

THESE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT

Présentée par : **BABAHARRA Oumayma**

En : Sciences physiques

Spécialité : Energétique - Thermique

Amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments par intégration des microcapsules de matériau à changement de phase (MCP) dans ses éléments structuraux

Soutenu publiquement le : **25/06/2022 à 10h00**

A l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Khouribga devant le Jury :

Pr. El Ayachi Rachid	P.E.S à la Faculté des Sciences et Techniques, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal	Président Rapporteur
Pr. Achoubir Khalid	P.E.S. à l'Ecole Supérieure de Technologie, Université Mohammed V, Salé	Rapporteur
Pr. Bakkas M'bark	P.E.S. à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Meknès, Université Moulay Ismail, Meknès	Rapporteur
Pr. Bahlaoui Ahmed	P.E.S. à la Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal	Examineur
Pr. Hayani Mounir Sanaa	P.H. à la Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Khouribga	Examineur
Pr. Khallaki Kaoutar	P.H. à l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Université Sultan Moulay Slimane, Khouribga	Co-encadrant
Pr. Choukairy Khadija	P.E.S. à l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Université Sultan Moulay Slimane, Khouribga	Directeur de Thèse

Dédicaces

À mon très cher père

À ma très chère mère

À mon cher mari

À mes chers sœur et frères

À toute ma famille et mes amis

Listes des Publications et des Communications

Publications

- Babaharra, O., Choukairy, K., Faraji, H., Hamdaoui, S., Khallaki, K. A survey of a PCM-based heated floor for building load management in presence of single and hybrid nanoparticles. (Soumis)
- O. Babaharra, K. Choukairy, S. Hamdaoui, K. Khallaki, and S. Hayani Mounir, “Thermal behavior evaluation of a radiant floor heating system incorporates a microencapsulated phase change material,” *Construction and Building Materials*, vol. 330, p. 127293, May 2022, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127293](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127293). Thomson Reuters (IF 2020=6.14-Q1)
- Babaharra, O., Choukairy, K., Khallaki, K. & Hayani Mounir, S. Numerical study of phase change material microencapsulated in a typical multilayer wall for a hot climatic zone. *Heat Transf.* **51**, 1193–1212 (2022). DOI: [10.1002/htj.22348](https://doi.org/10.1002/htj.22348) Scopus (CiteScore 2020=2.4-Q2)
- Babaharra, O., Choukairy, K., Khallaki, K. & Mounir, S. H. Numerical study of the types of glazing on annual consumption loads and comparison with thermal regulations. *AIP Conf. Proc.* **2345**, 020007 (2021). DOI: [10.1063/5.0049432](https://doi.org/10.1063/5.0049432) Scopus (CiteScore 2019=0.7)
- Babaharra, O., Choukairy, K., Khallaki, K. & Mounir, S. H. Numerical study of the effect of different construction materials on heating and cooling loads for two climatic zones in Morocco. *AIP Conf. Proc.* **2056**, 020019 (2018). DOI: [10.1063/1.5084992](https://doi.org/10.1063/1.5084992) Scopus (CiteScore 2018=0.6)

Communications

- O. Babaharra, K. Choukairy, K. Khallaki, and S. Hayani Mounir “ Effect of the variation of PCM type on the thermal performance of a multilayer wall in a hot climate”. The 3rd Edition of the international conference on Industrial Systems and Processes SPIn2022
- O. Babaharra, K. Choukairy, H. Faraji “ Microencapsulation of Phase Change Materials in a building roof”. The 7th edition of the International Congress on Thermal Sciences (AMT’2022)

- O. Babaharra, K. Choukairy, K. Khallaki, and S. Hayani Mounir “Impact of thermal bridges on the annual consumption charges for two climatic zones” International Conference on Mathematics & Data Science 2 (ICMDS-2021)
- O. Babaharra, K. Choukairy, K. Khallaki, and S. Hayani Mounir “Numerical Study of the Types of glazing on Annual Consumption Loads and Comparison with Thermal Regulation”. The 6th edition of the International Congress on Thermal Sciences (AMT’2020)
- Communication orale à l’ENSA de Tanger dans la 1ère édition des Journées Doctorales en Sciences et Technologies (JDST’18).
- Communication orale à la journée doctorale de recherche scientifique organisée par le laboratoire IPOSI à l’ENSA de Khouribga
- Communication orale au doctoriales 2020 à l’ENSA de Khouribga

Remerciements

Les travaux de recherche réalisés au cours de cette thèse ont été effectués à l'école nationale des sciences appliquées de Khouribga au laboratoire d'ingénierie des procédés, informatique et Mathématiques (LIPIM). Il m'est donc évident d'exprimer mes sincères remerciements aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à la bonne conduite de ces travaux de thèse.

Je tiens tout d'abord à adresser mes plus sincères remerciements et considérations envers ma directrice de thèse **Pr. Choukairy khadija, P.E.S.** à l'école nationale des sciences appliquées Khouribga, pour sa confiance, sa qualité d'encadrement, ses qualités scientifiques et pédagogiques ainsi que ses conseils scientifiques avisés qui m'ont permis de mener à termes ces travaux de recherche dans les conditions les plus favorables.

Je suis aussi reconnaissante envers mon co-encadrante de thèse **Pr. Khallaki Kaoutar, P.H.** à l'école national des sciences appliqués Khouribga et je tiens à exprimer mes remerciements pour ses précieux conseils pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques.

Je tiens aussi à remercier vivement **Pr. Hayani mounir Sanaa, P.H.** à la faculté polydisciplinaire de Khouribga pour ses aides en encadrement et ses précieux conseils scientifiques apportés durant toute la période de préparation de cette thèse.

J'adresse mes remerciements aux **professeurs : Pr. El Ayachi Rachid P.E.S** à la Faculté des Sciences et Techniques, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal ; **Pr. Achoubir Khalid P.E.S.** à l'Ecole Supérieure de Technologie, Université Mohammed V, Salé et **Pr. Bakkas M'bark P.E.S.** à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Meknès, Université Moulay Ismail, Meknès d'avoir accepté de rapporter et d'évaluer ce travail.

Je tiens également à remercier **Pr. Bahlaoui Ahmed P.E.S.** à la Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal et **Pr. Hayani Mounir Sanaa P.H.** à la Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Khouribga d'avoir accepté de juger et d'examiner ce travail.

En fin, je voudrais remercier les membres de ma famille et mes amis pour leur soutien et encouragement.

Résumé

Notre travail de recherche consiste à l'amélioration de la performance thermique du bâtiment par intégration des MCP sous forme de microcapsules dans les éléments structuraux, précisément dans les murs multicouches extérieurs et le plancher.

Le premier axe de notre recherche consiste à évaluer les performances thermiques de l'incorporation des microcapsules du MCP dans un mur multicouche typique pour une zone climatique chaude au Maroc. L'intégration des microcapsules est effectuée pour trois emplacements dans le mur multicouche : dans la couche externe du mortier, dans la couche interne du mortier et au milieu dans la matrice solide de la brique creuse.

Par conséquent, une simulation numérique est développée en régime transitoire bidimensionnel en utilisant l'approche enthalpique et en appliquant la méthode des volumes finis pour la résolution numérique. L'effet de la position, du type et de la fraction massique incorporées du MCP sont étudiés et comparés au cas du mur multicouche de référence (sans MCP). Cette comparaison est basée sur les deux facteurs déterminants de l'inertie thermique du panneau mural à savoir le déphasage thermique et l'atténuation en amplitude. Les flux de chaleur surfaciques sont également calculés pour quantifier la capacité du mur multicouche à stocker l'énergie.

Le second axe de notre recherche consiste à évaluer numériquement l'intégration des microcapsules du MCP dans la composition d'un plancher chauffant. Cela vise principalement à bénéficier de la capacité du stockage thermique des MCP afin de réduire la consommation énergétique du système de chauffage et de stabiliser la température intérieure autour de la température de confort. Le modèle physique est basé sur un calcul bidimensionnel en considérant l'approche enthalpique et en appliquant la méthode numérique des volumes finis. L'effet de différents paramètres tels que la position et la fraction massique des microcapsules du MCP, la distance entre les tubes, la température de chauffage et le type de matériau à changement de phase sur la performance thermique du plancher chauffant sont évalués et discutés. Par la suite, en raison de l'inconvénient majeur des MCP qui est leur faible conductivité thermique, nous avons amélioré les microcapsules du MCP avec des matériaux conducteurs appelés NePCM.

Finalement, nous avons effectué une simulation numérique pour un plancher chauffant rafraichissant en utilisant la meilleure configuration retenue pour le plancher chauffant durant la période hivernale et en circulant de l'eau froide dans les tubes afin d'avoir un confort thermique pour la période hivernale et estivale.

Nos résultats constituent une contribution scientifique par la mise en place d'une technique de stockage par chaleur latente en intégrant des microcapsules de matériaux à changement de phase dans les éléments de l'enveloppe du bâtiment, nous avons apporté des recommandations permettant de concevoir des enveloppes énergétiquement efficaces avec une solution passive.

Mots clés : MCP, Stockage d'énergie, Bâtiment, Transfert thermique, Micro-encapsulation, Mur multicouche, Plancher chauffant.

Abstract

The present research consists of improving the building thermal performance by integrating the PCM microcapsules in the structural elements, specifically in the exterior multilayer walls and the heated floor.

Firstly, this research begins by an evaluation of thermal performance relative to the PCM microcapsules incorporation in a typical multilayer wall for a hot climatic zone in Morocco. The integration of microcapsules is carried out for three locations in the multilayer wall: in the outer mortar layer, in the inner mortar layer and in the solid matrix of the hollow brick.

Therefore, a numerical simulation is developed in two-dimensional transient state using the enthalpy approach and applying the finite volume method for the numerical resolution.

The effect of PCM position, PCM type and the mass fraction incorporated are studied and compared to the reference case (multilayer wall without MCP). This comparison is based on the two determining factors of thermal inertia, namely the phase shift and the amplitude attenuation. Surface heat fluxes are also calculated to quantify the ability of the multilayer wall to store energy.

Secondly, a numerical evaluation of PCM integration in a heated floor is carried out. This mainly aims is to benefit from the thermal storage capacity of PCM in order to reduce the energy consumption of the heating system and to stabilize the indoor temperature around the comfort range. The physical model is based on a two-dimensional calculation considering the enthalpy approach and applying the numerical method of finite volumes.

The effect of different parameters such as the PCM position and the PCM mass fraction, the distance between the tubes, the heating temperature and the PCM type on a heated floor thermal performance are evaluated and discussed. Subsequently, due to the major drawback of PCM which is their low thermal conductivity, we will improve the PCM microcapsules with conductive materials called NePCM.

Finally, we carried out a numerical simulation for a cooling floor by using the best configuration retained for the heating floor during the winter period and by circulating cold water in the tubes in order to have thermal comfort for the winter and summer period.

Our results constitute a scientific contribution by the implementation of a storage technique which integrates PCM microcapsules in the building envelopes elements, we brought recommendations allowing to design energy efficient envelopes with a passive solution.

Keywords: PCM, Energy storage, Building, Heat transfer, Microencapsulation, Multilayer wall, heated floor.

Tables des matières

Résumé.....	v
Abstract.....	vi
Tables des matières	vii
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xvi
NOMENCLATURE.....	xvii
Introduction générale.....	1
I Chapitre I : Revue Bibliographique	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Stockage d'énergie thermique.....	5
I.2.1 Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible.....	5
I.2.2 Stockage d'énergie thermique par chaleur latente	6
I.3 Type de matériaux à changement de phase.....	7
I.3.1 Les composés organiques.....	7
I.3.2 Les composés inorganiques.....	8
I.3.3 Les composés eutectiques.	9
I.4 Classification des matériaux à changement de phase investigués dans la littérature pour les applications de construction.	9
I.5 Critères de choix d'un matériau à changement de phase	11
I.6 Méthodes d'encapsulation des matériaux à changement de phase	11
I.7 Etudes antérieures sur l'intégration du MCP dans l'enveloppe du bâtiment	12
I.8 Etat de l'art sur l'intégration des matériaux à changement de phase dans les planchers chauffants.....	20
I.9 Bilan et conclusions	31
II Chapitre II : Formulation Mathématique Et Numérique.....	33
II.1 Introduction.....	34
II.2 Intégration des MCP dans un mur multicouche.....	34
II.2.1 Description du système étudié.....	34
II.2.2 Hypothèses simplificatrices.....	35

II.2.3	Résolution numérique pour la micro-encapsulation du MCP dans le mur multicouche.....	36
II.2.4	Conditions aux limites.....	37
II.2.5	Condition initiale.....	37
II.2.6	Discretisation par volumes finis	38
II.2.7	Mise à jour de la fraction liquide	40
II.2.8	Optimisation du maillage et du pas de temps.....	41
II.2.9	Validation avec les résultats de la littérature.....	44
II.3	Intégration des matériaux à changement de phase dans le plancher chauffant.....	49
II.3.1	Description du système étudié.....	50
II.3.2	Hypothèses simplificatrices.....	51
II.3.3	Formulation mathématique	52
II.3.4	Résolution par la méthode de volumes finis	54
II.3.5	Optimisation du maillage et du pas de temps.....	55
II.3.6	Validation avec les résultats expérimentales de la littérature	58
II.4	Conclusion	59
III Chapitre III : Intégration des Microcapsules du MCP dans un Mur Multicouche..		61
III.1	Introduction.....	62
III.2	Intégration des microcapsules du MCP dans une couche de mortier.	63
III.3	Description des configurations des murs multicouche étudiées	65
III.3.1	Incorporation du matériau à changement de phase dans la couche externe du mortier.....	67
III.3.2	Incorporation du matériau à changement de phase dans la couche interne du mortier (Mur M2).....	74
III.3.3	Incorporation du matériau à changement de phase dans la matrice solide de la brique creuse Mur M3.....	81
III.4	Comparaison entre les différents types des murs multicouches étudiés	87
III.5	Effet du changement du type de MCP sur la réponse thermique du mur multicouche.....	90
III.6	Effet de l'incorporation des microcapsules du MCP pour la période hivernale	93

III.7	Conclusion	95
IV 	CHAPITRE IV : Amélioration des Performances Thermiques du Plancher Chauffant	97
IV.1	Introduction.....	98
IV.2	Effet de l'intégration des microcapsules du MCP sur les performances thermiques du plancher.....	99
IV.3	Effet de la position des microcapsules du MCP sur les performances thermiques du plancher.....	101
IV.4	Effet de la variation de la quantité de microcapsules sur les performances thermiques du plancher.....	107
IV.5	Effet de l'inter-distance entre les tubes de chauffage sur les performances thermiques du plancher.....	112
IV.6	Effet de la température de chauffage des tubes chauffants sur la performance thermique du plancher.....	117
IV.7	Effet du changement du type du MCP sur les performances thermiques du plancher chauffant.....	122
IV.8	Amélioration des planchers chauffant par l'ajout de nanoparticules conducteurs aux microcapsules du MCP.....	126
IV.8.1	Effet de l'ajout des nanoparticules conducteurs simple.	127
IV.8.2	Effet de l'ajout des nano particules conducteurs hybride.....	131
IV.9	Evaluation des performances thermiques du plancher pendant la période estivale.....	135
IV.10	Plancher chauffant rafraichissant	138
IV.11	Conclusion	140
	Conclusion générale et perspectives.....	143
	Références.....	147

Liste des figures

Figure I-1 : Courbe de fusion lors du phénomène de changement de phase solide-liquide.....	7
Figure I-2 : Cellule avec différents emplacements du MCP (a) emplacement extérieur, (b) emplacement au milieu (c) emplacement à l'intérieur.....	13
Figure I-3 : schéma du mur étudié avec différents emplacements du MCP.....	14
Figure I-4 : Schéma du double panneau MCP	15
Figure I-5 : Brique de construction contenant des matériaux à changement de phase dans ses cavités cylindrique.....	18
Figure I-6 : remplissage des cavités de briques creuses dans différents emplacements	19
Figure I-7 : Configuration des planchers chauffant étudiés (MCPA et MCPB).....	23
Figure I-8 : Système de chauffage par le sol avec matériau à changement de phase.....	26
Figure I-9 : Structure du plancher chauffant avec MCP.	26
Figure I-10 : Vue schématique du capteur solaire avec NEPCM.....	28
Figure I-11 : Description de la cavité étudiée avec NePCM.....	29
Figure I-12 : Composition du mur multicouche étudié avec ajout du NePCM.....	29
Figure II-1. Configurations des différents types de mur multicouche (M1, M2, M3)	35
Figure II-2. Volume de contrôle typique pour un cas bidimensionnel.....	38
Figure II-3 : Effet du maillage sur la température interne pour le mur multicouche.	42
Figure II-4 : Effet du maillage sur la variation de la fraction liquide des MCP incorporés dans le mur multicouche.....	43
Figure II-5 : Effet du pas de temps sur la température interne pour le mur multicouche.	43
Figure II-6 : Effet du pas de temps sur la variation de la fraction liquide des MCP incorporés dans le mur multicouche.	44
Figure II-7 : photographie de la brique creuse traditionnelle et de la brique contenant le MCP dans ses cavités[6].....	45
Figure II-8: Illustration schématique du problème de Stefan : position du front de fusion	46
Figure II-9 : Comparaison de la solution numérique avec la solution analytique pour le MCP n-octadécane	48
Figure II-10 : Comparaison avec le résultat expérimental pour la brique à changement de phase.....	49

Figure II-11 : Configuration du plancher chauffant avec microcapsules de matériau à changement de phase.....	50
Figure II-12 : Symétrie du problème au niveau de la couche contenant les tubes chauffants et les MCPs.	52
Figure II-13 : Température de l'eau imposée sur les surfaces des tubes chauffants.....	53
Figure II-14 : Effet du maillage sur la variation de la fraction liquide des MCP incorporés dans le plancher chauffant.	56
Figure II-15 : Effet du maillage sur la température interne pour le plancher chauffant.....	57
Figure II-16 : Effet du pas de temps sur la température interne pour le plancher chauffant....	57
Figure II-17 : Effet du pas de temps sur la variation de la fraction liquide des MCP incorporés dans le plancher chauffant.....	58
Figure II-18 : Validation de la solution numérique et expérimentale du plancher chauffant. .	59
Figure III-1. Composition de la couche du mortier avec microcapsules du MCP.....	63
Figure III-2 : Variation de la température surfacique interne et externe de la couche du mortier	64
Figure III-3 .Variation de la fraction liquide pour une incorporation de 15% du MCP dans le mortier.	65
Figure III-4 : Configuration du mur multicouche de référence.....	66
Figure III-5 : Configuration du mur multicouche avec incorporation du MCP dans la couche externe de mortier (mur M1).	67
Figure III-6 : Variation temporelle de la température surfacique à travers le mur multicouche M1.	68
Figure III-7 : Variation de la fraction liquide pour une incorporation de 15% du MCP-Mur M1	70
Figure III-8 : Température surfacique interne pour le mur multicouche M1 avec et sans MCP.	71
Figure III-9 : Variation de la fraction liquide pour le mur multicouche M1 avec MCP.....	72
Figure III-10 : Energie stockée pendant 24h par le mur multicouche M1 pour différents pourcentages du MCP.	74
Figure III-11 : Configuration du mur multicouche avec incorporation du MCP dans la couche interne de mortier (mur M2).....	75
Figure III-12 : Variation de la température surfacique à travers le mur M2	76
Figure III-13 : Variation de la fraction liquide pour une incorporation de 15% du MCP-M2.	77

Figure III-14 : Température surfacique interne pour le mur multicouche M2 avec et sans MCP.	78
Figure III-15 : Variation de la fraction liquide pour le mur multicouche M1 avec MCP.....	79
Figure III-16 : Energie stockée et restituée par le mur multicouche M2 pour différents pourcentages de MCP.....	80
Figure III-17 : Configuration du mur multicouche avec incorporation du MCP dans la matrice solide de la Zbrique creuse (mur M3).	82
Figure III-18 : Variation de la température surfacique à travers le mur M3	82
Figure III-19: Variation de la fraction liquide pour une incorporation de 15% du MCP-M3..	84
Figure III-20 : Température surfacique interne pour le mur multicouche M3 avec et sans MCP.	85
Figure III-21: Variation temporelle de la fraction liquide pour le mur multicouche M3.....	86
Figure III-22: Energie stockée par le mur multicouche M3 pour différents pourcentages de MCP pendant 24h.	87
Figure III-23 : Variation de la température surfacique interne pour les différents types de mur multicouche	88
Figure III-24: Variation de la fraction liquide pour les différents types de mur multicouche .	89
Figure III-25: Variation de la température surfacique interne pour les différents types du MCP.	90
Figure III-26: Variation de la fraction liquide pour les différents types du MCP.....	92
Figure III-27 : Variation temporelle de la température interne du mur multicouche avec et sans MCP pour la période hivernale de la ville de Khouribga.....	94
Figure III-28 : Variation temporelle de la température interne du mur multicouche avec et sans MCP pour la période hivernale de la ville de Khouribga.....	95
Figure IV-1: Configuration du plancher chauffant avec microcapsules du matériau à changement de phase.....	99
Figure IV-2 : Variation temporelle de la température surfacique pour le plancher chauffant avec et sans MCP.....	100
Figure IV-3. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différentes positions du MCP.....	101
Figure IV-4 . Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pendant la décharge pour différentes positions du MCP.	102
Figure IV-5 . Variation temporelle de la fraction liquide pendant la période de charge pour différentes positions du MCP.....	103

Figure IV-6 .Variation temporelle de la fraction liquide pendant la période de décharge pour différentes positions du MCP.....	104
Figure IV-7 . Temps de fusion et de solidification du plancher chauffant avec MCP en fonction de la position des microcapsules.	105
Figure IV-8. Variation temporelle du flux surfacique du plancher chauffant pour différentes positions du MCP.....	106
Figure IV-9. Variation temporelle de la température surfacique de plancher chauffant pour différents pourcentages de microcapsules du MCP.	107
Figure IV-10. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différents pourcentages de microcapsules du MCP pendant la période de décharge.....	108
Figure IV-11. Variation temporelle de la fraction liquide pour différents pourcentages de microcapsules du MCP pendant la charge.	110
Figure IV-12. Variation temporelle de la fraction liquide pour différents pourcentages de microcapsules du MCP pendant la décharge.....	110
Figure IV-13 . Temps de fusion et de solidification du plancher chauffant avec MCP en fonction de la quantité des microcapsules.	111
Figure IV-14. Variation temporelle du flux thermique surfacique de plancher chauffant pour différents pourcentages de microcapsules du MCP.	112
Figure IV-15. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différentes inter-distances entre les tubes de chauffage.	113
Figure IV-16. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant durant la décharge pour différentes inter-distances entre les tubes de chauffage.	114
Figure IV-17. Variation temporelle de la fraction liquide pour différentes inter-distances entre les tubes chauffant pendant la charge.....	114
Figure IV-18. Variation temporelle du flux surfacique du plancher chauffant pour différentes inter-distance entre les tubes de chauffage.....	115
Figure IV-19. Variation temporelle de la fraction liquide pour différentes inter-distances entre les tubes chauffant pendant la décharge.....	116
Figure IV-20. Temps de fusion et de solidification du plancher chauffant avec MCP en fonction de l'inter-distance entre les tubes de chauffage.	117
Figure IV-21. Variation temporelle de la température surfacique de plancher chauffant pour différentes températures de chauffage.....	118
Figure IV-22 . Variation temporelle de la température surfacique de plancher chauffant pendant la période de décharge pour différentes températures de chauffage.	118

Figure IV-23. Variation temporelle du flux thermique surfacique de plancher chauffant pour différentes températures de chauffage.....	119
Figure IV-24. Variation temporelle de la fraction liquide pour différentes températures de chauffage des tubes pendant la charge.	120
Figure IV-25. Variation temporelle de la fraction liquide pour différentes températures de chauffage des tubes pendant la décharge.	121
Figure IV-26. Temps de fusion et de solidification du plancher chauffant avec MCP en fonction de la température de chauffage.....	122
Figure IV-27 : Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différent types du MCP	124
Figure IV-28 : Variation temporelle de la fraction liquide pour différent types du MCP	125
Figure IV-29 : Valeurs des facteurs de forme pour les différentes formes des nanoparticules[5]	127
Figure IV-30. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différent types de NePCM simple.	128
Figure IV-31. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différent types de NePCM simple pendant la période de décharge.	129
Figure IV-32. Variation temporelle de la fraction liquide pour différent types de NePCM simple pendant la période de charge.	130
Figure IV-33. Variation temporelle de la fraction liquide pour différent types de NePCM simple pendant la période de décharge.	131
Figure IV-34. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différent types de NePCM hybride.....	132
Figure IV-35. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différent types de NePCM hybride pendant la période de décharge.....	133
Figure IV-36.Effusivité thermique effective pour différent type de NePCM en $[J.K^{-1}m^{-2}s^{-1/2}]$	134
Figure IV-37. Variation temporelle de la fraction liquide pour différent types de NePCM hybride pendant la période de charge.....	134
Figure IV-38. Variation temporelle de la fraction liquide pour différent types de NePCM hybride pendant la période de décharge.	135
Figure IV-39 : Variation de la température surfacique interne pour le plancher avec et sans MCP.	136
Figure IV-40 : Variation de la fraction liquide du plancher avec microcapsules du MCP. ...	137

Figure IV-41 : Variation de la température surfacique interne pour le plancher avec et sans rafraichissement.	138
Figure IV-42 : Variation de la fraction liquide des microcapsules du MCP pour le plancher avec et sans rafraichissement.....	139

Liste des tableaux

Tableau I-1 : MCP investigué dans la littérature pour l'application au bâtiment.....	10
Tableau I-2 : Critères de choix d'un MCP.	11
Tableau II-1 : Coefficients ai et le terme source b pour le MCP.	39
Tableau II-2 : Coefficients ai et le terme source b pour la brique et la lame d'air.....	40
Tableau II-3 : Effet du maillage sur la température interne pour la brique à changement de phase.....	42
Tableau II-4 : Effet du pas de temps sur la température interne pour la brique à changement de phase.....	42
Tableau II-5 : Propriétés thermophysiques des matériaux de construction de la dalle	51
Tableau II-6 : Propriétés thermophysiques du MCP	51
Tableau II-7 : Coefficients ai et le terme source b pour les couches sans microcapsules des MCP.	54
Tableau II-8 : Coefficients ai et le terme source b pour les couches avec microcapsules des MCP.	54
Tableau II-9 : Effet du maillage sur la température interne pour la brique à changement de phase.....	56
Tableau II-10 : Effet du pas de temps sur la température interne pour la brique à changement de phase.	56
Tableau III-1 . Propriétés thermophysiques des matériaux de construction	66
Tableau III-2 . Propriétés thermophysiques du MCP paraffine n-octadécane	66
Tableau III-3 . Atténuation de l'amplitude thermique pour différentes interfaces du mur multicouche	69
Tableau III-4 . Atténuation de l'amplitude thermique pour différentes interfaces du mur multicouche	77
Tableau III-5 . Atténuation de l'amplitude thermique pour différentes interfaces du mur multicouche M3.....	83
Tableau III-6 . Propriétés thermo physiques des différents types de MCP.....	91
Tableau IV-1 : Propriétés thermo physique de différents types du MCP.	123

NOMENCLATURE

H : Enthalpie volumique totale (J/m^3)

T : Température (K)

dt : Pas de temps (s)

dx, dy : interdistance dans les directions x et y (m)

cp : Chaleur spécifique ($J/kg K$)

h(T) : Enthalpie sensible (J)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection et rayonnement ($W / (m^2k)$)

f : Fraction liquide

L : Chaleur latente de fusion (J/kg)

St : le numéro de Stéphan

x, y : Coordonnée cartésienne (m)

INDICES

Ext : Environnement extérieur

Int : Environnement interne

P : Nœud principal

E : Nœud Est

W : Nœud Ouest

S : Nœud Sud

N : Nœud Nord

i: Indice de la direction x

j : Indice de la direction y

si : Surface interne

se : Surface externe

bf : fluide de base

eff : effective

l : fluide

s : solide

hnf : nano fluide hybride

SYMBOLES GRECS

ε : Fraction massique (%)

ρ : Densité (Kg/m³)

τ : Période (h)

α : Diffusivité thermique (m²/s)

k : Conductivité thermique (W/(m.K))

φ : Flux de chaleur (W/m²)

λ : Solution de l'équation transcendante de la fraction liquide.

μ : viscosité dynamique (kg/ms)

φ_p : fraction de nanoparticules

ω : facteur de relaxation

Introduction générale

Le secteur du bâtiment est un secteur consommateur d'énergie. Il a été identifié comme l'un des principaux contributeurs au niveau du stockage thermique, et il représente 36% de l'énergie finale dans le monde. Dans ce sens, plusieurs chercheurs ont proposé des solutions constructives qui assurent un confort thermique intérieur avec une moindre consommation d'énergie.

L'une des techniques passives les plus largement acceptées dans la littérature pour l'amélioration de la performance thermique des bâtiments est l'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) dans ses éléments. Nous soulignons que le stockage thermique joue un rôle important dans diverses applications industrielles, tertiaires et résidentielles et les MCP absorbent de l'énergie lorsque le changement de phase se produit pendant le processus de chauffage, et peuvent ensuite libérer cette énergie pendant le refroidissement, ce processus est appelé stockage d'énergie thermique latente.

Dans le cadre du stockage d'énergie thermique dans le bâtiment, l'énergie peut être principalement stockée sous deux formes : sous forme de chaleur sensible ou bien de chaleur latente. Par ailleurs, les matériaux de construction conventionnels utilisent la chaleur sensible pour stocker l'énergie en utilisant leur masse thermique. Pourtant, le stockage thermique en utilisant les matériaux à changement de phase (MCP) se fait par chaleur latente. Ces derniers peuvent être encapsulés sous différentes formes. Dans la présente recherche, les MCP seront intégrées dans le mur extérieur du bâtiment et le plancher chauffant sous forme de microcapsules. Ces derniers sont compatibles avec une large gamme de matériaux de construction, ainsi que les microcapsules présentent l'avantage de la réduction en épaisseur de l'élément dans lequel est intégré le MCP et permettent une augmentation de la zone de transfert de chaleur entre le MCP et le matériau environnant.

Cependant, la présentation de ce mémoire est divisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre consiste à présenter les définitions des différents concepts ayant un rapport avec le stockage énergétique dans le bâtiment avec utilisation des MCP. En commençant par la définition du stockage d'énergie thermique dans le bâtiment avec ses différentes formes. Ensuite, les différents types des MCP avec leurs classifications et les critères de choix relatifs ainsi que les différentes méthodes d'encapsulation de ces derniers

dans les éléments structuraux de bâtiment sont présentés. En deuxième partie de ce chapitre, une revue bibliographique abordera essentiellement deux thématiques principales, la première étant l'intégration des MCP sous forme de microcapsules et de macrocapsules dans les éléments de bâtiment. La deuxième thématique traitera l'intégration des MCP dans les planchers chauffants, abordera également la problématique de la faible conductivité thermique des MCP. Ce qui nous a amené à citer les travaux concernant l'addition de matériaux conducteurs aux microcapsules des MCP appelés NePCM afin d'améliorer le transfert thermique. Finalement, une synthèse sera présentée à la fin de ce chapitre de manière à positionner les principales conclusions et à décrire clairement la position de la problématique de la présente recherche.

Le deuxième chapitre présentera les configurations considérées, les équations qui régissent l'effet de l'ajout des matériaux à changement de phase dans les éléments structuraux du bâtiment. Les modèles numériques avec la méthode de discrétisation, l'étude de sensibilité de maillage et la validation des modèles numériques menés par comparaison avec les résultats des travaux expérimentale de la littérature. Cette comparaison est faite aussi bien dans le cas de l'insertion des microcapsules du MCP dans le mur multicouche et dans le plancher chauffant.

Le troisième chapitre consiste à l'intégration des microcapsules du MCP dans différents emplacements d'un mur multicouche pour la journée la plus extrême de la ville de Khouribga en période estivale, et ce en élaborant une simulation numérique en régime transitoire bidimensionnelle (2D) et en utilisant l'approche enthalpique. L'effet de cette intégration sur la réponse thermique est élaboré pour trois types de mur multicouche : pour un emplacement des microcapsules dans la couche externe du mortier, un emplacement des microcapsules dans la couche interne du mortier, et un emplacement des microcapsules dans la matrice solide de la brique creuse.

Plusieurs effets seront traités pour chaque types de mur multicouche. En commençant par une analyse de la variation de la température surfacique à travers les trois types de mur avec une incorporation de 15% du MCP. Suivi d'une étude paramétrique de l'effet de la variation de la fraction massique du MCP sur la variation de la température surfacique interne et le volume de la fraction liquide du MCP, en comparant le mur incorporant le matériau à changement de phase à différents pourcentages avec le mur de référence (sans MCP). Ensuite, une étude sélective sera élaborée afin d'évaluer l'effet du changement du type de MCP sur la

performance thermique des trois types de mur. Par conséquent, une comparaison entre les différents cas étudié et la description des avantages thermiques apportées sera présentée. Et finalement, en utilisant la meilleure configuration retenue pendant la période estivale, une évaluation de la performance thermique du mur multicouche sera effectuée pour la période hivernale afin d'avoir une analyse générale pour différentes périodes de l'année.

Le quatrième chapitre consiste à combiner l'intégration des tubes de chauffage dans les planchers de bâtiment et l'insertion des microcapsules du MCP afin de bénéficier du rôle de stockage d'énergie par chaleur latente lors de la période de décharge. Nous allons commencer par une intégration d'une quantité minimale des microcapsules du MCP afin d'évaluer l'effet de l'ajout des microcapsules au plancher chauffant, par la suite on abordera une étude paramétrique de l'effet de la position et de la quantité des microcapsules sur les performances thermiques du plancher, suivi d'une étude paramétrique de l'inter-distance entre les tubes de chauffage et la température de mise en chauffage convenable. Ensuite, une étude sélective du MCP convenable à notre configuration de plancher sera abordée. Par conséquent, à cause de l'inconvénient de la faible conductivité thermique des MCP. Nous allons procéder à l'amélioration des microcapsules du MCP ajoutés dans le plancher chauffant par des nanoparticules conducteurs afin d'évaluer les performances thermiques qui peuvent être apportés par le changement des propriétés thermo physiques des MCP. Par ailleurs, en utilisant la meilleure configuration retenue pour le chauffage en période hivernale, une étude numérique sera abordée pendant la période estivale pour s'assurer que cette intégration n'apporte aucun inconvénient pour d'autre période de l'année. Finalement, une étude numérique sera abordée en imposant une température froide pour l'eau circulant dans les tubes afin d'avoir un rafraîchissement de l'ambiance interne pendant la période estivale.

Nous concluons ce mémoire de recherche par une conclusion générale dressant un bilan des résultats obtenus, ainsi que quelques perspectives pour une éventuelle poursuite de ce travail de recherche.

I | Chapitre I : Revue Bibliographique

CHAPITRE I

I.1 | Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les définitions des différents concepts ayant un rapport avec le stockage énergétique dans le bâtiment en utilisant les matériaux à changement de phase (MCP). Une première partie concerne le stockage d'énergie thermique dans le bâtiment avec ses différentes formes, ensuite on va présenter les différents types des MCP avec leurs classifications et les critères de choix relatifs, en plus des méthodes d'encapsulation de ces derniers dans les éléments structuraux du bâtiment. La troisième partie consiste à réaliser un état de l'art sur les travaux scientifiques antérieurs qui décrivent l'intégration des MCP sous forme de microcapsules et de macrocapsules dans les éléments de bâtiment, ensuite une analyse des travaux concernant l'intégration des MCP dans les planchers chauffants sera étudiée. Finalement, la problématique de la faible conductivité thermique des MCP nous amène à citer les travaux concernant l'addition de matériaux conducteurs aux microcapsules des MCP appelés NePCM afin d'améliorer le transfert thermique. La dernière partie englobe les principales conclusions et décrit clairement la position de la problématique de la présente recherche.

I.2 | Stockage d'énergie thermique

Le stockage thermique a un rôle important dans les différentes applications industrielles, tertiaires et résidentielles[1]. Il peut être réalisé en refroidissant, chauffant, fondant, solidifiant ou vaporisant un matériau, l'énergie devenant disponible sous forme de chaleur lorsque le processus est inversé. Les méthodes de stockage d'énergie thermique sont classées comme stockage d'énergie thermique à chaleur sensible ou stockage d'énergie thermique à chaleur latente [2].

I.2.1 | Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible

Le stockage sensible de la chaleur consiste à stocker l'énergie thermique en augmentant la température d'un solide ou d'un liquide. Il s'agit de la plus simple technologie de stockage de chaleur dans laquelle le matériau ne subit pas le changement de phase au-delà de la limite de la température spécifiée. Le changement de température se produit très lentement et par conséquent, ces matériaux stockent l'énergie thermique pendant une durée plus longue. Quantitativement, il peut être évalué en utilisant la relation suivante[3] :

CHAPITRE I

$$Q = mC_p(T_f - T_i) \quad (I-1)$$

Où

Q : quantité de chaleur stockée (J)

T_i : température initiale (K)

T_f : température finale (K)

m : masse du milieu de stockage de chaleur (kg)

C_p : chaleur spécifique (J/kg K)

Le matériau de stockage utilise la convection, la conduction et le rayonnement pour absorber et libérer l'énergie thermique. Dans les bâtiments, la technique de stockage sensible de la chaleur est appliquée soit par un support de stockage liquide ou par un support de stockage solide[4].

I.2.2 | Stockage d'énergie thermique par chaleur latente

Le stockage de chaleur latente est la méthode la plus efficace pour stocker l'énergie thermique. La chaleur latente est la chaleur libérée ou absorbée par un corps ou un système thermodynamique au cours d'un processus et que sa température reste constante même si la chaleur est absorbée (ou libérée) par le système. Le stockage de chaleur latente offre une densité de stockage beaucoup plus élevée avec une plage de température plus étroite entre le stockage et la libération de chaleur que le stockage de chaleur sensible [5-7]. Il peut être facilement réalisé dans les bâtiments par transition de phase solide-liquide[8]. Numériquement, la capacité thermique latente d'un matériau peut être exprimée comme suit :

$$Q = mL \quad (I-2)$$

Où

m : la masse du MCP (Kg)

L : l'enthalpie de fusion (J/Kg)

Les matériaux à changement de phase absorbent de l'énergie lorsque le changement de phase se produit pendant le processus de chauffage, et peuvent ensuite libérer cette énergie pendant le refroidissement [3]. Le mode de changement de phase solide à liquide est le plus largement utilisé pour le stockage d'énergie thermique à chaleur latente [9]. La Figure I.1 montre le

CHAPITRE I

phénomène de changement de phase pour le mode de changement solide – liquide relatif à un corps pur.

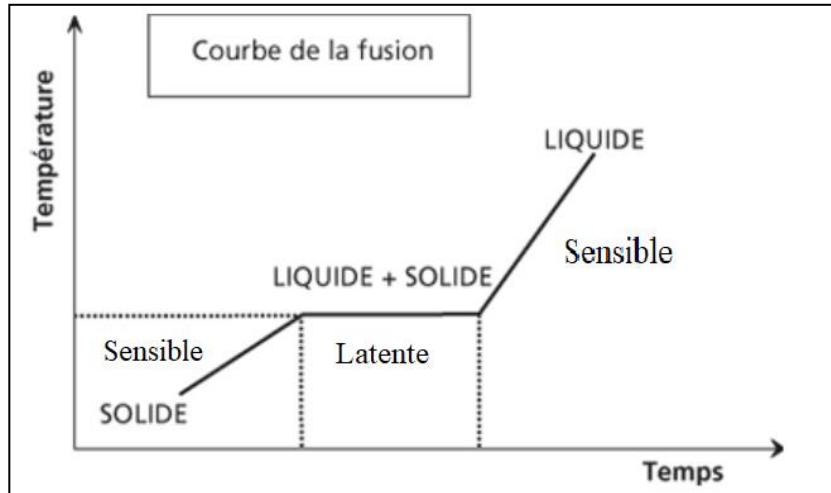


Figure I-1 : Courbe de fusion lors du phénomène de changement de phase solide-liquide.

L'énergie totale stockée est la somme de la chaleur sensible à l'état solide, de la chaleur latente lors du changement de phase à température constante et de la chaleur sensible à l'état liquide.

I.3 | Type de matériaux à changement de phase

On reconnaît parmi les MCP les plus courants [10-12], les trois types essentiels : organiques, inorganiques et eutectiques. Chaque groupe a une plage de température de fonctionnement et des enthalpies de fusion différentes.

I.3.1 | Les composés organiques

Les matériaux à changement de phase organiques sont principalement des n-alcanes et des acides gras, ces matériaux ont une plage de température comprise entre 0°C et 150°C. On cite les avantages et inconvénients de ces composés comme suit :

Les avantages :

- Disponible dans une large plage de températures.
- Sur refroidissement presque négligeable.

CHAPITRE I

- Haute stabilité chimique.
- Température de fusion élevée.
- Changement de volume plus petit pendant la transition de phase.
- Thermiquement stable et fiable.
- Non toxique.
- Meilleure compatibilité avec les matériaux de construction conventionnels.

Les inconvénients :

- Une mauvaise conductivité thermique.
- Un faible stockage de chaleur latente volumétrique.
- Une inflammabilité modérée.

I.3.2 | Les composés inorganiques

Les MCP inorganiques sont principalement des hydrates de sel, présentant les avantages et les inconvénients suivants par rapport aux MCP organiques.

Les avantages :

- Capacité de stockage de chaleur latente élevée.
- Bonne conductivité thermique.
- Moins de changement de volume.
- Facilement disponible.
- Non inflammable.

Les inconvénients :

- La surfusion.
- La corrosion.
- La pression de vapeur élevée.
- La séparation des phases les rend impropres à une application directe dans les bâtiments.

CHAPITRE I

I.3.3 | Les composés eutectiques.

Les MCP eutectiques sont préparés en combinant deux ou plusieurs matériaux à changement de phase. En général, ce sont des mélanges des MCP organiques et inorganiques :

- Organique/organique.
- Organique/inorganique.
- Inorganique/inorganique.

Ce type de matériaux à changement de phase possède les avantages et inconvénients suivants :

Les avantages :

- Un point de fusion net similaire à une substance pure.
- Leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs.

Les inconvénients :

- Le manque de données disponibles sur leurs propriétés thermiques.
- Ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels.

Cependant, pour sélectionner le MCP le mieux adapté pour les applications de construction, une analyse approfondie de toutes les propriétés thermiques, physiques et chimiques doit être effectuée. En général, pour les applications de construction, les MCP de type organique sont largement utilisés, en raison de leur disponibilité abondante et de leur faible coût.

I.4 | Classification des matériaux à changement de phase investigués dans la littérature pour les applications de construction.

Dans cette section, nous allons classer les différents types des matériaux à changement de phase les plus investigués dans la littérature, en présentant la température de fusion et la chaleur latente relatives à chaque type du MCP. Pour cela, le Tableau I.1 présente les différents MCP qui sont plus utilisés dans la littérature pour le secteur du bâtiment.

CHAPITRE I

Tableau I-1 : MCP investigué dans la littérature pour l'application au bâtiment

Nom du MCP	Température de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [J/Kg]	Référence
N-octadécane	22.7°C	128.84	[13]
Micronal DS 5001 X	23°C	110	[14] [15]
PEG 600	21-25°C	148	[16]
Bio MCP et Energain MCP	21°C et 25°C	70	[17]
Paraffine Micro encapsulé d'Energain	23.5°C	107.5	[18]
Micronal DS-5008X	23.5°C	102.6	[19]
MMCP	24.9- 25.81°C	140	[20]
Dodécanol	25 .8°C	111.5	[21]
Micronal DS 5038 X	26°C	110	[22]
Micronal DS5001	26°C	146	[23] [24]
n-paraffine	25°C	170	[25]
Bio MCP Q25	25°C	250	[26]
RT28	28°C	135.80	[27]
RT27	27°C	98.14	[28-30]
Graphite modifié MCPM	27.7°C	124.8	[31]
n-octadécane/CaCl ₂	29.19°C	84.37	[32]
Paraffine n-octadécane	28°C	180	[33]
n-octadécane	29.9°C	186.5	[34]
n-Eicosane	29.87°C	186.89	[35]
Caprice acide and Mystérique acide	25.51°C	84.98	[36]

CHAPITRE I

I.5 | Critères de choix d'un matériau à changement de phase

Le choix du matériau à changement de phase doit répondre à plusieurs critères pour avoir un meilleur stockage d'énergie par chaleur latente à savoir : les propriétés thermo physiques, chimiques, cinétiques et économiques (Tableau I.2)

Le MCP idéal doit répondre à un certain nombre de critères souhaités, et devrait être facilement disponible en grandes quantités à faible coût.

Tableau I-2 : Critères de choix d'un MCP.

Propriétés thermiques	<ul style="list-style-type: none">• Une température de fusion dans la plage de fonctionnement souhaitée.• Une chaleur latente à transition de phase élevée par unité de volume.• Une chaleur spécifique élevée.• Une conductivité thermique
Propriétés physiques	<ul style="list-style-type: none">• Un petit changement de volume lors de la transformation de phase.• Une faible pression de vapeur à la température de fonctionnement.• Equilibre de phase favorable.• Une densité élevée.
Propriétés cinétiques	<ul style="list-style-type: none">• Pas de surfusion.• Un taux de nucléation élevé.• Un taux de cristallisation adéquat.
Propriétés chimiques	<ul style="list-style-type: none">• Une stabilité chimique à long terme.• Un cycle de gel / fusion complètement réversible.• Compatibilité avec les matériaux de construction.• Aucune influence de la corrosion sur les matériaux de construction.• Il doit être non toxique, non inflammable et non explosif pour assurer la sécurité.
Propriétés économiques	<ul style="list-style-type: none">• Moins cher.• Une plus grande disponibilité.

I.6 | Méthodes d'encapsulation des matériaux à changement de phase

Les méthodes d'intégrations des MCP dans l'enveloppe du bâtiment sont les suivants :

CHAPITRE I

- La micro encapsulation dont les microcapsules des MCP sont composées de capsules de polymères d'un diamètre en micromètres. Ces capsules ont une forme sphérique et le MCP est enfermé à l'intérieur de la microcapsule. La qualité de la microcapsule des MCP est évaluée par le rapport entre la masse des capsules et la masse totale de la poudre. Les principaux avantages de l'utilisation du MCP microencapsulé sont : l'incorporation facile dans les matériaux de construction conventionnels, L'augmentation de la zone de transfert de chaleur entre les MCP et le matériau environnant, le manque de protection nécessaire contre leur destruction et la perte de propriétés, et le bon contrôle du changement de volume lors du changement de phase.
- La macro-encapsulation qui consiste à l'inclusion des MCP sous une forme quelconque dans un emballage ou un conteneur tel que des tubes, des sachets, des sphères, des panneaux, etc. Les conteneurs peuvent servir directement d'échangeurs de chaleur et s'intégrer directement dans les éléments de construction. Les principaux avantages de ce type d'intégration sont : l'amélioration de la compatibilité du matériau avec le matériau environnant, en créant une barrière, l'amélioration de la manipulation du MCP en production et la réduction de l'effet de changement de volume externe.
- La méthode la plus simple consiste en l'imprégnation directe du MCP dans le gypse, le béton ou d'autres matériaux poreux. Habituellement, les matériaux utilisés pour l'imprégnation sont les suivants : plâtre, béton, bois, ciment et composés. Le volume occupé par le MCP dans les pores du matériau de construction est suffisamment petit pour éviter les pertes de MCP, mais d'importants problèmes de fuite existent qui sont responsable d'une interaction chimique entre le MCP et son conteneur poreux. En plus, une intégration incorrecte peut détériorer les propriétés mécaniques du matériau de la matrice de construction.

I.7 | Etudes antérieures sur l'intégration du MCP dans l'enveloppe du bâtiment

Dans cette section, les études numériques et expérimentales récentes concernant l'incorporation du MCP dans l'enveloppe du bâtiment comme élément de stockage passif, seront présentées. Un grand nombre de publications est investigué dans ce sens.

CHAPITRE I

Ibáñez et al.[37] ont étudié expérimentalement et numériquement l'évaluation de l'influence des MCP en considérant la possibilité de les utiliser dans les murs, le plafond et le sol, en utilisant la méthode enthalpique, ainsi, la programmation est faite sur le logiciel fortran et puis intégré comme type sur TRNSYS. Les résultats ont montré que les positions optimales des macrocapsules du MCP sont le plafond et le mur ouest, et que le MCP utilisé pour les conditions climatiques et la conception de cette application doit avoir une température de changement de phase comprise entre 25°C et 27,5°C. Par ailleurs, une diminution de la température ambiante maximale moyenne allant jusqu'à 3°C est obtenue.

Xian SHI et al.[38] ont mené une étude expérimentale pour une cellule en conditions réelles, cette dernière incorpore un MCP macro-encapsulé dans des murs multicouches (à l'extérieur, au milieu et à l'intérieur) (Figure I.2). L'effet de la position du MCP dans les murs en béton sur les températures intérieures et les niveaux d'humidité des modèles de pièces est également évalué. Les résultats ont montré que les cellules avec MCP pouvaient ajuster la température intérieure et l'humidité, l'efficacité de l'incorporation du MCP s'est avérée être fortement dépendante de la position du MCP dans les murs en béton. Finalement, le modèle avec MCP au milieu de mur en béton a montré le meilleur contrôle de la température et a été efficace pour réduire la température maximale jusqu'à 4°C et réduit l'humidité relative de 16% par rapport au modèle de référence.

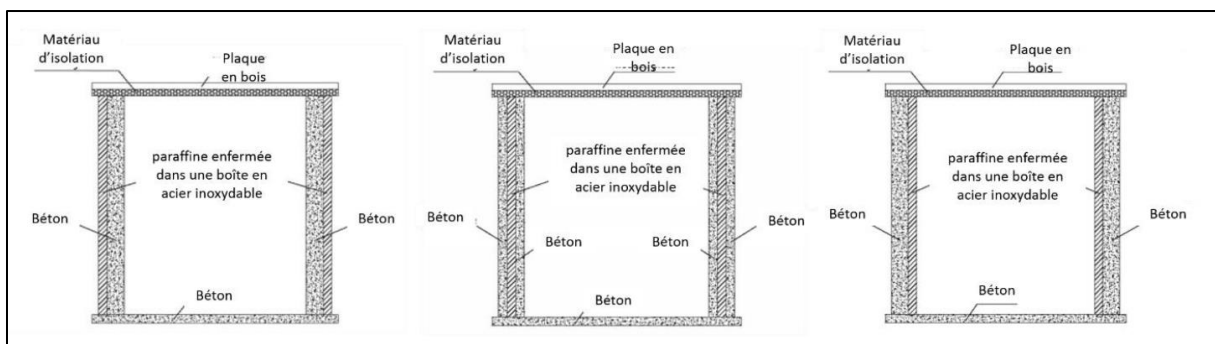


Figure I-2 : Cellule avec différents emplacements du MCP (a) emplacement extérieur, (b) emplacement au milieu (c) emplacement à l'intérieur.

Lee et al.[39] ont élaboré des essais sur terrain à l'aide de deux bancs d'essai identiques, un MCP sous forme de couches minces est placé longitudinalement dans les murs. Les auteurs ont évalué le taux de la réduction du flux thermique et le délai de transfert de chaleur, ainsi que l'emplacement optimal des murs orientés sud et ouest avec et sans MCP (Figure I.3).

CHAPITRE I

L'emplacement optimal pour un MCP dans le mur sud était l'emplacement 3, tandis que l'emplacement optimal pour un MCP dans le mur ouest était l'emplacement 2. À ces endroits, les réductions de flux de chaleur de pointe étaient de 51.3% et 29.7% pour le mur sud et le mur ouest respectivement. Les retards de pointe maximum du flux thermique étaient de 6.3 h pour l'emplacement 3 dans le mur sud et de 2.3 h pour l'emplacement 2 dans le mur ouest.

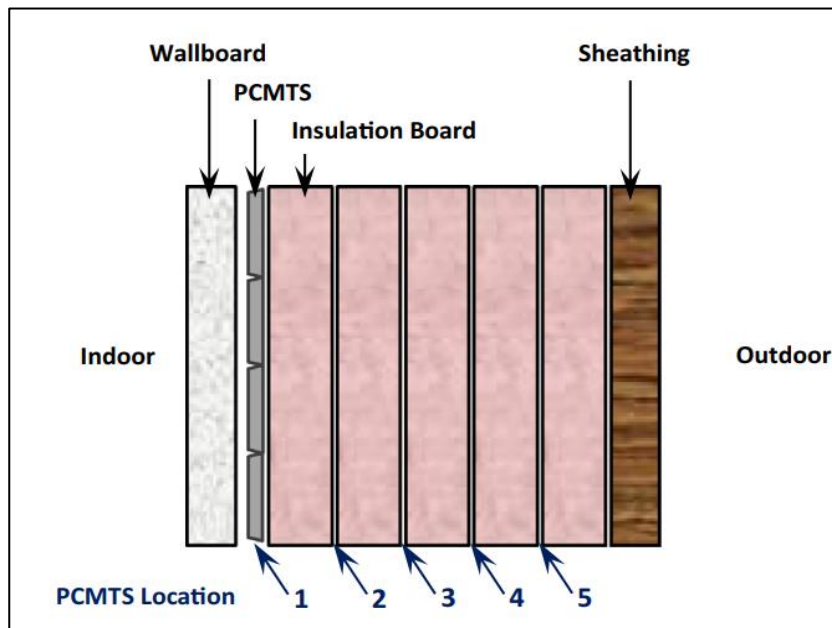


Figure I-3 : schéma du mur étudié avec différents emplacements du MCP

Kuznik et al.[40] ont élaboré une étude expérimentale sur une salle de test à échelle réelle. Une plaque commerciale de 5mm d'épaisseur contenant 60% de matériau à changement de phase est incorporée dans la cloison de séparation interne d'un bâtiment léger. Les auteurs ont étudié le comportement thermique en utilisant une salle d'essai contrôlée, et en évaluant les différentes températures mesurées à l'intérieur de la salle. Finalement, ils ont conclu que cinq millimètres de panneau mural de MCP doublent l'énergie qui peut être stockée et déstockée pendant l'expérience, la plaque MCP est équivalente à 8 cm de béton et la variation de la température peut chuter de 4.7°C.

Zhu et al.[27] ont étudié numériquement les performances énergétiques et thermiques dans une zone climatique typique avec un été chaud et un hiver froid en chine, la structure étudiée est composée d'un mur de trois couches comprenant une couche de MCP interne (active en

CHAPITRE I

saisons froides), une couche de MCP externe (active dans les saisons chaudes) et une couche de béton conventionnel (Figure I.4), et ce pour un immeuble de bureaux climatisés.

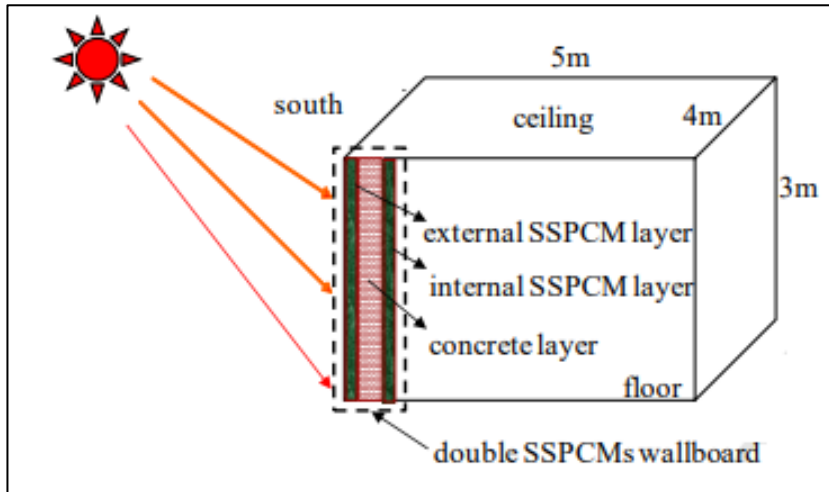


Figure I-4 : Schéma du double panneau MCP

Les auteurs ont montré que les épaisseurs recommandées des panneaux muraux externes et internes étaient entre 30 et 60 mm. Ainsi, avec l'épaisseur recommandée, les économies d'énergie annuelle étaient de 3.9% et 18.8% pour le refroidissement et le chauffage respectivement. Ils ont conclu que les couches externe et interne ont été efficaces pour réduire la demande annuelle d'énergie et la charge de pointe pendant les saisons chaudes et froides respectivement.

Barreneche et al.[41] ont étudié expérimentalement les performances thermiques d'un MCP développé avec du polymère et 12% de paraffine et comprend un déchet du processus de recyclage de l'acier connu sous le nom de poussière de four à arc électrique. Cette intégration est effectuée pour un mur intermédiaire d'adjacence de deux cabines identiques. Les profils thermiques montrent que l'inclusion des MCP diminuent la température ambiante intérieure jusqu'à 3°C et les mesures acoustiques réalisées in-situ démontrent que le nouveau matériau en feuille dense est capable d'isoler acoustiquement jusqu'à 4 dB de plus que la cellule de référence. En plus, les tests de lixiviation montrent que le matériau développé est considéré comme un matériau non dangereux. Ils ont conclu que l'intégration d'une couche de MCP dans une telle structure peut améliorer à la fois l'efficacité énergétique et acoustique du bâtiment.

CHAPITRE I

Martin et al.[42] ont élaboré une étude expérimentale et numérique pour un système de fenêtres incorporant des matériaux à changement de phase d'hydrate de sel, ce système est un panneau qui se compose de quatre panneaux de verre de sécurité avec trois fentes, dont le premier contient un verre prismatique, le second un gaz krypton et le dernier un MCP. Dans cette étude la comparaison est faite entre un panneau de fenêtre avec MCP et un panneau en double vitrage, en plus d'une évaluation de leur effet sur la température de pointe de la surface intérieure et la température de l'air de la pièce. Cette étude a montré que le panneau de fenêtre avec MCP réduit le transfert de chaleur que le panneau en double vitrage, l'énergie thermique a été réduite de 66% pendant l'été ce qui a permis de réduire considérablement le besoin de refroidissement et réduire la surchauffe dans les bâtiments.

Souci et al.[43] ont incorporé un MCP dans une cavité de brique creuse en plus d'une vérification de l'effet de la convection naturelle pendant le processus de fusion par comparaison entre deux cas : lorsqu'il n'y a qu'une conduction pure et lorsque la convection naturelle n'est pas négligée. Il a été constaté que l'effet de la convection naturelle est limité et peut être représentée par une formule empirique de conductivité thermique équivalente, et que le transfert de chaleur par convection accélère le processus de fusion du MCP. En plus, Il a été observé que la convection domine dans le haut de la cavité, réduisant la progression de l'interface solide-liquide en bas où la convection naturelle a un effet moindre.

