

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
HOUARI BOUMEDIENE

Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procédés



Thèse de Doctorat en Science

Présentée pour l'obtention du grade de Docteur

En : GENIE MECANIQUE

Spécialité : Thermo-énergétique

Par : BOUDALI ERREBAI Farid

Sujet :

**Utilisation des Matériaux à Changement de Phase pour une
meilleure efficacité énergétique dans le bâtiment**

Soutenu publiquement, le 09/05/2019, devant le jury composé de :

M. BOUMEDIEN Ali	Professeur à l'USTHB/FGM	Président
M. CHIKH Salah	Professeur à l'USTHB/FGM	Directeur de thèse
M. AMARA Mohamed	Maître de Recherche/A au CNERIB	Examineur
M. BENABDESSELAM Azzedine	Maître de Conférences/A à l'USTHB/FGM	Examineur
M. BELMILI Hocine	Maître de Recherche/A à l'UDES	Examineur
M. IMESSAD Khaled	Maître de Recherche/A au CDER	Examineur

TABLE DES MATIERES

Remerciements	11
Dédicaces	12
Résumé	13
ملخص.....	15
Abstract	16
Publications et communications	18
Nomenclatures	19
Abréviations	21
Introduction générale	22
1. Définition du problème.....	22
2. Objectifs du travail	25
3. Structure de la thèse	26
Chapitre I. Généralités et synthèse bibliographique	28
I.1. Introduction.....	29
I.2. Stockage de chaleur dans les bâtiments	29
I.2.1. Stockage par chaleur sensible	30
I.2.2. Stockage par chaleur latente.....	31
I.2.3. Matériaux à Changement de Phase (MCP)	34
I.3. Applications des matériaux de stockage d'énergie thermique.....	45
I.3.1. Panneaux muraux incorporant des MCP.....	46
I.3.2. Murs incorporant des MCP	47
I.3.3. Planchers et plafonds incorporant des MCP	48
I.3.4. Mur Trombe avec l'incorporation des MCP	48
I.4. Techniques de mesure des caractérisations thermiques	49
I.4.1. Calorimétrie à balayage différentiel (DSC)	50
I.4.2. Analyse thermique différentielle (DTA).....	51
I.4.3. Méthode T-history.....	51
I.4.4. Méthode du fil chaud	51
I.4.5. Méthode de la plaque chaude gardée	52
I.5. Confort thermique	53
I.5.1. Obtention du confort thermique par l'utilisation de MCP	53
I.5.2. Cadre réglementaire sur le confort thermique.....	53
I.6. Amélioration du stockage thermique par chaleur latente.....	54

I.6.1. Amélioration du coefficient d'échange thermique globale	55
I.6.2. Extension de la surface de transfert de chaleur	56
I.6.3. Amélioration de l'uniformité des processus de transfert de chaleur.....	56
I.7. Etudes de la performance thermique des MCP	58
I.7.1. Approche expérimentale	58
I.7.2. Approche de modélisation numérique.....	60
I.7.3. Combinaison entre l'expérimental et la modélisation numérique.....	60
I.8. Conclusion	61
Chapitre II. Modélisation numérique du phénomène de changement de phase	62
II.1. Introduction à la modélisation numérique	63
II.2. Modèles de changement de phase.....	63
II.3. Formulation numérique des problèmes de changement de phase.....	65
II.3.1. Méthode de l'enthalpie	66
II.3.2. Méthode de la capacité thermique	67
II.3.3. Modèle de transformation de la température	69
II.3.4. Méthode de la source de chaleur.....	69
II.3.5. Résumé	70
II.4. Choix et améliorations apportées aux modèles de changement de phase.....	71
II.5. Méthodologie de simulation	73
II.6. Modélisation numérique en mécanique des fluides (CFD).....	74
II.6.1. Procédure de simulation par CFD.....	74
II.6.2. Modélisation de la turbulence.....	75
II.6.3. Difficultés liées à l'emploi des codes CFD	77
II.7. Efficacité du transfert thermique par convection.....	78
II.8. Conclusion	79
Chapitre III. Caractérisation thermophysique des panneaux de plâtre-MCP.....	80
III.1. Introduction	81
III.2. Matériaux et méthodes	81
III.2.1. Sélection du matériau à changement de phase	81
III.2.2. Sélection du plâtre	82
III.2.3. Préparation des échantillons de plâtre-MCP	83
III.3. Détermination des paramètres thermophysiques.....	84
III.3.1. Conductivité thermique	84
III.3.2. Chaleur spécifique	86
III.3.3. Masse volumique.....	88
III.4. Conclusion.....	89
Chapitre IV. Comportement thermique des panneaux de plâtre-MCP	90

IV.1. Introduction	91
IV.2. Installation expérimentale utilisée pour la validation.....	91
IV.2.1. Description de la cellule de test.....	91
IV.2.2. Equipements d'instrumentation utilisés	93
IV.3. Modélisation numérique du comportement thermique	93
IV.3.1. Équations gouvernantes.....	93
IV.3.2. Cas étudiés, les conditions d'essai et les hypothèses de simulation.....	95
IV.3.3. Maillage et outil de résolution.....	97
IV.3.4. Validité du modèle numérique	99
IV.4. Résultat et interprétation des simulations.....	101
IV.4.1. Comportement thermique des panneaux de plâtre incorporant des MCP	101
IV.4.2. Effet de la température de fusion	105
IV.5. Conclusion.....	106
Chapitre V. Amélioration du comportement thermique des panneaux de plâtre incorporant des MCP.....	107
V.1. Introduction	108
V.2. Installation expérimentale.....	108
V.2.1. Description de la cellule de test.....	108
V.2.2. Description des panneaux MCP implémentés dans la cellule de test	109
V.2.3. Equipements d'instrumentation utilisés.....	110
V.3. Modélisation numérique du comportement thermique.....	111
V.3.1. Équations gouvernantes.....	111
V.3.2. Cas étudiés, les conditions d'essai et les hypothèses de simulation	111
V.3.3. Maillage et outil de résolution.....	115
V.3.4. Modélisation numérique	116
V.3.5. Validation du modèle numérique proposé.....	117
V.4. Résultat et interprétation.....	119
V.4.1. Comportement thermique expérimental des panneaux de plâtre-MCP	119
V.4.2. Modélisation numérique du comportement thermiques	121
V.5. Conclusion.....	138
Chapitre VI. Comportement thermique d'un local d'habitation équipé de panneaux de plâtre-MCP	139
VI.1. Introduction	140
VI.2. Description de la géométrie du local.....	140
VI.3. Maillage du local.....	141
VI.4. Cas étudiés sur un local.....	142
VI.5. Résultats et interprétations	144
VI.5.1. Comportement thermique en période d'été sans climatisation.....	144

VI.5.2. Gains d'énergie liés au chauffage	155
VI.5.3. Gains d'énergie liés à la climatisation.....	160
VI.6. Conclusion.....	164
Conclusion générale et perspectives	166
Références bibliographiques	168
Annexe A. Caractéristiques, Equations enthalpie-température et Fonctionnement du code UDF	179
A.1. Equations de l'enthalpie-température de fusion et de solidification.....	180
A.2. Organigramme de fonctionnement du code UDF.....	181
A.3. Propriétés du MCP Micronal DS 5040.....	182
Annexe B. Equipements utilisés pour la détermination des caractéristiques thermophysiques.....	183
B.1. Conductivité thermique	184
B.2. Chaleur spécifique	184
B.2.1. Chaleur spécifique à l'état solide du MCP	184
B.2.2. Chaleur spécifique en fonction de la température.....	185
B.3. Masse volumique	186
Annexe C. Détermination des incertitudes sur les mesures	187
C.1. Estimation des incertitudes sur la mesure de la conductivité thermique	188
C.2. Estimation des incertitudes sur la mesure de la densité.....	188
C.3. Estimation des incertitudes sur la chaleur spécifique	188
C.4. Estimation des incertitudes sur la masse du MCP	188

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Propriétés thermophysiques des matériaux de stockage par chaleur sensible à 20 °C [31].	31
Tableau I.2. Comparaison des avantages et inconvénients des types de transformation de phase.....	33
Tableau I.3. Avantages et inconvénients des MCPO, des MCPIO et des MCPE [35].....	37
Tableau I.4. Avantages et inconvénients de la microencapsulation et la macroencapsulation [37].....	43
Tableau I.5. Liste des MCP commerciaux courants [43].	44
Tableau II.1. Caractéristique, avantages et inconvénients des méthodes mathématiques utilisées pour les problèmes de changement de phase [94].	70
Tableau II.2. Conditions du terme source définies par l'utilisateur pour définir le cas d'absorption/libération de chaleur [103].	72
Tableau III.1. Caractéristiques thermophysiques du MCP Micronal DS 5001 (source : BASF).....	82
Tableau III.2. Propriétés thermophysiques du plâtre (valeurs mesurées à une température de 21 °C). 83	
Tableau III.3. Composition des mélanges plâtre-MCP testés.	84
Tableau IV.1. Différents cas de simulation.	95
Tableau V.1. Paramètres d'études variables.....	111
Tableau V.2. Constantes des équations polynomiales du 3 ^{ème} degré.....	137
Tableau VI.1. Caractéristiques des parois du local.	140
Tableau VI.2. Différents cas d'études.	142
Tableau VI.3. Comparaison pour différents matériaux.	156
Tableau VI.4. Comparaison entre un panneau perforé et des panneaux ordinaires.....	156
Tableau VI.5. Comparaison pour différentes épaisseurs de panneaux absorbants.....	157
Tableau VI.6. Comparaison entre différents sens d'écoulement de l'air.	157
Tableau VI.7. Comparaison entre différents débits d'écoulement de l'air.....	158
Tableau VI.8. Désignation des cas d'étude pour le chauffage.	159
Tableau VI.9. Différents matériaux.....	161
Tableau VI.10. Comparaison entre un panneau perforé et des panneaux ordinaires.....	161
Tableau VI.11. Différentes épaisseurs des panneaux absorbants.....	162
Tableau VI.12. Différents sens d'écoulement de l'air.....	162
Tableau VI.13. Comparaison entre différents débits d'écoulement de l'air.....	163
Tableau VI.14. Désignation des cas d'étude pour la climatisation.....	164
Tableau A.1. Coefficients de l'équation $f(T)_{ab}$ pour différents pourcentage de MCP dans le plâtre. .	180
Tableau A.2. Coefficients de l'équation $f(T)_{lib}$ pour différents pourcentage de MCP dans le plâtre. .	180
Tableau A.3. Caractéristiques thermophysiques du Micronal DS 5040 (source : BASF).	182

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Schéma explicatif : (a) principe de fonctionnement d'un panneau de plâtre-MCP perforé dans un local, (b) diffusion de la chaleur à travers une plaque perforée.	26
Figure I.2. Différentes formes de plaques de plâtre acoustique.	26
Figure I.3. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement de phase.....	29
Figure I.4. Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la	32
Figure I.5. Classification du stockage d'énergie thermique [35].	35
Figure I.6. Solidification présentant une surfusion.	38
Figure I.7. Critères de sélection basés sur les caractéristiques de MCP.....	41
Figure I.8. Macroencapsulation dans : (a) un récipient plat, (b) une capsule, (c) des balles et (d) des sacs [42].....	42
Figure I.9. Paraffine microencapsulée produite par BASF, à gauche en dispersion fluide et à droite en poudre sèche [42].	43
Figure I.10. Composites sous forme de tableaux ou de plaques : (a) panneau de fibres FB (image : Rubitherm Technologies GmbH) et (b) panneaux DuPont, Energain [42].	45
Figure I.11. Vue schématique d'un mur léger. Les microcapsules de MCP sont intégrées dans le plâtre intérieur [41].....	47
Figure I.12. Configuration du modèle de mur Trombe [41].....	49
Figure I.13. Courbes de réponse des températures de balayage en fonction de la masse de l'échantillon et de la vitesse de chauffage [61,62].	50
Figure I.14. Principe de mesure de conductivité thermique utilisant la méthode du fil chaud [69].	52
Figure I.15. Le schéma de l'installation de la plaque chaudes gardée [71].....	53
Figure I.16. Classification des méthodes d'amélioration de la performance pour le système de stockage par chaleur latente.	54
Figure I.17. Schéma du système de stockage multi-étages à chaleur latente.	57
Figure II.1. Interface solide-liquide.....	64
Figure II.2. Un maillage de volume de contrôle typique.....	66
Figure II.3. Synoptique de la méthodologie de validation.	73
Figure II.4. Procédure de simulation par l'utilisation des outils numériques CFD.....	74
Figure II.5. Fluctuations de vitesse.....	75
Figure II.6. Distribution de température en présence et en l'absence de diffusion. (a) $\Gamma = 0$, (b) $\Gamma \neq 0$ (d'après PATANKAR, 1980).	77
Figure III.1. Poudre de MCP microencapsulé utilisé (Micronal DS 5001).....	81
Figure III.2. Chaleur spécifique du Micronal DS 5001 avec une température de changement de phase de 26 °C sur une plage de température comprise entre 15 °C et 32 °C. (Source : BASF).	82

Figure III.3. Les échantillons réalisés pour la mesure des propriétés thermophysiques.	83
Figure III.4. Conductivité thermique pour les différents pourcentages de MCP dans le plâtre.	85
Figure III.5. Conductivité thermique en fonction de la température.	86
Figure III.6. Chaleur spécifique pour des panneaux de plâtre-MCP à la température de 18 °C.	87
Figure III.7. Chaleur spécifique des mélanges de plâtre-MCP en fonction de la température (entre 22 °C et 29 °C).	88
Figure III.8. Masse volumique des panneaux de plâtre-MCP.	89
Figure IV.1. Installation expérimentale pour étudier le comportement thermique d'une cellule.	92
Figure IV.2. Photos de l'installation expérimentale : (a) côté face et (b) côté arrière.....	93
Figure IV.3. Equipements utilisés : (a) multimètre Keithley 2700 et (b) Calibrateur à bloc sec Omega CL-730A.....	93
Figure IV.4. Schéma de discrétisation du maillage.	94
Figure IV.5. Sollicitation sur le panneau de plâtre-MCP.	95
Figure IV.6. Modèle géométrique de la paroi standard de plâtre-MCP.	96
Figure IV.7. Maillage en 2D du panneau.	98
Figure IV.8. Comparaison du modèle numérique et des résultats expérimentaux pour le panneau de plâtre avec 30 % de MCP.	100
Figure IV.9. Contour de température à t =12h : (a).Plâtre, (b) 10 % de MCP, (c) 20 % de MCP, (d) 30 % de MCP, (e) 40 % de MCP et (f) 50 % de MCP dans le plâtre.	101
Figure IV.10. Contour de température à t =12 h : (a) Ep = 10 mm, (b) Ep = 30 mm, (c) Ep = 50 mm, (d) Ep = 70 mm et (e) Ep = 90 mm.	102
Figure IV.11. Variations de température de la surface interne des panneaux de plâtre-MCP pour : (a) l'épaisseur Ep = 50 mm pour un pourcentage de MCP variable (b) pourcentage de MCP de 30 % pour une épaisseur variable.	103
Figure IV.12. Oscillations de la température de la surface interne des panneaux étudiés.....	104
Figure IV.13. Déphasage thermique de la surface interne des panneaux étudiés.....	105
Figure IV.14. Amplitude thermique pour deux types de MCP à température de fusion de 23 °C et 26 °C pour : (a) période d'été et (b) période d'hiver.	106
Figure V.1. Installation expérimentale pour l'étude du comportement thermique des cellules.....	109
Figure V.2. Panneau de plâtre-MCP contenant 36 perforations.....	110
Figure V.3. Appareil de mesure multifonction Testo 435-2.....	110
Figure V.4. Présentation des cas de simulations sur les plans d'études.	113
Figure V.5. Modèle géométrique de la paroi de plâtre-MCP perforée.....	114
Figure V.6. Profil de variation de température extérieure.	115
Figure V.7. Maillage du modèle de simulation 2D.	116
Figure V.8. Comparaison du modèle numérique et des résultats expérimentaux pour la paroi perforée de plâtre avec 30 % de MCP.	118

Figure V.9. Comportement thermique expérimental d'un panneau perforé et d'un panneau ordinaire.	120
Figure V.10. Vitesse le long de l'axe $y = L/2$ pour différentes vitesses d'entrée d'air (v_i) sur un panneau de 50 mm d'épaisseur et une distance entre les perforations de 43 mm.	122
Figure V.11. Représentation du : (a) contours de vitesse et (b) vecteur de vitesse.	122
Figure V.12. Vitesse sur l'axe d'étude pour différentes distances entre les perforations (D_i) pour un panneau de 50 mm d'épaisseur et une vitesse d'entrée d'air de 5 mm/s.	123
Figure V.13. Variation des températures moyennes pour différentes vitesses de l'air.	124
Figure V.14. Variation des températures moyennes pour différentes distances entre les perforations.	125
Figure V.15. Variation des températures pour différentes épaisseurs de parois.	126
Figure V.16. Oscillation de la température moyenne de la surface droite en fonction de D_i pour 30 % de MCP dans le plâtre et pour 50 mm d'épaisseur et pour différents débits d'air.	127
Figure V.17. Contours de température des panneaux de plâtre-MCP perforés à $t = 12$ h et pour $v = 3$ mm/s pour : (a) $D = 300$ mm, (b) $D = 150$ mm, (c) $D = 100$ mm, (d) $D = 75$ mm, (e) $D = 60$ mm, (f) D $= 50$ mm, (g) $D = 43$ mm.	128
Figure V.18. Nombre de Nusselt sur l'axe y (surfaces de parois gauche et droite) pour différentes distance entre les perforations.	129
Figure V.19. Nombre de Nusselt sur l'axe x à travers les perforations pour différentes distances entre les perforations.	130
Figure V.20. Nombre de Nusselt pour différentes vitesses de l'air pour la : (a) surface de gauche, (b) surface de droite, (c) surface de passage de l'air.	131
Figure V.21. Nombre de Nusselt moyen en fonction de la variation de la température.	132
Figure V.22. Déphasage en fonction de : (a) distance entre les perforations pour $E_p = 90$ mm, (b) épaisseurs pour distance entre les perforations $D = 43$ mm.	133
Figure V.23. Densité de flux de chaleur en fonction de $D = 300$ mm à $D = 43$ mm pour $E_p = 50$ mm et pour $v = 3$ mm/s à $v = 7$ mm/s : (a) absorption de chaleur, (b) libération de chaleur.	135
Figure V.24. Densité de flux de chaleur absorbée en fonction de $D = 300$ mm à $D = 43$ mm pour $E_p =$ 10 mm à $E_p = 90$ mm et pour $v = 3$ mm/s.	136
Figure V.25. Flux de chaleur absorbé en fonction du terme sans dimension (E_p/D_i).	138
Figure VI.1. Modèle de géométrie du local.	141
Figure VI.2. Maillage du panneau en 2D du local.	142
Figure VI.3. Les trois types de panneaux : (a) type 1 : panneau avec perforation, (b) type 2 : panneau ordinaire (P.O.B) et (c) type 3 : panneau ordinaire (P.O.H).	143
Figure VI.4. Sens d'écoulement d'air : (a) sens BA_1 vers BA_2, (b) sens BA_2 vers BA_1 et (c) sens Mixte.	144

Figure VI.5. Contours de température du local à t = 12 h et pour un débit d'air de 0,6 V/h en période estivale sans climatisation.	145
Figure VI.6. Comportement thermique pour différents matériaux.....	147
Figure VI.7. Comportement thermique entre un panneau perforé et des panneaux ordinaires.	148
Figure VI.8. Comportement thermique pour différentes épaisseurs.....	150
Figure VI.9. Comportement thermique pour différents sens d'écoulement de l'air.....	152
Figure VI.10. Comportement thermique pour différents sens d'écoulement de l'air lorsque la ventilation se fait de BA_1 vers BA_2.....	153
Figure VI.11. Comportement thermique pour différentes vitesses d'écoulement lorsque la ventilation est mixte.	154
Figure VI.12. Contours de température du local à t = 12 h et pour un débit d'air de 0,6 V/h en période hivernale avec l'utilisation du chauffage.....	155
Figure VI.13. Récapitulatif des cas sur la consommation du chauffage.	159
Figure VI.14. Contours de température du local à t = 12 h et pour un débit d'air de 0,6 V/h en période estivale avec l'utilisation de la climatisation.....	160
Figure VI.15. Récapitulatif des cas sur la consommation de la climatisation.....	164
Figure A.1. Organigramme de fonctionnement du code UDF.	181
Figure B.1. Appareil de mesure de la conductivité thermique Taurus TCA 300 DTX.....	184
Figure B.2. Appareil utilisé pour la mesure de la chaleur spécifique CT-METRE.....	185
Figure B.3. Appareil utilisé pour la mesure de la chaleur spécifique DSC Polyma 214.....	186
Figure B.4. Appareils pour la détermination de la masse volumique : (a) balance et (b) pied à coulisse.	186

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes vifs et sincères remerciements à mon directeur de thèse le Professeur Salah CHIKH pour sa confiance en ma capacité à mener cette thèse à terme, pour ses directives et encouragements précieux, pour son soutien et pour tous les efforts qu'il a consacrés à diriger cette recherche.

J'adresse aussi mes sincères remerciements au Professeur Ali BOUMEDIEN pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de cette thèse.

Je remercie Mr. Azzedine BEN ABDESSELAM, Maître de Conférences/A à l'USTHB, Mr. Mohamed AMARA, Maître de Recherche/A au CNERIB, Mr. Hocine BELMILI, Maître de Recherche/A à l'UDES et Mr. IMESSAD Khaled, Maître de Recherche/A au CDER, d'avoir bien accepté de faire partie du jury et examiner ce travail.

Un grand Merci à tous ceux qui m'ont aidé et encouragé, je pense à Mr. Lotfi DERRADJI et à mes collègues du CNERIB.

Mes remerciements aussi à toute ma famille, en particulier à ma femme de m'avoir soutenu ces derniers mois, à mes parents qui m'ont toujours encouragé dans mes études, à mes frères et sœurs et mes chers enfants Meriem et Nassim.

DEDICACES

Je dédie cette thèse à :

A mes parents

A ma femme

A mes enfants

A mes frères et sœurs

A tous ceux qui m'aiment

RESUME

Le stockage d'énergie dans les bâtiments est un moyen important pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus appropriées pour une telle gestion, en établissant une relation constante entre la demande et la fourniture d'énergie. En cherchant à optimiser l'utilisation de l'énergie solaire qui est gratuite, le stockage de la chaleur pendant la journée est très important pour une gestion efficace de cette énergie thermique dans les bâtiments. Les systèmes qui permettent une capture d'énergie thermique importante et qui possèdent une masse thermique inadéquate peuvent entraîner une surchauffe, induisant ainsi des exigences supplémentaires en matière de ventilation ou de climatisation. De plus, la gestion de l'absorption d'énergie thermique améliore le confort thermique à l'intérieur du bâtiment tout en réduisant la consommation d'énergie ce qui induit une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il est donc nécessaire d'optimiser le transfert de chaleur en concevant une enveloppe de bâtiment plus efficace. L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) dans une enveloppe du bâtiment peut améliorer la capacité de stockage de chaleur et le comportement thermique de l'enveloppe de bâtiment et peut aider à réduire la consommation d'énergie tout en améliorant le confort thermique en contrôlant l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment. En fait, le MCP peut absorber, stocker et libérer de grandes quantités d'énergie sous forme de chaleur latente dans une plage de températures relativement étroite en raison du phénomène de changement de phase. Cependant, la faible conductivité thermique des MCP ralentit le processus d'absorption et de libération de chaleur. Dans cette thèse, des méthodes expérimentales ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques thermophysiques des composites plâtre-MCP, à savoir la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la densité. Ces mesures ont été suivies d'une recherche expérimentale en laboratoire et des simulations numériques pour : i) étudier le comportement thermique des panneaux de plâtre-MCP pour plusieurs cas (différents pourcentage de MCP dans le plâtre, différentes épaisseurs de panneaux et différentes températures de changement de phase), ii) proposer une nouvelle solution technique pour améliorer le comportement thermique d'un panneau de plâtre-MCP. Cette technique consiste à perforer ce panneau de plusieurs petites perforations permettant d'obtenir une plus grande surface de contact avec l'air ambiant améliorant ainsi le transfert convectif de chaleur. Cette technique d'amélioration passive est

implémentée expérimentalement et numériquement pour en vérifier les performances d'absorption et de libération de chaleur, iii) étudier le comportement thermique d'un local incorporant des matériaux à changement de phase (MCP) dans son enveloppe (comme moyen d'améliorer son inertie thermique), par le biais de simulations, à l'aide du logiciel Ansys Fluent. Dans cette partie, une comparaison est faite entre un local qui possède une enveloppe ordinaire et des locaux qui possèdent une enveloppe contenant différents types de MCP (différentes températures de changement de phase), différentes épaisseurs, ...etc. Les résultats trouvés montrent que l'utilisation des panneaux perforés augmente l'absorption et la libération de chaleur. L'augmentation moyenne était de 100 % pour l'absorption de chaleur et de 175 % pour la libération de chaleur par rapport à un panneau standard sans perforations. En outre, l'utilisation des panneaux perforés améliore le confort thermique et réduit la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation. Les gains d'énergie sont estimés à 20,1 % pour le chauffage et 16,2 % pour la climatisation entre des panneaux de plâtre-MCP perforé et ordinaire.

Mots clés : Matériaux à changement de phase, MCP, Absorption de chaleur, Libération de chaleur, Ansys Fluent.

ملخص

يعد تخزين الطاقة في المباني وسيلة مهمة للإدارة المثلى للطاقة الحرارية. إنه يجعل من الممكن تكييف الإنتاج مع الاحتياجات وخلق أنسب الشروط لمثل هذه الإدارة، من خلال إقامة علاقة ثابتة بين الطلب وإمدادات الطاقة. يعد تخزين الطاقة الحرارية خلال اليوم أمرًا مهمًا للغاية لإدارة الطاقة بكفاءة في المباني من خلال السعي إلى تحسين استخدام الطاقة الشمسية مجانًا. يمكن للأنظمة التي توفر التقاطًا عاليًا للطاقة الحرارية ولها كتلة حرارية غير كافية أن تؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة، مما يؤدي إلى متطلبات إضافية للتهوية أو تكييف الهواء. بالإضافة إلى ذلك، تعمل إدارة امتصاص الطاقة الحرارية على تحسين الراحة الحرارية داخل المبنى مع الحد من استهلاك الطاقة مما يؤدي إلى تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، لذلك من الضروري تحسين نقل الحرارة عن طريق تصميم مغلف بناء أكثر فعالية. يمكن أن يؤدي استخدام مواد تغيير الطور في غلاف المبنى إلى تحسين سعة تخزين الحرارة والسلوك الحراري للمبنى، ويمكن أن يساعد في تقليل استهلاك الطاقة مع تحسين الراحة الحرارية عن طريق التحكم في الجمود الحراري للمبنى. في الواقع، يمكن لمواد تغيير الطور امتصاص وتخزين وإطلاق كميات كبيرة من الطاقة الحرارية الكامنة في نطاق درجة حرارة ضيقة نسبيًا بسبب ظاهرة تغير الطور. ومع ذلك، فإن التوصيل الحراري المنخفض لمواد تغيير الطور يؤدي إلى إبطاء عملية امتصاص الحرارة وإطلاقها. في هذه الأطروحة، تم استخدام الطرق التجريبية لتحديد الخصائص الحرارية الفيزيائية لمركبات الجص ومواد تغيير الطور، وهي الموصلية الحرارية والحرارة النوعية والكثافة. وتلت هذه الخطوات من قبل مختبر البحوث التجريبية والمحاكاة العددية ل: 1) لدراسة السلوك الحراري للجبس مدمج مع مواد متغيرة الطور لعدة حالات (نسبة مختلفة من المواد متغيرة الطور في الجص، سمك مختلف للوحات ودرجات حرارة تغير الطور مختلفة، 2) اقتراح حل تقني جديد لتحسين السلوك الحراري للوحات الجصية التي تحتوي على المواد متغيرة الطور. تتكون هذه التقنية من تثقيب هذه اللوحات إلى عدة ثقوب صغيرة مما يجعل من الممكن الحصول على مساحة أكبر من التلامس مع الهواء المحيط، وبالتالي تحسين نقل الحرارة عن طريق الحمل الحراري. يتم تطبيق تقنية التحسين بشكل تجريبي وعددي للتحقق من أداء الامتصاص والحرارة. 3) دراسة السلوك الحراري لغرفة تتضمن مواد متغيرة الطور في غلافها (كوسيلة لتحسين الجمود الحراري) عن طريق المحاكاة.

في هذا الجزء، يتم إجراء مقارنة بين غرفة تحتوي على لوحة جدارية عادية وأخرى تحتوي على لوحات جدارية مكونة من أنواع مختلفة من مواد تغيير الطور (درجات حرارة مختلفة)، وسمك مختلف، إلخ.

تظهر النتائج التي تم العثور عليها أن استخدام لوحات ذات ثقوب يزيد من امتصاص وإطلاق الحرارة. وكان متوسط الزيادة 100 ٪ لامتصاص الحرارة و175 ٪ لإطلاق الحرارة مقارنة مع لوحة عادية دون ثقوب. بالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام الألواح المثقبة يحسن الراحة الحرارية ويقلل من استهلاك الطاقة المتعلق بالتدفئة وتكييف الهواء. تقدر المكاسب في الطاقة بنسبة 20.1 ٪ للتدفئة و16.2 ٪ لتكييف الهواء بين اللوحات ذات مواد تغيير المرحلة المثقبة واللوحات ذات مواد تغيير المرحلة العادية (دون ثقوب).

الكلمات المفتاحية: امتصاص الحرارة، إطلاق الحرارة، مواد تغيير الطور.

ABSTRACT

The energy storage in buildings is a significant means for an optimal management of thermal energy. It allows adapting production to the needs and creating the most suitable conditions for such management, providing a constant relationship between the demand and the supply of energy. Storing heat during the day is very important for an optimized efficient energy management in buildings. Systems enabling significant energy capture with inadequate thermal mass can lead to overheating which result in additional requirements for ventilation or air conditioning. In addition, the management of the absorption of thermal energy improves the thermal comfort inside the building while reducing energy consumption and greenhouse gas emissions. It is necessary to optimize the heat transfer by designing a more efficient building envelope. The use of Phase Change Material (PCM) in a building envelope can improve heat storage capacity and the thermal behavior of the building envelope and can help reduce energy consumption while improving thermal comfort by controlling the thermal inertia of the building envelope. In fact, the PCM can absorb, store and release large amounts of energy as latent heat in a relatively narrow range of temperatures due to a phase change phenomenon. However, the small thermal conductivity of the PCM slows down the process of heat absorption and release. In this thesis, experimental methods were used for the determination of the thermophysical characteristics of plaster-PCM composites namely thermal conductivity, specific heat and density. These measures were followed by an experimental research in laboratory and numerical simulations to: i) study the thermal behavior of a PCM plasterboard for different cases such as, different percentage of PCM in plaster, different thicknesses and different phase change temperatures, ii) suggests a new technical solution for improvement of thermal behavior of a PCM plasterboard. It consists of perforating the panel with several small holes yielding a greater contact surface area with the surrounding air. This passive enhancement technique is implemented experimentally and numerically to check its performance, iii) study the thermal behavior of a building incorporating Phase Change Materials (PCM) in its envelope (as a way to improve its thermal inertia), through simulations, with Ansys fluent software. It aims too to study the influence of PCM on thermal comfort and energy consumption in the summer and winter period. In this thesis, a comparison is made between a home that has an ordinary envelope and homes which have an envelope containing different types of PCM (different phase change temperatures, different thicknesses...etc.). The results show that using the perforated panels

produces an increase in heat absorption and release. The average increase was 100 % for heat absorption and 175 % for heat release as compared to a standard panel without holes. In addition, using the perforated panels leads to an improvement in thermal comfort as well as a reduction in the energy consumption of heating and air conditioning. The energy savings are estimated to be 20.1 % for heating and 16.2 % for air conditioning between perforated and ordinary MCP plasterboards.

