d'où la motivation du choix de cette période pour mener cette étude. Selon les informations issues de la station météorologique située dans la ville de Timimoune (sud-ouest de l'Algérie), la valeur moyenne du rayonnement du flux solaire au mois de juin est égale à $110,9\text{ W / m}^2$.

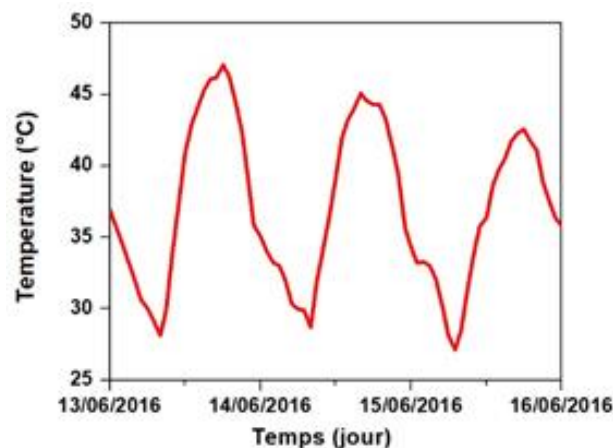


Figure 3.13. La température de l'air ambiant dans le sud de l'Algérie

3.6.2 Les conditions aux limites

Les conditions aux limites mathématiques pour le domaine de calcul sont les suivantes :

- Les conditions aux limites dans la surface intérieure ($x = e$):

$$-\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial x} = h_{c,i}(T_i - T_{si}) \quad (3.12)$$

- Les conditions aux limites dans la surface extérieure ($x = 0$):

$$-\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial x} = h_{c,e}(T_a - T_{se}) \quad (3.13)$$

Où T_a est la température de l'air extérieur qui est calculée par la formule (9) :

$$T_a = T_{se} + \frac{\alpha Q_s}{h_{c,e}} \quad (3.14)$$

Avec α est l'absorbant solaire de la surface du mur et Q_s (W / m^2) est le rayonnement de flux solaire.

Pour les conditions aux limites selon l'axe y et aux interfaces du paroi/MCP, on considère les mêmes formules qui ont été mentionnées dans la section 3.5.2 (les équations 3.10 et 3.11)

3.6.3 Résultats et discussion

La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre ce problème physique. Un élément quadrilatéral à quatre-nodal a été appliqué pour mailler le domaine informatique. Après plusieurs tests de maille, un nombre d'élément égal à 2444 a été adopté pour cette simulation.

3.6.3.1 L'effet de l'emplacement et de la quantité de MCP :

L'effet de la quantité de MCP dépend du nombre de trous dans le mur de briques. Dans cette étude, cinq cas différents de la quantité de MCP insérée dans les trous sont étudiés. Le MCP est d'abord inséré dans une seule colonne de la brique creuse et dans chaque nouvelle phase une nouvelle colonne est ajoutée jusqu'à ce que la brique atteigne son maximum en MCP. Afin d'installer le MCP à l'intérieur de la brique creuse, il existe différentes configurations qui peuvent être utilisées.

Dans cette section, plusieurs possibilités de position du MCP ont été testées. Parmi tous les essais de chacun des cinq cas mentionnés ci-dessus, il n'a été sélectionné que les configurations importantes où l'effet de l'emplacement du MCP a été clairement indiqué.

La figure 3.14 clarifie la combinaison entre la quantité et l'emplacement du MCP en utilisant diverses configurations pour chaque cas. L'efficacité du système MCP-brique a été évaluée en le comparant avec une brique de référence sans MCP et ce en se basant sur la température au niveau de la surface intérieure. La figure 3.15 montrent l'évaluation de l'effet de la position du MCP en mesurant la température intérieure de toutes les configurations pour chaque cas proposé et en le comparant au cas de référence (sans MCP).

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

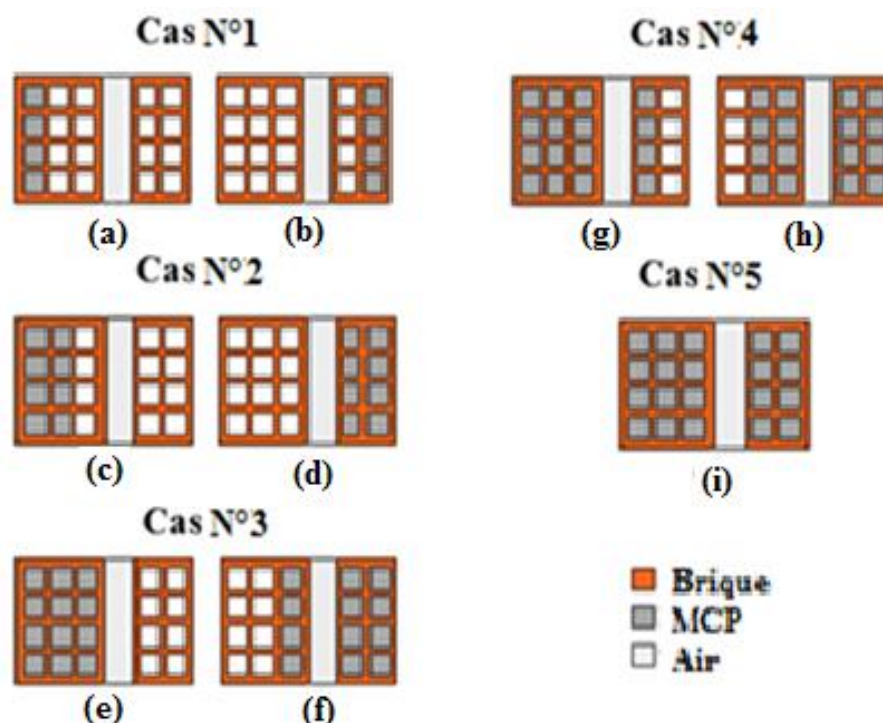


Figure 3.14 L'effet de la quantité et de l'emplacement du MCP à l'intérieur du mur de brique creuse

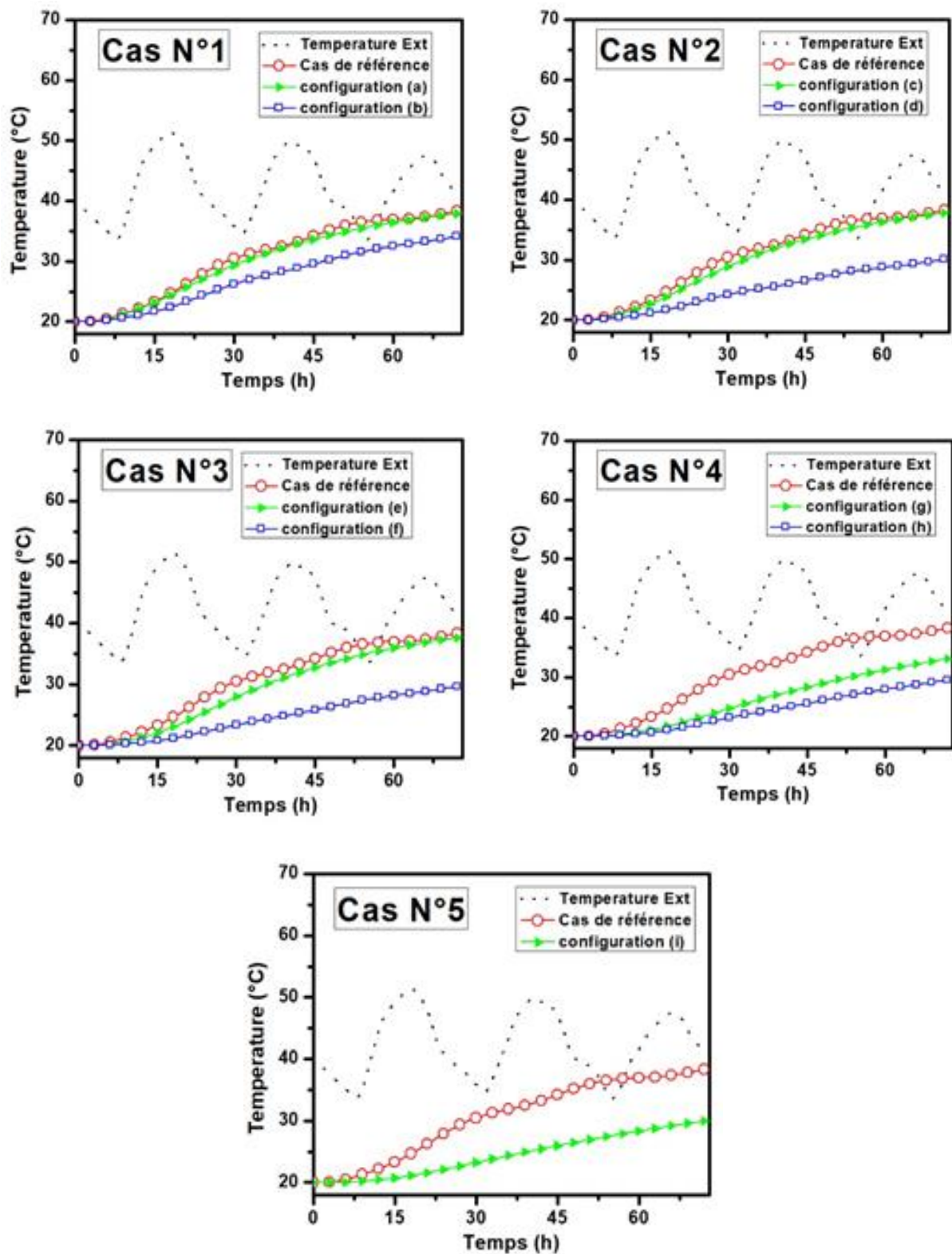


Figure 3.15 Température moyenne de la surface interne dans les cinq cas étudiés avec différentes configurations

Dans le premier cas, on constate que l'emplacement optimal de MCP est donné par la configuration (b), où le niveau de température de la surface intérieure est plus bas que d'autres configurations examinées. L'un des avantages de l'utilisation d'une petite quantité de MCP est de maintenir la résistance mécanique de la brique creuse. Par ailleurs, il pourrait avoir un impact négatif sur la performance thermique du mur lorsqu'il est placé dans la mauvaise position. Les résultats obtenus par les configurations (a) et (c) peuvent être utilisés pour expliquer ce qui peut se produire lorsqu'une petite quantité de MCP est placée dans un endroit inapproprié. On constate que la température de la surface intérieure pour ces deux configurations est plus proche du cas de référence. La cause est due à la faible énergie thermique stockée par le MCP. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire d'ajouter une quantité plus élevée de MCP afin de renforcer l'inertie thermique de la paroi.

3.6.3.2 L'effet de la quantité de MCP

L'effet de la quantité de MCP sur la performance thermique du mur est estimé en sélectionnant la configuration optimale donnée par l'emplacement de MCP dans chacun des cinq cas et ce en les comparant. La figure 3.16 présente la température maximale atteinte à la surface intérieure des différentes configurations sélectionnées. Ces résultats préliminaires ne peuvent pas être utilisés seuls pour déterminer la meilleure performance possible.

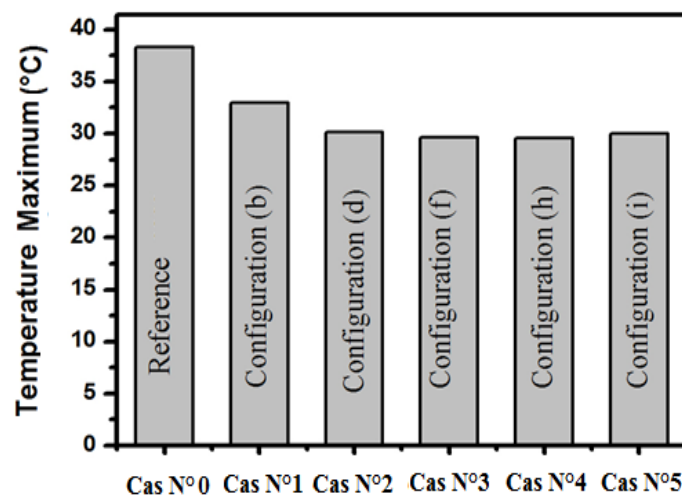


Figure 3.16. La température de surface interne de la configuration optimale dans chaque cas

À la suite de ce travail, on garde la paroi avec MCP {cas N°2 configurations (d)} dont elle a été sélectionnée au-dessus comme la paroi optimale et on essaye de

tester d'autres facteurs qui influencent leur comportement thermique à savoir l'effet du type de MCP, l'épaisseur de la couche de lame d'air et l'effet d'utiliser d'autres matériaux d'isolations appliqués entre les deux couches de briques creuses.

3.6.3.3 *L'effet de type de MCP*

Le type de MCP est l'un des facteurs importants qui influent sur la performance thermique des murs. Il est à noter que les MCP sélectionnés ont des chaleurs latentes et des températures de transitions toutes deux différentes. Lorsque cette dernière est très supérieure à la température ambiante, une petite quantité de chaleur latente est absorbée par MCP. Tandis que, lorsque la température de transition est très faible, cela affecte négativement le processus de solidification par conséquent la température intérieure pendant la nuit est réduite considérablement. Dans le présent document, trois MCP commerciaux, RT21, RT26 et RT42 sont utilisés. Les caractéristiques thermophysiques des trois sont présentées dans [264].

La chaleur latente des trois MCP sélectionnés est approximativement la même. Donc la variation de type du MCP ne va dépendre que de la température de transition. La figure 3.17 montre la température dans la surface intérieure pour les trois types de MCP, ainsi qu'une brique sans MCP, pendant la simulation. Les résultats indiquent que RT42 et RT26 ne sont pas utiles pour réduire la température dans la surface intérieure du fait qu'elle soit évaluée assez proche de celle de la brique sans MCP. La température de transition élevée de la RT42 l'a maintenue dans une phase solide tout le temps. Par conséquent, le mur de briques creuses ne bénéficie pas de sa forte chaleur de fusion latente. Pour la RT26, elle n'a pas une température de transition élevée comme le premier MCP. Néanmoins, la quantité de chaleur latente stockée par ce type de MCP n'est pas suffisante pour réduire autant que souhaitable le flux de chaleur dans l'espace intérieur. D'autre part, lorsque RT21 est introduit, la fluctuation de la température intérieure est considérablement réduite et elle est très proche de la température ambiante.

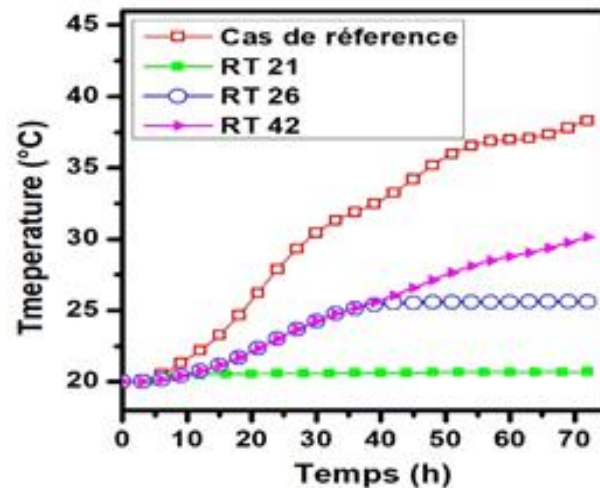


Figure 3.17. La température à la surface intérieure pour différents types de MCP

3.6.3.4 L'effet de l'épaisseur de la couche de lame d'air

Dans cette section, diverses épaisseurs de la couche de lame d'air sont testées tout en gardant les autres paramètres optimaux sélectionnés précédemment (configuration (d) RT21 en tant que MCP) sans altération. La figure 3.18 illustre la température moyenne de la paroi de brique creuse de MCP sous différentes épaisseurs de lame d'air. Comme illustré, la variation de l'épaisseur n'a pas une influence significative sur la fluctuation de la température de la surface intérieure où on peut vraiment la négliger. D'autre part, lorsque l'épaisseur de cette couche augmente, on peut remarquer une diminution non importante dans l'amplitude de la température. Cela s'explique par le fait que la présence de cette couche crée une résistance thermique qui entrave le flux de chaleur qui passe vers l'intérieur, ce qui amorti l'absorption de la chaleur latente par le MCP. Comme l'indique la figure 3.19, la présence de cette couche de lame d'air à grande épaisseur peut amortir l'efficacité du MCP pour stocker plus d'énergie solaire. Par conséquent, dans les applications pratiques et dans les conditions similaires à celles mentionnées dans ce travail, l'épaisseur de la couche de lame d'air doit être limitée et de préférence sa valeur n'excède pas 50 mm.

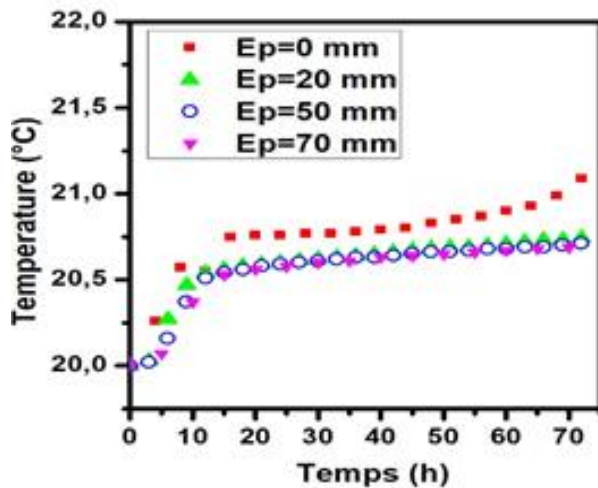


Figure 3.18. La température moyenne de la surface interne pour différentes épaisseurs de lame d'air

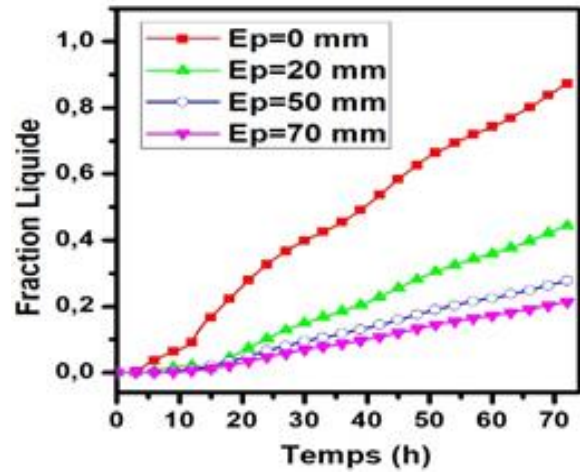


Figure 3.19. La fraction liquide du MCP pour différentes épaisseurs de lame d'air

3.6.3.5 L'effet d'utilisation d'autres matériaux isolants au lieu de la couche de lame d'air :

Le type de matériaux qui peut être installé en tant que couche intermédiaire entre les deux couches de briques creuses est également un paramètre influant sur la performance thermique de la paroi de la brique creuse-MCP. Deux matériaux isolants habituellement utilisés dans l'application du bâtiment sont sélectionnés pour cette simulation et ont été comparé avec la couche de lame d'air. Leurs propriétés thermo physiques sont répertoriées dans le tableau 3.5 [266] et leurs épaisseurs sont égales à 20 mm. On mentionne que les autres paramètres (configuration(d) et RT21 en tant que MCP) sont restés sans modification.

| Matériau | Densité (kg/m ³) | Conductivité thermique (W/m.K) | Capacité thermique (KJ/kg.K) |
|---------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Lame d'air | 1 | 0.13 | 1 |
| Polystyrène expansé | 18 | 0.039 | 1.45 |
| Panneau de liège | 125 | 0.049 | 1.56 |

Tableau 3.5. Caractéristiques des matériaux utilisés comme couche de séparation entre les deux parois de briques.

La figure 3.20 montre la température à la surface intérieure pour différents matériaux utilisés comme couche séparatrice. On constate que l'utilisation de matériaux isolants nous donne généralement un résultat proche de celui obtenu avec la couche d'air. Cependant, on trouve que le profil de température de l'air est légèrement plus élevé que d'autres matériaux en raison de la différence des propriétés thermiques entre ces matériaux et en particulier la conductivité thermique.

Comme le montre la figure 3.21, l'utilisation d'un matériau d'isolation a un impact négatif puisqu'il retarde le processus de changement de phase en empêchant le MCP d'absorber une grande quantité de chaleur. Les résultats de la fraction liquide du MCP, lorsque ces matériaux examinés sont appliqués, montrent que lorsque la lame d'air est utilisée environ 60% de MCP a changé en état liquide à la fin de la simulation. Cette valeur n'a pas beaucoup varié, lorsque les autres matériaux isolants sont appliqués à la place de l'air, puisqu'il est devenu à l'environ de 50%. Par conséquent, l'augmentation de la conductivité thermique de tels matériaux entourant le MCP permet d'améliorer le transfert au cœur de ce matériau afin que le changement de phase soit plus accéléré. Dans la pratique et dans les conditions proposées dans cette étude, on peut noter que l'utilisation d'un matériau isolant tel que le polystyrène ou le liège entre les deux couches de brique creuse est une solution non rentable car elle n'a aucun effet évident sur les résultats une fois comparée avec celui d'une couche d'air.