Les travaux cités ci-dessus concerne l'intégration des MCP dans les éléments de bâtiment sous formes de macrocapsules. Nous soulignons que les MCP peuvent être intégrées dans les différents éléments de l'enveloppe du bâtiment (les murs externes, les cloisons, les planchers, les plafonds, les fenêtres) et leur intégration a prouvé une amélioration au niveau du confort interne du bâtiment. Mais comme nous avons décrit dans section 1.6 que les MCP intégré sous forme de microcapsule sont faciles à incorporer dans les matériaux de construction conventionnels, et permettent d'augmenter le transfert de chaleur entre les MCP et le matériau environnant. A cet égard nous allons présenter des études antérieures concernant la micro-encapsulation des MCP dans les éléments du bâtiment.

En commençant par le travail de Yahay et al.[44] qui ont étudié numériquement l'intégration des plaques de plâtre incorporant des microcapsules de matériau à changement de phase dans le plafond d'une maison individuelle en Malaisie, en utilisant un MCP eutectique d'acide laurique-stéarique obtenu à partir du produit d'huile de palme. Les auteurs ont conclu que cette

CHAPITRE I

intégration est capable de garder le bâtiment à une température interne de confort de 25°C, en plus d'une réduction de la consommation de climatisation de 12%.

Nous soulignons que la plupart des modèles mathématiques considérés pour l'intégration des MCP dans le bâtiment sont basés sur la méthode enthalpique en utilisant une résolution par volumes finis. En appliquant cette méthode, Younsi et al.[45] ont étudié numériquement le comportement d'un mur en brique intégrant 20% de MCP micro-encapsulé de type Micronal DS5001X ; et ont prouvé que l'ajout d'une couche de mortier_MCP à la brique permet de réduire le flux thermique maximal de 50%, d'amortir les pics de température sur la face du mur intérieur de 2.5°C et d'améliorer le déphasage.

Également, une modélisation physique et une analyse numérique de transfert de chaleur à travers les briques creuses contenant un MCP n-octadécane ont été réalisées par Mahdaoui et al.[46]. Les auteurs ont montré qu'une température de fusion de 32 °C a entraîné une fraction fondue plus élevée d'environ 65%, en plus, ils ont affirmé que la chaleur latente de fusion élevée permet d'abaisser la température de pointe et d'amortir considérablement l'onde thermique et que l'effet du transfert de chaleur par convection externe et interne a montré que le coefficient de convection extérieur à un effet léger sur la variation de température. Pourtant, l'influence du coefficient interne est relativement considérable.

Kant et al.[47] ont analysé thermiquement des briques de construction contenant des matériaux à changement de phase dans la cavité cylindrique des briques (Figure I.5).

L'évaluation a été faite en comparant les trois cas différents :

- Briques normales.
- Briques avec air rempli dans la cavité cylindrique.
- Briques avec MCP remplies dans la cavité cylindrique.

Les résultats obtenus indiquent qu'en passant des briques normales aux briques avec air rempli dans les trois cavités cylindriques, une réduction du flux de chaleur de 3.17 % est obtenue. Concernant le remplissage des cavités cylindriques par le MCP, il s'est avéré que l'acide caprique est un MCP plus efficace que la paraffine et la RT-25, et ce par une réduction maximale du flux thermique de 8.31% avec de l'acide caprique rempli dans trois cavités

CHAPITRE I

cyllindriques et de 2.26% pour le remplissage d'une seule cavité. Par conséquent, l'intégration des MCP dans la brique de construction pourrait être une technique efficace pour le contrôle thermique passif des bâtiments.

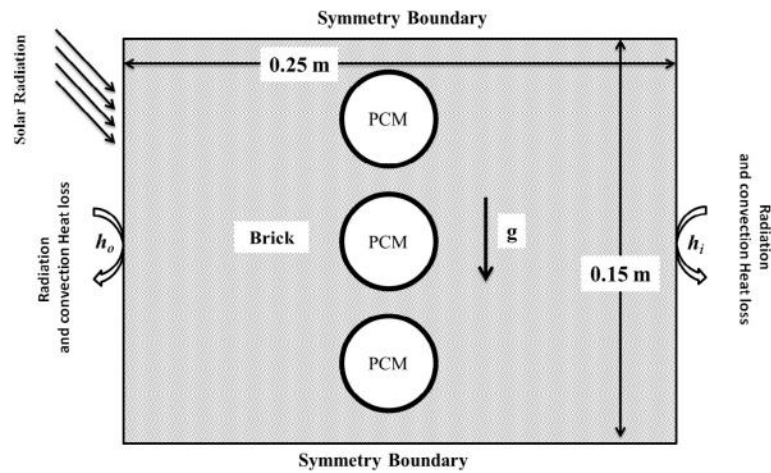


Figure I-5 : Brique de construction contenant des matériaux à changement de phase dans ses cavités cylindrique.

Une étude similaire élaborée par Alawadhi et al.[48] a montré que la charge de refroidissement énergétique peut être diminuée lorsque les cylindres MCP sont incorporés dans les briques vu que le flux de chaleur total dans l'espace intérieur peut être réduit de 17.55%, et que l'emplacement central des cylindres avec MCP a montré les meilleures performances en termes d'efficacité thermique.

Gao et al.[49] ont développé et vérifié un modèle de simulation couplé à un transfert de chaleur à changement de phase en utilisant les données expérimentales d'une expérience à grande échelle. Les calculs sont faits pour une brique creuse rempli en ses cavités par un MCP, cette étude évalue les performances thermiques de la brique en changeant l'emplacement du remplissage de MCP du milieu intérieur vers le milieu extérieur (Figure I.6).

CHAPITRE I

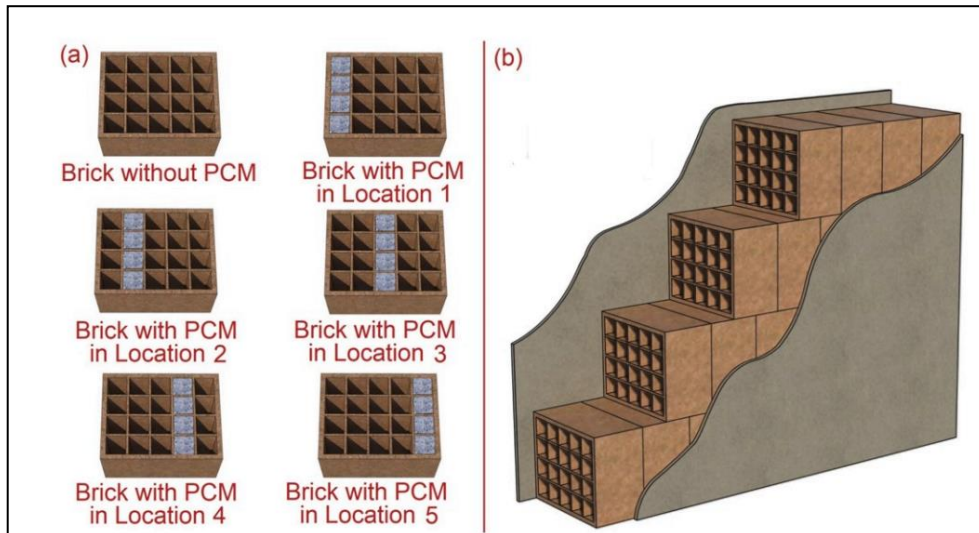


Figure I-6 : remplissage des cavités de briques creuses dans différents emplacements

Les résultats montrent qu'avec le déplacement du MCP des cavités internes vers les cavités externes, les cavités creuses intérieures sont le meilleur choix pour remplir le MCP représentant un déphasage thermique important, une réduction significative du flux de la surface interne.

Aketouane et al.[50] ont évalué l'impact de changement du type d'habitation sur les performances thermiques d'un bâtiment intégrant des MCP dans les cavités des briques creuses des murs extérieurs, les habitations étudiées sont trois constructions typiques (Construction individuelle, Construction collective et Construction d'hôtels), et ce pour les six zones climatiques au Maroc. Les résultats ont montré que quelles que soient les orientations, le flux de chaleur à la surface interne du mur dans les deux climats (saharien et océanique) pour une journée typique du 31 juillet était constant lorsque le MCP était partiellement liquide (partiellement solide), pourtant qu'il suit les conditions extérieures lorsque le MCP était complètement solide ou liquide. Ainsi, le MCP avec une température de fusion médiane de 32 °C était très efficace pour l'hôtel (15 étages), cependant une température de fusion médiane de 37 °C était meilleure pour l'individuelle (2 étages) et le collectif (5 étages). En termes d'économie d'énergie, le MCP avec une température de fusion médiane de 37°C a pu économiser 40% de l'énergie nécessaire pour maintenir la température intérieure à une température de consigne de 26°C dans le climat océanique et de 15% à 25% dans le climat saharien.

L'intégration des MCP dans les éléments du bâtiment peut se faire pendant les premières phases de construction, mais peut aussi se faire pour une rénovation d'un bâtiment existant.

CHAPITRE I

Dans ce sens, Ascione et al.[51] ont élaboré une étude numérique sur cinq pays différents dont le but est de faire une rénovation énergétique des bâtiments existants au moyen de l'ajout d'un MCP microencapsulé dans le plâtre de la face intérieure de l'enveloppe. En référence à chaque ville, le pourcentage de temps en zone de confort thermique est plus élevé lorsque la température de fusion est de 29°C, il y a encore 7.2%, 15.4% et 22.9% de temps de confort par rapport au bâtiment de base respectivement pour Ankara, Séville et Naples, ainsi les heures de confort passent de 11.2% à 21.9% des heures occupées à Athènes et de 32.9% à 51% des heures occupées à Marseille. Finalement, les auteurs ont conclu que l'optimisation est strictement liée à l'emplacement climatique et à l'utilisation du bâtiment.

Karim et al.[52] ont introduit la paraffine stabilisée par une matrice de polymère dans les cavités d'une dalle alvéolée pouvant être utilisée comme plancher/plafond. Le comportement thermique des deux dalles avec et sans MCP est étudié pour une condition de température périodique imposée sur l'une des faces. Les résultats montrent que la dalle remplie complètement de MCP présente les meilleures performances avec une forte diminution des fluctuations de température et un important déphasage. En réduisant de moitié la quantité de MCP c.à.d. remplir 4 alvéoles, on peut constater que l'écart de température est réduit de près de la moitié et que le déphasage est légèrement augmenté par rapport à celui de la dalle de référence.

Dans le premier volet de notre étude bibliographique, nous nous sommes focalisés sur les travaux concernant l'intégration des MCP dans les éléments du bâtiment sous forme de macro capsules et de microcapsules. Le deuxième volet de cette étude bibliographique concernera l'utilisation de la technologie des planchers chauffants et l'impact de l'intégration des MCP sur l'amélioration du rendement de ces derniers. Pour cela, la prochaine section sera dédiée pour la définition des planchers chauffants et les différents modes opératoires pour leur fonctionnement.

I.8 | Etat de l'art sur l'intégration des matériaux à changement de phase dans les planchers chauffants.

Un plancher chauffant est un émetteur de chaleur à basse température, il est constitué par des réseaux de canalisations dans lesquels circule un fluide (eau chaude entre 35°C et 45°C) qui

CHAPITRE I

diffuse de la chaleur à la surface supérieure du plancher, et puis à l'intérieure des pièces à chauffer. La construction des planchers chauffants est régie par la norme **DTU 65.14** [53].

Le plancher chauffant devra être dimensionné de manière permettant d'avoir une température surfacique du plancher restant modéré et proche de la température de confort thermique qui est limité à 28°C. Ainsi un plancher chauffant à eau chaude basse température peut être utilisé comme mode de chauffage et/ou de rafraîchissement d'une habitation (plancher chauffant-rafraîchissant). En plus, ces types de planchers s'adaptent parfaitement bien à plusieurs modes de chauffage et peuvent être couplés avec une pompe à chaleur, une chaudière et même à l'énergie solaire.

Dans ce sens, Mokhtari et al. [54] ont étudié un système de chauffage solaire pour utilisation de plancher chauffant, ce dernier est composé d'un serpentin formé de tubes en cuivre de 15mm de diamètre, et il est isolé du sol par une couche de 50mm de polystyrène et par une couche du gros béton. Les auteurs ont souligné qu'au bout de 60 h, la température du fluide commence à se stabiliser à 40°C et le système a atteint le régime établi. Également, ils ont montré que la température intérieure oscille entre les valeurs de 20°C et 25°C qui représente une marge répondant aux exigences du confort thermique pour une journée claire, et qu'il est nécessaire de prévoir un système d'appoint dans le cas des journées nuageuses.

Zaheer-Uddin et al. [55] ont représenté les résultats de l'application d'un système de plancher chauffant identique, sauf que l'apport de chaleur dans cette étude est assuré par une chaudière à gaz au lieu du chauffage par capteurs solaire. Le système se compose d'une dalle de plancher à serpentin encastré et alimenté par une chaudière à gaz répondant à la demande de chaleur de la zone grâce à une régulation avec des thermostats. Les résultats montrent qu'une période de près de 50 heures est nécessaire pour que le système atteigne le régime établi, ainsi qu'en modulant l'apport d'énergie de la chaudière, la température de la zone peut être maintenue à moins de 0,5°C du point de consigne tout au long d'une journée froide avec une température extérieure moyenne de -6°C.

Également, Kharchi et al.[56] ont mené une étude pour profiter du rayonnement solaire constituant une source d'énergie gratuite et non polluante pour le chauffage d'une dalle en béton de 3.2 m² de surface et de 17 cm d'épaisseur, parcouru par un serpentin en cuivre de 16/18 mm de diamètre. Les résultats montrent que la température de la dalle est de l'ordre de 22°C à 24°C et les auteurs ont conclu qu'un certain confort thermique est atteint, et ont

CHAPITRE I

constaté que pendant la nuit les températures relevées aux extrémités baissent légèrement, ce qui est dû à la mauvaise isolation latérale de la dalle reconnu par l'effet de bord.

Le plancher chauffant peut fonctionner comme un système de chauffage au sol pour assurer un confort thermique pendant la période hivernale, ainsi il peut fonctionner comme un plancher rafraichissant en période estivale. Pour cela, Mokhtari et al.[57] ont pensé à exploiter le plancher chauffant comme circuit hydraulique conditionné pour le rafraîchissement en période estivale sans investir dans un système de climatisation. Les résultats ont montré que l'utilisation de la technique du plancher solaire direct avec capteurs à surface moins importante dans un climat maghrébin est très prometteuse et permet de couvrir 60% des besoins d'énergie du bâtiment, ainsi le recours aux planchers rafraîchissants a montré que le procédé pouvait effectivement donner une satisfaction en termes de rafraîchissement avec une diminution de 4°C de la température d'ambiance à condition d'utiliser une température du circuit hydraulique relativement élevée à l'ordre de 22.5°C pour assurer à la fois le confort thermique et éviter le risque de condensation.

Afin de rester dans le contexte de l'utilisation de l'énergie solaire directement pour chauffer le fluide caloporteur circulant dans les serpentins du plancher sans passer par un réservoir de stockage, Belkacem et al. [58] ont évalué le confort thermique d'un local utilisant cette technique et ont conseillé d'utiliser un plancher réversible avec une ventilation nocturne pour assurer à la fois un niveau de confort thermique et des économies d'énergie.

D'après les études de la littérature, il est à noter que le chauffage de l'eau dure environ 50h à 60h pour que la température de l'eau atteint son maximum et pour que le régime stable soit établi. Le chauffage du plancher peut se faire en profitant de plusieurs modes de chauffage. Également, il est nécessaire de coupler à ces modes un système de régulation afin de pratiquer une intermittence durant les périodes d'inoccupation du bâtiment, ce qui conduit toujours à des économies d'énergie. La mise en place d'un système de régulation par programmation d'intermittence à heures fixes permet une meilleure optimisation selon la norme EN 12098[59].

Afin d'avoir une solution passive permettant un gain en chaleur lorsque le système de chauffage est éteint. Plusieurs études ont proposé l'intégration de macrocapsules des MCP

CHAPITRE I

dans les plancher chauffants afin d'en profiter de l'effet cumulatif des MCP pendant cette période.

González et al.[60] ont présenté une étude numérique sur les planchers chauffants qui incluent des matériaux à changement de phase en utilisant une approche 2D. Ces MCP sont incorporés en forme de macrocapsules noyées dans la couche du béton selon deux dispositions (Figure I.7), la première configuration appelée MCP-A dispose d'une longue barre de MCP parallélépipédique en contact direct avec le tube de chauffage et une seconde appelée MCP-B contenant deux barres de MCP parallélépipédiques plus étroites et disposées symétriquement entre les tubes de chauffage sans contact direct avec ces derniers. Les solutions de transfert de chaleur dans les planchers chauffants avec intégration du MCP sont comparées à celles obtenues pour les planchers chauffants sans MCP. L'étude prend en compte à la fois les périodes de charge et de décharge, la période de charge correspond au temps pendant lequel l'eau circule dans les tubes de chauffage, cependant, la période de décharge correspond au moment où la circulation de l'eau à l'intérieur des tubes est interrompue et le sol dégage de la chaleur jusqu'à ce que l'ensemble du MCP se solidifie.

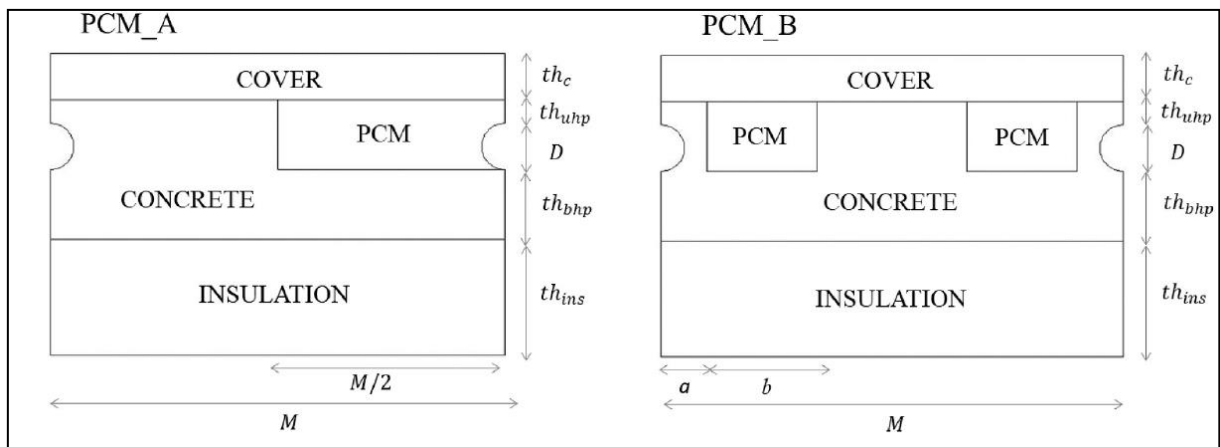


Figure I-7 : Configuration des planchers chauffant étudiés (MCPA et MCPB).

Les résultats montrent que l'incorporation du MCP dans le noyau en béton entraîne une diminution du transfert de chaleur, allant de 50-110 W/m² pour les planchers radiants en béton classiques à 45-90 W/m² pour planchers radiants avec MCP. L'énergie thermique stockée augmente entre 445.5 et 552.0 Wh / m² pour les sols classiques et 1141.0–1245.5 Wh/m² pour les sols avec MCP. Le contact direct entre le MCP et les tubes de chauffage (MCP-A) est essentiel pour augmenter les vitesses de fusion. La fusion est jusqu'à 4.6 fois plus rapide pour

CHAPITRE I

le MCP-A que pour le MCP-B, en revanche, la solidification est jusqu'à 1.8 fois plus rapide pour MCP-B que pour MCP-A.

Wenlong Cheng et al.[61] ont introduit des plaques de MCP appelé HCE-SSMCP, faites de (paraffine solide + paraffine liquide) / polyéthylène haute densité / graphite expansé, dans une salle d'essai avec un système de chauffage par le sol d'une maison en hiver. Ce système charge de la chaleur en utilisant de l'électricité nocturne afin de répondre aux besoins de chauffage pendant la journée. Les résultats ont montré que l'amélioration de la conductivité thermique du MCP dans une certaine plage pourrait améliorer considérablement l'efficacité énergétique du système de chauffage et réduire l'épaisseur des matériaux isolants. La fuite de chaleur à travers l'isolation est étroitement liée à la conductivité thermique du MCP et diminue considérablement avec l'augmentation de la conductivité thermique. Plus la conductivité thermique du MCP est élevée, plus on peut atteindre une meilleure performance avec une couche d'isolation plus mince, plus l'efficacité de la consommation d'énergie est augmentée.

Devaux et al.[62] ont montré les avantages du MCP lorsqu'il est incorporé dans les murs, le plafond et en combinaison avec un système de chauffage par le sol en utilisant deux types différents de MCP. L'utilisation de MCP à point de fusion plus élevé avec le système de chauffage par le sol a permis un transfert de charge de pointe significatif, tandis que l'utilisation de MCP à point de fusion plus bas dans les murs et le plafond a fourni le confort nécessaire dans le bâtiment. Les résultats ont montré que ce système a permis une économie de coûts de 42% et une économie d'énergie correspondante de 32%, soulignons que les économies de coûts proviennent à la fois des économies d'énergie et du transfert de charge de pointe.

Farid et al.[63] ont abordé l'idée d'améliorer le système de chauffage par le sol existant en utilisant un matériau à changement de phase macro-encapsulé (MCP) qui fond et se solidifie à environ 28°C, placé en couche de béton pendant la construction. Les performances des deux dalles de béton ont été testées expérimentalement. L'objectif est de minimiser la fluctuation de la température de la surface du plancher et de disposer d'un stockage de chaleur suffisant pour que le chauffage puisse être effectué uniquement pendant les périodes creuses d'électricité. Les résultats ont montré que le choix du $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ comme MCP et la conception appropriée du système ont permis de maintenir la surface du sol près de la température souhaitée de 24°C pendant de longues périodes. La surface du sol contenant du

CHAPITRE I

MCP a montré une fluctuation de température plus petite que le sol sans le MCP même si le processus de chauffage n'a été effectué que pendant 8 h, évitant ainsi la surchauffe pendant la période de charge thermique.

Huang et al.[64] ont proposé une étude sur un nouveau plancher MCP comprenant 2 couches de tubes chauffant et une couche MCP macro-emballée, et ont étudié expérimentalement et numériquement le processus de stockage de chaleur et celui de sa libération. Les résultats révèlent que le nouveau plancher avec MCP est capable de libérer 37677.6 kJ de chaleur pendant 16h en période de pompage dans une pièce de 11 m² et qui représentent 47.7% de l'énergie fournie par l'eau solaire. La comparaison entre la pièce MCP et la pièce ordinaire montre que le stockage de chaleur latente par l'acide caprique est beaucoup plus approprié et utile que le stockage de chaleur sensible par le béton dans le sol.

Sung Ho Choi et al.[65] ont analysé le décalage temporel d'une surface d'un système de plancher chauffant couplé à une couche de MCP dans une maquette au sein du laboratoire (Figure I.8) et ont ensuite comparé la performance thermique de ce système à celui d'un système de plancher conventionnel.

Les résultats obtenus ont montré qu'en terme de temps requis pour que la température de la surface du sol peut augmenter à 30°C, la salle 1 a pris 4h50min, tandis que la salle 2 avec système de plancher chauffant a pris 5h5min, le décalage temporel observé pour la salle 2 dû au MCP est de 15 min. Cependant, pour que la température de la surface du sol diminue à 22°C pendant la décharge, le déplacement de la charge de pointe pour la salle 1 a duré 11 h 41 min, alors qu'il a duré 16h43min pour la salle 2 ; il a été observé qu'on introduisant la couche de MCP, le déphasage pendant la décharge vaut 5h2min.

CHAPITRE I

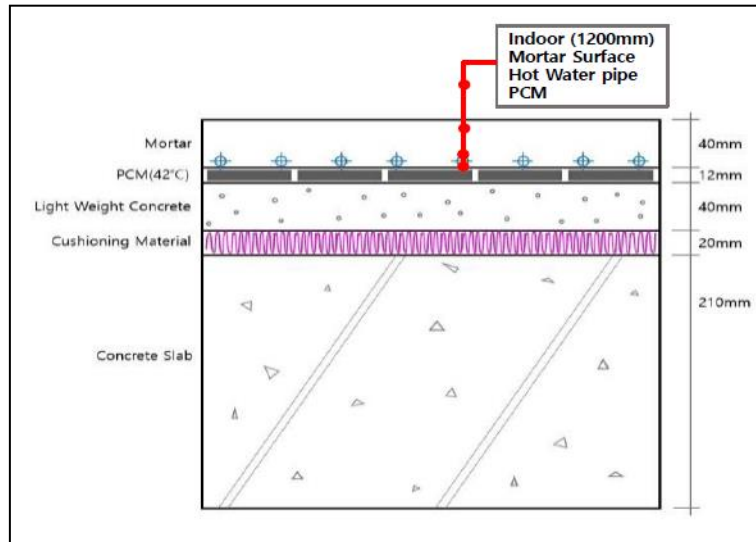


Figure I-8 : Système de chauffage par le sol avec matériau à changement de phase.

Zhang et al.[66] ont développé un modèle numérique bidimensionnel d'un bâtiment avec un système de chauffage pour le plancher intégrant un matériau à changement de phase pour une période d'hiver. Les auteurs ont validé leur modèle mathématique, en réalisant une salle d'essai expérimentale avec système de chauffage au sol avec MCP (Figure I.9). Les effets de la température de changement de phase, de la chaleur latente et de la conductivité thermique du MCP sur la réponse dynamique thermique du système sont étudiés.

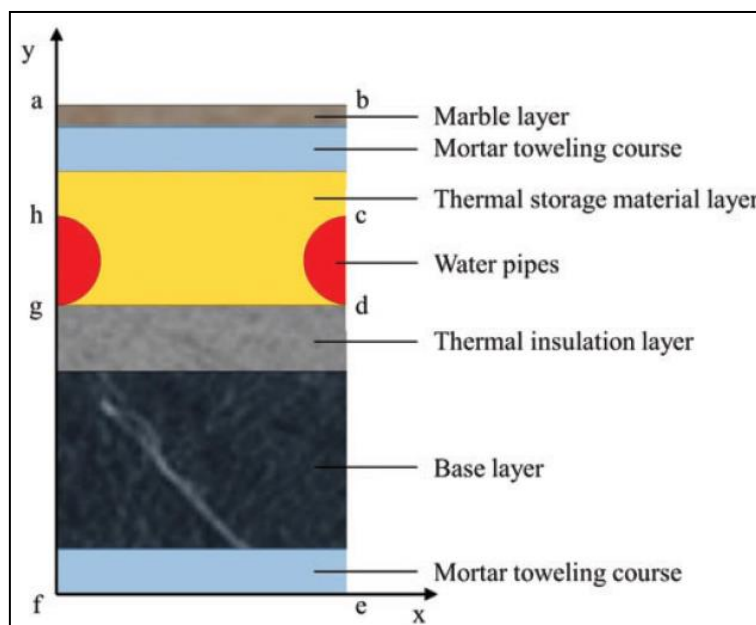


Figure I-9 : Structure du plancher chauffant avec MCP.

CHAPITRE I

Les résultats ont montré que la température de changement de phase et la conductivité thermique du MCP ont une influence significative sur le confort thermique. Inversement à la chaleur latente qui est de l'ordre de 100 à 200 kJ/kg et qui n'a pas eu d'influence évidente sur les performances thermiques du sol. Concernant la température de changement de phase, un MCP avec une température de fusion de 313K a été recommandé et a permis d'augmenter la température intérieure moyenne de 2.2K et augmenter le rapport de stockage d'énergie thermique de 12%.

Selon les travaux de la littérature scientifique, il est connu que les MCP souffrent de leur faible conductivité thermique [67]. Cet inconvénient peut réduire l'efficacité thermique des éléments de bâtiment intégrant les MCP. Afin d'assurer un meilleur transfert de chaleur, parmi les techniques utilisées dans la littérature, on trouve l'insertion de matériaux à haute conductivité thermique dans les MCP qui sont appelés NePCM (Matériaux à changement de phase améliorés par des nanoparticules : « Nanoparticle-enhanced phase change materials »). Les différents travaux relatifs à l'insertion des NePCM dans le bâtiment seront examinés en analysant l'effet apporté sur la performance thermique.

Al-Kayiem et al.[68] ont conçu une installation expérimentale afin d'étudier les performances d'un chauffe-eau solaire en étudiant trois cas différents, le premier cas est un système de chauffe-eau solaire sans matériau à changement de phase, dans le deuxième cas, un MCP de type paraffine pure est ajouté au système étudié et le dernier cas est amélioré par 1% d'additif des nanoparticules de matériaux conducteur Cu de diamètre de 20 nm (Figure I.10). Par conséquent, trois angles d'inclinaison ont été choisis, spécifiquement 10, 20 et 30° pour les trois modes opératoires de fonctionnement (sans MCP, avec MCP, avec NePCM). Le processus impliquait un changement total du réservoir d'eau de 60 litres à 19h00 et à 7h00 avec circulation d'eau de 0.5 kg/min.

CHAPITRE I

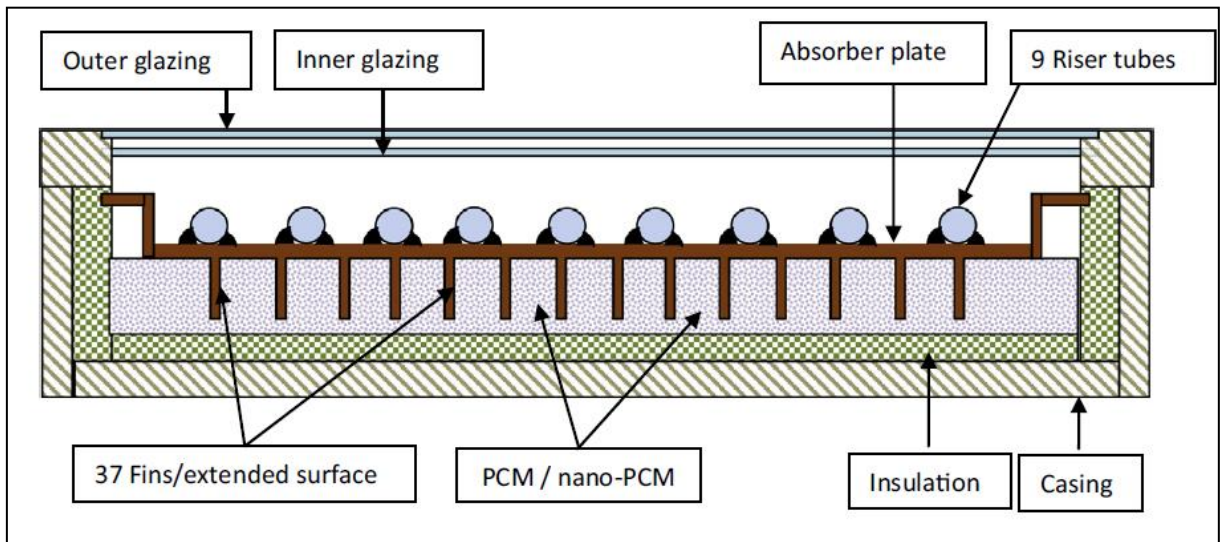


Figure I-10 : Vue schématique du capteur solaire avec NEPCM.

Les résultats révèlent que la conductivité thermique du composite de nano particules et MCP a été améliorée de 24% par rapport au MCP paraffine pure. Ainsi, les performances du système sont optimales à une inclinaison de 10° . L'efficacité du capteur solaire a été améliorée de 6.9% et de 8.4% lorsque le MCP et le nano composite Cu-MCP sont intégrées, respectivement. Finalement, après le changement de l'eau à 19h00, le système avec NePCM a produit de l'eau chaude à 40.7°C le lendemain matin en utilisant l'énergie thermique déchargée pendant la nuit.

Karunesh et al.[69] ont mené une étude numérique pour l'intégration de nanoparticules de graphène dans les MCP, remplies dans une cavité carrée en aluminium et chauffée d'un côté (FigureI.11). Les nanoparticules de graphène sont mélangées à trois rapports volumétriques différents (1%, 3% et 5%), avec trois catégories différentes de MCP couramment utilisées à savoir, l'acide caprique, le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et le n-octadécane, afin de voir l'effet de l'ajout des nanoparticules sur la fusion du composite MCP développé.

Les résultats indiquent que l'ajout de nanoparticules de graphène améliore la conductivité thermique du MCP, améliore les caractéristiques de fusion telles que la vitesse de fusion, entraîne une augmentation relative de la viscosité dynamique par rapport à celle du MCP pur, dégradant ainsi considérablement son efficacité de transfert de chaleur par convection naturelle avec la concentration accrue de nanoparticules dans la phase fondue. Ce phénomène peut être préoccupant dans les grands réservoirs avec MCP, où la fusion de ce dernier est généralement dominée par convection.

CHAPITRE I

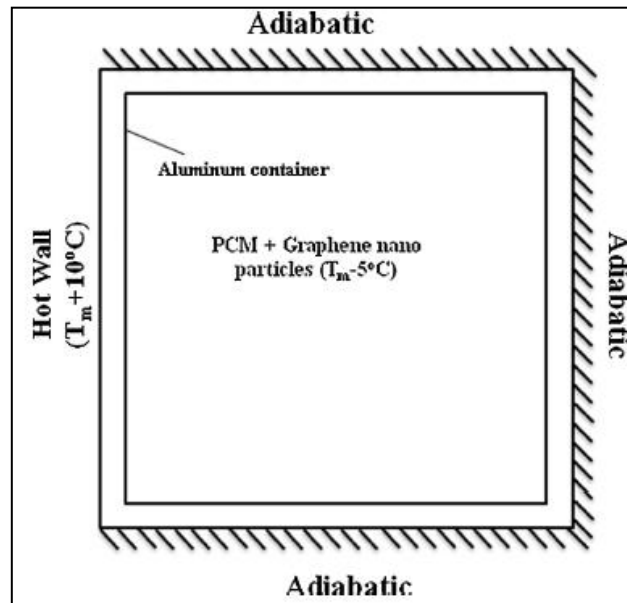


Figure I-11 : Description de la cavité étudiée avec NePCM.

Sarrafha et al.[70] ont étudié le rôle potentiel des nano tubes de carbone (CNT) dans l'amélioration de performance des MCP organiques dans les applications de construction. Le panneau étudié est un NePCM macro-encapsulé, composé de n-octadécane et de CNT, il est introduit au sein d'une paroi multicouche, et ses performances thermiques sont analysées numériquement pour des conditions météorologiques chaudes (été), froides (hiver) et modérées (automne).

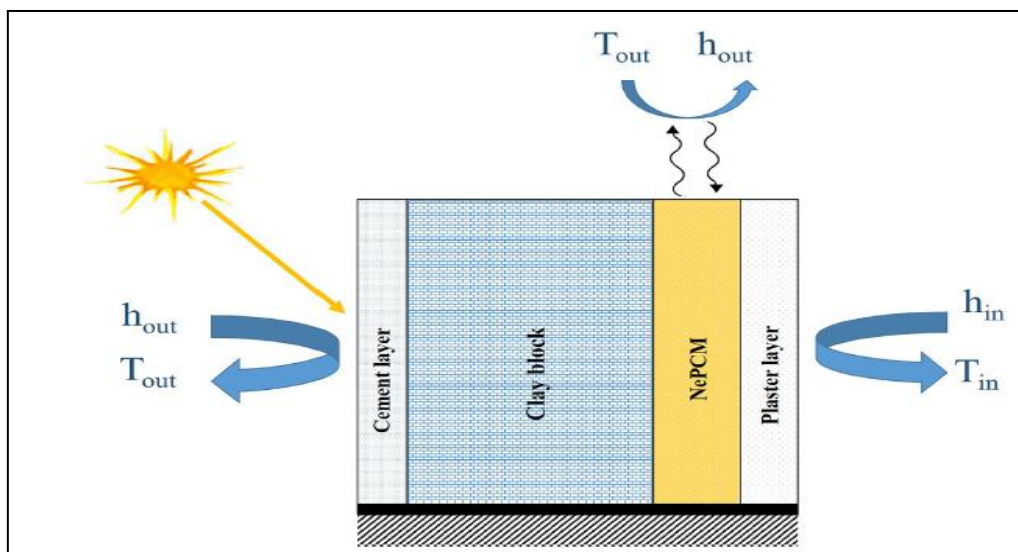


Figure I-12 : Composition du mur multicouche étudié avec ajout du NePCM.

CHAPITRE I

Les résultats acquis ont montré que l'ajout du CNT au n-octadécane a été bénéfique pour le confort thermique du bâtiment les jours sélectionnés en hiver et en automne. Cependant, il a également été montré que l'augmentation de la conductivité thermique du MCP par l'ajout de nanotubes pouvait également être préjudiciable au confort thermique du bâtiment pendant la période d'été, la principale raison était que le panneau NePCM restait en phase liquide pendant de longues périodes pendant la journée d'été. Par conséquent, l'augmentation de la conductivité thermique entraîne une augmentation du flux de chaleur dans le bâtiment. L'augmentation de la conductivité thermique des MCP dans les applications de construction via l'ajout de nanoparticules entraîne des taux de charge/décharge plus élevés.

Tian-Hu Wang et al.[71] ont utilisé des MeMCP « Matériaux à changement de phase microencapsulés » avec une température de fusion de 28°C comme moyen de stockage d'énergie afin de contrôler le comportement thermique d'un échangeur de chaleur. Les MCP ont été mélangés avec des microparticules de graphite expansé (EG) pour améliorer le taux de transfert de chaleur dans l'échangeur de chaleur. Les particules MeMCP sont constituées de noyaux de paraffine d'une taille moyenne de 45 µm. L'échangeur de chaleur est un radiateur tubulaire en cuivre avec des ailettes en aluminium confinées dans un lit de MeMCP ou dans un mélange composite de MeMCP + de microparticules de graphite expansé (EG). Les résultats montrent que la conductivité thermique du MeMCP était de 0.22 W/m.K, et en utilisant EG, il a été augmenté à 0.51W/m.K, la capacité thermique massique de MeMCP et MeMCP+30% EG a été étudiée à l'aide de technique DSC. Il a été constaté que la chaleur spécifique du MeMCP était de 25 kJ/kg K, et elle a été réduite à 18 kJ/kg K en ajoutant l'EG. La densité de MeMCP était de 452.6 kg/m³, et en utilisant EG, elle a été augmentée à 485.1 kg/m³ pour MeMCP + 30%EG. L'utilisation de microparticules EG comme additifs, améliore notablement la libération et l'absorption du transfert de chaleur non seulement aux temps initiaux mais aussi aux temps plus longs et le composite MeMCP + EG a fourni une différence de température de 15°C à la sortie de l'échangeur de chaleur par rapport au MeMCP.

Nabavitatabayyi et al.[72] ont rapporté les résultats d'une simulation numérique approfondie qui examine l'application de MCP intégrés par des nanoparticules dans le réservoir d'eau chaude et analysent l'impact de l'intégration de nanoparticules sur les performances thermiques du système en termes de temps de solidification, de réponse thermique et de décalage de la demande de puissance. Les résultats révèlent que la dispersion de nanoparticules dans l'application des ballons d'eau chaude empêche la température de chuter, en plus que le temps

CHAPITRE I

de solidification étaient de 103 min pour le MCP pur et de 64 min pour les MCP améliorés, alors une réduction de 60% avec l'ajout de nanoparticules au MCP avec une concentration volumétrique de 10%, ainsi l'utilisation de MCP améliorés retarde la demande de puissance de 2h par rapport aux MCP pur en raison de la conductivité thermique plus élevée.

I.9 | Bilan et conclusions

Dans ce chapitre, l'étude bibliographique a porté sur un panorama des travaux antérieurs en vue de l'utilisation des matériaux à changement de phase dans le secteur du bâtiment.

En première partie, nous avons décrit les méthodes de stockage thermique à savoir le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente. Comme les matériaux à changement de phase stockent l'énergie sous forme de chaleur latente, la partie qui suit a concerné la présentation des différents types des MCP, leur classification ainsi que les critères de choix de ces matériaux et les différents types d'intégration. Par la suite, nous avons abordé à travers les études antérieures sur les matériaux à changement de phase, les différentes formes d'intégrations des MCP dans le bâtiment et les résultats obtenus.

Après évaluation des différents travaux sur l'intégration de ces matériaux à efficacité énergétique (MCP), nous constatons que ces derniers peuvent à eux seuls apporter les avantages suivants :

- Le MCP améliore le confort thermique et acoustique.
- Le MCP réduit la consommation énergétique.
- L'intégration des MCP dans les parois de bâtiment peut produire un potentiel d'avantage financiers et une réduction importante de la consommation d'énergie.
- Le MCP réduit les fluctuations de la température interne du bâtiment.
- Une plaque MCP de 5 mm est équivalente à un mur en béton de 8 cm.
- L'utilisation des MCP entraîne un déphasage de l'onde de température, de ce fait les MCP sont des moyens pour augmenter l'inertie thermique du bâtiment.

Certes, que les matériaux à changement de phase ont la capacité d'absorber et de libérer une grande quantité d'énergie thermique au cours du changement de phase, mais la conductivité thermique de ces matériaux couramment utilisés pour le stockage d'énergie thermique est relativement faible, ce qui est l'un des principaux inconvénients pour limiter leur utilité. Récemment dans la littérature, des tentatives ont été faites pour améliorer la conductivité

CHAPITRE I

thermique du MCP en mélangeant différents additifs appelés nanoparticules et ayant une conductivité thermique plus élevée, ces derniers permettent d'avoir un composite potentiel lorsqu'elles sont mélangées de manière appropriée avec différents MCP.

Suite à cela, une étude bibliographique est présentée sur l'intégration des Nanoparticules à haute conductivité thermique dans le bâtiment et les avantages apportés en termes d'amélioration des performances thermiques.

D'après les résultats obtenus dans la littérature, l'ajout des nano particules aux matériaux à changement de phase a révélé des améliorations cruciales sur l'augmentation de la conductivité thermique ce qui a permis de garantir une performance thermique plus importante que dans les structures seulement avec le matériau à changement de phase.

Suite à la consommation majeure portée par le secteur du bâtiment, le gouvernement marocain a élaboré un règlement thermique de construction (RTCM) en 2015, et ce pour apaiser la consommation énergétique causée par le secteur de la construction qui ne cesse pas d'augmenter au fil du temps. Pour faire face à cela, nous proposons dans ce travail d'améliorer la performance thermique du bâtiment par intégration des MCP dans ses éléments structuraux (murs et plancher) sous forme de microcapsules, ces derniers sont compatibles avec une large gamme de matériaux de construction tels que la brique creuse, le béton, le ciment, le gypse et les panneaux muraux. Pour améliorer le stockage d'énergie thermique dans les bâtiments, nous soulignons également que l'intégration des MCP sous forme de microcapsules n'est pas investigués auparavant dans la littérature au niveau de nos cas de figures, ainsi la micro-encapsulation présente l'avantage de la réduction en épaisseur de l'élément dans lequel est intégré le MCP. Et que l'incorporation de ces derniers est facile dans les matériaux de construction conventionnels, ainsi qu'à l'augmentation de la zone de transfert de chaleur entre les MCP et le matériau environnant.

Le prochain chapitre portera sur la formulation mathématique, la validation, la sensibilité du maillage et les outils numériques dont on aura besoin dans la suite du travail.

II | Chapitre II : Formulation Mathématique Et Numérique

CHAPITRE II

II.1 | Introduction

Nous nous intéressons dans notre étude à l'effet de l'ajout des matériaux à changement de phase dans les éléments structuraux du bâtiment.

Avant d'analyser cet effet, nous définissons dans cette section les configurations considérées, les équations qui régissent le phénomène, la méthode numérique utilisée et les tests de validation menés par comparaison avec les résultats des autres auteurs. La comparaison est faite aussi bien à la fois dans le cas de l'insertion des matériaux à changement de phase dans un mur multicouche et dans le plancher chauffant. Nous soulignons que ça soit pour le mur multicouche ou le plancher chauffant, les études numériques sont effectuées sur le logiciel Ansys fluent.

II.2 | Intégration des MCP dans un mur multicouche

II.2.1 | Description du système étudié

Dans la plupart des constructions résidentielles au Maroc, la majorité des murs de l'enveloppe extérieure sont construits en brique creuse avec des couches de mortier interne et externe. Dans cette première partie d'étude, on évaluera la performance thermique d'un tel mur multicouche en brique creuse en introduisant des microcapsules de matériau à changement de phase (MCP) dans trois différents emplacements. Les scénarios étudiés des murs multicouches avec microencapsulation du MCP sont appelés ici M1, M2 et M3, en plus d'un mur multicouche de référence sans MCP.

Pour le mur multicouche M1, le matériau à changement de phase est microencapsulé dans la couche externe de mortier ; le mur multicouche M2 contient les microcapsules dans la couche de mortier proche de l'ambiance interne et le mur multicouche M3 possède les microcapsules dans la matrice solide de la brique creuse (Figure II.1).

Les couches de mortier ont une épaisseur de 2cm, la brique creuse de 8 trous est d'une épaisseur de 10cm dont les dimensions des cavités d'air sont de (3.5cmx3.5cm). Ainsi, le MCP utilisé est composé de microcapsules de paraffine n-octadécane vu qu'elles possèdent une capacité de stockage de chaleur latente élevée (environ 243.5 KJ/Kg).

Les trois scénarios des murs appelés M1, M2 et M3 ont été simulés en imposant une variation sinusoïdale de la température extérieure représentant la variation quotidienne de la température

CHAPITRE II

ambiante en période estivale pour la ville de Khouribga qui varie entre 25°C la nuit et 45°C en cours de la journée.

Les hypothèses adoptées pour ce problème, les équations d'énergie régissant le comportement thermique des éléments constituant le système étudié et la résolution numérique des équations algébriques obtenues par la discrétisation en volumes finis, seront exposés.

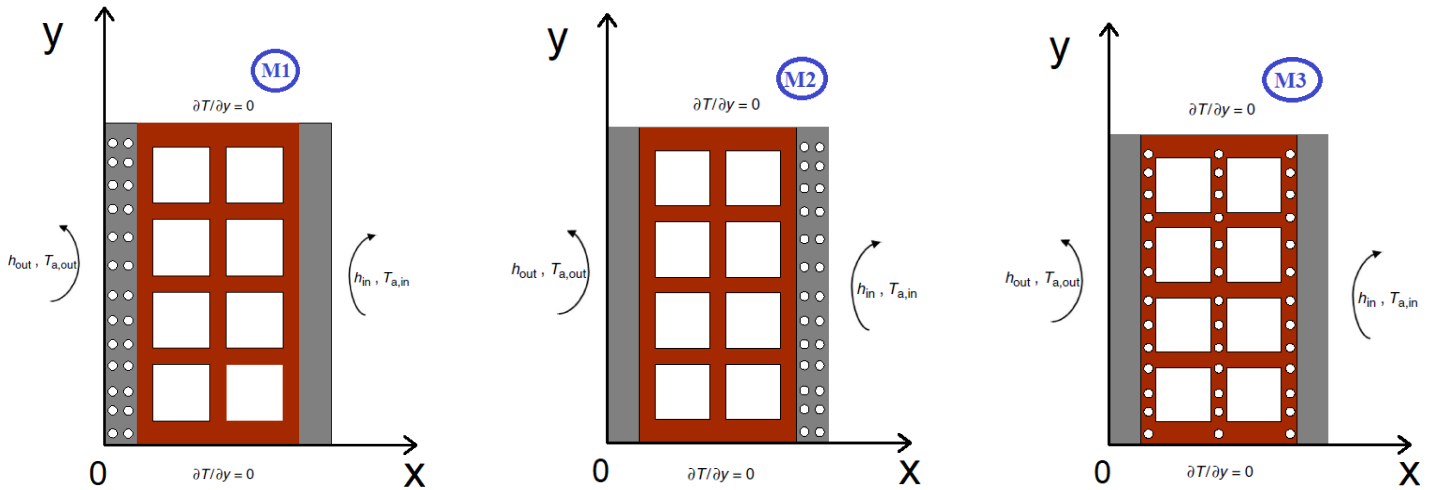


Figure II-1. Configurations des différents types de mur multicouche (M1, M2, M3)

II.2.2 | Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses suivantes ont été prises en compte dans le modèle mathématique pour le système étudié :

- Le transfert de chaleur se fait en deux dimensions.
- Le transfert de chaleur se fait en régime instationnaire.
- Les propriétés thermo physiques de la brique sont constantes.
- Le contact est parfait aux interfaces.
- La convection est négligeable dans la phase fondue du MCP et dans les cavités d'air.
- Les faces inférieure et supérieure de la brique sont isolées thermiquement (parois adiabatique).
- La chaleur transmise des surfaces latérales vers l'air extérieur et intérieur se fait par convection naturelle.

CHAPITRE II

- Le transfert de chaleur par rayonnement est supposé négligeable en vue de la dominance des autres modes de transfert (convection et conduction).

II.2.3 | Résolution numérique pour la micro-encapsulation du MCP dans le mur multicouche

Le principal défi posé par les problèmes de changement de phase réside dans la non-linéarité engendrée par la présence d'une interface de position du front de fusion qui évolue dans le temps.

En général, deux méthodes peuvent être utilisées et se divisent en deux principales classes :

- méthodes à grille mobile ou déformable (méthode de Stéphan analytique) : Le maillage est régénéré à chaque instant afin qu'une de ses lignes se superpose à ce front.
- méthodes à grille spatiale fixe nommées aussi "méthodes enthalpiques", englobent la méthode de l'enthalpie totale, la méthode de capacité thermique apparente et la méthode de terme source latente.

La méthode enthalpique présente l'avantage de ne résoudre qu'une seule équation d'énergie et une autre de la fraction liquide permettant ainsi de déterminer aussi bien les champs de température dans les deux phases du MCP que la position et la forme de l'interface solide/liquide séparant les deux phases.

La méthode enthalpique a été choisie pour la formulation et le traitement de l'équation de l'énergie régissant le comportement thermique du MCP et de la brique creuse et se fera d'une façon bidimensionnelle en suivant la direction Ox et Oy.

II.2.3.1 | Méthode enthalpique

Compte tenu des hypothèses précédentes, on peut écrire l'équation de l'énergie sous la forme suivante :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (\text{II-1})$$

Nous mentionnons que l'indice (i) est relatif aux couches constituant le mur multicouche (mortier, brique, air et MCP)

L'enthalpie volumique totale H en fonction de la température T peut être décomposée comme somme de l'enthalpie sensible h(T) et de la chaleur latente comme suit :

$$H(T) = h(t) + (\rho L)_i f \quad (\text{II-2})$$

$$h(t) = \int_{T_m}^T (\rho c_p)_i dT \quad (\text{II-3})$$

CHAPITRE II

$$h(t) = (\rho c_p)_i (T - T_m) \quad (\text{II-4})$$

En remplaçant l'équation (2) dans l'équation (1), l'équation de l'énergie prend la forme suivante :

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = \alpha_i \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \alpha_i \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right) - (\rho L)_i \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) \quad (\text{II-5})$$

La fraction liquide :

- $f=0$ si le MCP est en phase solide.
- $f=1$ si le MCP en phase liquide.

Cependant, en introduisant les microcapsules du MCP dans les différentes couches du mur multicouche, la méthode utilisée pour la résolution des équations est la méthode d'enthalpie, l'équation de l'énergie prendra la forme suivante :

(a). **Pour les couches avec microcapsules d'MCP**

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = \alpha_i \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \alpha_i \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right) - \varepsilon(\rho L)_i \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) \quad (\text{II-6})$$

(b). **Pour les couches sans microcapsules d'MCP**

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = \alpha_i \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \alpha_i \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right) \quad (\text{II-7})$$

Avec ε représente la fraction massique des microcapsules du MCP

II.2.4 | Conditions aux limites

$$\blacksquare -\alpha \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)_{x=0} = h_{\text{ext}}(T_{\text{ext}}(t) - T_{(x=0,t)})$$

Avec : $T_{\text{ext}}(t) = 35 + 10\sin\left(\frac{\pi}{12}t\right)$ Et $h_{\text{ext}} = 20 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{k})$

$$\blacksquare -\alpha \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)_{x=L} = h_{\text{int}}(T_{(x=L,t)} - T_{\text{int}})$$

Avec : $T_{\text{int}}(t) = 26^\circ\text{C}$ Et $h_{\text{int}} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{k})$ [46]

$$\blacksquare -\alpha \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)_{y=0} = -\alpha \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)_{y=E} = 0$$

II.2.5 | Condition initiale

$$\blacksquare T(x, y, 0) = 26^\circ\text{C}$$

CHAPITRE II

II.2.6 | Discrétisation par volumes finis

Pour la première fois en 1971, la méthode des volumes finis a été décrite par PATANKAR et SPALDING, ensuite publiée en 1980 par PATANKAR[73], cette dernière est une méthode de discrétisation qu'on utilise pour résoudre numériquement les équations différentielles aux dérivées partielles. La méthode des volumes finis est basée sur l'intégration des équations de transport qui gouvernent les écoulements des fluides et les équations d'énergie qui gouvernent le transfert de chaleur.

Cette méthode est distinguée par sa fiabilité aux résultats, son adaptation aux problèmes physiques, sa possibilité de traiter des géométries complexes, sa garantie pour la conservation de masse, de quantité de mouvement et de tout produit scalaire transportable sur chaque volume de contrôle dans tout le domaine de calcul.

Elle consiste à discrétiser le domaine d'étude en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volume de contrôle (Figure II.2), puis d'effectuer des bilans relatifs aux équations régissant du problème sur ces petits volumes.

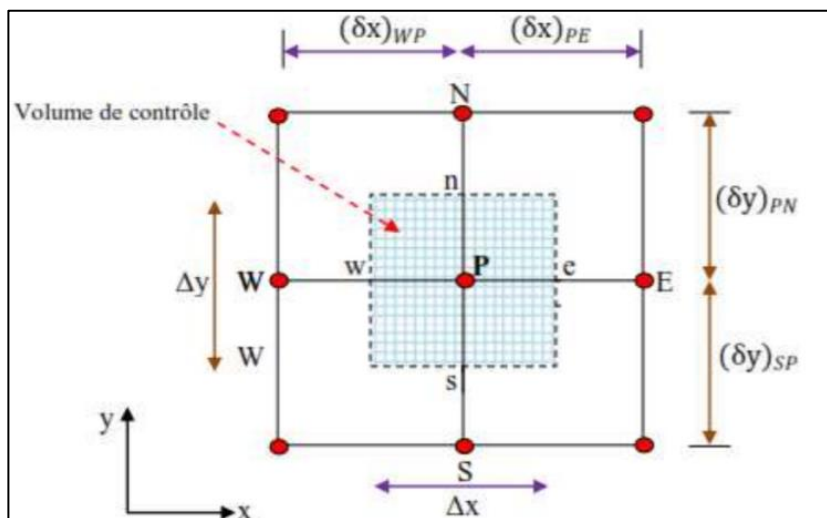


Figure II-2. Volume de contrôle typique pour un cas bidimensionnel

Chacun des volumes de contrôle englobe un nœud dit nœud principal P, les points E et W (Est et Ouest) sont des voisins dans la direction x, tandis que N et S (Nord et Sud) sont ceux dans la direction y.

Le volume de contrôle entourant le nœud principale P est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points e et w dans la direction x ; n et s dans la direction y.

CHAPITRE II

Les distances entre les nœuds N et P et celle entre P et S sont dénotées respectivement $\delta y(\text{PN})$ et $\delta y(\text{SP})$. De la même façon, on dénote par $\delta y(\text{PE})$ et $\delta y(\text{WP})$ la distance qui sépare E et P et P et W. La longueur du volume de contrôle selon la direction y est de $\Delta y = \delta y$ et de $\Delta x = \delta x$ selon la direction x.

La discrétisation de l'équation de l'énergie (5) par la méthode des volumes finis se fait par l'intégration de cette dernière comme suit :

$$\iiint \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) dx dy dt = \iiint \left[\alpha_i \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + \alpha_i \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) - \varepsilon(\rho L)_i \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) \right] dx dy dt$$

$$\frac{h_p - h_p^0}{\Delta t} = \alpha_i \frac{h_e - 2h_p + h_w}{\Delta x^2} + \alpha_i \frac{h_s - 2h_p + h_N}{\Delta y^2} - \varepsilon(\rho L)_i \left(\frac{f_p - f_p^0}{\Delta t} \right)$$

Donnant les indices i et j pour les nœuds de la direction x et y respectivement, on obtient

$$h_{(i,j)} - h_{(i,j)}^0 = \alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (h_{(i-1,j)} - 2h_{(i,j)} + h_{(i+1,j)}) + \alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (h_{(i,j-1)} - 2h_{(i,j)} + h_{(i,j+1)}) - \varepsilon(\rho L)_i (f_{(i,j)} - f_{(i,j)}^0)$$

$$\left(-\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) h_{(i-1,j)} + \left(1 + 2\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + 2\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \right) h_{(i,j)} + \left(-\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) h_{(i+1,j)} = h_{(i,j)}^0 + \alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (h_{(i,j-1)} + h_{(i,j+1)}) - \varepsilon(\rho L)_i (f_{(i,j)} - f_{(i,j)}^0)$$

L'équation discrétisée prend la forme suivante :

$$a_e h_{(i+1,j)} + a_p h_{(i,j)} + a_w h_{(i-1,j)} = b$$

Où a_e , a_p , a_w sont les coefficients respectifs de $h_{(i+1,j)}$, $h_{(i,j)}$, $h_{(i-1,j)}$ et b est le terme source de l'équation. Ces coefficients sont décrits dans le Tableau suivant :

Tableau II-1 : Coefficients ai et le terme source b pour le MCP.

a_e	$\left(-\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right)$
a_p	$\left(1 + 2\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + 2\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \right)$
a_w	$\left(-\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right)$
b	$h_{(i,j)}^0 + \alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (h_{(i,j-1)} + h_{(i,j+1)}) - \varepsilon(\rho L)_i (f_{(i,j)} - f_{(i,j)}^0)$

CHAPITRE II

Pour la brique et l'air la fraction liquide est nulle et les coefficients a_i et le terme source b relatifs sont définis comme suit :

Tableau II-2 : Coefficients a_i et le terme source b pour la brique et la lame d'air.