Keywords: Phase change materials, PCM, Heat absorption, Heat release, Ansys Fluent.

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Publications internationales

1. Farid BOUDALI ERREBAI, Salah CHIKH, Lotfi DERRADJI. Experimental and numerical investigation for improving the thermal performance of a microencapsulated phase change material plasterboard. *Energy Conversion and Management* 2018. Volume 174, 309-321. Doi: 10.1016/j.enconman.2018.08.052.

Communications internationales

1. Farid BOUDALI ERREBAI, Salah CHIKH, Lotfi DERRADJI, AMARA Mohamed. Enhancement of heat absorption/release of phase change material plasterboards. The 3rd International Conference on Power, Energy and Mechanical Engineering (ICPEME 2019). February 16-19, 2019 Prague, Czech Republic.

2. BOUDALI ERREBAI Farid, Salah CHIKH, Lotfi DERRADJI, Mohamed AMARA. Experimental determination of thermophysical properties of PCMs plasterboard. 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE 2018). Cesme, Izmir, Turkey on 24 – 27 Avril, 2018.

3. BOUDALI ERREBAI Farid, Salah CHIKH, Lotfi DERRADJI, Mohamed AMARA. Numerical simulation of the influence of melting temperature of PCMs on the winter and summer comfort in a building. The 4th International Conference on Energy and Environment Research (ICEER 2017). July 17-20, 2017, Porto, Portugal.

4. BOUDALI ERREBAI Farid, CHIKH Salah, DERRADJI Lotfi, AMARA Mohamed. Modeling the thermal behavior of panels containing micro-encapsulated PCM in the building. International Conference on Mathematics and Engineering (ICOME 2017), du 10 au 12 Mai, à Istanbul, Turquie.

5. F. BOUDALI ERREBAI, S. CHIKH, L. DERRADJI, M. AMARA. Thermal energy storage using phase change materials in a building for better energy efficiency in summer period. International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE Cappadocia-2015). Nevşehir City, Turkey on May 20 – 23, 2015.

NOMENCLATURES
Caractères latins

A_i	Surface de passage d'air pour un trou (m^2)
A_p	Surface du panneau (m^2)
A_T	Surface totale du passage d'air (m^2)
C_p	Chaleur spécifique massique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
$C_{p,air}$	Chaleur spécifique massique de l'air ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
C_{pm}	Chaleur spécifique massique du matériau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
D	Distance entre deux perforations (m)
E_p	Epaisseur (m)
g_j	Vecteur de force gravitationnelle (-)
h	Enthalpie massique ($J.kg^{-1}$)
H	Enthalpie spécifique ($J.kg^{-1}$)
K	Coefficient de transfert de chaleur ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
L	Longueur du panneau (m)
L_f	Chaleur latente de fusion ($J.kg^{-1}$)
m	Masse (kg)
\dot{m}_{air}	Débit massique d'air ($kg.s^{-1}$)
n_i	Nombre de perforations (-)
P	Pression statique (Pa)
S	Terme source d'énergie ($W.m^{-3}$)
T	Température (K)
t	Temps (s)
$u_{i,j}$	Composants de vitesse (-)
v	Vitesse ($m.s^{-1}$)
V	Volume (m^3)
$x_{i,j}$	Vecteurs de direction (m)

Caractères grecs

λ	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
μ	Viscosité dynamique ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
ρ	Densité (kg.m^{-3})
φ	Densité de flux thermique (W.m^{-2})
Φ	Flux de chaleur (W)

Indices

ab	Absorption
ai	Air intérieur
am	Air moyen
ent	Entrée
exp	Expérimental
ext	extérieur
f	Final
F	Fusion
i	Initial
int	Intérieur
lib	Libération
liq	Liquidus
moy	Moyenne
num	Numérique
S	Solidification
si	Surface interne
sol	Solidus
sor	Sortie
t	Temps actuel
t-1	Temps précédent

ABREVIATIONS

AEF	Analyse par éléments finis
AT	Amplitude de température
CFD	Computational Fluid Dynamics
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DTA	Differential Thermal Analysis
EAMA	Ecart absolu maximum
EAMI	Ecart absolu minimum
EMR	Ecart moyen relatif
MCP	Matériaux à changement de phase
MCPE	Matériaux à changement de phase eutectique
MCPIO	Matériaux à changement de phase inorganique
MCPO	Matériaux à changement de phase organique
PEG	Polyéthylène Glycol
PM	Précision moyenne
PSE	Polystyrène expansé
UDF	User Defined Functions

INTRODUCTION GENERALE

1. Définition du problème

Le secteur du bâtiment est considéré comme un grand consommateur d'énergie. Sa consommation représente 25 % de la consommation totale d'énergie dans le monde, ce qui en fait le troisième consommateur d'énergie après le secteur industriel (32 %) et le secteur des transports (31 %) en 2010, selon les statistiques de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) [1]. Dans un autre ouvrage publié par Waqas et Din [2], il est rapporté que le secteur de la construction représente à lui seul environ 30 à 40 % de l'énergie primaire consommée annuellement dans le monde et représente également un tiers des émissions de gaz à effet de serre. En Algérie, la consommation nationale d'énergie absorbée pour le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) avoisine les 36 % parmi les autres secteurs (industrie, transport et agriculture) [3].

L'utilisation de mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments est devenue nécessaire pour diminuer les besoins en énergie dans le secteur du bâtiment. En effet, la consommation d'énergie est principalement due à l'utilisation du chauffage et de la climatisation pour améliorer le confort thermique à l'intérieur des habitations. Cette énergie générée par les appareils de chauffage ou de climatisation sera perdue ultérieurement soit par transmission à travers l'enveloppe de l'habitation, soit par renouvellement de l'air. Par conséquent, le stockage d'énergie est un moyen pratique pour une gestion efficace et optimale de l'énergie thermique. En effet, le stockage thermique permet d'adapter la production aux besoins énergétiques et de créer les conditions les plus favorables pour cette gestion en établissant une relation continue entre la demande énergétique et l'énergie fournie.

Il existe deux types de systèmes de stockage d'énergie thermique :

- le premier type est le système de stockage actif, caractérisé par l'utilisation des systèmes pour créer un transfert de chaleur par convection forcée dans le matériau de stockage [4].
- le second type est le système de stockage passif qui ne nécessite aucun échangeur de chaleur supplémentaire pour extraire la chaleur du stockage. Ce système utilise la masse thermique

du bâtiment pour stocker de l'énergie dans des enveloppes de bâtiment sous forme de chaleur sensible [5].

La recherche bibliographique montre qu'un nombre important d'études expérimentales et numériques sur l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage de la chaleur latente dans les bâtiments ont été entreprises ces dernières années [6–9]. L'utilisation passive de matériaux à changement de phase (MCP) dans le bâtiment peut aider à améliorer le confort thermique en augmentant l'inertie thermique des murs et à réduire la consommation énergétique dans le bâtiment [10–15]. En effet, les MCP sont capables de stocker (absorber) et de libérer de grandes quantités d'énergie sous forme de chaleur latente dans une plage de température relativement faible après un changement de phase. Le stockage et la libération de chaleur réduisent la consommation d'énergie en stockant l'énergie thermique dans le MCP pendant la journée (lorsque la température de l'air est élevée) et la libèrent pendant la nuit (lorsque la température de l'air est généralement basse) [16,17]. D'autres études ont signalé que les MCP étaient un très bon moyen pour améliorer l'inertie thermique des matériaux dans les bâtiments légers [18].

Pour choisir un bon MCP, ce dernier doit satisfaire aux exigences suivantes : i) la plage de température de fusion doit correspondre à l'application, ii) une chaleur de fusion latente élevée, une conductivité thermique élevée, iii) des propriétés thermiques et chimiques stables et iv) disponible et peu coûteux [19].

La détermination des propriétés thermophysiques du MCP, principalement la conductivité thermique, la chaleur latente, la température de fusion et la densité, constitue une étape importante du processus de gestion thermique en évaluant les performances d'économie d'énergie des composites de MCP (plâtre-MCP, béton-MCP...etc.). Les propriétés thermiques ont une importance majeure dans le comportement thermique des parois incorporant des MCP, puisque les performances de ces parois dépendent essentiellement de leurs propriétés thermophysiques principales. Des études ont été effectuées pour déterminer expérimentalement, numériquement et même analytiquement les propriétés thermophysiques des plaques de plâtre-MCP. Parmi ces travaux, Porfiri et al. [20] qui ont développé un modèle analytique pour prédire la conductivité thermique des composites en utilisant des techniques d'homogénéisation. Le modèle a été validé par une Analyse par Eléments Finis (AEF). Il a été observé que les valeurs de conductivité thermique prédites par le modèle analytique

correspondaient étroitement aux résultats déterminés par AEF. En revanche, cette étude n'a pas été validée expérimentalement.

Plusieurs études ont été entreprises afin d'améliorer l'absorption et la libération de chaleur pour les murs incorporant des MCP. La faible conductivité thermique du MCP, de l'ordre de 0,2 W/m.K en moyenne, est un inconvénient pour stocker et/ou libérer de l'énergie thermique et limite ainsi ses applications [21,22]. Pour surmonter cet inconvénient, il y a deux manières d'améliorer la conductivité thermique : i) la première consiste à ajouter des substances dont la conductivité thermique est supérieure à celle du MCP utilisé et ii) la seconde consiste à encapsuler les matériaux à changement de phase [19]. Parmi les études qui se sont déroulées de la première manière, Şahan et al. [23], dans leur travail pour améliorer les propriétés thermiques d'une paraffine, ont mélangé une nano-magnétite (Fe_3O_4) de manière homogène à la paraffine par une technique de dispersion à deux fractions de masse différentes (10 % et 20 %). Les résultats trouvés ont montré que les conductivités thermiques étaient augmentées respectivement de 48 % et 60 %. Dao et Jeong [24] ont utilisé le graphène pour encapsuler l'acide stéarique (SA). La conductivité thermique maximale, trouvée pour le composite préparé par mélange de solution de graphène, a augmenté de 126 % comparée à celle de l'acide stéarique.

Une autre solution pour améliorer le stockage et/ou la libération de l'énergie thermique consiste à améliorer le transfert de chaleur par convection sur la surface du MCP afin de compléter le cycle de charge-décharge, comme l'ont conclu plusieurs chercheurs. Parmi ces chercheurs, Koo et al. [25] ont constaté, dans leur étude, que le stockage thermique d'une plaque de plâtre-MCP augmentait avec le coefficient de transfert de chaleur convectif. Et dans le même cadre, David et al. [26] ont développé dans leur étude un modèle numérique pour évaluer plusieurs corrélations de transfert de chaleur par convection issues de la littérature. Leur modèle concerne les flux de convection naturels, mixtes et forcés. Ils ont trouvé que le transfert de chaleur par convection a un impact important sur le processus de stockage/libération dans le cas des plaques de plâtre-MCP. Dans le cas de la convection naturelle, les résultats trouvés dépendent fortement de la corrélation utilisée lors de l'étude numérique et les résultats peuvent varier jusqu'à 200 %. Pour les flux de convection mixte et forcée, ils ont trouvé que plus la vitesse est élevée, plus la capacité de stockage est importante. En 2016, les mêmes chercheurs [27] ont étudié l'effet du changement de phase sur le transfert de chaleur par convection naturelle le long du panneau de MCP et le taux de stockage d'énergie par le MCP à différentes vitesses et températures ambiantes. Ils ont constaté que le changement de phase entraînait une augmentation du flux de

chaleur par convection. Ce changement de phase se caractérise par trois étapes consécutives : i) une première étape dynamique, ii) un ralentissement/rétrogradation de la température de la surface de la paroi et iii) une seconde étape dynamique. Dans la même approche, une nouvelle corrélation a été établie par Gracia et al. [28] pour le coefficient de transfert de chaleur convectif entre un flux d'air et une plaque constituée d'un matériau à changement de phase. En effet, les résultats obtenus avec la corrélation montrent de meilleurs accords avec les résultats de la simulation CFD, ce qui a rendu cette corrélation plus adaptée à la simulation des systèmes de stockage de chaleur dans les MCP. Les études de David et al. [26,27] et Gracia et al. [28] ne traitaient que de l'influence du coefficient de transfert de chaleur par convection et du débit d'air sur le comportement thermique d'un panneau incluant un matériau à changement de phase.

2. Objectifs du travail

Le but du présent travail est de contribuer, avec une solution technique, à améliorer le transfert de chaleur d'un panneau de plâtre-MCP sans modifier les caractéristiques physiques du MCP. Cette solution consiste à perforer le panneau de plusieurs petites perforations pour permettre à l'air de les traverser lors de la ventilation de l'habitation. Cette technique permet d'augmenter la surface de transfert de chaleur entre le panneau et l'air, conduisant à une absorption de chaleur par convection et à une libération de chaleur plus importante autour du panneau de plâtre-MCP. Le principe de fonctionnement du panneau de plâtre-MCP perforé pour améliorer l'absorption et la libération de la chaleur est montré sur les Figure 0.1a et Figure 0.1b. Ce principe est similaire au : i) système de mur Trombe [29], avec la différence que la paroi externe est un mur opaque standard au lieu d'être un vitrage et que la paroi intérieure absorbante, dans notre cas, est perforée. ii) parois extérieures ventilées, en effet, l'air circulant dans les différentes parties de l'enveloppe de l'habitation (mur, toiture...etc.) diminue les déperditions thermiques globales par récupération de la chaleur, bien que les déperditions thermiques par transmission augmentent dans ces parois.

L'utilisation des panneaux perforés existe déjà pour d'autres applications, en particulier, dans le domaine acoustique (Figure 0.2), où des panneaux perforés améliorent l'absorption acoustique à basse fréquence. Ils sont utilisés sur les murs et sous les plafonds [30].

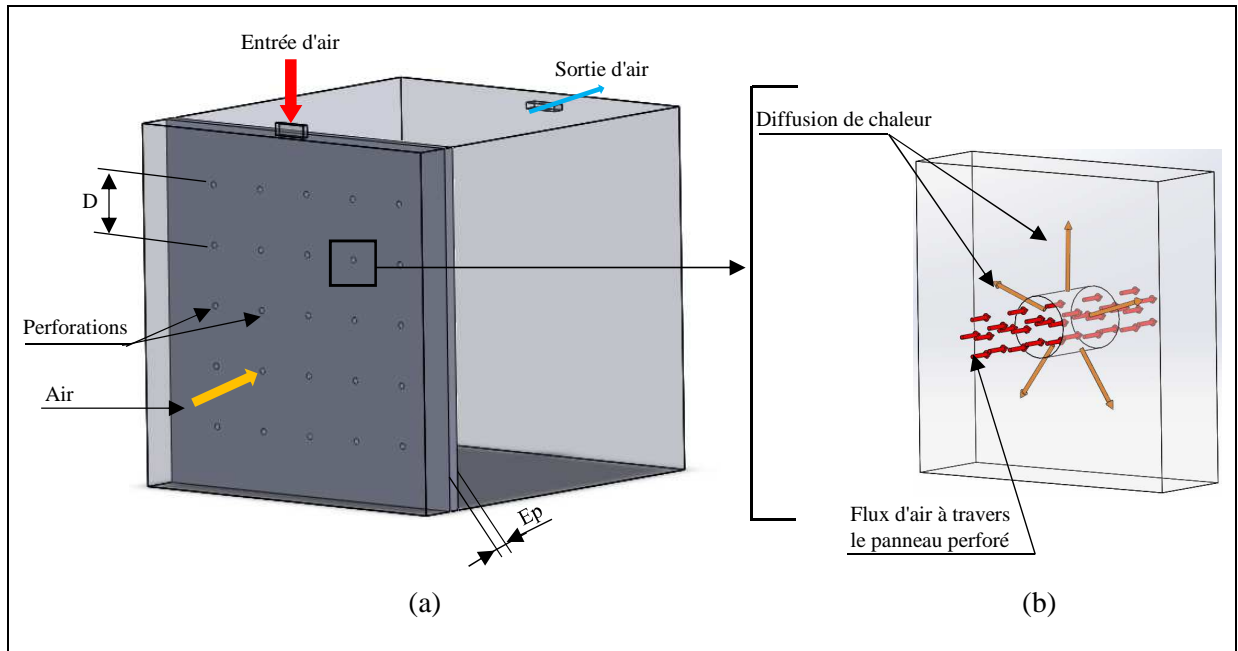


Figure 0.1. Schéma explicatif : (a) principe de fonctionnement d'un panneau de plâtre-MCP perforé dans un local, (b) diffusion de la chaleur à travers une plaque perforée.



Figure 0.2. Différentes formes de plaques de plâtre acoustique.

3. Structure de la thèse

La thèse est divisée en six chapitres :

- Le premier chapitre est consacré d'abord à une analyse bibliographique dans laquelle les différents modes de stockage de l'énergie thermique ont été présentés, le classement des différents matériaux à changement de phase en fonction de leurs propriétés. Dans ce premier chapitre, sont également présentés les phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage de l'énergie thermique, l'incorporation de MCP dans les matériaux de construction et les éléments de construction, les applications des MCP dans le bâtiment, les techniques de mesure

des caractéristiques thermiques, la notion du confort thermique ainsi que les techniques d'amélioration du stockage thermique par chaleur latente.

- Le chapitre II présente la modélisation thermique du phénomène de changement de phase. Dans ce chapitre, différents modèles ont été présentés. Le modèle utilisé dans cette recherche pour modéliser le changement de phase est présenté en détail.

- Le chapitre III présente les méthodes expérimentales de détermination des caractéristiques thermophysiques. Les essais sont décrits en détail et les résultats de ces caractéristiques sont donnés pour les différents types de panneaux étudiés.

- Le chapitre IV décrit la modélisation du comportement thermique des panneaux de plâtre incorporant des MCP. Dans ce chapitre, une validation expérimentale est réalisée à travers la réalisation des cellules de test à échelle réduite. Le logiciel de simulation Ansys Fluent a été utilisé en lui intégrant un modèle sous la fonction UDF (User Defined Functions) qui décrit la relation enthalpie-température pour les différents pourcentages de MCP dans le plâtre.

- Le chapitre V aborde une méthode d'amélioration du comportement thermique des panneaux de plâtre incorporant des MCP, qui consiste à perforer les panneaux de plusieurs petites perforations pour permettre à l'air de les traverser lors de la ventilation. Cette méthode est proposée pour améliorer le transfert de chaleur de ces panneaux. Différents types de panneaux ont été étudiés pour déterminer une relation entre le transfert thermique en fonction de l'épaisseur de la paroi et l'espace entre les perforations.

Le chapitre VI complète la recherche effectuée dans le chapitre V par des modélisations de comportement thermique d'un local d'habitation équipé avec des panneaux de plâtre-MCP. Des simulations ont été effectuées pour déterminer les gains en énergie pour des scénarios d'hiver et d'été.

- Enfin, nous concluons ce travail de recherche en synthétisant nos résultats trouvés et en indiquant quelques directives de recherche future pour la poursuite des travaux dans ce domaine.

CHAPITRE I. GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

La présente partie de ce chapitre vise à fournir des informations de base pour cette recherche et donne une compréhension générale sur l'utilisation des MCP dans le bâtiment pour améliorer le confort thermique d'une part et d'autre part, pour diminuer le recours à l'utilisation excessive des équipements de chauffage et de climatisation, ce qui engendre une réduction la consommation énergétique et améliore l'efficacité énergétique. Ce chapitre se concentre sur : le stockage de la chaleur ; la présentation, la caractérisation, l'encapsulation et le choix des MCP ; les techniques de mesure des caractérisations thermiques ainsi que sur la notion du confort thermique dans les bâtiments.

I.2. Stockage de chaleur dans les bâtiments

Le stockage thermique dans le bâtiment peut se classer principalement en deux techniques qui sont (voir la Figure I.1) :

- Stockage par la chaleur sensible dans lequel la température des matériaux de stockage varie avec la quantité de chaleur stockée. Sur la base des supports de stockage, cette technique de stockage peut aussi être classée en deux catégories : (i) le milieu de stockage est liquide et (ii) le support de stockage est solide.
- Stockage par la chaleur latente dans lequel l'énergie thermique est emmagasinée ou restituée lorsqu'un corps change d'état (transition entre l'état solide et l'état liquide ou transition entre l'état liquide et l'état gazeux).

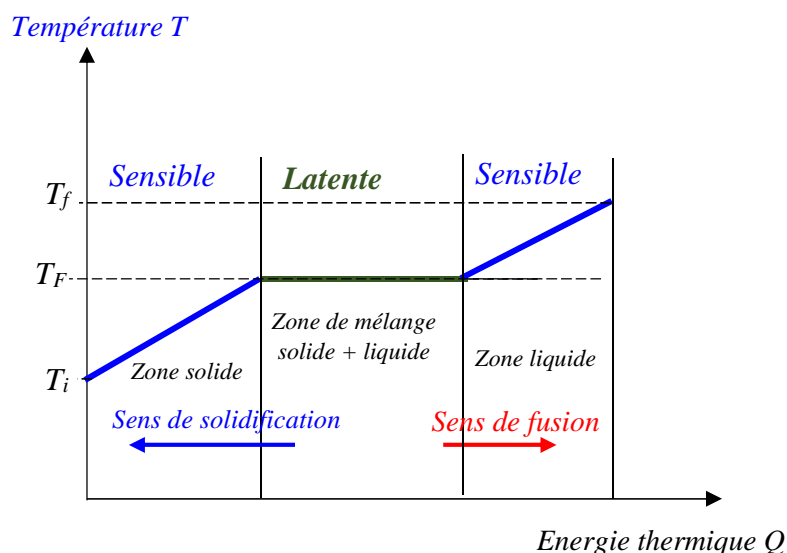


Figure I.1. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement de phase.

I.2.1. Stockage par chaleur sensible

Le système de stockage de l'énergie thermique est basé sur le stockage de chaleur sensible, l'énergie est stockée en modifiant la température des matériaux utilisés (Figure I.1, zone sensible). Les matériaux de stockage de chaleur sensible ne subissent aucun changement dans leur phase (liquide, solide ou gaz) sur la plage de températures considérée. Les principaux avantages de ces systèmes sont leur faible coût et leur longue stabilité de fonctionnement. Si h est l'enthalpie massique du matériau de stockage, la variation de la quantité de chaleur, noté Q , échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial (noté avec l'indice i) à un état final (noté avec l'indice f) peut être exprimée comme suit :

$$Q = m. (h_f - h_i) \quad [J] \quad (I.1)$$

Où :

- m est la masse du matériau [kg],
- h_i est l'enthalpie massique initiale [J/kg],
- h_f est l'enthalpie massique finale [J/kg].

Dans le cas où la capacité thermique massique du matériau (notée C_p) est constante, l'équation (I.1) de la variation de la quantité de chaleur peut s'écrire comme suit :

$$Q = m. C_p. (T_f - T_i) \quad [J] \quad (I.2)$$

Où :

- C_p est la chaleur spécifique massique [J/(kg.K)].
- T_i est la température initiale [K].
- T_f est la température finale [K].

Donc, pour permettre un maximum d'énergie thermique emmagasinée, il est utile d'utiliser des matériaux à forte capacité thermique.

Le classement du type de stockage par chaleur sensible dépend essentiellement du type de matériau de stockage, en particulier de son état physique. On définira ainsi :

- le stockage par les fluides (l'eau, l'huile, les sels fondus). Ils offrent une grande capacité de stockage d'énergie thermique, spécialement l'eau qui est peu coûteuse et facilement disponible. Cependant, ses principaux inconvénients sont : (i) la corrosion, (ii) les fuites, (iii) une isolation coûteuse en raison de la pression de vapeur élevée et (iv) un grand changement de volume.

- Le stockage par les solides (métaux, bois, pierre, béton, briques, etc.). L'utilisation de matériaux solides permet également d'éviter la limitation de l'utilisation de l'eau et d'autres liquides tels que les problèmes de fuite et la pression de vapeur élevée. Dans le bâtiment, les matériaux tels que la pierre, le béton et la brique sont des matériaux généralement utilisés pour le stockage thermique. Ces derniers, ne peuvent ni se congeler ni entrer en ébullition.

Le Tableau I.1 donne les propriétés thermophysiques des matériaux les plus utilisés dans le bâtiment.

Tableau I.1. Propriétés thermophysiques des matériaux de stockage par chaleur sensible à 20 °C [31].

Matériaux	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Capacité thermique volumétrique (10 ⁶ J/m ³ .K)
Argile	1458	879	1,28
Briques	1800	837	1,51
Grés	2200	712	1,57
Bois	700	2390	1,67
Béton	2000	880	1,76
Verre	2710	837	2,27
Aluminium	2710	896	2,43
Fer	7900	452	3,57
Acier	7840	465	3,68
Terre graveleuse	2050	1840	3,77
Magnétite	5177	752	3,89
Eau	999	4182	4,17

I.2.2. Stockage par chaleur latente

Le stockage par chaleur latente se produit lorsque des substances passent d'une phase à une autre à des températures souhaitées telles que solide au liquide, liquide au solide et solide au solide. Les transformations solide-liquide sont les plus couramment utilisées pour les supports de stockage d'énergie thermique. Celles-ci peuvent être expliquées par le fait que les molécules du matériau à l'état liquide ont une plus grande liberté de mouvement, de sorte que les molécules ont une énergie plus élevée.

Selon les propriétés thermophysiques des phases obtenues (solide, liquide, gaz), les valeurs des chaleurs latentes et les niveaux de températures, chaque type de transformation (changement de phase du : solide au liquide, solide au solide ou liquide au gaz) présente plusieurs avantages et des inconvénients. Certains de ces avantages et de ces inconvénients sont résumés dans le Tableau I.2.

Les matériaux de stockages par chaleur latente permettent d’emmagasiner une grande quantité de chaleur dans une masse et un volume plus faibles de matériau, avec seulement une faible variation de température par rapport aux supports de stockage de chaleur sensible. Les matériaux utilisés comme supports de stockage de chaleur latente sont connus sous le nom de Matériaux à Changement de Phase (MCP).

Pour donner des ordres de grandeur sur la capacité de stockage par chaleur latente, l’énergie demandée pour faire fondre 1 kg de glace est équivalente à 80 fois l’énergie demandée pour augmenter la température de 1 kg d’eau de 1 °C soit 4,2 kJ/°C, alors qu’il faut 335 kJ pour compléter sa fusion en eau à T = 0 °C (Figure I.2).

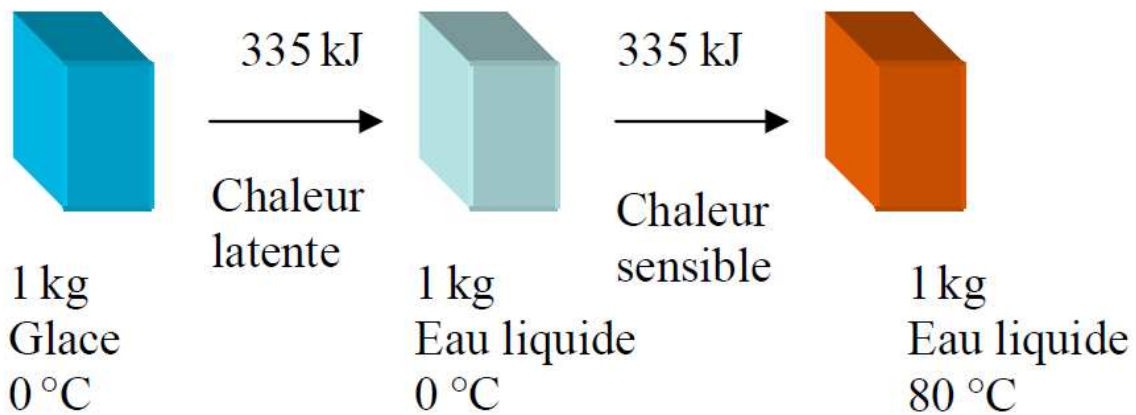


Figure I.2. Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide [32].

La variation de la quantité de chaleur dans le cas d’un changement d’état (fusion) s’écrit comme suit :

$$Q = m. (h_f - h_i) = m. \Delta h_f \quad [J] \quad (I.3)$$

Où Δh_f est l’enthalpie spécifique de fusion.

Dans le cas où le matériau passe d'un état solide à un état complètement liquide, l'équation (I.3) de la variation de la quantité de chaleur s'écrit :

$$Q = m. [C_{p.sol}(T_F - T_i) + L_f + C_{p.liq}(T_f - T_F)] \quad [J] \quad (I.4)$$

Où :

$C_{p.sol}$ (J/(kg·K)) est la chaleur massique du matériau à l'état solide.

$C_{p.liq}$ (J/(kg·K)) est la chaleur massique du matériau à l'état liquide.

T_F (K) est la température de changement de phase solide-liquide (température de fusion).

T_i (K) est la température initiale du matériau.

T_f (K) est la température finale du matériau.

L_f (J/kg) est la chaleur latente de changement de phase.

L'équation (I.4) est valide uniquement lorsque la chaleur spécifique de la phase solide ($C_{p.sol}$) et la chaleur spécifique de la phase liquide ($C_{p.liq}$) sont considérées constantes sur leur plage respective de variation de température.

Tableau I.2. Comparaison des avantages et inconvénients des types de transformation de phase.

Type de transformation	Avantages	Inconvénients
Liquide au Gaz	La valeur de la chaleur latente est grande	Le changement de volume est important
Solide au Solide	Le changement de volume est faible Pas de formation de fluide	La valeur de la chaleur latente est faible
Solide au Liquide	Le changement de volume est faible	La valeur de la chaleur latente est moyenne
Solide au Gaz	Importante chaleur latente	Le changement de volume est important

I.2.3. Matériaux à Changement de Phase (MCP)

I.2.3.1. Définition

Les MCP ont été considérés comme des matériaux de stockage d'énergie thermique. L'application des MCP se trouve généralement dans de nombreux domaines, notamment le refroidissement des produits alimentaires, les parois dans le bâtiment, le système de récupération de chaleur, les centrales solaires, l'emballage, le textile, ...etc. Dans le bâtiment, les matériaux de construction thermiquement massifs permettent de réduire les fluctuations de la température de l'air et de déplacer les charges de refroidissement en périodes creuses (réduire les charges de refroidissement et de chauffage) en réduisant ainsi la consommation énergétique [33]. Les MCP peuvent être tout matériau capable d'absorber, de stocker et de libérer de la chaleur sous forme d'énergie thermique. En effet, l'énergie thermique est stockée dans les MCP au cours d'un processus de fusion alors qu'elle est récupérée au cours du processus de solidification [34]. Les phénomènes de fusion et de solidification des MCP peuvent être expliqués par la modification de la température ambiante dans laquelle les MCP sont placés. Lorsque la température ambiante dépasse le point de fusion des MCP, les liaisons chimiques dans les MCP commencent à se défaire et les MCP absorbent la chaleur dans le processus endothermique (état de fusion). Au fur et à mesure que la température ambiante descend au-dessous du point de fusion des MCP, ces derniers libèrent la chaleur dans le processus exothermique et retrouvent ainsi un état solide. Donc, les propriétés des MCP peuvent être utilisées pour maintenir le confort intérieur, en particulier les bâtiments à faible masse thermique.

I.2.3.2. Classification des MCP

Les MCP peuvent être classés en trois groupes principaux : les matériaux à changement de phase organique, les matériaux à changement de phase inorganique et les matériaux à changement de phase eutectique (voir la Figure I.3). Les matériaux à changement de phase eutectique peuvent être un mélange de composé organique-organique, inorganique-inorganique ou même une combinaison des deux.