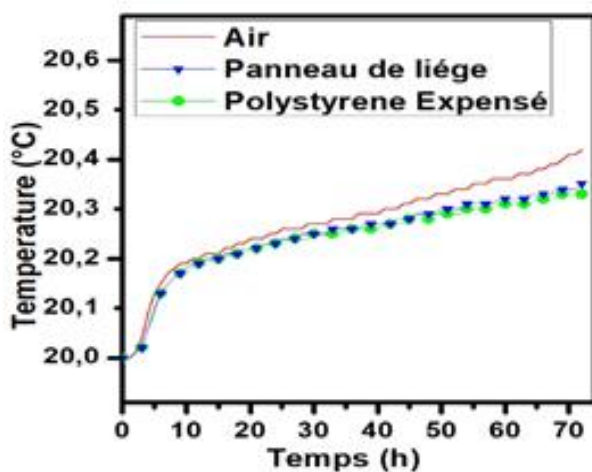


Figure 3.20. La température à la surface intérieure pour différents matériaux

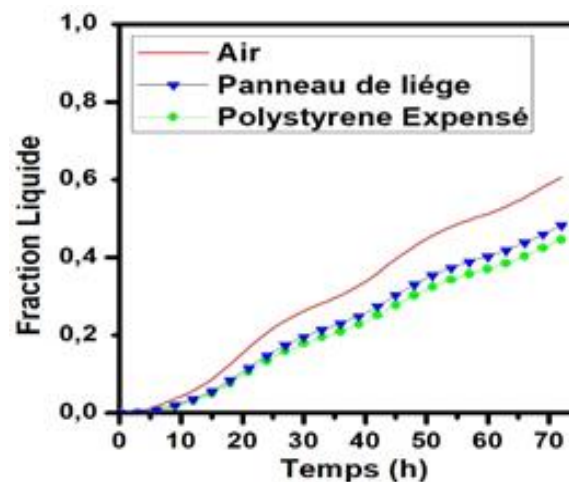


Figure 3.21. La fraction liquide à la surface intérieure pour différents matériaux

Chapitre IV : ETUDE DE LA
CONVECTION NATURELLE DANS UNE
ENCEINTE AVEC DES PAROIS
CONTENANT DES MCP

4 ETUDE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS UNE ENCEINTE AVEC DES PAROIS CONTENANT DES MCP

4.1 Introduction sur la convection :

La convection est un mode de transport d'énergie par action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important du transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux particules de fluides adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces particules. Ensuite ces dernières vont se mélanger avec d'autres particules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie, celle-ci est alors emmagasinée dans les particules fluides et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

4.1.1 Type de convection

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide, des courants dus simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle qu'une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. Si les deux causes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite mixte.

4.1.2 Convection naturelle

Pour une plaque plane verticale de longueur L , placée dans un fluide en repos. Cette plaque est chauffée de manière isotherme à la température T_{cd} et soit T_{∞} la température du fluide en $x \rightarrow \infty$ telle que $T_{\infty} < T_{cd}$.

Le fluide se dilate le long de la plaque sous l'effet de la chaleur faisant diminuer sa masse volumique. Ainsi apparaît une force motrice volumique (poussée d'Archimède) qui s'oppose à la force de frottement due à la viscosité du fluide et créant l'ascension de ce dernier. La différence de température avec le réservoir de fluide froid situé à l'infini entraîne une recirculation naturelle du fluide. En outre et selon les conditions aux limites, les études relatives à la convection sont souvent menées dans les cavités.

Le transfert de chaleur dans les cavités a été fréquemment un sujet d'étude par les chercheurs à cause de son intérêt pratique. Celui-ci dans des espaces fermés est compliqué par le fait qu'en général, le régime à l'intérieur n'est pas stationnaire. Dans une cavité verticale, le fluide adjacent à la surface la plus chaude va monter vers le haut par contre celui de la surface froide va descendre, déclenchant un mouvement de rotation à l'intérieur de la cavité qui va augmenter le phénomène de transfert de chaleur.

Le schéma d'écoulement typique dans une cavité rectangulaire verticale est affiché dans la figure 4.1.

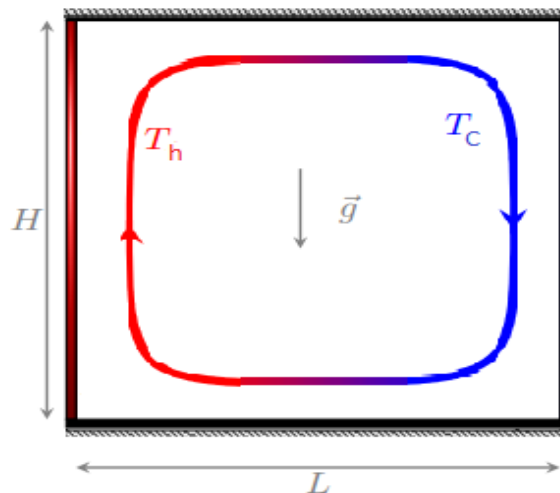


Figure 4.1. Schéma d'écoulement dans une cavité Verticale

4.1.3 Approximation de Boussinesq :

En 1903, à l'époque même où Rayleigh s'intéresse à la convection, Boussinesq propose une simplification de ses équations de façon à ne conserver que les ingrédients nécessaires et suffisants à la convection thermique.

Considérant le phénomène de convection naturelle, la variation de la masse volumique du fluide en fonction de la température est donnée par l'expression suivante :

$$\rho = \rho_{\infty}[1 - \beta(T - T_{\infty})] \quad (4.1)$$

L'hypothèse de Boussinesq est généralement utilisée pour traiter un problème de convection naturelle en simplifiant la formulation. Ainsi, les variations de la masse volumique du fluide sont prises en compte uniquement dans le terme moteur des équations de Navier-Stokes donc dans le terme de poussée d'Archimède. L'application de cette approximation se limite aux cas où les différences de température sont suffisamment faibles pour que $\beta(T - T_{\infty}) \ll 1$.

4.1.4 Convection naturelle avec MCP :

Le transfert de chaleur par convection entre la face interne du mur et l'air intérieur est nécessaire pour évaluer le processus de stockage / libération dans le MCP. C'est un problème très important car il y a un manque de connaissance concernant le transfert de chaleur par convection avec des parois de MCP alors que les simulations numériques ont besoin de la valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection.

Certaines études numériques utilisent une valeur constante de h pour la simulation de murs avec MCP tel que Bastani et al. $h=8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [267], Kong et al $h=8,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [268], Matthieu-Potvin et al. $h=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [269], et Zhou et al ont rapporté des valeurs entre $5,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ et $12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [270]. Cependant, il est bien connu que, pour la convection naturelle, le coefficient de convection moyen devrait dépendre au moins de la différence de température entre le mur et l'environnement intérieur. De plus, ces valeurs de h ont été déterminées dans une configuration sans la présence du MCP.

David et al. [271] ont confronté quatre corrélations issues de la littérature pour simuler la quantité d'énergie stockée dans une couche de MCP. Ils ont trouvé jusqu'à 50% d'écart dans leurs résultats en fonction de la corrélation. Liu et Awbi [272] ont trouvé que la corrélation utilisée pour évaluer le transfert de chaleur par convection pour les murs ordinaires sous-estime ce coefficient pour la paroi MCP par un facteur égal à 2. De Gracia et al. [273] ont étudié le transfert de chaleur par convection entre un flux d'air et une plaque de MCP. Par conséquent, ils ont constaté que la corrélation utilisée dans la littérature pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur dans le cas du MCP n'est plus valide. Ils ont introduit un coefficient de correction dans l'expression de corrélation pour tenir compte de la présence du MCP. Une étude expérimentale du coefficient de transfert de chaleur par convection a été effectuée pour des essais à grande échelle. Kuznik et al [274] ont réalisé des expériences dans des grandes salles de test avec des panneaux muraux en MCP. Les auteurs ont observé une intensification du transfert de chaleur le long des parois de MCP pendant le changement de phase. Ils ont estimé le coefficient de transfert de chaleur par convection, et ils ont obtenu des valeurs bien supérieures à celles prédites par les corrélations de la littérature.

4.2 Présentation du problème physique

Le but principal de cette étude numérique est d'évaluer les caractéristiques du transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité fermée pendant le processus de changement de

phase. Dans cette analyse, la simulation numérique représente un modèle en 2D d'une cavité carrée ($L=1\text{ m}$) avec une de ses parois verticales incorporées par un MCP.

D'après les résultats obtenus dans le chapitre précédent, on a vu que l'application d'un mur extérieur en double paroi va conduire à modérer les fluctuations de la température dans la surface intérieure en réduisant ainsi la différence thermique avec l'espace intérieur. Par conséquent, l'existence de ce modèle en tant que paroi extérieure dans cette cavité ne permet pas d'atteindre l'objectif fixé par cette étude où l'on s'intéresse à une vision claire de l'effet du phénomène de changement de phase sur le transfert de chaleur par convection naturelle.

Dans ce contexte, un mur avec une seule couche de brique creuse remplie avec MCP va être sélectionné. Ce dernier modèle a une résistance thermique inférieure à la paroi utilisée précédemment. Dans ce cas, il est donc prévisible qu'apparaisse une génération de courants de convection naturelle à l'intérieur de la cavité à cause de l'augmentation de la différence thermique entre ses parois latérales.

Dans cette configuration, on considère que notre paroi de brique creuse incorporée avec MCP est en contact direct avec l'espace extérieur où sa surface est exposée à une température élevée (supérieure à celle du changement de phase). À l'instant initiale, la température de modèle entier (air + paroi) est proposée constante et le MCP est dans un état solide. Au fil du temps, la chaleur commence à se transférer de l'extérieur vers l'intérieur à travers la paroi de brique, provoquant ainsi la fusion de MCP par le stockage de chaleur latente qui lui permet de se transformer à son état liquide. Au cours de ce processus de changement de phase, on se concentre sur le développement de transfert de chaleur par la convection naturelle à l'intérieur de la cavité. Il convient de noter que ce cas étudié peut se trouver également dans d'autres régions au climat très chaud en période d'été (sud d'Algérie) et surtout dans la journée où la température extérieure est très élevée. Cela conduit les habitants à consommer plus d'énergie pour atteindre plus de confort thermique. Cette situation peut également être trouvée dans certains entrepôts d'aliments, de médicaments où d'autres produits industriels, qui doivent toujours rester à une certaine température pour maintenir la validité du produit. La configuration géométrique en 2D utilisée dans la présente étude est décrite au-dessus dans la figure 4.2.

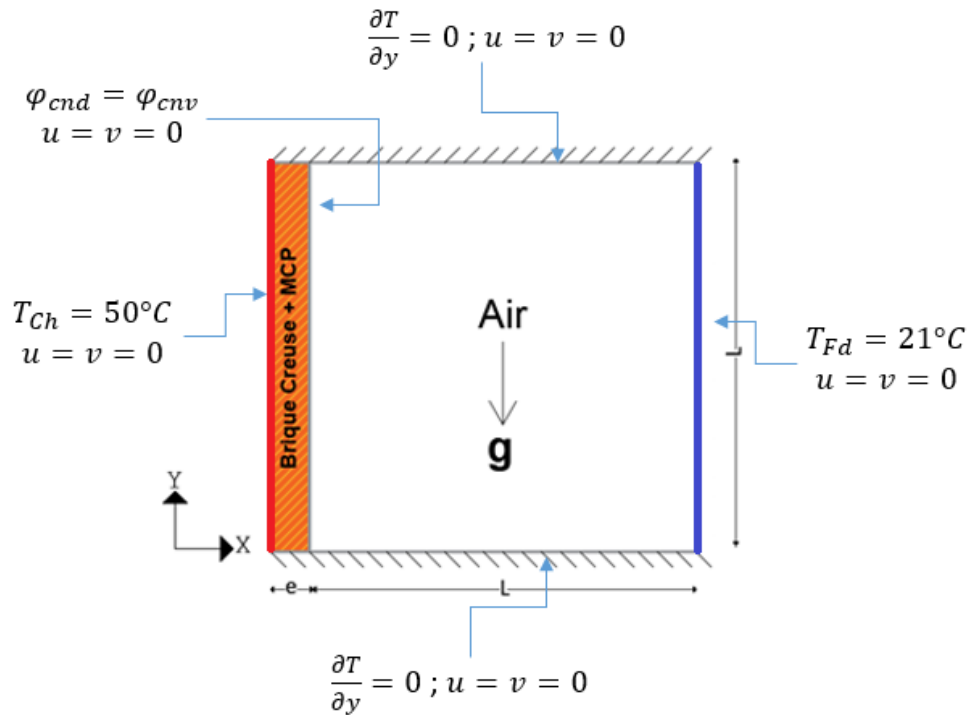


Figure 4.2 Modèle physique

4.3 Les Hypothèses

Les hypothèses liées à la paroi de brique creuse avec MCP ont déjà été mentionnées dans le chapitre 3 section 1. Les hypothèses simplificatrices du fluide à l'intérieur de la cavité qui ont été retenues dans cette étude sont les suivantes :

- Le transfert de chaleur à l'intérieur de la cavité est combiné par la conduction et la convection dans un régime transitoire.
- L'écoulement du fluide à l'intérieur de la cavité est considéré newtonien, incompressible, laminaire et qui satisfait l'hypothèse de Boussinesq.
- Les propriétés thermo physiques du fluide sont supposées constantes à l'exception de sa masse volumique ρ qui obéit à l'approximation de Boussinesq dans le terme de la poussée d'Archimède. Ces propriétés thermo-physiques sont prises à la température de référence T_0
- La dissipation visqueuse est négligée.
- Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable
- La source de chaleur à l'intérieur de la cavité est nulle.
- Le problème physique est considéré comme bidimensionnel.

4.4 Les équations gouvernantes

D'après les définitions annexées dans l'introduction de ce chapitre, les équations générales qui régissent la convection naturelle sont celles de la mécanique des fluides thermiques avec un couplage au niveau des forces volumiques faisant intervenir le terme de gravité \vec{g} . Donc, les équations qui décrivent l'écoulement sont : les équations de la conservation de la masse (Eq. de continuité), de la quantité de mouvement (Navier-stokes) et l'équation d'énergie.

- **Equation de continuité**

Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla(\rho\vec{V}) = 0 \quad (4.2)$$

Où $\vec{V}(x, y, t)$ est le vecteur de vitesse et l'opérateur $\frac{D}{Dt}$ représente la dérivée totale de la variable par rapport au temps et exprimé par :

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \quad (4.3)$$

Pour un écoulement en 2D d'un fluide incompressible, l'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.4)$$

Avec u et v représentent respectivement, les composantes du vecteur de vitesses \vec{V} suivant l'axe x et l'axe y .

- **Equation de Navier-Stokes**

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide et son mouvement mais aussi les causes qui le produisent. Donc, on peut indiquer que le taux de variation de la quantité de mouvement, contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures, qui sont appliquées.

Pour un fluide newtonien et incompressible, l'équation de la quantité de mouvement s'écrit sous la forme suivante :

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{F}_v \quad (4.5)$$

Où $\vec{F}_v = \rho \vec{g}$ représente le vecteur de la force volumique.

Selon les hypothèses citées au-dessus et en présence de la convection naturelle, le bilan de la quantité de mouvement aboutit, pour un écoulement 2D, aux équations régissant le mouvement du fluide dans les directions x et y est :

➤ Suivant x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.6)$$

➤ Suivant y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho_\infty - \rho)g \quad (4.7)$$

Le dernier terme $(\rho_\infty - \rho)g$ représente la force extérieure nette par unité de volume du fluide (la différence entre la force de flottabilité et le poids de fluide). C'est la force qui initie et soutient les courants de convection.

Dans le cas d'une cavité fermée et en appliquant l'hypothèse de Boussinesq qui a été déjà expliquée dans l'introduction, l'équation suivante l'axe « y » va se réécrire de la manière suivante :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_C) \quad (4.8)$$

• Equation d'énergie

Le principe de conservation de l'énergie donne l'équation d'énergie suivante :

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla(\lambda \nabla T) + S_T + \mu \Phi \quad (4.9)$$

Dans l'équation (4.9), les deux termes de gauche $[\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}]$; $[\rho C_p (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \cdot T]$ sont respectivement, le terme transitoire et le terme de convection. Pour les trois termes à droite $[\lambda \nabla T]$, $[S_T]$ et $[\mu \Phi]$ représentent respectivement, le terme de diffusion, le terme de source de chaleur et le terme de la dissipation d'énergie due au frottement visqueux.

Pour le fluide à l'intérieur de la cavité (air) et sous les hypothèses citées au-dessus, l'équation (4.10) va se réécrire :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.10)$$

Pour le cas de transfert de chaleur bidimensionnel par conduction à travers la paroi de brique creuse avec MCP, la chaleur latente à changement de phase est convertie en chaleur spécifique équivalente selon la méthode de la capacité calorifique spécifique apparente. Comme il a été déjà cité auparavant dans les hypothèses reliées à la présence du MCP, la convection naturelle lors de la fusion est exclue, ainsi, dans l'équation (4.10), on supprime le terme de la convection.

Selon l'analyse ci-dessus, l'équation (4.11) est transformée en type suivant :

$$\rho_{\text{eff}} C_{p,\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.11)$$

Avec λ_{eff} , ρ_{eff} et $C_{p,\text{eff}}$ représentent respectivement la densité effective, la conductivité thermique effective et la capacité thermique effective de la paroi de brique creuse avec MCP.

4.5 Condition aux limites

L'ensemble des équations gouvernantes mentionnées ci-dessus sont complétées par les conditions initiales et limites suivantes :

$$\left. \begin{aligned} & \bullet \quad t = 0 ; T_p = T_{\text{Air}} = 21^\circ\text{C} \quad ; u = v = 0 \text{ et } f_{\text{sol}} = 1 \text{ (Le MCP est dans l'état solide)} \\ & \bullet \quad t \geq 0 ; x = 0 ; 0 \leq y \leq L ; T = 50^\circ\text{C} ; u = v = 0 \\ & \bullet \quad t \geq 0 ; x = L + e ; 0 \leq y \leq L ; T = 21^\circ\text{C} ; u = v = 0 \\ & \bullet \quad t \geq 0 ; x = e ; 0 \leq y \leq L ; \lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{\text{Air}} \frac{\partial T}{\partial x} ; u = v = 0 \\ & \bullet \quad t \geq 0 ; y = 0 \text{ et } y = L ; 0 \leq x \leq L + e ; \frac{\partial T}{\partial y} = 0 ; u = v = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

Le MCP a été choisi dans cette étude par rapport à sa température de changement de phase de sorte qu'elle soit approximative de la température initiale du modèle ce qui accélère le commencement du processus de changement de phase lors de la simulation. Les propriétés thermo physiques du MCP sélectionné sont définies dans la référence [275]. La simulation numérique est effectuée pour les nombres de Rayleigh $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$ et 10^6 .

4.6 Etude des propriétés thermo physique

Afin de déterminer la conductivité thermique effective de notre paroi, on va essayer dans cette section de comparer la précision et la différence entre les résultats obtenus par les modèles analytiques et celles de la simulation numérique. Le modèle parallèle pour un matériau de plusieurs composantes « N » avec une conductivité thermique définie λ_i et des fractions de volume f_i peuvent être spécifiées comme suit :

$$\lambda_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \times f_i \quad (4.13)$$

Il a été signifié aussi que le modèle parallèle donne la valeur maximale de la conductivité thermique, ce qui signifie que, parmi toutes les manières possibles d'organiser les N composantes, l'arrangement parallèle de ces composantes entraîne une conductivité thermique maximale et par conséquent, le modèle parallèle est considéré comme la limite supérieure de la conductivité thermique [276,277].

Le modèle en série d'un composite de plusieurs composantes « N » peut être spécifié comme suit :

$$\frac{1}{\lambda_{\text{eff}}} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{\lambda_i} \quad (4.14)$$

Il a été démontré que le modèle de série donne la valeur minimale de la conductivité thermique, ce qui signifie que, le modèle de série est considéré comme la limite inférieure de la conductivité thermique [276,278].

Le réseau de résistance thermique est une méthode efficace pour analyser la conductivité thermique de matériaux composites avec des structures simples qui peuvent être facilement divisées en plusieurs zones. Le concept de réseau de résistance thermique est analogue au concept de résistance électrique. Par conséquent, la conductivité thermique effective de matériau composite peut être obtenue par les combinaisons de la conductivité thermique de chaque composant. Dans notre modèle, les composantes (brique creuse avec MCP) de la paroi sont arrangées dans une orientation perpendiculaire à la direction du flux de chaleur. Dans ce cas, pour déterminer la résistance thermique, on utilise l'équation (4.15) :

$$\frac{1}{R_{\text{TOT}}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{b,i}} \quad (4.15)$$

D'où R_{TOT} représente la résistance thermique totale de la paroi et R_b est la résistance thermique d'une seule brique creuse avec MCP. Par conséquent, la conductivité thermique effective est déduite par l'équation (4.16) :

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{L}{e \times R_{\text{TOT}}} \quad (4.16)$$

Avec e et L représentent respectivement l'épaisseur et la hauteur de la paroi.

Un modèle basé sur la méthode des éléments finis a été configuré pour mesurer numériquement la valeur de la conductivité thermique effective. Pour évaluer sa valeur, le modèle doit être dans un état stationnaire. Ainsi, pendant le processus de changement de phase où on considère que le régime est transitoire, la conductivité thermique du MCP dépend de la fraction liquide et solide de MCP.

$$\lambda_{\text{mcp}} = f_{\text{sol}} \times \lambda_{\text{sol}} + (1 - f_{\text{sol}}) \times \lambda_{\text{liq}} \quad (4.17)$$

Comme dans notre cas, le MCP sélectionné pendant cette étude possède la même conductivité thermique dans les deux états solide et liquide.