Ae	$(-\alpha_i \frac{\Delta t}{\delta x^2})$
Ap	$(1 + 2\alpha_i \frac{\Delta t}{\delta x^2} + 2\alpha_i \frac{\Delta t}{\delta y^2})$
Aw	$(-\alpha_i \frac{\Delta t}{\delta x^2})$
B	$h_{(i,j)}^0 + \alpha_i \frac{\Delta t}{\delta y^2} (h_{(i,j-1)} + h_{(i,j+1)})$

II.2.7 | Mise à jour de la fraction liquide

Pour le matériau à changement de phase, à chaque itération, un résolveur des systèmes linéaires des matrices tri-diagonaux (TDMA) est utilisé pour résoudre le système d'équation, suivi d'une mise à jour de la fraction liquide f . Après la $(k+1)^{ème}$ application du résolveur TDMA, on réarrange ce système de la manière suivante :

$$a_p h_{(i,j)} = -a_e h_{(i+1,j)} - a_w h_{(i-1,j)} + h_{(i,j)}^0 + \alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (h_{(i,j-1)} + h_{(i,j+1)}) - \varepsilon(\rho L)_i (f_{(i,j)}^k - f_{(i,j)}^0)$$

Si le MCP est en train de se fondre alors la $i^{ème}$ valeur de la fraction liquide doit être mise à jour ($h_p=0$) :

$$0 = -a_e h_{(i+1,j)} - a_w h_{(i-1,j)} + h_{(i,j)}^0 + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (h_{(i,j-1)} + h_{(i,j+1)}) - \varepsilon(\rho L)_i (f_{(i,j)}^{k+1} - f_{(i,j)}^0)$$

En sous-traitant ces deux équations membre à membre, la mise à jour de la fraction liquide est calculée par :

$$f_{(i,j)}^{k+1} = f_{(i,j)}^k + \omega \frac{a_p h_{(i,j)}}{\rho L}$$

ω : facteur de relaxation

On complète cette équation pour les nœuds où il n'y a pas de changement de phase par la correction suivante :

CHAPITRE II

$$f_{(i,j)} = 0 \text{ si } f_{(i,j)} < 0$$

$$f_{(i,j)} = 1 \text{ si } f_{(i,j)} > 1$$

La convergence du calcul itératif est obtenue lorsque le critère mathématique suivant est satisfait :

$$\frac{|H_p^n - H_p^{n+1}|}{|H_p^n|} < 10^{-6}$$

II.2.8 | Optimisation du maillage et du pas de temps

Avant de procéder à la validation du modèle, une étude d'optimisation du maillage et du pas de temps a été faite, afin de réaliser un accommodement entre le temps de calcul et la précision des résultats des simulations numériques.

L'optimisation du maillage est élaborée pour la configuration du mur M3, incorporant les microcapsules du MCP n-octadécane dans la matrice solide de la brique creuse.

Les propriétés thermophysiques du MCP n-octadécane sont prises de la littérature[74][75] (Tableau III-2).

Les Tableaux et Figures suivantes présentent l'effet de différents maillages sur la température surfacique moyenne du mur multicouche ; le pas de temps choisi étant $\Delta t=5\text{sec}$.

Nous observons à partir du Tableau II.5 que le passage du maillage de 0.3 cm à 0.2 cm a entraîné une variation de température 0.018%, ainsi ce passage a entraîné une variation de la fraction liquide de 0.01%, de ce fait un maillage de 0.3 cm sera considéré.

Pour l'effet des différents pas de temps : $\Delta t=5, 2$ et 1s sur la température interne de surface, le Tableau II.5 présente les variations relatives à la température interne de surface pour les différents pas de temps choisis. Comme on peut l'observer, le passage de $\Delta t=2\text{s}$ à $\Delta t=5\text{s}$ a entraîné une variation relative de la température interne de l'ordre de 0.015% et une différence de 0.004°C , en plus d'une variation de la fraction liquide de 0.572%. Finalement le maillage choisi est de 0.3 cm avec un pas de temps de 2 secondes.

CHAPITRE II

Tableau II-3 : Effet du maillage sur la température interne pour la brique à changement de phase.

dx (cm)	dy (cm)	T(i=N)	V.R[%]	Différence	fr(i=N)	V.R[%]	Différence
0.3	0.3	27.754			0.09351		
0.2	0.2	27.749	0.018%	0.005	0.09352	0.011%	1.00E-05
0.1	0.1	27.734	0.054%	0.015	0.09363	0.118%	1.10E-04

Tableau II-4 : Effet du pas de temps sur la température interne pour la brique à changement de phase

dt	T(i=N)	V.R[%]	Différence	fr(i=N)	V.R[%]	Différence
1s	26.261			0.088		
2s	26.263	0.008%	0.002	0.0874	0.682%	6.00E-04
5s	26.267	0.015%	0.004	0.0869	0.572%	5.00E-04

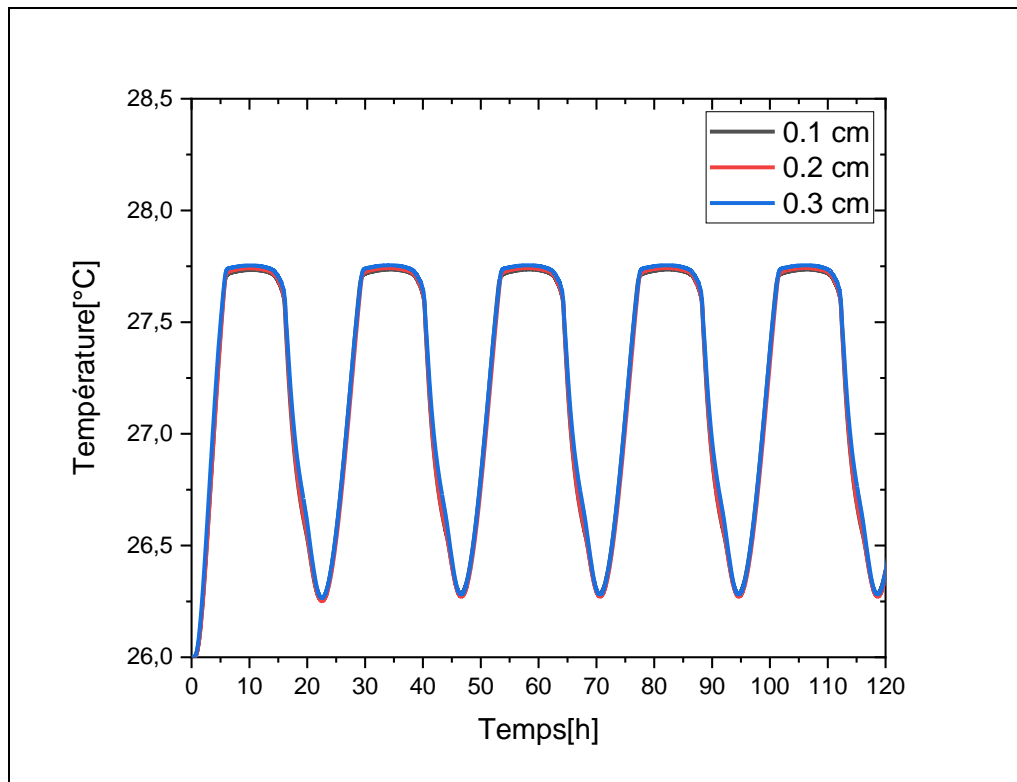


Figure II-3 : Effet du maillage sur la température interne pour le mur multicouche.

CHAPITRE II

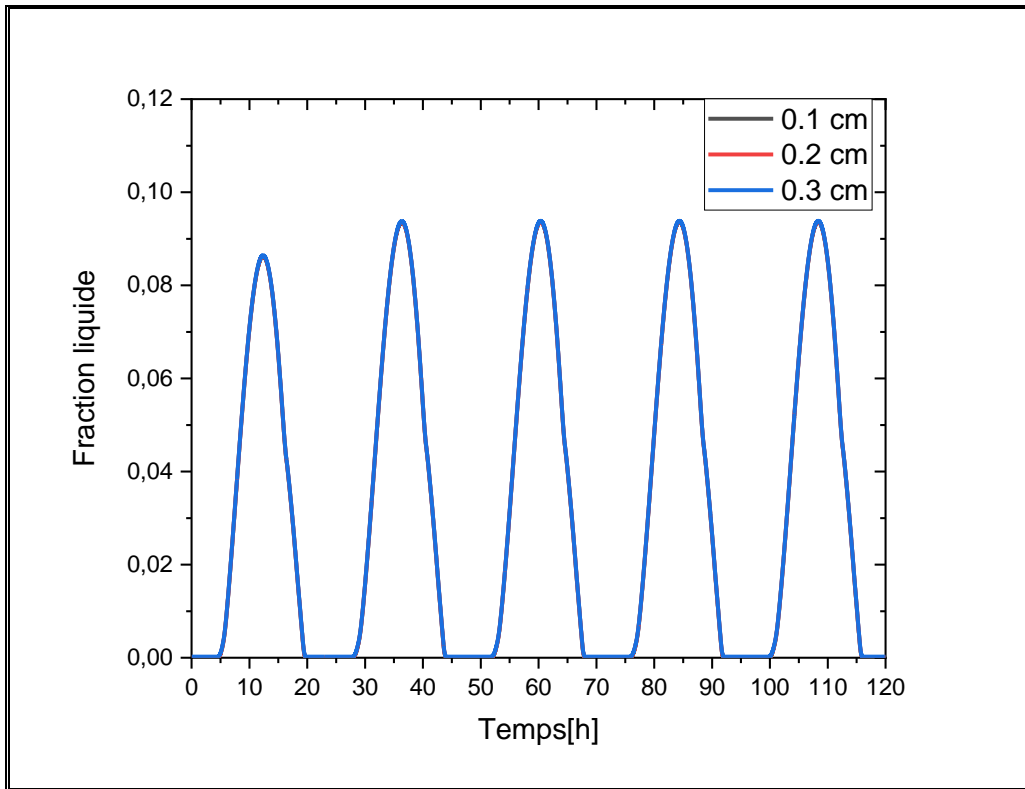


Figure II-4 : Effet du maillage sur la variation de la fraction liquide des MCP incorporés dans le mur multicouche.

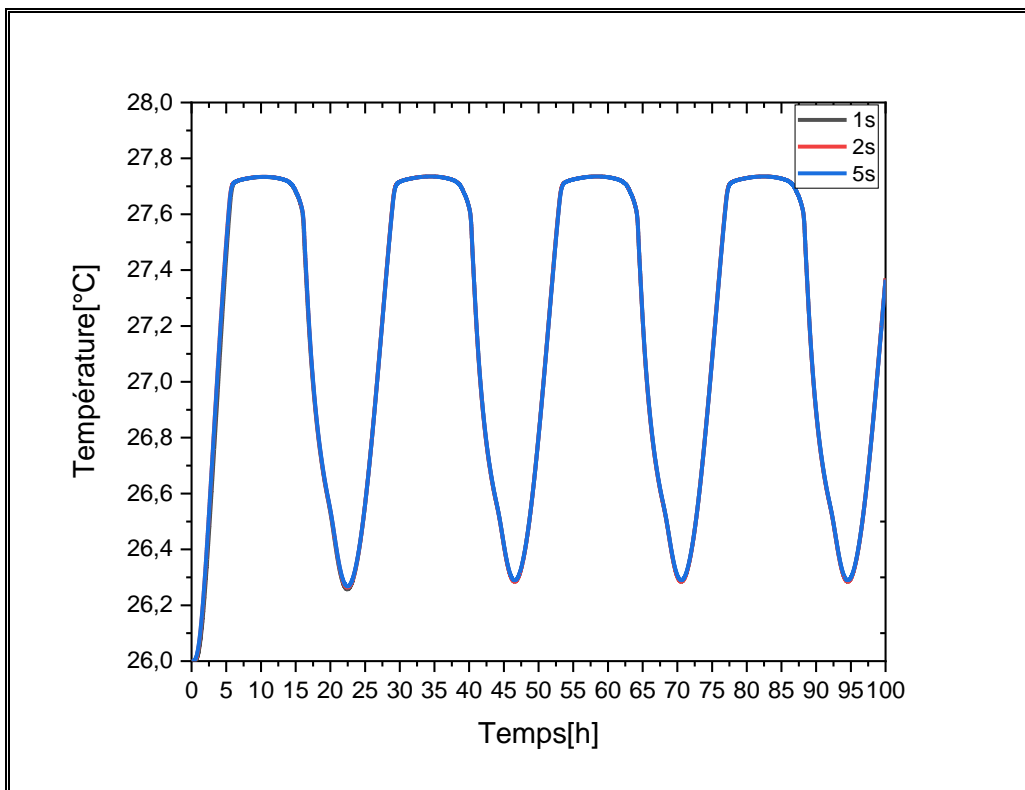


Figure II-5 : Effet du pas de temps sur la température interne pour le mur multicouche.

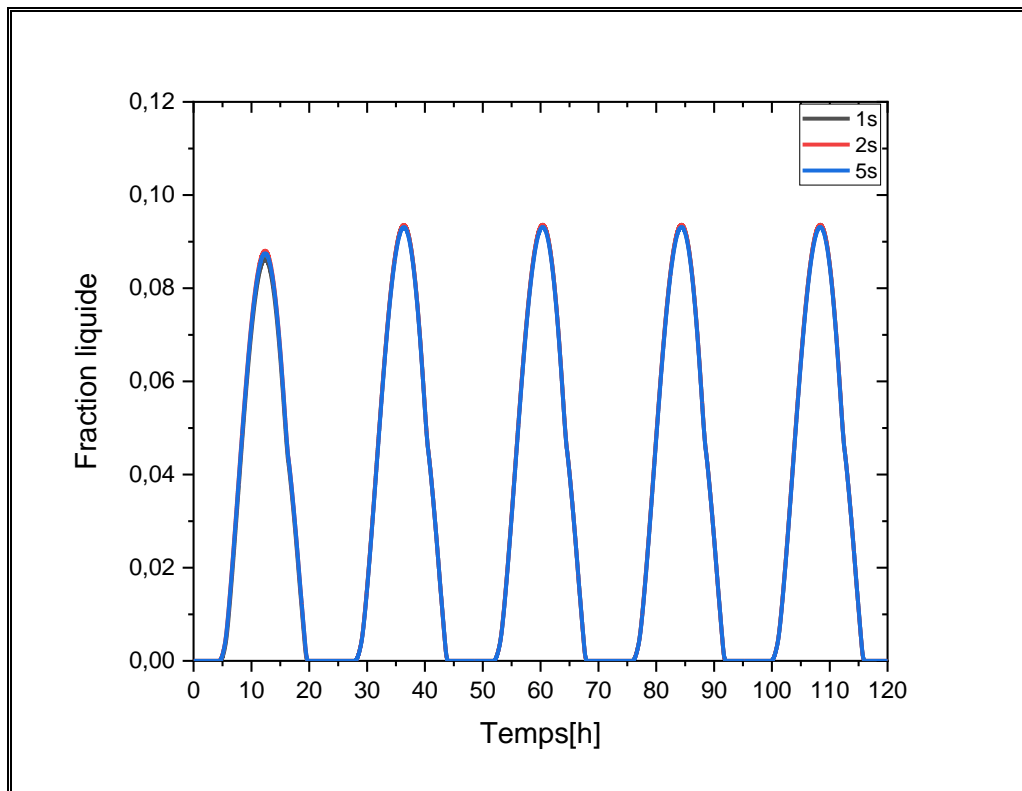


Figure II-6 : Effet du pas de temps sur la variation de la fraction liquide des MCP incorporés dans le mur multicouche.

II.2.9 | Validation avec les résultats de la littérature

Pour se permettre de mener une étude paramétrique, il est primordial de passer par l'étape de la validation de notre modèle numérique avec les résultats expérimentaux antérieurs de la littérature.

En première partie, il s'agit de la fusion d'un bloc semi-infini d'un MCP pur (paraffine n-octadécane) de 4cm d'épaisseur, initialement à la température de fusion $T=T_m=28^{\circ}\text{C}$.

On lui impose une température constante supérieure à sa température de fusion ($T_L=38^{\circ}\text{C}$) à la frontière ouest, et il est supposé adiabatique pour les autres cotés.

On suppose que le transfert de chaleur se fait uniquement par conduction à travers le MCP. Ce modèle numérique relatif au bloc semi-infini d'MCP est validé par comparaison à la solution analytique de ce problème. Ce dernier est résolu analytiquement, puis à l'aide d'un logiciel de calcul, la position du front de fusion pour les deux modèles est comparée.

CHAPITRE II

En deuxième partie, le MCP est introduit lors de sa fabrication dans les cavités d'une brique creuse du commerce de dimension : 11cmx21.5cm et de 15cm de hauteur. Chaque cavité est un parallélépipède de section 2.5cmx2.5cm.

La FigureII.7 présente une photographie de la brique creuse traditionnelle et de la brique contenant le MCP dans ses cavités, ainsi les dimensions de la face supérieure de la brique sont précisées. La quantité des MCP dans la brique représente 26% en volume[76]. Ce problème est résolu numériquement puis comparé à la solution du modèle expérimentale.

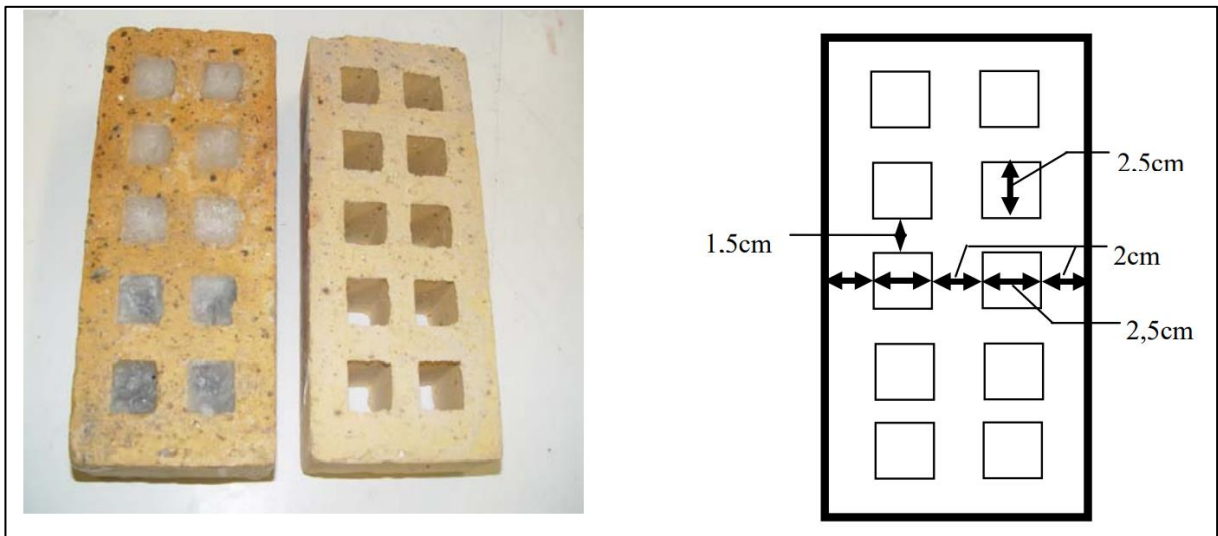


Figure II-7 : photographie de la brique creuse traditionnelle et de la brique contenant le MCP dans ses cavités[6].

II.2.9.1 | Comparaison de la solution du modèle numérique avec la solution du modèle analytique pour le MCP n-octadécane

Une des formulations les plus classiques du processus de changement de phase est celle appliquée à la solution du « problème de Stefan » ([77] [78]). Il s'agit de la solidification monodimensionnelle d'un produit pur confiné dans un espace semi-infini ($0 \leq x < \infty$). D'après ces références, la position du front de fusion est présentée sur la Figure II.8 et montre bien la géométrie du problème.

CHAPITRE II

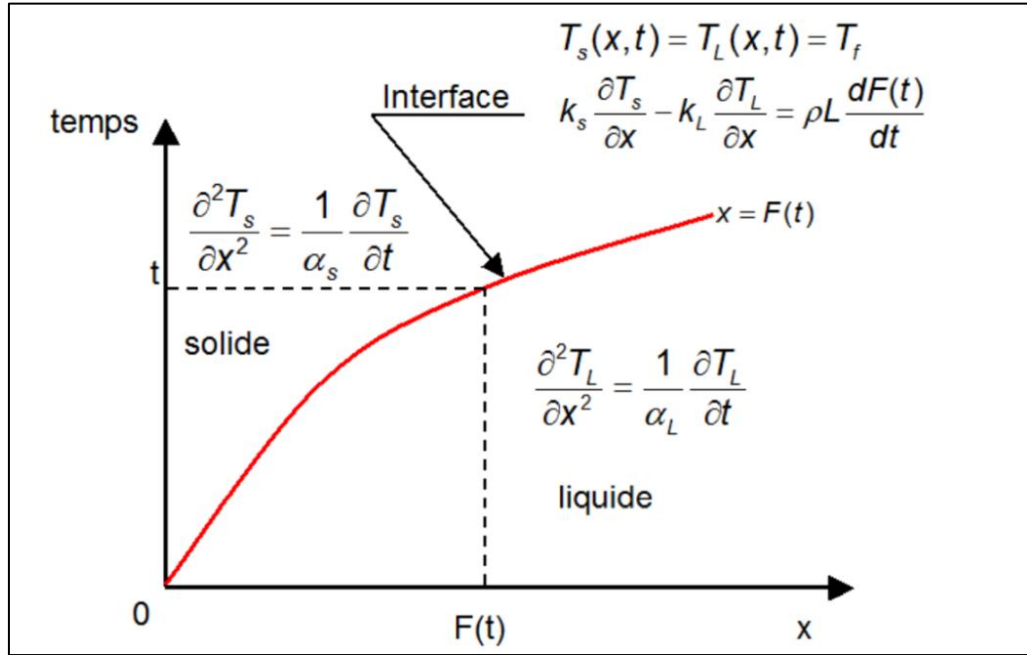


Figure II-8: Illustration schématique du problème de Stefan : position du front de fusion

La formulation mathématique de ce problème pour la phase solide est donnée comme :

$$\frac{dT_s}{dx^2} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{dT_s(x,t)}{dt} \quad \text{Pour } 0 < x < f(t), t > 0 \quad (\text{II-8})$$

$$T_s(x, t) = T_0 \quad \text{Pour } x = 0, t > 0 \quad (\text{II-9})$$

Pour la phase liquide, La formulation est donnée comme suit :

$$\frac{dT_l}{dx^2} = \frac{1}{\alpha_l} \frac{dT_l(x,t)}{dt} \quad \text{Pour } f(t) < x < \infty, t > 0 \quad (\text{II-10})$$

$$T_l(x, t) = T_i \quad \text{Pour } t = 0, x > 0 \quad (\text{II-11})$$

$$T_l(x, t) = T_i \quad \text{Pour } x \rightarrow \infty, t > 0 \quad (\text{II-12})$$

Et les conditions de couplage à l'interface $x=f(t)$ sont comme suit :

$$T_s(x, t) = T_l(x, t) = T_f \quad \text{Pour } x = f(t), t > 0 \quad (\text{II-13})$$

$$K_s \frac{dT_s}{dx} - K_l \frac{dT_l}{dx} = \rho L \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) \quad \text{Pour } x = f(t), t > 0 \quad (\text{II-14})$$

Rappelant que la solution de l'équation de conduction thermique se présente sous la forme suivante pour $T_s(x, t)$ et $T_l(x, t)$:

$$T_s(x, t) = T_0 + A \operatorname{erf}\left[\frac{x}{2(\alpha_s t)^{1/2}}\right] \quad (\text{II-15})$$

$$T_l(x, t) = T_i + B \operatorname{berfc}\left[\frac{x}{2(\alpha_l t)^{1/2}}\right] \quad (\text{II-16})$$

Les constantes A et B sont à déterminer.

Les équations (15) et (16) sont introduites dans la condition d'interface (13), on trouve :

$$T_0 + A \operatorname{erf}(\lambda) = T_i + B \operatorname{berfc}\left[\lambda \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_l}\right)^{1/2}\right] = T_f \quad (\text{II-17})$$

CHAPITRE II

$$\lambda = \frac{f(t)}{2(\alpha_s t)^{(1/2)}} \text{ d'où } f(t) = 2\lambda(\alpha_s t)^{(1/2)} \quad (\text{II-18})$$

Les coefficients A et B sont déterminés à partir des équations (17) et (18) comme suit :

$$A = \frac{T_f - T_0}{\text{erf}(\lambda)}$$

$$B = \frac{T_f - T_i}{\text{erfc}\left(\lambda\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_l}\right)^{(1/2)}\right)}$$

En introduisant les coefficients A et B dans les équations (15) et (16), nous obtenons les températures pour les phases solide et liquide comme suit :

$$\frac{T_s(x,t) - T_0}{T_f - T_0} = \frac{\text{erf}\left(\frac{x}{2(\alpha_s t)^{(1/2)}}\right)}{\text{erf}(\lambda)} \quad (\text{II-19})$$

$$\frac{T_l(x,t) - T_0}{T_f - T_0} = \frac{\text{erfc}\left(\frac{x}{2(\alpha_l t)^{(1/2)}}\right)}{\text{erfc}\left(\lambda\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_l}\right)^{(1/2)}\right)} \quad (\text{II-20})$$

L'équation de bilan énergétique d'interface est maintenant utilisée pour déterminer la relation pour l'évaluation du paramètre λ .

Autrement dit, lorsque $f(t)$, $T_s(x, t)$ et $T_l(x, t)$ des équations (18), (19) et (20) respectivement sont substitués dans l'équation (14), nous obtenons l'équation transcendante suivante pour la détermination de λ .

$$\lambda e^{\lambda^2} \text{erf}(\lambda) = \frac{c_p(T_0 - T_f)}{L\sqrt{\pi}} \quad (\text{II-21})$$

Une approximation analytique pour λ est donnée par l'équation (22) présentés dans [79]

$$\lambda = 0.706\sqrt{St}(1 - 0.21(0.5642 \cdot St)^{(0.03 - 0.15St)}) \quad (\text{II-22})$$

Une fois que λ est connu à partir de la solution de cette équation, $f(t)$ est déterminé à partir de l'équation (18), $T_s(x,t)$ à partir de l'équation (19) et $T_l(x,t)$ à partir de l'équation (20).

Concernant la validation de la solution analytique et numérique, la Figure II.9 montre la position du front de fusion en fonction du temps.

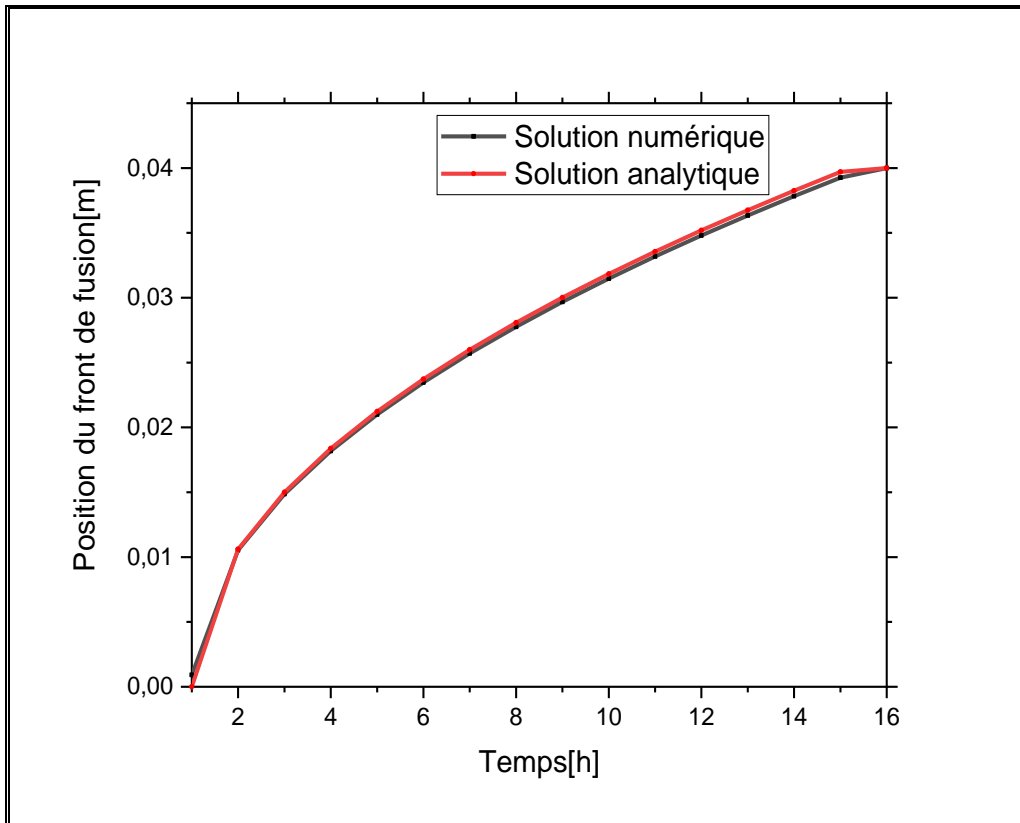


Figure II-9 : Comparaison de la solution numérique avec la solution analytique pour le MCP n-octadécane

La comparaison entre les deux modèles donne une courbe numérique très proche de la courbe analytique avec une erreur moyenne calculé par l'équation (23) de l'ordre de 1% et une différence moyenne de fraction liquide à l'ordre de 2.4E-04 mm.

$$ERR = \left(\sum_{1,2,\dots,N} \frac{|f_{exp} - f_{sim}|}{f_{exp}} \right) / N \quad (II-23)$$

A la lumière de ces résultats, nous considérons que le modèle numérique représente correctement le phénomène de changement de phase à travers le MCP n-octadécane.

II.2.9.2 | Comparaison avec le résultat expérimental pour la brique à changement de phase

La Figure II.10 montre la comparaison entre nos résultats numériques avec ceux obtenus dans l'expérimentation [76] sur la variation de température de la face interne de la brique creuse avec MCP, la comparaison entre les deux modèles présente une courbe numérique très proche de la courbe expérimentale avec une erreur moyenne de 1.5% et une différence moyenne de 0.4°C, Ceci peut s'expliquer par la présence de la convection naturelle dans l'expérimentale,

CHAPITRE II

et aussi notre étude numérique est faite en supposant deux dimensions par contre à la présence de la troisième dimension en expérimentale. En générale, nous aboutissons à que notre modèle numérique est valide pour prédire des résultats plus proches de la réalité.

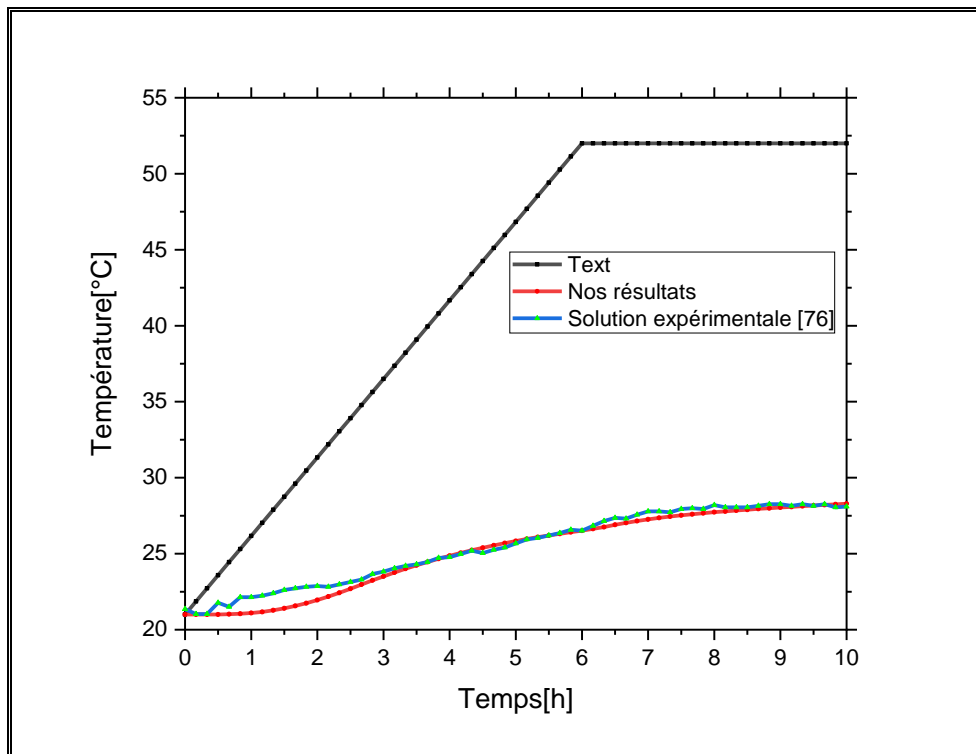


Figure II-10 : Comparaison avec le résultat expérimental pour la brique à changement de phase.

II.3 |Intégration des matériaux à changement de phase dans le plancher chauffant.

La technique de chauffage par le sol a été développée dans les années 1960, cette dernière fonctionnait comme des radiateurs traditionnels, en chauffant de l'eau qui circule dans les tubes de chauffage et en suite cédant la chaleur à la surface supérieure du plancher, ensuite l'ambiance de la pièce se réchauffe par convection.

L'objectif de cette étude est de déterminer la distribution spatiale et temporelle de la température au niveau d'un plancher chauffant avec intégration de microcapsules de matériaux à changement de phase dans la couche contenant les tubes de chauffage.

Nous soulignons que les tubes sont supposés entourer d'un matériau à haute conductivité thermique, ceci permet de supposer que la température à la surface des tubes chauffants est supposée uniforme et proche de la température de l'eau.

Cette étude sera élaborée en régime instationnaire en se basant sur la résolution de l'équation de la diffusion de chaleur en deux dimensions, ainsi les échanges de chaleur dans notre étude

CHAPITRE II

se feront en prenant en compte que la conduction thermique et en négligeant le phénomène de convection.

L'échange avec l'ambiance interne se fait par convection.

Nous présenterons en premier lieu la description du système étudié, ensuite nous allons aborder l'approche physique du problème et la formulation mathématique qui nous conduira par la suite à la résolution numérique du problème en utilisant l'approche de calcul par la méthode des volumes finis.

II.3.1 | Description du système étudié

Notre système est un plancher chauffant qui est constitué de cinq couches, le système donné est relatif à une configuration typique à l'échelle réelle prise de la littérature [80].

Une première couche qui correspond à une chape de ciment de 4 cm suivie de 4cm de liège et d'une isolation thermique EPS, la couche qui vient après est celle dans laquelle sont introduits les tubes de chauffage et les microcapsules de matériau à changement de phase et finalement une couche de revêtement constitué par 2cm de marbre.

La Figure II.11 illustre la composition du plancher chauffant étudié. La température de l'eau qui circule dans les tubes est prise d'une étude expérimentale de la littérature[81]. Les propriétés thermo physiques des matériaux utilisés sont représentées dans les Tableaux II.7 et II.8.

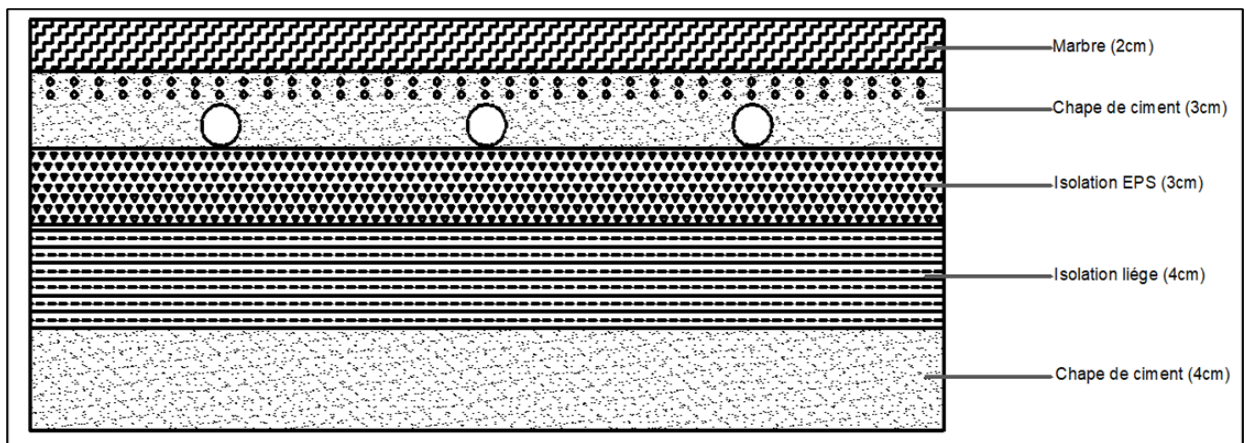


Figure II-11 : Configuration du plancher chauffant avec microcapsules de matériau à changement de phase.

CHAPITRE II

Tableau II-5 : Propriétés thermophysiques des matériaux de construction de la dalle

Numéro du matériau de construction (i)	Matériaux de construction	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/(m K)]	Capacité thermique spécifique [J/(kg K)]
1	Liège	400	0.065	1500
2	Marbre	2800	3.5	1000
3	Chape de ciment	1600	0.85	1000
4	EPS	29	0.04	1450

Tableau II-6 : Propriétés thermophysiques du MCP

Température de fusion [°C]	27
Chaleur latente de fusion [J/kg]	185 000
Masse volumique (solide / liquide) [kg/ m ³]	1500
Conductivité thermique (solide / liquide) [W/(m.k)]	0.54
Capacité thermique spécifique (solide / liquide) [J/(kg K)]	2200

II.3.2 | Hypothèses simplificatrices

Le bilan thermique de la diffusion de la chaleur au sein de la dalle chauffante est élaboré en adoptant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes.
- Le transfert de la chaleur dans la dalle et dans le fluide est instationnaire et bidimensionnel (2D).
- La dalle chauffante est supposée adiabatique dans tous les côtés, sauf la façade supérieure en contact avec l'ambiance interne.
- Le contact est parfait aux interfaces.
- La convection est négligeable dans la phase fondue du MCP.
- Les tubes sont entourés d'un matériau conducteur de telle façon que la température de l'eau est égale à la température de surface des tubes chauffants.

CHAPITRE II

- Le transfert de chaleur dans la couche contenant les tubes et les microcapsules se fait par symétrie.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est supposé négligeable en vue de la dominance des autres modes de transfert (convection et conduction).

II.3.3 | Formulation mathématique

Compte tenu des hypothèses précédentes, l'équation de l'énergie pour toutes les couches sauf la couche contenant les tubes et les microcapsules prend la forme suivante :

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = \alpha_i \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \alpha_i \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right) \quad (\text{II-24})$$

Pour la couche contenant les tubes chauffants et les microcapsules, la Figure II.12 illustre la symétrie du problème.

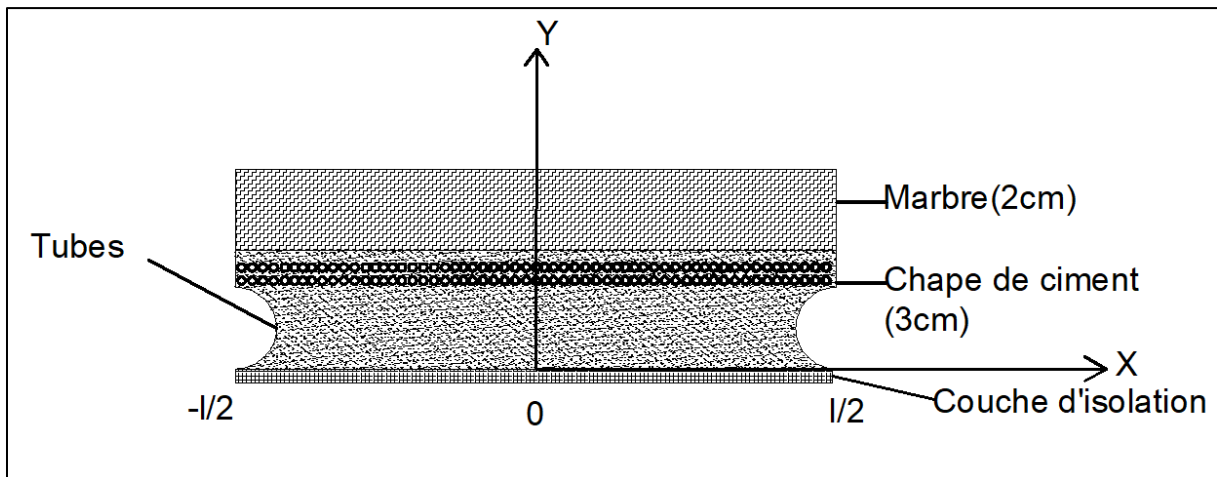


Figure II-12 : Symétrie du problème au niveau de la couche contenant les tubes chauffants et les MCPs.

Cependant, les conditions aux limites sont identiques pour chaque face sauf pour la face qui représente la face en contact avec l'ambiance interne.

La résolution du « demi-problème » est équivalente à celle du problème global en considérant que les mêmes phénomènes existent de part et d'autre, par symétrie.

L'ajout du terme ε du pourcentage de micro-encapsulation des MCPs est indispensable, dans ce cas l'équation prend la forme suivante :

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) = \alpha_i \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \alpha_i \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right) - \varepsilon(\rho L)_i \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) \quad (\text{II-25})$$

CHAPITRE II

II.3.3.1 | Conditions aux limites

$$\blacksquare -\alpha \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)_{y=h} = h_{\text{int}} (T_{(y=h,t)} - T_{\text{int}})$$

$$h_{\text{int}} = 10 \text{ W/ (m}^2\text{.K) et } T_{\text{int}} = 20^\circ\text{C}$$

$$\blacksquare -\alpha \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)_{y=0} = 0$$

La température de l'eau imposée aux niveaux des tubes pour les deux plans de symétrie droite et gauche est représentée sur la Figure II.1 et décrite par :

$$T|_{(x+1/2)^2+(y-R)^2=R^2} = T|_{(x-1/2)^2+(y-R)^2=R^2} = T_{\text{eau}}$$

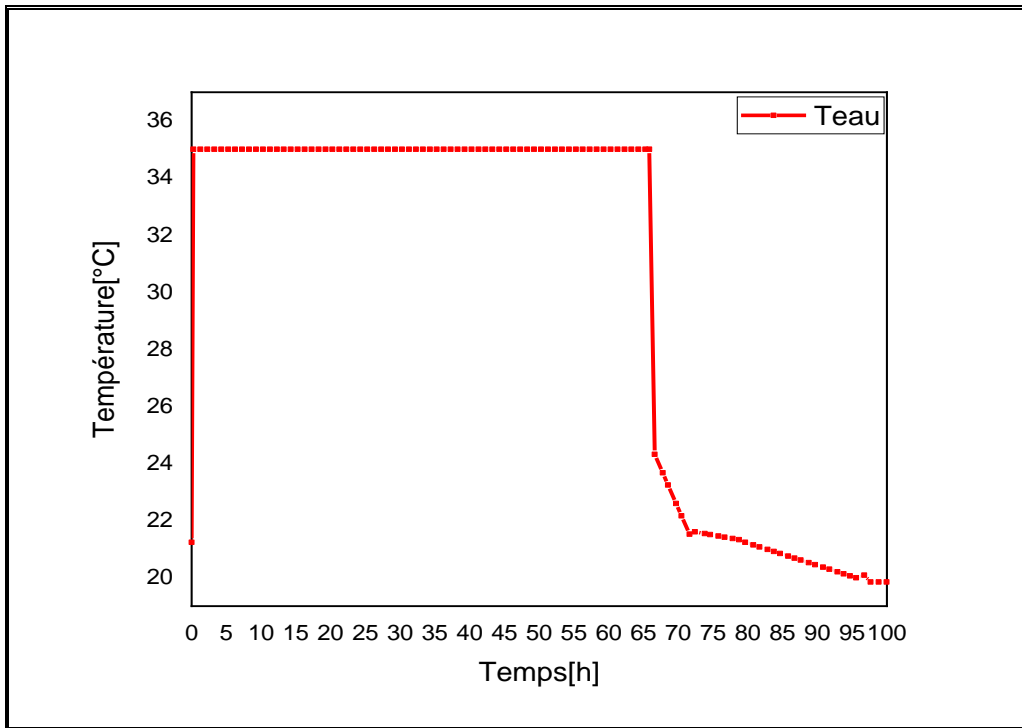


Figure II-13 : Température de l'eau imposée sur les surfaces des tubes chauffants.

II.3.3.2 | Condition initiale

$$\blacksquare T(x, y, 0) = T_{\text{int}}$$

CHAPITRE II

II.3.4 | Résolution par la méthode de volumes finis

La discrétisation de l'équation de l'énergie par la méthode de volumes finis, et comme pour le premier cas du mur multicouche les coefficients des équations discrétisées sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau II-7 : Coefficients a_i et le terme source b pour les couches sans microcapsules des MCP.

ae	$(-\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2})$
ap	$(1 + 2\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + 2\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta y^2})$
aw	$(-\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2})$
b	$h_{(i,j)}^0 + \alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (h_{(i,j-1)} + h_{(i,j+1)})$

Pour la partie du système dans laquelle existent les microcapsules des MCP, les coefficients a_i et le terme source b relatifs sont définis comme suit :

Tableau II-8 : Coefficients a_i et le terme source b pour les couches avec microcapsules des MCP.

ae	$(-\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2})$
ap	$(1 + 2\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + 2\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta y^2})$
aw	$(-\alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta x^2})$
b	$h_{(i,j)}^0 + \alpha_i \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (h_{(i,j-1)} + h_{(i,j+1)}) - \varepsilon(\rho L)_i (f_{(i,j)} - f_{(i,j)}^0)$

CHAPITRE II

Dans ce cas, pour le matériau à changement de phase, à chaque itération, un résolveur des systèmes linéaires de matrices tri-diagonaux (TDMA) est utilisé pour résoudre le système d'équation, suivi d'une mise à jour de la fraction liquide f après la $(k+1)^{\text{ème}}$ application du résolveur TDMA, la mise à jour de la fraction liquide est calculée par :

$$f_{(i,j)}^{k+1} = f_{(i,j)}^k + \omega \frac{a_p h(i,j)}{\rho L}$$

On complète cette équation pour les nœuds où il n'y a pas de changement de phase par la correction suivante :

$$\begin{aligned} f_p &= 0 \text{ si } f_p < 0 \\ f_p &= 1 \text{ si } f_p > 1 \end{aligned}$$

II.3.5 | Optimisation du maillage et du pas de temps

Les Tableaux et les Figures suivantes présentent l'effet de différents maillages sur la température à la surface interne du mur ; le pas de temps choisi étant $\Delta t=5\text{sec}$.

Le maillage choisi pour les couches qui ne contiennent pas les microcapsules du MCP est légèrement grossier de 0.5 cm, l'optimisation du maillage est élaborée pour la couche intégrant les microcapsules avec trois maillages plus précis de 0.1, 0.2 et 0.3 cm.

Nous observons à partir du Tableau II.11 que le passage du maillage de 0.2 cm à 0.3 cm a entraîné une variation de 1.09%, ainsi ce passage a entraîné une variation de la fraction liquide de 9%, de ce fait un maillage de 0.2 cm sera considéré vu que le passage de 0.2cm à 0.1 cm entraîne une variation de 0.885% et 1.329% pour la température surfacique et la fraction liquide respectivement.

Pour l'effet des différents pas de temps : $\Delta t=5, 2$ et 1s sur la température interne de surface, le Tableau II.12 présente les variations relatives à la température interne de surface pour les différents pas de temps choisis. Comme on peut l'observer, le passage de $\Delta t=2\text{s}$ à $\Delta t=5\text{s}$ a entraîné une variation relative de la température interne de l'ordre de 0.003% et une différence de $1.0\text{E}-03^\circ\text{C}$, en plus d'une variation de la fraction liquide de 0.991%. Finalement le maillage choisi est de 0.2 cm pour la couche intégrant les microcapsules des MCP et 0.5 cm pour les autres couches avec un pas de temps de 2 secondes.

CHAPITRE II

Tableau II-9 : Effet du maillage sur la température interne pour la brique à changement de phase.

dx(cm)	dy(cm)	T(i=N)	V.R[%]	Différence	fr(i=N)	V.R[%]	Différence
0.3	0.3	28.911			0.774		
0.2	0.2	28.595	1.093%	0.316	0.677	12.532%	0.097
0.1	0.1	28.342	0.885%	0.253	0.668	1.329%	0.009

Tableau II-10 : Effet du pas de temps sur la température interne pour la brique à changement de phase.

dt	T(i=N)	V.R[%]	Différence	fr(i=N)	V.R[%]	Différence
1s	28.901			0.9889		
2s	28.902	0.003%	0.001	0.9987	0.991%	9.80E-03
5s	28.911	0.031%	0.009	0.9988	0.010%	1E-04

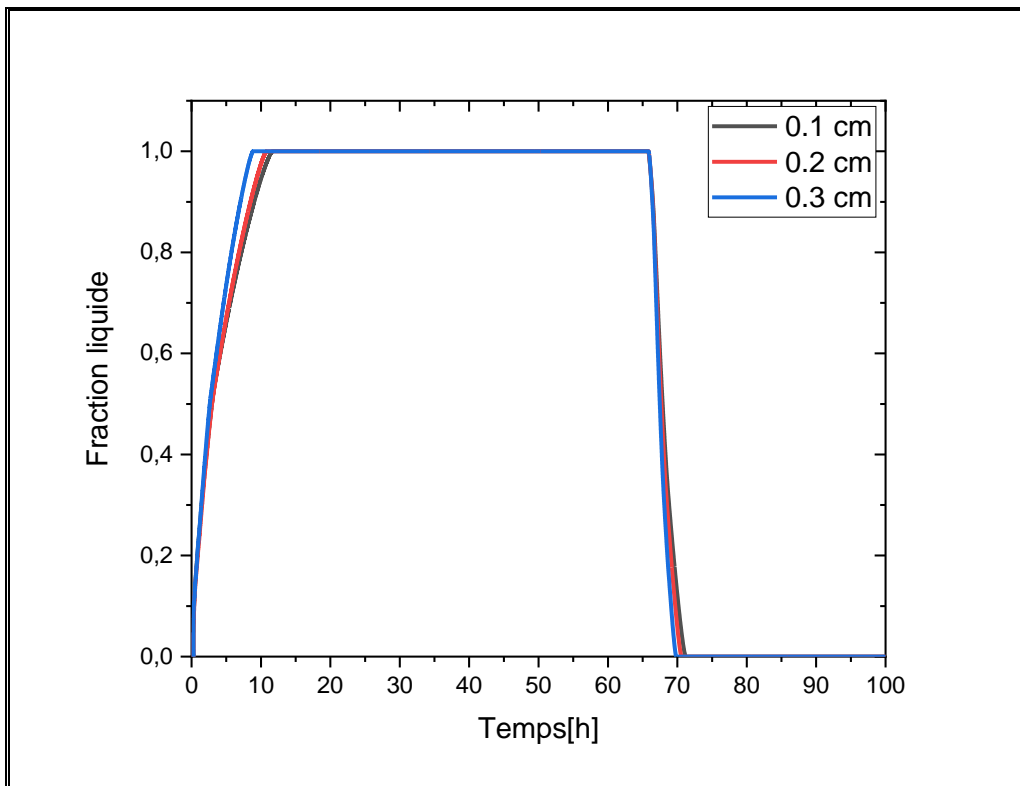


Figure II-14 : Effet du maillage sur la variation de la fraction liquide des MCP incorporés dans le plancher chauffant.

CHAPITRE II

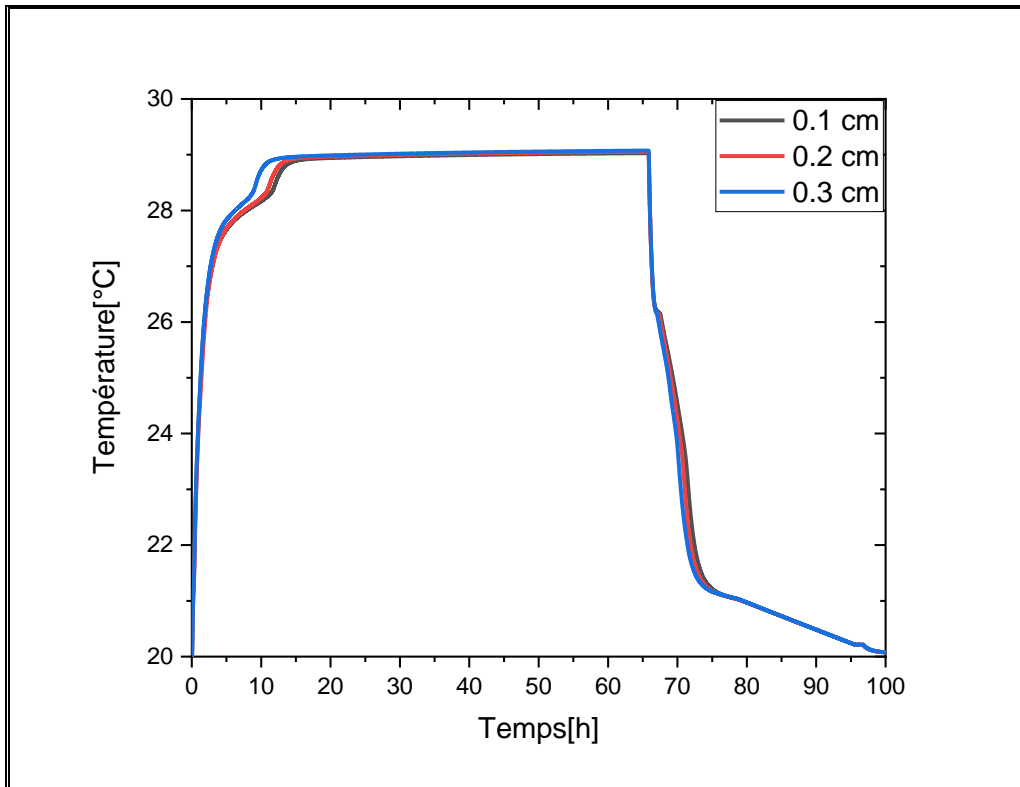


Figure II-15 : Effet du maillage sur la température interne pour le plancher chauffant.

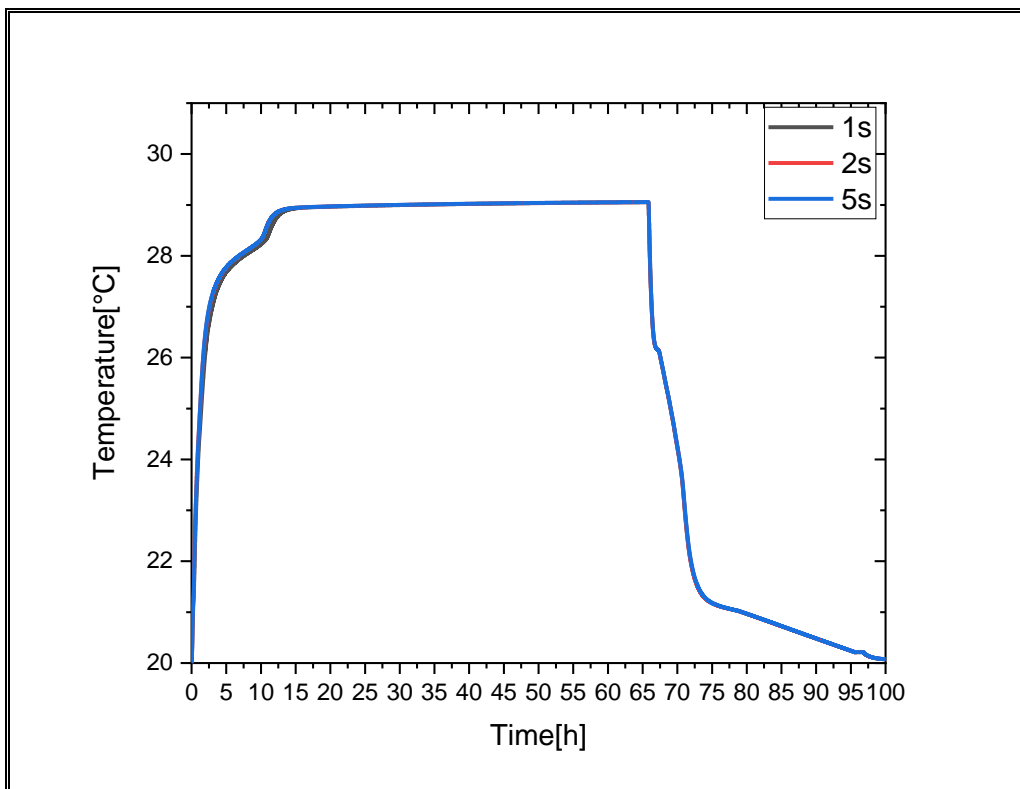


Figure II-16 : Effet du pas de temps sur la température interne pour le plancher chauffant.

CHAPITRE II

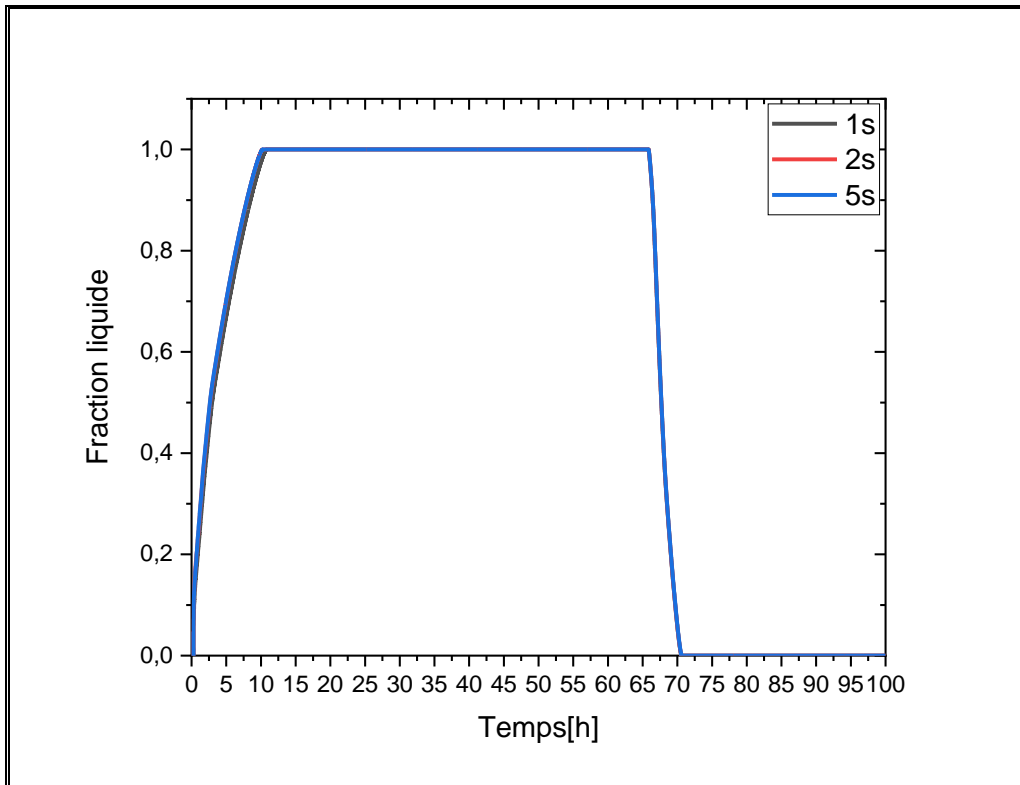


Figure II-17 : Effet du pas de temps sur la variation de la fraction liquide des MCP incorporés dans le plancher chauffant.

II.3.6 | Validation avec les résultats expérimentales de la littérature

Le système sur lequel nous avons validé notre modèle mathématique et numérique est un plancher rayonnant amélioré avec des matériaux à changement de phase d'hydrate de sel (MCP) macro-encapsulé dans une couche de sable humide[81].

Notre modèle de validation du plancher radiant en deux dimensions a été implémenté dans un logiciel de calcul de dynamique des fluides en utilisant la méthode des volumes finie.

Pour minimiser les erreurs numériques et accélérer le calcul, la taille du maillage a été raffinée pour la zone proche des conteneurs MCP et grossière pour la zone éloignée. Le maillage complet est limité à 0.5 cm pour réduire le temps de calcul, avec un maillage de 0.2 cm réservés à la couche intégrant les microcapsules du MCP.

La Figure II.18 montre la comparaison entre nos résultats numériques avec ceux obtenus dans l'expérimentation sur la variation de la température de la face inférieure du revêtement du plancher chauffants avec MCP.