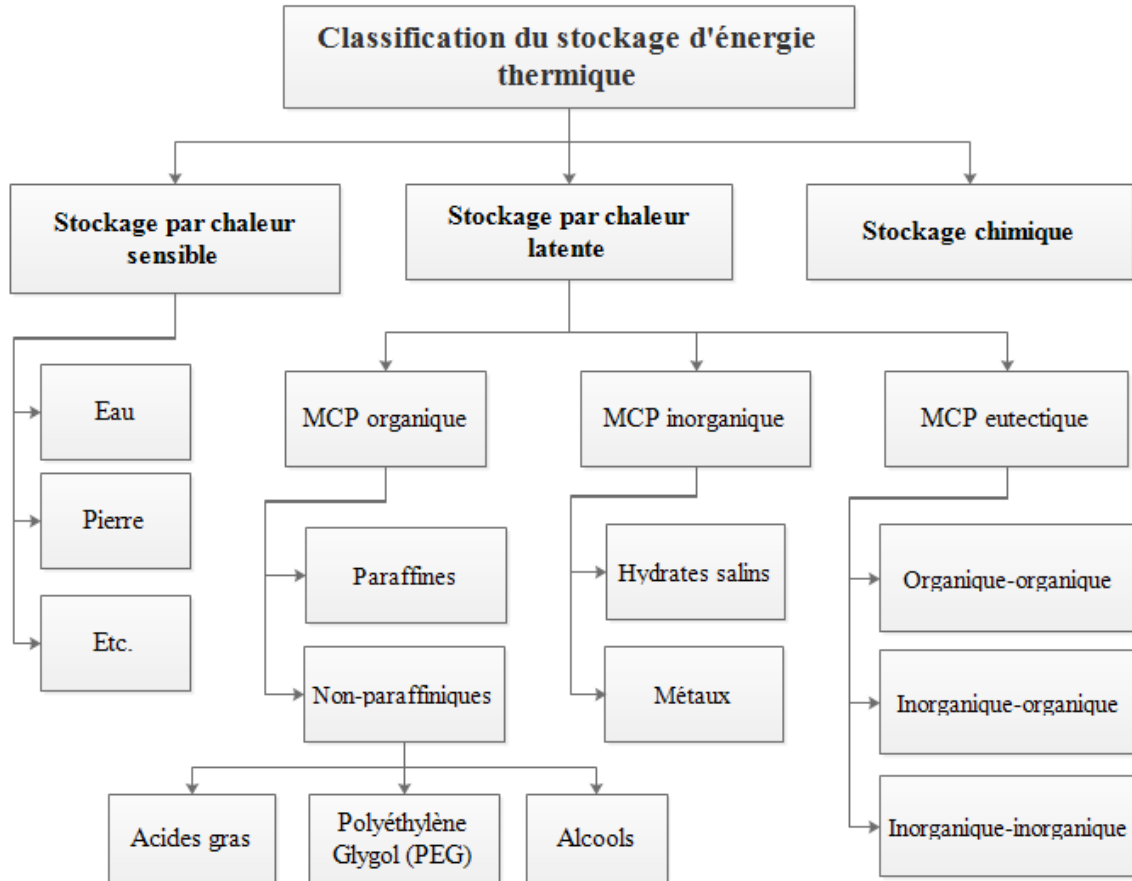


Figure I.3. Classification du stockage d'énergie thermique [35].

I.2.3.2.1. Matériaux à changement de phase organique (MCPO)

Les matériaux à changement de phase organiques sont constitués de paraffines, d'acides gras, de polyéthylène glycol (PEG), d'alcools et de leurs dérivés. Parmi les MCPO, les alcools sont classés comme MCPO solide-solide tandis que les paraffines, les acides gras et les PEG sont classés comme MCPO solide-liquide. L'utilisation des MCPO de manière traditionnelle présente plusieurs faiblesses, à savoir une faible conductivité thermique et une fuite de liquide pendant la fusion, limitant ainsi leur application en tant que matériau de stockage d'énergie thermique.

Les paraffines sont des MCPO solides-liquides typiques qui sont largement utilisés comme matériaux de stockage d'énergie thermique. La paraffine est constituée d'hydrocarbures saturés (n-alcanes) de formule chimique C_nH_{2n+2} , dont les propriétés sont très similaires. Le point de fusion des paraffines augmente avec l'augmentation de leur nombre de carbone. Les propriétés

thermiques (pics de fusion et de solidification) des paraffines dépendent également de leur nombre de carbones.

Les acides gras sont également des MCPO solides-liquides prometteurs. Les propriétés thermiques des acides gras (températures et chaleur latente de fusion et de solidification) augmentent avec l'augmentation de leur nombre de carbones. Les propriétés thermiques des acides gras sont également influencées par leur pureté. La chaleur latente de fusion des acides gras est comparable à celle des paraffines.

Les PEG, également connus sous le nom de poly (oxyéthylènes), sont composés d'une chaîne linéaire de diméthyléther avec des groupes terminaux hydroxyles. Ils ont toujours été considérés comme des MCPO prometteurs en raison de leurs températures de changement de phase adaptées et de leurs capacités de stockage de chaleur latente élevées. Cependant, les PEG présentent une instabilité à l'état de fusion et une faible conductivité thermique, ce qui limite leur application.

Les polyalcools (polyol) et les dérivés d'alcool se révèlent prometteurs comme MCPO. Ils subissent une transition de phase solide-solide. Les propriétés thermiques de ces substances dépendent de la structure et de la symétrie de leur chaîne. Il existe trois types de polyalcool qui peuvent être utilisés comme des MCP, à savoir le pénéthertriitol (PE), la pentaglycérine (PG) et le néopentylglycol (NPG).

I.2.3.2.2. Matériaux à changement de phase inorganique (MCPIO)

Les MCPIO sont constitués d'hydrates de sel et de composés métalliques. L'hydrate de sel, $M.nH_2O$ où M est un composé inorganique, servant de substance de stockage de chaleur en raison de sa densité de stockage d'énergie élevée. Cependant, il présente de nombreux problèmes (voir Tableau I.3) qui peuvent en outre affecter ses propriétés de changement de phase, limitant ainsi son application en tant que matériaux de stockage d'énergie thermique.

Les métaux sont d'autres MCPIO prometteurs. Les métaux diminuent certains problèmes liés aux hydrates de sel, tels que la faible conductivité thermique, la corrosion élevée et les grands changements de volume pendant la fusion. Cependant, les métaux ne conviennent que pour les applications à haute température (> 100 °C). Néanmoins, la plupart des auteurs précédents ne mentionnent pas les températures de congélation des MCPIO.

I.2.3.2.3. Matériaux à changement de phase eutectique (MCPE)

Les MCPE peuvent être définis comme une composition à fusion minimale de deux composants ou plus, capables de fondre et de geler de manière congruente. Pendant le processus de fusion et de solidification, un mélange doit agir comme un seul composant, ce qui signifie qu'il peut geler et fondre simultanément sans séparation. Les MCPE peuvent être facilement réalisés en mélangeant des MCP organiques-organiques, organiques-inorganiques et inorganiques-inorganiques selon un ratio souhaité pour des applications spécifiques. Les MCPE testés les plus courants sont les acides gras et les hydrates de sel.

Tableau I.3. Avantages et inconvénients des MCPO, des MCPIO et des MCPE [35].

Type de MCP	Avantages	Inconvénients
MCPO	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne stabilité thermique - Gel sans trop de surfusion - Capacité à fondre de façon congruente - Pas de ségrégation - Non réactif - Non toxique - Changement de volume faible - Compatible avec les matériaux de construction conventionnels - Faible pression de vapeur - Recyclable - Bas prix 	<ul style="list-style-type: none"> - Fuite de liquide pendant la fusion - Faible conductivité thermique (environ 0,2 W/m.K) - Inflammable
MCPIO	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité de stockage de chaleur latente volumétrique élevée - Ininflammable - Haute conductivité thermique par rapport aux MCPO 	<ul style="list-style-type: none"> - problème de surfusion - Ségrégation - Ne pas fondre de façon congruente - Changements de volume élevés - Corrosif pour le métal - Séparation de phases sur des cycles de changement de phases répétés
MCPE	<ul style="list-style-type: none"> - Plage de fusion très petite - Les propriétés peuvent être personnalisées pour répondre aux exigences spécifiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Manque de données sur propriétés thermophysiques

I.2.3.3. Phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

I.2.3.3.1. Surfusion

Généralement, lorsqu'un MCP à l'état liquide est refroidi, on n'observe pas la solidification au moment où le MCP atteint la température de fusion (Figure I.4). Le MCP peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs de degrés au-dessous de la température de changement de phase. En effet, lorsque la solidification se déclenche, une chaleur sera dégagée et si la masse de liquide est assez importante et que les échanges de chaleur avec le milieu extérieur sont faibles, le début de la solidification engendre une remontée de la température du matériau pour atteindre la température de changement de phase. Ce phénomène provoque une réduction de l'efficacité thermique des matériaux de stockage par chaleur latente par rapport aux matériaux de stockage par chaleur sensible. En effet, la libération de la chaleur (durant la solidification) aura lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur aura lieu. Il y aura donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le processus de chauffage et celle restituée pendant le processus de refroidissement.

La surfusion n'apparaît que pour certains types de MCP tel que les matériaux inorganiques (sels hydratés).

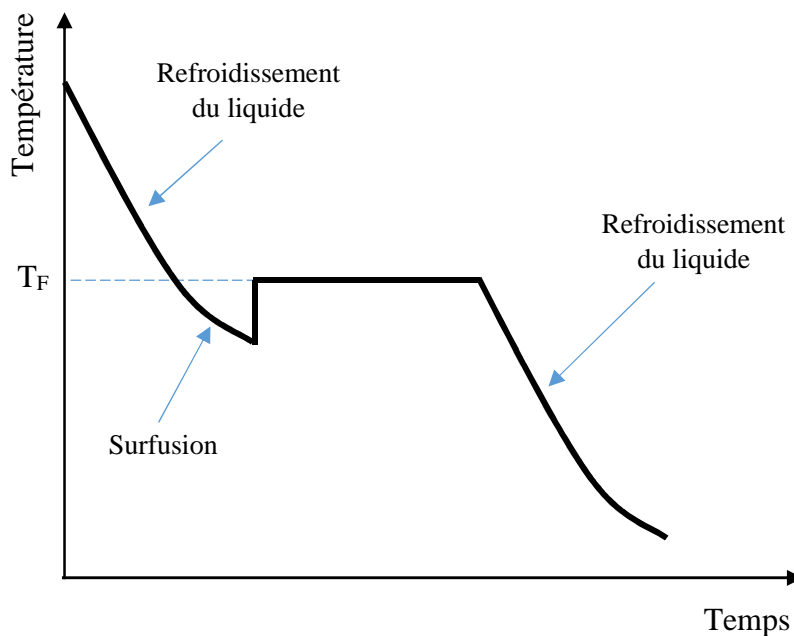


Figure I.4. Solidification présentant une surfusion.

I.2.3.3.2. Surchauffe

Le phénomène de surchauffe d'un MCP est le réchauffement de ce dernier après son changement de phase (réchauffement de la phase liquide après la fusion du MCP, de la phase vapeur après la vaporisation du MCP). Lorsque la surchauffe s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible, alors que quand la surchauffe s'effectue pendant une courte durée, le stockage de chaleur n'est considéré que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le matériau.

I.2.3.3.3. Dilatation

Ce phénomène se produit pendant le changement de phase de solide à liquide. En effet, le matériau change sa densité et donc son volume, ce qui pourrait poser un problème dans quelques applications en particulier lorsque les MCP sont disposés dans un conteneur (encapsulés) qui doit supporter l'augmentation de pression.

I.2.3.4. Choix du MCP

Les MCP ne peuvent pas être tous utilisés comme matériaux de stockage d'énergie thermique, en particulier pour les applications dans le domaine du bâtiment. Un MCP idéal pour le stockage de l'énergie thermique doit posséder des caractéristiques thermodynamiques, cinétiques, chimiques, techniques et économiques souhaitables, comme indiqué ci-dessous et sur la Figure I.5 [35].

I.2.3.4.1. Propriétés thermodynamiques :

- Une température de fusion des MCP sur une plage de température de fonctionnement souhaitée. En effet, dans le domaine du bâtiment, les critères de choix d'un matériau à changement de phase sont basés principalement sur la plage de température de travail des MCP. La plage de température de fonctionnement des MCP doit être conforme au climat local, à l'emplacement dans les bâtiments ou au type de système où les MCP sont utilisés. Les MCP ayant une transition de phase proche de la température de confort humaine (18-30 °C) peuvent être utilisés pour des applications dans le bâtiment. Il existe trois plages de température de MCP proposées pour une utilisation dans des bâtiments : i) jusqu'à 21 °C pour le refroidissement, ii) 22-28 °C pour le confort humain et iii) 29-60 °C pour les applications d'eau chaude [36].
- Une chaleur latente de fusion élevée par unité de volume.

- Une densité élevée pour que les MCP occupent moins de volume.
- Une chaleur spécifique élevée pour permettre également un stockage significatif d'énergie thermique sensible.
- Une conductivité thermique élevée pour faciliter l'absorption et la restitution de la chaleur pour les petites différences de température.
- Comportement à la fusion et à la solidification : le MCP doit fondre et geler complètement pour que la phase solide et la phase liquide se présentent sous une forme homogène. Ceci est très important pour éviter la différence de densité entre le solide et le liquide. Cette différence de densité provoque la ségrégation qui entraîne des changements dans la composition chimique du matériau.

I.2.3.4.2. Propriétés chimiques :

- Cycle complet de fusion et de congélation réversibles.
- Stabilité chimique.
- Aucune dégradation après un grand nombre de cycles de fusion/solidification, de sorte qu'une longue durée de vie est possible.
- Non corrosif pour les matériaux de construction.
- Non toxique, non inflammable et non explosif.

I.2.3.4.3. Propriétés cinétiques :

- Peu ou pas de surfusion.
- Peu ou pas de surchauffe.
- Taux élevé de croissance cristalline.
- Taux de nucléation élevé.

I.2.3.4.4. Considérations économiques :

- Faible coût.
- Disponibilité et abondance à grande échelle.



Figure I.5. Critères de sélection basés sur les caractéristiques de MCP.

I.2.3.5. Incorporation du MCP dans les matériaux et les éléments de construction

Le MCP peut être incorporé dans des matériaux et des éléments de construction par incorporation directe, immersion, encapsulation, stabilisation de la forme et formation de MCP composites stables [37].

I.2.3.5.1. Incorporation directe

C'est la méthode la plus simple, la plus pratique et la plus économique, dans laquelle le MCP est directement mélangé avec les matériaux de construction (gypse, ciment, mortier, béton...etc.) lors de la production. Pour une utilisation réussie du MCP, en particulier dans les matériaux à base de ciment, il ne doit pas : i) affecter la liaison entre la pâte et l'agrégat, ii) affecter les propriétés mécaniques et iii) affecter les propriétés de durabilité.

I.2.3.5.2. Immersion

Dans la technique d'immersion, les éléments de construction (blocs de béton et de briques, panneaux muraux...etc.) sont plongés dans le MCP à son état liquide. Ce MCP sera absorbé par les éléments de construction par capillarité [38]. Il est rapporté qu'il peut se présenter des fuites de MCP [39], en particulier après un grand nombre de cycles thermiques. En outre, cela peut affecter les propriétés mécaniques et la durabilité des éléments de construction.

Il convient de mentionner ici que les techniques directes et les techniques d'immersion incorporent le MCP directement dans les matériaux de construction classiques.

I.2.3.5.3. Encapsulation des MCP

Dans cette technique, le MCP doit être encapsulé avant d'être utilisé dans les éléments de construction. D'après Regin et al. [40], l'encapsulation de MCP devrait : i) satisfaire aux

exigences de résistance, de durabilité, de stabilité et de fiabilité thermiques, ii) protéger le MCP, en agissant comme une barrière, des interactions destructrices avec le milieu environnant, iii) avoir une surface suffisante pour un transfert de chaleur efficace et iv) être structurellement stable.

En général, deux méthodes d'encapsulation de MCP sont rapportées : la macroencapsulation et la microencapsulation [41].

a) Macroencapsulation des MCP

Dans cette technique, une quantité importante de MCP (jusqu'à plusieurs litres) peut être emballée dans un conteneur tel que des tubes, des sphères et des panneaux pour une utilisation ultérieure dans des éléments de construction (Figure I.6).

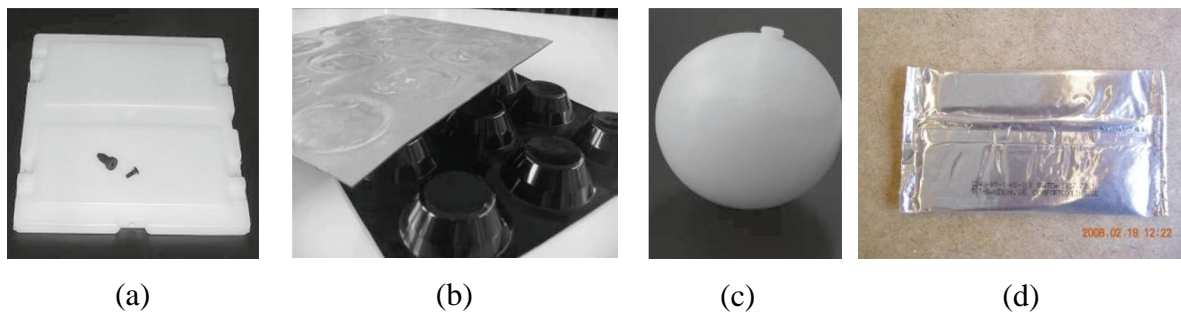


Figure I.6. Macroencapsulation dans : (a) un récipient plat, (b) une capsule, (c) des balles et (d) des sacs [42].

b) Microencapsulation des MCP

Dans la microencapsulation, de petites particules de MCP allant de 1 μm à 1000 μm sont enfermées dans une mince coque solide, généralement constituée de polymères naturels et synthétiques. Il existe plusieurs procédés de microencapsulation physiques et chimiques. Les procédés physiques utilisés dans la microencapsulation sont le séchage par pulvérisation, les procédés à lit centrifuge et à lit fluidisé ou les procédés de revêtement, par exemple dans des cylindres de roulement. Les procédés chimiques utilisés sont des encapsulations in situ telles que la coacervation complexe avec de la gélatine, la polycondensation interfaciale pour obtenir une enveloppe de polyamide ou de polyuréthane, la précipitation due à la polycondensation de résines amino et autres. Les matériaux à changement de phase ayant des températures de changement de phase comprises entre 10 et 80 °C peuvent être élaborés avec ces techniques (Figure I.7).

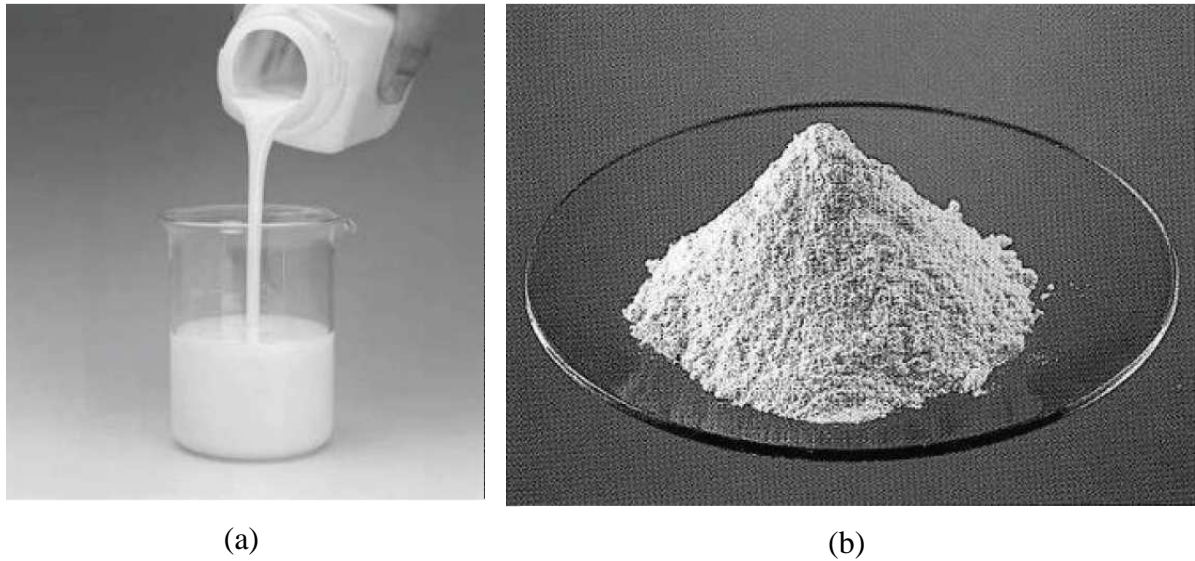


Figure I.7. Paraffine microencapsulée produite par BASF, à gauche en dispersion fluide et à droite en poudre sèche [42].

La microencapsulation et la macroencapsulation présentent des avantages et des inconvénients donnés dans le Tableau I.4 ci-après.

Tableau I.4. Avantages et inconvénients de la microencapsulation et la macroencapsulation [37].

	Avantages	Inconvénients
Microencapsulation	<ul style="list-style-type: none"> - Empêche la fuite du MCP pendant la transition de phase en construisant une barrière, augmentant ainsi son incorporation dans divers matériaux de construction. - Fournit un transfert de chaleur élevé à travers sa plus grande surface par unité de volume. - Capable de résister au changement de volume pendant la transition de phase. - Améliore la stabilité chimique. 	<ul style="list-style-type: none"> - La rigidité de la capsule empêche la convection naturelle et diminue donc le taux de transfert de chaleur. -La microencapsulation peut affecter les propriétés mécaniques des matériaux de construction. - Les coûts d'investissement sur la microencapsulation sont élevés.

Macroencapsulation	<ul style="list-style-type: none"> - Plus facile à manipuler. - Peut être conçue pour répondre à des applications spécifiques. - Améliore la compatibilité de MCP avec l'environnement en agissant comme une barrière. Cependant, le conteneur doit être compatible avec l'environnement. - Réduit les changements de volume externes de la capsule, ce qui est important pour les applications dans le bâtiment. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise conductivité thermique. - Doit être protégée contre la destruction (perçage de trous ou de clous dans les murs) lorsque le bâtiment est en service. - Plus de travail sur le chantier pour l'intégration dans la structure du bâtiment.
--------------------	---	--

I.2.3.6. Exemple des MCP commerciaux

Certains MCP commerciaux courants sont présentés dans le Tableau I.5. Il s'agit des paraffines organiques et des hydrates de sel. Ces produits commercialisés parmi lesquels on cite les produits des sociétés Rubitherm, PCM products et BASF. Ces industriels du domaine de l'industrie chimique ont chacun commercialisé leurs versions des MCP (Figure I.8).

Tableau I.5. Liste des MCP commerciaux courants [43].

Nom du MCP	Type de MCP	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)	Entreprise de fabrication
SP22 A4	Mélanges	24	165	Rubitherm GmbH
SP25 A8	Mélanges	25	180	Rubitherm GmbH
SP22 A17	Mélanges	22	180	Rubitherm GmbH
RT27	Paraffine	27	184	Rubitherm GmbH
RT21	Paraffine	22	134	Rubitherm GmbH
A26	Paraffine	26	150	PCM products Ltd
A24	Paraffine	24	145	PCM products Ltd
A22	Paraffine	22	145	PCM products Ltd
S21	Sel hydraté	22	170	PCM products Ltd
S23	Sel hydraté	23	175	PCM products Ltd
Micronal PCM	Paraffine	21, 23, 26	90-110	BASF Ltd

Les MCP commerciaux sont de plus en plus utilisés dans le développement de systèmes de stockage thermique en raison de la diversité des MCP commerciaux disponibles dans la gamme de confort thermique des bâtiments. Les MCP paraffiniques sont préférables aux hydrates ou aux mélanges de sels, car ils ne réagissent pas avec le matériau d'encapsulation.

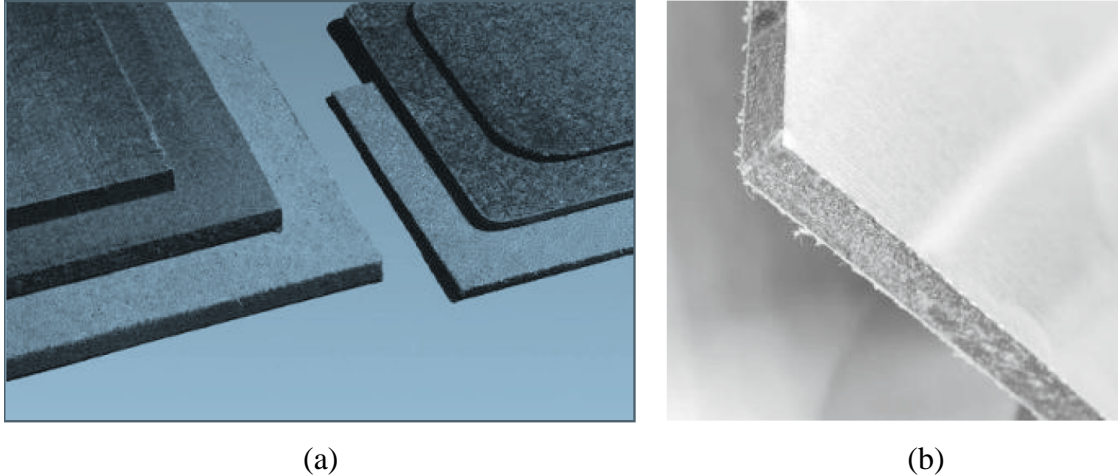


Figure I.8. Composites sous forme de tableaux ou de plaques : (a) panneau de fibres FB (image : Rubitherm Technologies GmbH) et (b) panneaux DuPont, Energain [42].

I.3. Applications des matériaux de stockage d'énergie thermique

L'enveloppe du bâtiment peut être définie comme l'élément qui sépare l'environnement intérieur de l'environnement extérieur. C'est un élément important qui affecte la qualité et contrôle les conditions intérieures indépendamment des conditions extérieures transitoires. Divers composants, tels que les murs, les fenêtres, les toits et les planchers bas, composent l'enveloppe d'un bâtiment [44]. Le MCP peut être incorporé dans pratiquement tous les éléments de l'enveloppe du bâtiment. Néanmoins, l'intégration la plus courante de MCP dans l'enveloppe concerne les murs, les sols, les plafonds, les toits et les fenêtres grâce à une installation facile et à un transfert de chaleur plus efficace [45].

Des études récentes (au cours des dernières années) portant sur l'incorporation de MCP dans l'enveloppe du bâtiment sont passées en revue et présentées comme suit :

- Panneaux muraux incorporant des MCP.
- Murs incorporant des MCP.
- Planchers et plafonds incorporant des MCP.
- Mur Trombe avec l'incorporation des MCP.

I.3.1. Panneaux muraux incorporant des MCP

Les panneaux muraux avec MCP sont considérés comme un remplacement efficace et moins coûteux de la masse thermique standard pour stocker la chaleur dans les bâtiments. Dans ces panneaux, le MCP est intégré dans des panneaux de gypse, de plâtre ou d'autres éléments de construction. Plusieurs auteurs ont étudié le comportement thermique de ces panneaux incorporant des MCP (Figure I.9). Parmi ces auteurs, Scalat et al. [46] ont considéré que l'utilisation de panneaux de MCP pouvait maintenir la température de la pièce dans la zone de confort humain pendant de longues périodes après l'arrêt du système de chauffage ou de refroidissement. Athienitis et al. [47] ont utilisé un panneau de gypse imprégné d'un MCP dans une salle d'essai extérieure pour étudier les performances thermiques du panneau de gypse-MCP utilisé dans un bâtiment solaire passif. Les résultats ont montré que la température ambiante peut être réduite au maximum de 4 °C pendant la journée. Neepser [48] a imprégné les cires d'acides gras et de paraffine dans des plaques de plâtre et examiné le comportement thermique sous la variation diurne de la température ambiante (le rayonnement absorbé n'a pas été pris en compte) avec un MCP sur trois types de parois. La première paroi est une cloison située à l'intérieur du bâtiment et possédant une grande conductivité thermique et une importante capacité de stockage par chaleur latente. La deuxième paroi est une cloison soumise à une variation de température intérieure réelle. La troisième paroi est un mur extérieur soumis à une variation de température réelle. Les résultats trouvés pour cette étude ont montré que lorsque la température de fusion est égale à la température moyenne de la paroi, l'énergie stockée est maximale. Ils ont conclu que la valeur optimale de la température de fusion dépend essentiellement de la température intérieure moyenne. Pour les murs extérieurs, la valeur optimale de la température de fusion dépend de la température extérieure et de la résistance thermique du mur. Ils ont conclu aussi que l'utilisation de MCP dans l'enveloppe du bâtiment n'altère pas le flux transmis qui traverse cette enveloppe.

Afin d'évaluer la capacité des MCP à stabiliser la température de l'environnement intérieur lorsqu'il y a des changements de température externes et des radiations solaires, Kuznik et al. [49] ont conçu une salle d'essais expérimentale nommée MINIBAT utilisant une batterie de 12 projecteurs pour simuler un ensoleillement artificiel. Il en résulte que le panneau de MCP peut réduire les fluctuations de température de l'air dans la pièce et améliorer la convection naturelle, évitant ainsi les stratifications thermiques inconfortables. Kuznik et Virgone [50] ont également testé deux cellules de test identiques sous deux types d'évolutions externes de la température, à savoir les étapes de chauffage et de refroidissement avec

différentes pentes et pour une évolution sinusoïdale de la température sur une période de 24 h. Ils ont constaté qu'il y avait un décalage entre les évolutions de la température intérieure et extérieure et que l'amplitude de la température intérieure dans la cellule était réduite.

Lv et al. [51] ont construit deux pièces, la première pièce était ordinaire et la seconde était une pièce incorporant des panneaux de plâtre-MCP. Ils ont constaté que les panneaux muraux de plâtre-MCP pouvaient atténuer les fluctuations de la température de l'air intérieur, réduire le transfert de chaleur vers l'air extérieur et conserver la chaleur.

Une autre étude a été réalisée par Kuznik et al. [52] dans laquelle ils ont rénové un bâtiment tertiaire avec des panneaux muraux de MCP de la société Dupont de Nemours. Ils ont alors constaté, lors de mesures s'étalant sur une année, que ces panneaux étaient vraiment efficaces quand la température extérieure variait autour de la température de fusion.

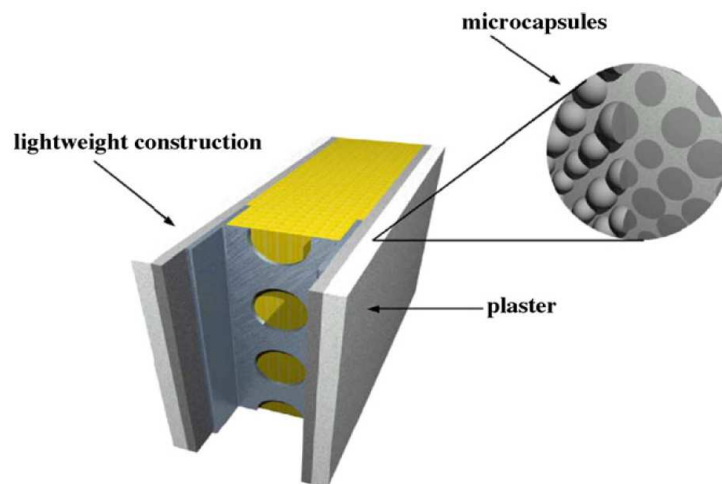


Figure I.9. Vue schématique d'un mur léger. Les microcapsules de MCP sont intégrées dans le plâtre intérieur [41].