En vertu de cette approche, on perturbe l'équilibre thermique de la paroi en créant un gradient de température ΔT entre ces deux surfaces et on mesure la densité de flux φ exprimé en watts (W/m^2). Lorsque tout le système est à l'état stationnaire, la conductivité thermique effective est calculée selon la norme UNE-EN 12664 [279] à travers équation (4.18) :

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\varphi \times e}{\Delta T} \quad (4.18)$$

La densité équivalente de ces matériaux est également ajustée pour lier la densité de brique creuse avec celle du MCP selon l'équation (4.19) :

$$\rho_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^N \rho_i \times f_i \quad (4.19)$$

Où ρ_{eq} est la densité de la paroi équivalente (Kg/m^3) et ρ_i est la densité de différents matériaux qui constituent la paroi.

On suppose que la densité du MCP lors de changement de phase soit constante puisque on a considéré dans les hypothèses que la variation de volume pendant le changement de phase est négligeable ou nulle.

Afin d'estimer la courbe de capacité thermique spécifique de la paroi de brique creuse avec MCP pour l'utiliser dans la simulation numérique, la méthode transmise par Tittlein et al. [280] a été utilisée. Elle consiste en une loi de mélange proportionnel pour la capacité thermique spécifique, en fonction des densités de matériaux, de leurs fractions volumiques et de leurs propres capacités thermiques spécifiques. Par conséquent, la capacité thermique effective $C_{p,\text{eff}}$ de la paroi peut être estimée à travers l'équation (4.20) :

$$\rho_{\text{eff}}C_{P,\text{eff}} = \rho_{\text{mcp}}f_{\text{mcp}}C_{P,\text{mcp}} + \rho_b(1 - f_{\text{mcp}})C_{P,b} \quad (4.20)$$

Où f_{mcp} désigne la fraction volumique du MCP incorporé dans la paroi, $C_{P,b}$ représente la capacité thermique spécifique de brique creuse et $C_{P,\text{mcp}}$ est une capacité thermique effective du MCP. Le changement de phase ne se produit pas entièrement à une température constante, en fait, le processus est terminé sur une certaine plage de température. La capacité thermique équivalente du MCP correspond normalement à une courbe gaussienne, avec une valeur maximale se produisant à la température de changement de phase maximale T_{cp} . L'équation (4.21) décrit l'expression mathématique de la capacité calorifique équivalente du MCP considéré dans cette étude [281].

$$C_{P,\text{mcp}}(T) = C_{P,\text{sol}} + B(T)(C_{P,\text{liq}} - C_{P,\text{sol}}) + L_f D(T) \quad (4.21)$$

D'où, la valeur de la fonction $B(T)$ est nulle dans la phase solide de MCP et égale à 1 dans la phase liquide. Cette fonction se développe linéairement de zéro à un dans la zone de transition de phase [282].

$$B(T) = \begin{cases} 0 & T < T_{\text{cp}} - \delta T \\ \frac{(T - T_{\text{cp}} + \delta T)}{2 \times \delta T} & T_{\text{cp}} - \delta T \leq T \leq T_{\text{cp}} + \delta T \\ 1 & T > T_{\text{cp}} + \delta T \end{cases} \quad (4.22)$$

D'après le MCP qui a été sélectionné dans cette étude, sa capacité thermique spécifique est identique pour les deux phases solide et liquide d'où le terme intermédiaire dans l'équation (4.21) $B(T)(C_{P,\text{liq}} - C_{P,\text{sol}})$ est toujours nul.

Pour la fonction $D(T)$, elle représente la fonction delta, sa valeur est nulle sauf dans la zone de transition de phase. L'objectif de cette fonction est de distribuer également la chaleur latente sur les deux côtés de la température de changement de phase.

$$D(T) = e^{\left(-\frac{1}{\sqrt{\pi\delta T^2}}\left(\frac{T - T_{\text{cp}}}{\delta T}\right)^2\right)} \quad (4.23)$$

La figure 4.3 représente La capacité thermique effective du MCP dans le format gaussien en fonction de la température.

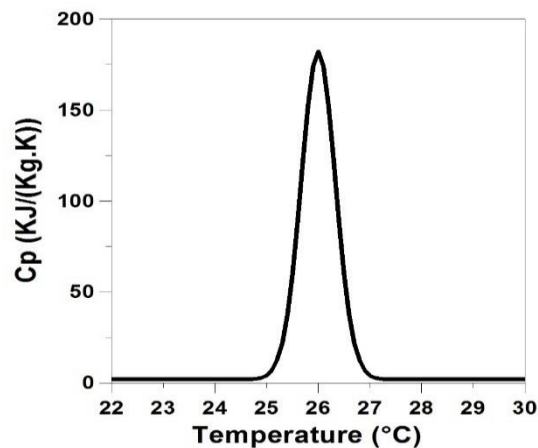


Figure 4.3. La capacité thermique effective du MCP utilisée dans la simulation

4.7 L'élaboration de la simulation numérique

Les paramètres qui ont été utilisés dans cette simulation sont présentés dans le tableau 4.1.

| Nom | Valeur | Description |
|-----------------|----------------------------|--|
| L | 1 m | Longueur de la cavité |
| e | 0.1 m | Épaisseur |
| T_{cd} | 323 K | Température chaude |
| T_i | 294 K | Température initiale |
| T_f | 299 K | Température de la fusion |
| δT | 1 K | Le range de changement de phase |
| λ_{MCP} | 0.2 W/m*K | Conductivité thermique du MCP |
| $C_{p,MCP}$ | 2000 J/kg*K | Capacité thermique spécifique du MCP |
| ρ_{MCP} | 880 kg/m ³ | La densité du MCP |
| L_f | 155*10 ³ J/kg | La chaleur latente de fusion |
| λ_{air} | 0.026 W/m*K | Conductivité thermique de l'air |
| $C_{p,air}$ | 1006 J/kg*K | Capacité thermique spécifique de l'air |
| μ_{air} | 1.85*10 ⁻⁵ Pa*s | La viscosité dynamique de l'air |
| β | 0.0033 1/K | Coefficient de dilatation thermique |
| pA | 1.0133*10 ⁵ Pa | La pression atmosphérique |

Tableau 4.1. Les paramètres utilisés lors de la simulation

Comme il a été mentionné auparavant, on va se baser sur une capacité thermique équivalente pour modéliser le changement de phase et donc, le module de changement de phase fourni par le logiciel ne va pas être utilisé dans cette étude. Dans ce cas, on a utilisé la fonction analytique pour exprimer cette variation de la capacité thermique équivalente de la paroi en fonction de la température. La figure 4.4 montre le résultat affiché dans l'interface graphique du logiciel.

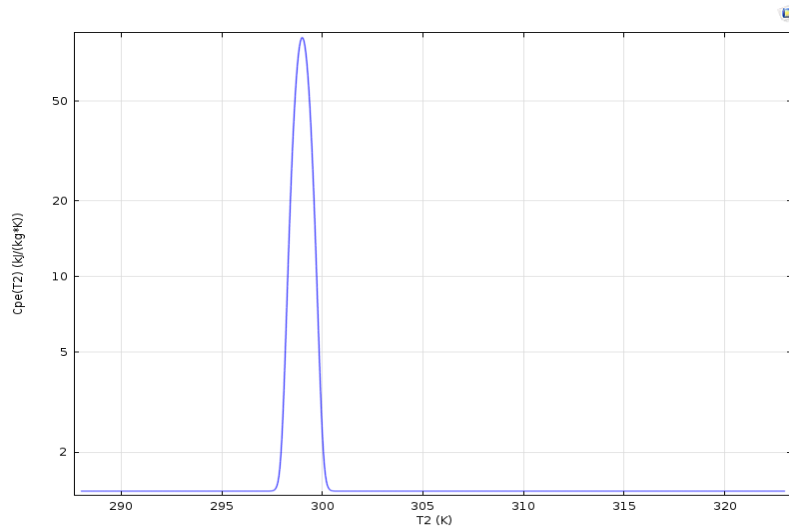


Figure 4.4. La capacité thermique équivalente de la paroi de brique avec MCP

Pour définir la force volumique qui produit la naissance de la convection naturelle, deux différentes approches peuvent être appliquées dans le logiciel :

La première approche consiste à prendre la valeur de la force volumique égale à ρg comme il est indiqué dans l'équation (24) :

$$F_y = -\text{nitf1} \cdot \rho \cdot g_{\text{consy}} \tag{4.24}$$

Le terme $-\text{nitf1} \cdot \rho$ représente la densité dépendante de la température et de la pression, et g_{const} celui de l'accélération gravitationnelle.

La deuxième approche est basée sur l'hypothèse de Boussinesq où la force volumique est donnée par la formule suivante :

$$F_y = \rho_{00} \cdot g_{\text{consy}} \cdot (T - T_i) / T_i \tag{4.25}$$

| Maillage | Ra=10 ³ | Ra=10 ⁴ | Ra=10 ⁵ | Ra=10 ⁶ |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 25 | 299,46 | 299,58 | 299,78 | 299,93 |
| 50 | 299,36 | 299,48 | 299,67 | 299,81 |
| 100 | 299,33 | 299,44 | 299,62 | 299,77 |
| 150 | 299,32 | 299,43 | 299,62 | 299,76 |
| 200 | 299,32 | 299,43 | 299,61 | 299,76 |

Tableau 4.2. Optimisation du maillage

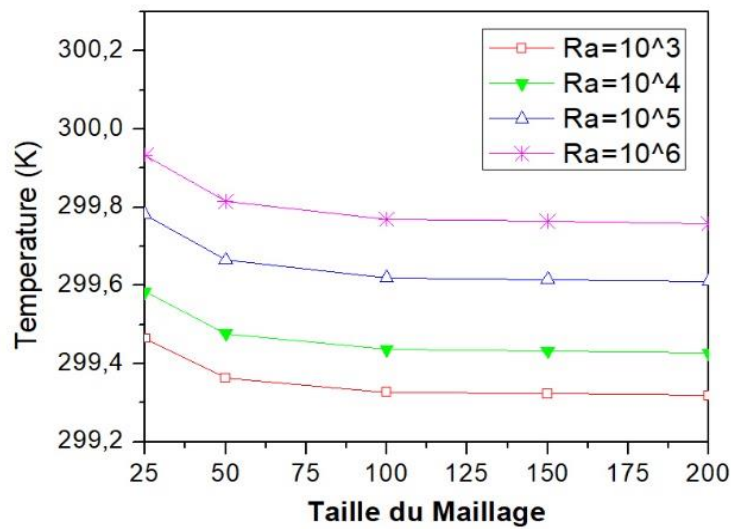


Figure 4.5. Température moyenne résultante de la cavité en fonction du maillage

Cette approche consiste à considérer que la densité de fluide va être égale à une densité de référence constante qui a été évaluée à partir de la valeur définie dans la case des propriétés de matériaux.

Pour choisir le meilleur maillage qui permet d'avoir des résultats fiables, on a étudié l'influence du nombre des éléments sur la température. Pour cela, une répartition uniforme des éléments a été utilisée. Les résultats de cette étude sont exposés dans le tableau 4.2 et la figure 4.5.

A partir du tableau 4.2 et de la figure 4.5, il a été constaté que l'augmentation du nombre des éléments devient insensible à partir de la maille de 100×100 et il ne va pas forcément changer la solution mais il demande un temps de calcul plus élevé.

La figure 4.6 montre le schéma du maillage de notre modèle :

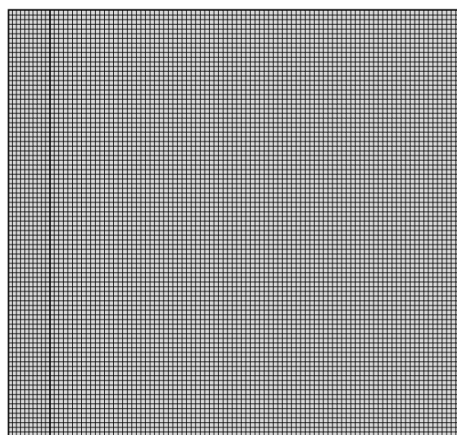


Figure 4.6. Exemple de maillage du modèle

Concernant l'étude temporelle, pour que l'on puisse consulter l'effet de la fusion sur la convection naturelle, on a maintenu la période de la simulation environ 10 heures ce qui représente une durée suffisante pour que la procédure de changement de phase soit terminée.

4.8 Résultat et Discussion

4.8.1 Validation du modèle numérique

Le but de cette procédure est de déterminer si la simulation numérique est en accord avec la réalité physique par rapport aux résultats expérimentaux et théoriques.

Dans cette section on va essayer de valider notre code de calcul « Comsol » afin qu'il puisse être utilisé avec fiabilité pour simuler des scénarios de la convection naturelle dans une cavité fermée qui contient une paroi avec MCP. La majorité des modèles numériques a été validée à l'aide des approches analytiques, des essais comparatifs en utilisant des modèles numériques validés, et / ou des résultats expérimentaux.

Dans notre étude, on va effectuer cette opération de validation pour confronter les résultats numériques à ceux d'un travail expérimental dans la littérature [283]. Le travail expérimental utilisé pour la validation est basé sur la conception d'un MCP hybride, contenant trois types distincts de MCP, qui sera incorporé dans un mortier de plâtre. À son tour, ce dernier va être appliqué comme un matériau de revêtement sur des panneaux de polystyrène extrudé (XPS) qui composaient les parois extérieures d'un prototype en forme d'une cellule de test à petite échelle « prototype à l'échelle de laboratoire ».

L'effet de mortier de plâtre avec MCP hybride a été évalué expérimentalement en comparant leur performance thermique par rapport au cas d'une cellule similaire, dans laquelle aucun MCP n'est ajouté. Les deux prototypes cubiques ont été placés dans une chambre climatique et soumis à des variations de température réelles simulées, permettant ainsi d'évaluer les différences de performance thermique induite par les deux types de mortiers testés. Le mortier MMCPH (MCP hybride) a étudié une combinaison de trois MCP avec des températures de fusion de 10°C, 26°C et 28°C. Ces trois MCP sont placés avec une quantité de masse égale, atteignant globalement 18,34% du poids total du mortier. Les principales propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés à la fois dans les prototypes, MR (mortier de référence) et MMCPH (pour le mortier hybride) sont synthétisées sur le tableau 4.3. Ce tableau contient également des informations sur les plaques de XPS (polystyrène extrudé) qui ont été utilisées dans la construction des murs de prototypes.

| Propriétés thermo-physiques | Unités | MR | MMCPH | XPS |
|--|----------|---------------|---------------|-------|
| Densité ρ | kg/m^3 | 1529.5 | 1309.8 | 32 |
| Conductivité thermique λ | $W/m.k$ | 0.4 | 0.3 | 0.034 |
| La capacité thermique spécifique C_p | $J/kg.k$ | Voir Fig. 4.2 | Voir Fig. 4.2 | 1400 |

Tableau 4.3. Propriétés thermodynamiques des matériaux utilisés

La figure 4.7 présente les résultats obtenus par DSC pour la capacité thermique spécifique du mortier de référence et de mortier avec MCP hybride.

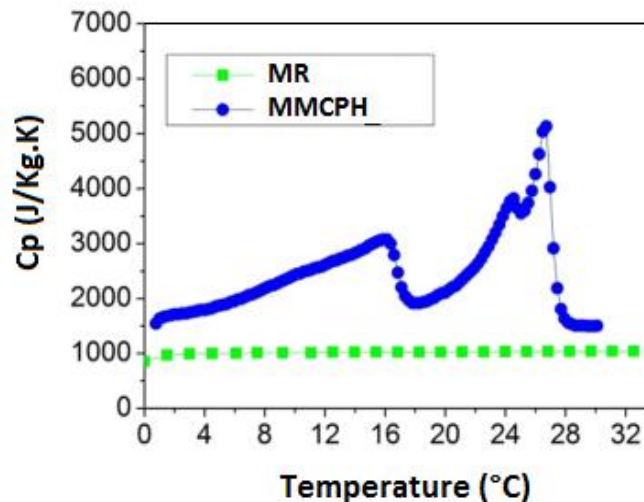


Figure 4.7. Résultats DSC de la capacité thermique spécifique

Les matériaux utilisés pour la construction des prototypes étudiés sont (de l'intérieur vers l'extérieur) : une couche de MR ou MMCPH de 0,02 m d'épaisseur et un polystyrène extrudé de 0,03 m (XPS). Le diagramme schématique de prototype avec les dimensions extérieures de 46 cm \times 46 cm \times 46 cm est représenté dans la figure 4.8 (unités en m).

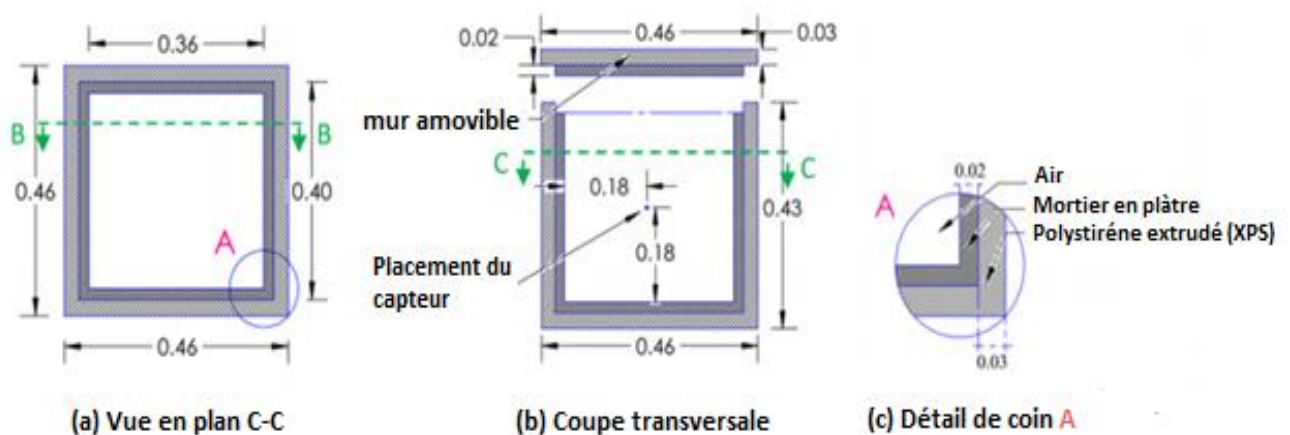


Figure 4.8. Représentation schématique et positionnement

En ce qui concerne la surveillance de la température, les capteurs PT100, avec une précision de $0,1^{\circ}\text{C}$, ont été positionnés au centre géométrique de l'espace interne, avec l'intention finale de surveiller les variations internes de température dans le prototype. Chaque prototype a été placé dans une chambre climatique contrôlée avec des dimensions intérieures de $1,04\text{ m} \times 1,2\text{ m} \times 0,6\text{ m}$. Cette dernière a été programmée pour suivre des cycles de température correspondant à la température solaire pour une paroi verticale orientée vers le sud, située au nord du Portugal, en tenant compte de deux scénarios saisonniers distincts : été et hiver. La température du solier-air ($T_{\text{solier-air}}$) a été calculée selon Equation (4.26) [284]

$$T_{\text{solier-air}} = T_{\text{air}} + \alpha \cdot I_g \cdot R_{se} \quad (4.26)$$

T_{air} est la température extérieure ($^{\circ}\text{C}$) ; α est le coefficient d'absorption de la surface ; I_g est le rayonnement solaire global (W/m^2) ; et R_{se} est la résistance de surface externe ($(\text{m}^2\text{ K})/\text{W}$).

Les valeurs de la température extérieure (T_{air}) et le rayonnement solaire global (I_g) ont été considérés par rapport aux valeurs horaires moyennes enregistrées pendant les jours représentatifs d'été et d'hiver obtenues par l'intermédiaire d'une station météorologique située dans le campus de l'Université du Minho. La véracité du code a été examinée en comparant les résultats de ce modèle expérimental avec les résultats numériques obtenus par Comsol. Dans ce contexte, on a confronté le profil de la température de l'air qui a été obtenu expérimentalement dans le centre de la cellule avec celles de notre code de calcul. On mentionne que dans cette étude de validation, on ne s'est intéressé qu'au cas où le mortier a été mélangé avec MCP hybride et que pour la variation de température en période d'été. La figure 4.9, nous indique la variation de la température au centre de la cellule avec MCP par rapport à la température extérieure.