CHAPITRE II

La comparaison entre les deux solutions donne une courbe numérique très proche de la courbe expérimentale avec une erreur moyenne $ERR=0.5\%$, Ceci peut s'expliquer par la négligence du phénomène de la convection naturelle dans nos hypothèses.

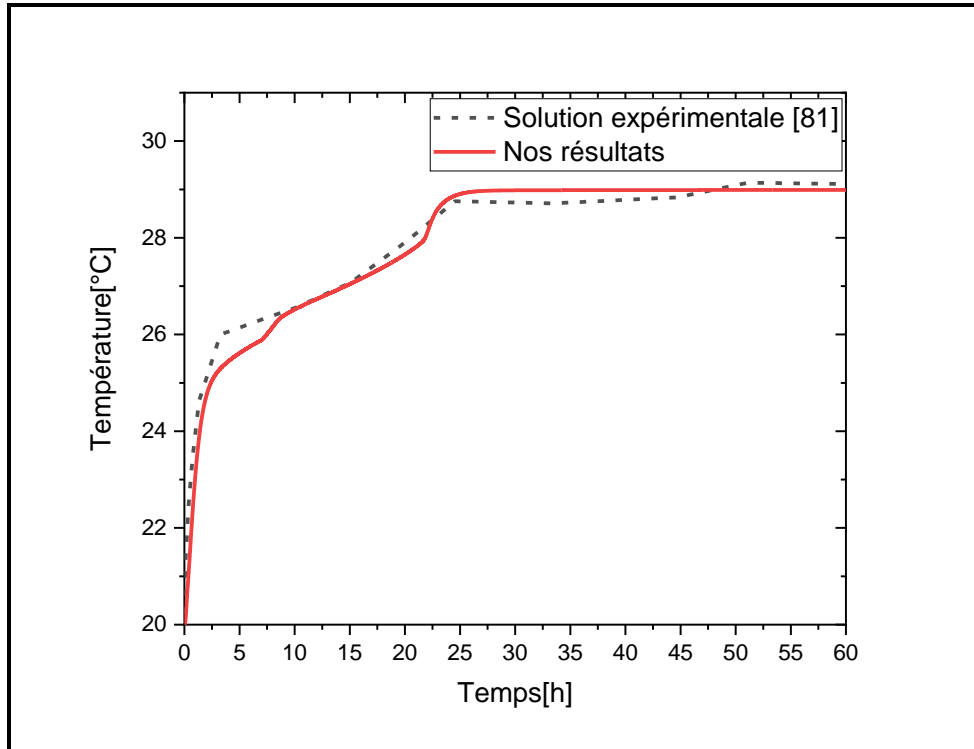


Figure II-18 : Validation de la solution numérique et expérimentale du plancher chauffant.

En général, nous aboutissons que les résultats numériques sont cohérents avec les valeurs expérimentales, ce qui permet d'affirmer que le modèle développé est valide pour prédire des résultats plus proches de la réalité pour une telle configuration du plancher chauffant.

II.4 | Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle étudié et la formulation mathématique correspondante à ce travail.

Ensuite, Nous avons abordé les principes de base de calcul numérique relatif à notre modèle. Premièrement, il s'agit du bilan énergétique du mur multicouche intégrant des microcapsules du matériau à changement de phase dans différents emplacements du mur multicouche, en deuxième partie vient la modélisation et formulation mathématique du plancher chauffant contenant les microcapsules de matériau à changement de phase.

CHAPITRE II

La résolution des équations d'énergie des différents matériaux et du MCP est établie par la méthode enthalpique, cette dernière présente l'avantage de résoudre l'équation d'énergie et ensuite de faire une mise à jour de la fraction liquide par une autre équation, et permettant de déterminer les champs de température dans les phases liquide et solide du MCP, en plus de la position du front de fusion séparant les deux phases.

La discrétisation des équations d'énergie est faite par la méthode des volumes finis, reconnue par sa précision spatio-temporelle, sa fiabilité avec les résultats et son adaptation aux différents problèmes physiques.

Ce chapitre a été dédiée à la validation de nos résultats numériques avec la solution analytique de la position du front de fusion pour un bloc du MCP pur et avec les résultats de la littérature pour une brique contenant des MCP dans les cavités de la brique creuse, en plus d'un système relatif à un plancher chauffant couplé avec une couche de matériaux à changement de phase.

La comparaison quantitative et qualitative entre nos résultats numériques et les résultats analytique et expérimentale a révélé un bon accord, ce qui nous permet de confirmer la validité et la fiabilité de notre calcul numérique.

Dans le chapitre qui suivra, nous présenterons les résultats obtenus par une étude paramétrique sur la micro-encapsulation des matériaux à changement de phase dans différents emplacements du mur multicouche pour une zone climatique chaude.

III | Chapitre III : Intégration des Microcapsules du MCP dans un Mur Multicouche

CHAPITRE III

III.1 | Introduction

Le but du présent chapitre consiste à l'évaluation de l'efficacité de l'incorporation du matériau à changement de phase (paraffine n-octadécane) dans un mur multicouche typique à différents emplacements. On verra aussi l'effet de la quantité et le type du MCP sur la réponse thermique du mur multicouche. Cette étude sera faite pour différentes périodes de l'année.

Premièrement, nous allons intégrer les microcapsules du MCP dans une couche de mortier soumise à une température sinusoïdale et représentant les conditions climatiques de la ville de Khouribga en période estivale, et ce en élaborant une simulation numérique en régime transitoire bidimensionnelle (2D) et en utilisant l'approche enthalpique.

Par la suite, on va étudier l'effet de l'intégration des microcapsules du MCP sur la réponse thermique de trois types de mur multicouche :

- M1 : emplacement des microcapsules dans la couche externe du mortier.
- M2 : emplacement des microcapsules dans la couche interne du mortier.
- M3 : emplacement des microcapsules dans la matrice solide de la brique creuse.

En principe, une analyse de la variation de la température surfacique à travers le mur sera présentée pour une période de 5 jours pendant l'été, avec une incorporation de 15% du MCP dans les trois types de mur.

En étape suivante, on présentera l'effet de la variation de la fraction massique du MCP sur la variation de la température surfacique interne et le volume de la fraction liquide du MCP, en comparant le mur incorporant le matériau à changement de phase à différents pourcentages avec le mur de référence (sans MCP), l'évaluation de l'effet de la variation de la fraction massique est basée sur les deux facteurs déterminant de l'inertie thermique du panneau mural : le décalage temporel et la réduction en amplitude.

Par la suite, la variation du flux surfacique interne et externe pour différentes fractions massiques du MCP sera calculée afin d'évaluer l'efficacité de l'incorporation du MCP dans le mur multicouche en termes d'énergie stockée dans ce dernier. En plus d'une étude sélective qui sera élaborée afin d'évaluer l'effet du changement du type de MCP sur la performance thermique du mur.

Finalement, en utilisant le meilleur scénario obtenu pendant la période estivale, une évaluation de la performance thermique du mur sera effectuée pour la période hivernale la plus froide de la ville de Khouribga.

CHAPITRE III

III.2 | Intégration des microcapsules du MCP dans une couche de mortier.

Dans cette partie, à travers la simulation numérique, une analyse thermique de la propagation de l'onde de température de l'extérieure vers l'intérieure d'une couche de mortier de ciment est réalisée pour mettre en évidence les indicateurs significatifs (déphasage et amplitude) qui concrétisent la performance de l'incorporation des matériaux à changement de phase dans la couche du mortier (Figure III.1), cette dernière est soumise à une variation de température extérieure sinusoïdale représentant la variation quotidienne de température pour une période de pointe.

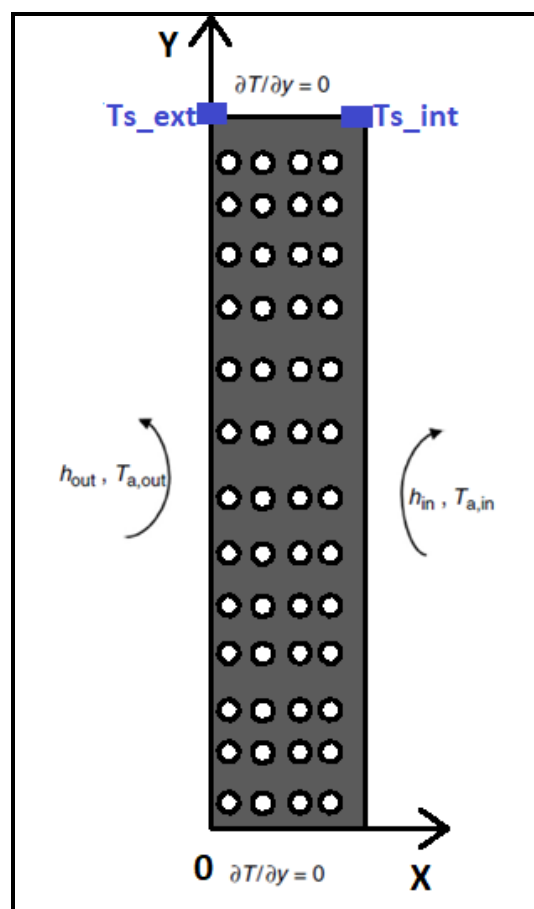


Figure III-1. Composition de la couche du mortier avec microcapsules du MCP

Il est à noter que le décalage de charge de pointe représente la capacité de la micro-encapsulation du MCP à déplacer la charge de pointe d'un moment de la journée à un autre, alors que la réduction de charge de pointe ou bien la réduction en amplitude est la capacité de réduire la charge maximale au cours d'une période donnée.

CHAPITRE III

La Figure III.2 présente la variation de la température surfacique interne et externe de la couche du mortier.

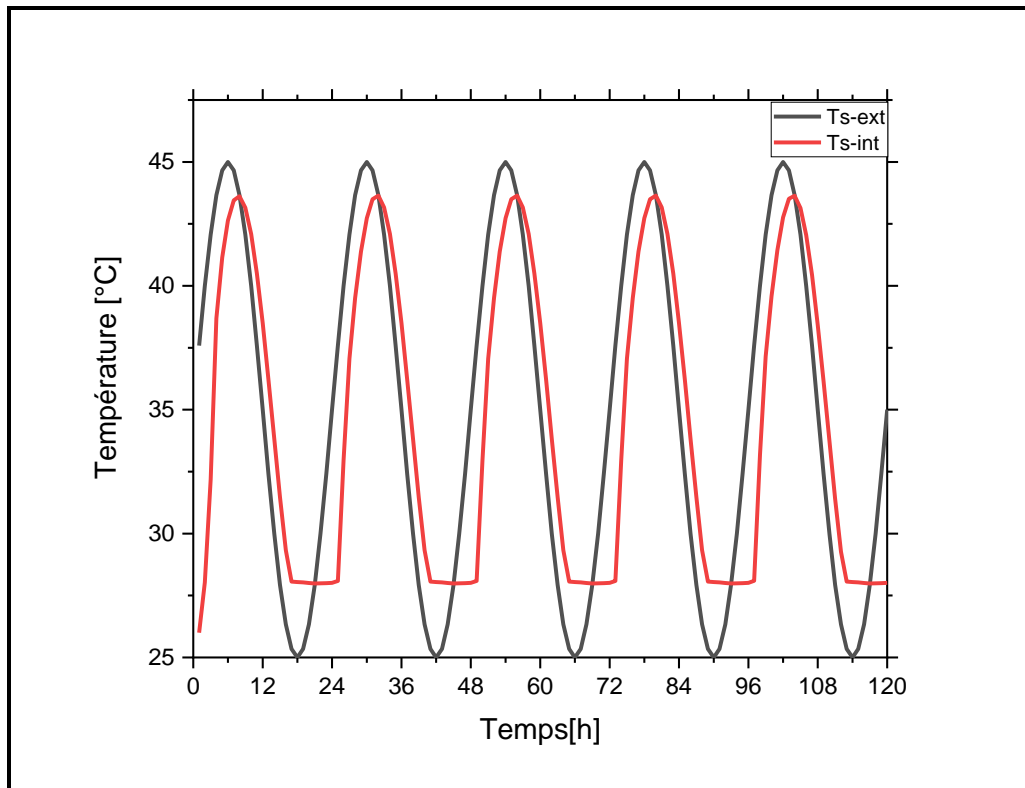


Figure III-2 : Variation de la température surfacique interne et externe de la couche du mortier

D'après cette figure, en passant de la température surfacique externe à la température surfacique interne (la limite droite de la couche du composite mortier_MCP), nous soulignons que pendant la contribution solaire le long de la journée, le déphasage obtenu au niveau de cette interface est d'environ 2 heures, en plus à la diminution en amplitude de 1.4°C , c'est-à-dire un taux de réduction de 3% par rapport au cas de référence. Par ailleurs, la température surfacique interne durant la période nocturne est stable pendant 8 heures aux alentours de 28°C (température de fusion), ceci est expliqué sur la Figure III.3 qui représente la variation temporelle de la fraction liquide pour une incorporation de 15% du MCP.

Pendant la période nocturne, la température intérieure atteint la température de fusion de 28°C , ce qui entraîne un changement de phase du MCP de l'état liquide à l'état solide.

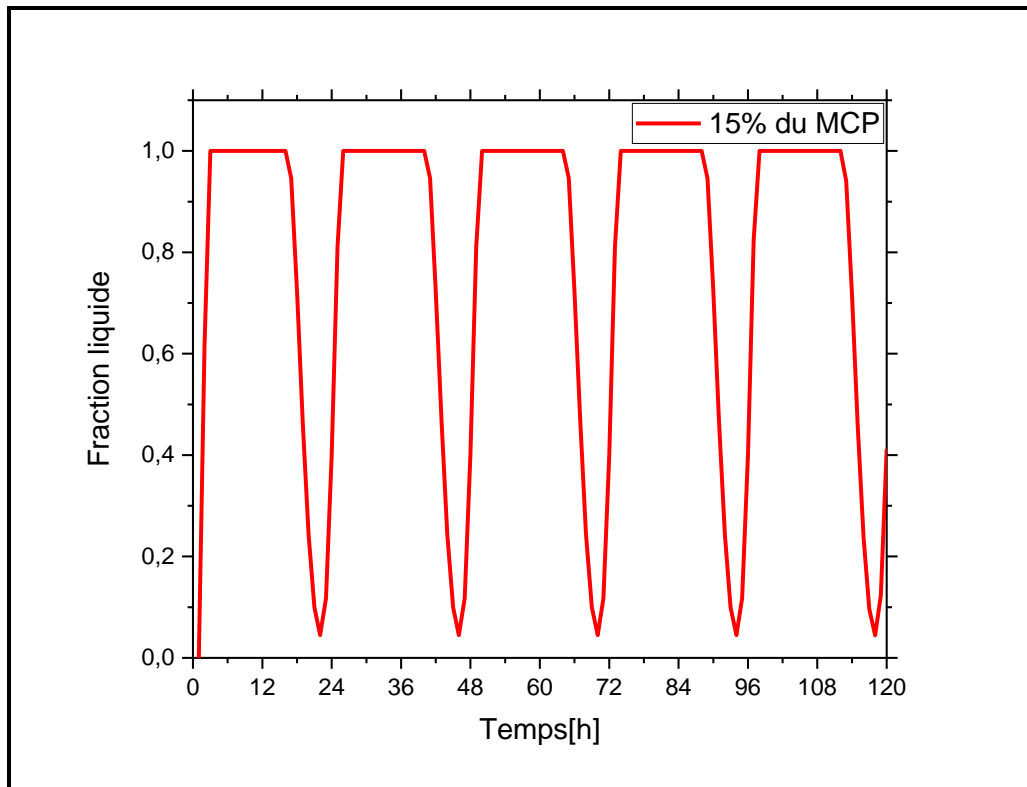


Figure III-3 .Variation de la fraction liquide pour une incorporation de 15% du MCP dans le mortier.

En concluant que l'intégration des microcapsules du MCP dans la couche du mortier a apporté des améliorations en termes de déphasage et de réduction en amplitude. Par conséquent, dans les sections suivantes nous allons élaborer une analyse thermique tout au long du mur multicouche intégrant le MCP dans différents emplacements, et puis nous allons quantifier le pourcentage de microcapsules qui garantit la meilleure performance thermique.

III.3 | Description des configurations des murs multicouche étudiées

Concernant la composition du mur, un mur du bâtiment marocain typique est considéré.

Il se compose d'une couche de mortier externe (2cm), une brique creuse de 8 trous (10cm), et une couche de mortier interne (2cm) (Figure III.4). La surface externe de la brique est exposée à la variation journalière de la température de l'air extérieur pour le mois de juillet dans la ville de Khouribga (variant entre 25°C et 45°C).

L'air intérieur est supposé à la température réglée pour le refroidissement selon la réglementation marocaine (26°C), la surface interne du mur multicouche est soumise à la convection de l'air intérieur.

CHAPITRE III

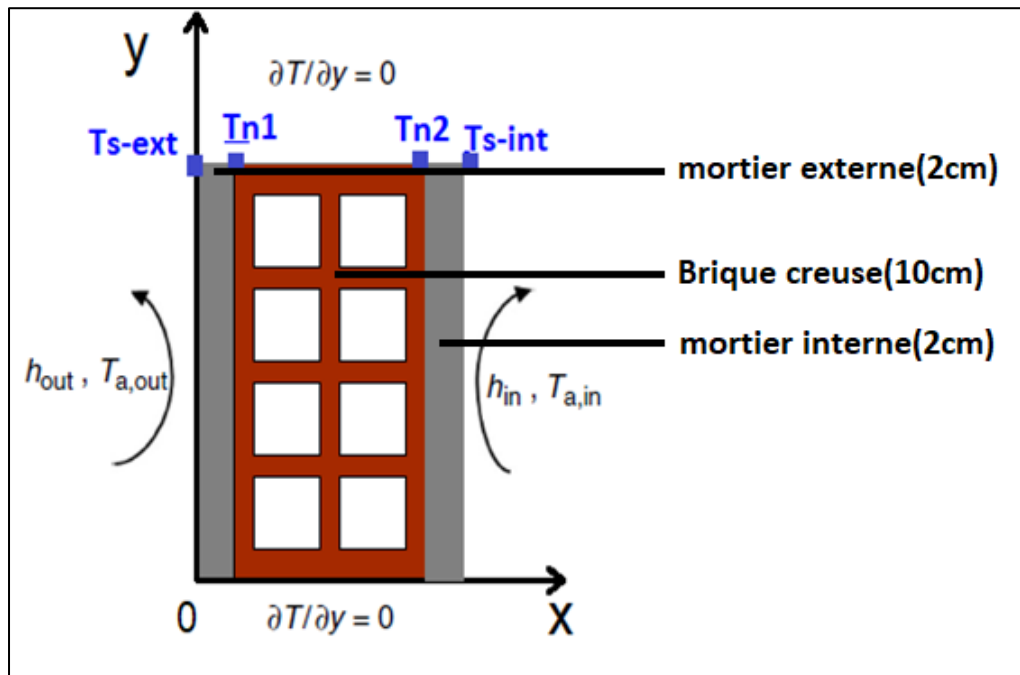


Figure III-4 : Configuration du mur multicouche de référence.

Le matériau à changement de phase considéré est une paraffine n-octadécane de température de fusion de 28°C, les propriétés thermophysiques des matériaux constituant le mur multicouche sont résumées dans le Tableau III.1 et III.2.

Tableau III-1 . Propriétés thermophysiques des matériaux de construction

Numéro de matériaux de construction	Matériaux de construction	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Capacité thermique spécifique [J/(kg. K)]
1	Brique	664	0.207	741
2	Air	1.225	0.026	1001.44
3	Mortier	1400	0.65	925

Tableau III-2 . Propriétés thermophysiques du MCP paraffine n-octadécane

Température de fusion [°C]	28
Chaleur latente de fusion [J/kg]	243 500
Masse volumique (solide / liquide) [kg/m ³]	722
Conductivité thermique (solide) [W/(m.k)]	0.264

CHAPITRE III

Conductivité thermique (liquide) [W/(m.k)]	0.2
Capacité thermique spécifique (solide) [J/(kg K)]	2153
Capacité thermique spécifique (liquide) [J/(kg K)]	2330

III.3.1 | Incorporation du matériau à changement de phase dans la couche externe du mortier

III.3.1.1 | Analyse de la variation de la température surfacique à travers le mur multicouche

Dans cette section, une analyse thermique de la propagation de l'onde de température de l'extérieur vers l'intérieur du mur multicouche est élaborée, pour mettre en évidence la performance thermique apportée par l'incorporation des matériaux à changement de phase dans la couche externe du mur multicouche.

En principe, l'effet de l'encapsulation est évalué en comparant un mur avec incorporation de 15% de fraction massique du MCP dans la couche de mortier externe du mur multicouche (Figure III.5), avec un mur sans MCP comme étant le mur de référence (Figure III.4).

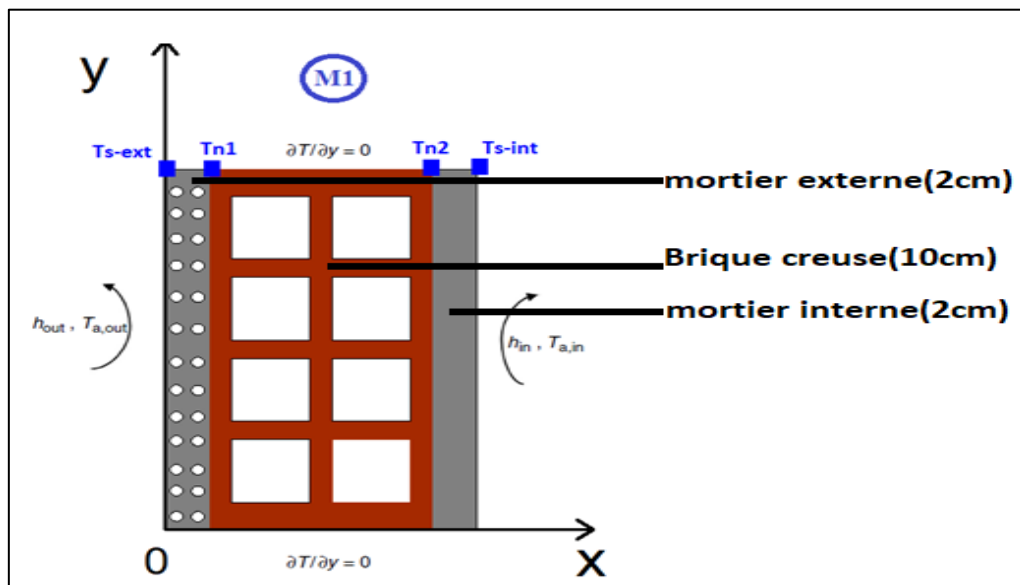


Figure III-5 : Configuration du mur multicouche avec incorporation du MCP dans la couche externe de mortier (mur M1).

La Figure III.6 présente la variation temporelle de la température surfacique interne et externe, en plus à la température aux interfaces du mur multicouche M1.

CHAPITRE III

Les températures T_{s_ext} et T_{s_int} représentent la température surfacique externe et interne respectivement du mur multicouche, T_{n1} représente la température surfacique entre le mortier externe et la brique creuse, et T_{n2} représente la température surfacique entre la brique creuse et le mortier interne.

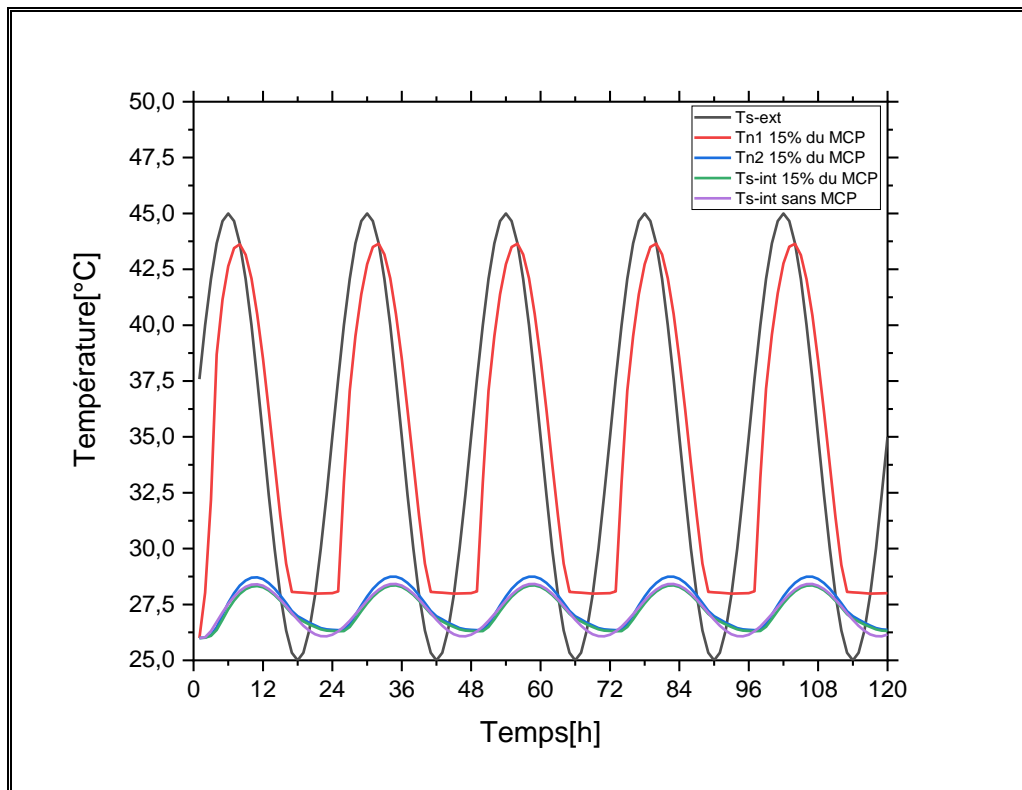


Figure III-6 : Variation temporelle de la température surfacique à travers le mur multicouche M1.

La variation de la température surfacique tout au long du mur montre un effet positif de l'incorporation des microcapsules des matériaux à changement de phase sur le déplacement de la température de pointe d'un temps donné à un autre en passant d'une couche à une autre adjacente, en plus de la diminution en amplitude à travers le passage de la température dans le mur.

Également, la variation des températures des surfaces interne, externe et des interfaces avec 15% de microcapsules de paraffine n-octadécane pendant cinq cycles de 24 heures est représentée et est complétée par le profil de température surfacique interne pour le mur de référence sans MCP.

CHAPITRE III

Le passage de la couche externe du mortier_MCP à celle de la brique creuse a entraîné un déphasage de 2 heures, en plus à une diminution en amplitude de 1.4°C. En passant de l'interface du composite MCP-mortier à celle de la brique creuse-mortier interne, il est clairement apparu l'effet de la couche de la brique creuse avec cavité d'air sur l'atténuation de la température maximale dans le mur, il est à noter que cette amplitude thermique est réduite de 14.6°C, ce qui correspond à une réduction relative de 33% (Tableau III.3). De plus, un déphasage entre les pics de température des deux interfaces est de l'ordre de 2 heures.

Tableau III-3 . Atténuation de l'amplitude thermique pour différentes interfaces du mur multicouche

	Tmin[°C]	ΔT_{\min} [°C]	Variation en %	Tmax[°C]	ΔT_{\max} [°C]	Variation en %
Ts_ext	25.0			45		
Tn1_15% du MCP	28.0	3	12%	43.6	1.4	3%
Tn2_15% du MCP	26.3	1.7	6%	29	14.6	33%
Ts-int_15% du MCP	26.3	0	0%	28.3	0.7	2%
Ts-int_sans MCP	26.1	0.2	1%	28.4	0.1	0.4%

En ce qui concerne la période nocturne, le déphasage est aussi important par rapport à la période diurne et représente 4 heures de déplacement de la charge de pointe, avec une atténuation d'amplitude de 1.7°C correspondant à un taux de réduction de 6%.

En ajoutant la couche du mortier interne, l'atténuation en termes d'amplitude est non significative, elle est de l'ordre de 0.4%, ceci est dû à la conductivité thermique du mortier (0.65 W/ (m.k)).

Cependant, en comparant la température surfacique interne pour le mur multicouche avec micro-encapsulation du MCP et le mur multicouche de référence, l'existence de la couche du composite de mortier_MCP avec 15% de microcapsules pour la période diurne ne présente aucun effet en termes de déphasage thermique, mais une réduction minimale de 0.23% en ce qui concerne l'amplitude thermique, par contre pendant la période nocturne, le pic de la température s'est déplacé de 2 heures, ce qui est dû à la transition de la phase liquide à la phase solide du MCP (Figure III.7).

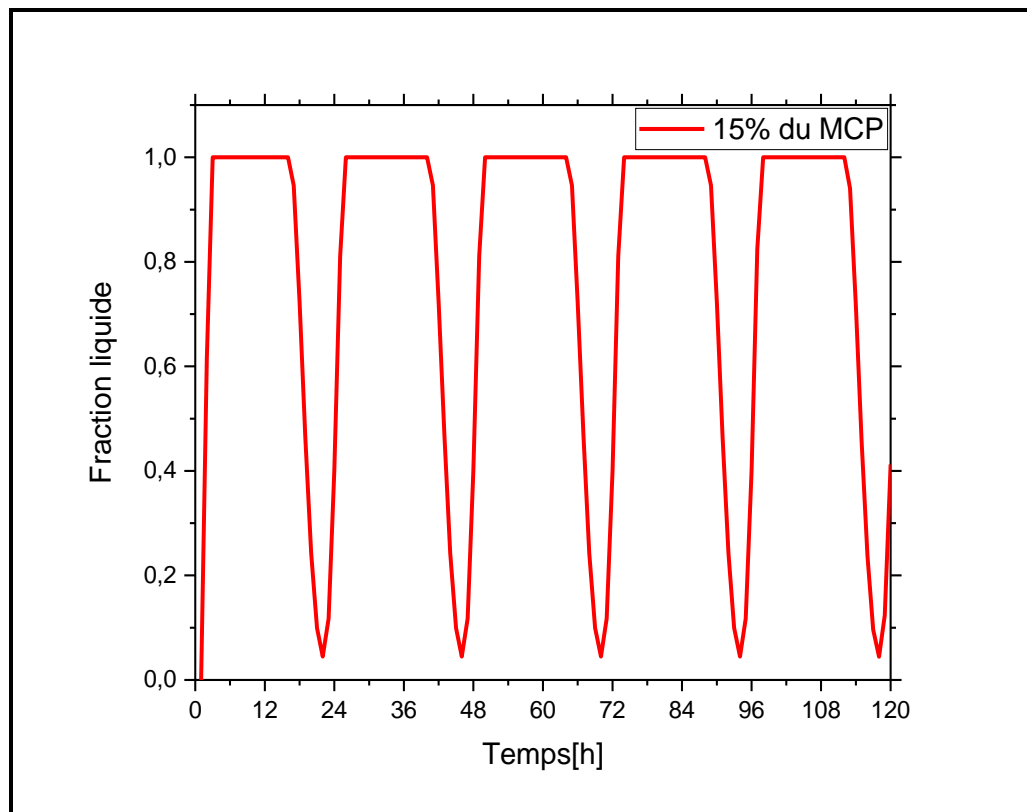


Figure III-7 : Variation de la fraction liquide pour une incorporation de 15% du MCP-
Mur M1

Il s'avère que l'incorporation du matériau à changement de phase dans la couche du mortier externe avec 15% de microcapsules au long de la journée ne présente aucun effet sur le déphasage au niveau de la surface interne, en parallèle à une diminution en amplitude non significative ; mais présente un déphasage de 2 heures pour la période nocturne.

Pour approfondir l'effet de l'ajout du matériau à changement de phase dans la couche externe du mur multicouche, il serait judicieux de mener une étude de l'impact de la quantité du MCP micro-encapsulé sur la réponse thermique du mur au niveau de la surface interne.

III.3.1.2 | Effet de la variation de la quantité du MCP micro-encapsulé sur la réponse thermique du mur multicouche M1.

Parmi les facteurs importants qui affectent la performance thermique du mur multicouche intégrant les microcapsules, on cite la quantité du MCP micro-encapsulé dans la couche du mortier, l'évaluation de l'effet de la quantité de microcapsules du MCP est élaborée en utilisant cinq fractions massiques qui varient de 15% à 35%, afin de chercher le pourcentage optimal du MCP dans la couche du mortier externe du mur multicouche.

CHAPITRE III

En premier, la détermination de la quantité optimale de microcapsules du MCP repose sur l'analyse de la variation de la température surfacique interne et la variation de la fraction liquide du MCP pour chaque pourcentage de la micro-encapsulation.

La simulation numérique est effectuée au mur multicouche de référence (mur sans MCP) et à d'autres scénarios pour différents pourcentages d'incorporation du MCP, les résultats du modèle numérique présenté sur la Figure III.8 mettent en évidence les profils de température pour la totalité des cas étudiés.

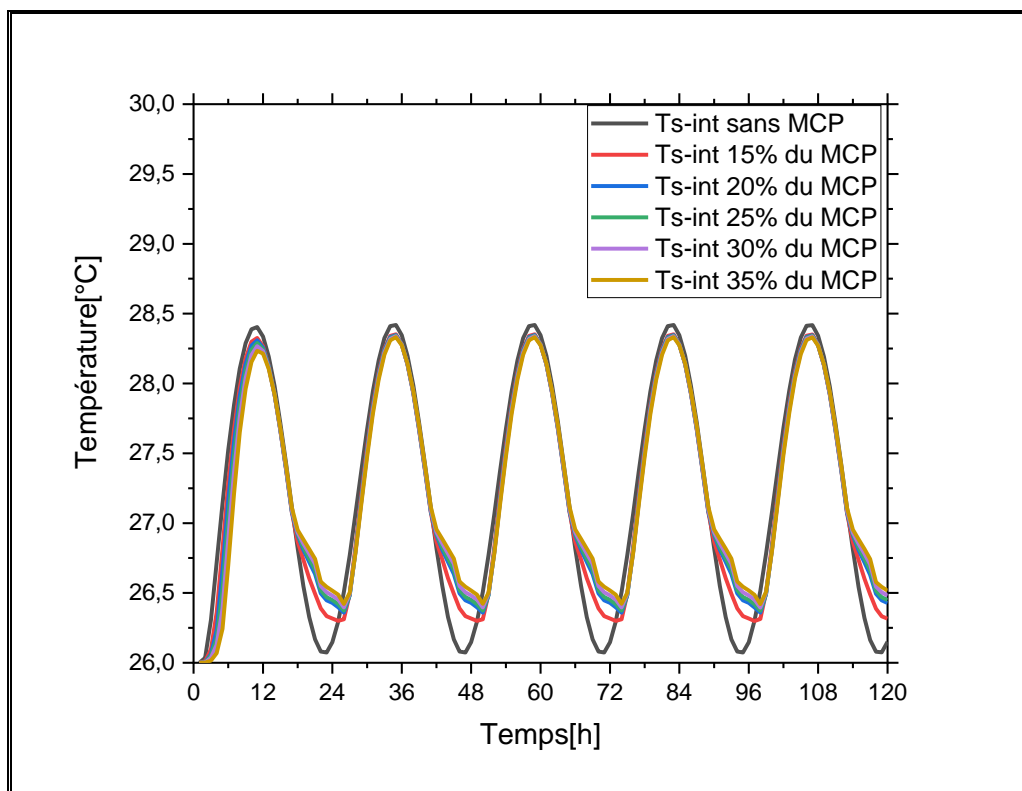


Figure III-8 : Température surfacique interne pour le mur multicouche M1 avec et sans MCP.

En intégrant une couche du composite mortier avec le MCP dans le mur multicouche, les microcapsules du MCP emmagasine la chaleur à l'intérieur du mur grâce à leur capacité de stocker la chaleur et de la restituer plus tard. Comme on peut remarquer sur les graphes de variation de température interne au cours de la journée, l'augmentation de la quantité de microcapsules présente un effet négligeable sur la réduction d'amplitude en passant du mur de référence à un mur avec composite mortier_MCP, ce taux de réduction varie entre 0.23% à 0.30% pour l'incorporation de 15% et 35% respectivement, de ce fait l'incorporation du MCP dans la couche externe du mortier d'un tel mur multicouche n'as pas d'effet significatif pour

CHAPITRE III

la période diurne pour un climat chaud telle que Khouribga. Également, nous signalons qu'à partir de 20% d'incorporation des microcapsules du MCP ; l'effet de variation d'amplitude et du déphasage thermique est le même que l'incorporation des fractions massique de 25%, 30% et 35%.

Cependant, en comparant les fluctuations nocturnes pour le cas de référence et les autres scénarios, il est remarquable que l'onde de température soit déphasée de 2 heures pour 15% d'incorporation à 3 heures pour 20% et reste invariable en termes de déphasage mêmes si on augmente la quantité de microcapsules du MCP, alors il est inutile d'ajouter plus de 20% de microcapsules dans la couche composite externe du mur multicouche afin d'avoir une meilleure performance thermique.

Concernant le déphasage pendant la période nocturne, il est clairement visible par l'évolution temporelle de la fraction liquide du MCP, représentée sur la Figure III.9.

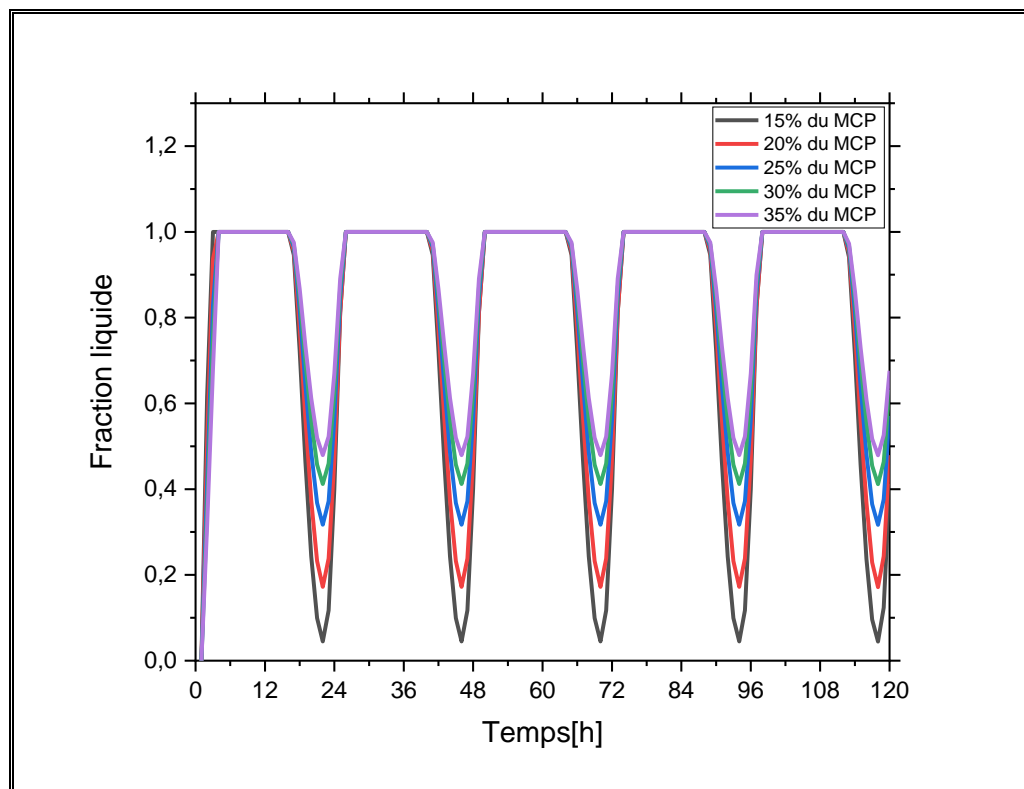


Figure III-9 : Variation de la fraction liquide pour le mur multicouche M1 avec MCP.

Cette figure explique l'existence des fluctuations nocturne de la température de surface intérieure en raison du processus de transition de phase liquide vers la phase solide des microcapsules du MCP.

CHAPITRE III

Cela affirme qu'à une certaine température de la surface du mortier, il existe une valeur critique représentant la température de fusion, au quelle les phases solide et liquide coexistent et le MCP commence à se solidifier et diffuse la chaleur vers la surface interne du mur multicouche étudié.

On remarque pour la variation de la fraction liquide, que plus on augmente la quantité incorporée du matériau à changement de phase, plus le processus de solidification est incomplet.

À chaque cycle, 96% de solidification est atteinte pour 15% de microcapsules tandis que 52% de solidification est atteinte pour 35% de microcapsules.

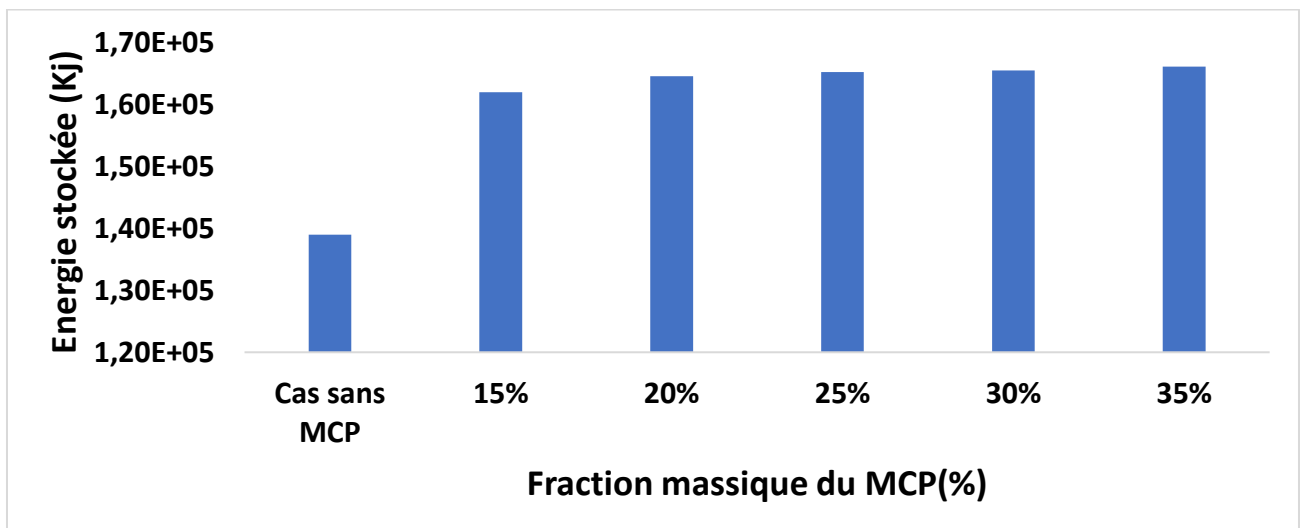
III.3.1.3 | Effet de la variation de la fraction massique du MCP sur l'énergie stockée dans le mur multicouche M1.

Pour l'analyse du comportement thermique des éléments de construction composite avec du MCP, les deux facteurs responsables du confort thermique sont le déphasage et le taux d'atténuation d'amplitude des températures de surface intérieure, alors que dans cette section, on va évaluer la capacité du stockage énergétique total du mur multicouche pour différentes fractions massiques du MCP microencapsulées.

L'énergie stockée par le mur multicouche est calculée en utilisant l'équation suivante :

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

Où φ_{si} et φ_{se} sont respectivement les flux de chaleur sur les surfaces intérieure et extérieure. La Figure III.10 présente l'énergie stockée pendant 24h par le mur multicouche intégrant les microcapsules du MCP dans sa couche de mortier externe, en passant de 15% d'encapsulation à 35%.



CHAPITRE III

Figure III-10 : Energie stockée pendant 24h par le mur multicouche M1 pour différents pourcentages du MCP.

Comme on peut observer à partir des valeurs obtenues pour l'énergie stockée dans le mur multicouche, qu'on ajoutant les microcapsules du MCP dans le mur multicouche M1, nous avons obtenu un stockage supplémentaire d'environ 17%. Par ailleurs, on constate que plus la fraction massique des microcapsules du MCP augmente plus le stockage d'énergie est important, l'énergie stockée par le mur multicouche avec incorporation des microcapsules du MCP dans la couche externe du mortier varie de $1.62.10^5$ KJ à $1.66.10^5$ KJ en passant de la fraction massique de 15% à celle de 35% ; on souligne également que le passage de la fraction de 15% à celle de 20% a entraîné une différence en termes d'énergie stockée de 1.6%, alors que la variation du taux d'énergie stockée au-delà de 20% est situé entre 0.15% et 0.4%.

Pour faciliter la compréhension de ces résultats sur la Figure III.10, la fraction liquide a été évaluée comme indiqué sur la Figure III.9, nous avons indiqué ci-dessus que 96% de solidification est atteinte pour 15% de microcapsules tandis que 52% de solidification est atteinte pour 35% de microcapsules, Ceci révèle que plus on augmente la fraction massique, plus le taux de solidification diminue, plus l'énergie stockée sous forme de chaleur latente est plus importante. Pour cela, l'incorporation d'une quantité importante du MCP est plus efficace pour permettre plus de stockage d'énergie thermique. Pour le mur multicouche M1, la variation du taux d'énergie stockée au-delà de 20% n'est pas trop significative, de ce fait, la fraction massique retenue est celle de 20% et ce résultat est compatible avec ce qui a été mentionné pour l'analyse de la variation de température interne et de la fraction liquide.

III.3.2 | Incorporation du matériau à changement de phase dans la couche interne du mortier (Mur M2).

III.3.2.1 | Analyse de la variation de la température surfacique à travers le mur multicouche.

L'analyse thermique de la propagation de l'onde de température de l'extérieur vers l'intérieur du mur est le but de cette section. Le MCP est incorporé dans la couche de mortier interne (Figure III.11). De la même manière pour le mur M1, l'effet de l'incorporation est évalué pour un mur avec 15% de fraction massique de MCP dans la couche du mortier interne, en plus d'une comparaison avec le mur de référence (Figure III.4).

La Figure III.12 montre la variation de la température surfacique interne et externe, et les températures aux interfaces du mur multicouche M2 avec 15% de paraffine n-octadécane

CHAPITRE III

micro-encapsulé pendant cinq cycles de 24 heures. Elle représente aussi le profil de température surfacique interne pour le mur sans MCP.

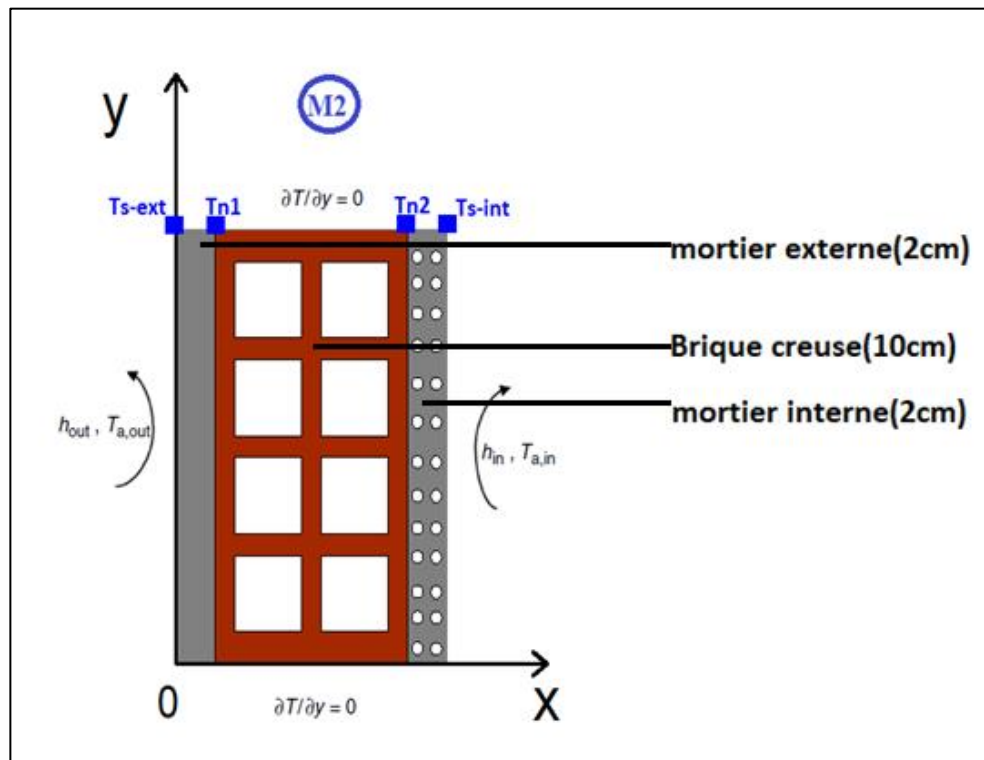


Figure III-11 : Configuration du mur multicouche avec incorporation du MCP dans la couche interne de mortier (mur M2).

CHAPITRE III

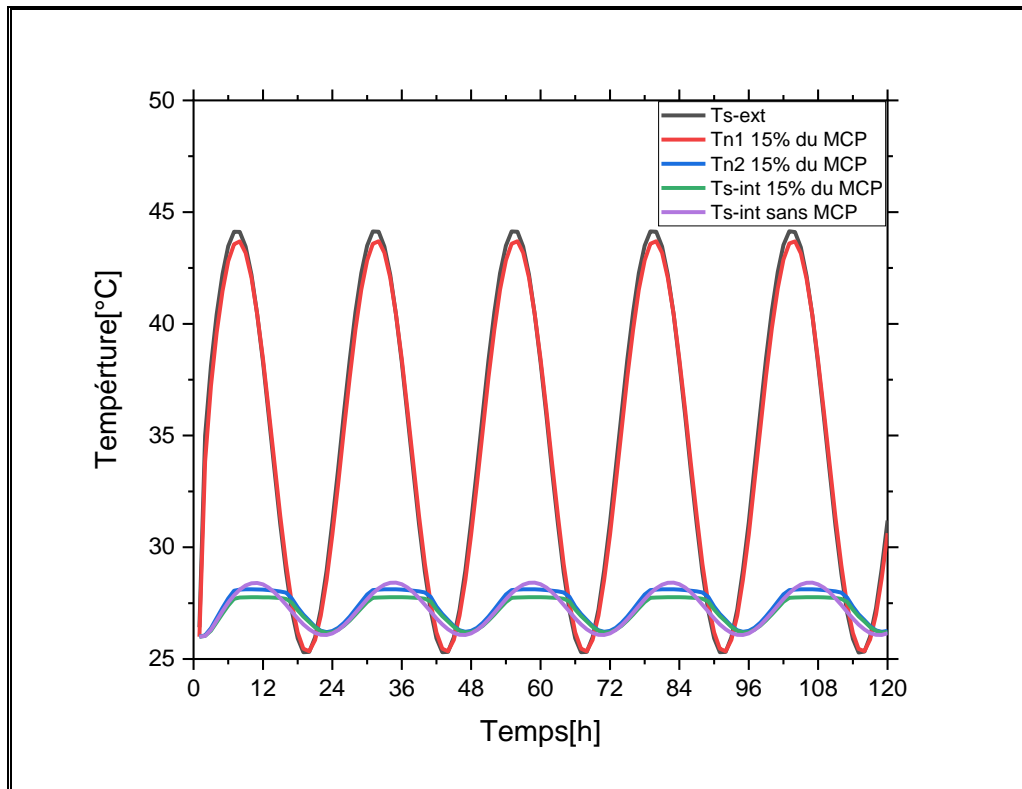


Figure III-12 : Variation de la température surfacique à travers le mur M2

Les températures T_{s_ext} et T_{s_int} représentent la température surfacique externe et interne respectivement, T_{n1} représente la température surfacique entre le mortier externe et la brique creuse, et T_{n2} représente la température surfacique entre la brique creuse et le mortier interne. En passant de la température surfacique externe à la température de l'interface du mortier externe-brique creuse, il est à noter que pendant la journée, le déphasage est de 1 heure au niveau de cette interface et la diminution en amplitude comme on peut le constater dans le Tableau III.4 est de 1.3°C , ce qui est relatif à un taux de réduction de 2.9%.

En passant à l'interface de la brique creuse et le mortier interne, l'effet de la couche de la brique creuse avec cavité d'air sur l'atténuation de la température maximale dans le mur a permis de réduire 15.6°C , ce qui correspond à une réduction relative de 36%. De plus, un déphasage entre les pics de température des deux interfaces de l'ordre de 3 heures.

Le déphasage est plus important pendant la période nocturne par rapport à la période diurne et représente 4 heures de déplacement de la charge de pointe.

CHAPITRE III

Tableau III-4 . Atténuation de l'amplitude thermique pour différentes interfaces du mur multicouche

	Tmin[°C]	Δt_{\min} [°C]	Variation en %	Tmax[°C]	ΔT_{\max} [°C]	Variation en %
Ts_ext	25			45		
Tn1_15% du MCP	25.4	0.4	1.6%	43.7	1.3	2.9%
Tn2_15% du MCP	26.2	0.8	3.1%	28.1	15.6	36%
Ts_int_15% du MCP	26.2	0	0%	27.8	0.3	1.1%
Ts_int_sans MCP	26.1	0.1	0.4%	28.4	0.6	2.2%

Par ailleurs, le long de la journée, la température surfacique Tn2 est stable pendant 9 heures, et elle est aux alentours de 28°C qui représente la température de fusion, ceci est expliqué sur la Figure III.13 par une période de changement de phase du MCP de l'état solide à l'état liquide.

En ajoutant la couche du mortier interne avec microcapsules du matériau à changement de phase, l'atténuation en termes d'amplitude est de l'ordre de 1.1%, ceci est dû à l'onde de température qui arrive au niveau de cette interface (Tn2 15% du MCP- Figure III.12) qui est légèrement supérieure à la température de fusion de la paraffine n-octadécane, et la fraction liquide qui ne dépasse pas 14% (Figure III.13).

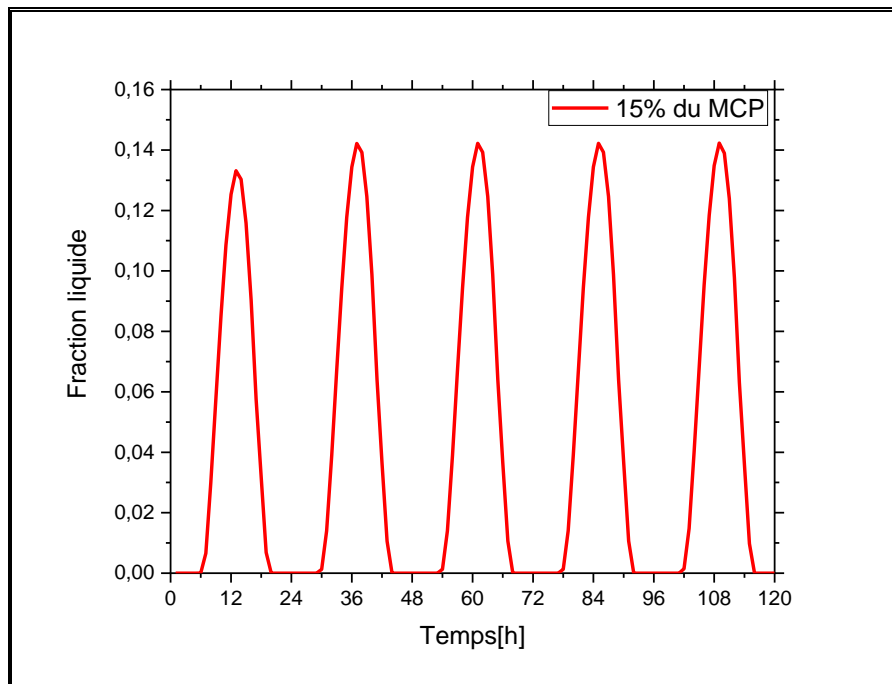


Figure III-13 : Variation de la fraction liquide pour une incorporation de 15% du MCP-

M2

CHAPITRE III

Par ailleurs, en comparant la température surfacique interne pour le mur multicouche avec micro-encapsulation de MCP et le mur multicouche de référence, l'existence de la couche du composite de mortier_MCP avec 15% de microcapsules pour la période diurne a entrainé un déphasage thermique de 1 heures avec une réduction de 2.2% en ce qui concerne l'amplitude thermique, en plus de la stabilisation de la température aux alentours de la température de fusion pour une longue durée de la journée, ce qui est du à la transition de la phase solide à la phase liquide du MCP. Comme pour le mur M1, l'effet de l'ajout du matériau à changement de phase dans la couche interne du mur multicouche M2 et l'étude de l'impact de la quantité du MCP micro-encapsulé sur la réponse thermique du mur au niveau de la surface interne sera abordée et fera l'objet de la prochaine section.

III.3.2.2 | Effet de la variation de la quantité de MCP micro-encapsulé sur la réponse thermique du mur multicouche M2.

La simulation numérique est effectuée au mur multicouche de référence (mur sans MCP : Figure III.4), et à d'autres scénarios pour différents pourcentages d'incorporation du MCP, les résultats du modèle numérique sur la Figure III.14 mettent en évidence les profils de température surfacique interne pour la totalité des cas étudiés pour le mur multicouche M2.

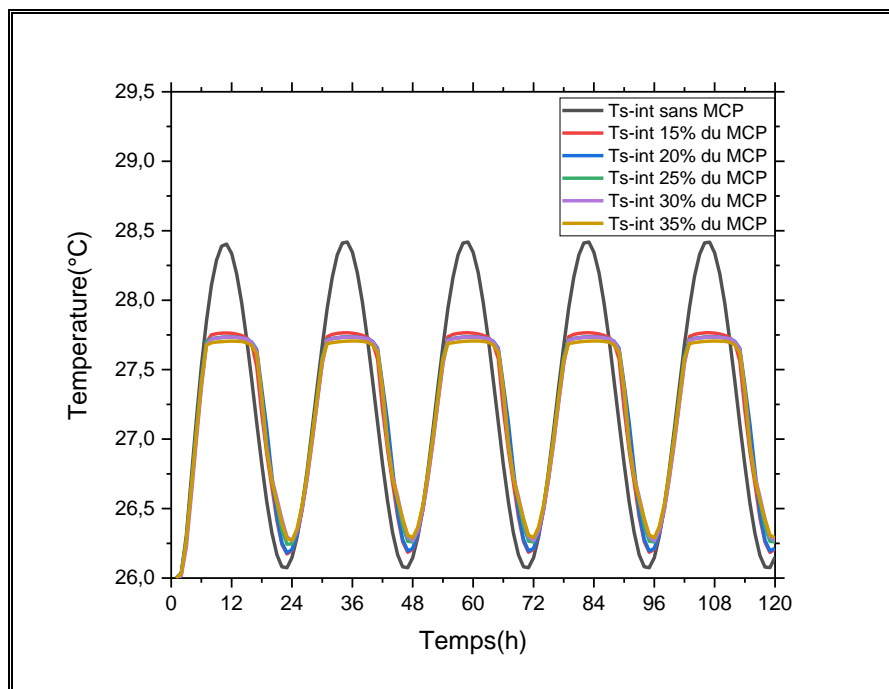


Figure III-14 : Température surfacique interne pour le mur multicouche M2 avec et sans MCP.