I.3.2. Murs incorporant des MCP

Une autre méthode pour appliquer les MCP dans les structures de bâtiments consiste à les incorporer dans une matrice de béton ou des ciments à cellules ouvertes ou même dans les briques. Parmi les travaux qui ont utilisé cette méthode, Hawes et al. [38] qui ont rapporté que les techniques de modification du béton et d'incorporation de MCP affectaient fortement la capacité de stockage thermique après avoir étudié les performances thermiques des MCP dans différents types de blocs de béton. Toutefois, l'application de MCP a considérablement réduit la résistance du béton [53]. Cabeza et al. [54] ont étudié le comportement thermique d'un béton

innovant avec MCP, afin de développer un produit qui n'affecterait pas la résistance mécanique du mur en béton. Ils ont installé deux cellules en béton de taille réelle pour démontrer la possibilité d'utiliser du MCP microencapsulé dans le béton. Ils ont constaté que le béton atteignait une résistance à la compression supérieure à 25 MPa et une résistance à la traction supérieure à 6 MPa.

I.3.3. Planchers et plafonds incorporant des MCP

Plusieurs recherches sur les planchers et les plafonds qui incorporent des MCP ont été réalisées. Xu et al. [55] ont utilisé des MCP dans le plancher d'un bâtiment solaire passif et ont développé un modèle pour analyser l'influence de divers facteurs sur la performance thermique, comme l'épaisseur de la couche de MCP, la température de fusion, la chaleur latente et la conductivité thermique du MCP. Ils ont indiqué que la chaleur latente et la conductivité thermique du MCP devraient être respectivement supérieures à 120 kJ/kg et 0,5 W/m.K et que l'épaisseur de la couche de MCP ne devrait pas dépasser 20 mm. Pasupathy et Velraj [56] ont étudié l'effet de l'utilisation d'un panneau de MCP sur le toit d'un bâtiment du point de vue de son emplacement et de son épaisseur. Dans leur étude, ils ont recommandé qu'un MCP à double couche soit incorporé dans le toit afin de réduire les variations de température de l'air intérieur et de mieux s'adapter à toutes les saisons.

I.3.4. Mur Trombe avec l'incorporation des MCP

Le chauffage solaire passif des bâtiments continue de susciter un grand intérêt dans les applications des énergies renouvelables [57]. Plusieurs auteurs ont proposé l'inclusion des MCP dans les systèmes de murs solaires pour remplacer les gros volumes de maçonnerie, et de nombreux essais expérimentaux et théoriques ont été effectués pour étudier la fiabilité des MCP dans ce type de système [29]. L'introduction des MCP dans les systèmes de mur Trombe pourrait contribuer au développement de systèmes légers, amovibles et rotatifs parfaitement adaptés à la catégorie des bâtiments légers. Dans cette approche, l'énorme masse thermique sensible d'un mur Trombe de masse traditionnelle et la grande quantité de matériau pourraient être remplacées par les charges thermiques latentes des MCP et donc, une quantité moindre de matériau sera nécessaire (Figure I.10). Moghiman et al. [58] ont remplacé la conception classique du mur Trombe par un ensemble de segments de paroi rotatifs pouvant tourner autour de leurs axes verticaux. Avec cette configuration, les segments de paroi tournants sont un bon absorbeur pendant la journée et un bon radiateur pendant les nuits d'hiver. Les résultats ont montré que, par rapport aux murs solaires classiques, les murs de stockage rotatifs peuvent être plus efficaces, même dans les climats froids.

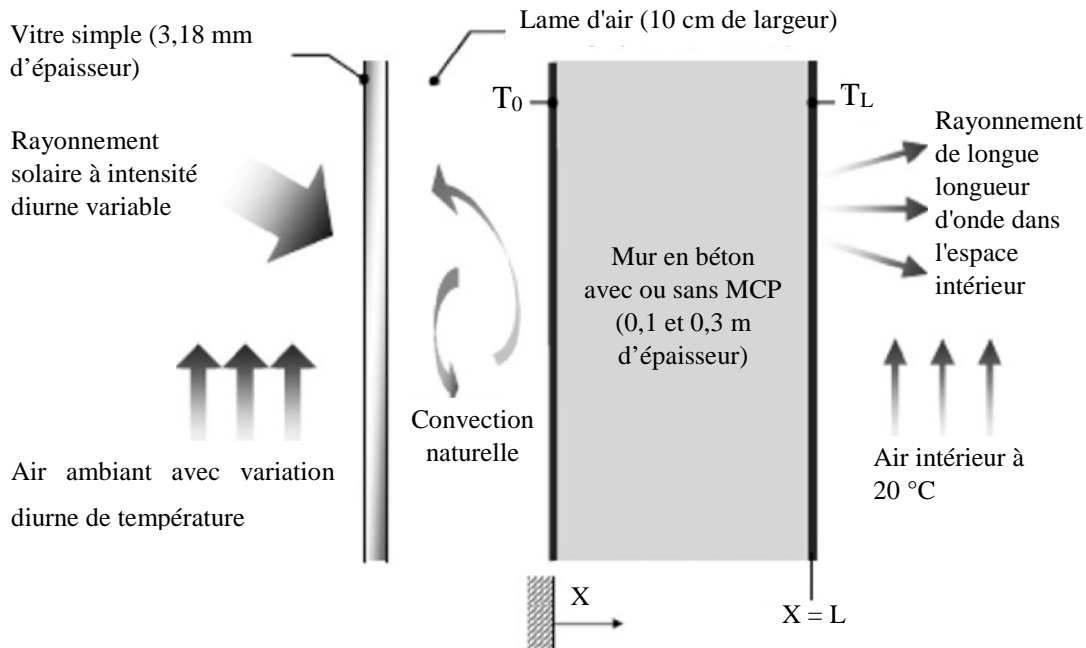


Figure I.10. Configuration du modèle de mur Trombe [41].

I.4. Techniques de mesure des caractérisations thermiques

La performance d'un système de stockage d'énergie thermique est directement associée aux propriétés de changement de phase du MCP. Ces propriétés sont fournies par les fabricants et peuvent être incorrectes, douteuses et sur-optimisées [59]. Par conséquent, il est nécessaire d'effectuer des mesures pour obtenir les propriétés de changement de phase correctes du MCP. Donc, les propriétés de performance thermique des MCP incorporés dans les matériaux de construction (composite MCP) doivent être testées avant les utiliser dans l'application réelle afin d'évaluer l'adéquation, les gains réels du système constructif, les propriétés thermiques dynamiques des composites et leur efficacité dans la diminution des fluctuations de température internes dans les bâtiments. Il existe plusieurs techniques de mesure pour la détermination de la chaleur latente, la température de fusion et la chaleur spécifique telles que la calorimétrie à balayage différentiel, l'analyse thermique différentielle et la méthode de T-history.

La connaissance correcte de la conductivité thermique est le deuxième paramètre thermique clé qui doit être connu pour concevoir correctement des systèmes de stockage de chaleur latente ou pour simuler correctement des modèles dynamiques avec des MCP. Dans la littérature, les méthodes du fil chaud et de la plaque chaude gardée sont le plus souvent utilisées pour déterminer expérimentalement la conductivité thermique des matériaux.

I.4.1. Calorimétrie à balayage différentiel (DSC)

Durant l'essai de DSC, l'échantillon et la référence (avec des propriétés thermiques connues) sont maintenus à la même température pendant l'essai, en mesurant la différence de chaleur ajoutée entre l'échantillon et la référence, de nombreuses propriétés thermiques de l'échantillon peuvent être obtenues, telles que la chaleur de fusion, la capacité thermique et la température de fusion/solidification. La méthode DSC peut également être utilisée pour analyser les propriétés thermiques des panneaux MCP. Grâce à l'essai DSC, non seulement la température de fusion et la chaleur de fusion du MCP peuvent être obtenues, mais aussi la distribution de MCP dans les panneaux muraux peut être aussi testée, tout comme la capacité de stockage thermique des panneaux de MCP. Malheureusement, il est très difficile d'étudier le comportement au changement de phase des MCP après incorporation avec les matériaux de construction en utilisant la méthode DSC, car elle ne convient que pour des échantillons de petite taille et relativement homogènes [60]. La capacité calorifique équivalente calculée à l'aide des courbes DSC est clairement influencée par la masse de l'échantillon et la vitesse de chauffage (Figure I.11) [61,62]. Mais d'un point de vue thermodynamique, l'enthalpie, qui est une variable intensive, ne peut pas dépendre de la masse de l'échantillon ou de la vitesse de chauffage.

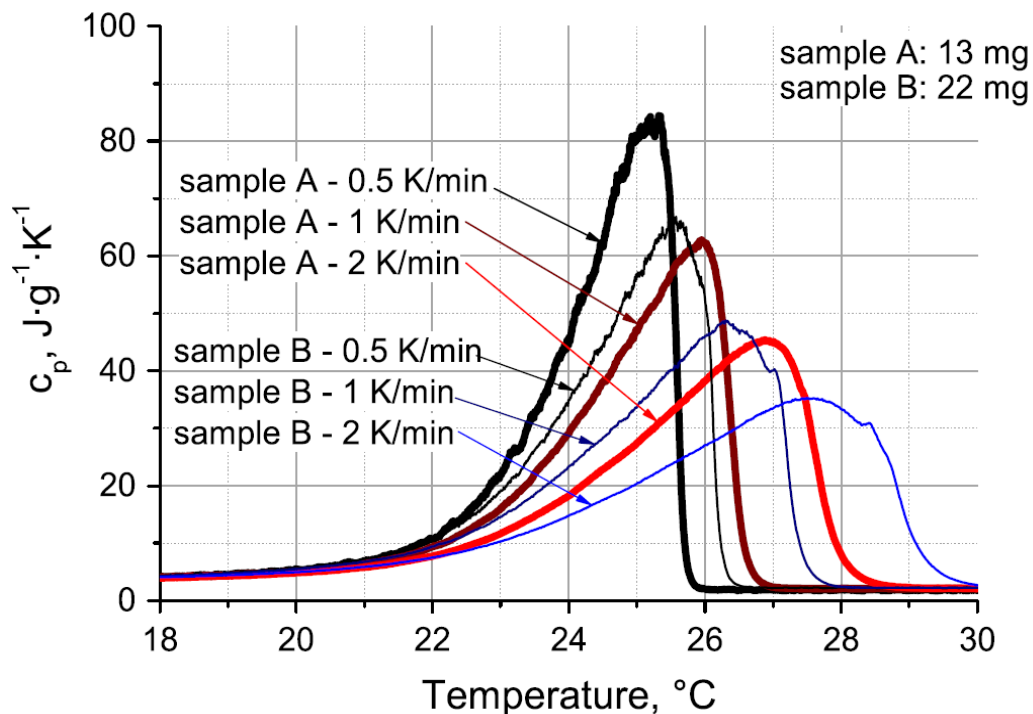


Figure I.11. Courbes de réponse des températures de balayage en fonction de la masse de l'échantillon et de la vitesse de chauffage [61,62].

I.4.2. Analyse thermique différentielle (DTA)

Dans le test d'analyse thermique différentielle (ATD) ou en anglais (DTA), la chaleur appliquée à l'échantillon et à la référence reste la même (alors que dans le test DSC, c'était plutôt la température). Le changement de phase et les autres propriétés thermiques peuvent ensuite être testés à travers la différence de température entre l'échantillon et la référence.

I.4.3. Méthode T-history

Pour tester de grands échantillons, Zhang et Jiang [63] ont proposé la méthode T-history qui permet la détermination simultanée des propriétés thermophysiques de nombreux MCP. Les propriétés thermophysiques sont extraites des courbes température-temps du MCP et comparées avec celles de courbe température-temps du matériau de référence (généralement de l'eau pure) [64]. Avec cette méthode, les auteurs ont mesuré les propriétés thermophysiques de nombreux MCP et ont constaté que les résultats sont en accord avec ceux rapportés dans la littérature. Cette méthode a été améliorée par Marín et al., Peck et al. et Hong et al. [65–67].

I.4.4. Méthode du fil chaud

Cette méthode utilise un fil de constantan connecté avec deux connecteurs électriques. Le thermocouple est placé entre deux échantillons d'un matériau donné (Figure I.12). La méthode du fil chaud permet de mesurer la conductivité thermique en utilisant une équation particulière de conduction thermique valable pour une source de chaleur linéaire dans un milieu homogène et isotrope à température initiale uniforme. Cette méthode de mesure est dynamique et est basée sur le contrôle de l'élévation de la température en un point donné et une distance spécifiée. Comme proposé par Carslaw et Jaeger [68], la méthode est établie pour une source de chaleur infiniment petite et une masse infinie. Selon cette théorie, la chaleur délivrée par le courant électrique diffuse à travers le système selon des directions orthogonales par rapport au fil chaud. La méthode du fil chaud est très simple à réaliser avec un équipement spécifique. Cependant, selon les normes, cette méthode est recommandée pour mesurer les conductivités thermiques inférieures à 2 W/m.K pour des matériaux isotropes. La méthode du fil chaud a été utilisée, par exemple, pour étudier la conductivité thermique de MCP purs et MCP avec différentes quantités de fibres de graphite [22,69].

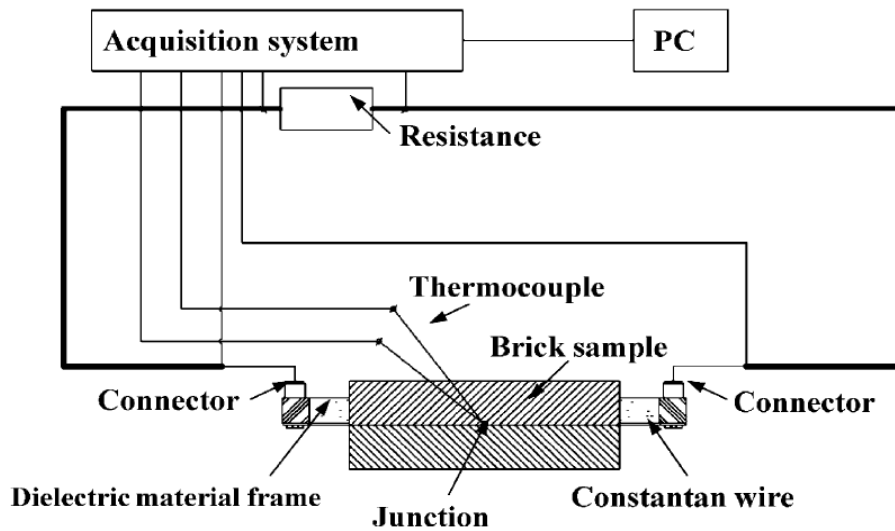


Figure I.12. Principe de mesure de conductivité thermique utilisant la méthode du fil chaud [69].

I.4.5. Méthode de la plaque chaude gardée

La conductivité thermique des matériaux MCP solides composites peut être mesurée selon les procédures standardisées à l'état stationnaire. Les appareils de mesure par la plaque chaude gardée ont pour rôle d'établir à travers des éprouvettes en forme de plaque à faces planes et parallèles, une densité de flux thermique unidirectionnelle, constante et uniforme. Cet appareil est doté généralement de deux fluxmètres (l'un placé sur la source chaude, l'autre sur la source froide) pour mesurer la densité de flux thermique à travers l'éprouvette. Par exemple, la conductivité thermique des matériaux en gypse-MCP et en béton-MCP peut être déterminée grâce à cette méthode. Dans le travail réalisé par Pomianowski et al. [70], une étude expérimentale utilisant un appareil à plaque chauffante pour déterminer la conductivité thermique du composite de béton-MCP incorporant jusqu'à 6 % en poids de paraffine microencapsulée. Les mesures ont été effectuées pour les températures inférieures, à l'intérieur et au-dessus de la plage de température de fusion du MCP utilisé. Ils ont conclu que la conductivité thermique était presque la même, peu importe si le MCP était à l'état liquide ou solide. La Figure I.13 montre le schéma de l'installation de la plaque chaude gardée.

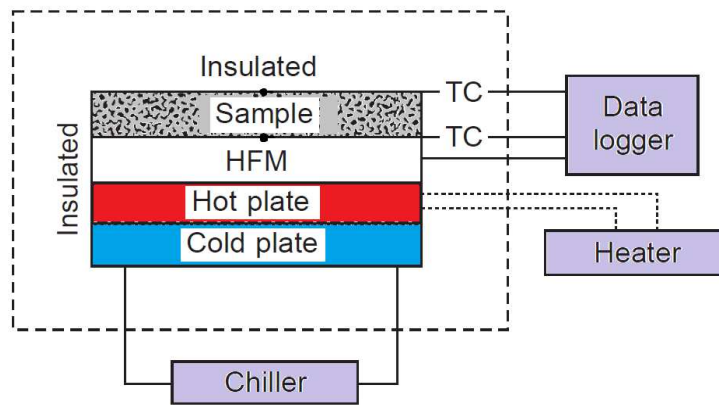


Figure I.13. Le schéma de l'installation de la plaque chaude gardée [71].

I.5. Confort thermique

I.5.1. Obtention du confort thermique par l'utilisation de MCP

Le confort thermique peut être défini par la température de fonctionnement qui varie selon la période de l'année. Il peut être obtenu par des moyens de stockage thermique actifs ou passifs. Les moyens de stockages thermiques passifs sont liés essentiellement au stockage dans la structure des bâtiments (à travers les matériaux de façon sensible ou latente par l'utilisation des MCP) alors que les moyens de stockages thermiques actifs concernent le transfert de l'énergie thermique stockée par l'utilisation des équipements.

Dans les applications de bâtiment, les MCP avec une température de changement de phase (entre 18 et 30 °C) sont préférés pour répondre au besoin de confort thermique. Certains MCP (les MCP organiques, les hydrates de sel, les eutectiques ainsi que les MCP commerciaux) sont énumérés dans le Tableau I.5 ci-dessus.

I.5.2. Cadre réglementaire sur le confort thermique

La société américaine des ingénieurs du chauffage, de la réfrigération et de la climatisation (ASHRAE) a répertorié les températures et les débits d'air proposés dans différents types de bâtiments et de conditions environnementales. Selon ASHRAE Standard 55 de 2017, la température ambiante (de confort) recommandée est de 23,5–27 °C en période d'été et de 20–24 °C en période d'hiver pour une humidité relative comprise entre 30 et 70 % [72]. En Algérie, la réglementation thermique préconise à travers le Document Technique Réglementaire DTR C3.2/4 que la température de confort de base pour des locaux d'habitation soit de 21 °C en hiver alors qu'en été, la température de confort de base est et de 24 °C pour un confort amélioré et de 27 °C pour confort normal [73].

I.6. Amélioration du stockage thermique par chaleur latente

L'équation de transfert de chaleur de base pour un processus de transfert de chaleur arbitraire peut être exprimée comme suit :

$$\Phi = K \cdot A \cdot \Delta T \quad [\text{W}] \quad (\text{I.5})$$

Où :

- Φ est le flux de chaleur [W],
- K est le coefficient de transfert de chaleur [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],
- A est la surface de transfert de chaleur [m^2],
- ΔT est la différence de température de transfert de chaleur [K].

Selon ladite équation, on peut trouver trois paramètres clés (K , A et ΔT) qui ont une corrélation directe avec le taux de transfert de chaleur.

Bien que des recherches approfondies ont été réalisées sur l'amélioration des performances du système de stockage de chaleur latente, les méthodes d'amélioration des performances peuvent être classées en trois catégories, comme le montre la Figure I.14 : amélioration de la conductivité thermique des MCP, extension de la surface de transfert thermique et uniformité du processus de transfert de chaleur.

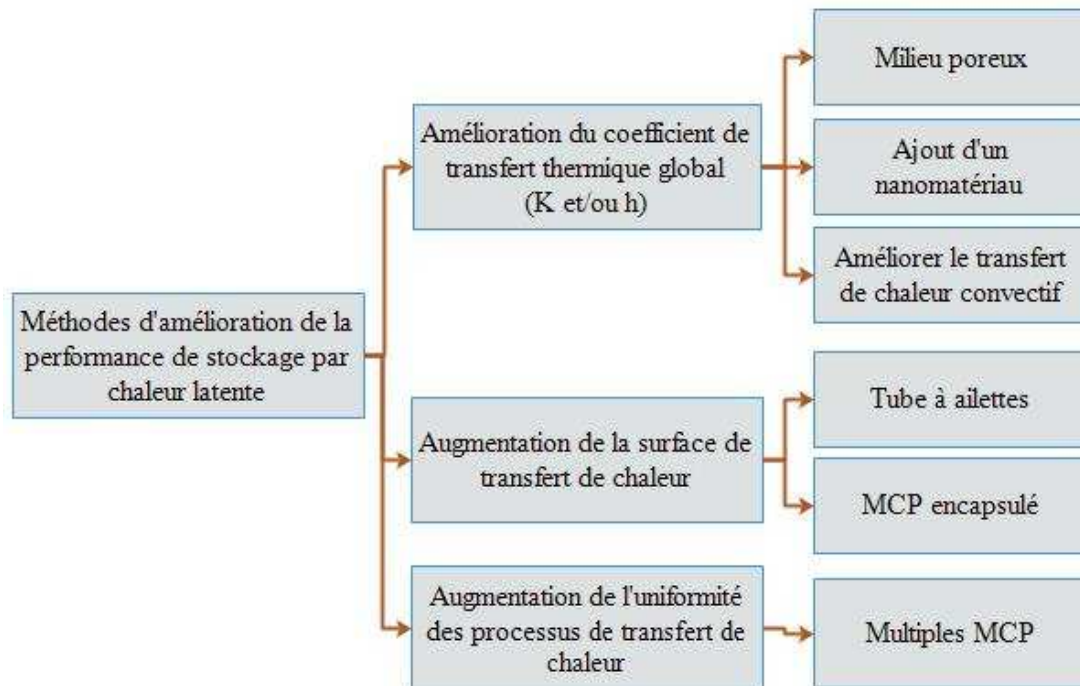


Figure I.14. Classification des méthodes d'amélioration de la performance pour le système de stockage par chaleur latente.

I.6.1. Amélioration du coefficient d'échange thermique globale

Selon l'équation (I.5), l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur (K) est un moyen efficace pour améliorer le taux de stockage de chaleur latente. Le coefficient K est l'inverse de la résistance thermique totale, y compris la résistance thermique du fluide caloporteur, la résistance thermique du MCP et la résistance thermique de la paroi. Afin d'augmenter le coefficient de transfert de chaleur, la résistance thermique totale doit être réduite. Pour la majeure partie du processus de stockage de la chaleur latente, la résistance thermique totale est dominée par la résistance thermique du MCP. Par conséquent, la première méthode d'amélioration des performances pour un système de stockage de chaleur latente consiste à diminuer la résistance thermique du MCP en améliorant sa conductivité thermique. Les milieux poreux à haute conductivité thermique et les nanoparticules sont couramment utilisés pour former des MCP composites stables, qui peuvent améliorer efficacement la conductivité thermique du MCP utilisé [74–76].

I.6.1.1. Utilisation d'un milieu poreux

Lorsque des supports poreux sont utilisés, le MCP est introduit dans le support poreux pour former le MCP composite. Le support poreux doit avoir une conductivité thermique élevée pour améliorer efficacement la conductivité thermique du MCP, une grande porosité afin de garantir un remplissage de MCP suffisant et de maintenir une densité de stockage d'énergie élevée. Les mousses métalliques telles que le cuivre, le nickel, les mousses d'aluminium, le graphite expansé et certaines roches expansées telles que la perlite et la vermiculite sont utilisées comme matériau de support poreux.

I.6.1.2. Ajout d'un nanomatériau

Lorsque des additifs de nanomatériaux sont utilisés pour améliorer la conductivité thermique du MCP, le nanomatériau sera dispersé dans le MCP pour former un MCP composite uniforme [77]. Les additifs doivent avoir une conductivité thermique et une stabilité chimique élevées pour garantir l'amélioration de la conductivité thermique du MCP et qu'aucune réaction chimique ne se produit. Les nanomatériaux de carbone tels que les nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT), les nanotubes de carbone à paroi simple (SWCNT), le graphite, le graphène et les nanoparticules d'oxydes métalliques ou les nanoparticules métalliques sont couramment utilisées comme additifs pour améliorer la conductivité thermique du MCP.

I.6.1.3. Améliorer le coefficient de transfert de chaleur par convection

La convection influence le transfert thermique sur des parois incorporant des MCP. En effet, le transfert de chaleur entre une paroi incorporant un MCP et l'air est dû à la convection thermique et donc, ce transfert de chaleur par convection est important pour évaluer le processus de stockage/libération dans la paroi incorporant un MCP [26–28].

I.6.2. Extension de la surface de transfert de chaleur

Selon l'équation (I.5), la deuxième façon d'améliorer les performances du processus de stockage/libération de chaleur est d'augmenter la surface de transfert de chaleur. La surface de transfert de chaleur étendue, y compris les tubes à ailettes et les MCP encapsulés, est largement utilisée pour augmenter la surface de transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le MCP améliorant ainsi les performances de stockage de la chaleur latente.

I.6.2.1. Tube à ailettes

Pour les systèmes de stockage de chaleur latente en coquille et tube, les tubes à ailettes sont utilisés pour améliorer les performances de transfert de chaleur du côté du MCP et du côté du fluide caloporteur. Les ailettes axiales ou radiales sont couramment utilisées pour améliorer les performances de transfert de chaleur du MCP. Le matériau des ailettes doit avoir une conductivité thermique élevée pour obtenir le meilleur effet d'amélioration. Récemment, Dhaidan et Khodadadi [78] ont passé en revue les études analytiques, numériques et expérimentales sur l'amélioration de la performance du stockage de la chaleur latente avec des ailettes à conductivité thermique élevée. Des conclusions intéressantes ont été tirées.

I.6.2.2. MCP encapsulé

Une autre méthode pour étendre la surface de transfert de chaleur pour améliorer le stockage de chaleur latente consiste à utiliser du MCP encapsulé, le MCP étant encapsulé pour former des capsules stables. Les capsules sont accumulées dans le conteneur de stockage de chaleur latente et le fluide caloporteur circule à travers les espaces entre les différentes capsules. La zone de transfert de chaleur peut être efficacement augmentée par ce procédé. Selon les dimensions des capsules, elles peuvent être divisées en microcapsules [77] ou en macrocapsules [79]. Pour les microcapsules, les dimensions sont généralement voisines du micron et les dimensions des macrocapsules sont voisines du millimètre.

I.6.3. Amélioration de l'uniformité des processus de transfert de chaleur

Selon l'équation (I.5), la troisième façon d'améliorer les performances de transfert de chaleur est d'augmenter la différence de température de transfert de chaleur. Pour la plupart des

applications de stockage de chaleur latente, la température d'entrée du fluide caloporteur et la température initiale du MCP sont indiquées. Il est difficile d'augmenter la différence de température totale entre le fluide caloporteur et le MCP. Cependant, la différence de température dans différents emplacements de l'élément de stockage de chaleur latente est contrôlable. Le processus de transfert de chaleur peut être amélioré par le contrôle de la différence de température pour différents temps et différents emplacements du processus de transfert de chaleur. Par conséquent, la troisième méthode couramment utilisée pour améliorer la performance d'un système de stockage de chaleur latente consiste à améliorer l'uniformité du processus de transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le MCP. Le système de stockage de chaleur latente en cascade avec plusieurs MCP est largement utilisé pour améliorer l'uniformité du processus de stockage de chaleur latente [17,80,81]. Le schéma de principe du système de stockage de chaleur latente en cascade est présenté à la Figure I.15. Sur la base de la variation de température du fluide caloporteur lors de son écoulement dans le système de stockage de chaleur latente, les MCP présentant des températures de fusion différentes sont disposés en fonction de la température qui augmente ou diminue progressivement. Pour le processus de charge, la température du fluide caloporteur diminue progressivement, de sorte que la température de fusion des MCP soit diminuée progressivement dans la direction de l'écoulement du fluide caloporteur. Le MCP à température de fusion élevée doit être disposé dans la région d'entrée du fluide caloporteur et un MCP à basse température de fusion est disposé dans la région de sortie du fluide caloporteur. Pour le processus de décharge, du fait que la température du fluide caloporteur augmente progressivement, le fluide caloporteur doit s'écouler de la région de MCP à température de fusion inférieure vers la région de MCP à température de fusion élevée [82].

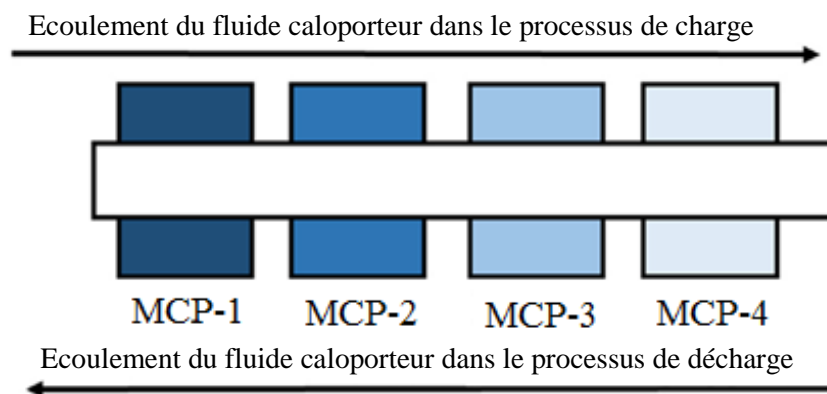


Figure I.15. Schéma du système de stockage multi-étages à chaleur latente.

I.7. Etudes de la performance thermique des MCP

Afin d'étudier l'effet du MCP sur la gestion thermique du bâtiment, la caractérisation sur des bâtiments à échelle réelle doit être faite. Par conséquent, plusieurs approches ont été appliquées pour étudier le phénomène de changement de phase. Les approches qui sont globalement utilisées peuvent être regroupées en deux approches, soit la modélisation expérimentale soit la modélisation numérique. L'approche expérimentale peut être réalisée dans des conditions de laboratoire ou dans des conditions d'environnement réel. Il existe également des combinaisons d'approche expérimentale et numérique (c'est-à-dire l'utilisation de résultats obtenus à partir de l'expérience et de l'application de modèles mathématiques ou numériques).

I.7.1. Approche expérimentale

I.7.1.1. Dans des conditions de laboratoire

Les tests de laboratoire sont plus préférables car ils sont faciles à configurer et entraînent des coûts limités. Il existe quelques essais réalisés avec succès en laboratoire pour caractériser les propriétés thermiques des composites de MCP dans les bâtiments. Les méthodes de test récentes utilisées en laboratoire pour évaluer les performances des MCP sont mentionnées ci-après.

Lee et al. [83] ont étudié les caractéristiques de stockage de chaleur des panneaux de plâtre contenant du MCP microencapsulé. Les panneaux de plâtre, de dimensions $0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} \times 0,015 \text{ m}$, ont été préparés en mélangeant du gypse avec de l'eau et du MCP microencapsulé, dont les fractions pondérales étaient de 10 et 20 % en poids. L'étude a été réalisée sur deux cellules de tests. La première cellule contient un panneau de plâtre avec MCP microencapsulé et la deuxième cellule, utilisée comme référence, contient un panneau de plâtre sans MCP. L'expérience a été réalisée en chauffant les cellules de tests à une température maximale de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ en utilisant un élément chauffant de 200 W pendant 30 minutes puis en laissant refroidir. Cette expérience avait pour but l'étude du comportement thermique des deux panneaux pour un scénario de chauffage/refroidissement des cellules. Les résultats trouvés ont montré que pour le cas où la température extérieure est de $10 \text{ }^\circ\text{C}$, le temps nécessaire pour la chute de la température de 30 à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dans la première cellule qui contient un panneau de plâtre avec MCP microencapsulé est de 94 minutes. Dans la deuxième cellule, le temps de chute de la température est de 20 minutes. Le temps de chute de température du panneau qui contient du MCP est donc 4 fois supérieur à celui d'un panneau de plâtre sans MCP.

Marchi et al. [84] ont quantifié l'effet du MCP sur la température interne du bâtiment. Ils ont développé une cellule de simulation avec des dimensions de 30 cm × 30 cm × 30 cm. La cellule a été préparée avec des panneaux en polyuréthane expansé de 5 cm d'épaisseur. Deux plaques d'acier de 10 mm d'épaisseur contenant différentes épaisseurs de panneaux MCP allant de 0 à 1,5 cm étaient placées à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule. La cellule était liée à un système d'acquisition par sondes de température. Le test de simulation était effectué durant plusieurs mois. Les résultats du test montrent que l'incorporation de MCP dans le bâtiment est un moyen efficace pour réduire la consommation d'énergie et d'améliorer le confort intérieur des bâtiments.