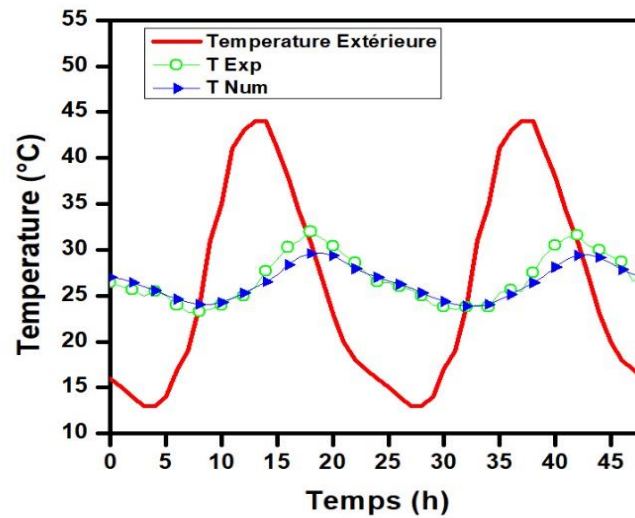


Figure 4.9. Comparaison entre le résultat expérimental et numérique

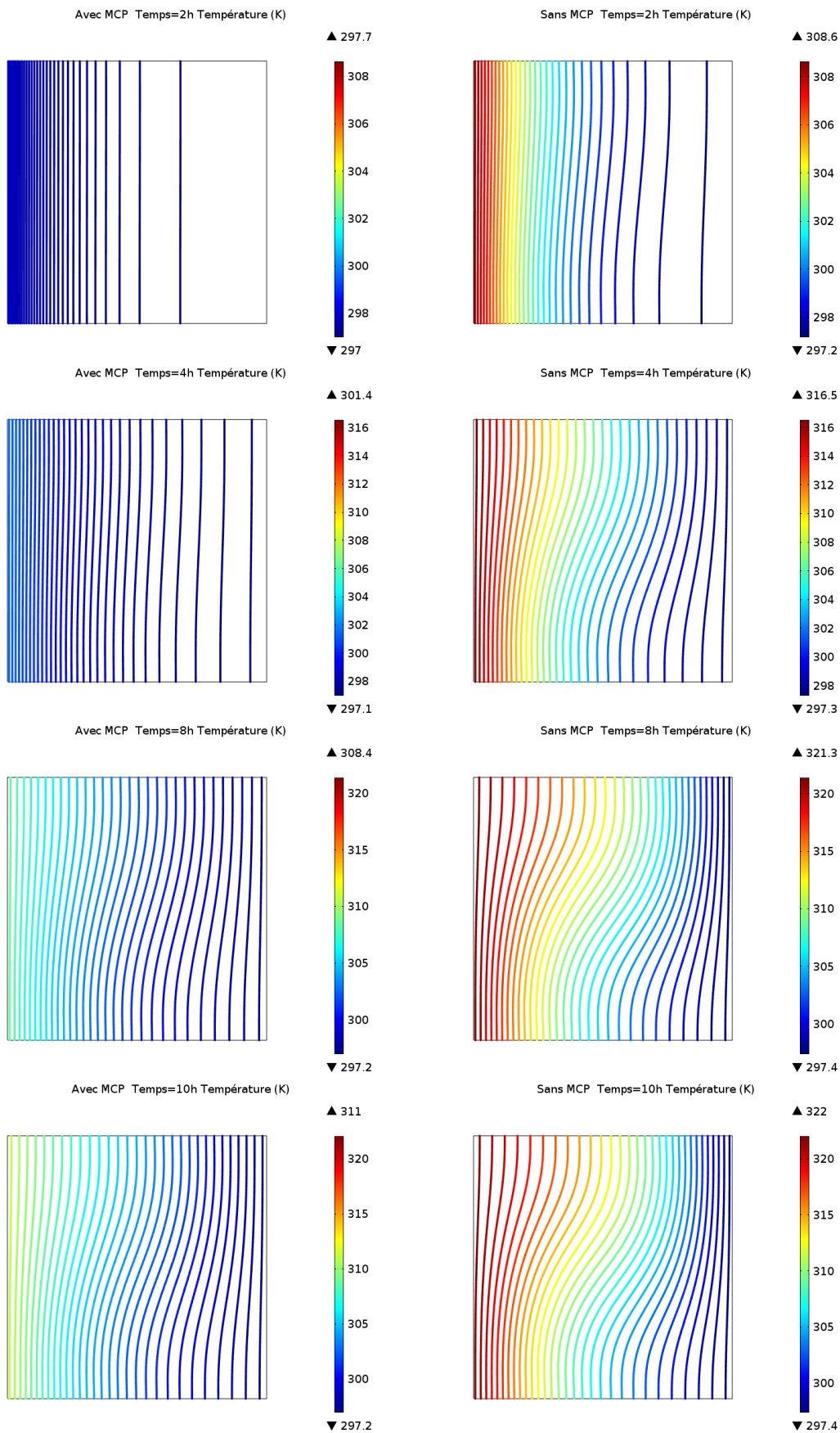
Comme indique cette figure, une petite différence entre les données numériques et expérimentales qui peut être due aux mêmes arguments qui ont été déjà mentionnés dans la section de validation du chapitre 3.

4.8.2 Etude de la variation de la température intérieure dans le temps en fonction du nombre de Rayleigh :

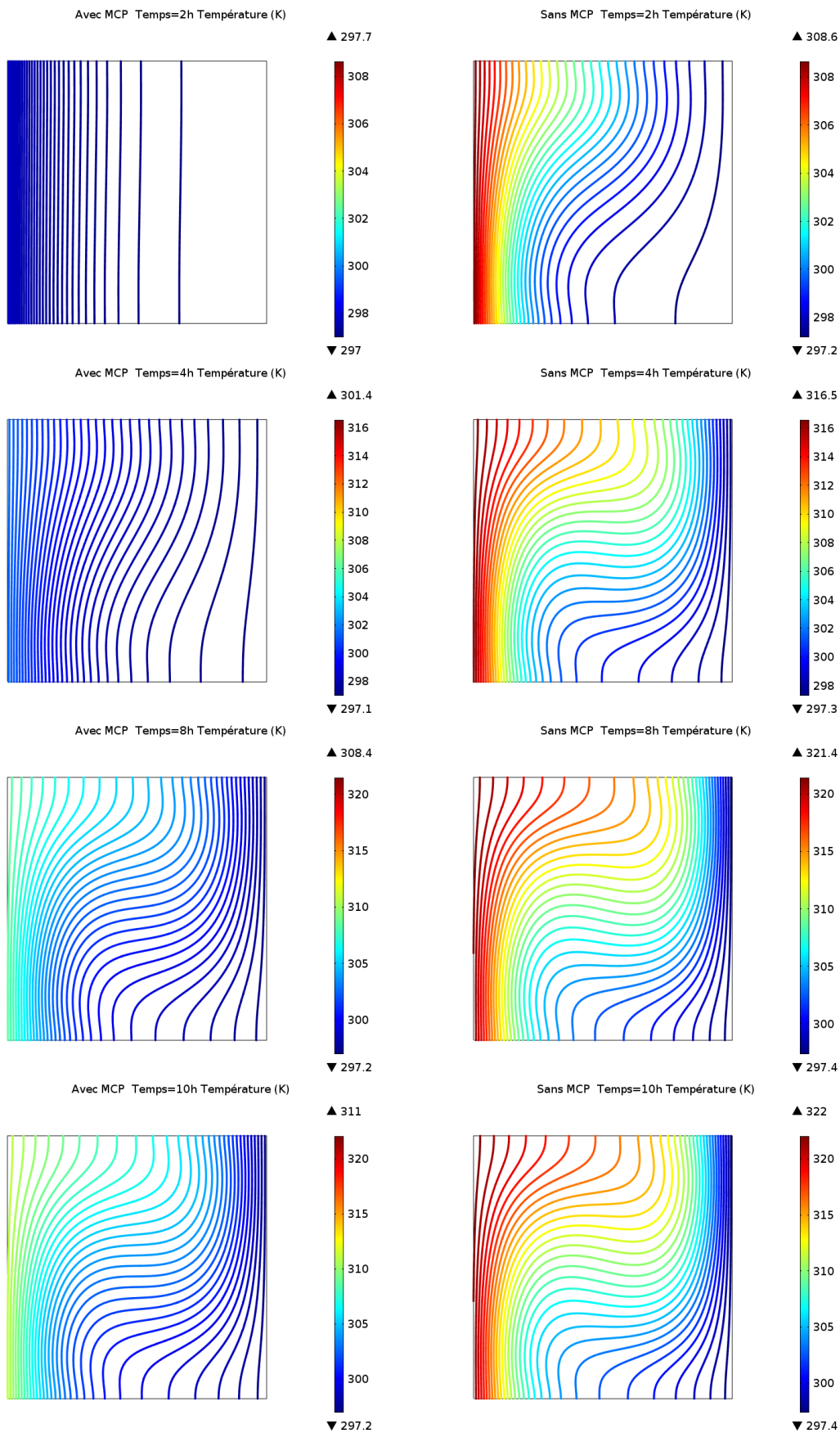
Les résultats numériques sont donnés pour une cavité fermée contenant une paroi de briques creuses avec MCP.

Notre objectif est d'observer l'évolution du transfert de chaleur par convection naturelle particulièrement pendant le processus de changement de phase et de comparer les résultats obtenus à ceux du cas de référence (sans MCP). La figure 4.10 montre la variation des isothermes au cours du temps à l'intérieur de la cavité pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh. Les résultats sont présentés pour les deux cas avec et sans MCP.

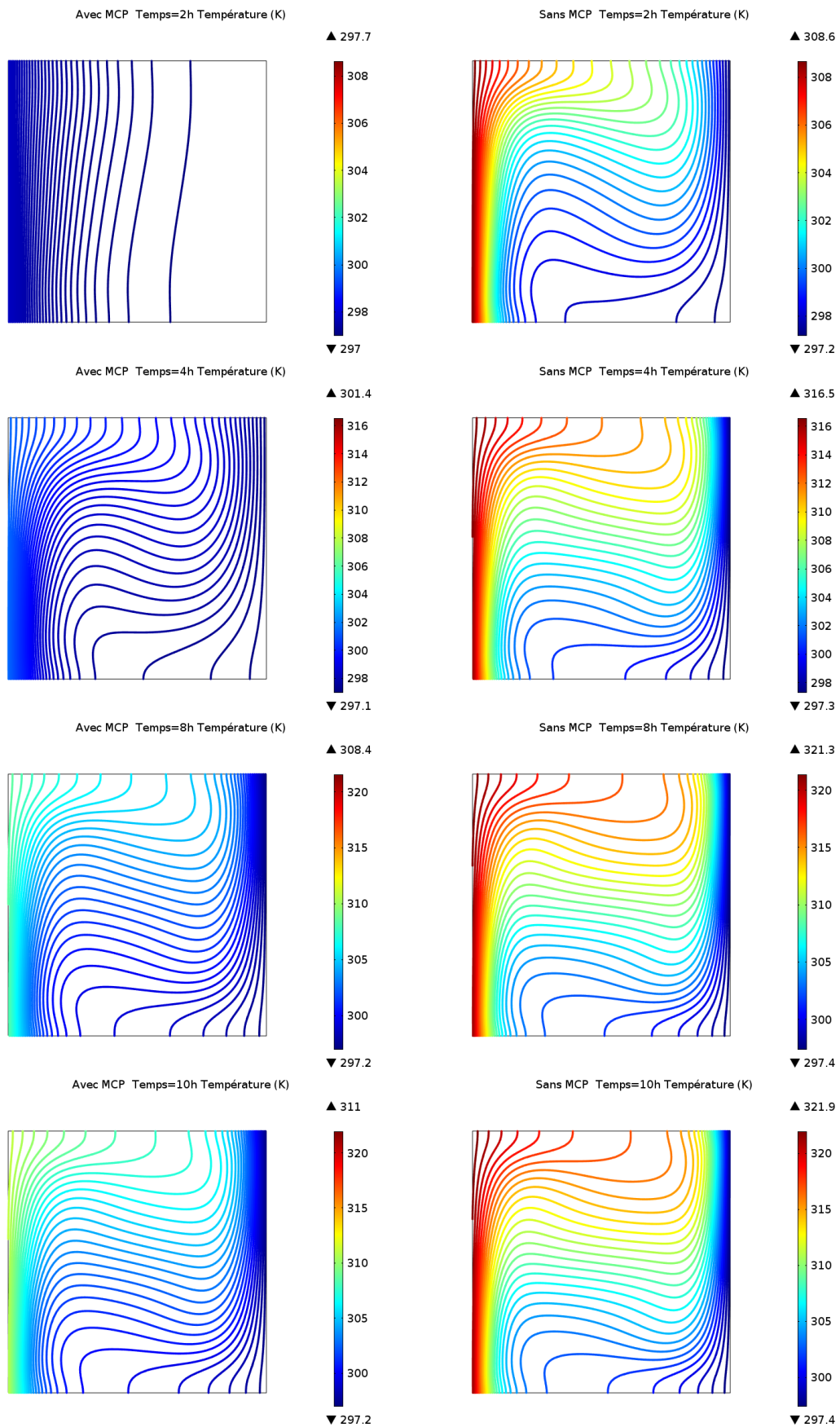
➤ Pour $Ra=10^3$



➤ Pour $Ra=10^4$



➤ Pour $Ra=10^5$



➤ Pour $Ra=10^6$

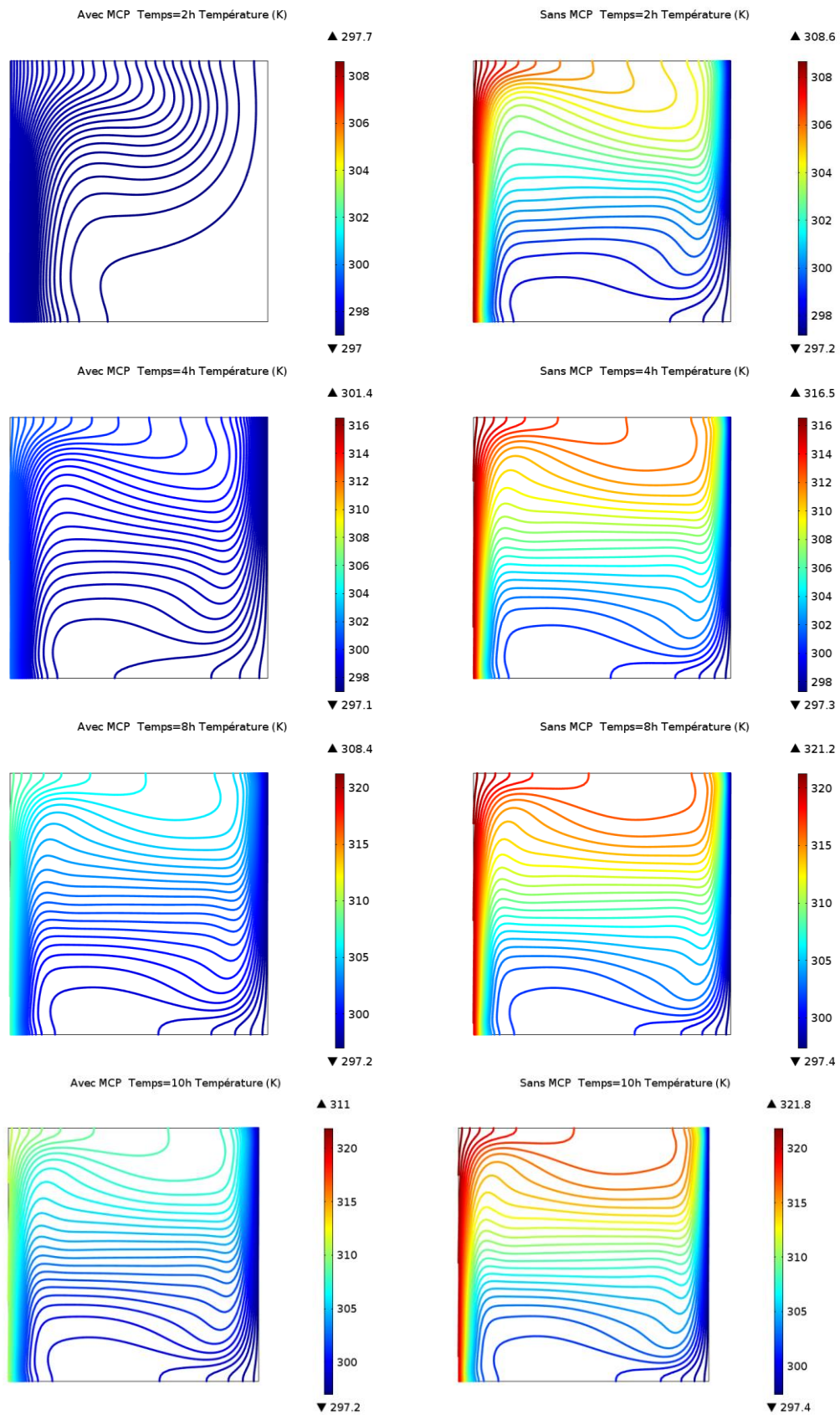


Figure 4.10. Les isothermes pour différents nombres de Rayleigh

Les résultats obtenus montrent que la présence du MCP dans la ralentisse la propagation de chaleur à l'intérieur de la cavité. Ceci est illustré en constatant la différence significative entre les valeurs de la température moyenne qui ont été obtenus à l'intérieure de la cavité avec MCP et avec celle de référence. Par exemple, pour $Ra = 10^3$ et après une période de 2 heures, on constate une différence de température autour de 3°C . Cette valeur a été évoluée en fonction du temps jusqu'à qu'elle atteint une valeur maximum d'environ 7°C après une période de 8 heures. A la fin de la simulation, la différence thermique moyenne entre les deux cas (avec et sans MCP) a diminué progressivement de nouveau jusqu'à qu'elle s'est stabilisée à une valeur de 6.15°C . Cette différence thermique moyenne a subi le même comportement pour les autres nombres du Rayleigh avec des différences de valeurs négligeables.

Pour $Ra = 10^3$ et $Ra = 10^4$, on observe que pendant les premiers instants de la simulation, la différence thermique entre les deux parois latérales de la cavité est presque nul. Au cours du temps, les isothermes sont distribués parallèlement à l'intérieur de la cavité ce qui révèle que le mécanisme de transfert de chaleur dominant durant cette période est la conduction. Après un certain moment, on observe une faible distorsion dans la stratification des isothermes. Cette observation peut être considérée comme un indicateur sur la naissance de la convection naturelle qui est due à l'augmentation de la différence thermique entre les deux parois latérales. L'apparition de cette distorsion a été enregistrée en premier lieu dans le cas de référence ce qui signifie que le mode de conduction s'étend à une période plus longue dans le cas du MCP. Avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, cette distorsion des isothermes devient plus forte de sorte que la couche limite thermique soit plus étroitement confinée au voisinage des parois froides et chaudes.

La comparaison avec la cavité de référence, nous montre que la distorsion des isothermes est plus importante dans le cas de l'absence du MCP. Ce qui démontre que ce dernier réduit l'impact de la convection naturelle pendant son processus de fusion. Par conséquent la distribution de la température à l'intérieur de la cavité devient plus lente. La cause revient à la masse thermique de la paroi avec MCP qui est supérieure à celle de référence en raison de l'absorption de la chaleur latente pendant le changement de phase. Ce qui conduit à stabiliser la température de la surface intérieure à une température constante. Après une certaine période de la simulation, on observe que la propagation de température dans la cavité avec MCP augmente plus rapidement ce qui va conduire à son tour à minimiser le temps de décalage par rapport à celle de référence. Ceci peut être expliqué d'une part, par l'augmentation à nouveau de la température de la surface interne après la transformation de la majorité du MCP à l'état liquide et d'autre part, le gradient de la

température va se diminuer à l'intérieur de la cavité de référence en raison de son approche vers un équilibre thermique.

Pour une meilleure visualisation de la distribution de température le long du modèle et de l'effet de l'augmentation du nombre de Rayleigh sur le processus du changement de phase, on a mesuré la distribution horizontale et verticale de la température au milieu de la cavité d'où les résultats présentés dans les figures 4.11 et 4.12. De même, la figure 4.13 montre l'évolution de la température le long de l'interface entre la paroi de brique et l'espace intérieur de la cavité au cours du temps. Tous ces résultats ont été calculés dans les deux cas avec/sans MCP et pour différents nombres de Rayleigh.