CHAPITRE III

Comme on peut le remarquer sur les courbes de variation temporelle de la température surfacique interne du mur multicouche avec incorporation du MCP dans la couche du mortier proche de l'ambiance interne ; au cours de la journée, l'augmentation de la quantité de microcapsules présente une chute de l'amplitude thermique allant de 2.3% à 2.5% en passant de la fraction massique de 15% à celle de 35%. Ainsi, la température interne reste stable chaque journée entre 6h et 18h aux alentours de la température de fusion, ceci est relatif à une période de changement de phase comme il est montré sur la Figure III.15 qui représente le changement temporel de la fraction liquide.

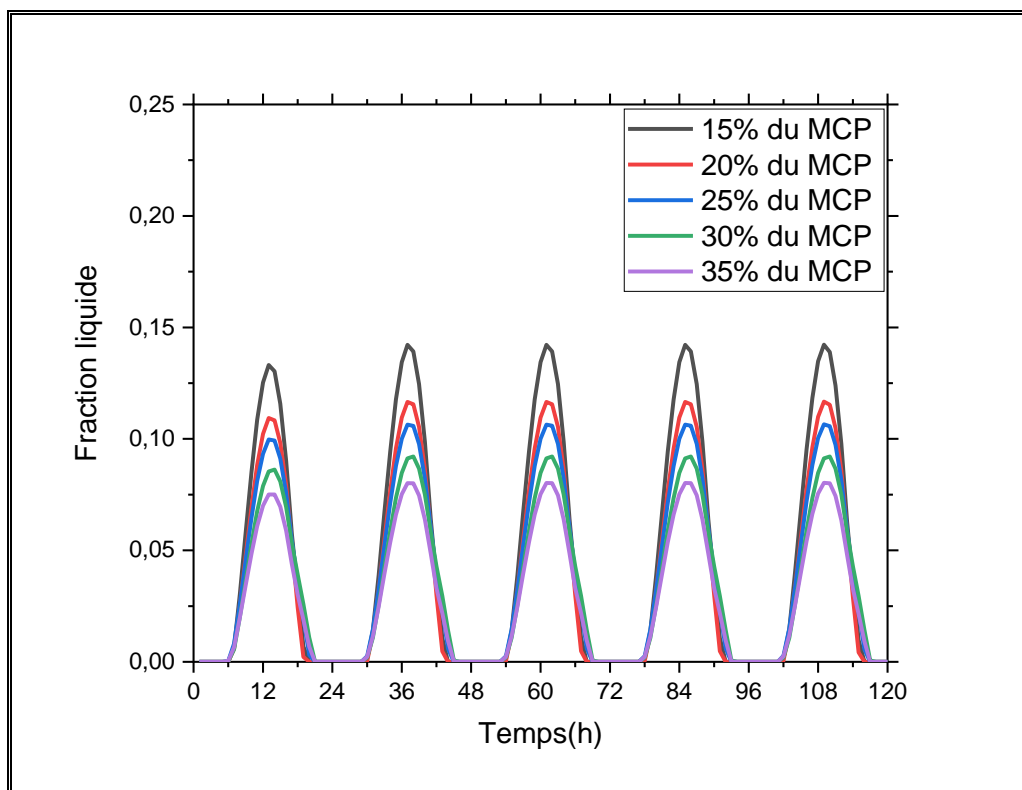


Figure III-15 : Variation de la fraction liquide pour le mur multicouche M1 avec MCP.

On remarque pour la variation de la fraction liquide, qu'en augmentant la quantité incorporée de matériau à changement de phase, ceci permet d'avoir un processus de fusion incomplet de l'état solide à l'état liquide.

Ce processus est observé par un cycle de la fraction solide-liquide passant du solide total au liquide quasi-total à chaque cycle, allant de 8% de liquéfaction pour 35% de microcapsules dans la couche du composite interne à 14% de liquéfaction pour 15% de microcapsules, ce qui explique que plus la fraction massique augmente plus le taux de liquéfaction diminue.

CHAPITRE III

Soulignons que le taux de fraction liquide est minimal pour le cas de l'incorporation des microcapsules dans la couche interne du mur multicouche en raison de la température maximale qui arrive au niveau de cette interface qui ne dépasse pas 28°C (Tableau III.4).

Cependant, en comparant le déphasage thermique pour les différentes fractions massiques du MCP, il s'avère que l'onde de température s'est déphasée de 1 heure à partir d'une incorporation de 20% du MCP et reste invariable même si on augmente la quantité des microcapsules, de ce fait, il n'est pas nécessaire d'ajouter plus de 20% de microcapsules dans la couche du mortier interne d'un tel mur multicouche pour un climat chaud telle que Khouribga.

III.3.2.3 | Effet de la variation de la quantité de la fraction massique du MCP sur l'énergie stockée du mur multicouche M2.

Dans cette section, nous allons évaluer la capacité du stockage énergétique total du mur multicouche M2 pour différentes fractions massiques du MCP microencapsulé.

Pour cela, la Figure III.16 présente l'énergie stockée par le mur multicouche intégrant les microcapsules du MCP dans sa couche du mortier interne, en passant de 15% d'encapsulation à 35%.

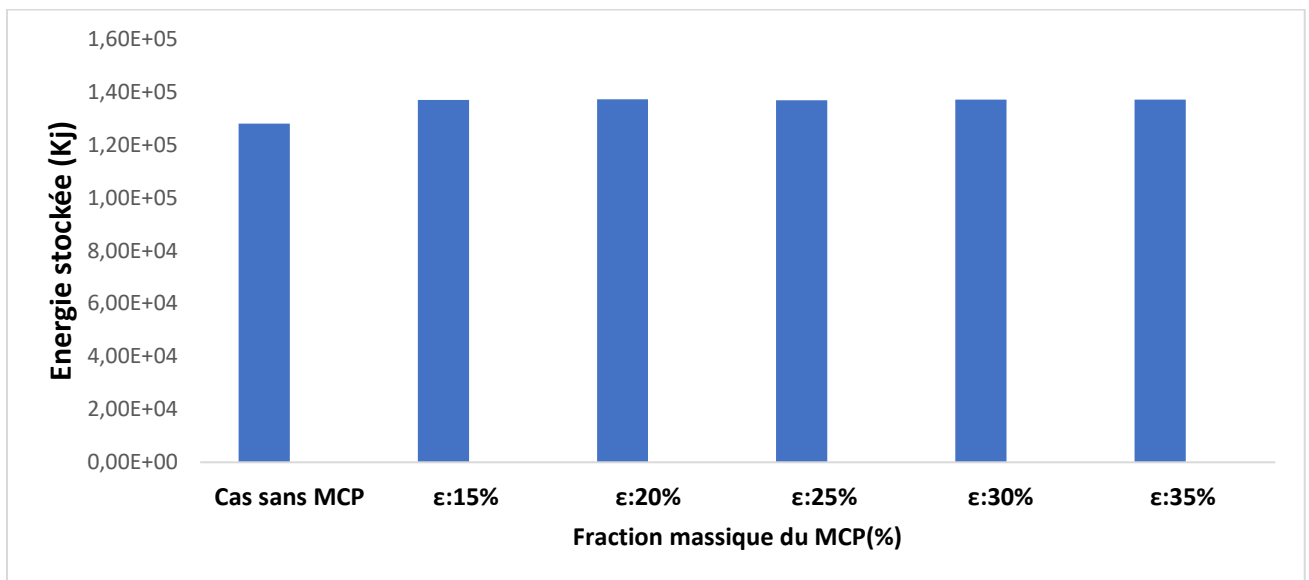


Figure III-16 : Energie stockée et restituée par le mur multicouche M2 pour différents pourcentages de MCP

CHAPITRE III

Comme on peut observer à partir des valeurs obtenues pour l'énergie stockée dans le mur multicouche, que nous avons obtenu une plus-value du stockage thermique dans le mur de 7% en ajoutant un pourcentage de microcapsules minimales. Également, nous remarquons qu'on variant la fraction massique des microcapsules du MCP de 15% à 35%, le stockage d'énergie ne présente pas une grande différence, et l'énergie stockée par le mur multicouche avec incorporation des microcapsules du MCP dans la couche interne du mortier est aux alentours de $1.37.10^5$ KJ pour toutes les fractions massiques utilisés ; on souligne que la variation du taux d'énergie stockée est situé entre 0.02% et 0.28% en variant la fraction massique des microcapsules du MCP. Cette variation minimale est due à la variation de la fraction liquide qui a été évaluée comme indiqué sur la Figure III.15, dont on peut constater que cette dernière varie entre 8% et 14% respectivement pour 15% et 35% de microcapsules. Cette variation n'est pas trop significative, et vu que les résultats mentionnés ci-dessus concernant l'analyse de la variation de température interne et de la fraction liquide du mur multicouche ont montré que l'incorporation de 20% de microcapsules a permis d'avoir le meilleur scénario en termes de performances thermiques ; de ce fait, la fraction massique retenue est celle de 20% de micro-encapsulation pour le mur multicouche M2.

III.3.3 | Incorporation du matériau à changement de phase dans la matrice solide de la brique creuse Mur M3

III.3.3.1 | Analyse de la variation de la température surfacique à travers le mur multicouche

Une analyse thermique de la propagation de l'onde de température de l'extérieur vers l'intérieur du mur multicouche M3 (les microcapsules du MCP sont incorporées dans la matrice solide de la brique creuse) (Figure III.17) est présentée. La Figure III.18 présente la variation de la température surfacique interne et externe, en plus à la température aux interfaces du mur multicouche.

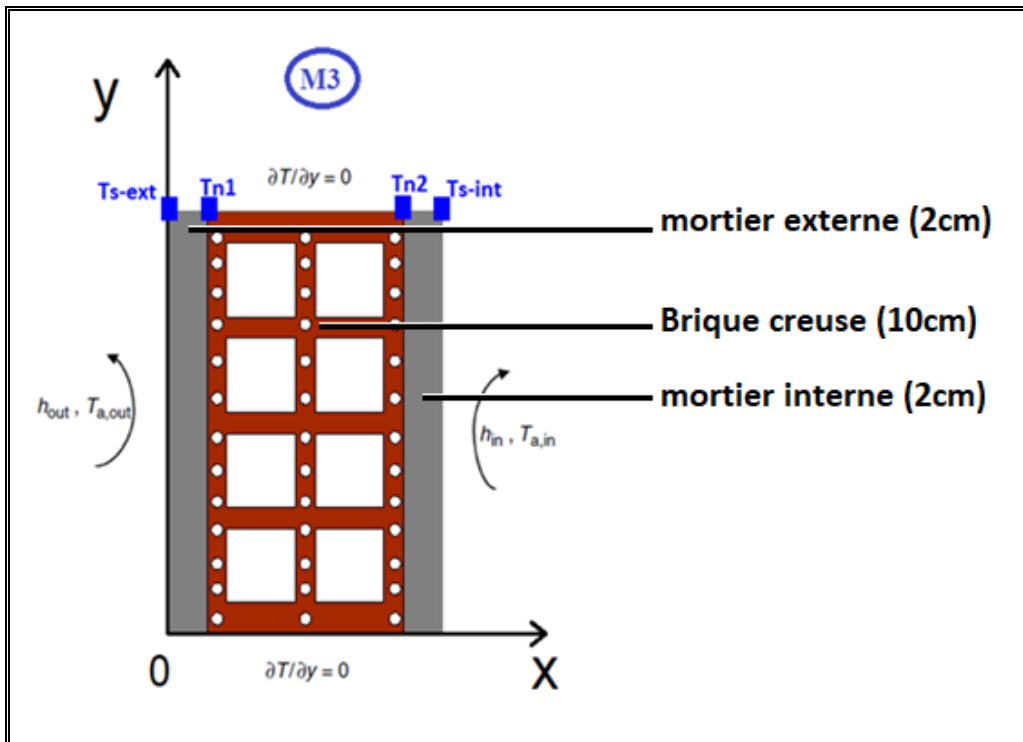


Figure III-17 : Configuration du mur multicouche avec incorporation du MCP dans la matrice solide de la Zbrique creuse (mur M3).

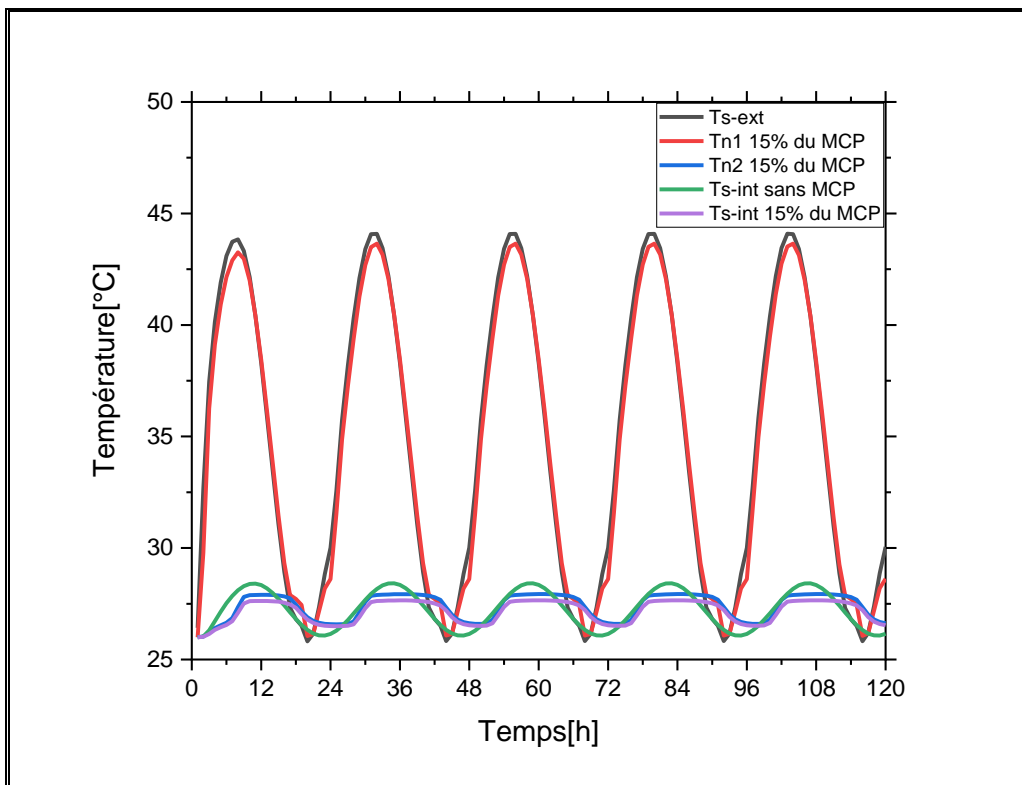


Figure III-18 : Variation de la température surfacique à travers le mur M3

CHAPITRE III

En passant de la température surfacique externe à la température Tn1 (à la fin de la couche du mortier externe), nous soulignons que pendant la contribution solaire le long de la journée, le déphasage obtenu au niveau de cette interface est d'environ 1 heure, en plus de la diminution en amplitude de 1.4°C (Tableau III.5) qui est relative à un taux de réduction de 3%.

Tableau III-5 . Atténuation de l'amplitude thermique pour différentes interfaces du mur multicouche M3

	Tmin[°C]	Δt_{\min} [°C]	Variation en %	Tmax[°C]	ΔT_{\max} [°C]	Variation en %
Ts_ext	25			45		
Tn1_15% du MCP	26	1	4%	43.6	1.4	3%
Tn2_15% du MCP	26.6	0.6	2.3%	28	15.6	36%
Ts-int_15% du MCP	26.5	0.1	0.4%	27.7	0.3	1%
Ts-int sans MCP	26.1	0.4	1.5%	28.4	0.7	2.8%

En passant de l'interface du mortier externe à celle de la brique creuse, l'effet des microcapsules du MCP et de la couche de la brique creuse avec cavité d'air sur l'atténuation de la température maximale dans le mur est observé, il est à noter que cette amplitude thermique est réduite d'environ 15.6°C, ce qui correspond à une réduction relative de 36%. De plus, un déphasage entre les pics de température des deux interfaces à l'ordre de 4 heures.

En ce qui concerne la période nocturne, le déphasage est aussi important par rapport à la période diurne et représente 6 heures de déplacement de la charge de pointe.

Par ailleurs, la température surfacique Tn2 est stable pendant 5 heures pour la période de refroidissement nocturne, et de 13 heures pour la période diurne. Ceci est expliqué sur la Figure III.19 qui représente la variation de la fraction liquide au cours du temps pour une incorporation de 15% du MCP.

CHAPITRE III

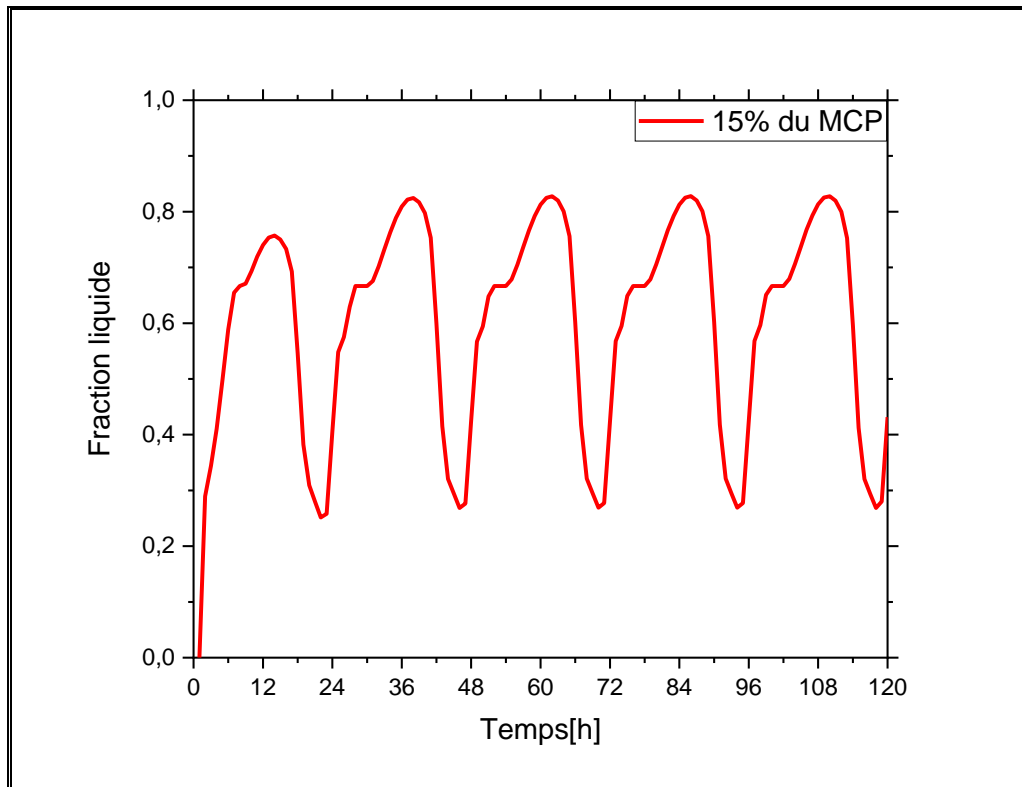


Figure III-19: Variation de la fraction liquide pour une incorporation de 15% du MCP-M3

Dans ces deux périodes, le changement de phase du MCP de l'état liquide à l'état solide et vice versa coexiste, ce qui signifie la stabilité de la température surfacique interne (T_{s_int} 15% du MCP : Figure III.18) en raison de la période de stockage par chaleur latente à température de fusion constante.

En ajoutant la couche du mortier interne, l'atténuation en termes d'amplitude est de l'ordre de 1%.

Cependant, en comparant la température surfacique interne pour le mur multicouche avec micro-encapsulation du MCP et le mur multicouche de référence, l'existence de la couche du composite de la matrice solide de la brique creuse et du MCP avec 15% de microcapsules présente un déphasage thermique de 5 heures par rapport à la température surfacique externe pour la période diurne, et de 6 heures pour la période nocturne.

III.3.3.2 | Effet de la variation de la quantité du MCP micro-encapsulé sur la réponse thermique du mur multicouche M3.

La Figure III.20 représente la variation temporelle de la température surfacique interne pour une incorporation de microcapsules de MCP dans la couche de la brique creuse.

CHAPITRE III

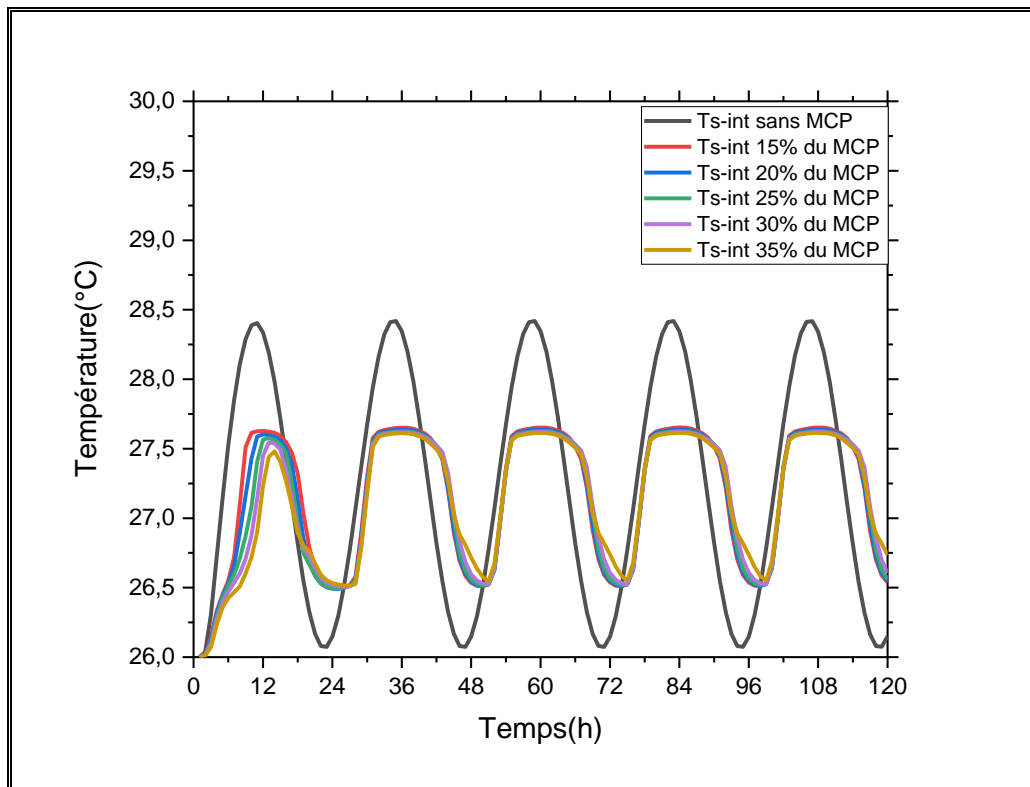


Figure III-20 : Température surfacique interne pour le mur multicouche M3 avec et sans MCP.

L'effet de la variation de la quantité du matériau à changement de phase a montré une atténuation de l'amplitude allant de 0.76°C à 0.8°C pour une fraction massique de 15% et 35% respectivement, en plus à la température surfacique interne qui reste stable de 8h à 21h à une température proche de la température de fusion (28°C), cela correspond à la période de changement de phase (Figure III.21) dans laquelle la fraction liquide varie d'un minimum de 33% à 25% et d'un maximum de 76% à 83%, et ce pour une fraction massique de 35% et 15% respectivement .

On remarque pour la variation de la fraction liquide, le processus de fusion est toujours incomplet et les phases liquide-solide existent pendant les cinq cycles, ajoutant que la fraction massique et la fraction liquide sont inversement proportionnels.

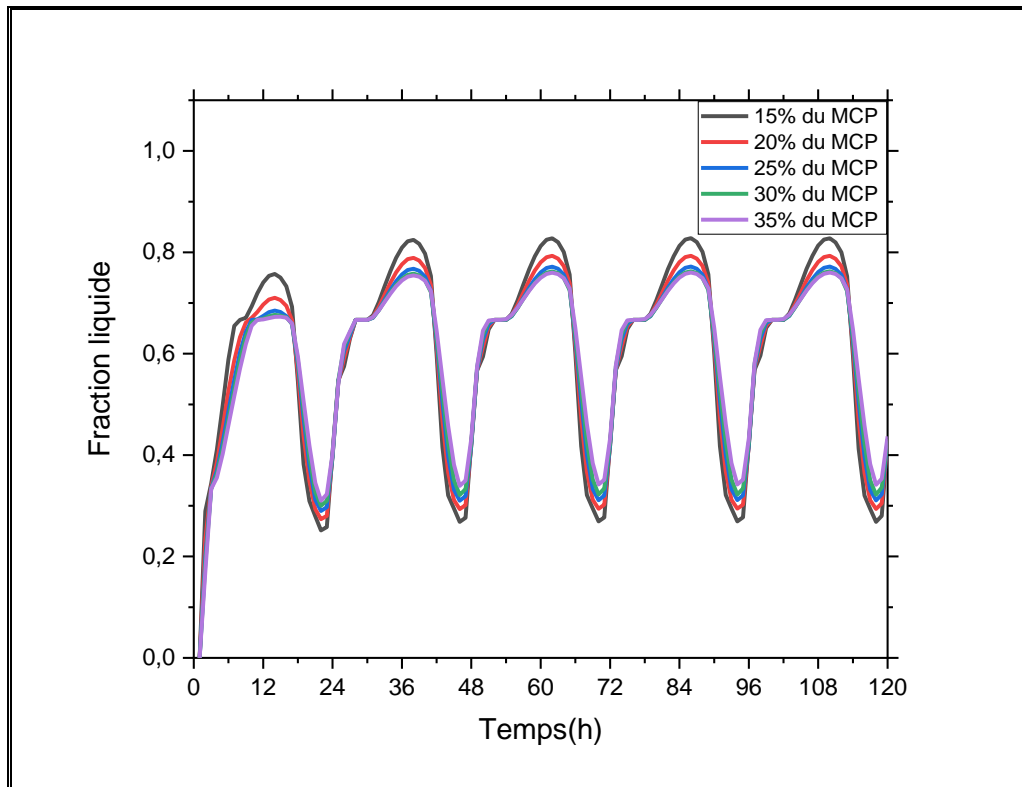


Figure III-21: Variation temporelle de la fraction liquide pour le mur multicouche M3.

Par ailleurs, concernant le déphasage thermique pour les différentes fractions massiques d'encapsulation, la différence temporelle entre les pics de température est de 1 heure pour la période diurne et de 3 heures pour la période nocturne, et ce à partir d'une incorporation de 20% du MCP.

Notant que le déphasage reste invariable même si on augmente la quantité de microcapsules au-delà de 20% d'encapsulation, de ce fait, il n'est pas nécessaire d'ajouter plus de cette quantité de microcapsules dans la couche composite brique-MCP d'un tel mur multicouche.

III.3.3.3 | Effet de la variation de fraction massique du MCP sur l'énergie stockée par le mur multicouche M3.

Dans la présente section, l'énergie stockée par le mur multicouche intégrant les microcapsules du MCP dans la matrice solide de la brique creuse en passant de 15% d'encapsulation à 35% est représentée sur la Figure III.22.

CHAPITRE III

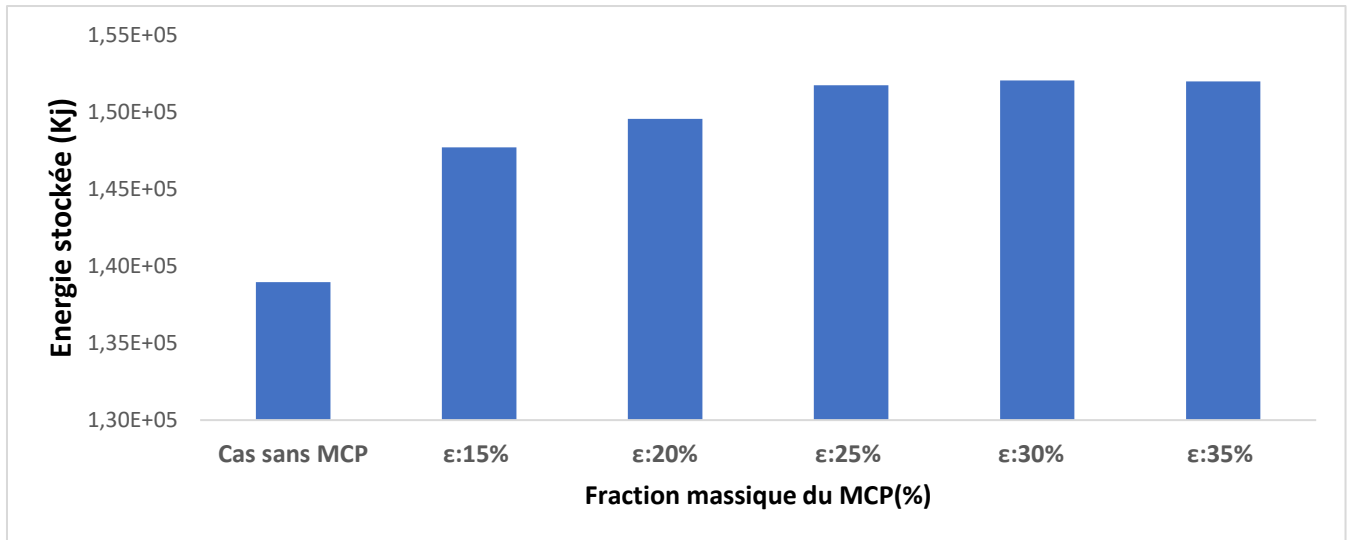


Figure III-22: Energie stockée par le mur multicouche M3 pour différents pourcentages de MCP pendant 24h.

D'après les valeurs obtenues pour l'énergie stockée dans le mur multicouche avec incorporation des microcapsules dans la matrice solide de la brique creuse, nous avons obtenu un stockage supplémentaire d'environ 7% pour une incorporation de 15% des microcapsules, on constate également que l'énergie stockée augmente avec l'augmentation de la fraction massique, et varie de $1.48.10^5$ KJ à $1.52.10^5$ KJ en passant de la fraction massique de 15% à celle de 35% ; ce stockage est prouvé par le changement de phase qui est toujours existant (Figure III.21), ce qui entraîne que les microcapsules du MCP stocke de la chaleur d'une façon continue. Également on remarque que le passage de la fraction massique de 15% à celle de 20% a entraîné une augmentation de l'énergie stockée de $1.48.10^5$ KJ à $1.5.10^5$ KJ ce qui est équivalent à un taux d'augmentation d'énergie stockée de l'ordre de 1.3%, et en passant de 20% à 25%, ce taux d'augmentation reste quasiment invariable même si on augmente la quantité des microcapsules du MCP, ce qui représente une variation non significative. Finalement, et on se basant sur l'analyse de la variation de température interne et de la fraction liquide, la fraction massique retenue est celle de 20% car elle présente des résultats compatibles avec ce qui a été mentionné ci-dessus.

III.4 | Comparaison entre les différents types des murs multicouches étudiés

En comparant les différents scénarios à savoir :

CHAPITRE III

- L'intégration des microcapsules dans la couche du mortier proche du milieu externe (Mur M1).
- L'intégration des microcapsules dans la couche du mortier proche de l'ambiance interne (Mur M2).
- L'intégration des microcapsules dans la matrice solide de la brique creuse (Mur M3).

Il est clair d'après les analyses thermiques des différents scénarios que la fraction massique de 20% présente le meilleur scénario en termes des performances thermiques, ceci confirme les résultats de la littérature[14] qui ont conclu à travers des essais expérimentaux que la fraction massique de 20% est la limite pour avoir une performance au niveau de la résistance mécanique, à ce stade l'incorporation de 20% de microcapsules prouve une performance à la fois thermique et mécanique.

Suite à ces conclusions, la Figure III.23 présente la variation de la température surfacique interne des trois scénarios étudiés pour la fraction massique de 20%.

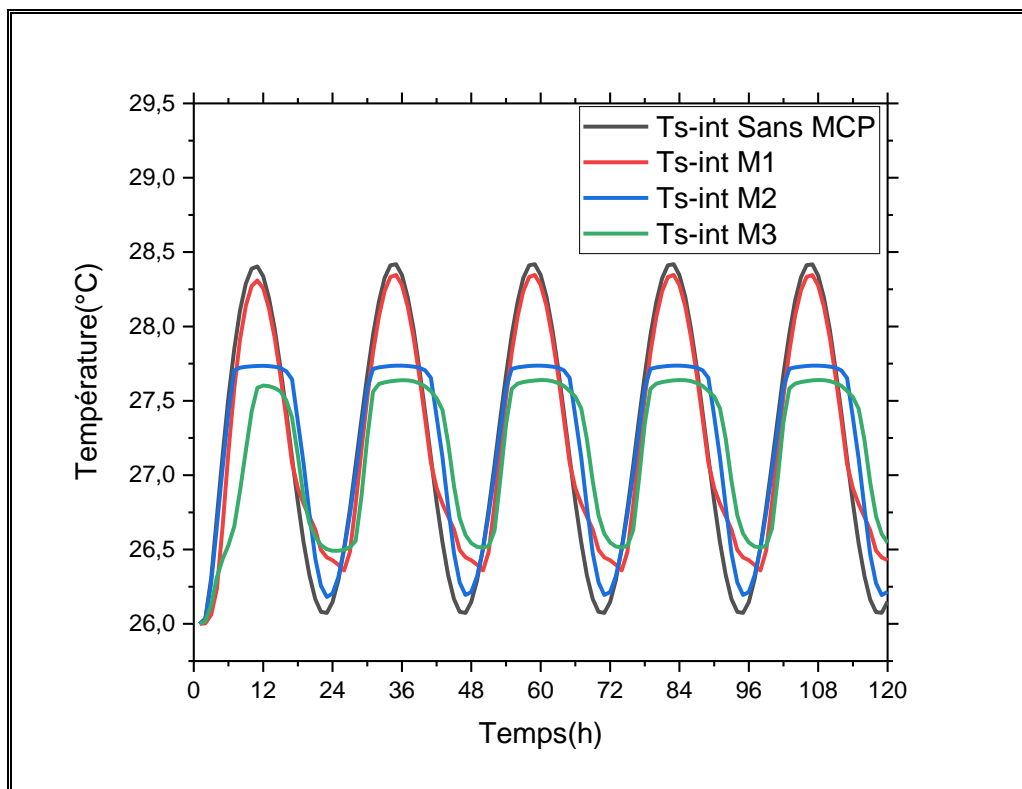


Figure III-23 : Variation de la température surfacique interne pour les différents types de mur multicouche

Cette figure montre que l'intégration du MCP dans la matrice solide de la brique creuse présente le meilleur scénario, permettant une atténuation de température de 2.7% par rapport au cas de référence, en plus d'un déphasage de l'onde de température de 1h en cours de la

CHAPITRE III

journée et de 3h pendant la période nocturne. Notons que le mur multicouche avec emplacement des microcapsules du MCP dans la matrice solide de la brique creuse rassemble le meilleur déphasage thermique et la meilleure diminution en amplitude obtenus par rapport à l'emplacement des microcapsules du MCP en couche de mortier interne et externe.

En deuxième classement vient le scénario représentant l'incorporation interne, ceci est dû à la dominance de la fraction solide dans la période nocturne et que la fraction liquide pendant la période diurne ne dépasse pas 14% de liquéfaction (Figure III.24).

Finalement vient le cas de l'encapsulation externe pour lequel il y a une domination de la fraction liquide pendant la période diurne ce qui ne permet pas d'avoir une atténuation remarquable et le changement de phase vient dans la nuit, ce changement de phase explique le déphasage thermique obtenu pendant la période nocturne.

Il est à noter que plus les fractions liquide et solide coexistent pendant la variation temporelle, plus l'atténuation en amplitude et l'augmentation du déphasage sont significatifs.

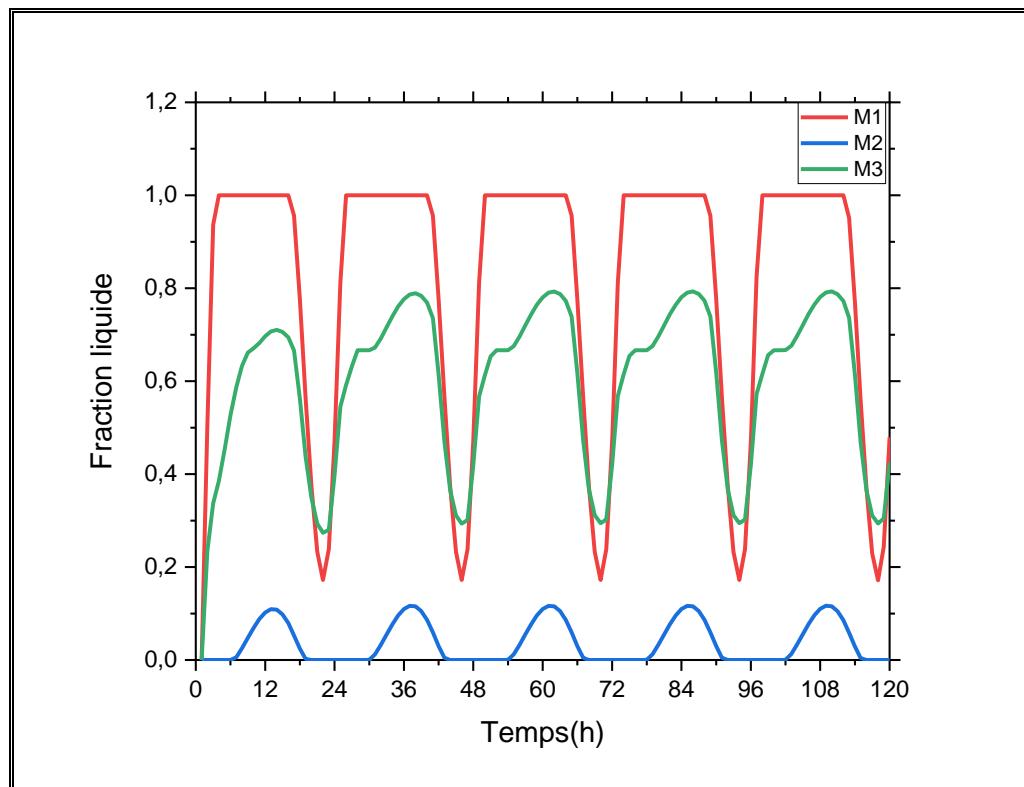


Figure III-24: Variation de la fraction liquide pour les différents types de mur multicouche

CHAPITRE III

A ce stade, le choix optimal est fixé pour l'incorporation du MCP dans la matrice solide de la brique creuse, mais il est indispensable de faire une évaluation de l'effet du type du matériau à changement de phase à incorporer, cela fera l'objet de la prochaine section.

III.5 | Effet du changement du type de MCP sur la réponse thermique du mur multicouche.

Dans cette section, on va aborder l'étude du changement du type de MCP sur le comportement thermique du mur multicouche avec incorporation de 20% des microcapsules du MCP dans la matrice solide de la brique creuse.

La Figure III.25 présente la variation temporelle de la température surfacique interne, en utilisant quatre types de matériaux à changement de phase dont leurs températures de fusion varient entre 24°C et 30°C.

Les propriétés thermo physique des MCP sont présentés dans le Tableau III.6.

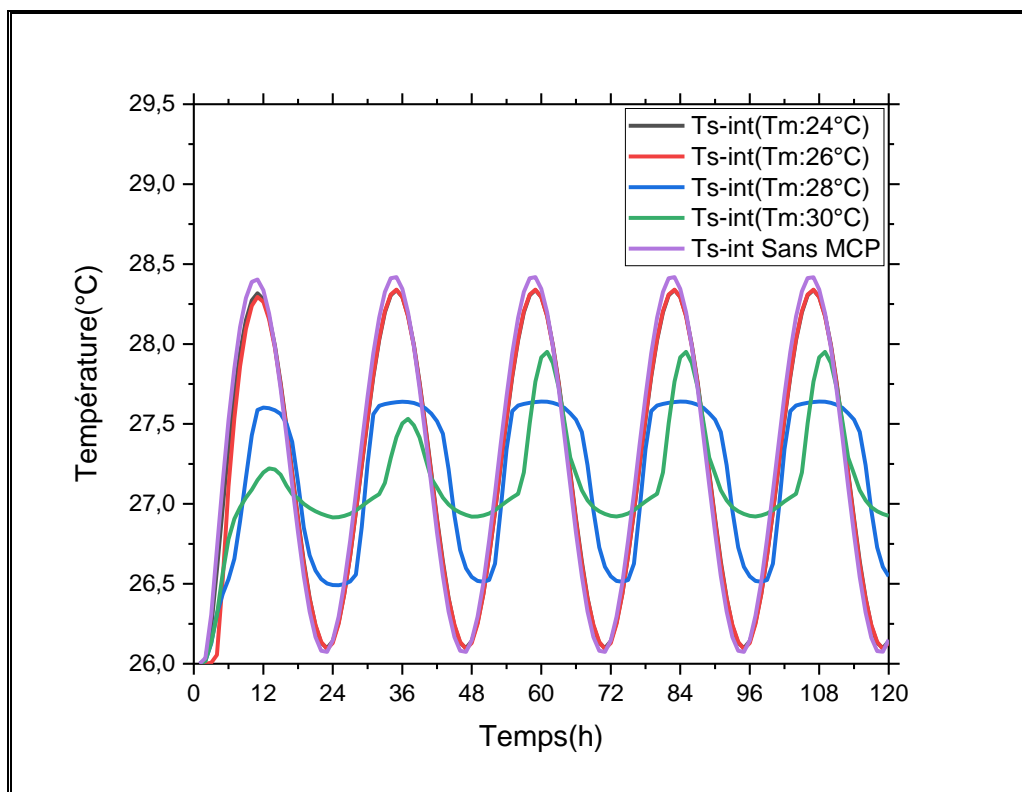


Figure III-25: Variation de la température surfacique interne pour les différents types du MCP.

CHAPITRE III

Tableau III-6 . Propriétés thermo physiques des différents types de MCP

MCP	Température de fusion [°C]	Conductivité thermique [W / (m.K)]	Masse volumique [kg / m ³]	Chaleur spécifique [J / (kg. K)]	Chaleur latente de fusion [J/kg]
CaCl ₂ , H ₂ O	30	1.09	1710	2200	187000
Paraffine	24	0.21	900	2100	144000
Micronal Ds	26	0.2	995	1700	16674

Le profil de température pour le matériau à changement de phase relatif à la température de fusion de 24°C (paraffine) montre que l'incorporation de ce MCP n'influence pas la température surfacique interne (Figure III.25). Cependant, il est clair que la variation de la température surfacique interne pour ce MCP coïncide avec la courbe relative à la composition du mur de référence (sans MCP), ceci est expliqué par la non existence des deux phases (les états liquide et solide) du MCP (Figure III.26). Nous soulignons que le MCP dans ce cas reste tout le temps en état liquide, cela est dû à l'intervalle de la température extérieure imposée variant entre 25°C et 45°C, de ce fait le MCP ne peut jamais être en état solide vu que la température minimale extérieure est supérieure à sa température de fusion.

Concernant la variation de température relative au Micronal Ds [T_m=26°C], l'atténuation en amplitude est négligeable (Figure III.25), et la variation en fraction liquide varie de la phase liquide totale (f=1) au cours de la journée à la phase de solidification partielle (32%) pour la période nocturne (Figure III.26). Le taux de solidification est minimal pour ce type du MCP en raison de la température externe imposée qui a une valeur minimale de 25°C, de ce fait une différence de 1°C par rapport à la température de fusion du Micronal Ds [T_m=26°C] est responsable du taux de solidification qui vaut 32%.

CHAPITRE III

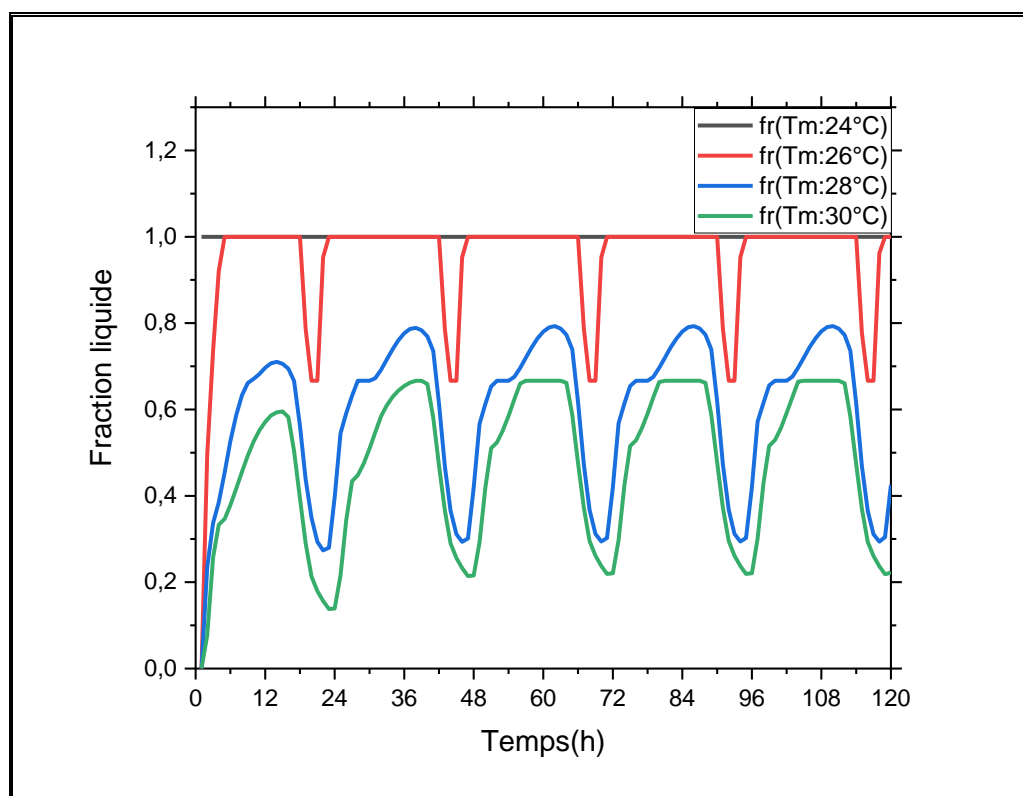


Figure III-26: Variation de la fraction liquide pour les différents types de MCP

Pourtant, pour la comparaison entre le n-octadécane [$T_m=28^{\circ}\text{C}$] et le $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [$T_m=30^{\circ}\text{C}$] (Figure III.26), nous rappelons que la température externe imposée augmente de 25°C à 45°C pendant la 1^{ère} demi-journée (de 0h à 12h pour chaque 24h) et puis commence à diminuer de 45°C à 25°C durant la 2^{ème} demi-journée (de 12h à 24h pour chaque 24h).

Pendant la 1^{ère} demi-journée, la fraction liquide augmente progressivement de la phase solide à la phase liquide et atteint 0.8 de liquéfaction pour le MCP n-octadécane, alors qu'elle atteint 0.66 de liquéfaction pour le MCP $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Ceci est expliqué par la température imposée qui augmente de 25°C à 45°C et qui atteint la température de fusion du MCP n-octadécane [$T_m=28^{\circ}\text{C}$] avant d'atteindre la température de fusion du $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [$T_m=30^{\circ}\text{C}$]. Par ailleurs, durant la 2^{ème} demi-journée, la température imposée diminue de 45°C à 25°C et atteint la température de fusion du $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [$T_m=30^{\circ}\text{C}$] avant d'atteindre la température de fusion du MCP n-octadécane [$T_m=28^{\circ}\text{C}$], et par conséquent la solidification commence pour le $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Pendant cette période, la fraction liquide atteint 0.3 pour le MCP n-octadécane alors qu'elle atteint 0.2 pour le MCP $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Nous remarquons que la solidification est plus dominante pour le $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ que pour le MCP n-octadécane. Par conséquent, la température surfacique

CHAPITRE III

interne pour le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ est supérieure à celle du MCP n-octadécane pendant la période nocturne.

Concernant la variation de la température surfacique interne pendant la période diurne, le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ présente une fluctuation de température. Pourtant, pour le MCP n-octadécane, la température reste stable aux alentours de la température de fusion chaque journée de 8h à 21h. Cette différence en allure de variation de la température surfacique interne est expliquée par la conductivité thermique qui est plus importante pour le MCP $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ que pour le MCP n-octadécane.

D'après les analyses des graphes de la température surfacique interne et la variation de la fraction liquide pour les quatre types des MCP étudiés, le MCP donnant le plus de confort thermique pour une période estivale pour une telle zone climatique chaude comme Khouribga est le MCP n-octadécane à température de fusion de 28°C .

Afin d'avoir une analyse complète et s'assurer que la configuration optimale retenue dans cette étude ne présente aucun effet négatif pendant la période hivernale ; la prochaine section va aborder une étude numérique du mur multicouche avec incorporation de 20% des microcapsules du MCP de type paraffine n-octadécane dans la matrice solide de la brique creuse pour la période hivernale de la ville de Khouribga.

III.6 | Effet de l'incorporation des microcapsules du MCP pour la période hivernale

Pour une analyse plus approfondie sur la performance thermique du mur multicouche, notre objectif dans cette section est de voir si la configuration optimale retenue pour la période estivale ne présente pas un effet négatif pendant la période hivernale. Pour cela, nous allons effectuer une étude pour une période de pointe hivernale avec les données météorologiques relatives à la ville de Khouribga dont la température extérieure varie entre 2 et 15°C . Les résultats obtenus de la variation temporelle de la température surfacique interne pour le mur multicouche avec MCP seront comparés avec les résultats du mur multicouche de référence (sans MCP). Pour cela, la Figure III.27 présente la variation temporelle de la température surfacique interne pour le mur multicouche avec et sans MCP.

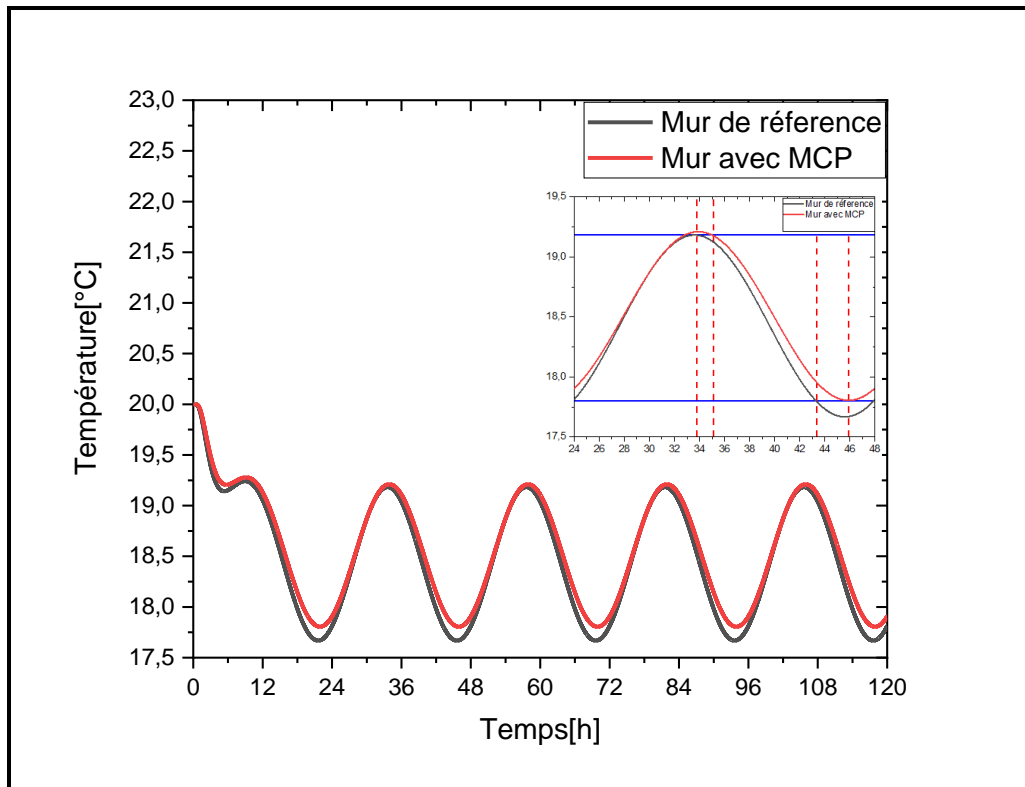


Figure III-27 : Variation temporelle de la température interne du mur multicouche avec et sans MCP pour la période hivernale de la ville de Khouribga

Comme on peut remarquer sur la Figure III.27 que la température interne du mur multicouche sans MCP varie entre 17.6°C et 19.2°C qui est une marge de température plus ou moins acceptable en termes de confort thermique par rapport à la température externe. En ajoutant les microcapsules du MCP dans la matrice solide de la brique creuse, nous soulignons que pendant la période diurne la température interne du mur avec et sans MCP ne présente pas une différence significative en termes de différence de température (0.1°C), mais un déphasage de 1 heure est obtenu pendant la période diurne.

Ainsi, pendant la période nocturne la température maximale vaut 17.6°C et 17.9°C respectivement pour le mur multicouche de référence et le mur multicouche avec MCP ; en plus d'un déphasage thermique de 2 heures. Cette légère augmentation en température ainsi que le déphasage thermique obtenu sont expliqués par la température extérieure qui ne dépasse pas 15°C alors que la température de fusion du MCP est de 28°C, ce qui entraîne que les microcapsules du MCP restent tout le temps en phase solide (Figure III.28), et par conséquent les microcapsules commencent à diffuser de la chaleur vers l'intérieur et jouent donc un rôle d'isolation thermique.

CHAPITRE III

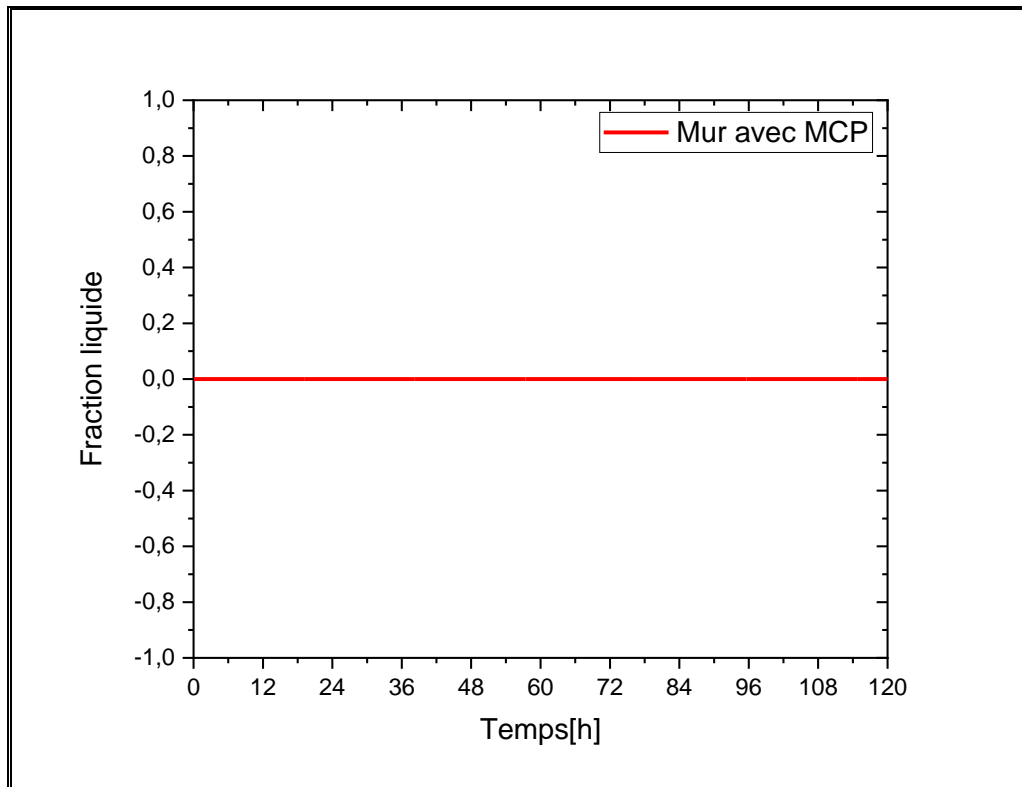


Figure III-28 : Variation temporelle de la température interne du mur multicouche avec et sans MCP pour la période hivernale de la ville de Khouribga

On conclut que la conception optimale retenue pendant la période estivale a donné des résultats positifs en période hivernale permettant d'augmenter légèrement la température de la surface intérieure par rapport aux mur multicouche de référence en plus d'un déphasage de 1 heure pendant la journée et de 2 heures pendant la période nocturne.

III.7 | Conclusion

Un modèle physique est proposé dans cette étude pour évaluer le comportement thermique d'un mur multicouche intégrant le matériau à changement de phase dans différents emplacements dans le mur, le MCP est micro-encapsulé dans des sphères de polyéthylène permettant d'empêcher la fuite dans la phase liquide du MCP.

Le matériau à changement de phase est une paraffine n-octadécane. Les calculs sont élaborés par la considération de l'approche d'enthalpie, en appliquant la méthode numérique des volumes finis.

Les différents murs étudiés sont un mur dans lequel les microcapsules du MCP sont placées dans la couche de mortier externe(M1), un mur multicouche dans lequel nous avons placé les

CHAPITRE III

microcapsules du MCP dans la couche du mortier proche de l'ambiance interne (M2), et un mur multicouche dans lequel les microcapsules du MCP sont placées dans la matrice solide de la brique creuse à 8 trous(M3).

La propagation de l'onde de température du milieu externe vers la face interne du mur multicouche avec intégration de 15% de microcapsules a été exposé pour les différents types des murs multicouche, en analysant les températures surfaciques et celles des interfaces, en plus d'une comparaison avec un mur de référence sans MCP. À ce stade la comparaison entre le mur de référence et celui avec le MCP pour les différents types de mur multicouche avec une incorporation de 15% des microcapsules a montré que la meilleure configuration est celle relative au mur multicouche avec incorporation des microcapsules du MCP dans la matrice solide de la brique creuse. Ensuite, nous avons procédé à la variation de la quantité des microcapsules de 15% à 35% dans les trois types de mur multicouche avec une comparaison avec le mur de référence (sans MCP).

L'évaluation de l'effet de la quantité des microcapsules dans les différents types de mur multicouche a montré que pour les trois scénarios pour une ville chaude telle que Khouribga qu'il n'est pas souhaitable de dépasser 20% en termes de pourcentage des microcapsules du MCP afin de garantir une meilleure performance thermique. Nous soulignons aussi que les résultats bibliographiques concernant la compression mécanique ont montré que le pourcentage optimal est celui de 20%. Dans ce cas, la configuration retenue dans notre étude prouve à la fois des performances thermiques et mécaniques.

Ainsi, la comparaison entre les différents types a montré que le scénario optimal est celui dans lequel nous intégrons les microcapsules du MCP dans la matrice solide de la brique creuse, permettant d'avoir un décalage temporel de 3 heures. Par ailleurs, il a été conclu que tant que les fractions liquide et solide coexistent pendant la variation temporelle, l'atténuation en amplitude et l'augmentation du déphasage sont plus significatifs.

Nous avons aussi évalué la performance thermique du mur multicouche en changeant le type du MCP, dont leurs températures de fusion varient entre 24°C et 30°C. On a trouvé que la paraffine n-octadécane de température de fusion 28°C représente le meilleur scénario en termes du confort thermique interne pour la ville de Khouribga en période estivale.