Barreneche et al. [85] ont développé des composites de MCP en incorporant des MCP microencapsulés à 5 % en poids et 15 % en poids (MCP Micronals DS 5001 commercialisé par la société BASF) avec du ciment et du plâtre. Les dimensions du panneau composite sont 300 mm × 300 mm × 30 mm. Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de 5 % en poids de MCP dans le ciment est plus avantageuse et que l'ajout de 15 % en poids de MCP dans le plâtre est meilleur par rapport au ciment.

Borreguero et al. [86,87] ont étudié le comportement de performance thermique du bloc composite de microcapsules plâtre-MCP. Les composites de plâtre ont été fabriqués en ajoutant 15 % en poids de polymères SiO₂-MCP (MCP microencapsulé). L'équipement utilisé avait la possibilité de quantifier la capacité thermique spécifique équivalente dans une certaine plage de températures, la capacité de stockage d'énergie thermique par mètre cube et la conductivité thermique effective à l'état d'équilibre final. Ce test a confirmé que les polymères SiO₂-MCP conviennent pour améliorer les propriétés thermorégulatrices du plâtre.

1.7.1.2. Dans les conditions réelles

Su et al. [60] ont effectué un test sur la capacité de stockage et de contrôle de la température sur le panneau composite de plâtre qu'ils ont élaboré. L'essai a été effectué à l'aide de la boîte scellée. La taille de la boîte était de 50 × 50 × 50 cm. Les températures intérieure et extérieure de la boîte ont été mesurées avec deux capteurs de température. L'essai a été réalisé dans des conditions d'environnement réel à Tianjin, en Chine.

Behzadi et Farid [88] ont simulé une maison typique de 171 m² équipée de panneaux de plâtre imprégnés de MCP à Auckland, en Nouvelle-Zélande. Ils ont constaté que l'utilisation de panneaux de plâtre imprégnés de MCP pouvait réduire la fluctuation de la température intérieure jusqu'à 4 °C par une journée d'été typique.

Sage-Lauck et Sailor [89] ont étudié la réponse thermique d'un duplex passif à Portland, dans l'état de l'Oregon. Le bâtiment a été entièrement instrumenté pendant la construction afin de surveiller divers paramètres de température de l'air, de température de surface, de niveaux de CO₂ et d'utilisation des fenêtres/portes et de la consommation d'électricité. Les résultats montrent que l'ajout de MCP pourrait réduire d'environ 60 % le nombre d'heures de chauffe. La réduction en pourcentage dépend de l'occupation, des charges internes et des calendriers d'utilisation des fenêtres.

I.7.2. Approche de modélisation numérique

La simulation par ordinateur a été précédemment développée pour simuler l'effet des MCP dans les bâtiments. Habituellement, ces techniques doivent être supportées par des données expérimentales. Fernandes et Costa [90] ont effectué des simulations numériques pour étudier l'effet du MCP dans une maison typique située dans trois sites au Portugal. Ils ont constaté que des réductions de 24 à 34 % des heures au-dessus de température de 25 °C étaient possibles, lorsque des panneaux de plâtre contenant 3 kg/m² de MCP étaient appliqués sur les murs et les plafonds. Ils ont conclu que la réduction de la température et les économies d'énergie varient considérablement et sont influencés par la température interne, les gains internes et d'autres caractéristiques thermiques du bâtiment.

Zwanzig et al. [91] ont réalisé une étude numérique du potentiel d'économie d'énergie lors de l'utilisation des panneaux de MCP collés contre les murs et le toit d'un bâtiment résidentiel typique dans différentes zones climatiques. L'étude a montré que ces panneaux de MCP peuvent réduire la consommation d'énergie en été et en hiver et peuvent aussi atténuer la charge électrique maximale en été.

Zhou et al. [92] ont réalisé des tests numériques pour étudier l'effet des facteurs qui influencent la performance thermique des composites de panneau mural MCP. L'étude a été effectuée dans des conditions changeant périodiquement à la fois à l'extérieur et à l'intérieur. Les paramètres déterminants de leur étude sont la température de fusion, la plage de fusion, la chaleur latente, la conductivité thermique et le coefficient de transfert de chaleur surfacique. Les résultats trouvés peuvent fournir un guide complet de la conception de panneau mural MCP.

I.7.3. Combinaison entre l'expérimental et la modélisation numérique

En combinant une approche expérimentale et numérique, Diaconu et Cruceru [93] ont mis au point une salle de test avec un panneau isolant de type sandwich à trois couches, les couches internes et externes munies de panneaux muraux en MCP, la couche intermédiaire

réalisée avec une isolation thermique classique (panneau en polystyrène expansé). La couche externe contient du MCP actif pendant la saison chaude, tandis que la couche interne contient du MCP qui fonctionnera en hiver. La salle d'essai était équipée d'un système de ventilation et de climatisation (CVC) pour une évaluation réaliste du potentiel d'économie d'énergie de la paroi composite MCP. Un modèle mathématique du système de la chambre d'essai et de l'environnement intérieur a été élaboré sur la base des résultats obtenus dans la salle de test. Sur la base de la simulation numérique, ils ont constaté que le système de panneaux qu'ils ont développé peut réduire la charge de refroidissement maximale d'environ 35,4 % et économiser environ 12,8 % d'énergie par an.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, les principes de stockage de l'énergie thermique dans le bâtiment ont été présentés en décrivant l'intérêt et les avantages du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à travers l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP). Les principaux paramètres liés aux matériaux de changement phase ont été aussi passés en revue à savoir : les différents matériaux utilisés et leur conditionnement, les phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage, l'incorporation de MCP dans les matériaux et les éléments de construction, les techniques de mesure des caractéristiques thermiques et la notion du confort thermique. Finalement, les différentes techniques d'amélioration du stockage thermique par chaleur latente ont été citées. Le présent chapitre se termine par la présentation des différentes études de performance thermique des MCP.

**CHAPITRE II. MODELISATION NUMERIQUE DU PHENOMENE DE
CHANGEMENT DE PHASE**

II.1. Introduction à la modélisation numérique

La modélisation numérique fait généralement référence au processus d'utilisation de modèles ou de relations mathématiques pour décrire le comportement statique ou dynamique d'un système réel. Les modèles numériques sont utilisés pour faciliter la conception mathématique d'un système physique. Par conséquent, différentes hypothèses peuvent être considérées dans le modèle numérique en fonction de la complexité du problème physique. La modélisation numérique est utilisée pour des études interprétatives, de conception ou prédictives dans une grande variété de domaines, allant de la dynamique quantique, la thermodynamique, l'analyse structurelle, l'ingénierie géotechnique et la modélisation climatique...etc. Il est important de noter que les modèles numériques doivent être validés et doivent refléter la réalité physique. Cette validation doit faire référence à une procédure itérative où les résultats du modèle sont comparés aux données expérimentales, jusqu'à ce que les erreurs soient justifiées dans les limites de la confiance. Des paramètres de validation appropriés doivent être utilisés pour quantifier ces erreurs et fournir une mesure de la précision des modèles. Une fois que le modèle numérique est validé, la simulation consistera à faire varier les paramètres spécifiques du modèle pour étudier leurs impacts respectifs sur les principales variables [43].

II.2. Modèles de changement de phase

Le changement de phase consiste en un processus de transfert de chaleur impliquant une chaleur sensible et latente, dans une plage de température quasi constante. Basée sur la première loi de la thermodynamique, la conservation de l'énergie, l'équation (II.1) est utilisée pour modéliser le processus de transfert de chaleur impliqué dans le changement de phase.

Équation d'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j c_{pm} T) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + S \quad (II.1)$$

En se référant à l'équation (II.1), dans le contexte eulérien :

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H)$ Représente l'énergie totale du fluide dans le volume de contrôle.

$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j c_{pm} T)$ Tient compte du transfert d'énergie dû au mouvement du fluide dans et hors du volume de contrôle (convection).

- $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right]$ Tient compte du transfert de chaleur par conduction sur les surfaces du volume de contrôle.
- S Tient compte d'une autre source d'énergie telle que les réactions chimiques, le courant électrique, ...etc.

Dans un problème de changement de phase, une solution peut être obtenue en appliquant les conditions aux limites et initiales à l'équation d'énergie discrétisée. Cependant, dans les problèmes impliquant des changements de phase, il existe des conditions aux limites supplémentaires à l'interface de changement de phase, comme le montre la Figure II.1 pour un problème à une dimension [43].

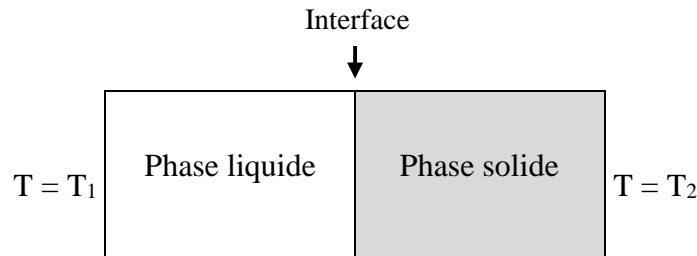


Figure II.1. Interface solide-liquide.

Pour de tels problèmes, on suppose généralement que le transfert de chaleur à l'interface est uniquement par conduction, perpendiculaire à l'interface et que le matériau est homogène à une température de fusion unique. Ces conditions sont connues sous le nom de conditions de Stefan (équation (II.2)) pour le changement de phase, exprimées sous la forme :

$$\begin{cases} T_{\text{sol}} = T_{\text{liq}} = T_F \\ \lambda \frac{\partial T_{\text{sol}}}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T_{\text{liq}}}{\partial x} = \rho L_f \frac{dS}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Les conditions de Stefan représentent la conservation de l'énergie à l'interface de changement de phase et se rapportent aux températures de changement de phase discrètes. La solution de l'équation d'énergie avec ces conditions aux limites supplémentaires décrirait la distribution de la température dans le matériau. Cependant, la difficulté avec ce processus est que les conditions aux limites à l'interface changent constamment avec la progression du changement de phase, ce qui implique qu'elles doivent être trouvées dans la solution finale. Plusieurs méthodes numériques ont été utilisées pour éviter de suivre explicitement l'interface

de changement de phase dans les modèles numériques. Cependant, bien que ces méthodes aient simplifié la modélisation du changement de phase, les simulations numériques restent une tâche difficile, en particulier en ce qui concerne l'hystérésis, le sous-refroidissement et la nucléation. Les modèles courants de suivi des changements de phase «non explicites» comprennent la méthode de l'enthalpie, la méthode de la capacité thermique effective, la méthode de transformation de la température et la méthode de la source de chaleur, décrites respectivement aux sections II.3.1. II.3.4.

II.3. Formulation numérique des problèmes de changement de phase

Une approche intuitive pour résoudre les problèmes de changement de phase consiste à suivre l'interface en mouvement à l'aide des méthodes de suivi frontal. Cependant, cette méthode doit supposer a priori que l'interface soit lisse ou monotone au cours de la période. Cette hypothèse n'est pas toujours vraie et, par conséquent, reformuler des problèmes de changement de phase à l'aide des techniques du maillage fixe devient une alternative évidente. La condition de Stefan (Eq. (II.5)) dans la méthode du maillage fixe est traitée implicitement par l'équation de conservation de l'énergie reformulée et, par conséquent, la position de l'interface mobile est connue lorsque la solution converge [94].

Transfert de chaleur en phase solide :

$$\rho \times C_{\text{sol}} \times \frac{\partial T_{\text{sol}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{sol}} \times \frac{\partial T_{\text{sol}}}{\partial x} \right) \quad (\text{II.3})$$

Transfert de chaleur en phase liquide :

$$\rho \times C_{\text{liq}} \times \frac{\partial T_{\text{liq}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{liq}} \times \frac{\partial T_{\text{liq}}}{\partial x} \right) \quad (\text{II.4})$$

La condition de Stefan qui impose le bilan thermique à l'interface solide-liquide est :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{sol}} \times \frac{\partial T_{\text{sol}}}{\partial x} \right) \times n - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{liq}} \times \frac{\partial T_{\text{liq}}}{\partial x} \right) \times n = \rho \times L_f \times v \times n \quad (\text{II.5})$$

Où :

- n est la normale sur l'interface de phase,
- v est la vitesse de l'interface,
- L_f est la chaleur latente par unité de masse de solide.

La méthode du maillage fixe est simple comparée aux autres méthodes. Elle est très polyvalente, pratique, adaptable et facilement programmable. Le dégagement de chaleur latente est pris en compte dans l'équation principale en utilisant l'une des méthodes suivantes : enthalpie, méthode

de la capacité thermique, modèle de transformation de la température, méthode de la source de chaleur. Les sections suivantes décrivent les méthodes les plus largement utilisées.

II.3.1. Méthode de l'enthalpie

Dans la méthode de l'enthalpie, la chaleur latente et la chaleur spécifique sont combinées dans un terme d'enthalpie dans l'équation gouvernante. Pour le transfert de chaleur dominé par la conduction, les équations (II.3), (II.4) et (II.5) peuvent être reformulées en une équation dans laquelle la chaleur latente est incluse dans le terme d'enthalpie (Eq. (II.6)).

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (\text{II.6})$$

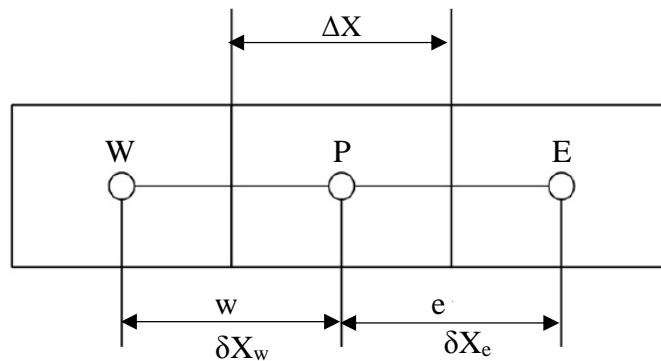


Figure II.2. Un maillage de volume de contrôle typique.

Pour illustrer cette méthode, une approximation totalement implicite de l'équation (II.6) pour un maillage typique montré à la Figure II.2, mène à l'équation discrétisée suivante :

$$h_p^{n+1} = h_p^n + a_w^{n+1} \times T_w^{n+1} + a_p^{n+1} \times T_p^{n+1} + a_e^{n+1} \times T_e^{n+1} \quad (\text{II.7})$$

Selon l'équation (II.7), il est clair que l'enthalpie actuelle (h_p^{n+1}) dépend de la valeur actuelle de la température (T_p^{n+1}) et que le terme d'enthalpie est donc non linéaire. L'équation ne peut être résolue sans l'utilisation des méthodes numériques appropriées pour gérer cette non-linéarité. Ceci doit être résolu soit par des solveurs non linéaires basés sur la méthode de Newton, soit en linéarisant les termes non linéaires et en utilisant des méthodes itératives. Si un solveur non linéaire est sélectionné, une fonction température-enthalpie auxiliaire est requise pour l'équation (II.7). Cette fonction température-enthalpie auxiliaire peut être écrite pour les matériaux qui changent de phase dans une plage de température spécifique comme suit :

$$T_p = \begin{cases} \frac{h_p}{C_{sol}} & , h_p \leq C_{sol} \times (T_F - \epsilon) \\ \frac{h_p + \left[\frac{C_{liq} - C_{sol} + L_f}{2} \right] \times (T_m - \epsilon)}{\left[\frac{C_{liq} - C_{sol} + L_f}{2} \right] \times (T_m - \epsilon)} & , C_{liq} \times (T_F - \epsilon) < h_p < C_{sol} \times (T_F - \epsilon) + L_f \\ \frac{h_p - (C_{sol} - C_{liq}) \times T_F - L_f}{C_{liq}} & , h_p \geq C_{liq} \times (T_F - \epsilon) + L_f \end{cases} \quad (II.8)$$

Où : ϵ est une petite valeur arbitraire qui représente la température de changement de phase.

Une approche alternative pour résoudre l'équivalent discrétisé (Eq. (II.7)) est de linéariser le terme non linéaire, $T_p^{n+1}(T)$. L'équation non linéaire discrétisée devient linéaire avec une variable dépendante principale "Température" qui peut être résolue de manière itérative pour l'enthalpie à l'aide de solveurs linéaires communs tels que les solveurs linéaires basés sur les méthodes directes (élimination de Gauss ou l'algorithme tridimensionnel) ou sur les méthodes itératives (Méthode Gauss-Seidel).

II.3.2. Méthode de la capacité thermique

Le terme de capacité thermique dans l'équation principale imite l'effet de l'enthalpie (chaleur sensible et chaleur latente) en augmentant la valeur de la capacité thermique pendant le changement de phase. Deux approches sont généralement utilisées pour rendre compte de la libération de chaleur latente : la capacité de chaleur apparente et la capacité de chaleur effective. Bien que les deux approches diffèrent par l'approximation de la capacité calorifique, cependant, les publications utilisent les terminologies de manière interchangeable. Poirier [95] explique plus en détail le concept de capacité thermique effective tandis que la méthode de la capacité thermique apparente a été introduite par Hashemi et Sliepcevich [96] pour résoudre un transfert de chaleur unidimensionnel avec changement de phase. L'équation de transfert de chaleur unidimensionnelle à prédominance de conduction utilisant la capacité de chaleur apparente peut s'écrire comme suit :

$$\rho \times C^A(T) \times \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (II.9)$$

Cette méthode est intéressante car la température est la seule variable principale qui doit être résolue sous la forme discrétisée. La clé de cette approche réside dans l'approximation de la capacité calorifique. Deux méthodes sont couramment utilisées pour estimer le terme de capacité thermique apparente dans l'équation (II.9) : les relations analytique/empirique et les approximations numériques.

II.3.2.1. Les relations analytiques/empiriques

La capacité calorifique d'un MCP peut être déterminée à partir des données de test avec des calorimètres à balayage différentiel (DSC). Les fabricants de MCP fournissent normalement des données limitées sur leurs produits, telles que la température de fusion, la chaleur de fusion et la capacité thermique aux états solide et liquide. Ces données minimales peuvent être utilisées pour estimer la capacité calorifique d'un MCP en utilisant une relation directe simple avec l'introduction d'une plage de température de fusion fiable :

$$C^A = \begin{cases} C_{sol} & , T \leq T_F - \epsilon \text{ (Région solide)} \\ \frac{C_{sol} + C_{liq}}{2} + \frac{L_f}{2 \times \epsilon} & , T_F - \epsilon < T < T_F + \epsilon \text{ (Région de mélange)} \\ C_{liq} & , T \geq T_F + \epsilon \text{ (Région liquide)} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

L'obtention de la convergence pourrait être un problème lors de la résolution de l'équation (II.9), si la plage de changement de phase est trop petite ou si le pas de temps est trop grand. Il y a un risque possible de manquer la contribution de chaleur latente dans un grand pas de temps. Par conséquent, les résultats des tests DSC peuvent être utilisés pour former une expression empirique permettant d'estimer la capacité calorifique.

II.3.2.2. Les approximations numériques

L'approximation numérique est une alternative lorsque des informations détaillées sur les comportements thermiques de MCP sont disponibles. De nombreuses approximations numériques ont été proposées dans la littérature. Par exemple, Comini [97] a appliqué une technique numérique en utilisant la méthode des éléments finis, dans laquelle la capacité calorifique était déterminée à l'aide d'une dérivée de l'enthalpie en fonction de la température. Plus tard, Morgan [98] a amélioré la relation pour éviter les problèmes de convergence. Lors de l'utilisation d'un schéma itératif, la capacité thermique peut être estimée à l'aide des solutions de température et d'enthalpie successives. La moyenne temporelle proposée par Morgan est représentée par l'équation suivante :

$$C^A = \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{h^n - h^{n-1}}{T^n - T^{n-1}} \quad (\text{II.11})$$

D'autre part, Lemmon [99] a proposé une approximation basée sur l'approche de la moyenne spatiale plutôt que sur la moyenne temporelle. Les approximations temporelles et moyennes spatiales sont toutefois sujettes à des problèmes de convergence, à moins de prendre certaines précautions [100].

II.3.3. Modèle de transformation de la température

Le modèle de transformation de la température a été développé par Cao et Faghri [101] pour surmonter les limitations temporelles et spatiales de la méthode de la capacité thermique. La méthode est également appelée "méthode améliorée de la capacité calorifique équivalente basée sur la température" [102]. Bien que la méthode a été testée par rapport à plusieurs exemples de référence, il a été rapporté qu'elle produisait des résultats incohérents, en particulier lorsque le transfert de masse par MCP est pris en compte. La clé de cette méthode est que l'énergie (Eq. (II.6)) est transformé en une équation non linéaire (Eq. (II.12)) avec la température comme seule variable dépendante.

$$\rho \times C_{\text{eff}}(T) \times \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho \times \frac{\partial S}{\partial t} \quad (\text{II.12})$$

Le terme source est représenté par l'équation suivante :

$$S(T) = \begin{cases} C_{\text{sol}} \times \epsilon & , T \leq T_F - \epsilon \\ \left(\frac{C_{\text{sol}} + C_{\text{liq}}}{2} \right) \times \epsilon + \frac{L_f}{2} & , T_F - \epsilon < T < T_F + \epsilon \\ C_{\text{liq}} \times \epsilon + L_f & , T \geq T_F + \epsilon \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Au cours du changement de phase, la chaleur latente est représentée par un terme source dans l'équation principale, le terme de capacité calorifique étant similaire à celui de la méthode de capacité calorifique apparente. Cependant, cette méthode n'est pas couramment utilisée mais offre une solution de remplacement par rapport à la méthode de la capacité thermique apparente.

II.3.4. Méthode de la source de chaleur

En utilisant la méthode de la source de chaleur, l'enthalpie totale dans l'équation gouvernante (Eq. (II.6)) est divisée en chaleur spécifique et chaleur latente où la chaleur latente agit comme un terme source. L'équation (II.6) devient ainsi :

$$\rho \times C_{\text{moy}} \times \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho \times L_f \times \frac{\partial f_{\text{liq}}}{\partial t} \quad (\text{II.14})$$

Dans ce schéma, le front de changement de phase est suivi par l'évaluation d'un champ de fraction liquide nodal qui prend la valeur 0 pour le solide, 1 pour le liquide et la valeur comprise entre 0 et 1 pour la région pâteuse. Avec cette approche, la fraction fluide est linéarisée et l'équation peut être résolue de manière itérative selon la température. La fraction liquide peut être approximée à l'aide de l'équation auxiliaire suivante :

$$f_l = \begin{cases} 0 & , T \leq T_F - \epsilon \\ \frac{(T - T_{sol})}{(T_{liq} - T_{sol})} & , T_F - \epsilon < T < T_F + \epsilon \\ 1 & , T \geq T_F + \epsilon \end{cases} \quad (II.15)$$

Lors de la discrétisation de l'équation (II.14) avec un schéma totalement implicite et en linéarisant le terme source "fraction liquide" au pas de temps actuel, l'équation discrétisée devient linéaire et doit être résolue pour la température de manière itérative avec la fraction liquide.

II.3.5. Résumé

Différents modèles et méthodes mathématiques ont été présentés pour traiter les problèmes de changement de phase en utilisant la méthode de maillage fixe : enthalpie, capacité calorifique, méthode de transformation de la température et méthode de la source de chaleur. Chaque méthode a sa caractéristique principale pour gérer le phénomène d'absorption et de libération de la chaleur latente, avec ses avantages et ses inconvénients. Le Tableau II.1 résume ces méthodes et met en évidence la principale caractéristique ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Tableau II.1. Caractéristique, avantages et inconvénients des méthodes mathématiques utilisées pour les problèmes de changement de phase [94].

Modèle	Caractéristique principale	Avantages	Inconvénients
Méthode d'enthalpie	L'enthalpie représente la chaleur sensible et latente.	<ul style="list-style-type: none"> - Rapide si le schéma approprié est sélectionné. - Faire face à un changement de phase net et progressif. 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté à gérer les problèmes de surfusion. - La température à un point de maillage typique peut osciller avec le temps.
Méthode de capacité thermique	La capacité thermique représente à la fois la chaleur sensible et la chaleur latente.	<ul style="list-style-type: none"> - Facile à programmer. - Convient au changement de phase progressif. 	<ul style="list-style-type: none"> - Manque d'efficacité informatique. - Un petit pas de temps et des mailles fines sont nécessaires pour la précision. - Difficulté dans la manipulation des cas où la plage de température de changement de phase est petite. - Difficile d'obtenir une convergence. - Non applicable pour les cas où le changement de phase se produit à température fixe.
Méthode de transformation de la température	La capacité thermique et le terme source sont utilisés pour tenir compte de la chaleur sensible et latente.	<ul style="list-style-type: none"> - Faire face à un changement de phase net et progressif. - Gérer les grandes échelles de temps et de parcours. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas une méthode courante et donc pas testée pour évaluer les avantages et les inconvénients.

Méthode source de chaleur	La chaleur latente est traitée comme un terme source.	<ul style="list-style-type: none"> - Intuitif grâce à la séparation de la chaleur latente de la chaleur sensible. - Faire face à un changement de phase net et progressif. 	<ul style="list-style-type: none"> - Manque d'efficacité informatique. - Problèmes avec les erreurs d'arrondi si la fusion se produit au-dessus de la plage de température. - Nécessite une sous-relaxation et des efforts supplémentaires sont donc nécessaires pour déterminer le facteur de relaxation optimal.
---------------------------	---	--	---

II.4. Choix et améliorations apportées aux modèles de changement de phase

Bien que les méthodes d'enthalpie, de capacité thermique et le modèle de transformation de la température ont été utilisées dans diverses études, elles supposent une relation d'enthalpie linéaire ou une relation $c_p = f(T)$ qui ne tiens pas compte du phénomène d'hystérésis dans le MCP. En effet, l'hystérésis fait référence au phénomène par lequel le MCP fond et gèle dans différentes plages de température et avec différentes enthalpies, c'est-à-dire différentes courbes température-enthalpie pour la fusion et la solidification. L'hystérésis est liée aux propriétés chimiques et cinétiques du matériau [42].

Pour de nombreuses raisons, dont l'efficacité de calcul, la précision de la modélisation et la flexibilité dans le choix des schémas de solutions, le modèle utilisé dans cette recherche est un modèle qui améliore les méthodes classiques d'enthalpie-porosité et de capacité calorifique effective. Ce modèle permet à l'utilisateur de définir séparément les courbes enthalpie-température définies pour les processus de fusion et de solidification en permettant ainsi de modéliser à la fois la non-linéarité et l'hystérésis impliquées dans les processus de changement de phase fournissant ainsi des résultats de simulation plus précis. La méthode utilisée par ce modèle peut être considérée comme une extrapolation de la méthode enthalpie-porosité, mais au lieu de calculer explicitement l'enthalpie du MCP à chaque pas de temps, elle repose sur l'ajout d'un terme de source de chaleur S dans l'équation (II.1) pour tenir compte de la chaleur latente supplémentaire impliquée dans les processus de fusion et de solidification [103]. Le terme source S est implémenté en tant que fonctions définie par l'utilisateur (UDF) et correspond à une représentation mathématique sous forme d'équations polynomiales des courbes de relations enthalpie-température de fusion et de solidification. Ces équations du terme source sont définies dans le Tableau II.2.

Tableau II.2. Conditions du terme source définies par l'utilisateur pour définir le cas d'absorption/libération de chaleur [103].

<p>Fusion (Absorption de chaleur) $T_t > T_{t-1}$</p>	$(T_t \leq T_{Liq}) \text{ et } (T_{t-1} \geq T_{sol})$	(II.16)
	$S_{ab} = \frac{-\rho}{\Delta t} \int_{T_{t-1}}^{T_t} f(T)_{ab} dT$	
	$(T_{sol} \leq T_t \leq T_{Liq}) \text{ et } (T_{t-1} < T_{sol})$	(II.17)
	$S_{ab} = \frac{-\rho}{\Delta t} \int_{T_{sol}}^{T_t} f(T)_{ab} dT$	
	$(T_t \geq T_{Liq}) \text{ et } (T_{t-1} < T_{sol})$	(II.18)
	$S_{ab} = \frac{-\rho}{\Delta t} \times L_{ab}$	
	$(T_t > T_{Liq}) \text{ et } (T_{sol} \leq T_{t-1} \leq T_{Liq})$	(II.19)
	$S_{ab} = \frac{-\rho}{\Delta t} \int_{T_{t-1}}^{T_{liq}} f(T)_{ab} dT$	
<p>Solidification (Libération de chaleur) $T_t < T_{t-1}$</p>	$(T_t \geq T_{sol}) \text{ et } (T_{t-1} \leq T_{Liq})$	(II.20)
	$S_{lib} = \frac{\rho}{\Delta t} \int_{T_{t-1}}^{T_t} f(T)_{lib} dT$	
	$(T_{sol} \leq T_t \leq T_{Liq}) \text{ et } (T_{t-1} > T_{Liq})$	(II.21)
	$S_{lib} = \frac{\rho}{\Delta t} \int_{T_{liq}}^{T_t} f(T)_{lib} dT$	
	$(T_t < T_{sol}) \text{ et } (T_{t-1} > T_{Liq})$	(II.22)
	$S_{lib} = \frac{\rho}{\Delta t} \times L_{lib}$	
	$(T_t < T_{sol}) \text{ et } T_{sol} \leq T_{t-1} \leq T_{Liq}$	(II.23)
$S_{lib} = \frac{\rho}{\Delta t} \int_{T_{t-1}}^{T_{sol}} f(T)_{lib} dT$		
<p>Pour les autres cas d'absorption/libération, $S_{ab} = S_{lib} = 0$.</p>		

Les équations du 4^{ème} degré des relations enthalpie-température de fusion et de solidification avec leurs coefficients de détermination (R^2) pour les différents pourcentages de MCP dans le plâtres ainsi que le schéma de fonctionnement du code UDF dans le logiciel Ansys Fluent sont données dans l'annexe A.

II.5. Méthodologie de simulation

La méthodologie utilisée pour la simulation et la validation des résultats est résumée dans la Figure II.3.