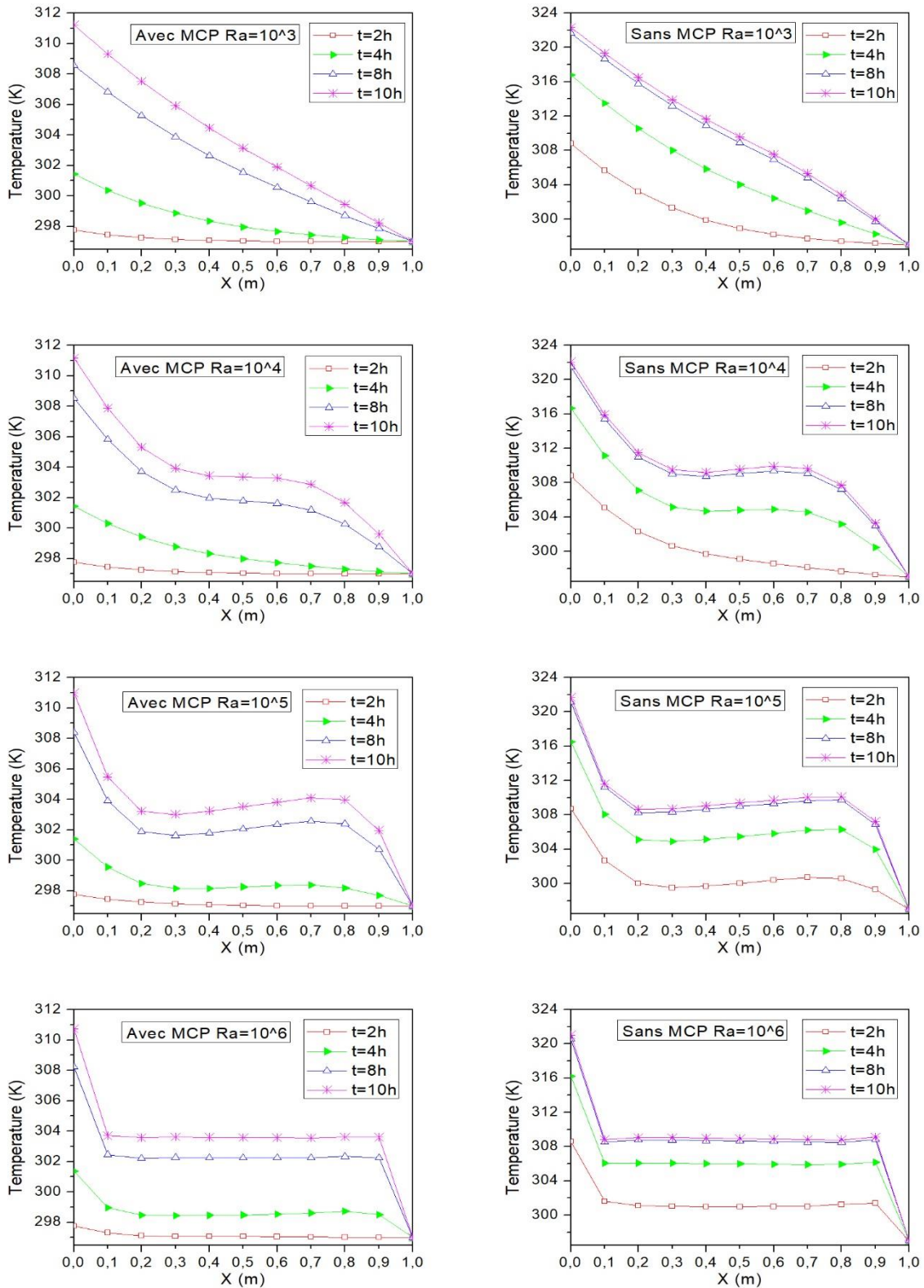


Figure 4.11. La distribution de la température suivant l'axe « x » au milieu de la cavité pour différentes Rayleigh au cours du temps

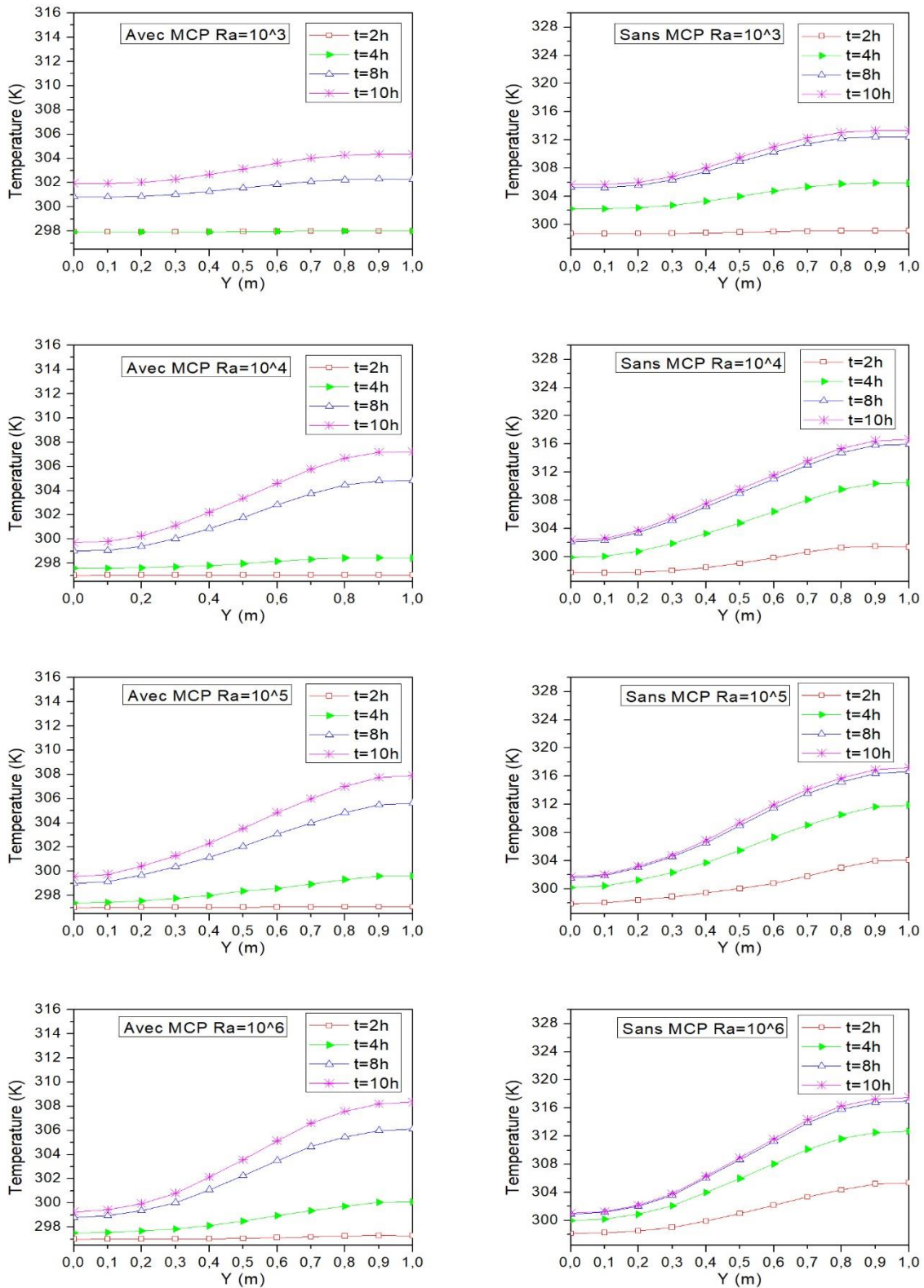


Figure 4.12. La distribution de la température suivant l'axe « Y » au milieu de la cavité pour différentes Rayleigh au cours du temps

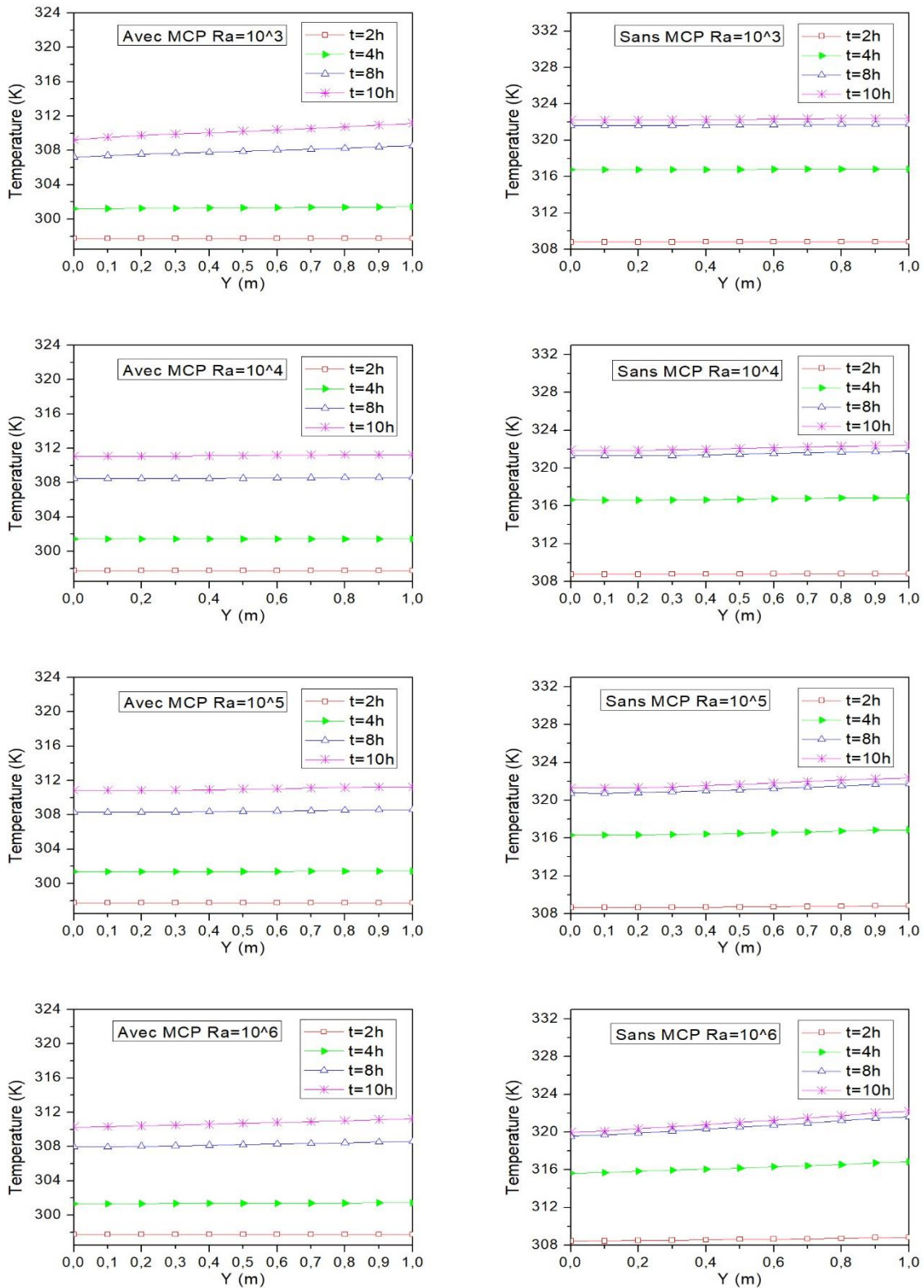


Figure 4.13. La distribution de la température le long de l'interface intérieure de la paroi pour différentes Rayleigh au cours du temps

Après l'observation de la figure 4.11, on peut déduire qu'à partir de l'augmentation du Ra , la variation de la température se concentre d'une manière très forte au niveau des parois latérales de la cavité. Cependant, la fluctuation de température au voisinage du centre reste limitée.

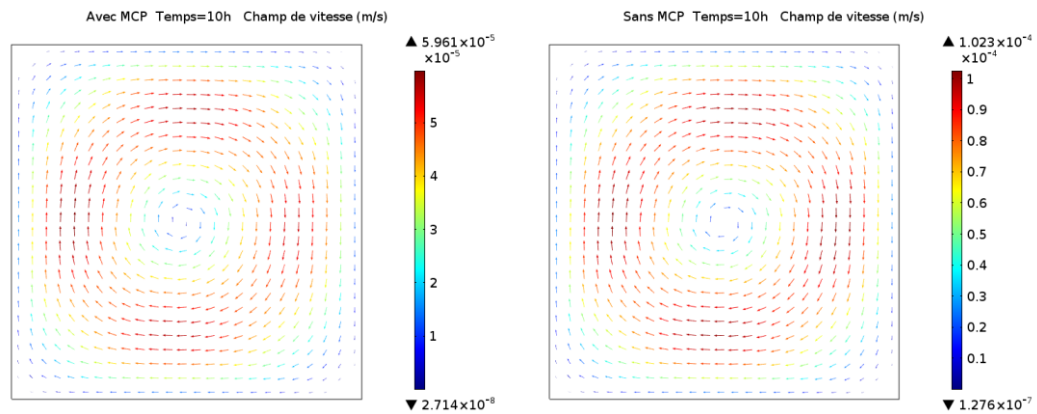
Avec l'augmentation du nombre de Rayleigh, on constate une variation de la pente du profil de la température près des surfaces latérales alors qu'autour de la partie centrale, on distingue une stabilisation de la température entraînant la création d'un palier. Par exemple, ce dernier va présenter une dimension plus étendue lorsque $Ra = 10^6$ dans lequel le champ de stabilité de température se propage sur toute la distance horizontale à l'exception des extrémités. Cette constatation peut s'expliquer par le développement de la convection naturelle qui dépend de l'augmentation du Rayleigh. Ceci se visualise sous forme d'une variation non linéaire de la température distribuée horizontalement le long de la cavité. Au fil du temps, la température se rapproche de plus en plus vers l'état d'équilibre, ce qui mène à une stabilité globale sauf au niveau des extrémités où la chaleur est transférée par conduction.

Quant à la figure 4.12, la température augmente en fonction de la hauteur de la cavité. Pour $Ra = 10^3$, on remarque une faible variation de la température avec la hauteur et ce en raison d'une influence minimale de la convection naturelle. Cet impact devient plus important avec le facteur temps et avec l'augmentation du Ra , surtout dans le cas de référence où a été enregistrée une valeur plus élevée par rapport au cas du MCP.

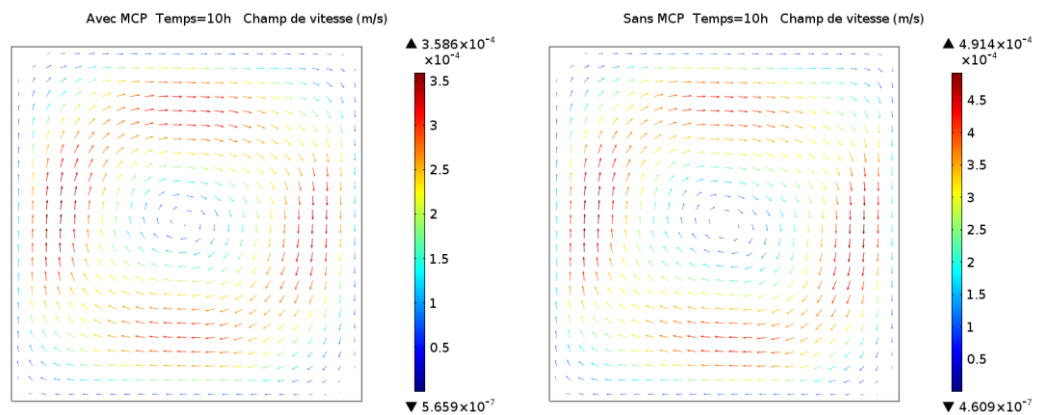
La figure 4.13 présente la distribution de la chaleur le long de l'interface pendant des périodes de temps distinctes. Dans le cas du MCP, les résultats montrent que la température au niveau de l'interface ne dépend pas de la hauteur. Cette constatation n'est valable que pour $Ra = 10^3$, $Ra = 10^4$ et $Ra = 10^5$. Quant au $Ra = 10^6$, on observe la présence de quelques variations de température lorsque on se dirige vers le haut. Cette variation est beaucoup plus significative dans le cas de référence. Ceci peut s'expliquer par l'escalade de l'air chaud dû à la croissance du Rayleigh ce qui va réduire la différence thermique dans les zones supérieures. Toutefois, le flux de chaleur est plus important dans la zone inférieure où se concentre l'air froid. Ce procédé devient plus rapide quand Rayleigh s'augmente. Par conséquent, l'état d'équilibre est atteint dans une courte durée au niveau de la zone supérieure. Dans le cas du MCP, on observe qu'il n'existe pas un décalage important entre les valeurs de température enregistrées lors des différentes périodes malgré la variation du Rayleigh. Ceci montre que l'influence de Rayleigh sur la durée nécessaire pour terminer le processus de fusion est presque négligeable.

En général, les résultats obtenus dans toutes les figures présentées ci-dessus montrent un retard au niveau de la propagation de la chaleur dans le cas du MCP comparé au cas de référence. Cette différence revient au processus de fusion qui diminue le taux de flux de chaleur transféré vers l'espace intérieur. Pour visualiser l'effet du MCP sur le mouvement de l'air à l'intérieur de la cavité. La figure 4.14 montre les champs de vitesses à la fin de la simulation dans les deux cas (avec et sans MCP) et pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh.

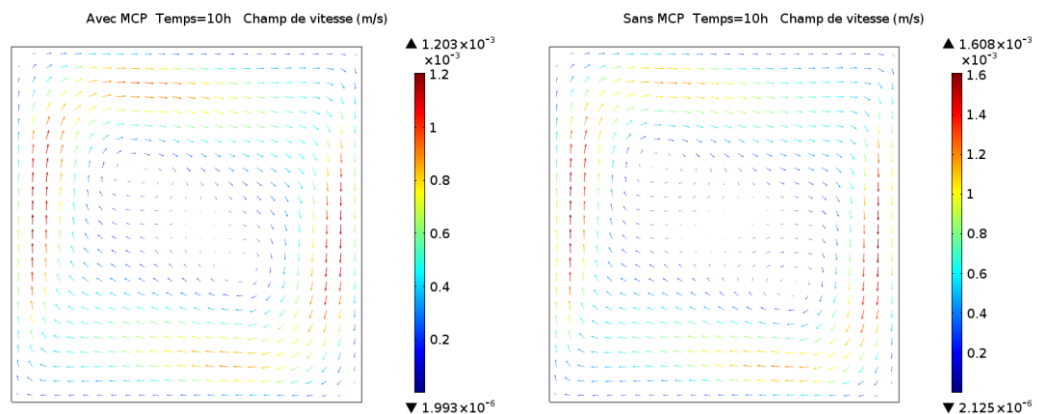
➤ Pour $Ra=10^3$



➤ Pour $Ra=10^4$



➤ Pour $Ra=10^5$



➤ Pour $Ra=10^6$

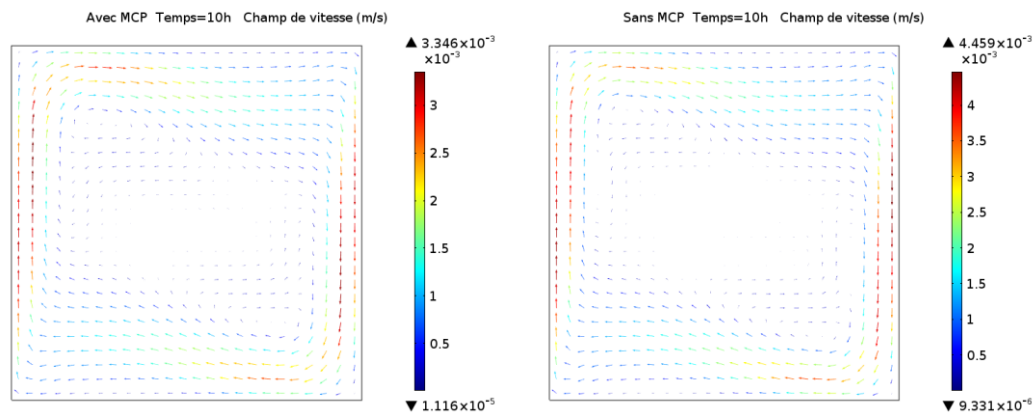


Figure 4.14. Les lignes de courants pour différents nombres de Rayleigh

On constate par les résultats des champs de vitesses que l'écoulement de l'air est plus cinétique avec des vitesses plus grandes dans le cas de l'absence du MCP. Par contre, ce dernier rend l'écoulement de l'air plus lent avec des vitesses faibles. Ceci est illustré dans la figure 4.14. Cet effet revient aux mêmes arguments qui ont été déjà mentionnés dans l'analyse du comportement des isothermes. L'augmentation du nombre de Rayleigh améliore le transfert de chaleur par convection naturelle qui provoque la présence d'une couche limite hydrodynamique avec une épaisseur relativement croissante dans la zone supérieure à cause de l'escalade de l'air au voisinage de la paroi chaude du fait de la poussée d'Archimède qui est plus forte que la gravité. D'autre part, la température de la surface interne va être plus faible dans la zone inférieure ce qui entraîne une très faible vitesse. Les résultats des lignes de courants dans les deux cas sont résumés dans les figures 4.15 et 4.16 qui représentent respectivement le profil de vitesse suivant x et y en fonction du temps pour différentes Rayleigh.

Les valeurs de vitesse U_x et U_y ont été calculées respectivement le long d'une ligne verticale et horizontale au milieu de la cavité.