Finalement, nous avons élaboré une étude numérique en période hivernale en utilisant la conception optimale retenue pendant la période estivale, les résultats ont montré que l'intégration de 20% des microcapsules de MCP dans la matrice solide de la brique creuse présente des améliorations en termes de performances thermiques pendant les deux périodes estivale et hivernale, en utilisant le MCP de type paraffine n-octadécane.

IV | CHAPITRE IV :
Amélioration des Performances
Thermiques du Plancher
Chauffant

CHAPITRE IV

IV.1 | Introduction

Avec la croissance de la consommation énergétique dans le secteur de construction, il est primordial de garantir un environnement interne confortable à travers un mode de chauffage respectueux de l'environnement.

Les planchers chauffants sont largement utilisés dans le secteur du bâtiment, car ils permettent de répartir uniformément la température et apportent une amélioration du confort thermique interne. Ainsi une conception appropriée du système de chauffage est nécessaire afin d'aboutir à un confort thermique souhaitable et de garantir une distribution uniforme de la température surfacique du plancher.

Les MCP peuvent être inclus dans les éléments porteurs du bâtiment et offrent un plus grand stockage thermique dans une plage de température étroite et peuvent stocker ou libérer une grande quantité de chaleur dans le processus de changement de phase solide à liquide et vice versa, ainsi les MCP sont capables de déplacer la charge thermique et d'améliorer le confort thermique intérieur tout en diminuant la fluctuation de la température de l'air intérieur pendant le processus de changement de phase à des températures presque constantes.

Dans le présent chapitre, nous proposons de combiner l'intégration des tubes de chauffage dans les planchers de bâtiment et l'insertion des microcapsules du MCP afin de bénéficier de la chaleur diffusée par ces derniers pendant le processus de décharge des tubes chauffants, cela apportera un niveau de température plus performant à l'intérieur du bâtiment pendant la période de décharge.

Pour cela, on commencera par l'intégration d'une quantité minimale des microcapsules du MCP afin de prouver l'effet positif de l'ajout des microcapsules aux plancher chauffant. Par la suite on abordera une étude paramétrique de l'effet de la position et de la quantité des microcapsules sur les performances thermiques du plancher, suivi d'une étude paramétrique de l'inter-distance entre les tubes de chauffage et la température de mise en chauffage convenable. Ensuite, afin de mieux bénéficier de cette solution passive, une étude sélective du MCP convenable à notre configuration de plancher sera abordée. Mais comme c'est connu que les MCP conventionnels présentent l'inconvénient de la faible conductivité thermique, d'où l'idée de l'ajout des nanoparticules conducteurs aux matériaux à changement de phase. La combinaison de ces derniers permet d'avoir des matériaux appelés NePCM. Ces derniers ont révélé des améliorations cruciales sur l'augmentation de la conductivité thermique. Dans notre cas, nous proposons d'ajouter aux microcapsules du MCP intégrées dans le plancher

CHAPITRE IV

chauffant des nanoparticules simples et hybrides afin d'améliorer le taux de transfert de chaleur vers l'ambiance interne du bâtiment.

Finalement, en utilisant la meilleure configuration obtenue pour le chauffage en période hivernale, une étude numérique sera abordée en imposant une température froide pour l'eau circulant dans les tubes, afin de s'assurer que la configuration qui sera retenue pour la période hivernale ne présente pas d'effet négatif dans l'été, et ainsi pour avoir un rafraîchissement de l'ambiance interne pendant la période estivale.

IV.2 | Effet de l'intégration des microcapsules du MCP sur les performances thermiques du plancher.

Dans cette section, nous allons analyser l'amélioration du système de chauffage par le sol en intégrant des microcapsules du MCP de type sel hydraté (S27) de température de fusion de 27°C dans la couche de la chape de ciment (Figure IV.1), avec une température de chauffage de 35°C et une inter-distance entre les tubes de 14cm.

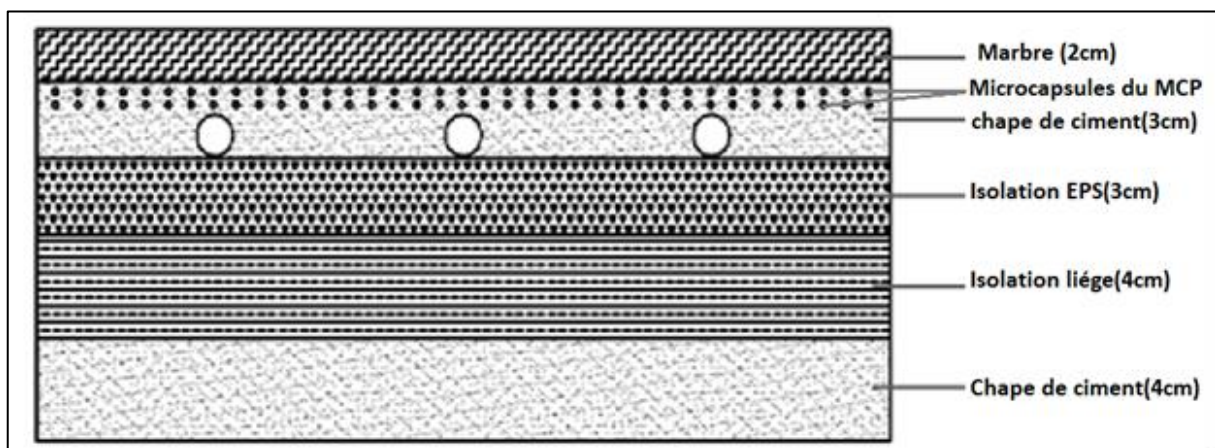


Figure IV-1: Configuration du plancher chauffant avec microcapsules du matériau à changement de phase

La température de surface supérieure sera examinée afin d'évaluer l'effet de l'intégration des microcapsules du MCP sur la performance thermique du sol en plus d'une comparaison avec le cas de référence.

La Figure IV.2 montre la variation temporelle de la température surfacique supérieure, pour le plancher chauffant avec 5% de fraction massique du MCP et pour le plancher chauffant sans MCP (cas de référence).

CHAPITRE IV

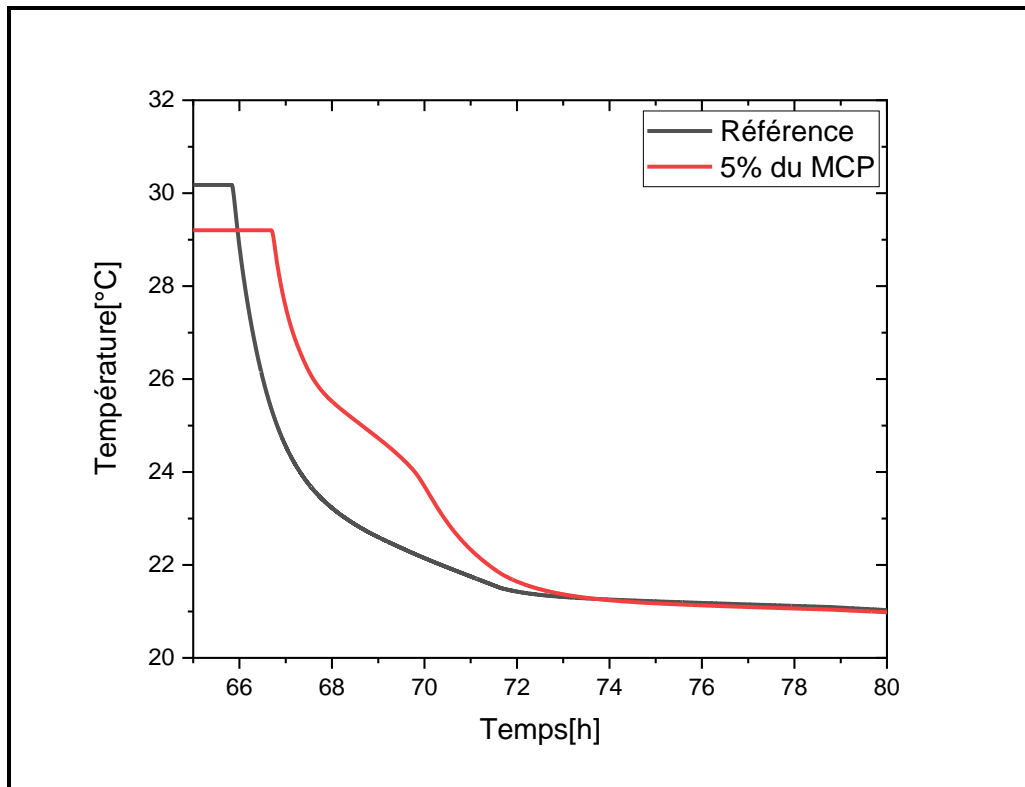


Figure IV-2 : Variation temporelle de la température surfacique pour le plancher chauffant avec et sans MCP

En comparant la variation de la température surfacique du plancher avec et sans MCP, il s'est avéré que pendant la période de charge, la température reste autour de 30°C pour le cas de référence. Cependant, la température surfacique maximale du plancher chauffant avec MCP est de 29°C. La température alors ne dépasse pas 1°C en termes de différence, mais en introduisant le MCP, un déphasage d'environ une heure est obtenu lors du processus de charge. Une fois que le système de chauffage est éteint, le plancher chauffant sans MCP change de température plus rapidement que celui avec MCP, cela montre le très bon effet cumulatif de ce dernier, et le plancher avec MCP est chauffé beaucoup plus longtemps que celui de référence. Les températures maximales surfaciques du plancher lors de la décharge sont respectivement de 22.6°C et 25°C pour le plancher chauffant classique et celui avec MCP, alors une amplitude maximale aux alentours de 2.5°C en parallèle à un déphasage temporel de 2.5h par rapport au plancher chauffant sans MCP sont obtenus en introduisant une quantité minimale de microcapsules (5%). En concluant que l'intégration des microcapsules du MCP a permis de bénéficier de leur effet cumulatif lorsque le chauffage est éteint. Or qu'il est essentiel de déterminer la position des microcapsules permettant un confort thermique pendant la période de décharge, cela fera l'objet de la prochaine section.

CHAPITRE IV

IV.3 | Effet de la position des microcapsules du MCP sur les performances thermiques du plancher.

Le but de cette section est l'analyse numérique de l'effet des microcapsules du MCP intégrées dans le plancher avec une fraction massique de 5% en dessous et en dessus des tubes chauffants.

La Figure IV.3 montre la variation temporelle de la température surfacique supérieure du plancher chauffant pour les deux positions du MCP respectivement pendant la période de charge et de décharge avec une température de chauffage de 35°C ; et la Figure IV.4 montre un zoom sur la période de la décharge.

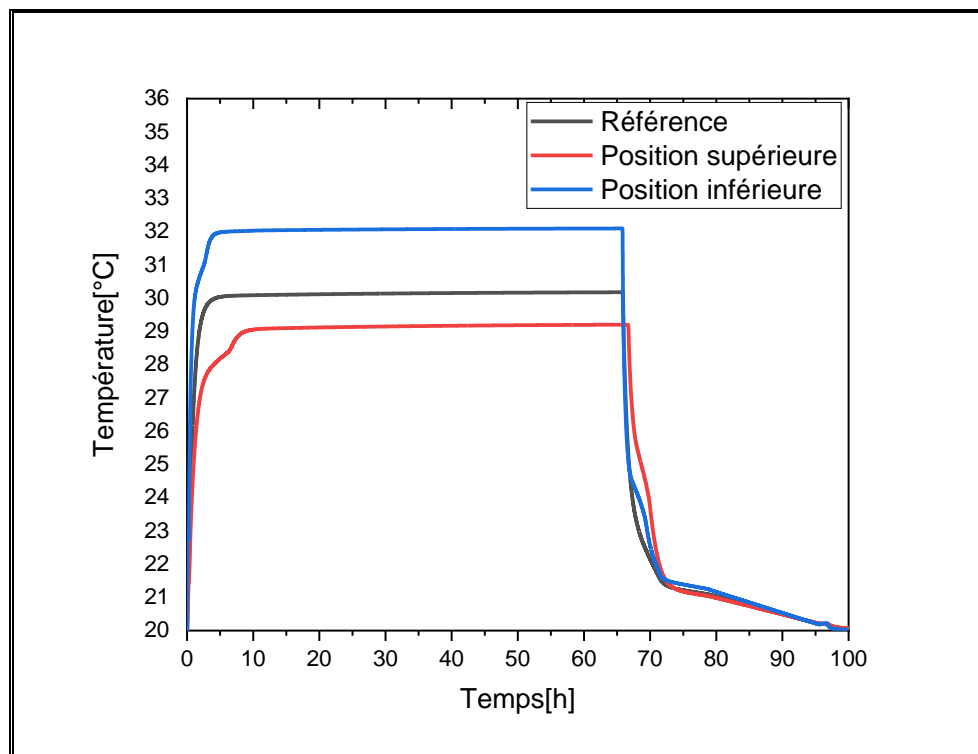


Figure IV-3. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différentes positions du MCP.

CHAPITRE IV

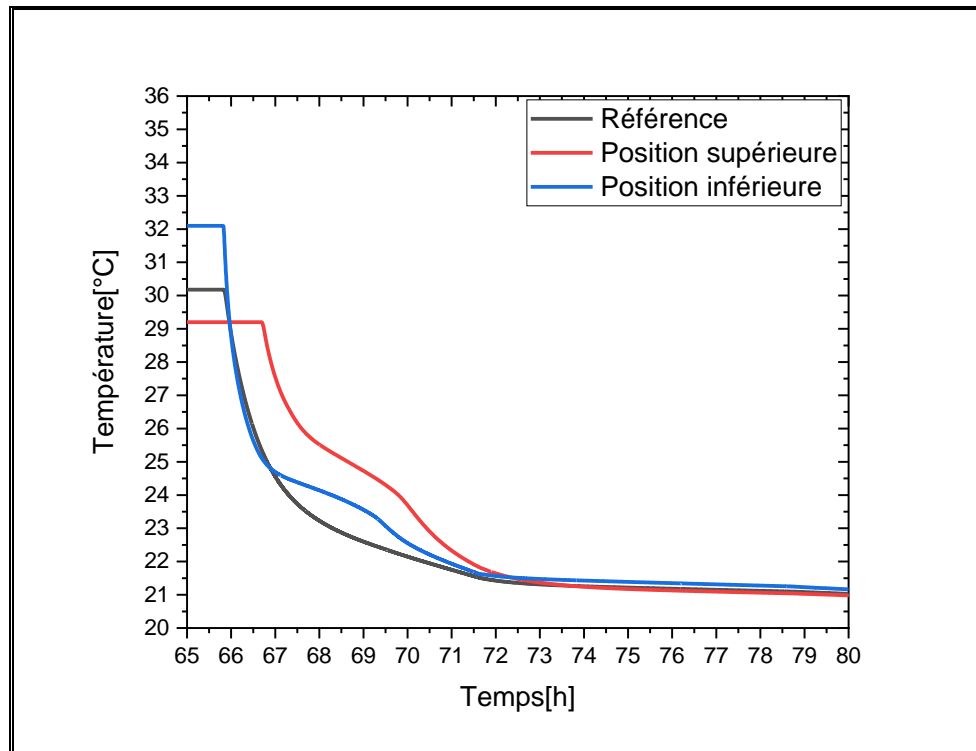


Figure IV-4 . Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pendant la décharge pour différentes positions du MCP.

Pour l'intégration des microcapsules entre les tubes de chauffage et la couche de revêtement (position supérieure), d'après la comparaison entre la variation de température surfacique du plancher avec MCP et du plancher sans MCP (cas de référence), il s'est avéré que pendant la période de charge, la température ne présente pas une grande différence avec le cas de référence (environ 1°C). Cependant, le chauffage par le sol consiste à chauffer l'entièreté de la surface de plancher à une température maximale de 28°C permettant le confort humain[82] . Nous soulignons que cette variation presque identique de la température des deux planchers pendant la période de chauffage est due au changement de phase des microcapsules du MCP, ceci est clairement apparue sur la Figure IV.5 qui présente la variation temporelle de la fraction liquide pendant la période de charge pour les deux positions du MCP.

CHAPITRE IV

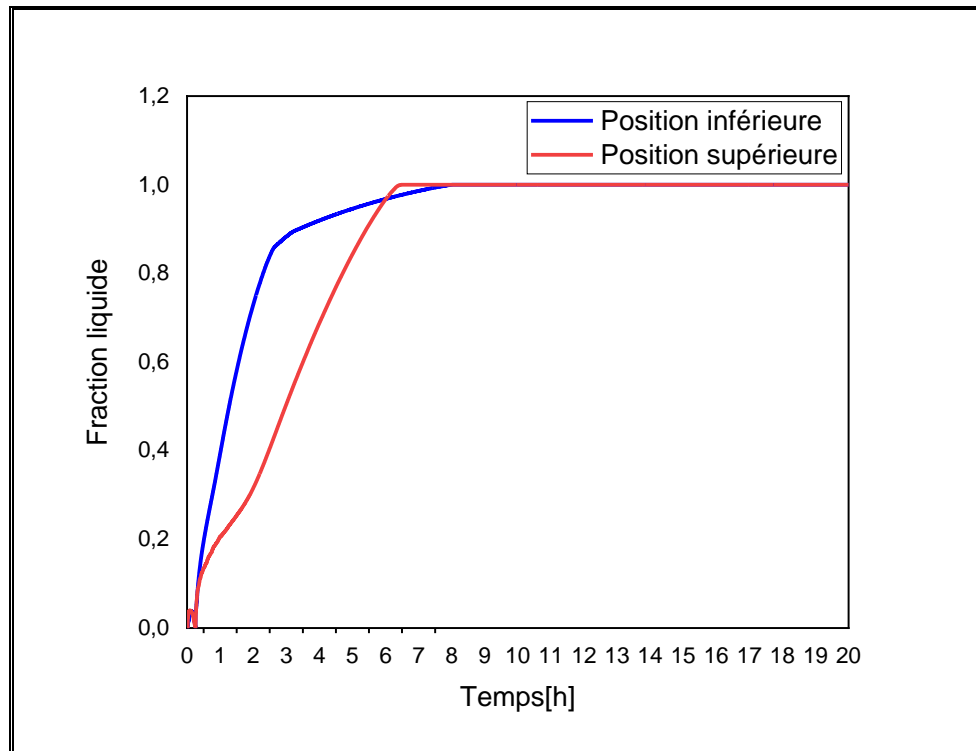


Figure IV-5 . Variation temporelle de la fraction liquide pendant la période de charge pour différentes positions du MCP.

Pour la position supérieure, le temps de changement de la phase solide totale à la phase liquide totale a pris 6.5h et ensuite les microcapsules du MCP restent en phase liquide (emmagasination) durant le reste de la période de charge, ce qui a permis pendant cette période d'avoir un stockage d'énergie par chaleur latente à température fixe aux alentours de la température de fusion, d'où la stabilisation de la température surfacique du plancher durant la charge des tubes chauffants.

Une fois que le système de chauffage est éteint, le plancher chauffant sans MCP change de température plus rapidement que le plancher chauffant avec microcapsules du MCP, cela montre le très bon effet cumulatif des microcapsules du MCP, car la surface du plancher reste chaude beaucoup plus de temps que celle du plancher de référence avec une durée de solidification aux alentours de 3.2h (Figure IV.6).

CHAPITRE IV

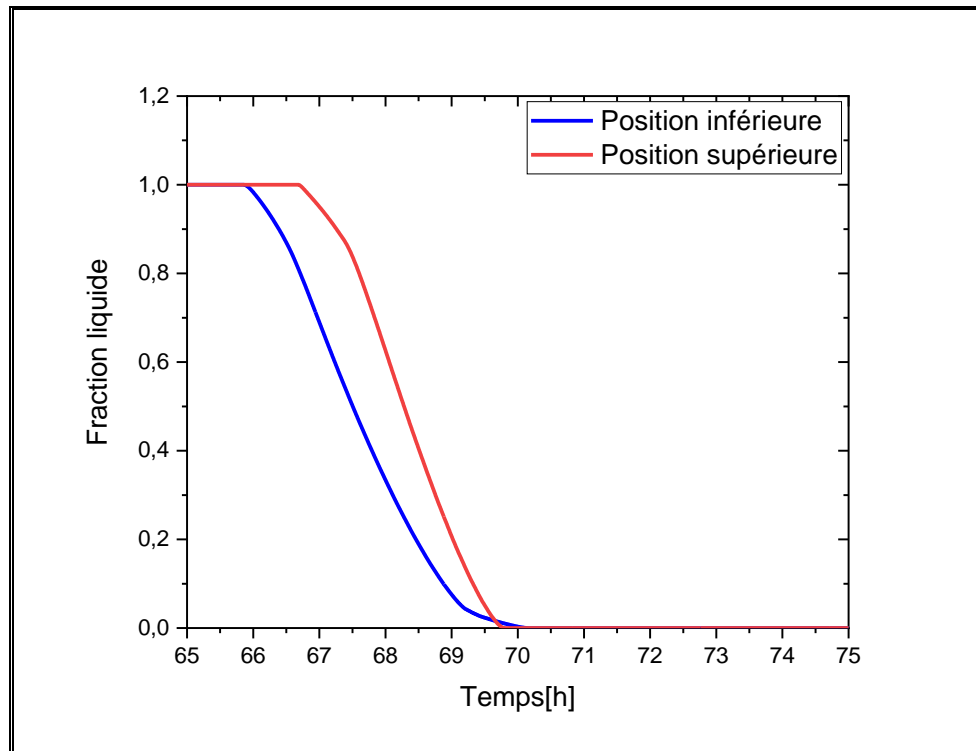


Figure IV-6 .Variation temporelle de la fraction liquide pendant la période de décharge pour différentes positions du MCP.

Les températures maximales surfacique du plancher pendant la décharge sont respectivement de 22.6°C et 25°C pour le plancher chauffant classique et le plancher chauffant avec MCP, d'où une amplitude maximale aux alentours de 2.5°C en parallèle à un déphasage temporelle du pic de la température du plancher de 2.5h sont obtenus par l'intégration des microcapsules du MCP en dessus des tubes de circulation de l'eau chaude.

Concernant l'intégration des microcapsules entre les tubes de chauffage et la couche d'isolation (position inférieure). Pendant la charge, les températures maximales en surface supérieure du plancher sont respectivement de 32°C et 30°C pour le plancher avec MCP et le plancher classique (Figure IV.4), une augmentation d'amplitude maximale de presque 2°C est obtenue provoquant l'inconfort thermique des occupants pendant la période de charge ; cette augmentation est due à la position des tubes de chauffages qui sont plus proche de l'ambiance interne.

Durant la période de décharge, les températures maximales en surface supérieure du plancher sont respectivement de 24°C et 22.6°C pour le plancher avec MCP et le plancher classique, d'où une augmentation d'amplitude maximale aux alentours de 1.5°C avec un déphasage de

CHAPITRE IV

1h sont obtenus par l'intégration des microcapsules du MCP en dessous des tubes de circulation de l'eau chaude.

En comparant les deux scénarios d'emplacement des microcapsules du MCP respectivement en dessous et en dessus des tubes de circulation d'eau chaude, la Figure IV.7 montre que la fusion pour le plancher avec emplacement des microcapsules en dessous et en dessus des tubes dure respectivement d'environ 8h et 6.5h et d'environ 4h et 3.2h en termes de temps de solidification.

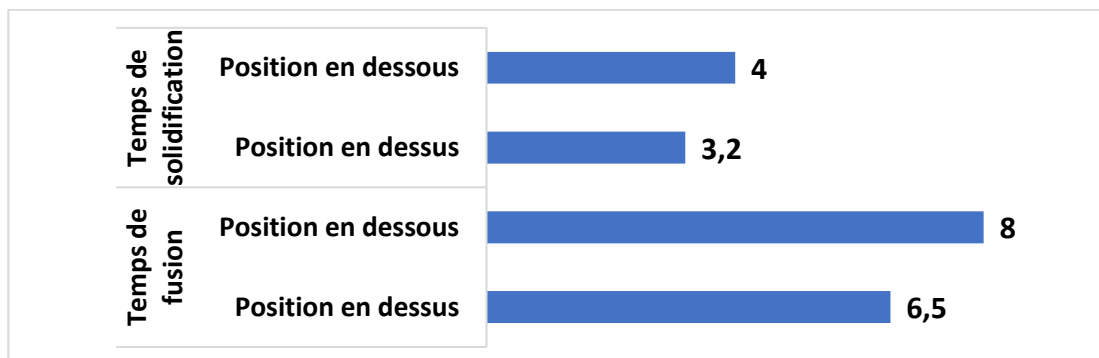


Figure IV-7 . Temps de fusion et de solidification du plancher chauffant avec MCP en fonction de la position des microcapsules.

Il s'est avéré que pour l'emplacement en dessous des tubes, une augmentation du flux thermique surfacique pendant la période de charge de 20% (Figure VI.8) est obtenue.

CHAPITRE IV

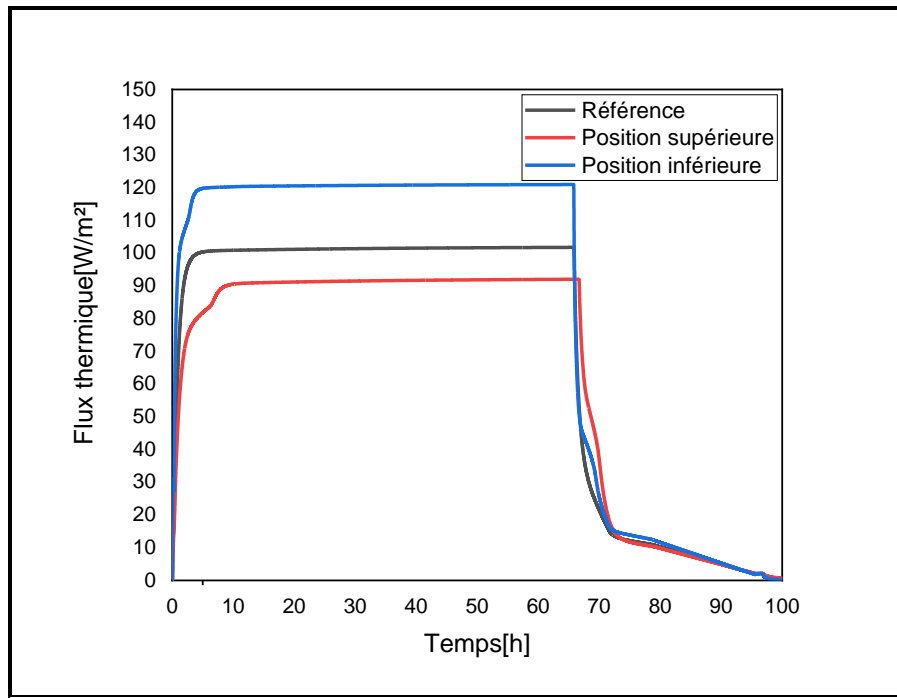


Figure IV-8. Variation temporelle du flux surfacique du plancher chauffant pour différentes positions du MCP.

Cependant, ce phénomène est inverse pendant la solidification et le flux maximale passe de 32W/m^2 pour le cas de référence à 42W/m^2 pour la position en dessous des tubes et à un maximum de 50W/m^2 pour la position en dessus des tubes, ce qui est équivalent à une augmentation de 32% et 57% (Figure IV-8) respectivement pour la position en dessous et en dessus des tubes par rapport au cas de référence.

En concluant que le meilleur emplacement des microcapsules du MCP est celui qui est entre les tubes chauffant et la couche du revêtement du plancher (position supérieure), permettant de mieux bénéficier de l'effet cumulatif du MCP durant la période où le chauffage est éteint avec une augmentation maximale d'amplitude de 2.5°C et un déphasage de 2.5h, et qu'en plaçant les microcapsules en dessous des tubes de chauffage, la chaleur générée par ces derniers est non seulement stockée dans le MCP, mais également dissipée dans l'environnement inférieur à travers le matériau isolant, ce qui entraîne un gaspillage d'énergie. Le choix optimal alors est la position des microcapsules du MCP en dessus des tubes chauffants, offrant de meilleures performances thermiques au plancher. Pourtant il est indispensable de choisir une quantité de microcapsules permettant d'avoir le plus de confort thermique. Ceci fera l'objectif de la prochaine section, en analysant l'effet de la variation du pourcentage des microcapsules du MCP sur les performances thermiques du plancher.

CHAPITRE IV

IV.4 | Effet de la variation de la quantité de microcapsules sur les performances thermiques du plancher.

Dans cette section, le pourcentage des microcapsules est varié de 5% à 30%, ce qui permet d'évaluer l'impact du changement de la quantité du MCP sur l'ambiance interne et de comparer ces scénarios avec la configuration de référence (plancher chauffant sans MCP).

La Figures IV.9 met en évidence le profil de la variation temporelle de la température surfacique supérieure du plancher durant la charge et la décharge des tubes de chauffage ; et la Figure IV.10 présente un zoom de la variation temporelle de la température surfacique pendant la période de décharge.

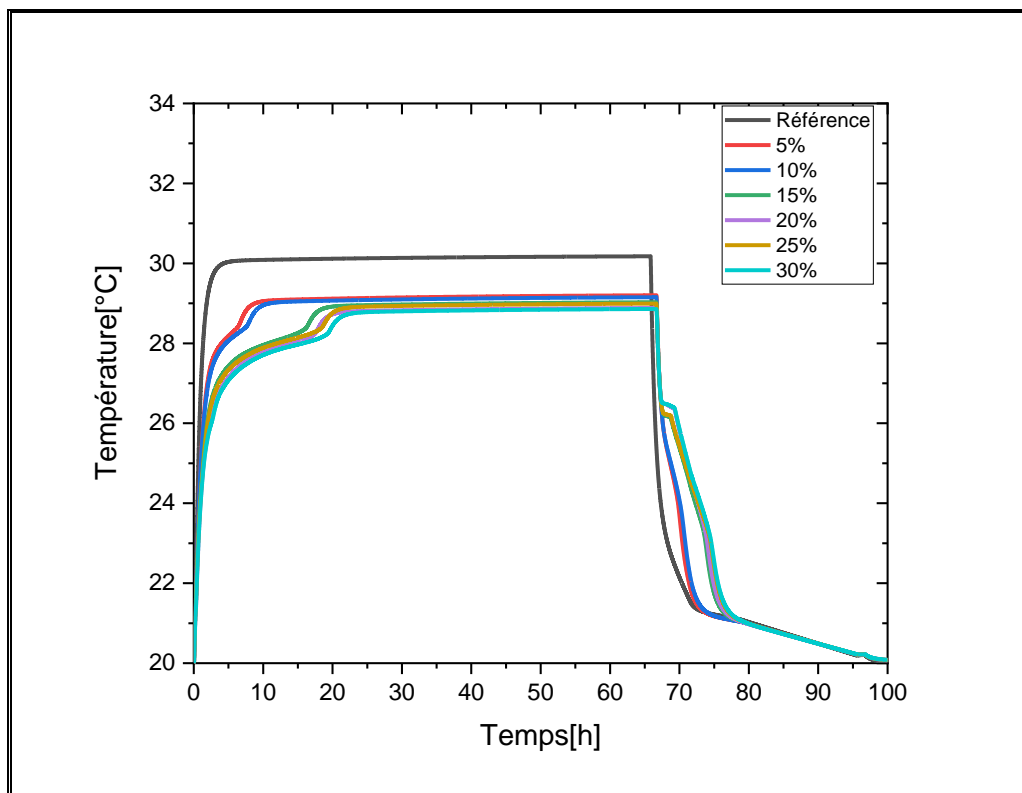


Figure IV-9. Variation temporelle de la température surfacique de plancher chauffant pour différents pourcentages de microcapsules du MCP.

CHAPITRE IV

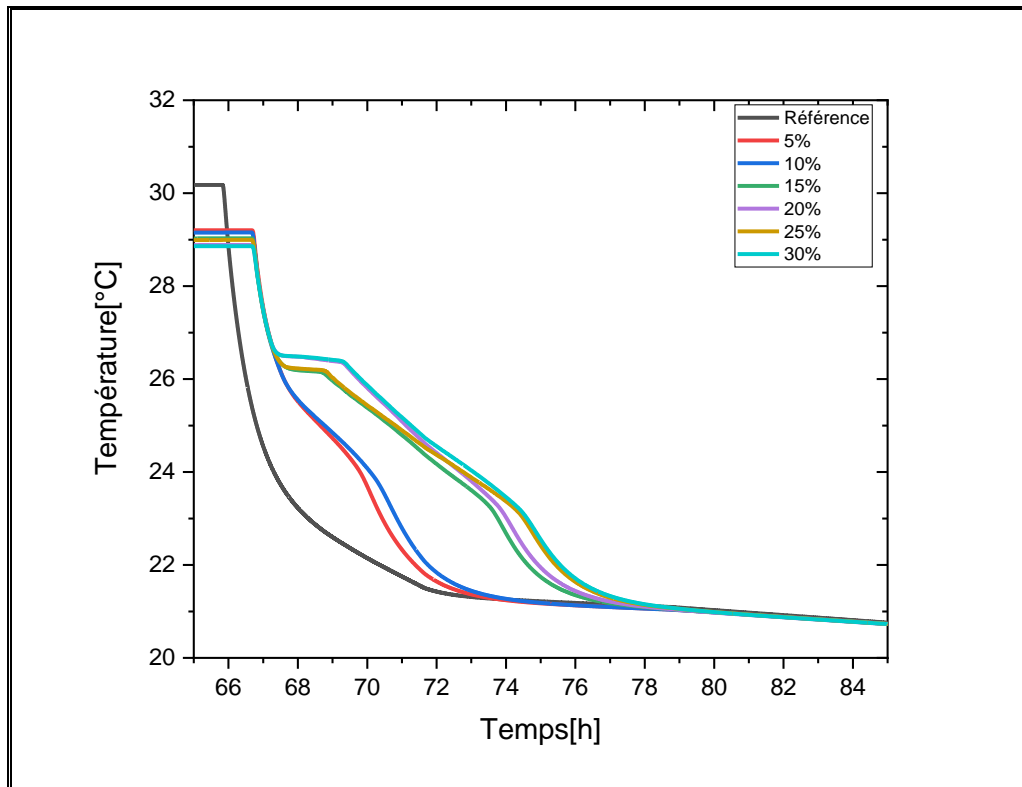


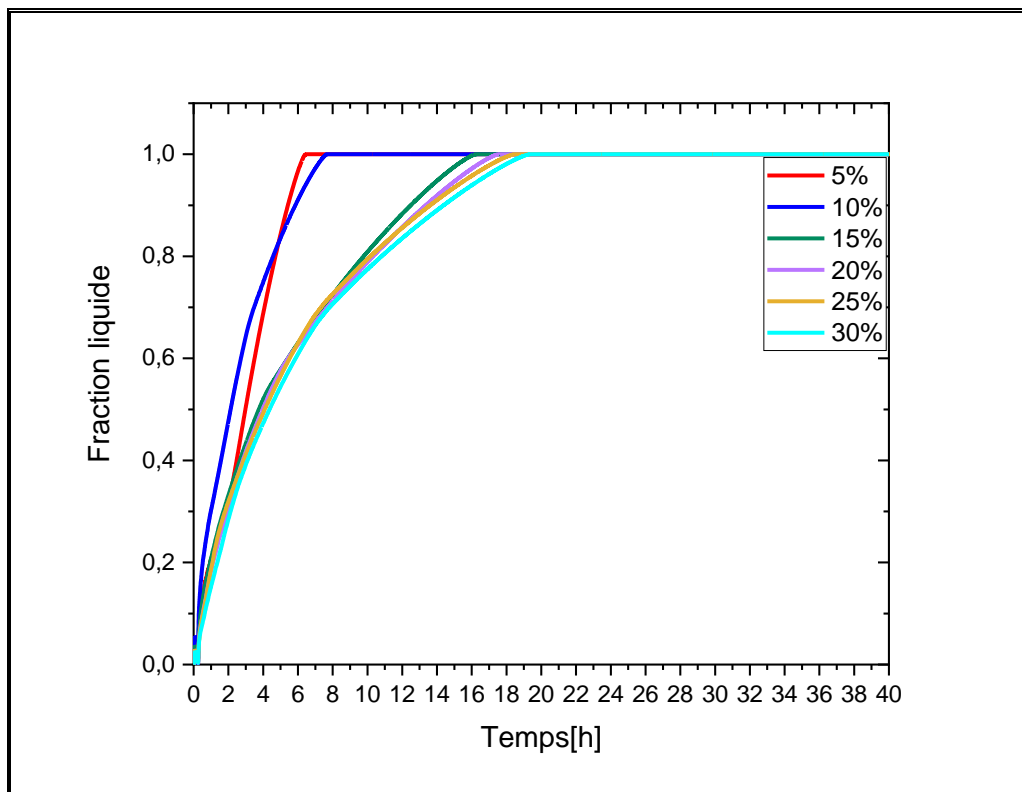
Figure IV-10. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différents pourcentages de microcapsules du MCP pendant la période de décharge.

Pendant la période de fusion, l'intégration du MCP dans le plancher chauffant permet le stockage de la chaleur provenant des tubes chauffants et empêche le transfert complet de ce dernier à la surface supérieure du plancher, et ce grâce à la capacité de stockage d'énergie sous forme de chaleur latente pendant la période de charge où le MCP se fond totalement. Cependant, lorsque le processus de décharge est présent, les microcapsules du MCP commencent à se solidifier et l'énergie thermique stockée pendant la période de charge sera diffusée au fur et à mesure que le taux de solidification augmente et par conséquent un chauffage de la surface du plancher chauffant est obtenu par intégration des microcapsules du MCP.

Afin de quantifier le taux de chauffage apporté par l'intégration de ces matériaux à efficacité énergétique, il est indispensable de mener une analyse thermique en se basant sur les trois facteurs prouvant la performance thermique du plancher, à savoir la variation de la température maximale qui de son rôle permet de préciser l'amplitude maximale, le déphasage de l'onde de température, et le temps nécessaire pour la fusion et la solidification des microcapsules du MCP.

CHAPITRE IV

Pendant la période de charge et par rapport au cas de référence, il est clairement apparu qu'en augmentant la quantité de microcapsules, la différence de la température de surface est aux alentours de 1°C en passant de 5% à 30% de microcapsules du MCP. Cependant, les températures maximales durant la phase de décharge pour le plancher chauffant avec MCP sont aux alentours de 25°C pour 5% et 10% de microcapsules, aux alentours de 26°C pour la micro-encapsulation de 15% et 20% et passent à 26.4°C pour 25% et 30% des microcapsules du MCP. En remarquant que plus en augmentent la quantité du MCP plus la température du plancher est proche de la température du confort qui ne doit pas dépasser 28°C ; en soulignons également que lorsqu'on dépasse le pourcentage du MCP de 15%, les résultats sont presque semblables et présentent une augmentation de température de 3.5°C en comparant avec le plancher de référence qui a une température maximale pendant la décharge de 22.6°C . En plus d'un déphasage de l'onde de température de 5 heures qui est obtenu en intégrant ce pourcentage du MCP. Dans ce cas, il n'est pas souhaitable de dépasser une quantité de 15% de microcapsules pour un plancher chauffant afin de garantir le confort thermique interne. Concernant le temps mis pour le processus de fusion et de solidification, la Figures IV.11 illustre la variation temporelle de la fraction liquide pendant la charge des tubes de circulation d'eau chaude, et la Figure IV.12 présente la variation temporelle de la fraction liquide pendant la période de décharge.



CHAPITRE IV

Figure IV-11. Variation temporelle de la fraction liquide pour différents pourcentages de microcapsules du MCP pendant la charge.

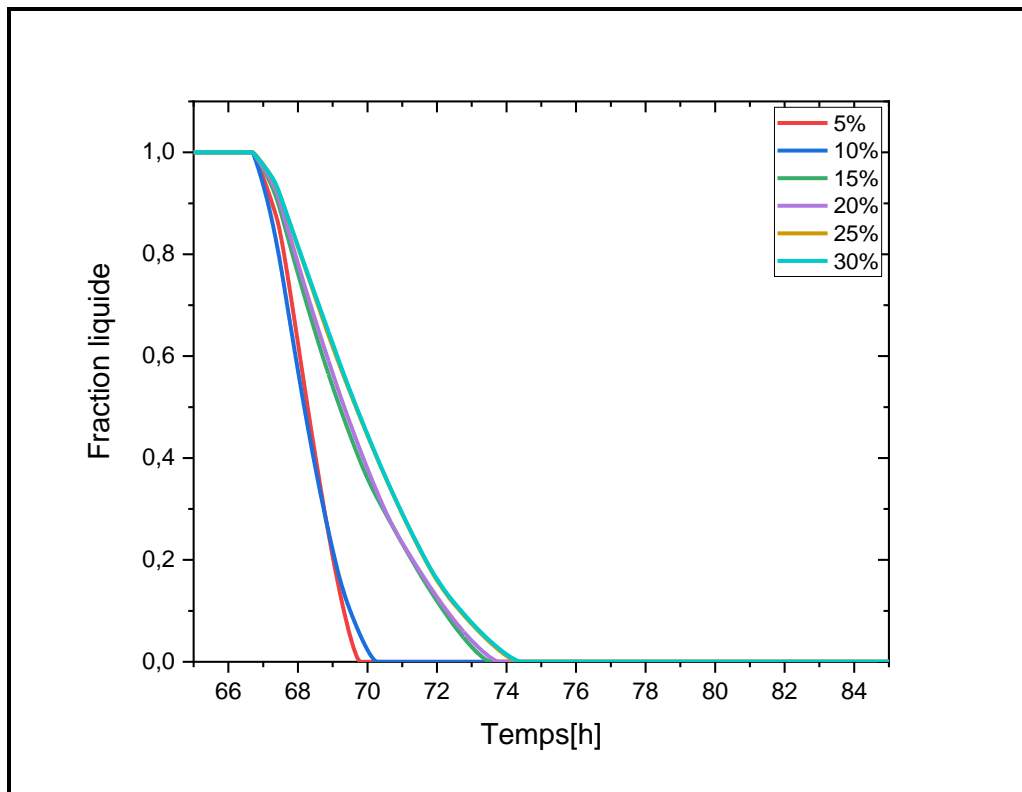


Figure IV-12. Variation temporelle de la fraction liquide pour différents pourcentages de microcapsules du MCP pendant la décharge.

Il est apparu que lorsqu'on passe de 5% à 30%, le temps de fusion passe de 6.5h à 19h (Figure IV.13), ceci explique que plus la quantité de microcapsules augmente, plus la fusion totale demande plus de temps, ce qui est favorable vu que lors du changement de phase, les microcapsules du MCP ont une température stable égale à la température de fusion du MCP qui présente une température du confort humain.

CHAPITRE IV

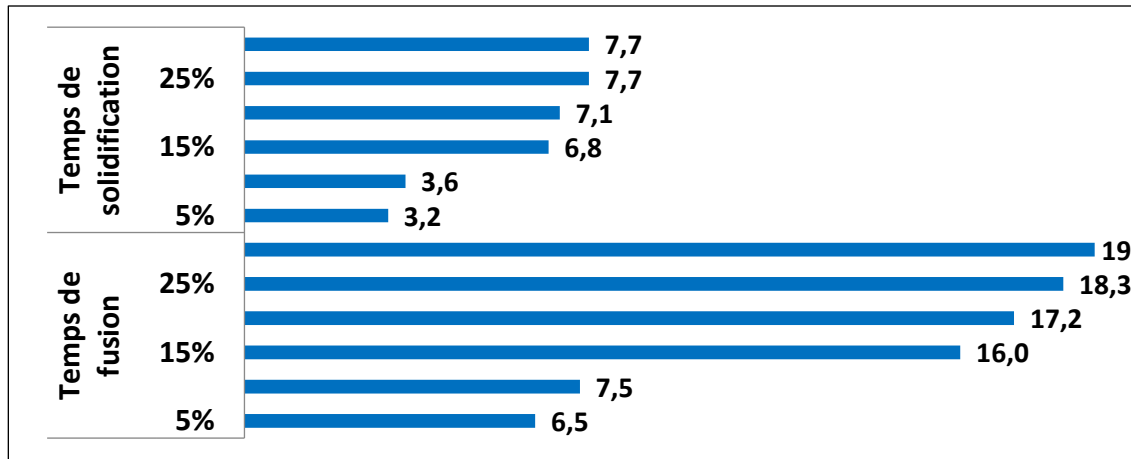


Figure IV-13 . Temps de fusion et de solidification du plancher chauffant avec MCP en fonction de la quantité des microcapsules.

Cependant, lorsqu'on ajoute plus de 15% de microcapsules, on ne remarque pas une grande différence en termes de temps de fusion, et que l'intégration de 15% de microcapsules nous a permis d'avoir une température du plancher acceptable dans la plage du confort thermique.

Pour le processus de solidification, plus la quantité du MCP augmente, plus le temps de solidification augmente et reste aux alentours de 7h après 15% (Figure IV.13), donc il n'est pas souhaitable de dépasser cette quantité afin de bénéficier de l'effet positif de l'intégration des microcapsules du MCP.

Pour conclure, en intégrant 15% des microcapsules du MCP dans le plancher chauffant, la température du plancher s'est augmentée de 3.5°C lorsque le chauffage est éteint, ce qui entraîne une variation du flux thermique surfacique maximal de 31.2 W/m² pour le cas de référence à 61.8 W/m² pour le plancher chauffant avec 15% de microcapsules du MCP (Figure IV.14), cette différence est équivalente à 98% d'augmentation en comparant avec le cas de référence, en plus d'un déphasage thermique de 5 heures qui est obtenu pendant la décharge, finalement le scénario optimal permettant une performance thermique maximale est celui relatif à 15% de quantité de microcapsules.

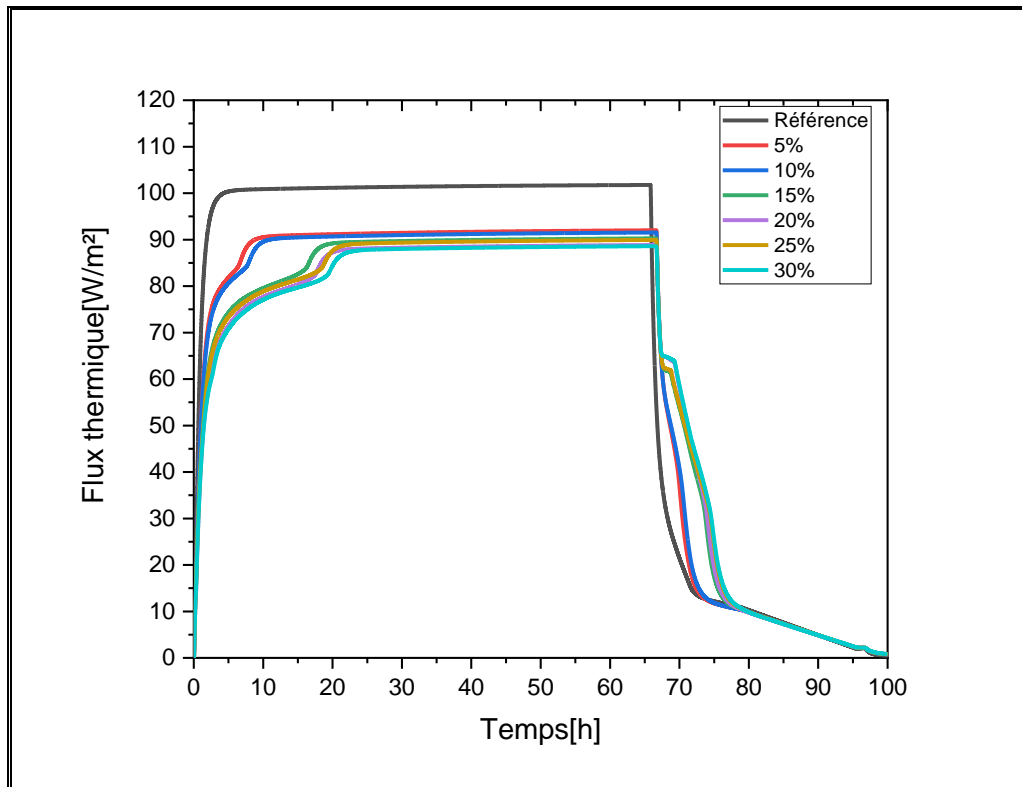


Figure IV-14. Variation temporelle du flux thermique surfacique de plancher chauffant pour différents pourcentages de microcapsules du MCP.

Dans la section suivante, nous aborderons l'étude de l'effet de l'inter-distance entre les tubes chauffant afin d'avoir une conception de plancher chauffant permettant à la fois des performances thermiques et économiques.

IV.5 | Effet de l'inter-distance entre les tubes de chauffage sur les performances thermiques du plancher.

Les tubes chauffés ont été placés sur la couche d'isolation thermique et le MCP micro-encapsulé était en dessus de ces tubes, au-dessus desquels se trouvait un revêtement de sol. Lorsque les tubes chauffaient, la chaleur était transportée vers le MCP et stockée. Ensuite, transportée vers la surface supérieure du plancher.

Dans cette section, l'effet de la distance entre les tubes pour le plancher chauffant avec 15% de microcapsules du MCP et une température de chauffage d'eau chaude de 35°C sera évaluée afin de garantir à la fois une performance thermique et économique.

La Figure IV.15 montre l'effet du changement d'inter-distance entre les tubes de chauffage sur la variation temporelle de la température surfacique du plancher pendant la période de

CHAPITRE IV

charge et de décharge. Et la Figure IV.16 montre un zoom de la variation temporelle de la température surfacique du plancher pendant la période de décharge.

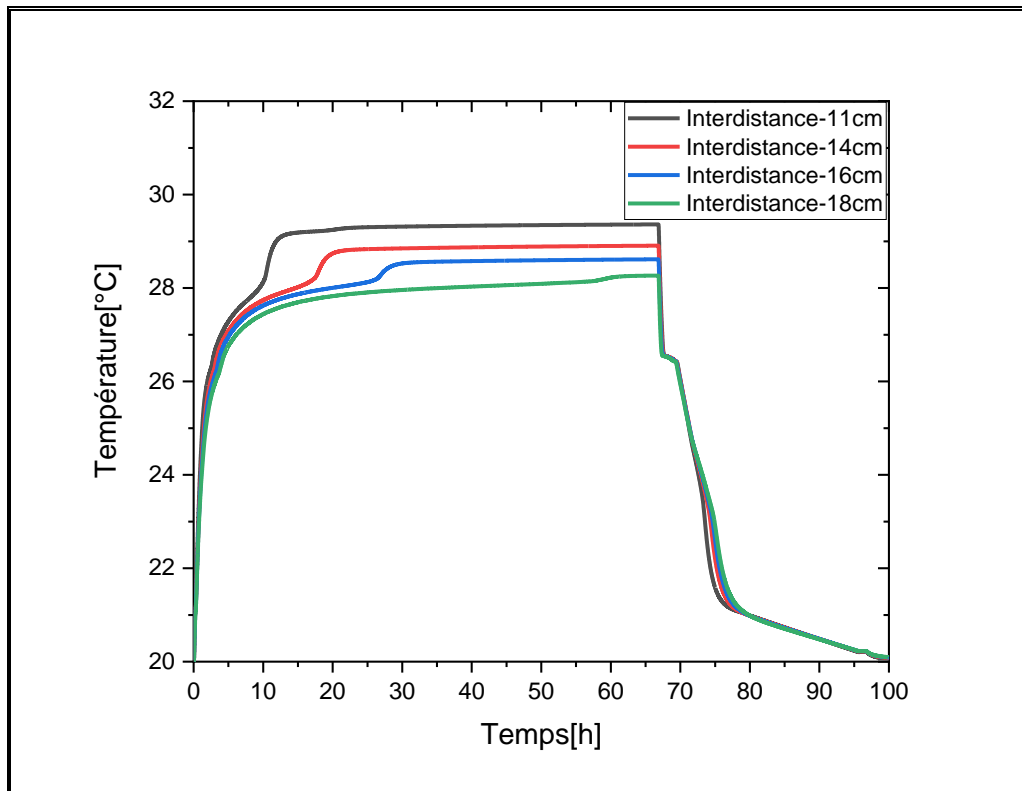
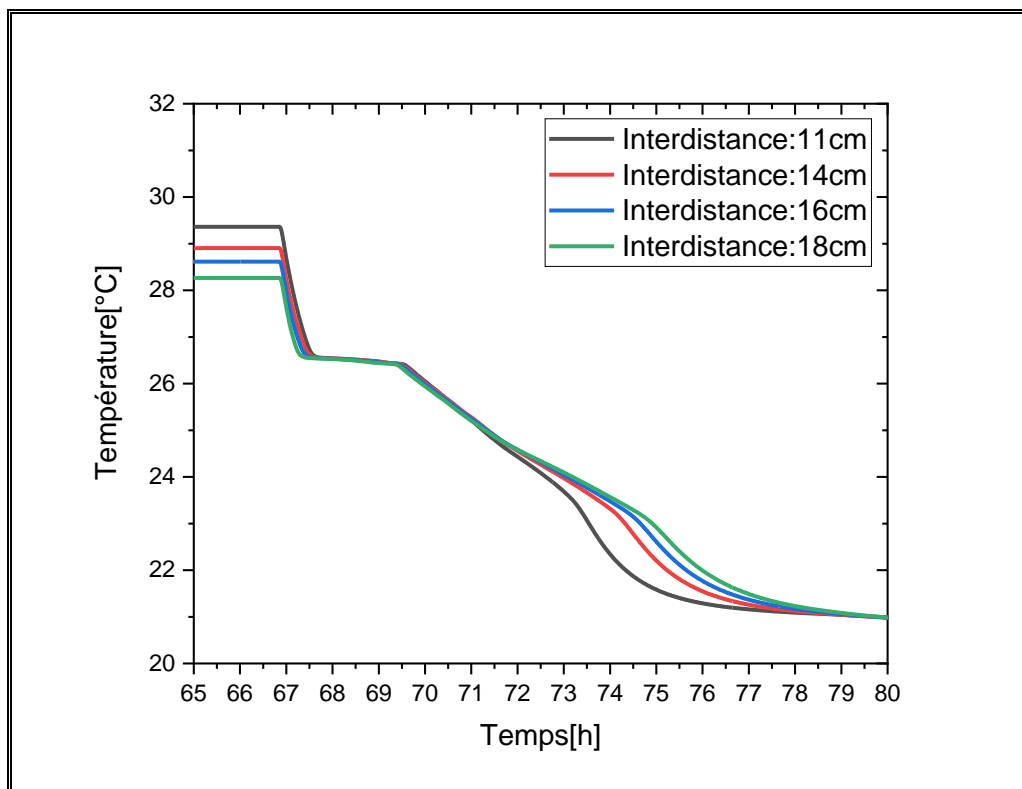


Figure IV-15. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différentes inter-distances entre les tubes de chauffage.



CHAPITRE IV

Figure IV-16. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant durant la décharge pour différentes inter-distances entre les tubes de chauffage.

Une augmentation de la distance entre les tubes implique une augmentation de la chaleur stockée pendant la phase de charge. En comparant avec le cas de référence qui a une température maximale pendant la charge de 30°C, l'amplitude maximale du plancher durant cette période vaut respectivement, 0.8°C, 1.3°C, 1.5°C et 1.9°C pour les inter-distances de 11, 14, 16 et 18cm. Nous remarquons que plus l'inter-distance augmente entre les tubes de chauffage, plus le taux de stockage thermique par chaleur latente augmente, ceci est expliqué sur la Figure IV.17 qui illustre la variation temporelle de la fraction liquide pendant la période de charge pour différentes inter-distances.

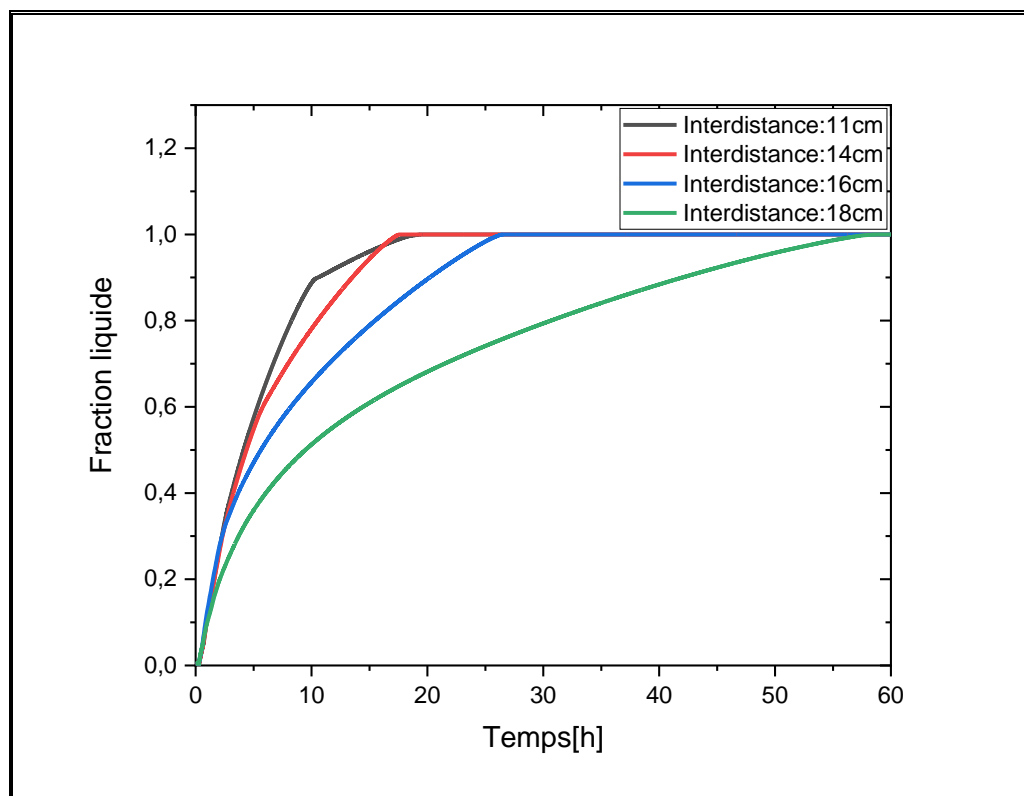


Figure IV-17. Variation temporelle de la fraction liquide pour différentes inter-distances entre les tubes chauffant pendant la charge.

On remarque que le temps de stockage est de 17, 16, 26 et 57h pour les inter-distance de 11, 14, 16 et 18cm respectivement, soulignons que plus on augmente la distance entre les tubes plus le temps de changement de phase augmente et plus le flux thermique est relativement stable dans cette période (Figure IV.18), en plus d'une chute de 23% du flux thermique est

CHAPITRE IV

obtenue pour le scénario relatif à 18 cm en inter-distance, ce qui est bénéfique pour la période de charge vu que la température surfacique du plancher reste uniforme dans un intervalle de confort et vaut 28°C qui représente la limite du confort thermique, le choix optimal pour la période de charge est donc celui relatif au plancher chauffant avec une inter-distance de 18 cm vu que pendant toute cette période les phases liquide et solide du MCP coexistent.