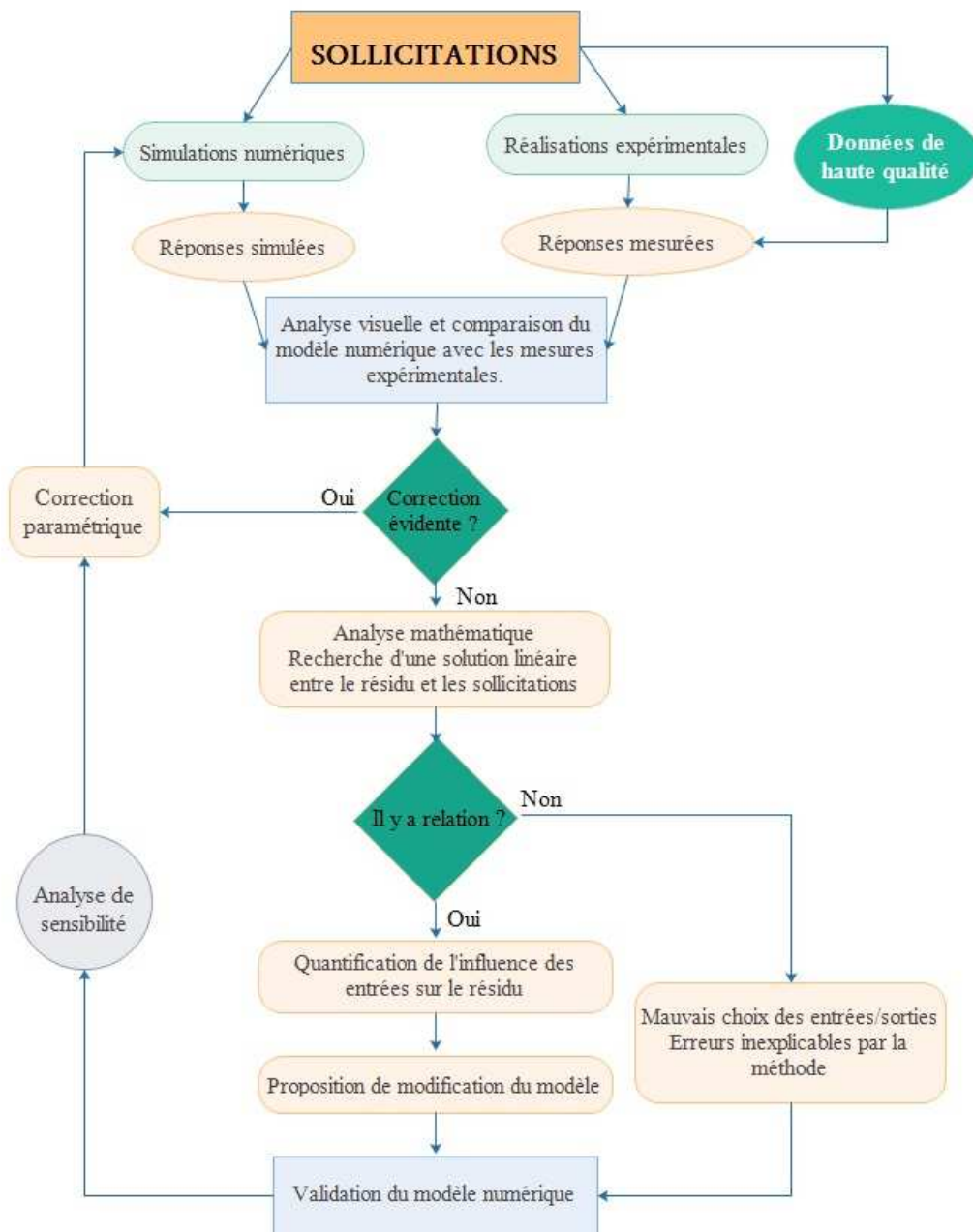


Figure II.3. Synoptique de la méthodologie de validation.

II.6. Modélisation numérique en mécanique des fluides (CFD)

II.6.1. Procédure de simulation par CFD

La simulation CFD consiste en l'utilisation des outils informatiques permettant d'étudier numériquement des systèmes impliquant un écoulement de fluide, un transfert de chaleur et d'autres processus physiques associés. Les étapes de base pour effectuer une simulation CFD sont illustrées dans la Figure II.4. La phase de prétraitement (Pre-processing) implique l'identification du problème, la création de la géométrie, la génération du maillage et les spécifications des modèles physiques, les propriétés du fluide, les conditions aux limites, les conditions initiales, les contrôles du solveur, etc.

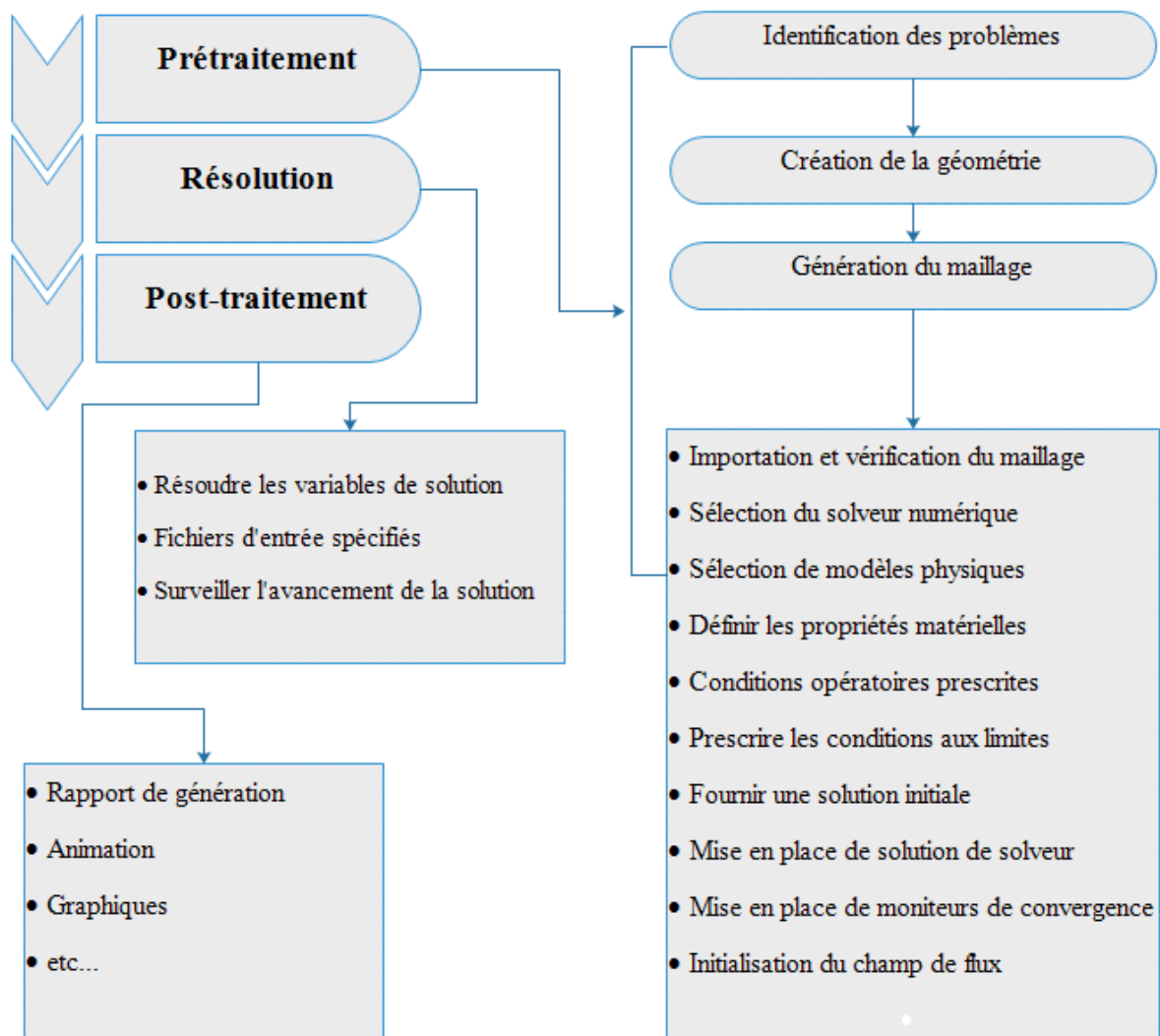


Figure II.4. Procédure de simulation par l'utilisation des outils numériques CFD.

II.6.2. Modélisation de la turbulence

Le choix d'un modèle de turbulence est très important pour prédire avec précision les différents types de flux d'air qui représentent la complexité de la simulation numérique des flux d'air dans les bâtiments selon plusieurs études [104]. La turbulence est un phénomène complexe, faisant référence à des variations aléatoires du mouvement des fluides à petite échelle, pour laquelle la simulation directe n'est pas possible avec le niveau technologique actuel (ANSYS FLUENT theory guide, 2010). Sa modélisation est plutôt réalisée avec les méthodes RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ou LES (Large Eddy Simulation), via un filtre qui limite la taille de la turbulence dans le domaine du flux. Dans le cas du modèle LES, les tourbillons supérieurs à la taille du filtre sont explicitement résolus pour améliorer la précision, au détriment de coûts de calcul importants. Les modèles RANS séparent les variables de la solution en composantes moyenne (moyenne dans le temps) et fluctuante, comme indiqué sur la Figure II.5 et l'équation (II.24). Les modèles RANS et LES introduisent des inconnues supplémentaires sous la forme approximative des équations de base, qui doivent être résolues pour fermer le système d'équations global (Fluent theory guide, 2010).

Les sections suivantes se concentrent sur les modèles de turbulence RANS, qui sont plus couramment utilisés en raison de l'effort de calcul relativement faible qui est requis.

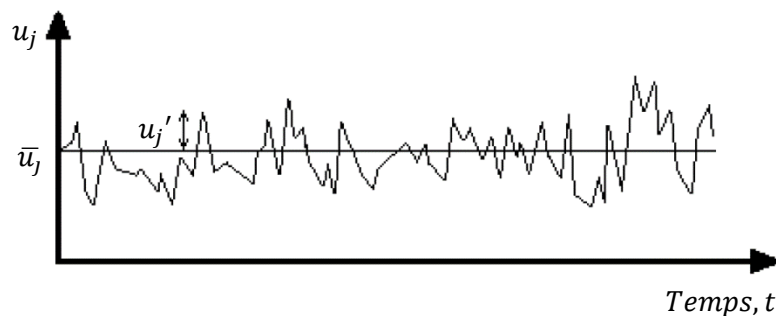


Figure II.5. Fluctuations de vitesse.

$$u_j = \bar{u}_j + u_j' \quad (\text{II.24})$$

Les vitesses en un point, dans le temps et dans l'espace, sont définies par u_j avec une valeur de temps moyen \bar{u}_j et une fluctuation de u_j' , comme défini par l'équation (II.24). Ce processus de calcul introduit de nouvelles inconnues qui sont les contraintes de Reynolds ($\overline{\rho u_i' u_j'}$) dans les équations gouvernantes (Guide de la théorie de Ansys Fluent, 2010). Les contraintes de Reynolds peuvent être évaluées par deux méthodes : les modèles de viscosité

turbulente et les modèles de Reynolds Stress Models (RSM). Les modèles de viscosité turbulente établissent une relation entre les contraintes de Reynolds et le gradient de vitesse moyen et produisent un processus relativement peu coûteux en termes de calcul. Des exemples de modèles de viscosité turbulente sont le modèle Spalart-Allmaras, les modèles $k-\varepsilon$ et les modèles $k-\omega$. Le modèle alternative Reynolds Stress Model vise à résoudre les équations de transport différentiel pour chaque terme des contraintes de Reynolds, ce qui augmente considérablement la complexité de la solution et le temps de calcul. Comme constaté sur les diverses études qui utilisent le CFD pour simuler les écoulements d'air dans des bâtiments et en raison des différents régimes d'écoulement rencontrés dans les bâtiments, le choix d'un modèle de turbulence est crucial, comme expliqué dans plusieurs études [43]. Il a été constaté que les modèles RANS (modèles RNG $k-\varepsilon$ et SST $k-\omega$) donnent plus de précision, bien que chaque modèle puisse donner des résultats relativement différents dans certains cas. En règle générale, le modèle de turbulence RNG $k-\varepsilon$ est le modèle le plus valable pour un écoulement à faible et forte turbulence dans des délais de simulation raisonnables. Ce modèle constitue une version améliorée du modèle $k-\varepsilon$ standard, de plus il a l'avantage d'éviter une modélisation particulière pour le voisinage des parois, en particulier par le biais de lois de paroi, puisqu'il s'étend aux régions dites à bas nombre de Reynolds.

Le modèle de turbulence RNG $k-\varepsilon$ sera utilisé dans le chapitre V et le chapitre VI pour décrire le flux d'air. Suivant l'approche de Boussinesq pour les modèles de turbulence $k-\varepsilon$, deux séries d'équations supplémentaires doivent être résolues : une pour l'énergie cinétique turbulente (k) et l'autre pour le taux de dissipation de l'énergie cinétique (ε) comme le montrent les équations (II.25), (II.26) et (II.27).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (\text{II.25})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.26})$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II.27})$$

Les coefficients $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ et C_μ sont des constantes empiriques et σ_k et σ_ε sont respectivement les nombres effectifs inverses de Prandtl pour l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation. Le taux de dissipation G_b est la génération d'énergie cinétique turbulente due à la flottabilité, G_k est la génération d'énergie cinétique due aux gradients de vitesse moyens et μ_t est la viscosité turbulente.

II.6.3. Difficultés liées à l'emploi des codes CFD

Plusieurs difficultés sont rencontrées lors de l'utilisation d'un code CFD, elles demandent par conséquent des solutions pour les surmonter. Parmi ces difficultés, nous pouvons recenser quelques-unes :

a) La diffusion numérique

La diffusion numérique (ou fausse diffusion) est un phénomène multidimensionnel qui se manifeste par l'accroissement artificiel du coefficient de diffusion réel. La Figure II.6 présente un exemple de profil de température observé en présence et en l'absence de diffusion lorsqu'un jet est soufflé parallèlement sur une plaque plane séparant une zone chaude et une zone froide du jet. Le profil théorique de température donné à gauche et correspondant au cas d'une absence totale de diffusion, comprend une discontinuité de température à l'interface entre les deux zones. En revanche, le phénomène de diffusion fait que l'évolution se fait de manière continue d'une température à l'autre pour le cas donné à droite. Le coefficient de fausse diffusion est maximal lorsque l'écoulement se fait avec une inclinaison de 45° par rapport aux lignes du maillage. Pour minimiser ce problème, il faut affiner davantage le maillage.

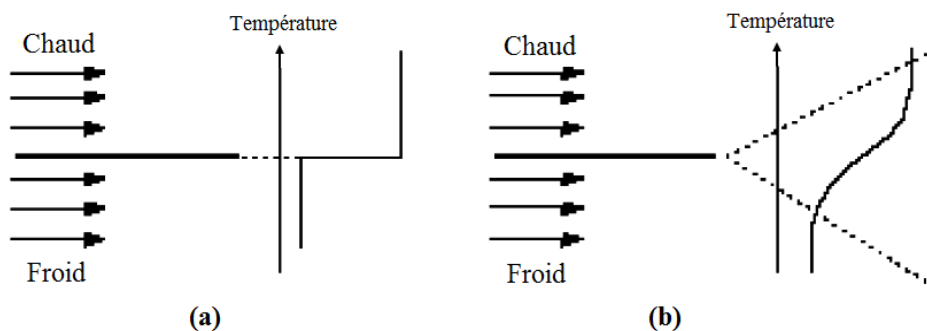


Figure II.6. Distribution de température en présence et en l'absence de diffusion. (a) $\Gamma = 0$,
(b) $\Gamma \neq 0$ (d'après PATANKAR, 1980).

b) Le choix du maillage

Il est clair que le nombre de cellules nécessaires pour résoudre un problème dépend essentiellement de la précision attendue et aussi des contraintes liées aux ressources informatiques. Il faut savoir qu'il est important que le maillage soit affiné au niveau des zones où les variables présentent de forts gradients, en particulier au voisinage des parois ou dans les zones dites de mélange. Pour limiter le nombre de cellules, on a recours à des grilles irrégulières, cartésiennes ou non. Au niveau des parois, une attention particulière est nécessaire, puisque l'hypothèse d'isotropie de la turbulence n'y est plus valable.

c) La maîtrise des conditions aux limites

Pour prédire et représenter le mouvement d'air dans un espace, il importe de définir toutes les conditions aux limites. Or sur site, il est difficile de mesurer certaines conditions aux limites telles que la distribution de température sur une paroi, le profil de vitesse à la sortie d'une bouche de soufflage et les caractéristiques turbulentes d'un jet. Les résultats de la comparaison à des mesures expérimentales seront donc tributaires d'une incertitude sur les conditions aux limites utilisées.

II.7. Efficacité du transfert thermique par convection

Le transfert thermique par convection est caractérisé par le nombre de Nusselt (Nu) qui exprime l'efficacité du transfert de chaleur par convection, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de chaleur transférée totale et la quantité de chaleur transférée par conduction uniquement. Il s'agit en fait, du transfert de chaleur sans dimension. Le nombre de Nusselt est d'autant plus élevé que la vitesse d'écoulement du fluide v est élevée. Lorsque l'influence de la conduction est importante le nombre de Nusselt tendra vers 1 et lorsque la convection est le mode de transfert prépondérant alors le nombre de Nusselt tendra vers $+\infty$. Le nombre de Nusselt s'écrit comme :

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot L}{\lambda} \quad (\text{II.28})$$

Où :

- h ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) est le coefficient de transfert thermique par convection. Ce coefficient dépend de la nature de l'écoulement du fluide, des propriétés thermiques du milieu fluide et de la géométrie du système étudié.
- L (m) est la dimension caractéristique du système étudié.
- λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) la conductivité thermique du fluide.

Au contact du fluide avec une paroi solide, la densité de flux de chaleur transmise est donnée par :

$$\varphi = h \cdot (T_p - T_f) \quad (\text{II.29})$$

Où :

- φ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) est la densité de flux thermique.
- T_p (K) est la température du fluide à la paroi.
- T_f (K) la température du fluide loin de la paroi.

Pour l'ensemble des problèmes de transfert de chaleur par convection, l'échange de chaleur convectif au contact avec la paroi se caractérise à l'aide du nombre adimensionnel de Nusselt :

$$\text{Nu} = \frac{\varphi \cdot L}{\lambda \cdot |T_p - T_f|} \quad (\text{II.30})$$

II.8. Conclusion

Ce chapitre a fourni une compréhension de la modélisation numérique des processus de changement de phase. Les méthodes de : i) l'enthalpie, ii) méthode de la capacité thermique, iii) le modèle de transformation de la température et iv) méthode de la source de chaleur sont décrites et leurs limites en termes d'évaluation linéaire de la fraction liquide sont soulignées.

La méthode de la source de chaleur sera utilisée dans les chapitres de modélisation numérique pour simuler le problème de changement de phase en utilisant une approche qui consiste à traiter séparément le processus de fusion et de solidification, en utilisant des relations enthalpie-température spécifiques de fusion à travers des fonctions définies par l'utilisateur (UDF). Ces fonctions sont obtenues à partir de techniques expérimentales de caractérisation de changement de phase pour imiter les relations enthalpie-température du MCP lors du changement de phase.

Nous présentons dans le quatrième chapitre la procédure de mesure des caractéristiques physiques à savoir la conductivité thermique, la chaleur spécifique et de la masse volumique pour différentes compositions de MCP dans le plâtre.

**CHAPITRE III. CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DES
PANNEAUX DE PLATRE-MCP**

III.1. Introduction

Parmi les problèmes auxquels sont confrontés les utilisateurs des MCP, nous pouvons citer i) les fournisseurs de ces matériaux ne donnent que des informations approximatives sur les MCP et ii) l'absence d'information sur les caractéristiques thermophysiques sur un mélange de ces MCP avec d'autres matériaux tel que le ciment, le plâtre, le béton ...etc. Pour cette raison, nous allons déterminer et présenter dans ce chapitre les caractéristiques thermophysiques pour des différentes formulations des plâtre-MCP. Les caractéristiques déterminées sont : i) la conductivité thermique, ii) la chaleur spécifique et iii) la masse volumique. Cette caractérisation sera précédée par l'élaboration des échantillons pour les différents pourcentages de MCP dans le plâtre. Le MCP utilisé est un produit commercial à base de paraffine microencapsulée de la société BASF.

III.2. Matériaux et méthodes

III.2.1. Sélection du matériau à changement de phase

Dans cette étude, un MCP commercial, Micronal DS 5001 (de la société BASF) en poudre sèche a été utilisé (Figure III.1). Ce MCP est composé de cire de paraffine encapsulée dans une enveloppe de microcapsules de polyméthacrylate de méthyle (taille d'environ 5 μm) avec une température de fusion de 26 °C et une chaleur latente d'environ 110 kJ/kg. Les principales propriétés des microcapsules de MCP sont présentées dans le Tableau III.1. La chaleur spécifique apparente du MCP varie de manière significative avec la température, comme le montre la Figure III.2. Parmi les raisons du choix des paraffines comme MCP, nous mentionnons : températures de fusion dans la gamme de confort thermique, iii) non-réactivité chimique et sécurité, iv) chaleur de fusion latente élevée, v) bonne fiabilité thermique et, surtout, microencapsulation et utilisation facile en mélange avec du plâtre [39].



Figure III.1. Poudre de MCP microencapsulé utilisé (Micronal DS 5001).

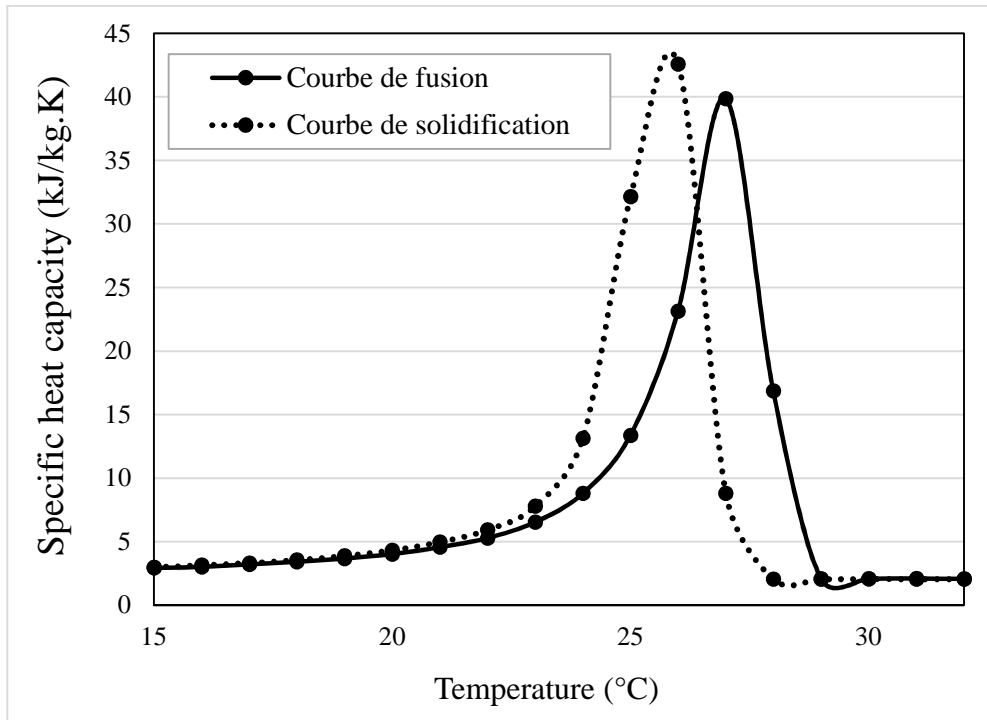


Figure III.2. Chaleur spécifique du Micronal DS 5001 avec une température de changement de phase de 26 °C sur une plage de température comprise entre 15 °C et 32 °C. (Source : BASF).

Tableau III.1. Caractéristiques thermophysiques du MCP Micronal DS 5001 (source : BASF).

MCP	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Type de produit	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion latente (kJ/kg)	Capacité de stockage globale (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.K)
Micronal DS 5001	250–350	Poudre	26	110	145	0,18

III.2.2. Sélection du plâtre

Le plâtre utilisé est principalement constitué d'hémihydrate bêta (CaSO₄, 1/2H₂O) et d'anhydrite (CaSO₄). Les autres composants présents proviennent des impuretés initialement contenues dans le gypse [105]. Les principales propriétés mesurées du plâtre sont présentées dans le Tableau III.2.

Tableau III.2. Propriétés thermophysiques du plâtre (valeurs mesurées à une température de 21 °C).

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Type de produit	Conductivité thermique (W/m.K)	Capacité thermique spécifique (J/kg.K)
1156	Panneau	0,534	1133

III.2.3. Préparation des échantillons de plâtre-MCP

Pour préparer les échantillons de plaques de plâtre-MCP, différents pourcentages (0 - 50 % en poids) de paraffine microencapsulée (Micronal DS5001) ont été mélangés au plâtre. Les échantillons (Figure III.3) ont été préparés selon la procédure suivante :

- 1) Choisir d'abord les moules avec les bonnes dimensions (forme parallélépipédique de 100 mm × 100 mm × 20 mm).
- 2) Préparez les différents matériaux qui constituent la formulation (plâtre, MCP et eau).
- 3) Mélanger une quantité bien déterminée de plâtre avec du MCP dans un récipient, le mélange étant continuellement agité à grande vitesse jusqu'à ce qu'il devienne homogène.
- 4) Ajouter de l'eau (la quantité d'eau était la même pour tous les autres échantillons).
- 5) Finalement, le mélange obtenu a été versé dans le moule et conservé dans une chambre climatique pendant 48 heures à 25 °C.



Figure III.3. Les échantillons réalisés pour la mesure des propriétés thermophysiques.

Les mélanges de plâtre-MCP ont été synthétisés en pesant et en mélangeant le plâtre, l'eau et le MCP microencapsulé dans les proportions indiquées dans le Tableau III.3.

Tableau III.3. Composition des mélanges plâtre-MCP testés.

MCP (%)	Composant		
	Plâtre (g)	MCP (g)	Eau (g)
0	250	0	155
10	225	25	
20	200	50	
30	175	75	
40	150	100	
50	125	125	

III.3. Détermination des paramètres thermophysiques

Les résultats des caractéristiques thermophysiques trouvés sont présentés ci-après. La description des appareils utilisés pour la détermination de ces caractéristiques est présentée dans l'annexe B et les incertitudes associées à ces mesures sont présentées dans l'annexe C.

III.3.1. Conductivité thermique

Les valeurs obtenues pour la conductivité thermique du mélange plâtre-MCP mesurée à 18 °C en fonction du pourcentage en poids de MCP et leurs incertitudes associées sont présentées sur la Figure III.4. Il est clairement constaté que l'ajout de particules de MCP dans la masse du plâtre entraîne une réduction non linéaire de la conductivité thermique. La diminution de la valeur de la conductivité thermique du mélange provoquée par l'utilisation de la paraffine microencapsulée (Micronal DS 5001) est un inconvénient vis-à-vis du transfert de chaleur, vu qu'elle ralentit le processus d'absorption et libération de chaleur. Cependant, la pente de la courbe de conductivité thermique commence à diminuer et se stabilise à une valeur de 40 % de MCP dans le plâtre et la conductivité thermique de la plaque de MCP-plâtre deviendra très proche de celle du MCP pur. Cette tendance convergente et cet effet stabilisant de la conductivité thermique du mélange peuvent être expliqués par la limite d'addition de MCP dans le plâtre, sachant que la densité du plâtre est de 3,14 fois supérieure à celle du MCP.

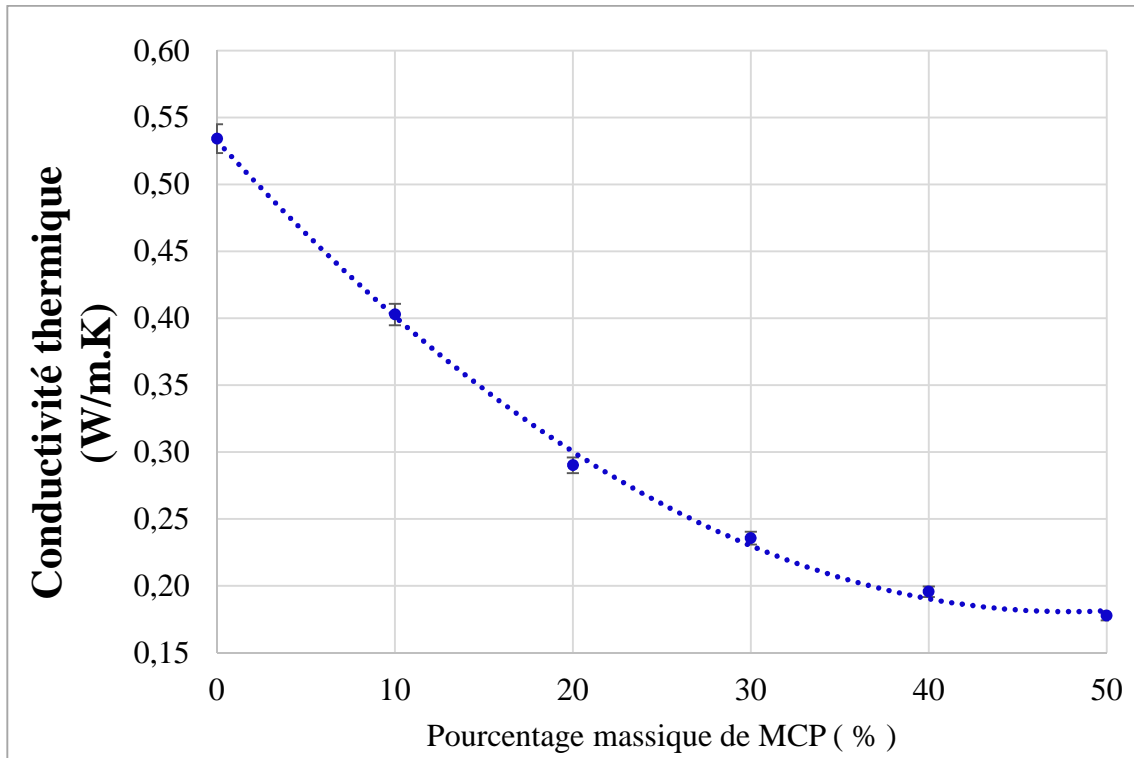


Figure III.4. Conductivité thermique pour les différents pourcentages de MCP dans le plâtre.

Un autre aspect de la conductivité thermique a été étudié, il concerne la variation de la conductivité thermique en fonction de la température. En effet, l'appareil Taurus TCA 300 DTX (Annexe B, Figure B.1) permet de sélectionner jusqu'à 5 paliers pour la mesure de la température. La Figure III.5 présente la conductivité thermique des différents mélanges MCP-plâtre en fonction de la température, entre 15 °C et 35 °C. Cette plage de température concerne l'état solide du MCP ($T < 26$ °C) et l'état liquide du MCP ($T > 26$ °C). Il est observé qu'il y a une légère variation de la conductivité thermique sur cette plage de température. Cette variation est estimée à 6,4 % pour un panneau de plâtre, 9,2 % pour un panneau de mélange de 10 % de MCP avec le plâtre, 9,5 % pour un mélange de 20 % de MCP, 7,5 % pour un mélange de 30 % de MCP, 6,3 % pour un mélange de 40 % de MCP et 7 % pour un mélange de 50 % de MCP.

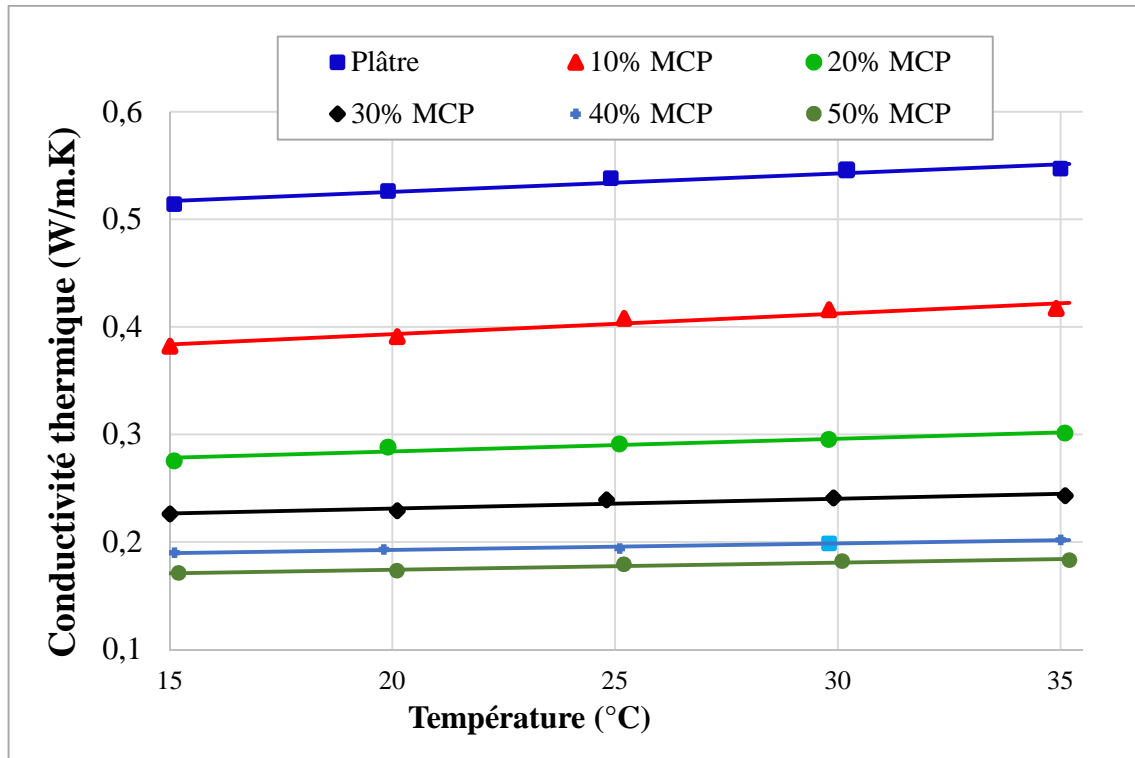


Figure III.5. Conductivité thermique en fonction de la température.