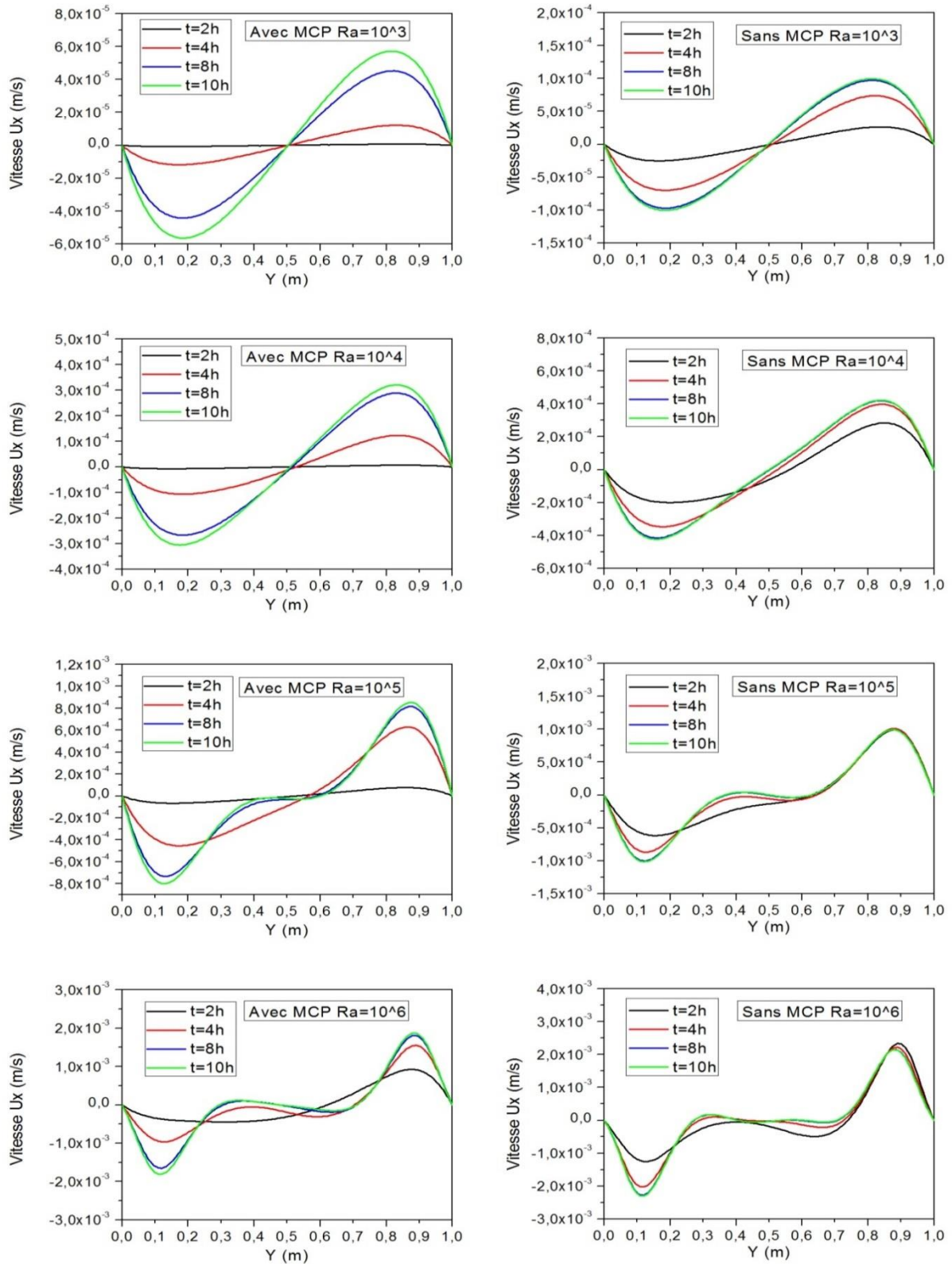


Figure 4.15. Vitesses U_x suivant l'axe « y » en fonction du temps pour différentes Rayleigh

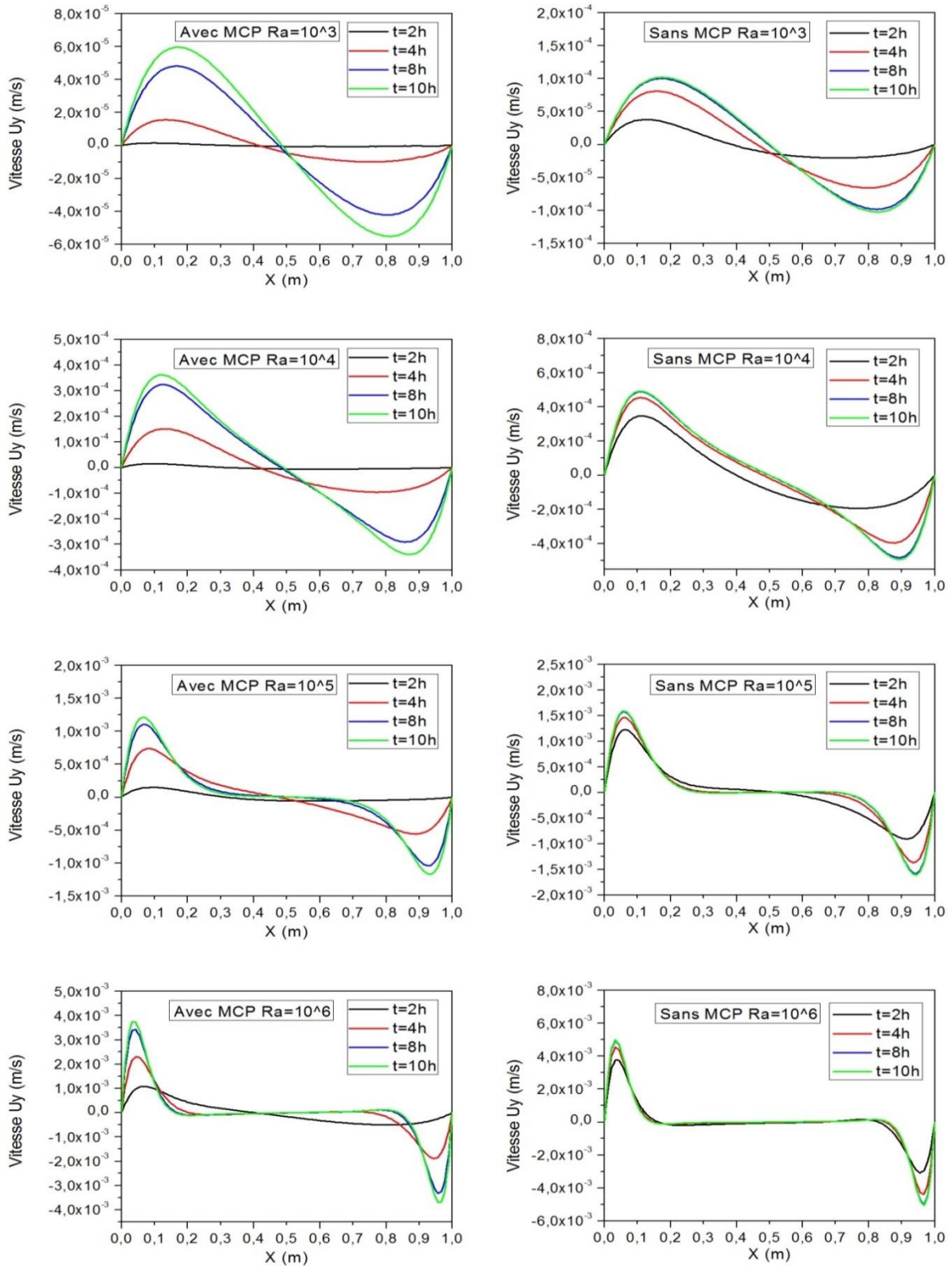


Figure 4.16. Vitesses U_y suivant l'axe « x » en fonction du temps pour différentes Rayleigh

Comme il a été décrit précédemment, les résultats montrent que l'amplitude de la vitesse de l'air augmente au court du temps à cause de l'augmentation de la différence thermique entre les parois latérales de la cavité ce qui rend la convection naturelle plus importante. Bien que les vitesses U_x et U_y pour $Ra = 10^3$ et $Ra = 10^4$ soient très faibles, elles sont distribuées symétriquement par rapport au centre de la cavité ce qui est illustré dans les lignes du courant par la création des vortex autour du centre. Par contre, on constate pour $Ra = 10^6$ que les vitesses élevées sont très concentrées au voisinage des surfaces chaudes et froides et elles sont très faible au niveau proche du centre de la cavité. Par ailleurs, La présence du MCP à l'intérieur de la paroi influence l'évolution et la forme de la couche limite thermique.

Les échanges thermiques au cours de l'écoulement du fluide sont caractérisés par le nombre de Nusselt. C'est le rapport entre le transfert thermique convectif et le transfert par conduction. Le taux de transfert thermique par convection naturelle dans une cavité est estimé à partir du calcul de ce nombre. D'après les résultats de la distribution de la température, le nombre de Nusselt local le long de la paroi avec MCP est défini comme suit :

$$N_{u,y} = \frac{h.y}{\lambda} \quad (26)$$

La figure 4.17 montre la variation au cours du temps du nombre de Nusselt local pour des valeurs de Rayleigh différentes dans les deux cas étudiés (avec et sans MCP).

D'après les résultats obtenus, on remarque que dans les premiers instants ($t=2h$), la valeur de Nusselt est très faible surtout dans le cas de la présence du mur avec le MCP. Durant les premiers instants le coefficient de transfert de chaleur par convection est indéfini car la surface intérieure de la paroi et le flux d'air ont la même température et l'échange s'effectue par conduction. Cet équilibre thermique dure plus longtemps jusqu'à ce que le processus de fusion se termine. De même, pour un faible nombre de Rayleigh ($Ra = 10^3$), le mode de transfert de chaleur dominant est la conduction. Par conséquent, il n'y a pas de flux convectif au voisinage de la paroi et la valeur de transfert de chaleur par convection n'a aucun effet sur le comportement du système. Ceci est illustré dans la figure par des valeurs minimales du Nusselt.

On constate aussi que le nombre du Nusselt local augmente lorsqu'on s'éloigne des parois isolées inférieure et supérieure. La valeur de ce dernier est nulle en contact avec ces deux parois. Ceci explique que l'échange de chaleur au niveau de la paroi verticale considérée devient plus important lorsqu'on s'éloigne des deux parois horizontales isolées.

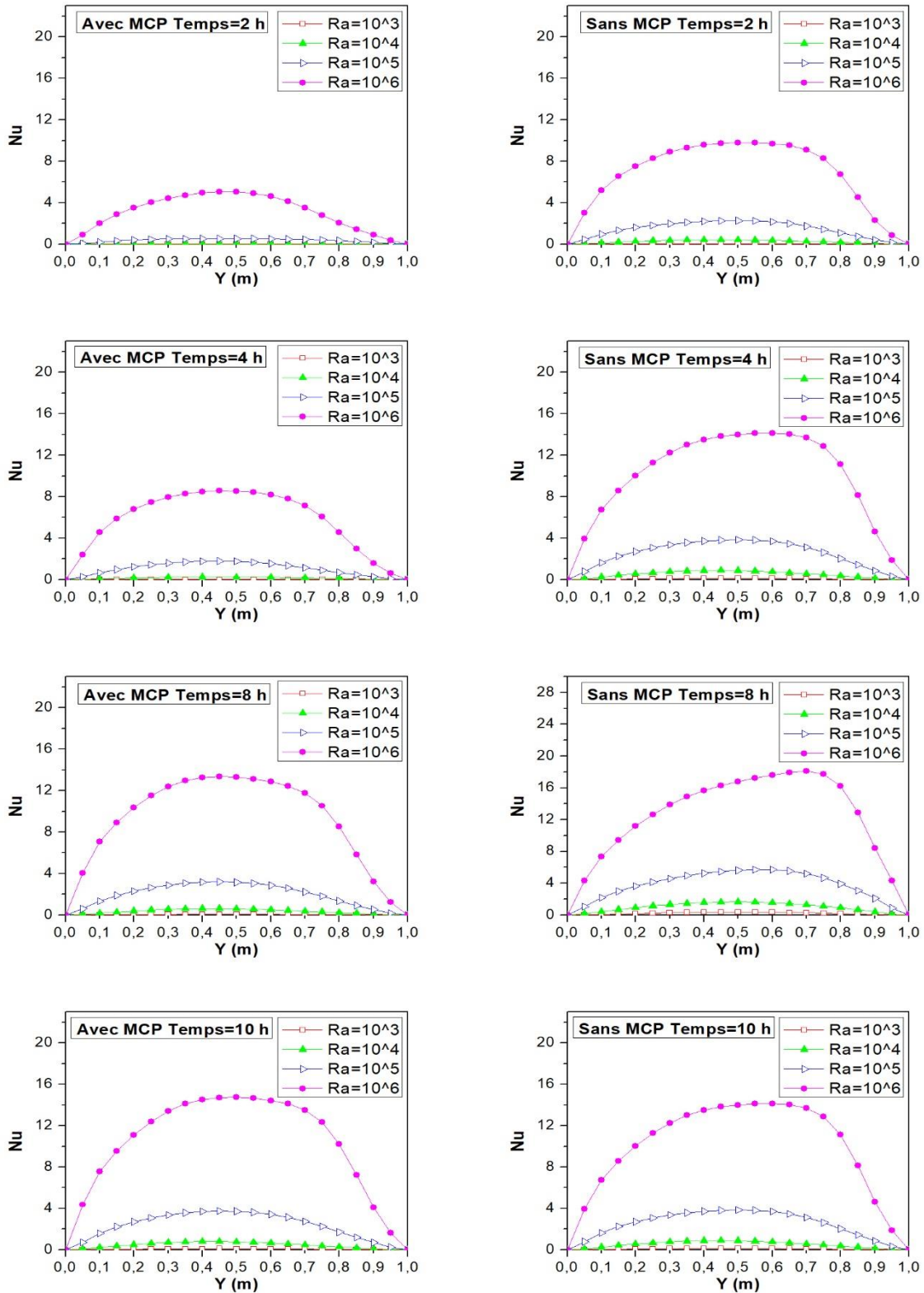


Figure 4.17. La variation du Nusselt Local au cours du temps pour différents nombres de Rayleigh

Cette constatation peut s'expliquer lorsque d'une part, la convection naturelle motive l'écoulement de l'air au voisinage de la paroi chaude ce qui améliore le flux convectif.

L'échange thermique par convection naturelle devient plus efficace avec l'augmentation du nombre de Rayleigh ce qui mène à des valeurs maximales du nombre du Nusselt local. L'évolution du Nusselt est plus importante dans le cas où le MCP n'est pas intégré dans la paroi de brique creuse. Ceci révèle comment le MCP peut présenter une solution efficace pour empêcher la propagation rapide de la chaleur à l'intérieur de la cavité et surtout pendant les périodes chaudes.

Conclusion générale et Perspectives

5 Conclusion et Perspectives

5.1 Conclusion

L'application du MCP dans le domaine du bâtiment favorise la technologie du stockage de la chaleur latente pour des économies d'énergie supplémentaires. Les travaux examinés dans la bibliographie ont révélé que l'incorporation de MCP dans les matériaux de construction classiques avec une installation précise dans les éléments de l'enveloppe du bâtiment (mur, plafond, sol...ex) avec une capacité de réduire la température maximale intérieure, améliorer la performance énergétique globale du bâtiment, utiliser l'énergie électrique hors pointe et augmenter la résistance thermique comme une couche d'isolation.

La non-linéarité du problème du changement de phase rend la solution analytique plus compliquée, ouvrant ainsi la voie au recours à différentes approches numériques. Le problème de la résolution des équations différentielles est ensuite laissé à l'ordinateur. Les modèles numériques sont donc plus flexibles vis-à-vis des effets thermiques et de la géométrie pouvant être traitée. La plupart des modèles examinés numériquement ont été validés avec des données expérimentales dans la littérature, ce qui rend les outils fiables pour évaluer et prédire l'effet du MCP dans les matériaux de constructions.

En se basant sur les informations fournies par la partie bibliographique et sur les données de la partie théorique, on a présenté une étude numérique fondée sur la méthode des éléments finis à travers laquelle on a étudié un nombre de points qui peuvent être résumés comme suit :

- Une analyse numérique des propriétés thermo physiques de la brique creuse contenant un MCP
- Une étude comparative entre deux différents matériaux de construction incorporés par MCP sont sélectionnés comme exemple pour tester leur capacité d'énergie stockée sous forme de chaleur latente.
- Une étude de la performance thermique d'une paroi extérieure en brique avec MCP sous différentes factures
- Une modélisation de l'application d'une paroi avec MCP dans une cavité fermée et son influence sur les échanges convectifs dans son espace intérieur.

Conclusion et Perspectives

Dans le premier point, on s'est intéressé à déterminer numériquement les propriétés thermo physiques de deux types de briques creuses contenant du MCP. Les résultats ont conduit à calculer les valeurs de la conductivité thermique effective dans l'état solide et liquide du MCP. Du même, on a accédé à tracer les profils de la capacité thermique équivalente durant le processus de changement de phase dans les deux types de briques creuses. Le calcul a également permis de déterminer le total du stockage de chaleur par chaleur latente pendant la fusion et de tracer le profil de la température dans l'interface intérieure. Les résultats de cette étude montrent aussi que le matériau proposé peut être l'une des solutions pour améliorer l'efficacité énergétique dans les bâtiments.

D'après le deuxième point, en comparant les résultats obtenus avec les deux matériaux, il a été observé que l'addition de MCP produisait une réduction de la fluctuation du flux de chaleur à la surface interne du parpaing plus que celle de la brique creuse. Cela s'explique par le fait qu'il existe une corrélation directe entre l'augmentation de la quantité de MCP et le renforcement de l'inertie thermique du matériau.

Quant au troisième point, le comportement thermique d'un mur extérieur en double couche de briques creuses remplies avec MCP a été étudié numériquement. Les données météorologiques réelles de la température et du rayonnement solaire de la ville de Timimoun au sud de l'Algérie (exemple, d'une zone chaude) sont appliquées comme conditions aux limites.

Les résultats obtenus par cette étude peuvent être utiles pour l'application du MCP dans le mur de briques creuses dans les bâtiments à énergie solaire. Une étude paramétrique a été réalisée pour estimer l'influence de divers facteurs de conception, tels que la quantité, l'emplacement et le type du MCP ... etc. On peut résumer l'impact de ces facteurs sur la performance thermique de la paroi par les recommandations suivantes :

- L'effet de l'emplacement et de la quantité du MCP sont évalués en examinant différents cas dont chacun contient des configurations spécifiques sur la position du MCP. Les résultats indiquent que la performance thermique optimale de la paroi est obtenue lorsque le MCP est rempli uniquement dans la brique creuse intérieure.
- Concernant le type de MCP utilisé, on a constaté que sous les conditions limites proposées, les oscillations de la température au niveau de la surface intérieure sont plus stables lorsque

le RT21 est appliqué par rapport aux autres MCP. Par conséquent, la température de fusion appropriée du MCP doit être proche de la température ambiante.

- Une couche de résistance thermique se produit par l'espace existant entre les deux couches de briques creuses. Cette couche doit être restreinte avec une épaisseur minimale afin de permettre au MCP de stocker une grande quantité d'énergie comme chaleur latente.
- L'effet d'utiliser différents matériaux, spécialement les matériaux isolants comme couche de séparation entre les deux briques creuses est insignifiant. Il est donc conseillé de conserver la lame d'air comme meilleure solution en termes de performance thermique et économique.

Le dernier chapitre traite sur le phénomène de la convection naturelle lors de l'utilisation du MCP. Un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis a été développé pour l'étude d'une paroi de brique creuse avec MCP placée dans une cavité fermée. Le but est de déterminer l'influence de la fusion du MCP sur le transfert de chaleur par la convection naturelle. Cette étude a été basée sur une comparaison entre le cas du MCP et celui de référence. Dans ce contexte, nous avons calculé la propagation de la chaleur à l'intérieur de la cavité qui a été présentée sous formes des isothermes. Les résultats ont montré que le MCP joue convenablement son rôle d'amortisseur thermique et les fluctuations des températures intérieures sont considérablement réduites. Ceci a été apparemment clair dans les lignes de courant qui ont montrées que l'écoulement de l'air est plus cinétique avec des vitesses plus grandes dans le cas de l'absence du MCP. Par contre, ce dernier rend l'écoulement plus lent avec des vitesses faibles.

L'augmentation du Rayleigh améliore l'évolution du flux convectif à l'intérieur de la cavité. Cependant, son influence sur la durée nécessaire pour terminer le processus de fusion est presque négligeable. De même, le calcul du nombre de Nusselt montre que son évolution a été plus grande dans le cas de l'absence du MCP. Cette situation peut représenter une solution efficace pour limiter les fluctuations importantes de la température intérieure et surtout dans les climats chauds.

5.2 Perspectives

En raison de la limitation du temps et des ressources, les discussions effectuées dans ce travail ne couvrent que certains aspects de la simulation. Une étude plus approfondie sur l'application du MCP dans le bâtiment peut être effectuée en modifiant quelques paramètres qui peuvent avoir une influence sur le comportement du MCP.

Conclusion et Perspectives

D'après les perspectives envisagées pour la continuation de ce travail, une étude expérimentale est nécessaire pour valider les modèles numériques sous des conditions réelles. De même, une analyse économique sur les conditions d'application et les gains en énergie résultant de l'introduction du MCP dans le bâtiment. Cependant, l'étude au niveau des publications scientifiques sur cette approche économique est très limitée.

Par ailleurs, Il est intéressant de présenter le modèle numérique en 3D pour visualiser l'effet de la troisième dimension sur les résultats obtenus. De plus, les résultats obtenus par le modèle numérique en 3D seront plus réalistes et plus proches des résultats expérimentaux.

Finalement, pour réaliser une analyse globale de l'application du MCP dans l'enveloppe du bâtiment, on procède à certains nombres d'essais à partir des différents facteurs tels que :

- L'intégration des MCP dans différents matériaux de construction à l'exception de la brique ayant fait l'objet d'étude.
- L'installation des MCP dans différents emplacements à savoir les planchers, les fenêtres, les sols ...etc.
- Prendre en considération le couplage de la convection naturelle et le rayonnement comme mode de transfert de chaleur lors de l'analyse des performances thermiques du MCP.