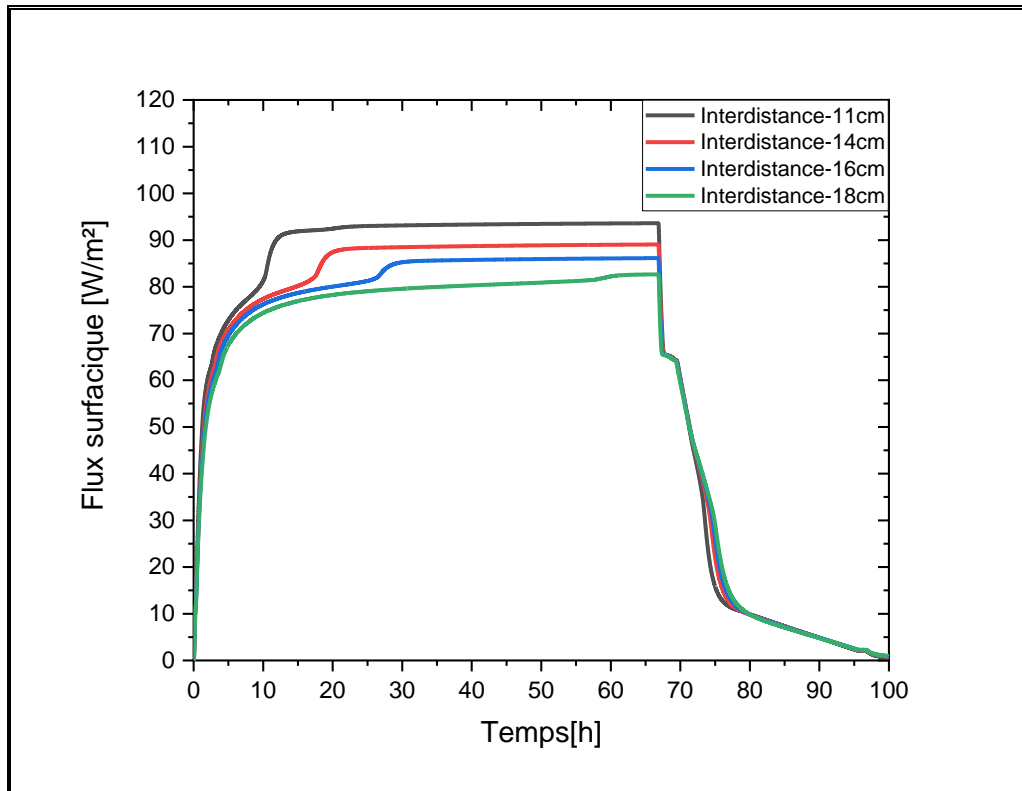


Figure IV-18. Variation temporelle du flux surfacique du plancher chauffant pour différentes inter-distances entre les tubes de chauffage.

Pour la période de charge, le MCP peut ralentir l'augmentation de la température à la surface du plancher et empêcher la chaleur d'être transportée complètement vers le haut. Pourtant lorsque le chauffage est éteint, le phénomène est inverse et le MCP peut favoriser le transfert de chaleur efficacement et accélérer la montée en température à la surface du plancher, et ce en bénéficiant de l'énergie stockée dans les microcapsules du MCP pendant la période de charge, qui est ensuite restituée pendant la solidification des microcapsules. Dans cette phase, lorsque l'intervalle entre deux tubes augmente, le temps du changement de la phase liquide à la phase solide du MCP augmente en passant d'une inter-distance de 11 cm à 18 cm (Figure IV.19).

Également, en comparant avec le cas de référence (plancher chauffant sans MCP), l'amplitude thermique maximale est augmentée de 3°C à 4°C en passant d'une inter-distance de 11 cm à

CHAPITRE IV

celle de 18cm, en plus d'un déphasage de 5h30min pour le plancher chauffant avec une inter-distance des tubes chauffant de 18cm.

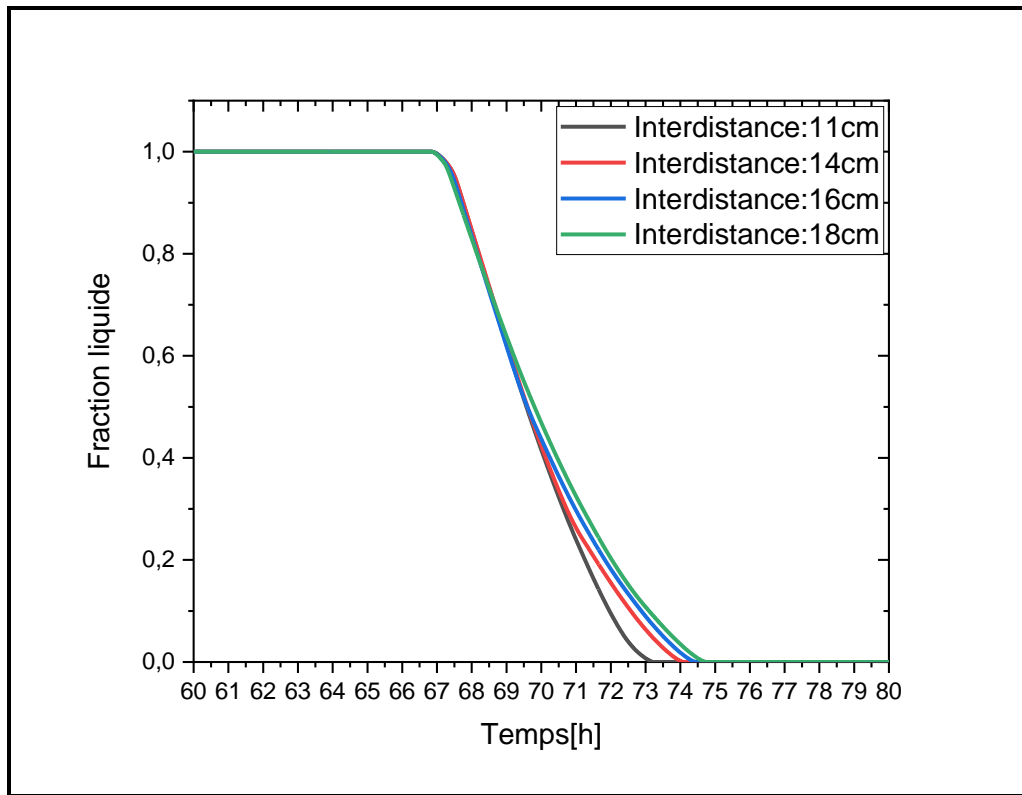


Figure IV-19. Variation temporelle de la fraction liquide pour différentes inter-distances entre les tubes chauffant pendant la décharge.

Ainsi, la Figure IV.20 illustre le temps requis lors de la fusion et la solidification des microcapsules du MCP en fonction de l'inter-distance entre les tubes de chauffage.

Pendant la période de charge, il est clair que plus l'intervalle entre deux tubes est petit, plus le temps de changement de phase est court et plus l'uniformité de la température du sol est mauvaise, car dans un temps minime le changement de phase est terminé et la température à la surface du plancher commence à augmenter.

Par ailleurs, durant la décharge, le temps de solidification est plus important en augmentant l'inter-distance, ce qui a permis d'avoir une amplitude thermique de 4°C pour le plancher chauffant avec une inter-distance des tubes chauffant de 18cm accompagné d'un déphasage de 5h30min par rapport au plancher chauffant sans MCP.

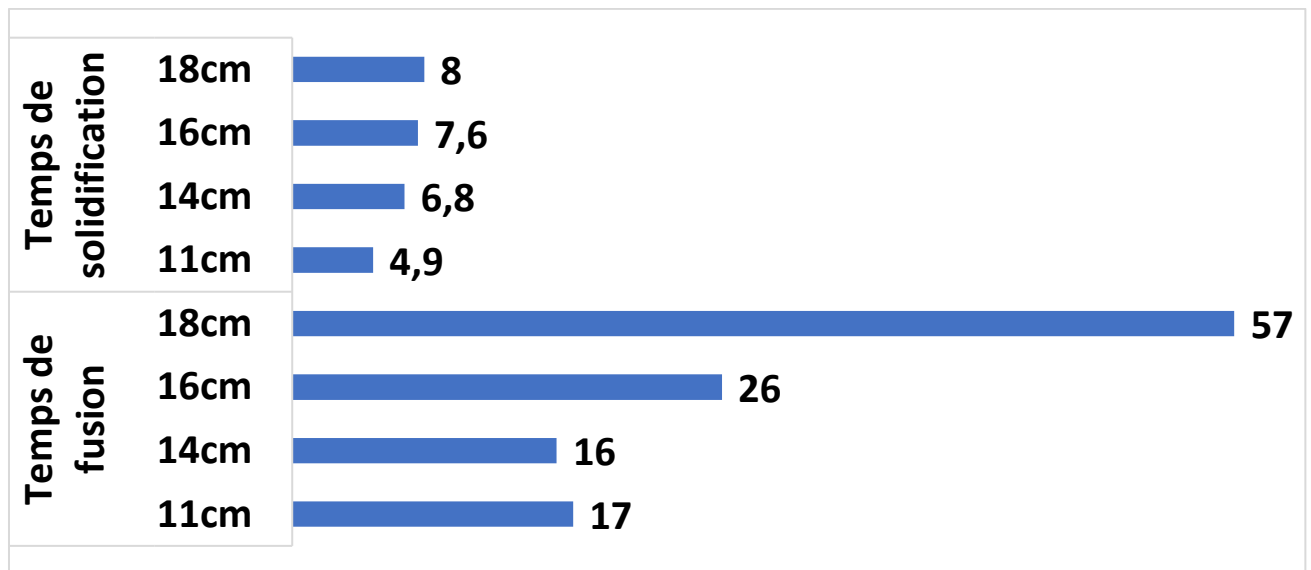


Figure IV-20. Temps de fusion et de solidification du plancher chauffant avec MCP en fonction de l'inter-distance entre les tubes de chauffage.

Finalement le scénario avec une inter-distance de 18cm est le plus optimal et garantit à la fois des performances thermiques acceptable permettant un confort thermique interne grâce à l'intégration de cette solution passive. Également, un gain économique est obtenu, vu qu'on minimisant le nombre de tubes, le cout d'installation sera optimisé.

IV.6 | Effet de la température de chauffage des tubes chauffants sur la performance thermique du plancher.

Dans la présente section, une analyse de l'augmentation de la température du chauffage de 35°C à 45°C est investiguée afin d'évaluer l'impact de cette augmentation sur la performance thermique du plancher chauffant durant la phase de décharge. Soulignons que la conception adoptée est celle relative à une inter-distance de 18cm avec 15% des microcapsules du MCP placés en dessus des tubes chauffants. Par conséquent, la Figure IV.21 présente la variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différentes température de chauffage. Et la Figure IV.22 présente un zoom de la variation temporelle de la température surfacique du plancher pour différentes température de chauffage.

CHAPITRE IV

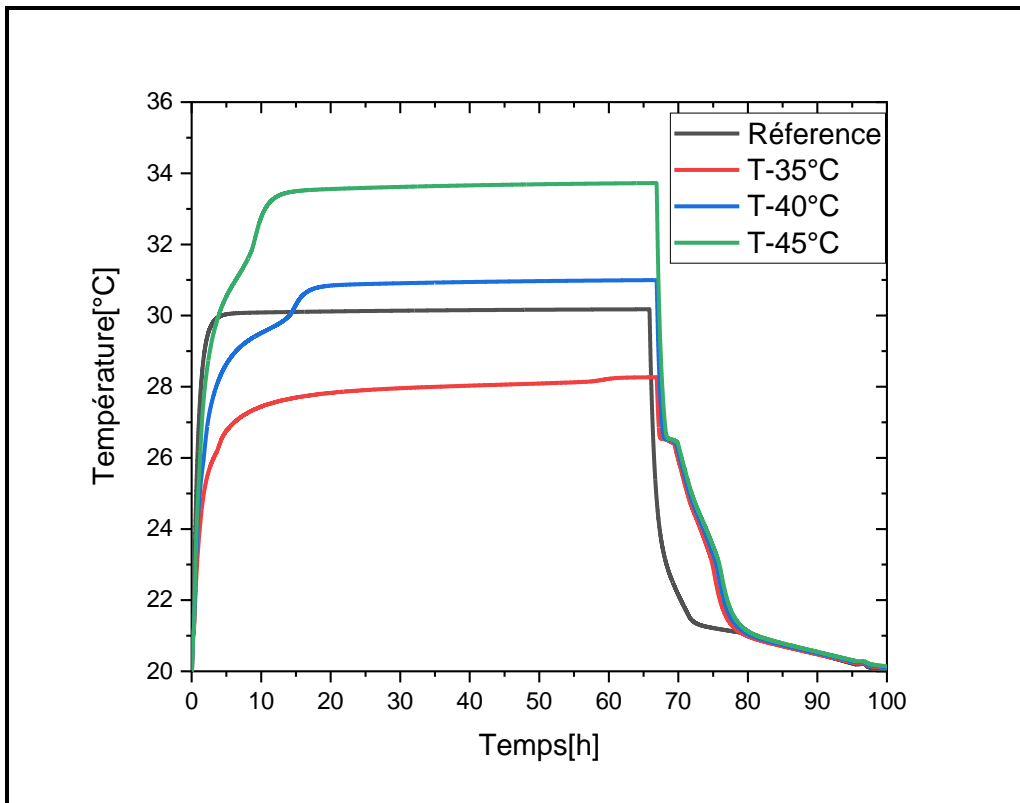


Figure IV-21. Variation temporelle de la température surfacique de plancher chauffant pour différentes températures de chauffage.

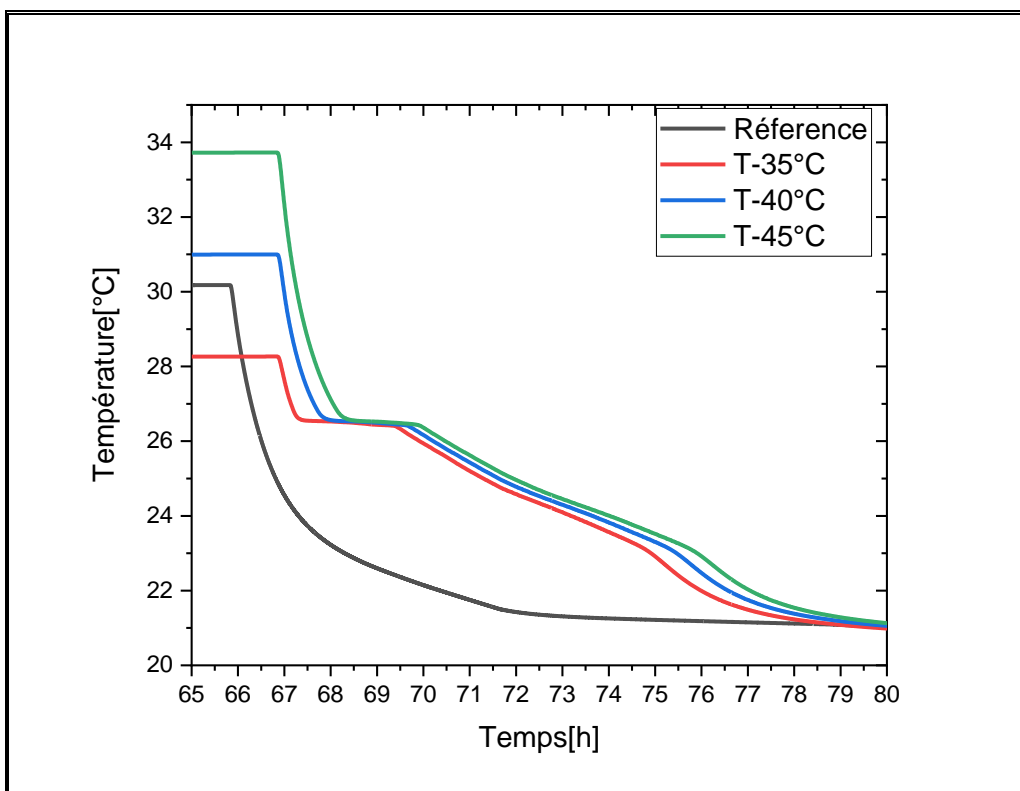


Figure IV-22 . Variation temporelle de la température surfacique de plancher chauffant pendant la période de décharge pour différentes températures de chauffage.

CHAPITRE IV

Pendant la période de charge, nous soulignons que l'augmentation de la température de chauffage implique une augmentation de la température maximale surfacique du plancher qui vaut respectivement 28°C, 31°C et 34°C pour la température de chauffage de 35°C, 40°C et 45°C, en plus d'une libération de chaleur arrivant au niveau du plancher allant à 35% par rapport au cas de référence (Figure IV.23).

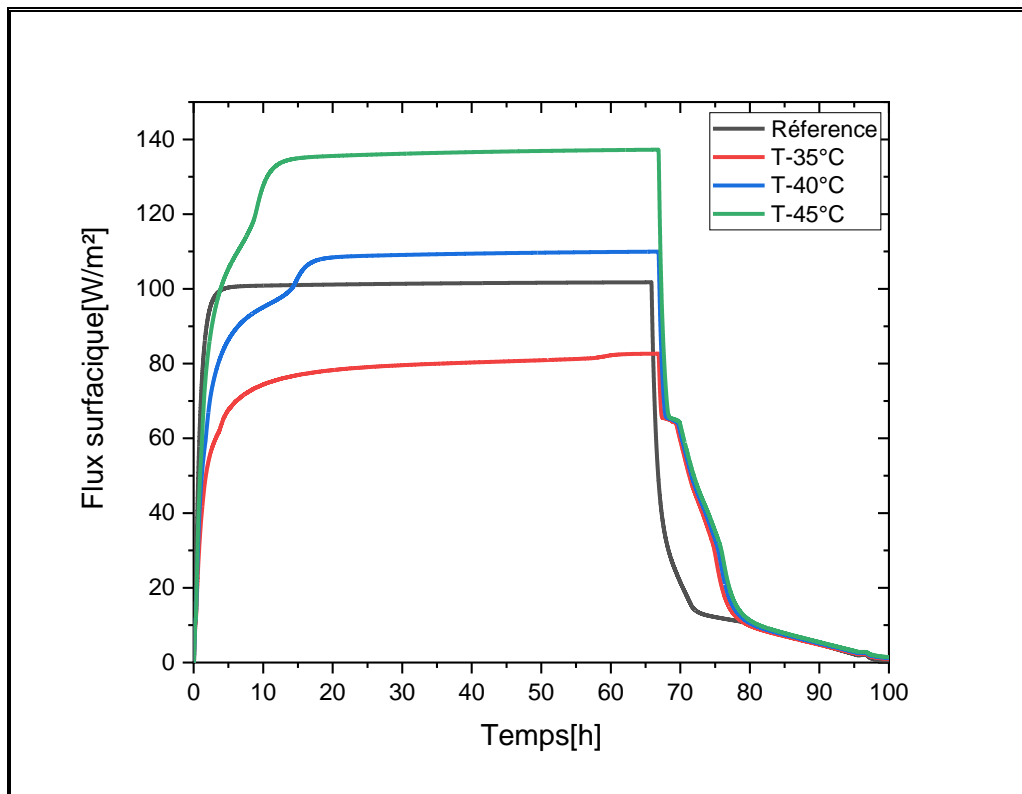


Figure IV-23. Variation temporelle du flux thermique surfacique de plancher chauffant pour différentes températures de chauffage.

Ceci affirme que le passage à une température supérieure à 35°C provoque un inconfort thermique au niveau de la surface du plancher, cela est clairement expliqué par la variation temporelle de la fraction liquide sur la Figure IV.24 qui montre que plus la température de chauffage est largement supérieure à la température de fusion du matériau à changement de phase, plus la vitesse de fusion de ce dernier est plus rapide de deux fois pour le passage de la température de chauffage de 35°C à 40°C, à 7 fois pour le passage de 35°C à 45°C.

CHAPITRE IV

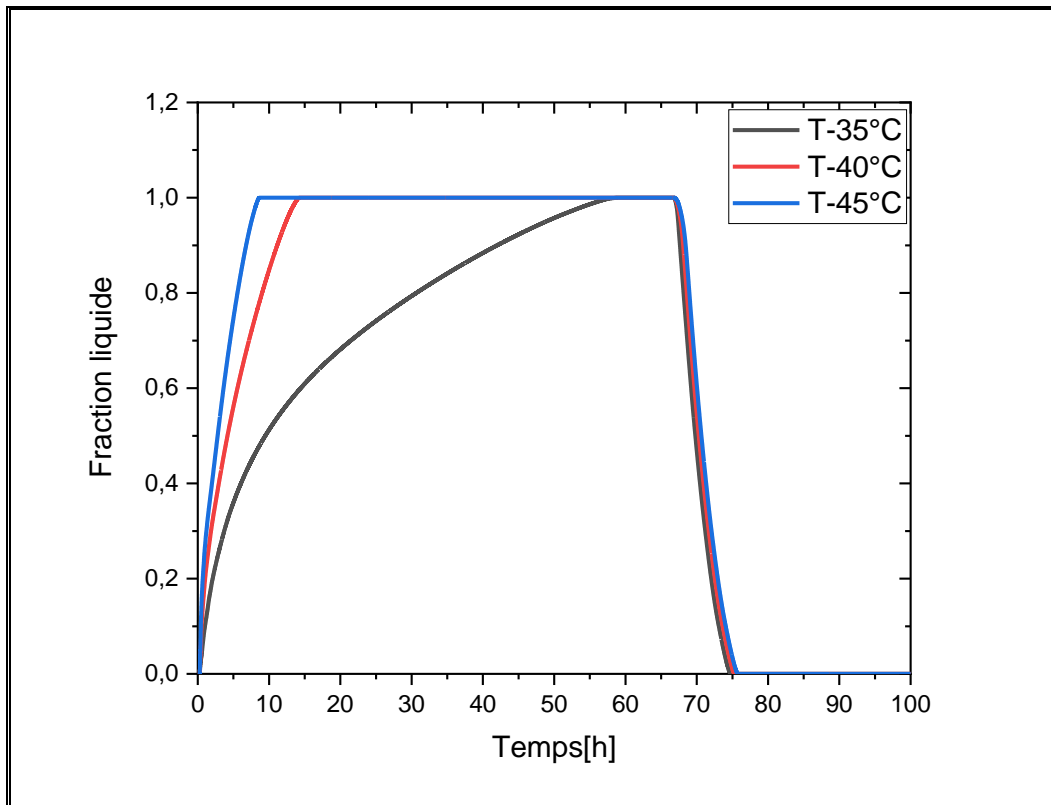


Figure IV-24. Variation temporelle de la fraction liquide pour différentes températures de chauffage des tubes pendant la charge.

On conclut que pour la phase de chauffage d'un plancher combinant les tubes chauffants et l'intégration des microcapsules du MCP, il est recommandé de fixer une température de chauffage d'eau circulant dans les tubes à une température qui ne dépasse pas 7°C de différence avec la température de fusion du MCP pour une telle conception de plancher, et ce pour mieux bénéficier de l'ajout des microcapsules du MCP lorsque ces derniers changent de phase de solide totale à liquide totale. Plus cette période est longue, plus la température des microcapsules reste stable à la température de fusion qui est dans notre cas proche de la température du confort humain, plus le confort au niveau du plancher est assuré pour une longue durée.

Concernant la période de décharge, on souligne qu'en augmentant la température de chauffage, la température maximale du plancher vaut respectivement 26.4°C, 26.5°C, 26.6°C pour la température de chauffage de 35°C, 40°C et 45°C, qui représente une légère différence de température, pourtant pour ces mêmes températures de chauffage, le déphasage obtenu avec l'augmentation vaut respectivement 5.5h, 6.3h, 6.7h. On remarque qu'en augmentant la

CHAPITRE IV

température de chauffage, le déphasage peut augmenter de 1h de plus, ceci est expliqué sur la Figure IV.25 qui représente la variation temporelle de la fraction liquide pendant la décharge.

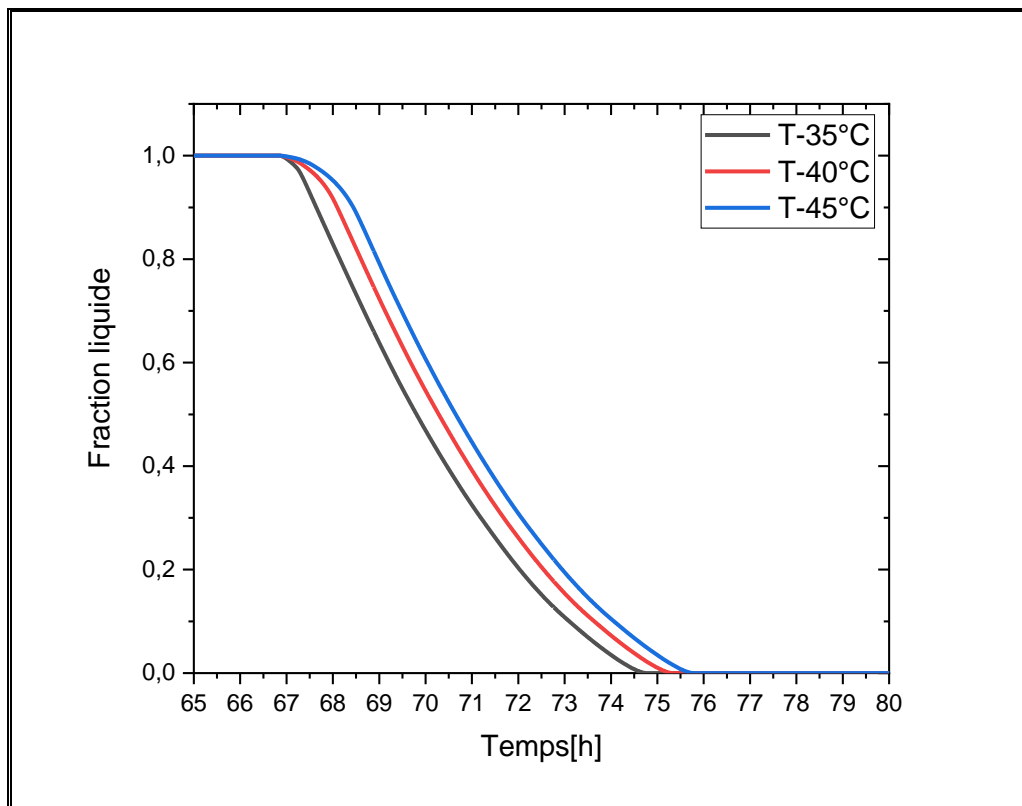


Figure IV-25. Variation temporelle de la fraction liquide pour différentes températures de chauffage des tubes pendant la décharge.

On remarque que plus la température de chauffage augmente plus le MCP prend plus de temps pour diffuser l'énergie stockée et plus le déphasage du pic de l'onde de température est important.

Également, la Figure IV.26 présente le temps requis pour que le MCP change de la phase solide à la phase liquide et vice-versa, il est à noter que l'augmentation de la température de chauffage influence grandement la température surfacique du plancher pendant la période de charge, et n'a pas une influence significative lorsque le chauffage est éteint.

Certes que l'augmentation de la température de chauffage peut nous permettre de bénéficier d'une heure de plus en termes de déphasage thermique pendant la décharge, mais l'inconvénient de dépassement de la température du confort humain pendant la phase de charge nous incitent de ne pas dépasser une température de 35°C pour la mise en marche du chauffage d'un tel plancher chauffant avec intégration des microcapsules du MCP.

CHAPITRE IV

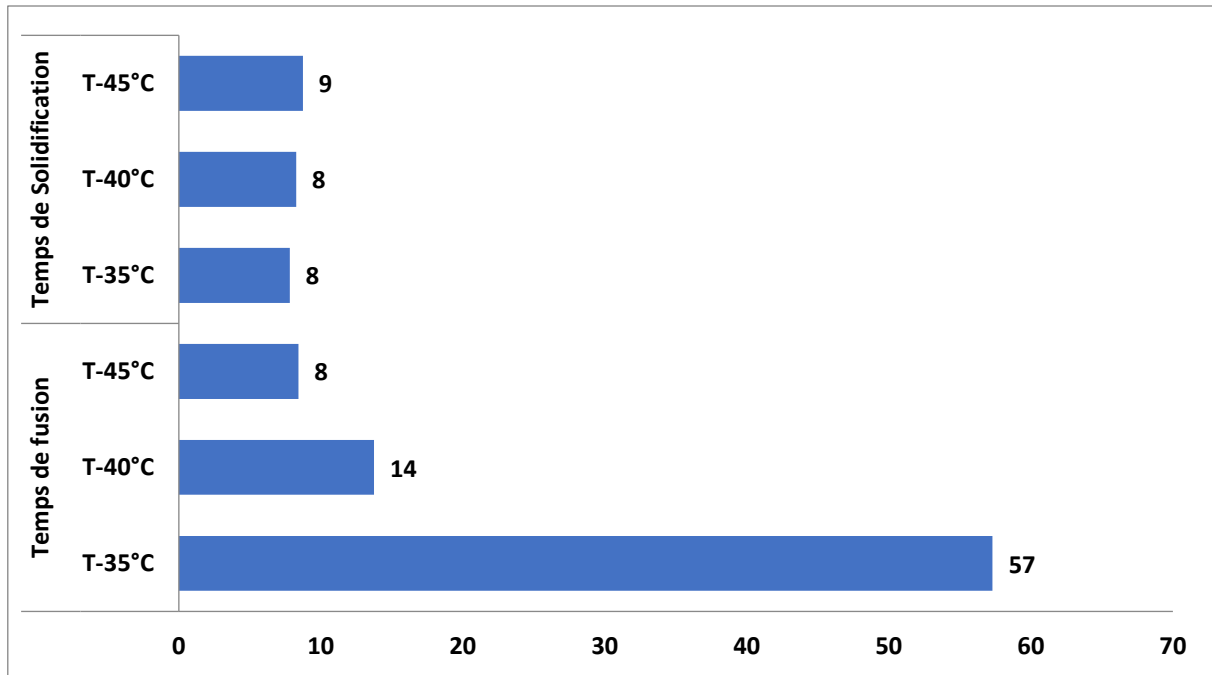


Figure IV-26. Temps de fusion et de solidification du plancher chauffant avec MCP en fonction de la température de chauffage.

A ce stade, nous avons conclu que le plancher chauffant avec 15% de microcapsules placées au-dessus des tubes chauffant et espacées de 18cm, avec une température de chauffage de 35°C a permis d'avoir les meilleures performances thermiques. Dans la section suivante, une étude sélective du type de MCP permettant le plus de confort thermique sera abordée.

IV.7 | Effet du changement du type du MCP sur les performances thermiques du plancher chauffant.

La sélection des MCP est basée sur plusieurs critères déterminants tels que : la température de changement de phase, la masse volumique, la chaleur latente, la conductivité thermique et la capacité thermique spécifique. La raison pour laquelle dans cette partie, l'objectif est d'examiner le comportement thermique du plancher chauffant en utilisant deux types du MCP. Les matériaux à changement de phase choisis dans cette étude sont regroupés en deux types, à savoir : le MCP inorganique de type sel hydraté (S27) qui a une conductivité thermique relativement plus élevée et le MCP organique n-octadécane. Les deux types du MCP choisis ont une température de fusion inférieure à la température de chauffage des tubes de circulation d'eau chaude, et proche de la température du confort humain.

Les propriétés thermophysiques des MCP utilisés sont présentés dans le Tableau IV.1.

CHAPITRE IV

Tableau IV-1 : Propriétés thermo physique de différents types du MCP.

	N-octadécane	S27
λ [W/ (m.K)]	0.192	0,54
ρ [Kg/m ³]	722	1500
C_p [J/ (Kg. K)]	2153	2200
L[J/kg]	186500	185000
T_m [°C]	30	27

En commençant par analyser le profil de température surfacique du plancher chauffant, la Figure IV.27 illustre la variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différents types utilisés pendant la période de charge et de décharge.

CHAPITRE IV

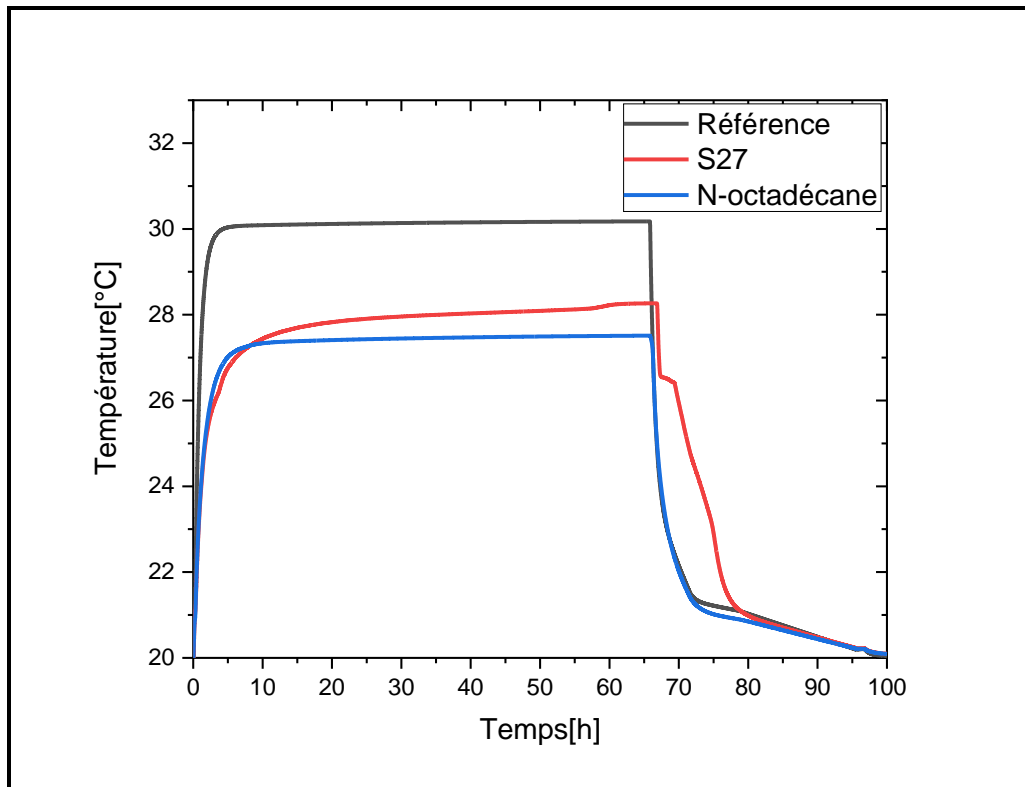


Figure IV-27 : Variation temporelle de la température superficielle du plancher chauffant pour différents types du MCP

Lors de la transmission de chaleur, le facteur de variation d'amplitude est utilisé pour évaluer la capacité de stockage de chaleur du plancher chauffant, en plus du temps requis pour la fusion et la solidification pour chaque type du MCP et du déphasage thermique obtenu.

En intégrant les microcapsules du MCP dans la composition du plancher, la chaleur reçue par les tubes chauffants est stockée. De plus, les microcapsules empêchent la chaleur d'atteindre la surface supérieure du plancher, cette intégration maintient également une température constante du MCP tant que les phases solide et liquide coexistent.

Pour l'utilisation du MCP organique, la température superficielle maximale du plancher est de 27°C pour le MCP n-octadécane et de 30°C pour le plancher conventionnel sans MCP, ce qui est relatif à une diminution de 3°C, et cette intégration maintient la surface du plancher à une température de confort thermique pendant la période de charge, ceci est dû au temps de fusion qui est de 67h (Figure IV.28).

CHAPITRE IV

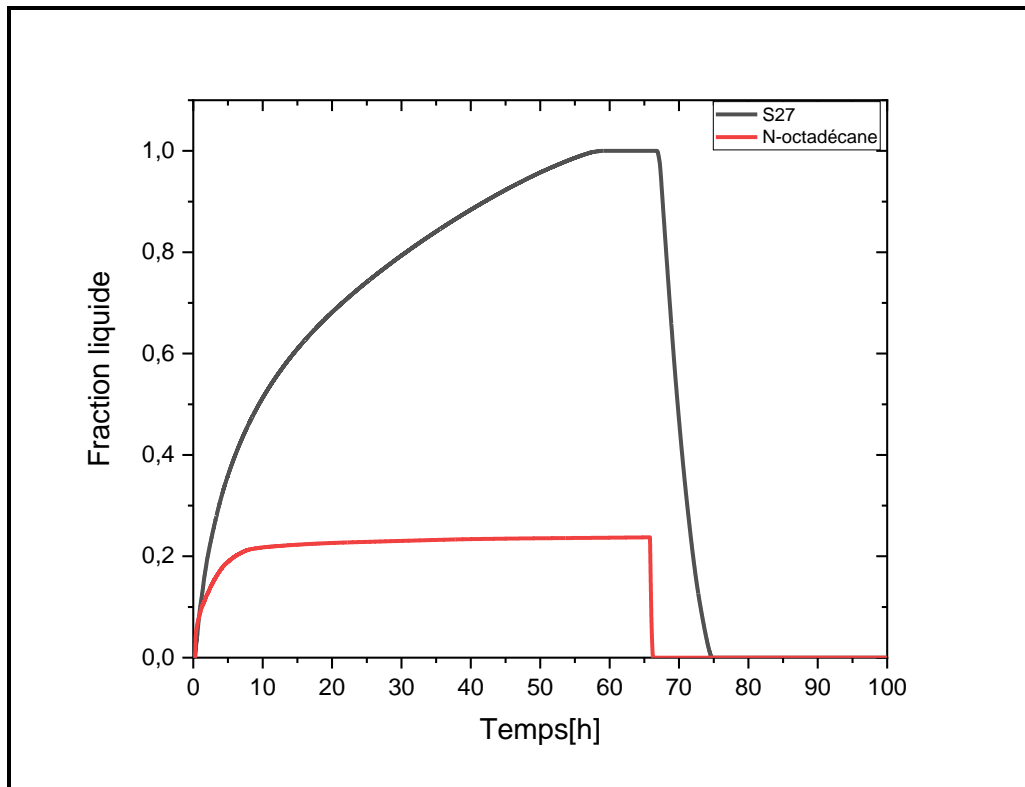


Figure IV-28 : Variation temporelle de la fraction liquide pour différent types du MCP

Le n-octadécane est resté pendant toute la période de charge en changement de phase. Pendant la période de décharge, le MCP n-octadécane se solidifie rapidement, ce qui a entraîné une température maximale du plancher presque similaire pour le n-octadécane et le cas de référence respectivement.

Cependant, le MCP inorganique est capable de stabiliser les fluctuations de température pendant la période de charge à une température maximale du plancher aux alentours de 28°C en utilisant du sel hydraté S27, avec une diminution relative de 2°C par rapport au cas de référence. De plus, la période de fusion est d'environ 57.5h, cette durée s'explique par la température de fusion qui est de 27°C qui est plus proche de la température de chauffage et nécessite plus de temps pour la fusion totale. Lors de la décharge, le plancher conventionnel présente une température maximale de 22.6°C, alors que le MCP inorganique S27 présente une température maximale de 26.4°C ; une augmentation alors d'environ 4°C par rapport au plancher classique sans MCP avec un déphasage de 5h30min sont obtenus.

Il est à noter que le S27 présente le meilleur type du MCP avec une stabilisation de la température de surface du plancher à une température de confort thermique de 28°C pendant la période de charge, et une augmentation de 4°C avec un déphasage de 5h30min pendant la période de décharge. le MCP inorganique S27 montre de meilleurs résultats grâce à son taux

CHAPITRE IV

élevé de capacité calorifique en volume (ρC) qui est de $3.4.10^6 \text{J}/(\text{m}^3.\text{K})$ alors qu'il vaut $1.6.10^6 \text{J}/(\text{m}^3.\text{K})$ pour le MCP n-octadécane ; à son taux de densité énergétique (ρL) qui est de $2.8.10^8 \text{J}/(\text{m}^3)$, et qu'il est de $1.3.10^8 \text{J}/(\text{m}^3)$ pour le MCP n-octadécane, et finalement à la conductivité thermique qui est plus importante pour le MCP inorganique S27.

IV.8 | Amélioration des planchers chauffant par l'ajout de nanoparticules conducteurs aux microcapsules du MCP.

Le changement des microcapsules du MCP en microcapsules du composite MCP-Nanoparticules conducteurs est basé sur le changement des propriétés thermo-physique des matériaux à changement de phase améliorés par des nanoparticules conducteurs via les relations de calculs cités par Faraji et al.[83] qui sont comme suit :

Pour les NePCM simple :

$$\begin{aligned}\rho_{nf} &= \rho_l \left[(1 - \varphi_p) + \varphi_p \left(\frac{\rho_s}{\rho_l} \right) \right] \\ cp_{nf} &= cp_l \left[(1 - \varphi_p) + \varphi_p \left(\frac{cp_s}{cp_l} \right) \right] \\ \mu_{nf} &= \frac{\mu_l}{(1 - \varphi_p)^{2.5}} \\ \rho L_{nf} &= \rho L_l (1 - \varphi_p) \\ \frac{K_{nf}}{K_l} &= \frac{K_s + k_l(S_f - 1) - \varphi_p(S_f - 1)(K_f - K_s)}{K_s + k_l(S_f - 1) - \varphi_p(K_f - K_s)}\end{aligned}$$

Pour les NePCM hybride :

$$\begin{aligned}\rho_{hnf} &= \rho_l (1 - \varphi_{p_2}) \left[(1 - \varphi_{p_1}) + \varphi_{p_1} \left(\frac{\rho_{s1}}{\rho_l} \right) \right] + \varphi_{p_2} \rho_{s2} \\ cp_{hnf} &= cp_l (1 - \varphi_{p_2}) \left[(1 - \varphi_{p_1}) + \varphi_{p_1} \left(\frac{cp_{s1}}{cp_l} \right) \right] + \varphi_{p_2} cp_{s2} \\ \mu_{hnf} &= \frac{\mu_l}{(1 - \varphi_{p_1})^{2.5} (1 - \varphi_{p_2})^{2.5}} \\ \rho L_{hnf} &= \rho L_l \left[(1 - \varphi_{p_1}) (1 - \varphi_{p_2}) \right]\end{aligned}$$

CHAPITRE IV

$$\frac{K_{hnf}}{K_{bl}} = \frac{K_{s2} + k_{bl}(S_f - 1) - \varphi_{p2}(S_f - 1)(K_{bl} - K_{s2})}{K_{s2} + k_{bl}(S_f - 1) - \varphi_{p2}(K_{bl} - K_{s2})}$$

$$\frac{K_{bl}}{K_l} = \frac{K_{s1} + k_l(S_f - 1) - \varphi_{p1}(S_f - 1)(K_l - K_{s1})}{K_{s1} + k_l(S_f - 1) - \varphi_{p1}(K_l - K_{s1})}$$

Avec φ_p représente la quantité intégrée des nanoparticules dans le MCP, et S_f représente le facteur de forme qui est défini comme suit :



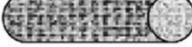

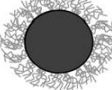
Type de nanoparticule	Forme	Facteur de forme, sf
Sphérique		3
Brique		3,7
Cylindrique		4,8
Plaquette		5,7
Lamina		16,1

Figure IV-29 : Valeurs des facteurs de forme pour les différentes formes des nanoparticules[5]

Le facteur de forme pris pour la présente étude est celui relatif à une forme sphérique, d'où $S_f=3$.

IV.8.1 | Effet de l'ajout des nanoparticules conducteurs simple.

Dans cette section, nous aborderons l'étude de l'impact d'ajout de nanoparticules simples aux microcapsules de matériau à changement de phase sur les performances thermiques du plancher en termes de variation en amplitude, en déphasage et en temps mis pour la fusion et la solidification de ces composites. Il est à noter que l'objectif principal est d'ajouter une fraction volumique minimale afin d'apporter des améliorations sur le confort thermique avec un cout minimal, pour cela la fraction volumique est limitée à 5%.

CHAPITRE IV

La Figure IV.30 présente la variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différents types de NePCM simple pendant la période de charge et décharge respectivement ; et la Figure IV.31 présente un zoom pour la période de décharge.

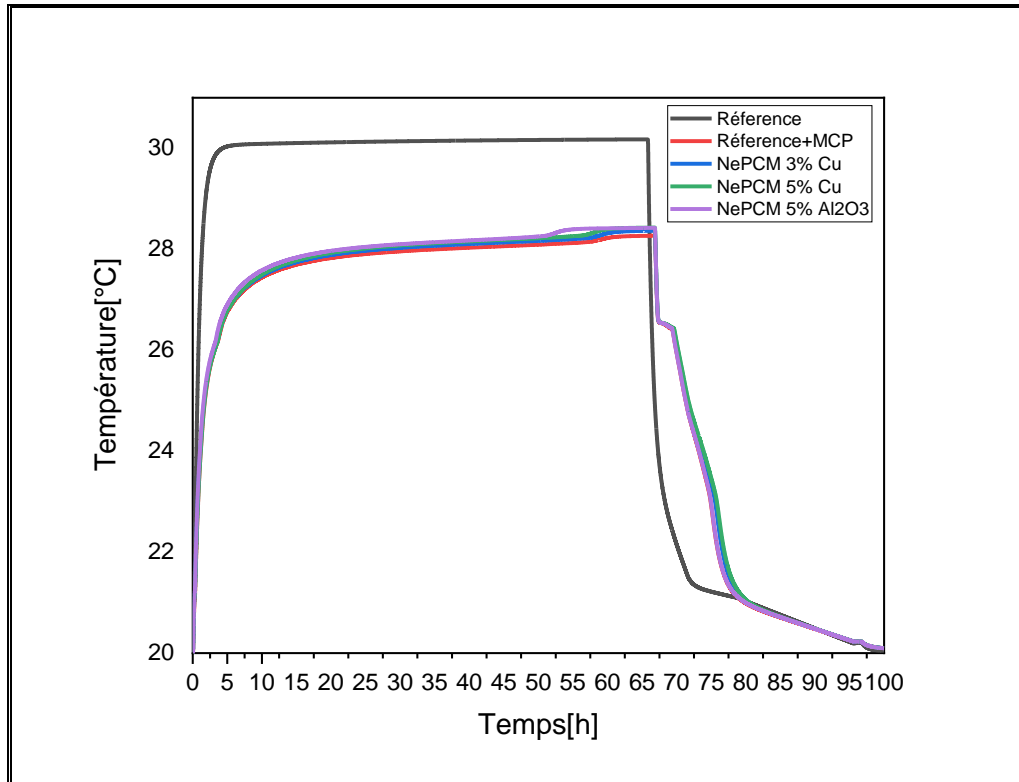


Figure IV-30. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différent types de NePCM simple.

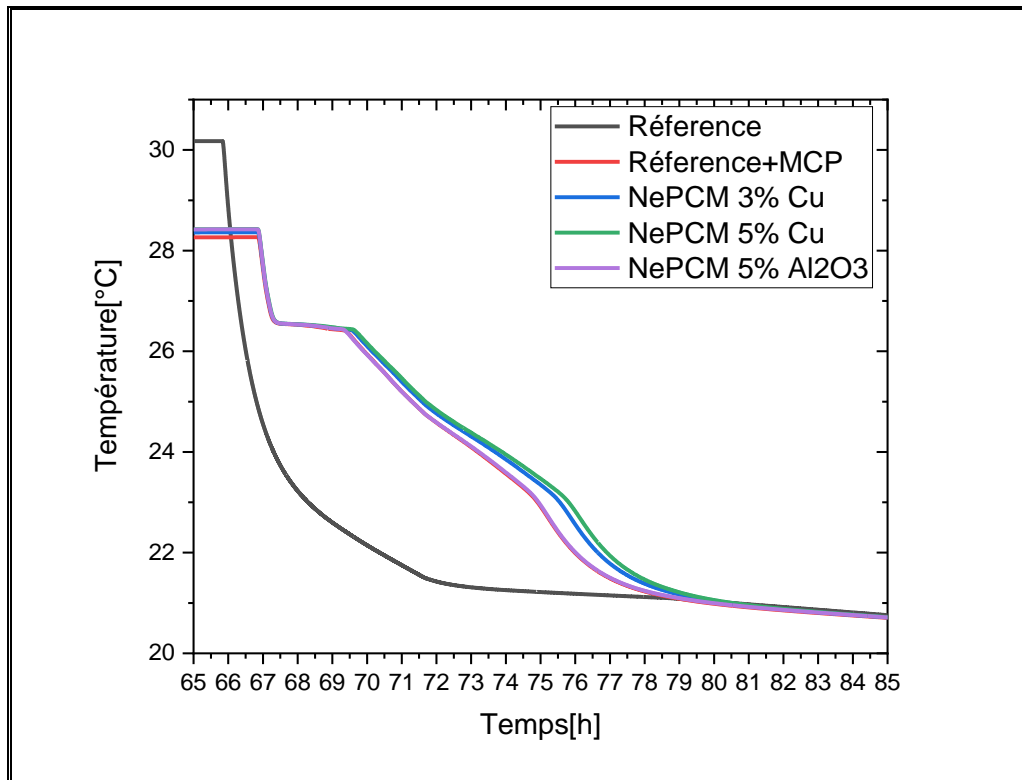


Figure IV-31. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différent types de NePCM simple pendant la période de décharge.

Les matériaux conducteurs utilisés sont le cuivre avec 3% et 5% en volume, et sont ainsi comparés avec 5% de Al_2O_3 . Ces scénarios avec NePCM sont comparés avec le cas du plancher de référence sans MCP et le plancher avec MCP.

La variation de l'amplitude maximale par rapport au cas du plancher de référence ne diffèrent pas beaucoup et varie de $4^{\circ}C$ à $4.23^{\circ}C$, en passant du cas du plancher avec MCP à celui avec 5% de nanoparticules de cuivre (Cu), de ce fait l'ajout des NePCM n'as pas un effet significatif sur la variation en amplitude que ça soit pour la charge ou la décharge des tubes chauffants. Cependant l'ajout de ces nanoparticules apportent un déphasage de l'onde de température par leur intégration, ce temps de déphasage vaut respectivement 5.5h, 6.3h, 6.7h et 5.7h pour le plancher chauffant avec MCP, 3% de NePCM de Cu, 5% de NePCM de Cu et 5% de NePCM de Al_2O_3 . L'ajout de l' Al_2O_3 n'a pas montré un effet sur le temps de déphasage, mais pour le cuivre qui est plus conducteur que l' Al_2O_3 , il y a un déphasage supplémentaire de 1h12min par rapport au cas de plancher chauffant avec MCP, et ce en utilisant 5% de cuivre.

On peut observer à partir des Figures IV.32 et IV.33 qui représentent la variation temporelle de la fraction liquide pour différents types de NePCM simple pendant la période de charge et de décharge, que la vitesse de fusion augmente avec l'augmentation de la concentration

CHAPITRE IV

volumétrique de nanoparticules, également que cette augmentation de la vitesse de fusion est assez faible par rapport à la fusion du MCP pur. Donc par l'ajout des nanoparticules au MCP, la conductivité et la viscosité sont augmentées, l'augmentation de la conductivité permet de favoriser le transfert de chaleur significativement, bien que l'augmentation de la viscosité a un effet négatif sur le transfert de chaleur et désormais sur la progression de la fusion, par conséquent une concentration volumétrique élevée de nanoparticules influence négativement l'amélioration de la viscosité, et cette dernière peut minimiser l'effet positif de l'augmentation de la conductivité du NePCM.

L'ajout de nanoparticules a clairement montré son importance et a conduit à un transfert de chaleur amélioré des matériaux à changement de phase, ainsi qu'il nous a permis de bénéficier d'un déphasage supplémentaire de 1h12min en ajoutant 5% du cuivre.

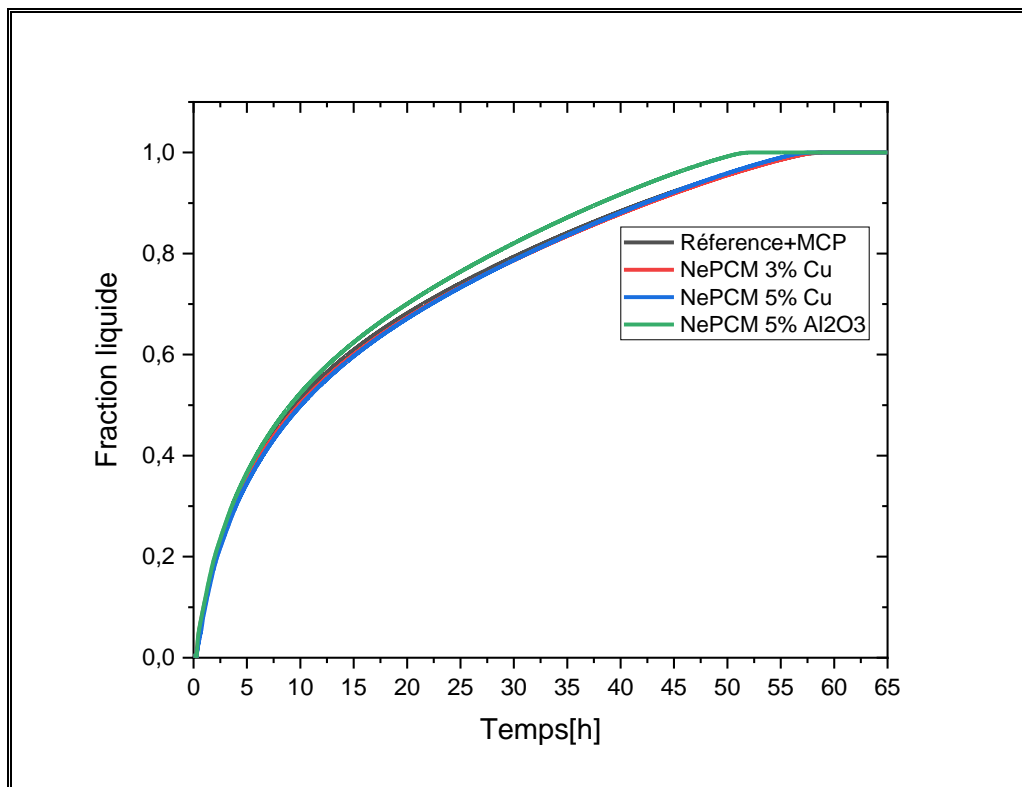


Figure IV-32. Variation temporelle de la fraction liquide pour différents types de NePCM simple pendant la période de charge.

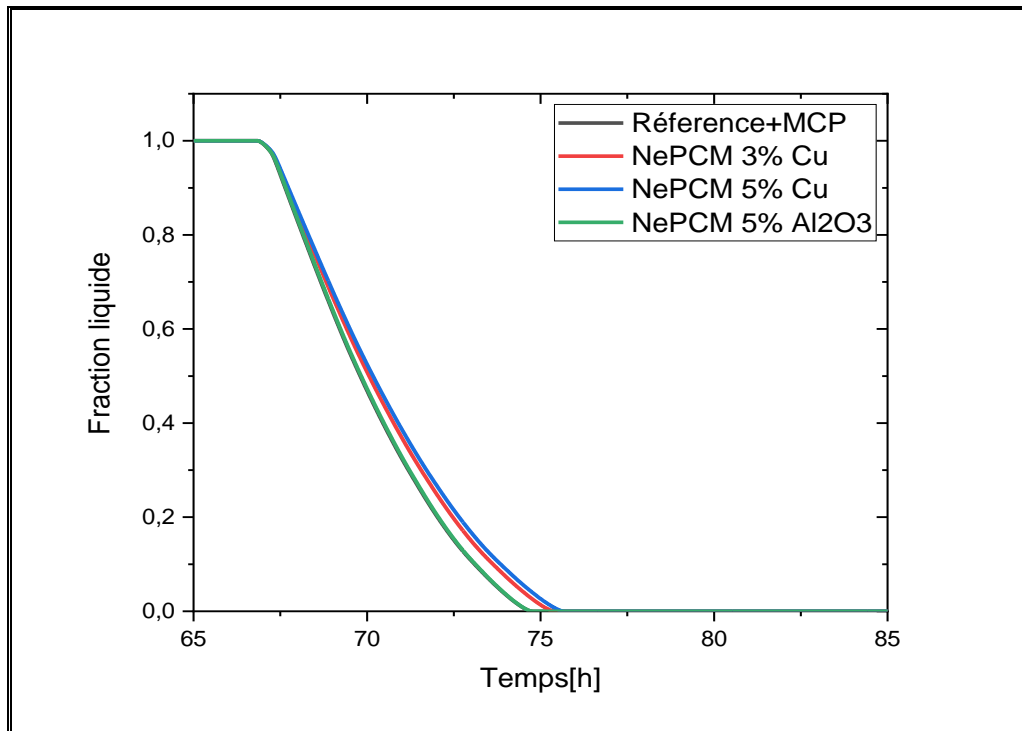


Figure IV-33. Variation temporelle de la fraction liquide pour différents types de NePCM simple pendant la période de décharge.

Cette étude est une étude préliminaire montrant l'importance d'ajouter des nanoparticules simples pour l'amélioration de la conductivité thermique du MCP ainsi que l'amélioration du transfert de chaleur du plancher chauffant. Dans la section suivante, on propose de mélanger les nanoparticules de cuivre avec celle de l' Al_2O_3 afin de minimiser le coût d'installation vu que le cuivre est reconnu coûteux, de ce fait on abordera dans la prochaine étude, l'intégration des NePCM hybride et leur impact sur les performances thermiques du plancher chauffant.

IV.8.2 | Effet de l'ajout des nano particules conducteurs hybride.

L'étude de l'impact d'ajout de nanoparticules hybride et la comparaison avec les nanoparticules simple sur les performances thermiques du plancher sera abordée afin de garantir à la fois une efficacité thermique et économique. A cet égard, la Figure IV. 34 présente la variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différents types de NePCM hybride pendant la période de charge et décharge respectivement ; et la Figure IV.35 présente un zoom sur la période de décharge.

CHAPITRE IV

Les matériaux conducteurs utilisés sont le NePCM simple 5%-Cu, comparé avec les NePCM hybride avec les fractions volumiques suivantes : 1%Cu-4% Al_2O_3 , 2%Cu-3% Al_2O_3 , et 2.5%Cu-2.5% Al_2O_3

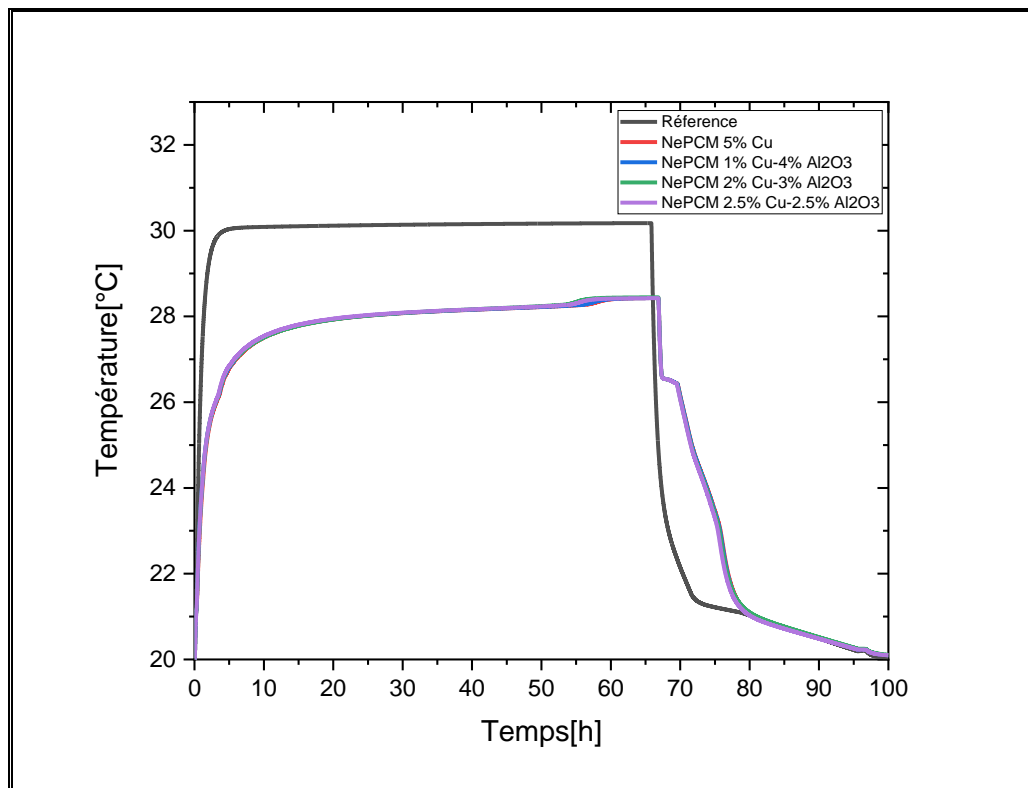


Figure IV-34. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différent types de NePCM hybride.