III.3.2. Chaleur spécifique

III.3.2.1. Chaleur spécifique à l'état solide

Les valeurs obtenues pour la chaleur spécifique du mélange plâtre-MCP en fonction du pourcentage en poids de MCP et leurs incertitudes associées sont présentées sur la Figure III.6. La chaleur spécifique a été déterminée en divisant la capacité thermique volumétrique mesurée par la densité des matériaux. La mesure de la capacité thermique volumétrique a été effectuée en utilisant l'appareil CT-METRE (voir annexe B, § B.2.1). Les valeurs trouvées montrent que la chaleur spécifique augmente de manière non linéaire avec l'augmentation du pourcentage en poids de MCP. Cette augmentation peut être expliquée par la valeur de la chaleur spécifique de MCP microencapsulé qui est plus importante que celle du plâtre

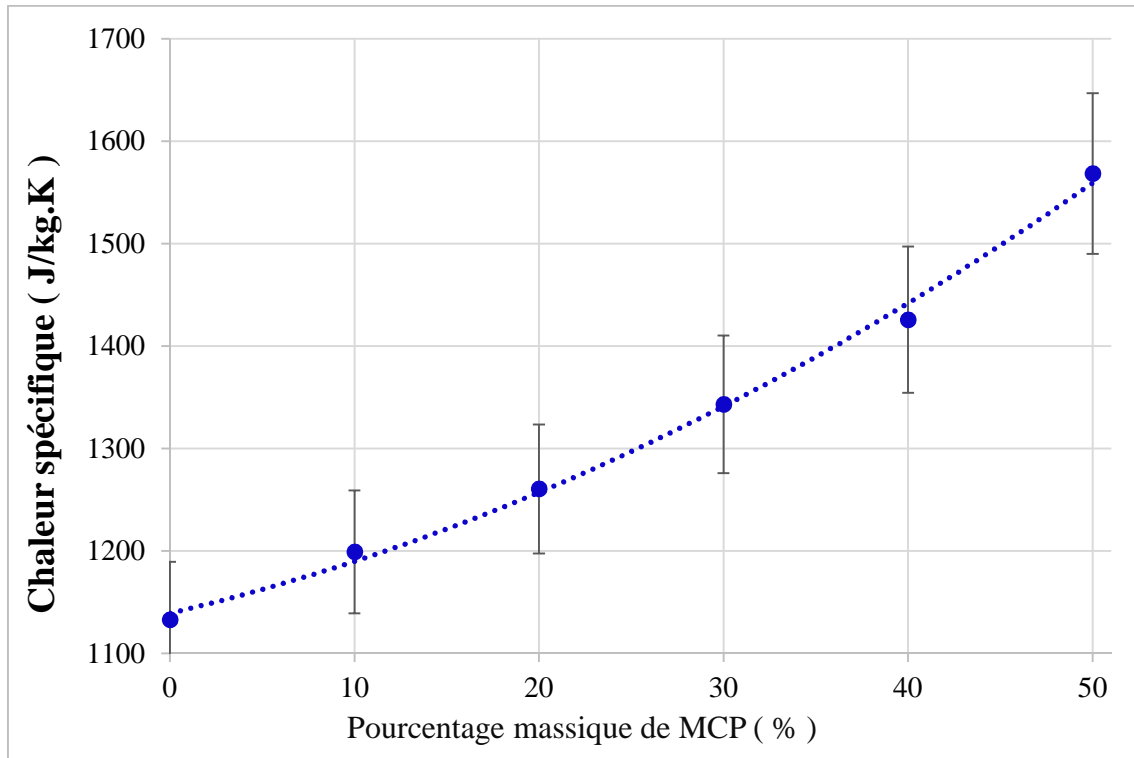


Figure III.6. Chaleur spécifique pour des panneaux de plâtre-MCP à la température de 18 °C.

III.3.2.2. Chaleur spécifique en fonction de la température

La Figure III.7 présente la chaleur spécifique mesurée en fonction de la température. Les courbes déterminées à partir de l'appareil DSC 214 Polyma sont influencées par la masse de l'échantillon et la vitesse de chauffage/refroidissement (d'après § I.4.1). Afin de bien caractériser le phénomène de l'hystérésis entre charge et décharge (l'évolution de la chaleur latente du MCP au cours du changement de phase, ainsi que la plage de température de changement de phase) des tests de DSC ont été réalisés. Le DSC utilisé pour les mesures permet de relever la puissance instantanée à fournir à l'échantillon de MCP utilisé en fonction de sa température pour que sa montée/descente en température soit en permanence constante. Cette montée/descente en température est imposée au préalable par l'utilisateur. Les détails sur l'utilisation de l'appareil sont donnés dans l'annexe B, § B.2.2. Sur la Figure III.7, l'effet de l'augmentation du pourcentage du MCP dans le mélange est présenté dans la plage de températures de fusion du MCP (22 °C et 29 °C). Cette figure indique que, comme prévu, l'augmentation de la quantité de MCP dans le mélange accroît de manière significative sa capacité calorifique spécifique (jusqu'à 3 fois pour la teneur en MCP entre 10 % et 50 %).

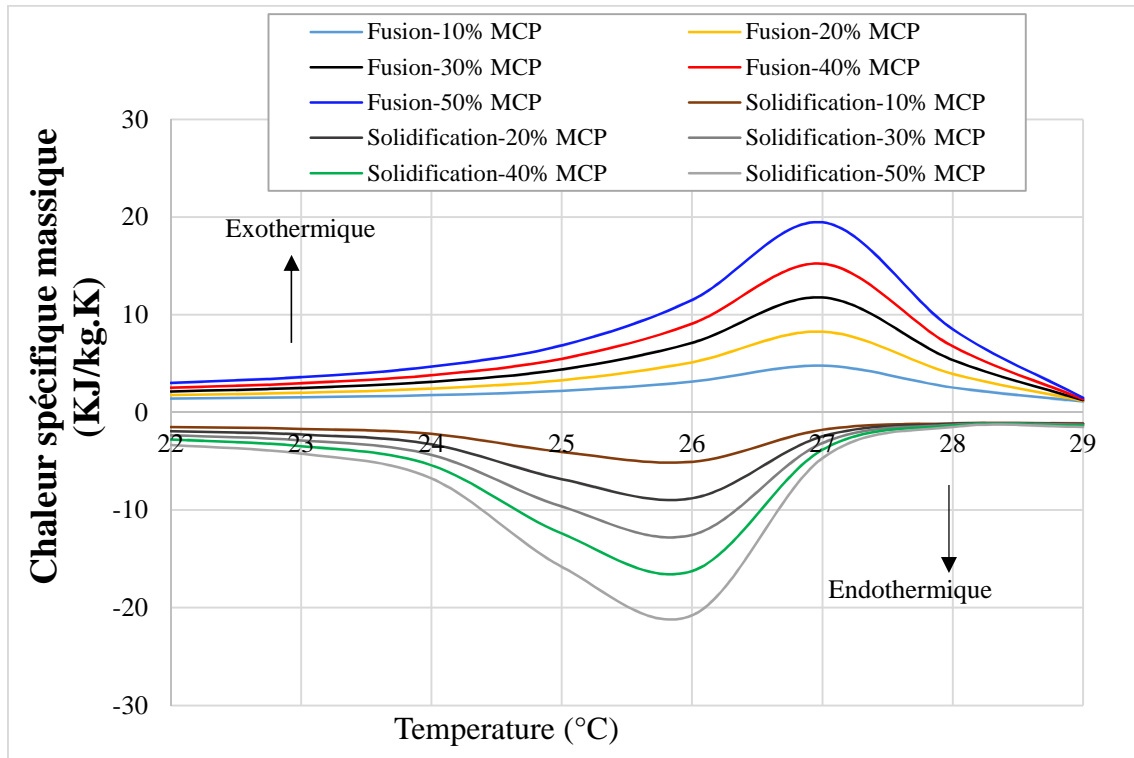


Figure III.7. Chaleur spécifique des mélanges de plâtre-MCP en fonction de la température (entre 22 °C et 29 °C).

III.3.3. Masse volumique

Les valeurs obtenues pour la masse volumique du mélange plâtre-MCP en fonction du pourcentage en poids de MCP sont présentées sur la Figure III.8. La densité des échantillons a été définie comme la masse divisée par le volume du mélange. Les instruments utilisés pour la détermination de la masse volumique sont présentés dans l'annexe B, § B.3. Comme observé sur cette figure, la densité décroît de manière non linéaire avec l'augmentation du pourcentage en poids de MCP. Dans ce cas, la diminution de la densité, lors de l'ajout de MCP, peut s'expliquer par la densité plus faible du MCP microencapsulé par rapport au plâtre utilisé. L'incertitude calculée pour la mesure de la densité est négligeable.

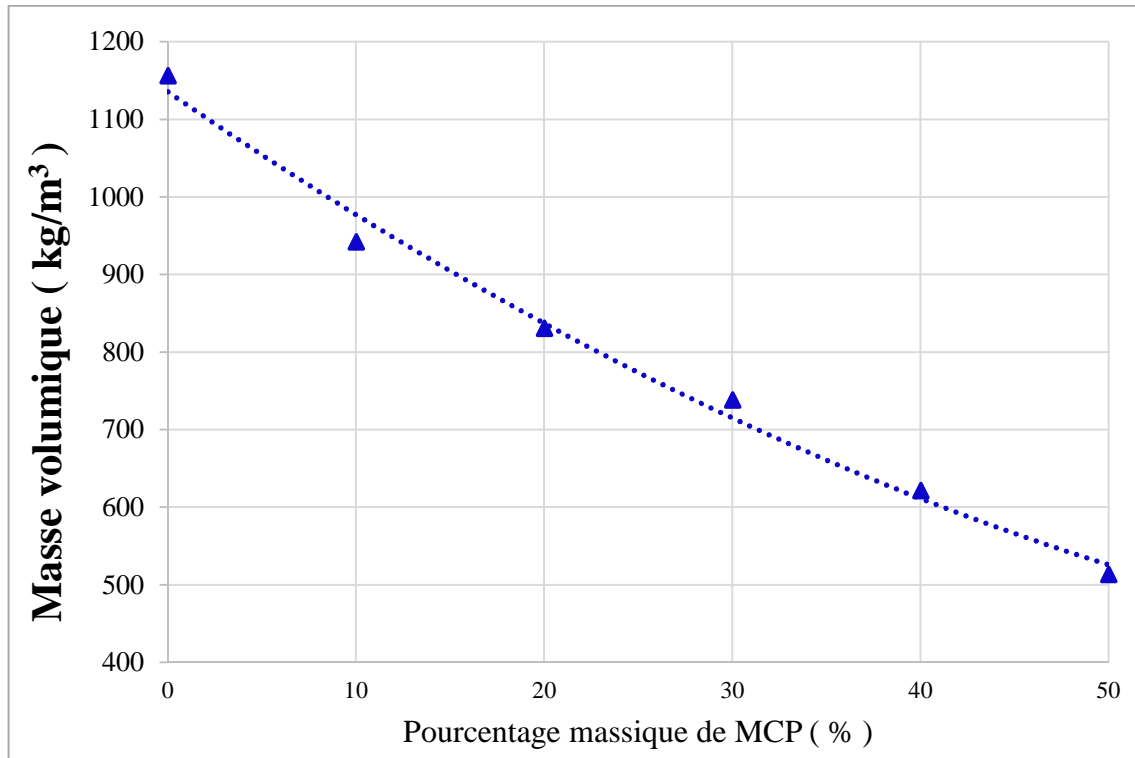


Figure III.8. Masse volumique des panneaux de plâtre-MCP.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les étapes de préparation des échantillons et l'utilisation des appareils pour la mesure de la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique pour les différents pourcentages de MCP dans le plâtre. Grâce à ces mesures, nous avons pu identifier l'influence du pourcentage massique de MCP sur les paramètres thermophysique mesurés. En effet, d'après les résultats trouvés, nous pouvons dire que l'augmentation de MCP dans le plâtre améliore la chaleur spécifique de ce dernier. En revanche, la conductivité thermique diminue ce qui engendre une diminution de la vitesse avec laquelle le panneau absorbe et libère de la chaleur. La masse volumique diminue aussi, ce qui limite la quantité de chaleur absorbé par unité de masse.

Le chapitre IV suivant traitera le comportement thermique des panneaux de composites plâtre-MCP vis-à-vis des fluctuations de températures estivale et hivernale pour la détermination des panneaux les plus adaptés à des situations définies.

**CHAPITRE IV. COMPORTEMENT THERMIQUE DES PANNEAUX DE
PLATRE-MCP**

IV.1. Introduction

Lorsqu'une paroi d'un bâtiment est soumise à des fluctuations de températures sur sa surface extérieure, il est important que la température de la surface intérieure reste la plus stable possible et aussi proche que possible des valeurs de températures conduisant au meilleur confort thermique des occupants. L'utilisation des MCP dont la température de changement de phase est proche de cette température conduisent à un confort optimal. L'étude du comportement de différents types de parois est donc nécessaire pour comprendre son évolution vis-à-vis des fluctuations de la température extérieure, variant sinusoïdalement, pour simuler les fluctuations journalières alors que la température intérieure est maintenue à une valeur constante. Le comportement thermique de différents types de parois (différentes compositions de MCP dans le plâtre) est donc étudié par simulation numérique et validé expérimentalement en faisant plusieurs hypothèses. La simulation numérique sera effectuée en utilisant le logiciel de simulation Ansys Fluent avec des conditions aux limites appropriées.

IV.2. Installation expérimentale utilisée pour la validation

IV.2.1. Description de la cellule de test

Le test expérimental consistait en une cellule d'essai à petite échelle, qui est un cube creux d'un volume interne de $660 \times 330 \times 330$ mm, illustré par la Figure IV.1 et la Figure IV.2. Les parois sont constituées de panneaux en polystyrène expansé (PSE) d'une épaisseur de 4 cm. La conductivité thermique et la densité du PSE sont faibles, respectivement 0,04 W/m.K et 20 kg/m³, ce qui signifie une très faible inertie thermique. Par conséquent, son influence sur le comportement thermique du panneau de test est très faible et peut être négligée.

Au milieu de la face supérieure de la cellule, un couvercle amovible a été mis pour permettre l'accès à l'intérieur de la cellule pour y insérer la plaque de plâtre-MCP de dimensions 330 mm \times 330 mm \times 12 mm.

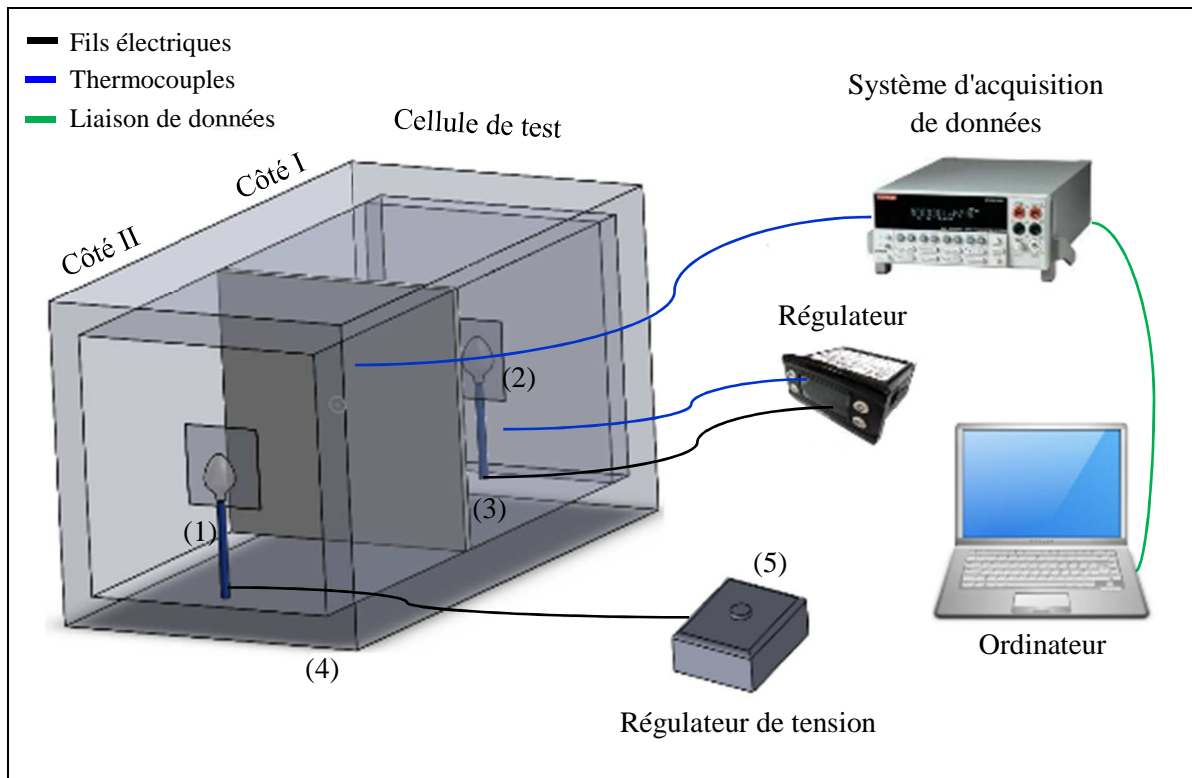


Figure IV.1. Installation expérimentale pour étudier le comportement thermique d'une cellule.

Avec :

- (1) Une lampe de 25 W pour imposer un profil de température extérieure souhaité sur le côté I de la cellule.
- (2) Une lampe de 10 W pour maintenir une température interne fixe sur le côté II de la cellule.
- (3) Panneau de plâtre incorporant un MCP.
- (4) Parois en polystyrène expansé de 4 cm d'épaisseur.
- (5) Contrôleur de tension connecté à la lampe (1) pour créer une variation sinusoïdale de la tension et donc une variation sinusoïdale de la température.



(a)

(b)

Figure IV.2. Photos de l'installation expérimentale : (a) côté face et (b) côté arrière.

IV.2.2. Equipements d'instrumentation utilisés

Les cellules de test ont été instrumentées avec 20 thermocouples de type T pour les murs et les mesures de température de l'air. Ces thermocouples étaient connectés à un multimètre multicanal Keithley 2700 (Figure IV.3a), qui peut enregistrer des données à des intervalles de temps réguliers et ajustables. Ces thermocouples ont été étalonnés avec un calibrateur à bloc sec Omega CL-730A (Figure IV.3b) avec une précision de $\pm 0,3$ °C.



(a)



(b)

Figure IV.3. Equipements utilisés : (a) multimètre Keithley 2700 et (b) Calibrateur à bloc sec Omega CL-730A.

IV.3. Modélisation numérique du comportement thermique

IV.3.1. Équations gouvernantes

Dans le cas de transfert de chaleur par conduction à travers un panneau contenant du MCP, l'équation de conservation de l'énergie a été exprimée sous la forme simplifiée suivante :

Équation d'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + S \quad (IV.1)$$

La discrétisation se réfère au processus de décomposition des termes de l'équation gouvernante en des formes algébriques discrètes plus simples. Elle peut également faire référence à la décomposition du domaine de flux en volumes de contrôle séparés, c'est-à-dire des maillages, comme illustré à la Figure IV.4, qui permet la production de champs de solutions localisées pour un domaine particulier.

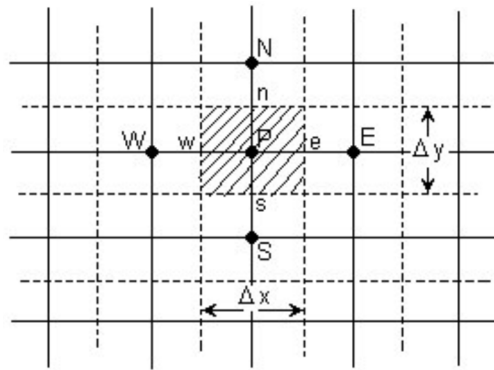


Figure IV.4. Schéma de discrétisation du maillage.

Sur la Figure IV.4, les valeurs du centre de la cellule sont notées par des lettres majuscules (P, E, N, W, S), tandis que les valeurs des faces sont indiquées par des lettres minuscules (e, n, w, s). La forme approximative des équations principales est appliquée à chaque volume de contrôle et les valeurs nominales sont requises pour obtenir une solution.

Le discrétisation de l'équation gouvernante (équation (IV.1)) par rapport à la direction y du volume de contrôle de la Figure IV.4 est comme suit :

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV = \iiint_{xyz} \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dz = [dx dy] \left[\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right)_n - \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \right] \quad (IV.2)$$

L'équation (IV.2) est donnée en termes de valeurs faciales. Cependant, le code CFD stocke les valeurs du centre de la cellule par opposition aux valeurs faciales. Ainsi, afin d'utiliser correctement les équations gouvernantes, les valeurs nominales doivent être calculées à partir des valeurs du centre de la cellule (Guide de la théorie ANSYS FLUENT, 2010). Ceci est accompli par un processus de linéarisation, qui simplifie les termes de l'équation gouvernante en termes algébriques linéaires à travers divers schémas de calcul de gradient.

IV.3.2. Cas étudiés, les conditions d'essai et les hypothèses de simulation

IV.3.2.1. Cas d'étude

Différents types de parois ont été simulés, avec ou sans matériaux à changement de phase. On peut classer, selon trois colonnes, les cas qui ont été analysés à l'aide de la simulation numérique. Ces cas de simulation sont donnés dans le Tableau IV.1 ci-dessous :

Tableau IV.1. Différents cas de simulation.

Pourcentage P_i (%)	Epaisseur E_{p_i} (mm)	Température de fusion de MCP T_F (°C)
0 (sans MCP)	10	23
10	30	26
20	50	-
30	70	-
40	90	-
50	-	-

Pour étudier l'influence des changements de phase sur le comportement d'un panneau de plâtre-MCP, nous avons réalisé des simulations dans lesquelles ledit panneau est soumis à une variation de température extérieure sinusoïdale pendant une période 48 heures (Figure IV.5), tandis que la température intérieure est maintenue constante ainsi que les coefficients d'échange thermique intérieur et extérieur (voir le § IV.3.2.3.) :

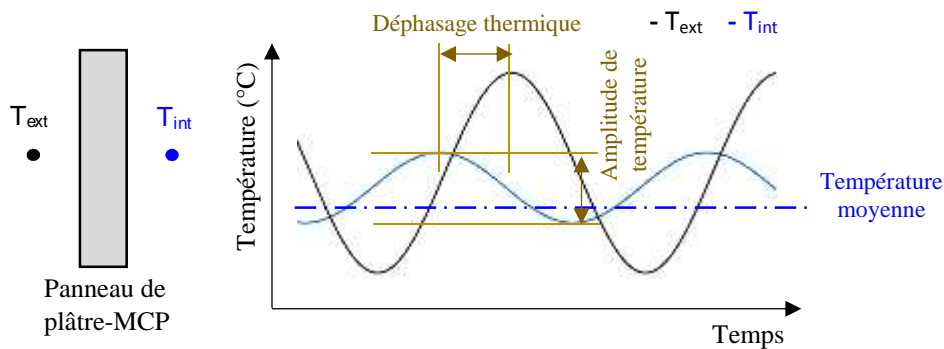


Figure IV.5. Sollicitation sur le panneau de plâtre-MCP.

N.B : Le déphasage thermique est la capacité d'une paroi d'une habitation à ralentir les transferts de chaleur. Ce déphasage thermique est notamment utile en période d'été pour

empêcher la pénétration de l'énergie thermique du rayonnement solaire le jour et la rejeter la nuit.

IV.3.2.2. Modèle d'étude

Le modèle des simulations utilisé pour cette étude est présenté sur la Figure IV.6. Il s'agit d'un modèle de panneau en 2D soumis à un transfert de chaleur par conduction à travers un panneau de plâtre-MCP. Ce panneau échange de la chaleur avec l'air dont les échanges superficiels par convection sont $\frac{1}{h_{int}}$ et $\frac{1}{h_{ext}}$.

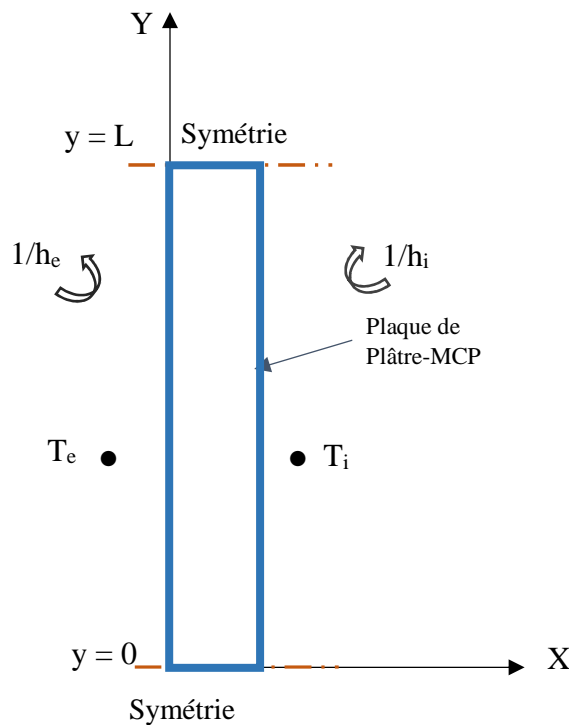


Figure IV.6. Modèle géométrique de la paroi standard de plâtre-MCP.

IV.3.2.3. Les conditions d'essais

Le transfert de chaleur à travers les parois est supposé être bidimensionnel par conduction en régime transitoires. Le système d'équations différentielles évolue dans le temps et dans l'espace à partir des conditions aux limites et aux conditions initiales. Toutes les valeurs des conditions initiales sont constantes. Ces conditions sont présentées sur la Figure IV.6 et elles sont respectivement données comme suit :

- Le coefficient $\frac{1}{h_{int}} = 10 \frac{W}{m^2.K}$.

- Le coefficient $\frac{1}{h_{\text{ext}}} = 16,67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$.
- La température de l'air intérieur est constante : pour la condition d'été $T_{\text{int}} = 24 \text{ °C}$ et pour la condition d'hiver $T_{\text{int}} = 21 \text{ °C}$.
- le long des lignes de symétrie ($y = 0$ and $y = L$) :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=L} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

- Température de l'air extérieur variant sinusoidalement :

$$T_{\text{ext}} = T_{\text{moy}} + AT \times \sin\left(\frac{2 \times \pi \times t}{86400}\right) \quad (\text{IV.4})$$

Où la température moyenne (T_{moy}) de l'air est :

- prise égale à 29 °C en période d'été, pour une variation de de température entre $T_{\text{min}} = 22 \text{ °C}$ et $T_{\text{max}} = 36 \text{ °C}$ (l'amplitude de température (AT) est prise égale à 7 °C).
- prise égale à 18 °C en période d'hiver, pour une variation de de température entre $T_{\text{min}} = 12 \text{ °C}$ et $T_{\text{max}} = 24 \text{ °C}$ (l'amplitude de température (AT) est prise égale à 6 °C).

IV.3.2.4. Hypothèses simplificatrices

Dans ce modèle, des hypothèses ont été considérées afin d'en simplifier l'étude. Les hypothèses suivantes ont été formulées pour les modèles mathématiques :

- L'écoulement est bidimensionnel.
- Le MCP est considéré comme homogène et isotrope.
- Le fluide est newtonien et incompressible.
- Le transfert thermique dans l'ensemble du panneau se fait par conduction.
- La densité et la conductivité thermique du MCP sont les mêmes pour les phases solide et liquide.

IV.3.3. Maillage et outil de résolution

Lors de la simulation, le maillage a un impact direct sur la convergence, la précision de la solution et le temps de calcul. Etant donné que la géométrie du panneau choisi est rectangulaire, un maillage structuré, permettant d'avoir un maillage régulier, convient bien pour la discrétisation (Figure IV.7). Le problème à étudier réside dans la résolution de l'équation aux dérivées partielles de la conservation de l'énergie. Le principe de la méthode consiste à résoudre cette équation sur un maillage de surface en 2D (réalisé avec un logiciel spécifique Gambit 2.4).

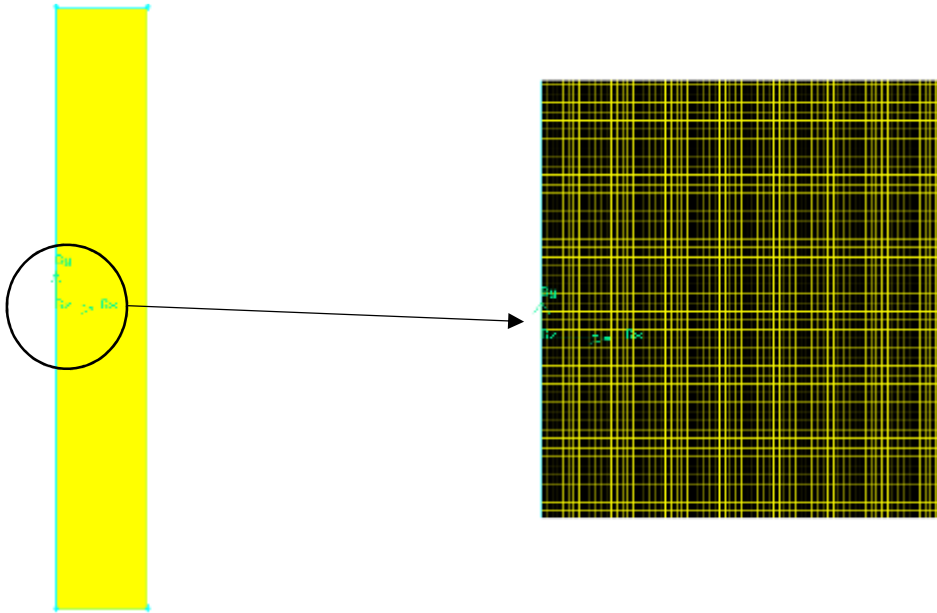


Figure IV.7. Maillage en 2D du panneau.

Le logiciel de simulation utilisé pour cette étude est Ansys Fluent. Ce logiciel est composé comme tout logiciel de CFD de trois éléments : un préprocesseur, un solveur et un postprocesseur. Il offre plusieurs algorithmes pour la discrétisation des équations régissant le problème et il permet également l'utilisation des fonctions externes préalablement définies par l'utilisateur (UDF) dans un langage de type C. Ceci nous permettra d'imposer des conditions aux limites telles que des profils de températures qui évoluent dans le temps, pour se rapprocher au mieux, des conditions réelles d'un côté et d'introduire un terme source dans l'équation de la chaleur pour prendre en compte le phénomène d'absorption/libération de la chaleur dans les matériaux à changement de phase, d'un autre côté.

Dans cette partie d'étude, le schéma de discrétisation Second Order Upwind a été utilisé. En effet, des recherches ont montré que ce schéma est le plus approprié pour la simulation de changement de phase. Par ailleurs, pour la discrétisation temporelle, le schéma Euler implicite est utilisé. Il a été montré dans plusieurs travaux qu'il n'y a pas de conditions à imposer sur les intervalles du temps et de l'espace en utilisant une méthode de résolution implicite [32].