Bibliographies

- [1] “European Union, Directive 2012/27/EU of the European parliament and of the council efficiency.” Official Journal of the European Union, 25-Oct-2012
- [2] Fraunhofer et al. (2015 - ongoing), "Study on Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables)", ENER/C2/2014-641
- [3] M. J Richardson, A. W Woods, An Analysis of phase change material as thermal mass. Proceedings of the Royal Society A, (2008) 1029-1056
- [4] J. Kośny, PCM-Enhanced Building Components. Cham: Springer International Publishing, (2015)
- [5] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," *Energy Conversion and Management*, 39 (1998) 1127-1138.
- [6] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part II: cool thermal storage," *Energy Conversion and Management*, 39 (1998) 1139-1153
- [7] I Dincer, M Rosen, *Thermal energy storage: systems and applications*, 2nd ed John Wiley & Sons, (2011) 84-141
- [8] B Jones, K Hsieh, M Hashinaga, The effect of air velocity on thermal comfort at moderate activity levels, *ASHRAE Transactions* 92 (1986) 761–769, Part 2B (CONF-8606125)
- [9] S Mondal, Phase change materials for smart textiles-an overview, *Appl Thermal Eng*, 28 (2008) 1536–1550
- [10] Bo Zhao¹, Chuan Li, Yi Jin¹, Cenyu Yang¹, Heat transfer performance of thermal energy storage components containing composite phase change materials, *IET Renewable Power Generation*, 10 (2016) 1515 - 1522
- [11] M Telkes, Solar house heating—a problem of heat storage. *J. Heat Ventilating* 44 (1947) 68–75.
- [12] M Telkes, Trombe wall with phase change storage material. In: *Proceedings of the 2nd national passive solar conference*, Philadelphia (1978).
- [13] M Telkes, Thermal energy storage in salt hydrates. *Solar Energy Mater*, 2 (1980) 381–393
- [14] S. N. AL-Saadi, Z. (John) Zhai, Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev*, 21(2013) 659–673
- [15] R. Baetens, B. P. Jelle, A. Gustavsen, “Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review,” *Energy Build*, 42 (2010) 1361–1368.
- [16] L Derradji, F Boudali, E.M Amara, Effect of PCM in Improving the Thermal Comfort in Building, *Energy Procedias*, 107 (2017) 157-161
- [17] A. M. Khudhair and M. M. Farid, “A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials,” *Energy Convers Manag*, 45 (2004) 263–275
- [18] F. Kuznik, D. David, K. Johannes, and J.-J Roux, “A review on phase change materials integrated in building walls,” *Renew. Sustain. Energy Rev*, 15 (2011) 379–391.
- [19] Yaping Cui¹, Jingchao Xie, Jiaping Liu, Jianping Wang and Shuqin Chen, A review on phase change material application in building, *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (2017) 1–15
- [20] Société BASF, www.basf.com
- [21] A. Sari, A. Karaipekli, Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material, *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 1271–1277
- [22] F.L. Tan, C.P. Tso, Cooling of mobile electronic devices using phase change materials, *Appl. Therm. Eng.* 24 (2004) 159–169
- [23] A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev* 12 (2008) 2438–2458
- [24] M Song, F Niu, N Mao, Y Hu, S Deng, Review on building energy performance improvement using phase change materials, *Energy and Buildings*, 158 (2018) 776-793

- [25] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, *Solar Energy*, 30 (1983) 313-332
- [26] H. Mehling, L.F. Cabeza, *Heat and Cold Storage with PCM – An up to Date Introduction*, Springer, Heat and Mass Transfer, (2008)
- [27] B Cárdenas, N León. High temperature latent heat thermal energy storage: phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renew Sustain Energy Rev* 27(2013) 724–37.
- [28] G.A. Lane, *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*, CRC Press, (1986)
- [29] V.V. Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: a state of art, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11 (2007) 1146–1166
- [30] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev* 15 (2011) 1675–1695
- [31] D. Hale, J. Hoover, M. O’neill, *Phase Change Materials Handbook* (1971).
- [32] C. V Konstantinidou, A Novoselac, *Integration of thermal energy storage in buildings*, Univ Tex. Austin, 2010
- [33] C. Alkan, Enthalpy of melting and solidification of sulfonated paraffins as phase change materials for thermal energy storage, *Thermochim Acta* 451(2006) 126–130
- [34] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renew Sustain, EnergyRev.*14 (2010) 615–628
- [35] S Y Kee, Y Munusamy, K S Ong, Review of solar water heaters incorporating solid-liquid organic phase change materials as thermal storage, *Applied Thermal Engineering*, 131 (2018) 455-471
- [36] S. Jegadheeswaran, S.D. Pohekar, Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (2009) 2225–2244
- [37] RUBITHERM GmbH - Paraffin in thermal energy storage applications, <http://www.rubitherm.com>
- [38] P Sobolčiak, H Abdelrazeq, N GözdeÖzerkan, M Ouederni, Heat transfer performance of paraffin wax-based phase change materials applicable in building industry, *Applied Thermal Engineering*, 107 (2016) 1313-1323.
- [39] A Sharma, V Tyagi, C Chen, D Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew Sustain Energy Rev* 13 (2009) 318–45
- [40] T Kousksoua, A Jamil, T El Rhafikia, Y Zeraouli, Paraffin wax mixtures as phase change Materials, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94 (2010) 2158-2165
- [41] M. Zábbransky, Heat capacity of liquids: critical review and recommended values. Supplement I, *J. Phys. Chem.*, 30 (2001) 1199
- [42] S.M. Hasnain, *Latent Heat Thermal Energy Storage for Solar Heating Applications*, (1990)
- [43] S. M. Hasnain, “Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques,” *Energy Convers. Manag.*, 39 (1998) 1127–1138
- [44] F Albouchi, M Lachheb, M Karkri, T Benameur, B N Sassi, Investigation of a graphite/paraffin phase change composite, *Int. J. of Thermal Sciences*, 88 (2015) 128-135
- [45] Y. Hong, Preparation of polyethylene paraffin compound as a form-stable solid-liquid phase change material, *Sol. Energy Mater, Sol. Cells* 64 (2000) 37–44
- [46] A Sari, A Karaipekli. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material. *Appl Therm Eng* 27 (2007) 1271–7
- [47] A Sari. Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid–liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties, *Energy Convers Manag.*, 45 (2004) 2033-2042
- [48] C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlinson, Solar thermal energy storage in phase change materials, in *proc ASES Annual Conf, USA*, (1992)

- [49] D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, Low chain esters of stearic acid as phase change materials for thermal energy storage in buildings, *Sol. Energy Mater Sol Cells* 36 (1995) 311–322
- [50] J.C. Petinelli, Produits paraffine dans le domaine du stockage de l'énergie thermique, communication à Stockage d'Énergie par Chaleur Latente, La Baule, (1980) 12-13
- [51] D. Rozanna, T. G. Chuah, A. Salmiah, Thomas S. Y. Choong, M. Sa'ari, Fatty Acids as Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage: A Review, *Int. J. of Green Energy*, 1 (2004) 495–513.
- [52] A. Karaipekli, A. Sarı, Preparation and characterization of fatty acid ester/building material composites for thermal energy storage in buildings, *Energy Build* 43 (2011) 1952–1959.
- [53] A. Sarı, A. Biçer, Thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters/building material composites as novel form-stable PCMs, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 101 (2012) 114–122
- [54] H. Fauzi, H.S.C. Metselaar, T.M.I. Mahlia, M. Silakhori, Thermo-physical stability of fatty acid eutectic mixtures subjected to accelerated aging for thermal energy storage (TES) application, *Appl. Therm. Eng.* 66 (2014) 328–334
- [55] A. Sarı, H. Sarı, A. Önal, Thermal properties and thermal reliability of eutectic mixtures of some fatty acids as latent heat storage materials, *Energy Convers. Manage* 45 (2004) 365–376
- [56] S.M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques, *Energy Convers Manage* 39 (1998) 1127–1138
- [57] RK Sharma, P Ganesan, VV Tyagi, HSC Metselaar, SC Sandaran. Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Convers Manag* 95 (2015) 193–228
- [58] H. Fauzi, H.S.C. Metselaar, T.M.I. Mahlia, M. Silakhori, Sodium laurate enhancements the thermal properties and thermal conductivity of eutectic fatty acid as phase change material (PCM), *Sol. Energy* 102 (2014) 333–337.
- [59] A. Karaipekli, A. Sarı, K. Kaygusuz, Thermal conductivity improvement of stearic acid using expanded graphite and carbon fiber for energy storage applications, *Renew Energy* 32 (2007) 2201–2210.
- [60] S Ushak, M. J Cruz, L. F. Cabeza, M Grágeda, Preparation and Characterization of Inorganic PCM Microcapsules by Fluidized Bed Method, *Materials* 9 (2016) 24
- [61] D.W. Hawes, D. Feldman and D. Banu, Energy conservation through latent heat thermal storage in building materials, *Proc. 5th Jacques Cartier Conf.*, Montreal, (1992)
- [62] A.J. Farrell, B. Norton, D.M. Kennedy, Corrosive effects of salt hydrate phase change materials used with aluminium and copper, *J. Mater. Process Technol* 175 (2006) 198–205
- [63] M Kenisarin, K Mahkamov, Salt hydrates as latent heat storage materials: Thermo physical properties and costs, *Sol Energy Mater. Sol. Cells* 145 (2016) 255–286
- [64] P Zhang, X Xiao, Z Ma, A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement. *Appl. Energy* 165 (2016) 472–510
- [65] C.E. Andracka, A.M. Kruijenga, B.A. Hernandez-Sanchez, E.N. Coker, Metallic Composites Phase-Change Materials, *Energy Procedia* 69 (2015) 726 – 736
- [66] P Salgaonkar, S Kulkarni, D Kulkarni, Eutectic: Phase Change Material for Food Storage, *Current Engineering and Technology*, 4 (2016) 99-101
- [67] S Kahwaji, M A White, Data supporting the prediction of the properties of eutectic organic phase change materials, *Data in Brief*, 17 (2018) 724-730
- [68] A Sari, K Kamil , Thermal performance of a eutectic mixture of lauric and stearic acids as PCM encapsulated in the annulus of two concentric pipes, *Solar Energy* 72 (2002) 493-504
- [69] V.V Tyagi. et D. BUDDHI, PCM thermal storage in building: a state of art –Renewable et sustainable, *energy reviews*, 11 (2005) 1146-1166.

- [70] G khundhair. et al. – A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials – *Energy Conservation*, 45 (2004), 263-275
- [71] Y. ZOHIR, “Etude expérimental et numérique du comportement thermique de matériaux à changement de phase. Intégration dans un composant solaire passif pour L'habitat ”, Thèse de 3ème cycle, Université d'Artois, Décembre (2008)
- [72] S Hohlein, A Konig-Haagen, D Bruggemann. Thermophysical characterization of $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, xylitol and erythritol as phase change materials (PCM) for latent heat thermal energy storage (LHTES). *Materials (Basel)* 10 (2017) 444
- [73] Y Cascone, M Perino. Estimation of the thermal properties of PCM through inverse modelling. *Energy Procedia* 78 (2015) 1714–9
- [74] H-Y Wang, S-S Lu. Study on thermal properties of phase change material by an optical DSC system. *Appl Therm Eng*, 60 (2013) 132–6
- [75] J Mazo, M Delgado, C Penalosa, P Dolado, I Miranda, A Lazaro. Evaluation of the suitability of different calorimetric methods to determine the enthalpy-temperature curve of granular PCM composites. *Appl Therm Eng*, 125 (2017) 306–16
- [76] A Sole, Miro L, C Barreneche, I Martorell, LF Cabeza. Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). *Renew Sustain Energy Rev* 26(2013) 425–36.
- [77] Huang Z, Xie N, Luo Z, Gao X, Fang X, Fang Y, Characterization of medium-temperature phase change materials for solar thermal energy storage using temperature history method. *Sol Energy Mater Sol Cells* 179 (2018) 152–60.
- [78] Z Yinping, J.Yi, A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Meas Sci Technol* 10 (1999) 201–5
- [79] A. Sari, A. Karaipekli, Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material, *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 1271–1277
- [80] D. A Neeper, Thermal Dynamics of Wall board with Latent Heat Storage. *Solar Energy* 68 (2000) 393-403
- [81] G. S Lock, *Latent Heat Transfer: An introduction to fundamentals*. United States: Oxford Science Publications (1994).
- [82] W. R Humphries, E. I Griggs, A design handbook for phase change thermal control an energy storage device. *NASA Technical Paper* (1977)
- [83] F Kuznik, D David, K Johannes, J. J Roux, A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Reviews* 15 (2010) 379-391.
- [84] C.V. Konstantinidou, A. Novoselac, *Integration of Thermal Energy Storage in Buildings*, Univ. Tex., Austin, (2010).
- [85] E. Rodriguez-Ubinas, L. Ruiz-Valero, S. Vega, J. Neila, Applications of phase change material in highly energy-efficient houses, *Energy Build.* 50 (July) (2012) 49–62
- [86] M. Pomianowski, P. Heiselberg, Y. Zhang, Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings, *Energy Build.* 67 (2013) 56–69
- [87] L. Royon, L. Karim, A. Bontemps, Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings, *Energy Build.* 63 (2013) 29–35.
- [88] X. Kong, S. Lu, Y. Li, J. Huang, S. Liu, Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application, *Energy Build.* 81 (2014) 404–415
- [89] X. Sun, Q. Zhang, M.A. Medina, K.O. Lee, Energy and economic analysis of a building enclosure outfitted with a phase change material board (PCMB), *Energy Convers. Manage.* 83 (2014) 73–78
- [90] G. Zhou, Y. Yang, X. Wang, S. Zhou, Numerical analysis of effect of shape-stabilized phase change material plates in a building combined with night ventilation, *Appl. Energy* 86 (2009) 52–59

- [91] A.L.S. Chan, Energy and environmental performance of building facades integrated with phase change material in subtropical Hong Kong, *Energy Build.* 43 (October (10)) (2011) 2947–2955
- [92] S M Sajjadian, J Lewis, S Sharples, The potential of phase change materials to reduce domestic cooling energy loads for current and future UK climates, *Energy Build.* 93 (2015) 83–89
- [93] K.O Lee, M.A Medina, E Raith, X Sun, Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management, *Appl. Energy* 137 (2015) 699–706
- [94] C. Voelker, O. Kornadt, M. Ostry, Temperature reduction due to the application of phase change materials, *Energy Build.* 40 (5) (2008) 937–944
- [95] S.D. Zwanzig, Y. Lian, E.G. Brehob, Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope, *Energy Convers. Manage.* 69 (2013) 27–40
- [96] L. Shilei, F. Guohui, Z. Neng, D. Li, Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards, *Energy Build.* 39 (2007) 1088–1091
- [97] X. Shi, S.A. Memon, W. Tang, H. Cui, F. Xing, Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels, *Energy Build.* 71 (2014) 80–87
- [98] F. Kuznik, J. Virgone, J.-J. Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation, *Energy Build.* 40 (2008) 148–156
- [99] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, *Energy Build.* 42 (2010) 534–540
- [100] C. Zhang, Y. Chen, L. Wu, M. Shi, Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures, *Energy Build.* 43 (2011) 3514–3520
- [101] C.K. Halford, R.F. Boehm, Modeling of phase change material peak load shifting, *Energy Build.* 39 (2007) 298–305
- [102] J Kosny, E Kossecka, A. Brzezinski, A Tleoubaev, D Yarbrough, Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs), *Energy Build.* 52 (2012) 122–131
- [103] F. Kaltenbach, PCM latent thermal storage media heating and cooling without energy consumption, *Detail Magazine*, 54 (2005) 4–549
- [104] S.M. Wakiltojar, W. Saman, Analysis and modelling of a phase change storage system for air conditioning applications, *Appl. Therm. Eng.* 21 (2001) 249–263
- [105] K Darkwa, J.S Kim, Heat transfer in neuron composite laminated phase-change drywall. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A-Journal of Power and Energy* 218 (A2), (2004) 83–88
- [106] K. Kaygusuz, C. Alkan, A. Sari, O. Uzun, "Encapsulated fatty acids in an acrylic resin as shape-stabilized phase change materials for latent heat thermal energy storage", *Energy Sources*, 30 (2008) 1050-1059
- [107] A. Shukla, D. Buddhi and R.L. Sawhney, "Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials", *Renewable Energy*, 33 (2008) 2606-2614
- [108] V D Caoa, S Pilehvar, C S Bringas, A M Szczotok, T Q Bui, M Carmona, J F Rodriguez, A L Kjøniksen, Thermal analysis of geopolymers concrete walls containing microencapsulated phase change materials for building applications, *Solar Energy*, 178 (2019) 295-307
- [109] D Feldman, MA Kahn, D Banu, Energy storage composite with an organic PCM. *Sol Energy Mater*, 18 (1989) 333–41
- [110] R Jacob, F Bruno, Review of solid–liquid phase change materials and their encapsulation technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48 (2015) 79-87
- [111] DW Hawes, D Banu, D Feldman, Latent heat storage in concrete, *Sol Energy Mater* 21(1990) 61–80

- [112] AK Athienitis, C Liu, D Hawes, D Banu, D Feldman, Investigation of the solar performance of a passive solar test room with wall latent heat storage. *Build Environ* 32(5) (1997) 405–10
- [113] M Hadjieva, R Stoykov, T Filipova, Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage. *Renew Energy* 19 (2000) 111–5
- [114] DA Neeper, Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *Sol Energy* 68 (2000) 393–403
- [115] W Xiao, X Wang, Y Zhang, Analytical optimization of interior PCM for energy storage in a lightweight passive solar room, *Appl Energy* 86 (2009) 2013–2018
- [116] L Xing, L Hongyan, W Shujun, Z Lu, C Hua. Preparation and thermal properties of form-stable paraffin phase change material encapsulation, *Sol Energy* 80 (2006) 1561–7
- [117] P Schossig, HM Henning, S Gschwander, T Haussmann. Microencapsulated PCMs integrated into construction materials. *Sol Energy Mater Sol C* 89 (2005) 297–306
- [118] C Castellón, M Medrano, J Roca, G Fontanals, LF Cabeza, improve thermal comfort in concrete buildings by using phase change material. In: *Proceedings of the energy sustainability conference* (2007) 457–63
- [119] A Figueiredo, R Vicente, J Lapa, C Cardoso, F Rodrigues, J Kämpf, Indoor thermal comfort assessment using different constructive solutions incorporating PCM, *Applied Energy*, 208(2017) 1208-1221
- [120] D Feldman, D Banu, D Hawes, Ghanbari, Obtaining an Energy Storing Building Material by Direct Incorporation of An Organic Phase Change Material in Gypsum Wallboard, *Sol Energ Mater*, 22 (1991) 231-242
- [121] M. Xiao, B. Feng, K. Gong, Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity, *Energy Convers. Manag.* 43 (2002) 103-108.
- [122] D. Zhou, C.Y. Zhao and Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications", *Applied Energy*, 92 (2012) 593-605
- [123] Y. Özönur, M. Mazman, H.Ö. Paksoy, H. Evliya, "Microencapsulation of coco fatty acid mixtures for thermal energy storage with phase change material", *International Journal of Energy Research*, 30 (2006) 741-749
- [124] A Raul, M. Jain, S Gaikwad, S K Saha, Modelling and experimental study of latent heat thermal energy storage with encapsulated PCMs for solar thermal applications, *Applied Thermal Engineering*, 143 (2018) 415-428
- [125] R Jacob, F Bruno, Review on shell materials used in the encapsulation of phase change materials for high temperature thermal energy storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48 (2015) 79-87
- [126] D Fernandes, F Pitie, G Caceres & J Baeyens. Thermal energy storage: “How previous findings determine current research priorities”. *Energy* 39 (2012) 246–257
- [127] W Zhao. Characterization of Encapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. Doctoral Dissertation. Lehigh University (2013)
- [128] MM Kenisarin, High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 955–970
- [129] JC Gomez. High-Temperature Phase Change Materials (PCM) Candidates for Thermal Energy Storage (TES) Applications. Milestone Report NREL/TP-5500-51446; (2011)
- [130] B Muñoz-Sánchez, I Iparragirre-Torres, V Madina-Arrese, U Izagirre-Etxeberria, A Unzurrunzaga-Iturbe, García-Romero, A. Encapsulated high temperature PCM as active filler material in a thermocline-based thermal storage system. *Energy Proc.* 69 (2015) 937–946.
- [131] Z Khan, Z Khan, A Ghafoor, A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility, *Energy Convers and Manag* 115 (2016) 132–158

- [132] N Vyshak, G Jilani. Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system. *Energy Convers Manage*; 48 (2007) 2161–8
- [133] L. Cao, F. Tang and G. Fang, "Synthesis and characterization of microencapsulated paraffin with titanium dioxide shell as shape-stabilized thermal energy storage materials in buildings", *Energy and Buildings*, article in press, (2014)
- [134] C. Liang, X. Lingling, S. Hongbo and Z. Zhibin, "Microencapsulation of butyl stearate as a phase change material by interfacial polycondensation in a polyurea system", *Energy Conversion and Management*, 50 (2009) 723-729
- [135] V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T. Akiyama, "Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review", *Renewable and Sustainable Energy*, 15 (2011) 1373-1391
- [136] M.N.A. Hawlader, M.S. Uddin, M.M. Khin, "Microencapsulated PCM thermal energy storage system", *Applied Energy*, 74 (2003)195-202
- [137] Q Zhongzhu, Ma Xiaol, Li Peng, Z Xudong, WAndrew, Micro-encapsulated phase change material (MPCM) slurries: Characterization and building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77 (2017) 246-262
- [138] F. Kuznik, J. Virgone, J.-J. Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation, *Energy Build.* 40 (2008) 148–156
- [139] C. Voelker, O. Kornadt, M. Ostry, Temperature reduction due to the application of phase change materials, *Energy Build.* 40 (2008) 937–944
- [140] J.S Kim, K Darkwa, Simulation of an integrated PCM-wallboard system. *Int. J. Energ. Res.* 27 (2003) 215–223.
- [141] SA Memon. Phase change materials integrated in building walls: a state-of-the-art review. *Renew Sustain Energy Rev*, 31 (2014) 870–906
- [142] H Nazir, M Batool, F J B Osorio, M I Ruiz, X Xu, Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review, *Int J. of Heat and Mass Transfer*, 129 (2019) 491-523
- [143] T.C. Ling and C.S. Poon, "Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview", *Construction and Building Materials*, 46 (2013) 55-62
- [144] A.G. Entrop, H.J.H. Brouwers, A.H.M.E. Reinders, Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses, *Solar Energy* 85 (2011)1007–1020
- [145] L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings* 39 (2007) 113–119.
- [146] A Hasan, A Khaled. Al Sallal, H Alnoman, Y Rashid and A Shaimaa, Effect of Phase Change Materials (PCMs) Integrated into a Concrete Block on Heat Gain Prevention in a Hot Climate, *Sustainability*, 8 (2016) 1009
- [147] P. Arce, C. Castellón, A. Castell, L.F. Cabela., Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings, *Energy and Buildings* 44 (2012) 88–93
- [148] X Shi, SA Memon, WC Tang, HZ Cui, F Xing. Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels. *Energy Build* 71 (2014) 80–7
- [149] E.A. Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material, *Energy and Buildings* 40 (2007) 351–357
- [150] CB Zhang, YP Chen, Wu LY, MH Shi, Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures, *Energy Build* 43(2011) 3514–20
- [151] E Alawadhi, M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material, *Energy and Buildings* 40 (2007) 351-357