CHAPITRE IV

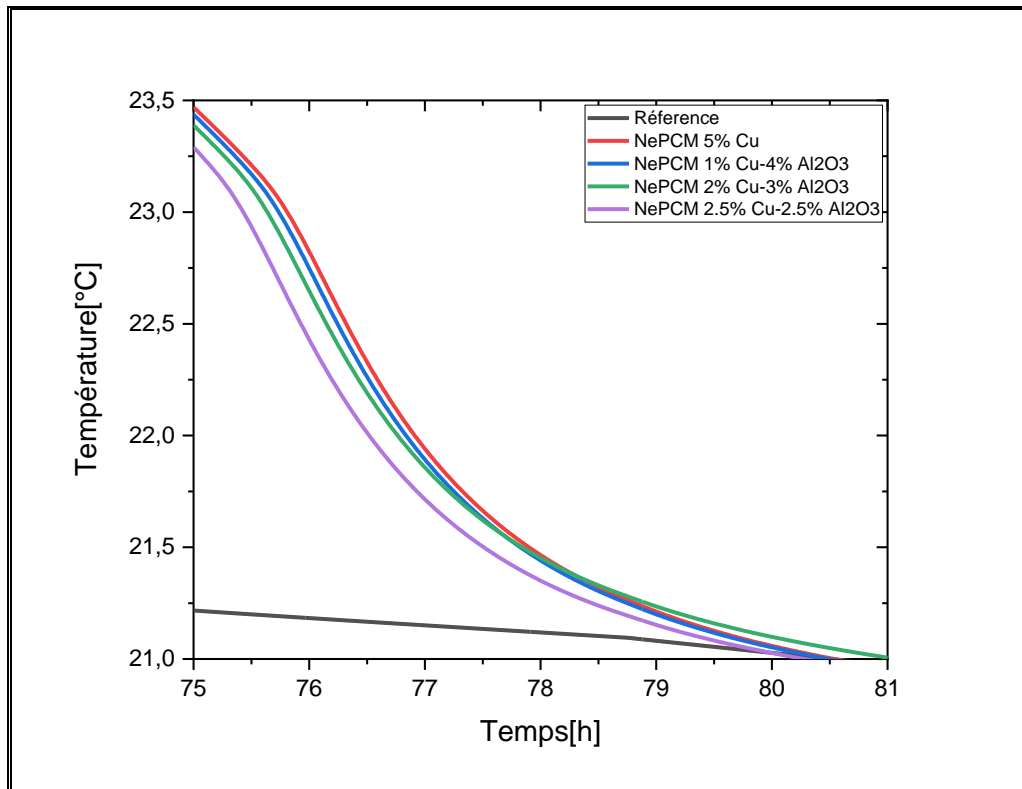


Figure IV-35. Variation temporelle de la température surfacique du plancher chauffant pour différent types de NePCM hybride pendant la période de décharge.

La variation de l'amplitude maximale par rapport au cas du plancher de référence n'a pas montré un effet significatif sur la variation en amplitude que ça soit pour la charge ou la décharge des tubes chauffants. Pourtant, l'ajout de ces nanoparticules a entraîné un déphasage thermique respectivement de 1h12min, 1h, 0.8h et 0.6h pour le NePCM simple 5%-Cu, 1% Cu-4% Al₂O₃, 2% Cu-3% Al₂O₃ et 2.5% Cu-2.5% Al₂O₃.

D'après la Figure IV.36, on remarque que plus l'effusivité thermique effective est plus importante, plus le déphasage est en augmentation, ce résultat confirme donc que le NePCM qui assure un grand déphasage de l'onde de température est celui correspondant à une effusivité thermique effective plus élevée. Notons que le NePCM simple 5%-Cu a une effusivité effective de $1571 \text{ J.K}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$, et varie de $1515 \text{ J.K}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ pour le NePCM hybride de 2.5% Cu-2.5% Al₂O₃ à $1549 \text{ J.K}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ pour le NePCM hybride 1% Cu-4% Al₂O₃. Le cuivre pur représente la meilleure effusivité effective. Pourtant, nous soulignons que le passage de ce dernier au NePCM hybride 1% Cu-4% Al₂O₃ a entraîné une réduction minimale en termes d'effusivité thermique effective qui vaut 1.45%.

CHAPITRE IV

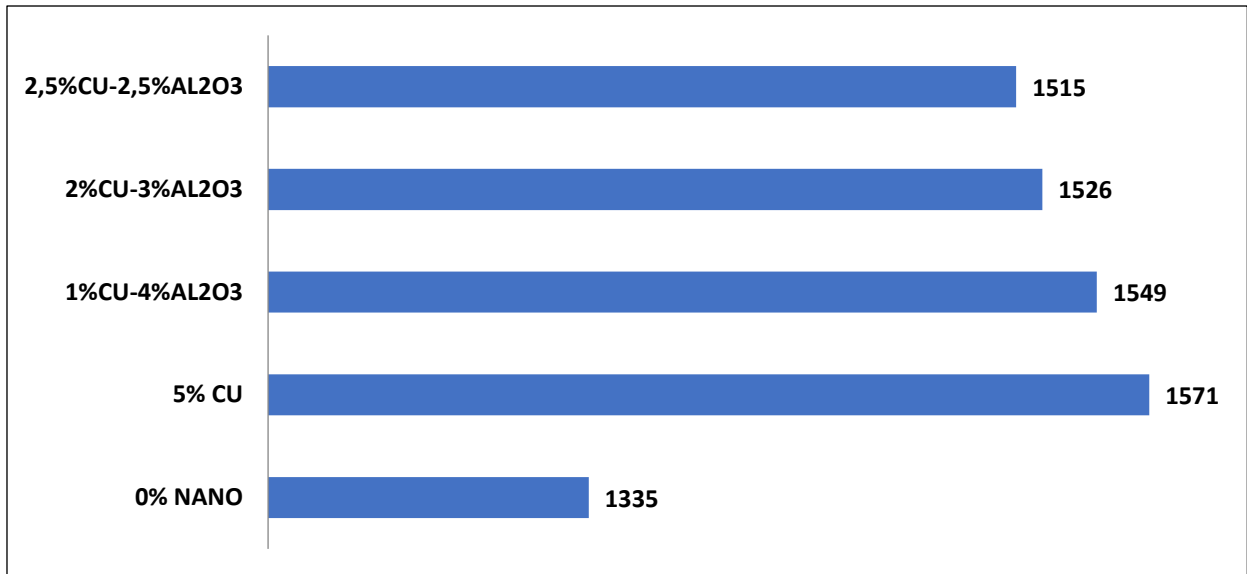


Figure IV-36. Effusivité thermique effective pour différent type de NePCM en $[J.K^{-1}m^{-2}s^{-1/2}]$

Également, les Figures IV.37 et IV.38 présentent la variation temporelle de la fraction liquide pour différents types utilisés pendant la charge et la décharge.

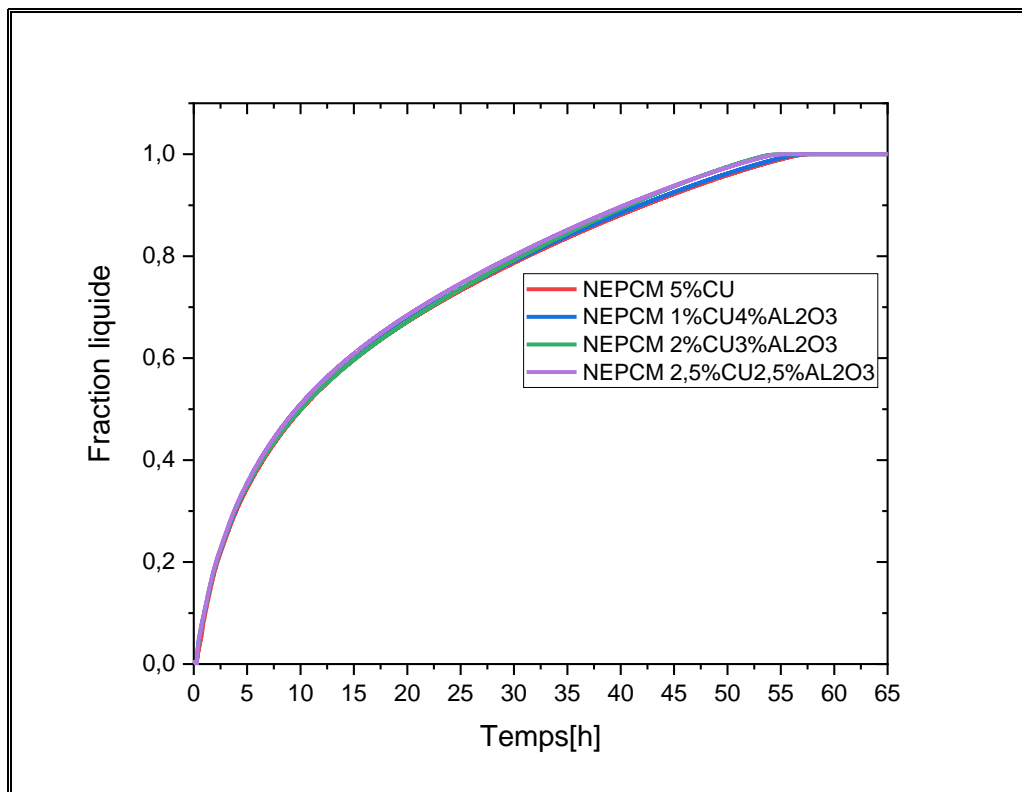


Figure IV-37. Variation temporelle de la fraction liquide pour différent types de NePCM hybride pendant la période de charge.

CHAPITRE IV

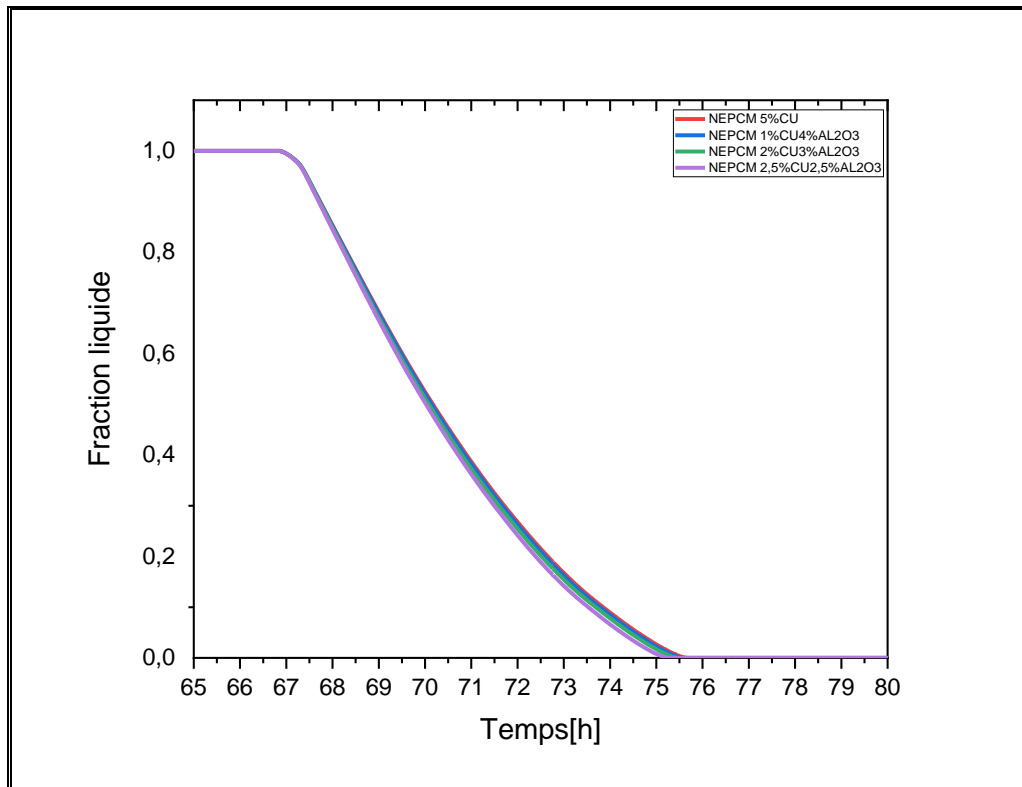


Figure IV-38. Variation temporelle de la fraction liquide pour différent types de NePCM hybride pendant la période de décharge.

Nous remarquons que le NePCM simple Cu-5% et le NePCM hybride 1%Cu-4% Al_2O_3 ont respectivement un temps de fusion de 56.8h et 56.4h et un temps de solidification de 8.7h et 8.6h. On conclut que les deux composite de MCP et nanoparticules simple 5%-Cu et hybride de 1%Cu-4% Al_2O_3 ont présenté le même comportement en termes de fusion et solidification avec une différence négligeable, une diminution faible en termes d'effusivité thermiques de $23 J.K^{-1}m^{-2}s^{-1/2}$, et respectivement un déphasage thermique de 1h12 et 1h ; la différence obtenue n'est pas trop significative, ce qui nous a permis de conclure que l'utilisation de 5% de cuivre ou bien de 1% de cuivre mélangé avec 4% d' Al_2O_3 a donné des performances thermiques avec une différence négligeable, en plus d'une performance économique en remplaçant 5% de cuivre par 1% de cuivre mélangé avec 4% d' Al_2O_3 sachant que le cuivre est plus couteux que l' Al_2O_3

IV.9 | Evaluation des performances thermiques du plancher pendant la période estivale.

CHAPITRE IV

Pour une analyse plus approfondie sur la performance thermique du plancher durant toute l'année. Notre objectif dans cette section est de s'assurer que la configuration retenue pendant la période hivernale ne présente aucun inconvénient pendant la période estivale.

Les résultats obtenus de la variation temporelle de la température surfacique interne pour le plancher avec MCP seront comparés avec les résultats du plancher sans MCP (plancher de référence), en supposant que la température ressentie oscille entre 26°C et 28°C. Pour cela, la Figure IV.39 présente la variation temporelle de la température surfacique interne pour le plancher avec et sans MCP.

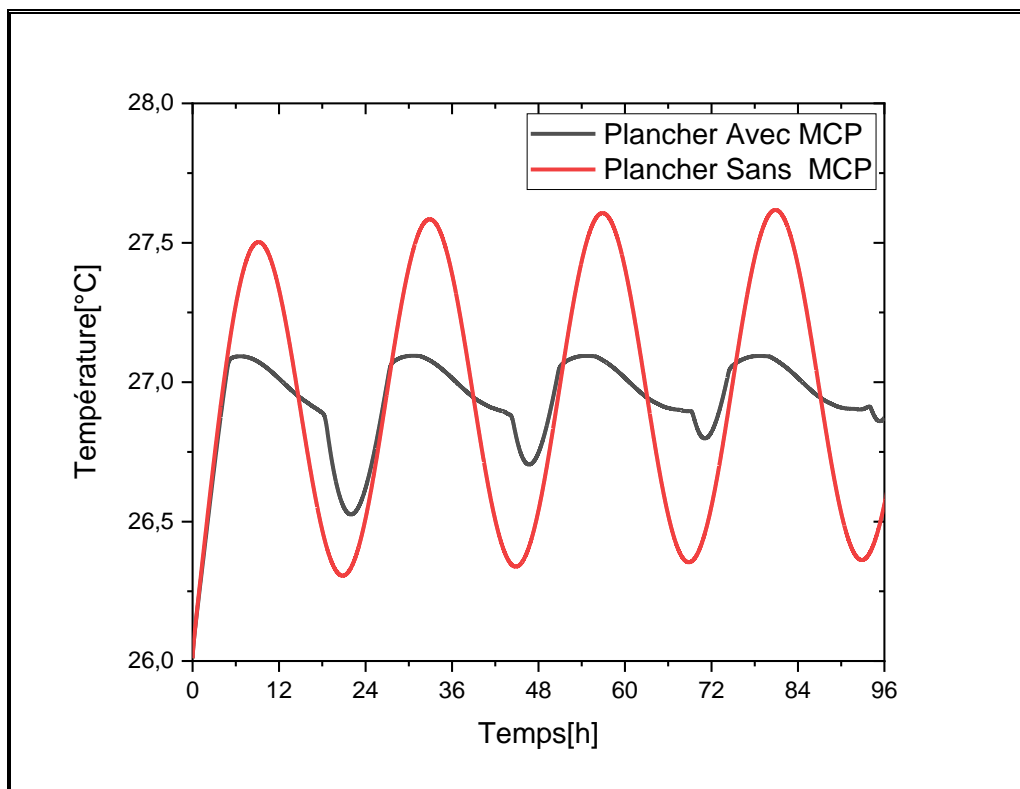


Figure IV-39 : Variation de la température surfacique interne pour le plancher avec et sans MCP.

Comme on peut remarquer sur cette figure que la température surfacique interne du plancher sans MCP varie entre 26°C et 27,5°C. Pourtant, en ajoutant les microcapsules du MCP dans le plancher, nous soulignons que pendant la période diurne la température interne du plancher oscille aux alentours de 27°C et présente une diminution d'amplitude de 0,5°C en comparant avec le cas de référence. Cette diminution est expliquée sur la Figure IV.40 qui présente la variation de la fraction liquide du MCP. Cette dernière s'est liquéfiée de 12% pendant la période diurne, ce qui a permis d'avoir une stabilisation de la température des microcapsules

CHAPITRE IV

du MCP aux alentours de la température de fusion (27°C), et par conséquent une diminution d'amplitude au niveau de la surface du plancher de 0.5°C .

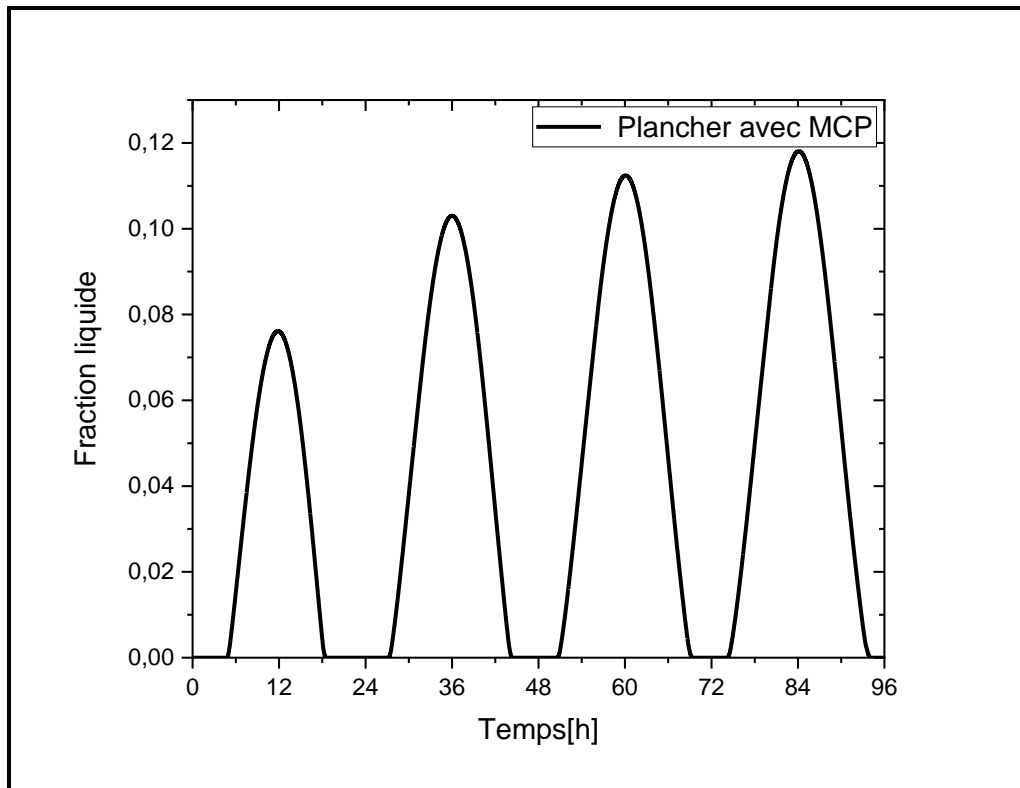


Figure IV-40 : Variation de la fraction liquide du plancher avec microcapsules du MCP.

Par ailleurs, pendant la période nocturne le plancher avec MCP présente une augmentation de la température de 0.5°C en comparant avec le plancher de référence (sans MCP), ce qui est expliqué par la fraction liquide des microcapsules du MCP qui est en phase solide. Dans ce cas, les microcapsules du MCP jouent le rôle d'une isolation thermique et ont apporté une augmentation de la température à la surface supérieure du plancher de 0.5°C en parallèle à un déphasage thermique de 6 heures en comparant avec le cas de référence.

A ce stade, on conclut que la conception optimale retenue pendant la période hivernale a donné des résultats positifs en période estivale permettant d'avoir une diminution en amplitude de 0.5°C durant la période diurne en parallèle à un déphasage thermique de 6 heures pendant la période nocturne.

Cependant, les planchers chauffants peuvent fonctionner comme un système de chauffage pendant la période hivernale, comme ils peuvent fonctionner comme un plancher rafraichissant permettant de refroidir les planchers en période estivale. Cela fera l'objet de la

CHAPITRE IV

prochaine section dans laquelle nous allons évaluer les performances thermiques du plancher rafraichissant.

IV.10 | Plancher chauffant rafraichissant

Afin d'assurer un conditionnement climatique permettant un confort thermique pendant toute l'année, nous proposons dans cette section d'appliquer un mode de rafraîchissement à la configuration retenue dans la période hivernale, afin d'exploiter le plancher comme un circuit hydraulique conditionné pour le rafraîchissement en période estivale. Pour éviter la condensation du fluide des tubes de chauffage, nous allons fixer la température à une valeur de 19°C pour se permettre d'avoir un confort interne. Pour cela, la Figure IV.41 montre la variation temporelle de la température surfacique interne pour le plancher chauffant sans rafraîchissement et le plancher chauffant avec rafraîchissement (plancher rafraîchissant).

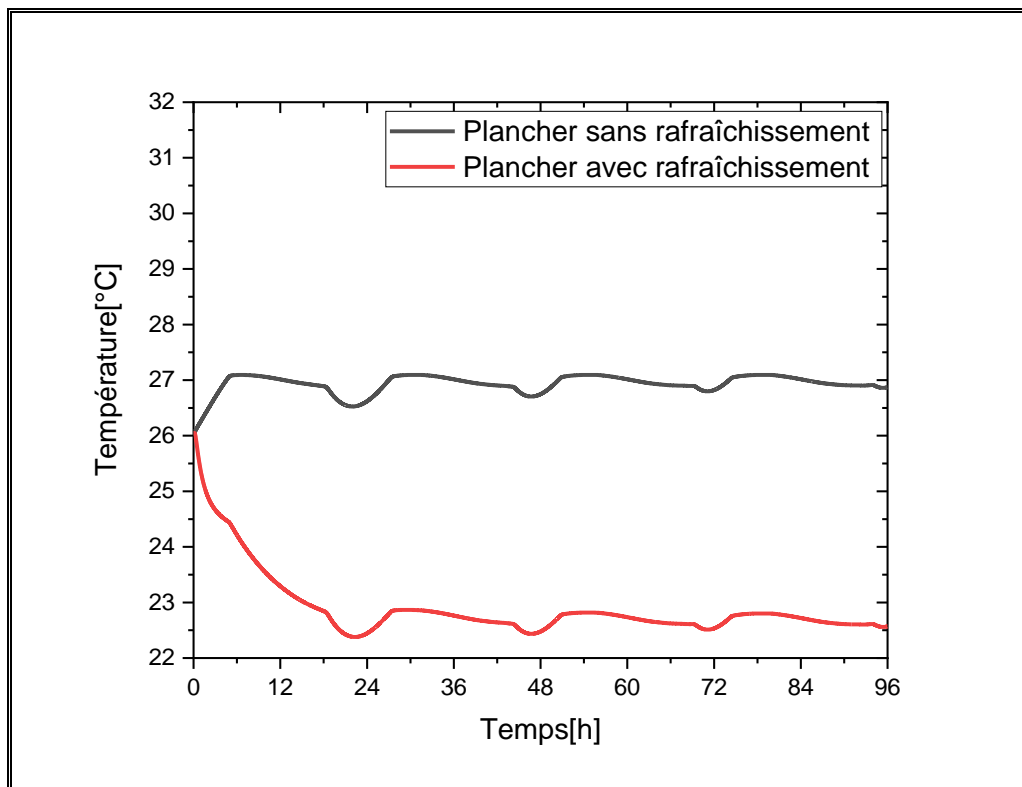


Figure IV-41 : Variation de la température surfacique interne pour le plancher avec et sans rafraîchissement.

CHAPITRE IV

D'après les résultats obtenus sur la figure, en circulant de l'eau froide à 19°C dans les tubes pour rafraîchir l'ambiance intérieure pour le cas du plancher avec rafraîchissement, la température surfacique du plancher varie entre 22.3°C et 22.7°C. Pourtant, en utilisant le plancher sans rafraîchissement, nous remarquons que la température surfacique du plancher varie entre 26°C et 27.2°C. Nous soulignons alors que le recours aux planchers rafraîchissants a montré que le procédé pouvait effectivement donner une satisfaction avec une diminution maximale de 4.5°C de la température d'ambiance, à condition d'utiliser une température du circuit hydraulique relativement élevée à l'ordre de 19°C afin de donner à la fois une sensation de confort aux occupants et pour éviter le risque de condensation.

Concernant la fraction liquide, on peut voir sur la Figure IV.42 la variation temporelle de la fraction liquide pour le plancher avec rafraîchissement et sans rafraîchissement.

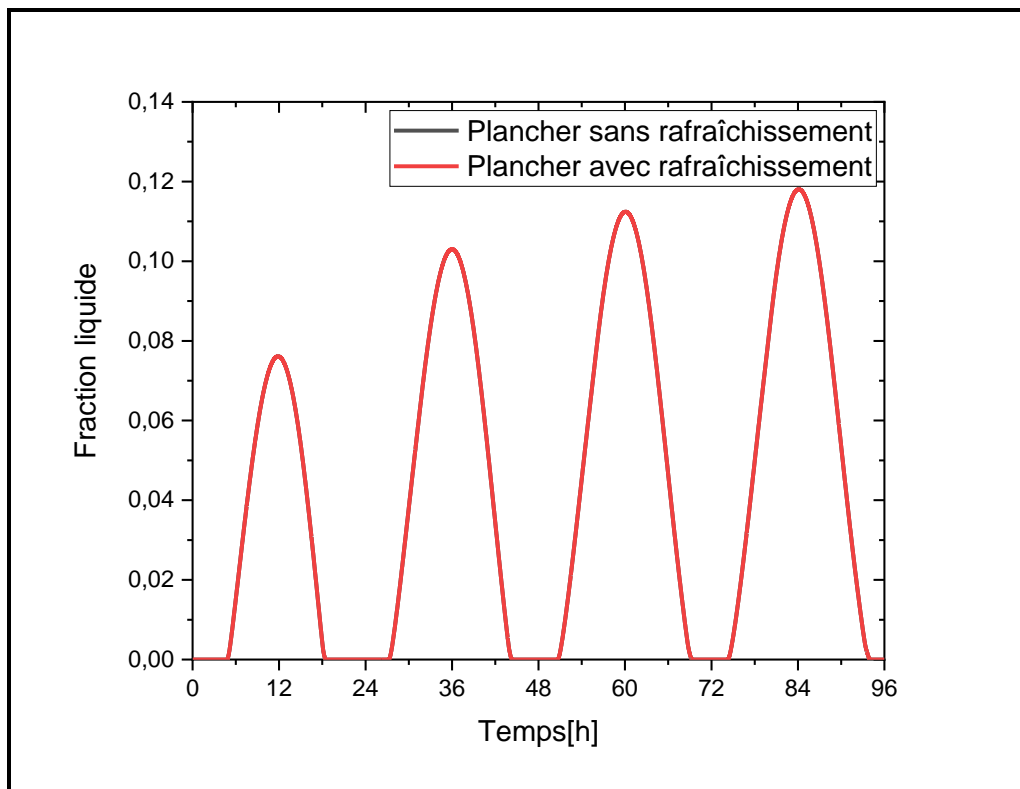


Figure IV-42 : Variation de la fraction liquide des microcapsules du MCP pour le plancher avec et sans rafraîchissement.

Nous remarquons que la fraction liquide des microcapsules du MCP présente un maximum de liquéfaction de 12% pendant la période diurne, cette liquéfaction est relative à la température ressentie imposée qui est légèrement supérieure à la température de fusion (27°C) et qui a permis d'avoir le changement d'état solide liquide des microcapsules ($f=0.12$). Cependant, le

CHAPITRE IV

MCP reste en phase solide pendant la période nocturne. Cela est relatif à la température de fusion du MCP (27°C) qui est largement supérieure à la température de rafraîchissement imposée (19°C) et qui est supérieure à la température imposée qui vaut 26°C pendant cette période. Dans ce cas, les microcapsules du MCP jouent le rôle d'une isolation thermique et peuvent apporter une augmentation de la température à la surface supérieure du plancher, mais la circulation de l'eau froide à 19°C dans les tubes a permis de rafraîchir l'ambiance interne. On conclut que le plancher chauffant peut être utilisé en tant que diffuseur de la chaleur pendant la période hivernale, et peut être aussi utilisé en tant qu'absorbeur de la chaleur en période estivale, en parle ici de plancher chauffant réversible.

IV.11 | Conclusion

Une simulation numérique d'un modèle physique en deux dimensions est élaborée dans ce chapitre afin d'évaluer le comportement thermique d'un plancher chauffant intégrant des microcapsules de matériaux à changement de phase micro-encapsulé dans des sphères de polyéthylène permettant d'empêcher la fuite dans la phase liquide du MCP.

L'objectif principal est de bénéficier de l'effet cumulatif des matériaux à changement de phase pendant la période où le chauffage est éteint et le MCP commence à diffuser l'énergie emmagasinée pendant le chauffage.

Une étude paramétrique est élaborée en commençant par l'évaluation de l'effet de l'emplacement et du pourcentage des microcapsules du MCP sur la performance thermique du plancher chauffant, à cette étape nous avons conclu que l'emplacement des microcapsules en dessus des tubes chauffants avec un pourcentage de microcapsules de 15% dans la couche du mortier de ciment a permis un meilleur transfert de chaleur vers la surface supérieure du plancher.

Ensuite, l'effet de l'inter-distance entre les tubes a prouvé que plus l'inter-distance est grande plus le MCP prend plus de temps durant la fusion et permet de fixer la température du plancher à une température de confort pendant la charge et la décharge, ce qui est aussi bénéfique en termes de performance économique en diminuant le nombre des tubes de chauffage par augmentation de l'inter-distance. Également un chauffage à une température de 35°C a permis d'avoir une température surfacique ne dépassant pas la limite exigée du confort thermique, et plus cette température augmente plus l'inconfort est présent précisément pendant la période de charge.

CHAPITRE IV

Avec cette configuration, l'étude de l'impact du type du MCP micro-encapsulé s'est élaborée en comparant les deux types du MCP organique et inorganique, il s'est avéré que les MCP inorganiques étudiés sont classés comme les meilleurs candidats, ainsi que ces derniers présentent un taux élevé de la capacité calorifique en volume, de la densité d'énergie, et de la conductivité thermique, ce qui a permis dans cette étude d'avoir une augmentation en amplitude de 4°C accompagnée d'un déphasage important de 5h30min en comparant le plancher avec MCP à celui de référence sans MCP.

Afin d'améliorer le transfert de chaleur du système de plancher chauffant avec MCP, nous avons ajoutés des nanoparticules pour remédier à l'inconvénient des MCP qui est leur faible conductivité thermique causant la diminution du rendement du système de plancher chauffant. Les nanoparticules ajoutées aux microcapsules du MCP sont appelés NePCM, dans la présente étude nous avons évalué l'impact de l'ajout des NePCM simples et hybrides sur la performance thermique du plancher et nous avons comparé entre eux.

En insérant des nanoparticules hybrides de 1% de Cu et 4% d'Al₂O₃ au lieu de nanoparticules simples de 5% de Cu, le NePCM hybride a une effusivité thermique effective légèrement inférieure de 1.45% à celle du NePCM simple, ce qui a mené à un gain économique pour lequel chaque 5% de cuivre peut être remplacé par 1% de cuivre mélangé avec 4% d'Al₂O₃, en plus d'un gain thermique avec un déphasage supplémentaire de 60 minutes.

Nous avons obtenu par cette intégration des microcapsules de matériau à changement de phase améliorés par 1% de cuivre et mélangé avec 4% d'Al₂O₃ une augmentation en amplitude de 4°C avec un déphasage de 6h30min par rapport au plancher chauffant classique.

Ensuite, nous avons effectué une simulation numérique en période estivale en utilisant la configuration retenue pendant la période hivernale, les résultats ont montré que l'intégration des microcapsules du MCP dans le plancher présente des améliorations en termes de performances thermiques pendant les deux périodes estivale et hivernale, en utilisant le MCP de type sels hydratés S27.

Finalement, nous avons effectué une simulation numérique pour un plancher rafraichissant en utilisant la meilleure configuration retenue pour le plancher chauffant durant la période hivernale et en circulant de l'eau froide dans les tubes à une température de 19°C, un rafraichissement de l'ambiance interne du plancher avec une diminution de la température surfacique interne de 4.5°C est obtenue.

CHAPITRE IV

Conclusion générale et perspectives

La croissance rapide de l'urbanisation a un impact négatif sur l'environnement et la consommation d'énergie du secteur du bâtiment. Il devient alors très crucial de fournir un confort thermique interne avec des techniques respectueuses de l'environnement.

Des techniques passives permettant d'avoir un confort thermique interne peuvent être utilisées. Parmi ces techniques, nous avons proposés l'intégration des matériaux à changement de phase dans les éléments de bâtiment. Par conséquent, cette thèse s'articule sur l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment par intégration des microcapsules du MCP dans ses éléments structuraux. Principalement, le mur multicouche extérieur et le plancher chauffant. Ce rapport est divisé en quatre chapitres, en commençant par le chapitre 1 qui décrit les différentes méthodes de stockage suivi de la présentation des différents types des MCP et les modalités de leur classification ainsi que les critères de choix relatif. Ensuite, nous avons élaboré une étude bibliographique qui a porté sur différents travaux en vue de l'intégration des MCP dans les éléments du bâtiment, ces travaux ont confirmé que les matériaux à changement de phase ont présenté des avantages sur l'amélioration de la performance thermique interne. Ainsi, ces matériaux souffrent de leur faible conductivité thermique qui présente une limitation de leur utilité. Suite à cela, une étude bibliographique est présentée sur l'intégration des Nanoparticules à haute conductivité thermique dans les éléments de bâtiment, ces nanoparticules ont révélé des améliorations cruciales sur l'augmentation de la conductivité thermique ce qui a permis de garantir une performance thermique plus importante que dans les structures seulement avec MCP. De ce fait, nous avons proposé dans la présente thèse d'améliorer la performance thermique du bâtiment par intégration des MCP dans ses éléments structuraux (murs et plancher) sous forme de microcapsules, ainsi qu'une amélioration de ces derniers par des nanoparticules conducteurs de différents types, et ce pour différentes périodes de l'année.

Le deuxième chapitre de cette thèse a regroupé la présentation du modèle étudié et la formulation mathématique correspondante à ce travail. En commençant par le bilan énergétique du mur multicouche intégrant les microcapsules du matériau à changement de phase dans différents emplacements du mur multicouche. Ensuite, la modélisation et la formulation mathématique du plancher chauffant contenant les microcapsules de matériau à changement de phase a été élaboré. La résolution des équations d'énergie relative aux deux

systemes est établie par la méthode enthalpique, et la discrétisation des équations d'énergie est faite par la méthode des volumes finis reconnu par son adaptation aux différents problèmes physiques. Après la description du système d'équations de chaque système étudié, nous avons procédé la validation de nos résultats numériques avec la solution analytique de la position du front de fusion pour un bloc du MCP pur et avec les résultats de la littérature pour une brique contenant des MCP dans les cavités de la brique creuse, en plus d'un système relatif à un plancher chauffant couplé avec une couche de matériaux à changement de phase. Finalement nous avons trouvés que les résultats numériques et les résultats analytique et expérimentale ont révélé un bon accord, et ont permis de confirmer la validité et la fiabilité de notre calcul numérique.

Dans le troisième chapitre, une évaluation du comportement thermique d'un mur multicouche intégrant les microcapsules du MCP de type paraffine n-octadécane dans différents emplacements dans le mur est effectuée. Les différents murs étudiés sont un mur dans lequel les microcapsules du MCP sont placées dans la couche de mortier externe(M1), un mur multicouche dans lequel nous avons placé les microcapsules du MCP dans la couche du mortier proche de l'ambiance interne (M2), et un mur multicouche dans lequel les microcapsules du MCP sont placées dans la matrice solide de la brique creuse à 8 trous(M3). La comparaison entre le mur de référence et celui avec le MCP pour les différents types de mur multicouche avec une incorporation de 15% des microcapsules a montré que la meilleure configuration est celle relative au mur multicouche avec incorporation des microcapsules du MCP dans la matrice solide de la brique creuse. Par la suite, la variation de la quantité des microcapsules de 15% à 35% pour les trois configurations étudiées a montré que pour une ville chaude telle que Khouribga, il n'est pas souhaitable de dépasser 20% en termes de pourcentage des microcapsules du MCP afin de garantir une meilleure performance thermique. La configuration optimale obtenu a confirmé les résultats bibliographiques concernant la compression mécanique qui ont montré que le pourcentage optimal est celui de 20%. A ce stade, la configuration retenue dans notre étude prouve à la fois des performances thermiques et mécaniques. Par ailleurs, il a été conclu que le scénario optimal est celui dans lequel nous intégrons les microcapsules du MCP dans la matrice solide de la brique creuse, permettant d'avoir un décalage temporel de 3 heures, en utilisant la paraffine n-octadécane de température de fusion 28°C comme type du MCP pour la ville de Khouribga en période estivale. Finalement, en utilisant la conception optimale retenue pour la période estivale ; une étude numérique pour la période hivernale est effectuée et les résultats ont montré que l'intégration de 20% des microcapsules de MCP de type paraffine n-octadécane dans la matrice solide de

la brique creuse présente des améliorations en termes de performances thermiques pendant les deux périodes estivale et hivernale.

Dans le quatrième chapitre, le comportement thermique d'un plancher chauffant intégrant des microcapsules de matériaux à changement de phase micro-encapsulé est élaboré. L'objectif principal est de bénéficier de l'effet cumulatif des matériaux à changement de phase pendant la période où le chauffage est éteint. Plusieurs études paramétriques sont élaborées en commençant par l'évaluation de l'effet de l'emplacement et du pourcentage des microcapsules du MCP, suivi de l'effet de l'inter-distance entre les tubes et la température de chauffage convenable. En plus de l'étude de l'impact du type du MCP micro-encapsulé qui s'est élaborée en comparant deux types du MCP (organique et inorganique)

Suite à ces études paramétriques, la configuration optimale obtenue consiste à intégrer les microcapsules en dessus des tubes chauffants avec un pourcentage de microcapsules de 15% dans la couche du mortier de ciment afin d'avoir un meilleur transfert de chaleur vers la surface supérieure du plancher. Ainsi, l'effet de l'inter-distance entre les tubes a prouvé que plus l'inter-distance est grande plus le bénéfice en termes de performance thermique et économique est important. Également un chauffage à une température de 35°C est recommandé et a permis d'avoir une température surfacique dans le cadre des exigences du confort thermique. Afin de rester dans une zone de confort réglementaire, il s'est avéré que les MCP inorganiques sont classés comme les meilleurs candidats. Par la suite, afin d'améliorer le transfert de chaleur du système de plancher chauffant avec MCP, nous avons ajouté des nanoparticules pour remédier à l'inconvénient des MCP qui est leur faible conductivité thermique causant la diminution du rendement du système du plancher chauffant, et nous avons conclu que l'ajout de 1% de cuivre mélangé avec 4% d'Al₂O₃ a permis une augmentation en amplitude de 4°C avec un déphasage de 6h30min par rapport au plancher chauffant classique. Cependant, les résultats ont montré que l'intégration des microcapsules du MCP dans le plancher présente des améliorations en termes de performances thermiques pendant les deux périodes estivale et hivernale en utilisant le MCP de type sels hydratés S27. Finalement, nous avons effectué une simulation numérique pour un plancher rafraichissant en utilisant la meilleure configuration retenue pour le plancher chauffant durant la période hivernale, et nous avons obtenu une amélioration de l'ambiance interne du plancher avec un rafraîchissement interne de 4.5°C.

Comme perspective, nous soulignons que le règlement thermique de construction au Maroc a fixé des exigences de confort thermique pour une carte composée de six zones climatiques. Pour cela, nous envisagerons de mener des études sur l'intégration des microcapsules du MCP dans les éléments de bâtiments étudiés en généralisons le calcul pour les différentes zones

climatiques et en utilisons d'autres matériaux de constructions courants, afin de pouvoir ressortir des configurations typiques relatives à chaque climat au Maroc avec les matériaux de construction convenable.

Références

- [1] A. El Maakoul, A. Degiovanni, Z. Bouhssine, Transient linear analytical heat transfer model for a building, validation with a non-linear coupled finite volume code, *Therm. Sci. Eng. Prog.* 20 (2020) 100756. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100756>.
- [2] P.K. Singh Rathore, S.K. Shukla, N.K. Gupta, Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: A critical review, *Sustain. Cities Soc.* 53 (2020) 101884. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101884>.
- [3] K. Pielichowska, K. Pielichowski, Phase change materials for thermal energy storage, *Prog. Mater. Sci.* 65 (2014) 67–123. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>.
- [4] S.M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques, *Energy Convers. Manag.* 39 (1998) 1127–1138. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00025-9).
- [5] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 615–628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.015>.
- [6] M.M. Farid, A.M. Khudhair, S.A.K. Razack, S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Convers. Manag.* 45 (2004) 1597–1615. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>.
- [7] A.M. Khudhair, 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. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00131-6).
- [8] J. Lizana, R. Chacartegui, A. Barrios-Padura, C. Ortiz, Advanced low-carbon energy measures based on thermal energy storage in buildings: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 3705–3749. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.093>.
- [9] M.A. Wahid, S.E. Hosseini, H.M. Hussen, H.J. Akeiber, S.N. Saud, A.Th. Mohammad, An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region, *Appl. Therm. Eng.* 112 (2017) 1240–1259. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.032>.
- [10] A. de Gracia, L.F. Cabeza, Phase change materials and thermal energy storage for buildings, *Energy Build.* 103 (2015) 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>.
- [11] S. Drissi, T.-C. Ling, K.H. Mo, A. Eddhahak, A review of microencapsulated and composite phase change materials: Alteration of strength and thermal properties of cement-

based materials, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 110 (2019) 467–484. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.072>.

[12] M. Liu, W. Saman, F. Bruno, Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 2118–2132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.020>.

[13] F. Liu, J. Wang, X. Qian, Integrating phase change materials into concrete through microencapsulation using cenospheres, *Cem. Concr. Compos.* 80 (2017) 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.001>.

[14] A. Eddhahak-Ouni, S. Drissi, J. Colin, J. Neji, S. Care, Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated Phase Change Materials (PCMs), *Appl. Therm. Eng.* 64 (2014) 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.050>.

[15] C. Barreneche, M.E. Navarro, A.I. Fernández, L.F. Cabeza, Improvement of the thermal inertia of building materials incorporating PCM. Evaluation in the macroscale, *Appl. Energy.* 109 (2013) 428–432. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.055>.

[16] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, D. Quenard, Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material, *Energy Build.* 38 (2006) 673–681. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.11.002>.

[17] U. Berardi, S. Soudian, Experimental investigation of latent heat thermal energy storage using PCMs with different melting temperatures for building retrofit, *Energy Build.* 185 (2019) 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.016>.

[18] M. Jaworski, Thermal performance of building element containing phase change material (PCM) integrated with ventilation system – An experimental study, *Appl. Therm. Eng.* 70 (2014) 665–674. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.093>.

[19] J. Xie, W. Wang, J. Liu, S. Pan, Thermal performance analysis of PCM components heat storage using mechanical ventilation: Experimental results, *Energy Build.* 123 (2016) 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.043>.

[20] C. Li, H. Yu, Y. Song, Z. Liu, Novel hybrid microencapsulated phase change materials incorporated wallboard for year-long year energy storage in buildings, *Energy Convers. Manag.* 183 (2019) 791–802. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.036>.

[21] X. Guo, J. Cao, Y. Peng, R. Liu, Incorporation of microencapsulated dodecanol into wood flour/high-density polyethylene composite as a phase change material for thermal

- energy storage, *Mater. Des.* 89 (2016) 1325–1334. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.068>.
- [22] C. Mankel, A. Caggiano, N. Ukrainczyk, E. Koenders, Thermal energy storage characterization of cement-based systems containing microencapsulated-PCMs, *Constr. Build. Mater.* 199 (2019) 307–320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.195>.
- [23] L. Haurie, S. Serrano, M. Bosch, A.I. Fernandez, L.F. Cabeza, Single layer mortars with microencapsulated PCM: Study of physical and thermal properties, and fire behaviour, *Energy Build.* 111 (2016) 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.028>.
- [24] F. Boudali Errebai, S. Chikh, L. Derradji, Experimental and numerical investigation for improving the thermal performance of a microencapsulated phase change material plasterboard, *Energy Convers. Manag.* 174 (2018) 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.052>.
- [25] Y. Kusama, Y. Ishidoya, Thermal effects of a novel phase change material (PCM) plaster under different insulation and heating scenarios, *Energy Build.* 141 (2017) 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.033>.
- [26] H. Jamil, M. Alam, J. Sanjayan, J. Wilson, Investigation of PCM as retrofitting option to enhance occupant thermal comfort in a modern residential building, *Energy Build.* 133 (2016) 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.064>.
- [27] H. Zhang, F. Xing, H.-Z. Cui, D.-Z. Chen, X. Ouyang, S.-Z. Xu, J.-X. Wang, Y.-T. Huang, J.-D. Zuo, J.-N. Tang, A novel phase-change cement composite for thermal energy storage: Fabrication, thermal and mechanical properties, *Appl. Energy.* 170 (2016) 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.091>.
- [28] A. Serrano, A.M. Borreguero, I. Garrido, J.F. Rodríguez, M. Carmona, Reducing heat loss through the building envelope by using polyurethane foams containing thermoregulating microcapsules, *Appl. Therm. Eng.* 103 (2016) 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.098>.
- [29] C. Lai, S. Hokoi, Thermal performance of an aluminum honeycomb wallboard incorporating microencapsulated PCM, *Energy Build.* 73 (2014) 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.017>.
- [30] A.M. Borreguero, A. Serrano, I. Garrido, J.F. Rodríguez, M. Carmona, Polymeric-SiO₂-PCMs for improving the thermal properties of gypsum applied in energy efficient buildings, *Energy Convers. Manag.* 87 (2014) 138–144. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.027>.

- [31] H. Cui, T. Feng, H. Yang, X. Bao, W. Tang, J. Fu, Experimental study of carbon fiber reinforced alkali-activated slag composites with micro-encapsulated PCM for energy storage, *Constr. Build. Mater.* 161 (2018) 442–451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.075>.
- [32] Y. Fang, H. Wei, X. Liang, S. Wang, X. Liu, X. Gao, Z. Zhang, Preparation and Thermal Performance of Silica/n-Tetradecane Microencapsulated Phase Change Material for Cold Energy Storage, *Energy Fuels.* 30 (2016) 9652–9657. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01799>.
- [33] T. Lecompte, P. Le Bideau, P. Glouanec, D. Nortershauser, S. Le Masson, Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material, *Energy Build.* 94 (2015) 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.044>.
- [34] C. Li, H. Yu, Y. Song, H. Liang, X. Yan, Preparation and characterization of PMMA/TiO₂ hybrid shell microencapsulated PCMs for thermal energy storage, *Energy.* 167 (2019) 1031–1039.
- [35] H. Liu, X. Wang, D. Wu, S. Ji, Fabrication and applications of dual-responsive microencapsulated phase change material with enhanced solar energy-storage and solar photocatalytic effectiveness, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 193 (2019) 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.012>.
- [36] K. Cellat, B. Beyhan, Y. Konuklu, C. Dündar, O. Karahan, C. Güngör, H. Paksoy, 2 years of monitoring results from passive solar energy storage in test cabins with phase change materials, *Sol. Energy.* 200 (2020) 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.045>.
- [37] M. Ibáñez, A. Lázaro, B. Zalba, L.F. Cabeza, An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS, *Appl. Therm. Eng.* 25 (2005) 1796–1807. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.11.001>.
- [38] 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. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.001>.
- [39] 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. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.003>.

- [40] 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. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.022>.
- [41] C. Barreneche, L. Navarro, A. de Gracia, A.I. Fernández, L.F. Cabeza, In situ thermal and acoustic performance and environmental impact of the introduction of a shape-stabilized PCM layer for building applications, *Renew. Energy.* 85 (2016) 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.054>.
- [42] J. Chambers, P. Hollmuller, O. Bouvard, A. Schueler, J.-L. Scartezzini, E. Azar, M.K. Patel, Evaluating the electricity saving potential of electrochromic glazing for cooling and lighting at the scale of the Swiss non-residential national building stock using a Monte Carlo model, *Energy.* 185 (2019) 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.037>.
- [43] O.Y. Souci, S. Houat, M.E. Ganaoui, Heat transfer study of phase change material incorporated into a cavity of a hollow brick during melting, *MATEC Web Conf.* 330 (2020) 01049. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202033001049>.
- [44] N.A. Yahay, H. Ahmad, Numerical Investigation of Indoor Air Temperature with the Application of PCM Gypsum Board as Ceiling Panels in Buildings, *Procedia Eng.* 20 (2011) 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.161>.
- [45] Z. Younsi, H. Naji, M. Lachheb, Numerical investigation of transient thermal behavior of a wall incorporating a phase change material via a hybrid scheme, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 78 (2016) 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.09.007>.
- [46] M. Mahdaoui, S. Hamdaoui, A. Ait Msaad, T. Kousksou, T. El Rhafiki, A. Jamil, M. Ahachad, Building bricks with phase change material (PCM): Thermal performances, *Constr. Build. Mater.* 269 (2021) 121315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121315>.
- [47] K. Kant, A. Shukla, A. Sharma, Heat transfer studies of building brick containing phase change materials, *Sol. Energy.* 155 (2017) 1233–1242. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.07.072>.
- [48] E.M. Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material, *Energy Build.* 40 (2008) 351–357. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.001>.
- [49] Y. Gao, F. He, X. Meng, Z. Wang, M. Zhang, H. Yu, W. Gao, Thermal behavior analysis of hollow bricks filled with phase-change material (PCM), *J. Build. Eng.* 31 (2020) 101447. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101447>.
- [50] Z. Aketouane, M. Malha, D. Bruneau, A. Bah, B. Michel, M. Asbik, O. Ansari, Energy savings potential by integrating Phase Change Material into hollow bricks: The case of

Moroccan buildings, *Build. Simul.* 11 (2018) 1109–1122. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0457-5>.

[51] F. Ascione, N. Bianco, R.F. De Masi, F. de' Rossi, G.P. Vanoli, Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season, *Appl. Energy.* 113 (2014) 990–1007. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.045>.

[52] L. Karim, A. Bontemps, A. Grados, L. Royon, Amélioration du confort thermique par intégration de Matériau à Changement de Phase (MCP) dans les planchers/plafonds de bâtiment à structure légère, in: *Amélioration Confort Therm. Par Intégr. E Matér. À Chang. Phase MCP Dans Planchersplafonds Bâtim. À Struct. Légère*, Marrakech, Morocco, 2013: pp. 1–5. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00940341> (accessed January 17, 2021).

[53] NF DTU 65.14 - Exécution de planchers chauffants à eau chaude DTU, (n.d.). <https://www.batirama.com/article/24957-nf-dtu-65.14-execution-de-planchers-chauffants-a-eau-chaude.html> (accessed November 5, 2021).

[54] F. Mokhtari, N.A. Messaoudène, A. Hamid, Etude du comportement thermique d'une maison munie d'un système de chauffage solaire, (n.d.) 8.

[55] M. Zaheer-Uddin, G.R. Zheng, S.-H. Cho, Optimal operation of an embedded-piping floor heating system with control input constraints, *Energy Convers. Manag.* 38 (1997) 713–725. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00058-1).

[56] Etude Expérimentale du Comportement Thermique d'un Plancher Solaire Direct 1. INTRODUCTION - PDF Free Download, (n.d.). <https://docplayer.fr/13420630-Etude-experimentale-du-comportement-thermique-d-un-plancher-solaire-direct-1-introduction.html> (accessed November 8, 2021).

[57] A. Mokhtari, H. Kazeoui, Y. Boukezzi, G. Achard, Utilisation d'un Circuit Hydraulique dans un Plancher pour le Chauffage et le Rafraîchissement des Locaux, (2021).

[58] N. Belkacem, L. Loukarfi, A. Khelil, H. Naji, B. Mohamed, M. Missoum, Simulation des charges thermiques dans une habitation pilote à plancher réversible, *Rev. « Nat. Technol. »*. C (2015) 17.

[59] NF EN 12098-5, Afnor Ed. (n.d.). <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-120985/performance-energetique-des-batiments-regulation-pour-les-systemes-de-chauf/fa185020/79317> (accessed November 8, 2021).

[60] B. González, M.M. Prieto, Radiant heating floors with PCM bands for thermal energy storage: A numerical analysis, *Int. J. Therm. Sci.* 162 (2021) 106803. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106803>.

- [61] W.-L. Cheng, B. Xie, R. Zhang, Z. Xu, Y. Xia, Effect of thermal conductivities of shape stabilized PCM on under-floor heating system, *Appl. Energy*. 144 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.055>.
- [62] P. Devaux, M.M. Farid, Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.060>.
- [63] M. Farid, W.J. Kong, Underfloor heating with latent heat storage, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Power Energy*. 215 (2001) 601–609. <https://doi.org/10.1243/0957650011538839>.
- [64] K. Huang, G. Feng, J. Zhang, Experimental and numerical study on phase change material floor in solar water heating system with a new design, *Sol. Energy*. 105 (2014) 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.009>.
- [65] S. Choi, T. Kim, J. Park, Mock-up Test of Time Lag in Floor Heating Systems with PCM, *E3S Web Conf.* 111 (2019) 06061. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911106061>.
- [66] Numerical and experimental investigation on dynamic thermal performance of floor heating system with phase change material for thermal storage - Qunli Zhang, Zhaosheng <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1420326X19900535> (accessed May 27, 2021).
- [67] M. Al-Maghalseh, K. Mahkamov, Methods of heat transfer intensification in PCM thermal storage systems: Review paper, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 92 (2018) 62–94. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.064>.
- [68] H.H. Al-Kayiem, S.C. Lin, Performance evaluation of a solar water heater integrated with a PCM nanocomposite TES at various inclinations, *Sol. Energy*. 109 (2014) 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.08.021>.
- [69] K. Kant, A. Shukla, A. Sharma, P. Henry Biwole, Heat transfer study of phase change materials with graphene nano particle for thermal energy storage, *Sol. Energy*. 146 (2017) 453–463. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.013>.
- [70] H. Sarrafha, A. Kasaeian, M.H. Jahangir, R.A. Taylor, Transient thermal response of multi-walled carbon nanotube phase change materials in building walls, *Energy*. 224 (2021) 120120. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120120>.
- [71] T.-H. Wang, T.-F. Yang, C.-H. Kao, W.-M. Yan, M. Ghalambaz, Paraffin core-polymer shell micro-encapsulated phase change materials and expanded graphite particles as an enhanced energy storage medium in heat exchangers, *Adv. Powder Technol.* 31 (2020) 2421–2429. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.04.006>.
- [72] M. Nabavitatabayyi, F. Haghighat, A. Moreau, P. Sra, Numerical analysis of a thermally enhanced domestic hot water tank, *Appl. Energy*. 129 (2014) 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.081>.

- [73] Numerical heat transfer and fluid flow. Von S. V. Patankar. Hemisphere Publishing Corporation, Washington – New York – London. McGraw Hill Book Company, New York 1980. 1. Aufl., 197 S., 76 Abb., geb., DM 71,90 - Bender - 1981 - <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cite.330530323> (accessed January 25, 2021).
- [74] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 615–628.
- [75] 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. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.022>.
- [76] (1) (PDF) Transfert de chaleur dans une brique contenant un matériau à changement de phase. https://www.academia.edu/1449556/Transfert_de_chaleur_dans_une_brique_contenant_un_mat%C3%A9riau_%C3%A0_changement_de_phase.
- [77] V. Voller, M. Cross, Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method, *Int. J. Heat Mass Transf.* 24 (1981) 545–556. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(81\)90062-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(81)90062-4).
- [78] S. Guichard, Contribution à l'étude des parois complexes intégrant des matériaux à changements de phase: modélisation, expérimentation, et évaluation de la performance énergétique globale, (n.d.) 247.
- [79] M. Amir, M. Lacroix, N. Galanis, Comportement thermique de dalles chauffantes électriques pour le stockage quotidien, *Int. J. Therm. Sci.* 38 (1999) 121–131. [https://doi.org/10.1016/S1290-0729\(99\)80049-0](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(99)80049-0).
- [80] S. Issam, A. Brakez, B. Benhamou, Dynamic modeling of thermal behaviour of a solar floor heating system for a HAMMAM in Marrakech, 2015.
- [81] B. Larwa, Study on thermal performance of a PCM enhanced hydronic radiant floor heating system, (2021) 14.
- [82] O. Abdellatif, B. Aour, B. Zeghmami, X. Chesneau, Etude numérique de diffusion thermique dans un système de stockage d'énergie destiné pour le chauffage par le sol: cas de la dalle plancher, 04 (2019) 46–56.
- [83] Investigating the effect of single and hybrid nanoparticles on melting of phase change material in a rectangular enclosure with finite heat source - Faraji - 2021 - International Journal of Energy Research - Wiley Online Library, (n.d.). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.6095>.