- [152] T. Silva, R. Vicente, N. Soares, V. Ferreira, Experimental testing and numerical modeling of masonry solution with PCM incorporation: a passive construction solution, *Energy and Buildings* 49 (2012) 235–245
- [153] L Boussaba, A Foufa, S Makhoulf, G Lefebvre, L Royon, Elaboration and properties of a composite bio-based PCM for an application in building envelopes, *Construction and Building Materials*, 185 (2018) 156-165
- [154] I. Cerón, J. Neila, M. Khayet, Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use, *Energy and Buildings* 43 (2011) 1869–1874
- [155] F. Kuznik, J. Virgone, Experimental assessment of phase change material for wall building use, *Applied Energy* 86 (2009) 2038–2046
- [156] A. Sarı, Composites of polyethylene glycol (PEG600) with gypsum and natural clay as new kinds of building PCMs for low temperature-thermal energy storage, *Energy Build* 69 (2014) 184–192
- [157] Y. Quanying, L. Lisha, L. Chen, Thermal performance of shape-stabilized phase change paraffin wallboard, *Int. J. Sustain. Energy* 29 (2010) 185–190
- [158] C. Yang, L. Fischer, S. Maranda, J. Worlitschek, Rigid polyurethane foams incorporated with phase change materials: a state-of-the-art review and future research pathways, *Energy Build.* 87 (2015) 25–36
- [159] F Kuznik, D David, K Johannes, J.J. Roux, A review on phase change materials integrated in building walls, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 379-391
- [160] Y.P. Zhang, K.P. Lin, R. Yang, H.F. Di, Y. Jiang, Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings, *Energy Build.* 38 (2006) 1262-1269
- [161] H. Inaba, P. Tu, Evaluation of thermo physical characteristics on shape stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material, *Heat Mass Transf.*32 (1997) 307–312
- [162] Y.P. Zhang, K.P. Lin, R. Yang, H.F. Di, Y. Jiang, Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings, *Energy Build* 38 (2006) 1262–1269
- [163] S. Ahmet, Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties, *Energy Convers. Manag* 45 (2004) 2033-2042
- [164] G. Zhou, Y. Zhang, K. Lin, W. Xiao, Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates, *Renew, Energy* 33 (2008) 1228–1236
- [165] C Sunliang., State of the art thermal energy storage solutions for high performance buildings, Master`s Thesis, university of Jyväskylä, Department of physics, Master`s Degree Programme in Renewable Energy (2010)
- [166] BL Gowreesunker, SA Tassou, Effectiveness of CFD simulation for the performance prediction of phase change building boards in the thermal environment control of indoor spaces, *Build Environ* 59 (2013) 612–25
- [167] M.A. Izquierdo-Barrientos, J.F. Belmonte, D. Rodríguez-Sánchez, A.E. Molina, J.A. Almendros-Ibáñez, A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM), *Appl. Therm. Eng.* 47 (2012) 73–85
- [168] X Jin, MA Medina, X Zhang. On the importance of the location of PCMs in building walls for enhanced thermal performance, *Appl Energy* 106 (2013) 72-8
- [169] L Bin, W Meixi, W Qi, M Shaoli, R Bennacer, Effect of the Position of the Phase Change Material (PCM $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) on the Solar Chimney Effect, *Energy Procedia*, 139 (2017) 462-467
- [170] G Evola, L Marletta, F Sicurella, A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. *Build Environ* 59 (2013) 517-27
- [171] BL Gowreesunker, SA Tassou. Effectiveness of CFD simulation for the performance prediction of phase change building boards in the thermal environment control of indoor spaces, *Build Environ* 59 (2013) 612-25

- [172] BM Diaconu, M Cruceru, Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings, *Energy Build* 42 (2010) 1759-72.
- [173] C Voelker, O Kornadt, M Ostry, Temperature reduction due to the application of phase change materials, *Energy Build* 40 (2008) 937-44
- [174] BM Diaconu. Thermal energy savings in buildings with PCM-enhanced envelope: influence of occupancy pattern and ventilation, *Energy Build* 43 (2011) 101-7
- [175] I Mandilaras, M Stamatiadou, D Katsourinis, G Zannis, M Founti. Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls, *Build Environ* 61(2013) 93-103
- [176] U Stritih, V.V Tyagi, R Stropnik, H Paksoy, F Haghighat, M.M Joybari, Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings, *Sustainable Cities and Society* 41 (2018) 286-295
- [177] L Zalewski, A Joulin, S Lassue, Y Dutil, D Rouse, Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material, *Sol Energy* 86 (2012) 208–19
- [178] M. Koschenz, B. Lehmann, Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings, *Energy and Buildings* 36 (2004) 567–578
- [179] X. Xu, Y. Zhang, K. Lin, H. Di, R. Yang, Modeling and simulation on thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings, *Energy and Buildings* 37 (2005) 1084–1091
- [180] R. Ansuini, R. Larghetti, A. Giretti, M. Lemma, Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control, *Energy and Buildings* 43 (2011) 3019–3026.
- [181] J. Mazo, M. Delgado, J.M. Marin, B. Zalba, 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* 47 (2012) 458–466
- [182] EM Alawadhi and HJ Alqallaf, building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: numerical study. *Energ Convers Manage* 52 (2011) 2958–2964
- [183] J Hashem, Alqallaf, E Alawadhi, Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain, *Energy and Buildings* (2013) 73-80
- [184] M. Ravikumar, P.S.S. Sirinivasan, Year-round performance of PCM filled RCC roof for thermal management, *European Journal Scientific Research* 3 (2011) 424–433
- [185] A Pasupathy, L Athanasius, R Velraj, RV Seeniraj. Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management. *Appl Therm Eng* 28 (2008) 556–65
- [186] A Pasupathy, R Velraj. Effect of double layer phase change material in building roof for year-round thermal management, *Energy Build* 40 (2008) 193–203
- [187] U. Stritih, V. Butala, Experimental investigation of energy saving in buildings with PCM cold storage, *Int. J. Refrig* 33 (2010) 1676–1683
- [188] AG Entrop, HJH Brouwers, AHME Reinders Experimental research on the use of microencapsulated phase change materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses. *Sol Energy* 85:1007–1020. ISSN 0038-092X. (2011)
- [189] X Jin, XS Zhang, Thermal analysis of a double layer phase change material floor, *Appl Therm Eng* 31(2011) 1576–81
- [190] Ye H, LS Long, HT Zhang, RQ Zou. The performance evaluation of shape stabilized phase change materials in building applications using energy saving index, *Appl Energy* 113 (2014) 1118–26.
- [191] M Stamatiadou, K Antonopoulos, M Founti Energy savings using floor tiles with phase change materials in a S. European country. In: *Proceedings of 11th international conference on thermal energy storage; Effstock. Thermal energy storage for energy efficiency and sustainability, Stockholm (2009)*
- [192] H. Manz, P.W. Egolf, P. Suter, A. Goetzberger, TIM-PCM external wall system for solar heating and day lighting, *Solar Energy* 61 (1997) 369–379

- [193] K.A.R Ismail., J. R Henriquez., Thermally effective windows with moving phase change material curtains, *Applied Thermal Engineering*, 21 (2001) 1909-1923
- [194] K.A.R. Ismail, J.R. Henríquez, Parametric study on composite and PCM glass system, *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 973–993
- [195] K.A.R. Ismail, C.T. Salinas, J.R. Henríquez, Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows, *Energy and Buildings* 40 (2007) 710–719.
- [196] H. Weinläder, A. Beck, J. Fricke, PCM-facade-panel for day lighting and room heating, *Solar Energy* 78 (2005) 177–186
- [197] H. Mehling, Strategic project “Innovative PCM-Technology” Results and future perspectives, 8th Expert Meeting and Workshop, Kizkalesi, Turkey, (2005)
- [198] E.M. Alawadhi, using phase change material in window shutter to reduce the solar heat gain, *Energy and Buildings* 47 (2012) 421–429
- [199] G. Lamé and B.P Clapeyron. Mémoire sur la solidification par refroidissement d’un globe liquide. *Ann. Chem. Phys* 47 (1831) 250-256
- [200] L.I. Rubenstein, the Stefan Problem. American Mathematical Society, Providence, Rhode Island, (1971)
- [201] J. Crank, Free and Moving Boundary Problems. Hemisphere Publishing Corporation, Washington (1993)
- [202] D Andreucci Lecture notes on the Stefan problem (2002)
- [203] C. Vuik, Some historical notes about the Stefan problem. *NieuwArchiefvoorWiskunde*, 4e serie 11 (1993) 57–167
- [204] H. Budhia and F. Kreith, “Heat transfer with melting or freezing in a wedge”, *Int. J. in Heat and Mass Transfer* 16 (1973) 195-211
- [205] A, J Dalhuijsen, A Segal, Comparison of finite techniques for solidification problems, *Int J Numer Methods Eng.* 23 (1981) 81–96
- [206] R.W Lewis, P.M Roberts, Finite element simulation of solidification problems *Appl Sci Res* 44 (1987) 61–92
- [207] E Pardo, D.C Weckman, A fixed grid finite element technique for modeling phase change in steady state conduction advection problems. *Int. J. Numer. Methods Eng* 29 (1990) 969–984
- [208] M Salcuden, Z Abdullah, on the numerical modeling of heat transfer during solidification processes. *Int J Numer Methods Eng.* 28 (1988), 445–473
- [209] B. G Thomas, I. V Samarasekara, J K Brimacombe, Comparison of numerical modeling techniques for complex two-dimensional transient heat conduction problems *Metal Trans B* 15 (1984) 307–318
- [210] S.C Gupta, A moving grid numerical scheme for multidimensional solidification with transition temperature range. *Comput Methods Appl Mech. Eng.* 189 (2000) 525–544
- [211] V.R Voller, C.R Swaminathan, B.G Thomas, Fixed grid techniques for phase change problems: a review. *Int. J Numer Methods Eng* 30 (1990) 875–898
- [212] V.D Fachinotti, A Cardona, A.E Huespe, A fast convergent and accurate temperature model for phase change heat conduction *Int. J. Heat Mass Transfer* 44 (1999) 1863–1884
- [213] K Morgan, R.W Lewis, O.C Zienkiewicz, An improved algorithm for heat conduction problems with phase change *Int. J. Numer Methods Eng* 12 (1978), 1191–1195.
- [214] B Nedjar, An enthalpy-based finite element method for nonlinear heat problems involving phase change, *Comput Struct* 80 (2002) 9–21
- [215] W.D Rolph, K.J Bathe, An efficient algorithm for analysis of nonlinear heat transfer with phase change *Int J Numer Methods Eng* 18 (1982)119–134
- [216] K.K Tamma, R.R Namburu, Recent advances trends and new perspectives via enthalpy-based finite element formulations for applications to solidification problems *Int J Numer Methods Eng* 30 (1990) 803–820

- [217] V.R Voller, C.R Swaminathan, B.G Thomas, Fixed grid techniques for phase change problems: a review. *Int J Numer Methods Eng* 30 (1990) 875–898
- [218] L.A Crivelli, S.R Idelsohn, A temperature-based finite element solution for phase-change problems *Int J Numer Methods Eng* 23 (1986) 99–119
- [219] E.L. Albasiny, The solution of non-linear heat-conduction problems on the Pilot Ace, *Proc. IEE, B: Radio Electron. Eng.* 103 (1) (1956) 158–162
- [220] R.E. White, An enthalpy formulation of the Stefan problem, *SIAM J Numer Anal* 19 (6) (1982) 1129–1157
- [221] X. Zeng, A. Faghri, Temperature-transforming model for binary solid–liquid phase-change problems Part II: Numerical simulation, *Numer. Heat Transfer, B: Fundam.* 25 (4) (1994) 481–500
- [222] G Beckett, J.A Mackenzie, M.L Robertson, A moving mesh finite element method for the solution of two-dimensional Stefan problems. *J. Comput Phys.* 168 (2001) 500–518
- [223] Beckett, G., Mackenzie, J.A., Ramage, A., Sloan, D.M., 2002. Computational solution of two-dimensional unsteady PDEs using moving mesh methods *J Comput Phys.* 182, 478–495
- [224] W Cao, W Huang, R.D Russell, An r-adaptive finite element method based upon moving mesh PDEs, *J. Comput Phys* 149 (1999) 221–244.
- [225] K Miller, R.N Miller, Moving finite elements. *SIAM J Numer Anal* 18, (1981) 1019–1057
- [226] J A Mackenzie, M L Robertson. The numerical solution of one-dimensional phase change problems using an adaptive moving mesh method *J Comput Phys* 161 (2000) 537–557
- [227] HT Hashemi, CM Sliepcevich, A numerical method for solving two dimensional problems of heat conduction with change of phase. *Chemical Engineering ProgSymposium* 63 (1967) 34–41
- [228] C. Bonacina, G. Comini, A. Fasano, M. Primicerio, Numerical solution of phase change problems, *Int. J. Heat Mass Transfer* 16 (10) (1973) 1825–1832
- [229] Y Fang, MA Medina. Proposed modifications for models of heat transfer problems involving partially melted phase change processes *Journal of ASTM International* 6 (2009)
- [230] C R Swaminathan, V R Voller, towards a general numerical scheme for solidification systems, *Int J Heat Mass Transfer* 40 (12) (1997) 2859–2868
- [231] MN Ozisik, MN Czisik, *Finite Difference Methods in Heat Transfer*, CRC Press. Patankar SV *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishers, (1980).
- [232] SV Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishers (1980).
- [233] AG Malan, RW Lewis, P Nithiarasu, An improved unsteady, unstructured, artificial compressibility, finite volume scheme for viscous incompressible flows, Part I - Theory and implementation, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 54, (2002) 695–714.
- [234] AJ Baker, *Finite Element Computational Fluid Mechanics*, Student Edition, McGraw-Hill Book Company, New York (1995)
- [235] Bathe KJ 1982 *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [236] TR Chandrakala and AD Belegundu, *Introduction to Finite Elements in Engineering*, Prentice Hall of India Pvt Ltd (1991).
- [237] Hughes TJR 2000 *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, Dover Publications, New York.
- [238] RW Lewis, K Morgan, HR Thomas and KN Seetharamu, *Finite Element Methods in Heat Transfer Analysis*, John Wiley & Sons (1996).
- [239] SS Rao, *The Finite Element Methods in Engineering*, Second Edition, Pergamon Press, New York, (1989).
- [240] JN Reddy, *An Introduction to Finite Element Method*, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, (1993).
- [241] LJ Segerlind, *Applied Finite Element Analysis*, Second Edition, John Wiley & Sons, (1984)

- [242] OC Zienkiewicz, RL Taylor, *The Finite Element Method, The Basis*, Butterworth and Heinemann, London, Vol. 1 (2000)
- [243] RW Clough, *The finite element analysis in plane stress analysis*, Proc. 2nd ASCE Conf. on Electronic Computation, Pittsburgh, PA, September (1960)
- [244] OC Zienkiewicz, K Cheung, *Finite elements in the solution of field problems*, Engineer, 200, (1965) 507–510
- [245] KK Gupta and JL Meek, *A brief history of the beginning of the finite element method*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 39, (1996) 3761–3774
- [246] JT Oden, *Finite elements: an introduction*, Handbook of Numerical Analysis, P.G. Ciarlet and J.L. Lions (eds), 2, (1996) 3–16, Elsevier, Amsterdam.
- [247] OC Zienkiewicz, *Origins, milestones and directions of the finite element method—a personal view*, Handbook of Numerical Analysis, P.G. Ciarlet and J.L. Lions (eds), 4, (1996) 7–67, Elsevier, Amsterdam.
- [248] JF Thompson, BK Soni and NP Weatherill, *Handbook of grid Generation*, CRC press (1999).
- [249] JP Holman, *Heat Transfer*, McGraw-Hill, Singapore (1989).
- [250] C Hirsch, *Numerical Computation of Internal and External Flows, Vol. 1, Fundamentals of Numerical Discretization*, Wiley & Sons, Chichester (1988).
- [251] B. M. Irons, *A Frontal Solution Program for Finite Element Analysis*, Int. J. Num Methods Eng, 2 (1970) 5-32
- [252] P Hood, *Frontal Solution Program for Unsymmetrical Matrices*, Int. J. Num Methods Eng, 10 (1976) 379-399
- [253] Y. Hasbani and M. Engelman, *Out-of-Core Solution of Linear Equations with Nonsymmetric Coefficient Matrix*, Computers and Fluids, 7 (1979) 13-31
- [254] R. L. Taylor, E. L. Wilson, S. J. Sackett, “*Direct Solution of Equations by Frontal and Variable Band, Active Column Methods*,” in *Proceedings of the U. S.-European Workshop on Nonlinear Finite Element Analysis in Structural Mechanics*, Bochum, W. Germany (1980)
- [255] E.M Alawadhi, "Phase change process with free convection in a circular enclosure: numerical simulations." *Computers & fluids* 33 (2004) 1335-1348
- [256] L. Karim, F. Barbeon, P. Gegout, A. Bontemps, L. Royon, *New phase-change material components for thermal management of the light weight envelope of buildings*. *Energy and Buildings*, 68 (2014) 703-706.
- [257] M.M Farid., A.M Khudhair., S.A.K Razack., S Al Hallaj, *A review on phase change energy storage: Materials and applications*, *EnergConver And Manag* 45 (2004) 1597-1615
- [258] A Trigui, M Karkri., Ch Boudaya., Y Candau., *Experimental investigation of a composite phase change material: thermal-energy storage and release*, *J. of compo. Mater*, (2012)
- [259] J.P Dumas., *Stockage du froid par chaleur latente*, *Technique de l'ingénieur*, (2002)
- [260] P Lamberg, R Lehtiniemi, A.M Henell, *Numerical and experimental investigation of melting and freezing process in phase change materials storage*, *Int. J. Thermal Sci*, 43(2004) 277-287
- [261] C. Hasse, M. Grenet, A. Bontemps, R. Dendievel, H. Sallee, *Realization, test and modeling of honey comb wallboards containing a phase change material*, *Energy Build.*, 43 (2011) 232-238
- [262] B. He, V. Martin, F. Setterwall, *Phase transition temperature ranges and storage density of paraffin wax phase change materials*, *Energy* 29 (2004) 1785-1804
- [263] Z.Q. Chen, M.W. Gu, D.H. Peng, *Heat transfer performance analysis of a solar flat-plate collector with an integrated metal foam porous structure filled with paraffin*, *Appl. Therm. Eng.* 30 (2010) 1967-1973
- [264] Rubitherm, *Buildings Materials / Chilled Ceilings / Heat Storage*, Available from www.rubitherm.de (2016)
- [265] *Station de météo Aéroport Gourara Timimoune wilaya (Adrar) Algérie*, Edition (2016)

- [266] J. Malek, B. Omrane, « La thermique du bâtiment - Du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation », Technique & ingénierie, Froid et génie climatique, Paris : DUNOD, (2016)
- [267] A Bastani, F Haghghat, J Kozinski, designing building envelope with PCM wallboards: design tool development, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 31 (2014) 554-562
- [268] K Xiangfei, L Shilei, L Yiran, H Jingyu, Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application, *Energy Build* 81(2014) 404-415
- [269] F M Potvin, L Gosselin, Thermal shielding of multilayer walls with phase change materials under different transient boundary conditions, *Int. J. Therm. Sci.* 48 (9) (2009) 1707-1717
- [270] D. Zhou, G.S.F. Shire, Y. Tian, Parametric analysis of influencing factors in phase change material wallboard (PCMW), *Appl. Energy* 119 (2014) 33-42
- [271] D. David, F. Kuznik, J.J. Roux, Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behavior of a phase change material wall, *Appl. Therm. Eng.* 31 (2011) 3117-3124
- [272] Liu Hongim, B Hazim. Awbi, Performance of phase change material boards under natural convection, *Build. Environ.* 44 (9) (2009) 1788-1793
- [273] De Garcia, D Damien, A Castell, F.L Cabeza, J Virgone, A correlation of the convective heat transfer coefficient between an air flow and a phase change material plate, *Appl Therm. Eng.* 51(2013)1245-1254
- [274] F. Kuznik, J. Virgone, J.J. Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experiment, *Energy Build.* 40 (2008) 148-156
- [275] RUBITHERM GmbH - Paraffin in thermal energy storage applications, <http://www.rubitherm.com>
- [276] S Torquato, *Random heterogeneous materials*. New York: Springer; (2002)
- [277] Y Xi, A Nakhi, Composite damage models for diffusivity of distressed materials, *J Mater Civil Eng*, 17 (2005) 286–95
- [278] JK Lee. Prediction of thermal conductivity of composites with spherical fillers by successive embedding *Arch, Appl Mech*, 77 (2007) 453–60
- [279] Standard: UNE-EN 12664 Thermal performance of building materials and products Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance (2002)
- [280] P Tittelein, S Gibout, E Franquet, K Johannes, L Zalewski, F Kuznik, et al. Simulation of the thermal and energy behaviour of a composite material containing encapsulated-PCM: Influence of the thermodynamic modeling, *Appl Energy* 140 (2015) 269-74
- [281] K Karunesh, A. Shukla, At Sharma, Heat transfer studies of building brick containing phase change materials; *Solar energy* 155 (2017)1233-1242
- [282] P.H Biwole, P Eclache, F Kuznik, Phase-change materials to improve solar panel's performance, *Energy Build.* 62 (2013) 59–67
- [283] K Mohammad, A Miguel, L.B Jose, de Aguiar, C.G Joao, Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behavior of buildings, *Energy* 94 (2016) 250-261
- [284] A Vaz Sa, M Azenha, de H Sousa, S Antonio. Thermal enhancement of plastering mortars with phase change materials: experimental and numerical approach. *Energy Build* 49 (2012) 16-27