Le critère de convergence absolu utilisé pour la résolution de l'équation d'énergie était 1×10^{-8} . L'algorithme SIMPLE avec un solveur a été utilisé pour résoudre numériquement l'équation d'énergie ci-dessus avec les conditions initiales et aux limites.

IV.3.4. Validité du modèle numérique

Afin de vérifier le modèle établi, une expérience à petite échelle a été mise en place afin de réaliser les différentes mesures (§ IV.2). Les mesures ont été intégrées dans le modèle numérique dont la validation consiste à comparer les résultats numériques avec les données expérimentales mesurées dans cette étude afin d'avoir une meilleure approche de la simulation numérique. Avant de procéder à la validation numérique, un test de stabilité, de convergence et d'indépendance du maillage a été effectué. Une fois que le modèle est prêt, il est utilisé pour valider les résultats.

La Figure IV.8 montre la comparaison entre les températures obtenues expérimentalement du côté II (Figure IV.1) et les résultats de la modélisation numérique à deux dimensions. Les données de mesures expérimentales sont enregistrées avec des intervalles de temps réguliers de 6 minutes, soit 10 mesures par heure. Nous pouvons observer qualitativement que, malgré le fait que la température d'entrée ne soit pas stable (en raison de petites fluctuations), la simulation numérique est conforme aux données expérimentales. Malgré la bonne concordance prédite par les simulations numériques, il existe certaines différences entre les résultats expérimentaux et numériques. Quantitativement, la différence entre les données numériques et expérimentales a été quantifiée par i) l'écart absolu maximum (EAMA), ii) l'écart absolu minimum (EAMI), iii) la précision moyenne (PM) et iv) l'écart moyen relatif (EMR). Ces écarts sont donnés par les équations, (IV.5), (IV.6), (IV.7) et (IV.8), suivantes :

$$EAMA = \text{Max}_{i=1, 2, \dots, n} \{ |T_{\text{num}} - T_{\text{exp}}| \} \quad (\text{IV.5})$$

$$EAMI = \text{Min}_{i=1, 2, \dots, n} \{ |T_{\text{num}} - T_{\text{exp}}| \} \quad (\text{IV.6})$$

$$PM = \text{Moyenne}_{i=1, 2, \dots, n} \{ |T_{\text{num}} - T_{\text{exp}}| \} \quad (\text{IV.7})$$

$$EMR = \text{Moyenne}_{i=1, 2, \dots, n} \left\{ \left| \frac{T_{\text{num}} - T_{\text{exp}}}{T_{\text{exp}}} \right| \times 100\% \right\} \quad (\text{IV.8})$$

Où, T_{num} et T_{exp} sont respectivement les températures numériques et expérimentales.

La comparaison des valeurs de température de surface pour les mesures expérimentales et la simulation numérique montrent que le modèle numérique proposé est capable de prédire les mesures avec une précision de :

- +0,6 °C de EAMA et -0,4 °C de EAMI pour la température de surface du panneau de MCP du côté I et pour une précision moyenne de $\pm 0,1$ °C, soit un écart moyen relatif de 0,9 % pour une différence de température de 7,7 °C entre le maximum et le minimum de cette température de surface.

- +0,2 °C de EAMA et -0,9 °C de EAMI pour la température de surface du panneau MCP de la côté II et pour une précision moyenne de $\pm 0,2$ °C, soit un écart moyen relatif de 3,9 % pour une différence de température de 4,2 °C entre le maximum et le minimum de cette température de surface.

Dans l'ensemble, les comparaisons montrent qu'il n'y a que très peu de différence de température et que le modèle peut être considéré comme fiable.

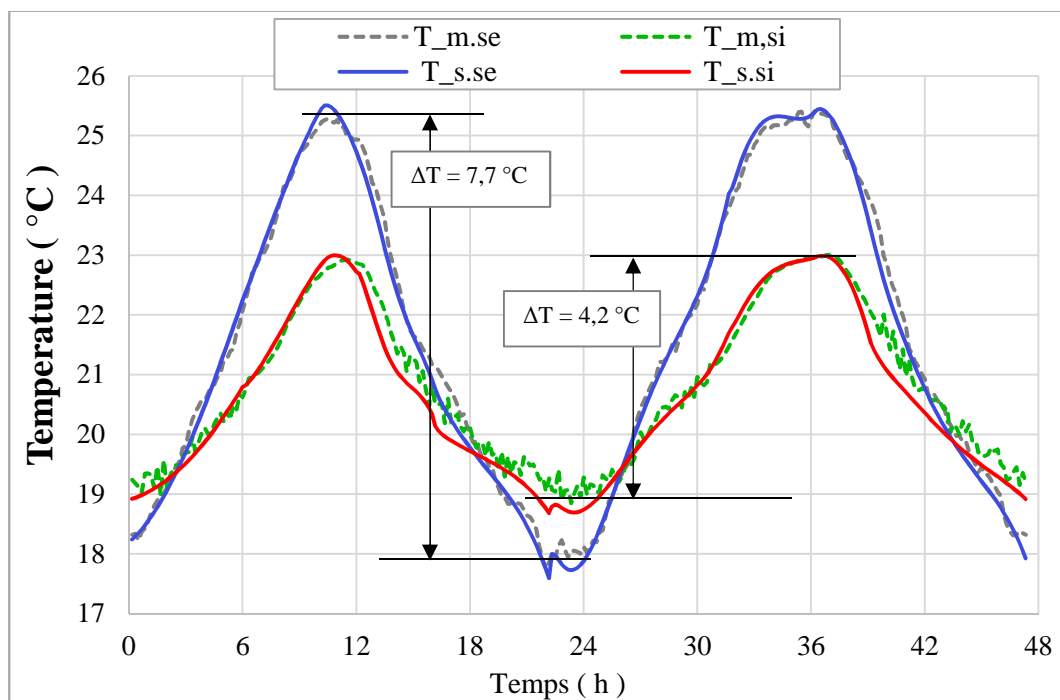


Figure IV.8. Comparaison du modèle numérique et des résultats expérimentaux pour le panneau de plâtre avec 30 % de MCP.

Avec :

- T_{m.si} est la température mesurée au centre de la surface interne.
- T_{m.se} est la température mesurée au centre de la surface externe.
- T_{s.se} est la température simulée au centre de la surface externe.
- T_{s.si} est la température simulée au centre de la surface interne.

IV.4. Résultat et interprétation des simulations

IV.4.1. Comportement thermique des panneaux de plâtre incorporant des MCP

Avant de procéder à l'amélioration du transfert thermique à travers les panneaux de plâtre-MCP, il est nécessaire de comprendre le comportement thermique de ces panneaux lors d'une variation de la température extérieure en fonction du temps. Les résultats du comportement thermique de ces panneaux sont illustrés dans la Figure IV.9 à la Figure IV.14.

La représentation du contour de température permet de montrer la répartition de la température à travers l'épaisseur des panneaux. La Figure IV.9 et la Figure IV.10 montrent les images de contour bidimensionnelles de la distribution de la température à $t = 12$ h pour les différents cas d'étude cité ci-dessus (Tableau IV.1). La Figure IV.9 montre les six cas de pourcentage de MCP dans le plâtre (de 0 à 50 %) pour une épaisseur des panneaux de 50 mm alors que la Figure IV.10 montre les cinq cas d'épaisseur de panneaux de plâtre-MCP (10 au 90 mm) pour un pourcentage de MCP de 30 %.

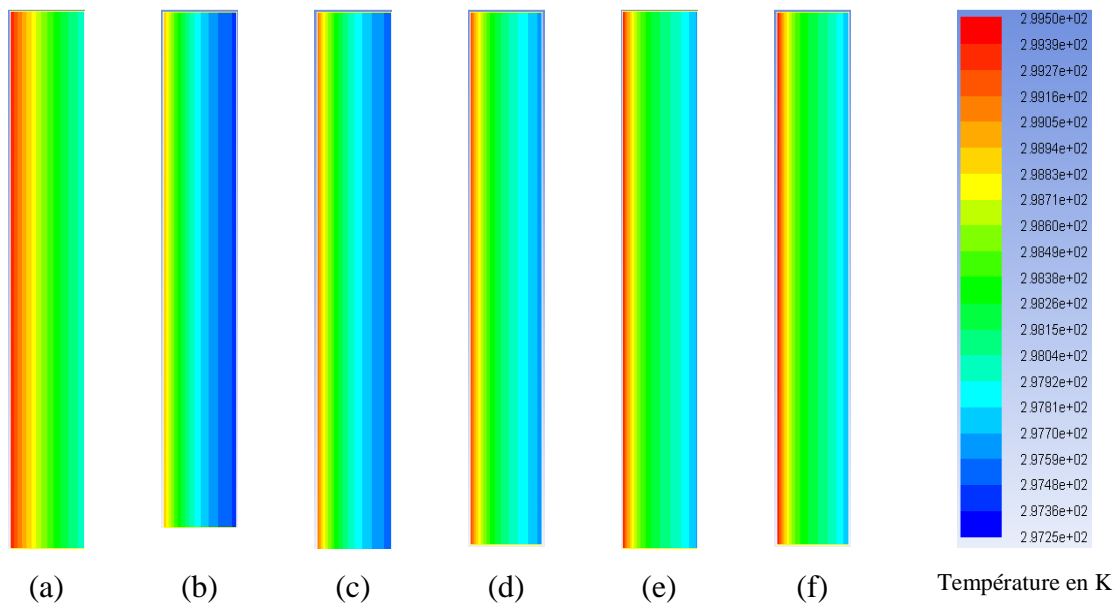


Figure IV.9. Contour de température à $t = 12$ h : (a).Plâtre, (b) 10 % de MCP, (c) 20 % de MCP, (d) 30 % de MCP, (e) 40 % de MCP et (f) 50 % de MCP dans le plâtre.

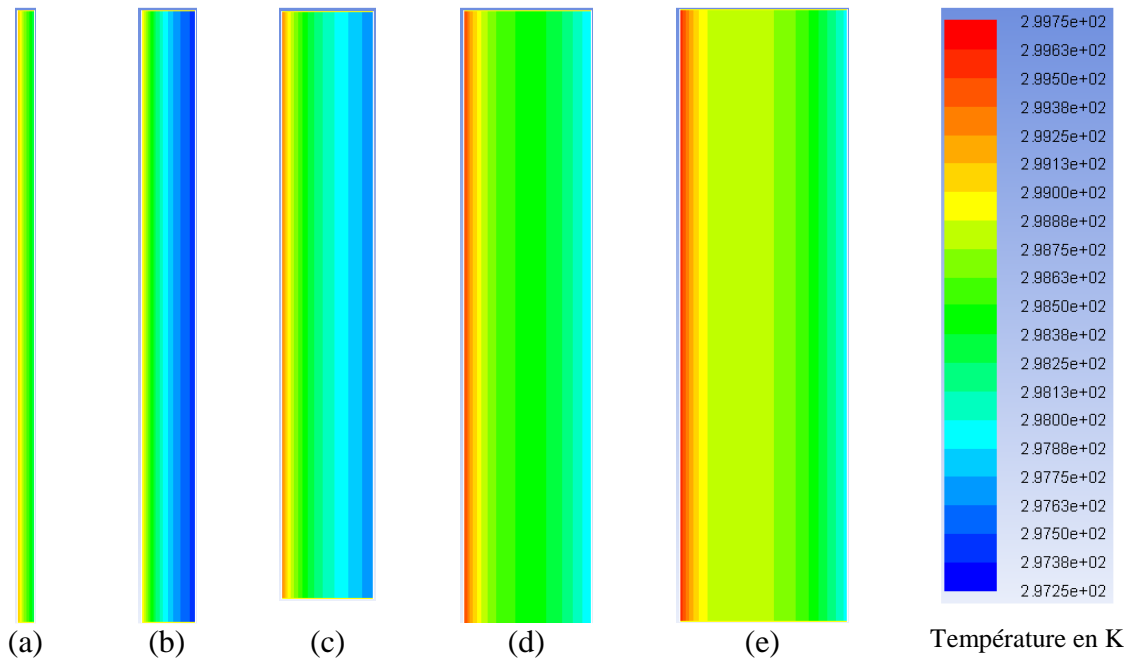
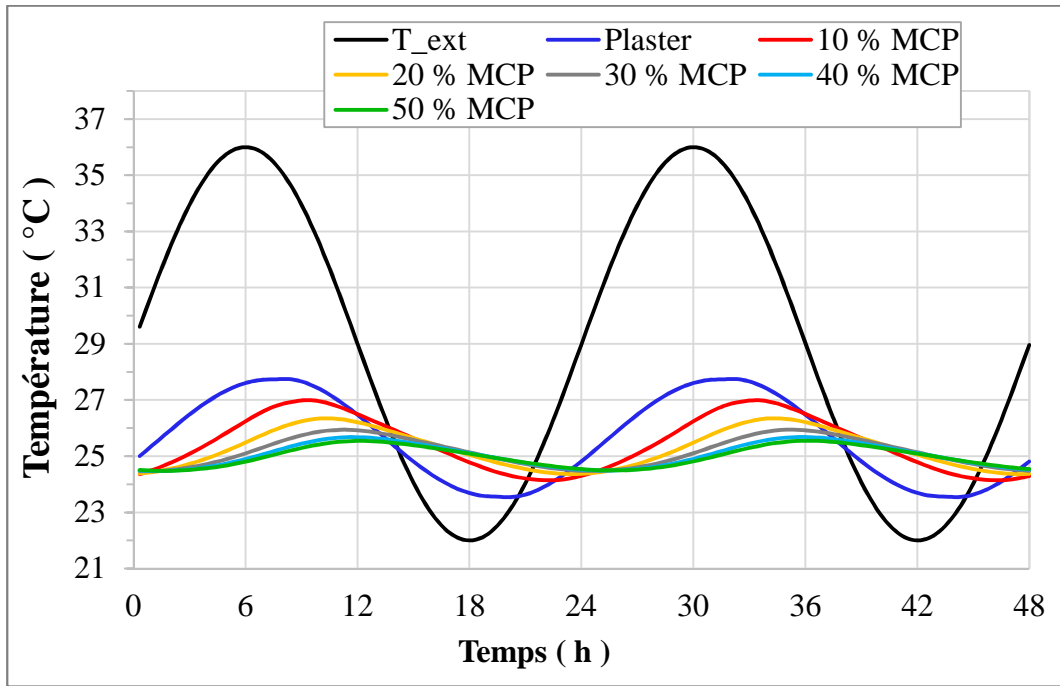


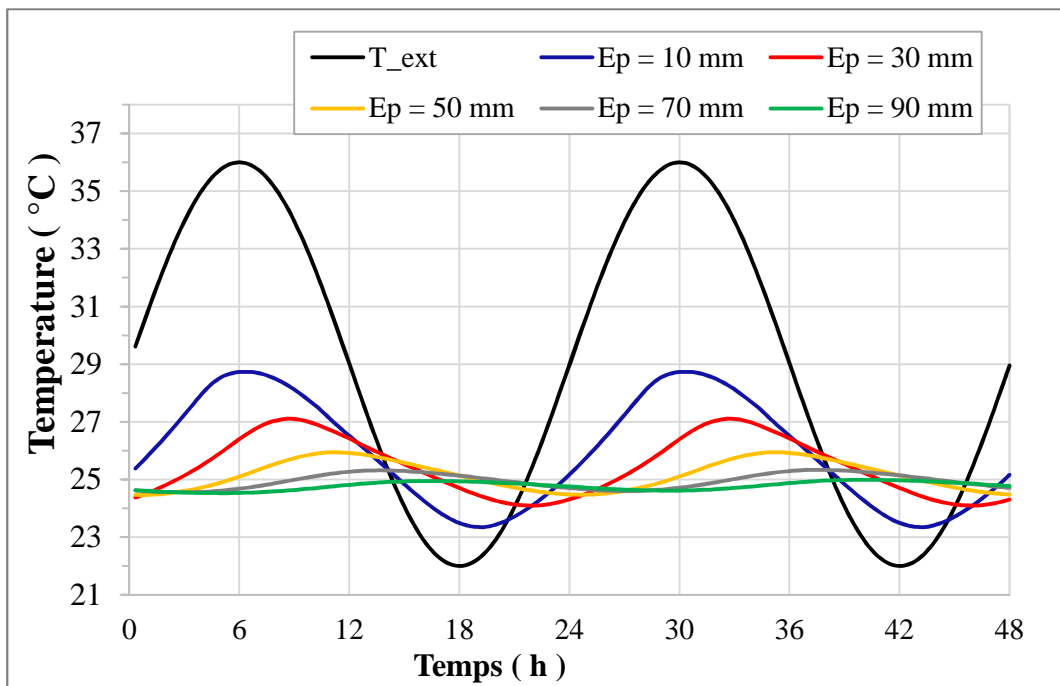
Figure IV.10. Contour de température à $t = 12$ h : (a) $E_p = 10$ mm, (b) $E_p = 30$ mm, (c) $E_p = 50$ mm, (d) $E_p = 70$ mm et (e) $E_p = 90$ mm.

La Figure IV.11a et la Figure IV.11b, montrent le comportement thermique des panneaux à travers le temps par la comparaison des variations de température moyenne de la surface interne des panneaux de plâtre-MCP pour (a) une épaisseur $E_p = 50$ mm pour le pourcentage de MCP dans le plâtre de 10, 20, 30, 40 et 50 % et (b) un pourcentage de MCP dans le plâtre de 30 % pour des épaisseurs de 10, 30, 50, 70 et 90 mm. Il a été constaté sur la Figure IV.11a que plus le pourcentage de MCP dans le plâtre augmente, plus la température moyenne de la surface intérieure du panneau devient stable. Il a été constaté aussi que les oscillations observées présentent également de légers déphasages avec l'oscillation de la température extérieure.

De même, sur la Figure IV.11b, il a été constaté que lorsque l'épaisseur du panneau augmente, la température de la surface intérieure devient stable et les oscillations observées présentent également des déphasages avec l'oscillation de la température extérieure.



(a)



(b)

Figure IV.11. Variations de température de la surface interne des panneaux de plâtre-MCP pour : (a) l'épaisseur $E_p = 50$ mm pour un pourcentage de MCP variable (b) pourcentage de MCP de 30 % pour une épaisseur variable.

Ces oscillations et déphasages sont résumés respectivement sur la Figure IV.12 et la Figure IV.13. Sur ces figures, nous remarquons, qu'en fonction des oscillations et des déphasages thermiques pour les différents cas étudiés, un pourcentage supérieur à 30 % présente peu d'intérêt vu que l'oscillation ne dépasse pas 0,5 °C entre un panneau de 30 % et 50 % de MCP dans la plâtre et que le déphasage thermique, ne dépasse pas une heure (1 h) entre un panneau de 30 % et 50 % de MCP dans le plâtre (pour un panneau d'épaisseur de 90 mm).

Concernant l'épaisseur du panneau, nous constatons qu'une épaisseur supérieure à 70 mm présente peu d'intérêt vu que l'oscillation ne dépasse pas 0,6 °C entre des panneaux d'épaisseurs de 70 mm et 90 mm et que le déphasage thermique ne dépasse pas deux heures (2 h) entre des panneaux d'épaisseurs de 70 mm et 90 mm (pour un panneau de 50 % de MCP dans le plâtre).

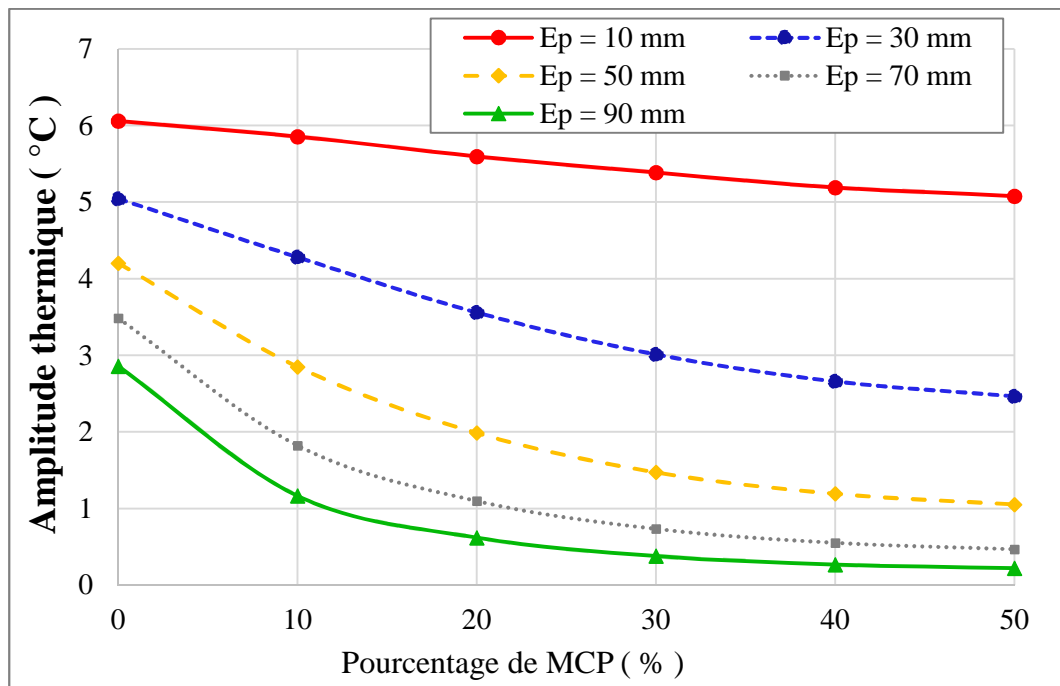


Figure IV.12. Oscillations de la température de la surface interne des panneaux étudiés.

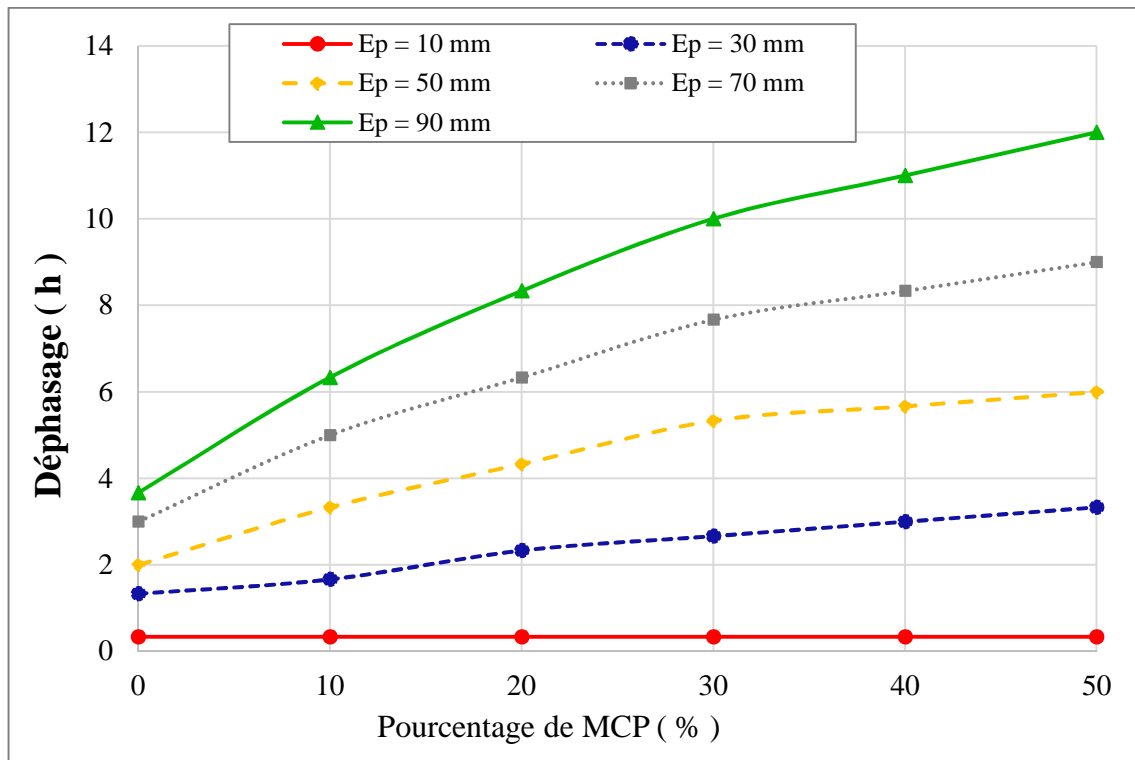


Figure IV.13. Déphasage thermique de la surface interne des panneaux étudiés.

IV.4.2. Effet de la température de fusion

Le choix de la valeur optimale de la température de fusion des MCP dépend de la température intérieure moyenne qui varie d'un type de bâtiment à l'autre et d'une saison à l'autre.

Des simulations numériques ont été effectuées avec un autre MCP nommé Micronal DS 5040, d'une température de fusion de 23 °C (les caractéristiques du Micronal DS 5040 sont données en annexe A).

La Figure IV.14a et la Figure IV.14b présentent respectivement les amplitudes thermiques pour deux MCP (Micronal DS 5001 d'une $T_f = 26$ °C et Micronal DS 5040 d'une $T_f = 23$ °C) pour les périodes d'été et d'hiver (voir § IV.3.2.3.). On remarque sur la Figure IV.14a, que pour un profil donné de variation de la température estivale, le MCP d'une température de fusion $T_f = 26$ °C a une amplitude moins importante par rapport à celui ayant $T_f = 23$ °C. Ceci signifie qu'il absorbe plus d'énergie thermique. La différence entre les deux amplitudes peut atteindre 1,4 °C pour un panneau de 90 mm d'épaisseur et 30 % de MCP. En revanche, pour un profil donné de variation de la température hivernale, le MCP d'une température de fusion $T_f = 23$ °C a une amplitude moins importante par rapport à celui ayant $T_f = 26$ °C, la différence entre les deux

amplitudes peut atteindre 1,0 °C pour un panneau de 90 mm d'épaisseur et 30 % de MCP. Ce qui signifie que le Micronal DS 5001 d'une $T_f = 26$ °C est mieux adapté aux conditions estivales alors que le Micronal DS 5040 d'une $T_f = 23$ °C est mieux adapté aux conditions hivernales.

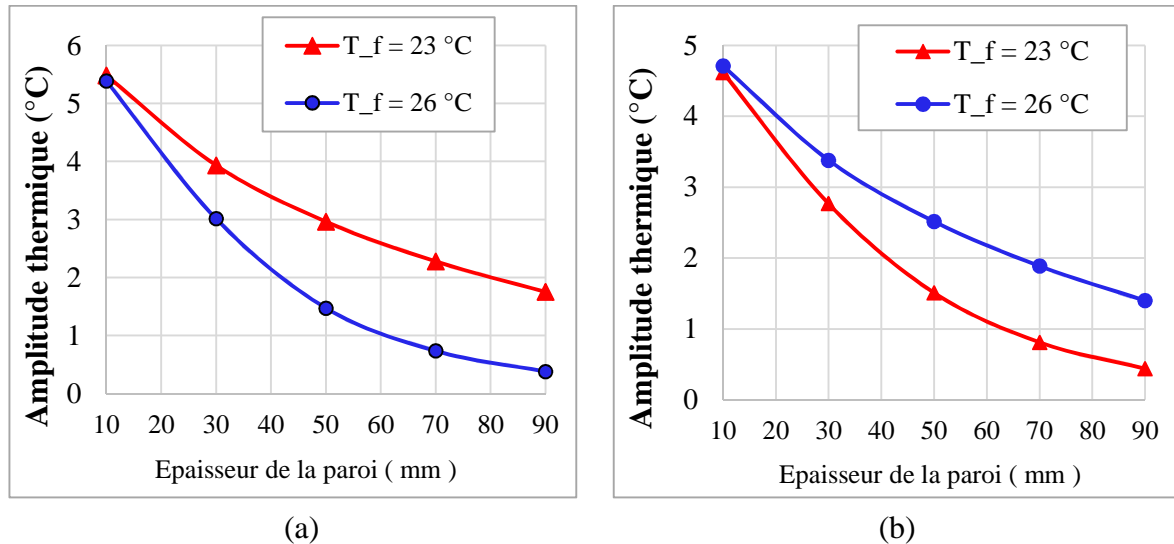


Figure IV.14. Amplitude thermique pour deux types de MCP à température de fusion de 23 °C et 26 °C pour : (a) période d'été et (b) période d'hiver.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une démarche préliminaire a été effectuée pour étudier la pertinence du concept de panneau contenant un MCP. Pour cela, des simulations numériques ont été réalisées avec le logiciel Ansys Fluent sur différents types de panneaux. Les cas suivants ont été respectivement étudiés :

- paroi en plâtre,
- parois constituées d'un mélange de différents pourcentages de MCP dans le plâtre (10, 20, 30, 40 et 50 %) d'une épaisseur de 50 mm,
- parois constituées d'un mélange de 30 % de MCP dans le plâtre pour différentes épaisseur (10, 30, 50, 70 et 90 mm).

Avant d'effectuer une étude paramétrique, une validation de modèle numérique a été effectuée. Les simulations numériques ont montré clairement que pour absorber l'énergie échangée pendant un cycle journalier de 24 heures, la quantité de MCP ainsi que l'épaisseur du panneau doivent être suffisantes. Il a été aussi montré que le choix de la température de fusion influe sur l'absorption de l'énergie thermique, traduit par l'amplitude de température.

**CHAPITRE V. AMELIORATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE
DES PANNEAUX DE PLATRE INCORPORANT DES MCP**

V.1. Introduction

Après avoir étudié les propriétés thermophysiques des panneaux de plâtre-MCP et effectué des simulations pour déterminer le comportement thermique de ces panneaux, il a été constaté que les propriétés thermiques ont une importance majeure dans le comportement thermique d'un panneau incorporant un MCP et influencent leurs performances. Plusieurs études ont été entreprises afin d'améliorer l'absorption et la libération de chaleur pour les panneaux incorporant un MCP. Le but ultime de ces études était de développer de nouvelles méthodes pour augmenter la conductivité thermique du MCP, pour une meilleure absorption de la chaleur par conduction et une meilleure efficacité des systèmes d'énergie de stockage de chaleur. La faible conductivité thermique du MCP, de l'ordre de 0,2 W/m.K, en moyenne, est un inconvénient pour stocker ou libérer de l'énergie thermique et limite ses applications. Pour surmonter cet inconvénient et améliorer le stockage et/ou la libération de l'énergie thermique, la solution proposée dans cette recherche consiste à améliorer le transfert de chaleur par convection sur la surface du MCP afin de compléter le cycle de charge-décharge. La solution technique proposée consiste à perforer le panneau de plusieurs petites perforations pour permettre à l'air de les traverser lors de la ventilation d'un local. Cette technique produit une surface de transfert de chaleur accrue entre le panneau et l'air, conduisant à une absorption de chaleur par convection et à une libération de chaleur plus importante autour de la plaque de plâtre-MCP.

V.2. Installation expérimentale

V.2.1. Description de la cellule de test

Le dispositif expérimental présenté dans la Figure V.1a été fabriqué à partir de celui qui est présenté dans la Figure IV.1. Deux cellules de tests ont été utilisées (Figure V.1), la première cellule a été utilisée pour tester le comportement thermique d'un panneau de plâtre-MCP perforé et la seconde cellule a été utilisée pour tester le comportement thermique d'un panneau de plâtre-MCP standard (sans perforations). Ces cellules de test ont été instrumentées par :

- (1) un régulateur de tension qui est un appareil électrique pour contrôler l'intensité électrique afin de créer une variation sinusoïdale de l'intensité,
- (2) un système d'acquisition de données utilisé pour mesurer la température en différents points des cellules par l'intermédiaire de thermocouples,
- (3) un ordinateur utilisé pour récupérer les valeurs des mesures,

- (4) une boîte contenant un ventilateur, pour amener de l'air, et une lampe de 120 W pour chauffer l'air de ventilation,
- (5) des tubes pour le passage de l'air,
- (6) un panneau de plâtre-MCP perforée,
- (7) un panneau de plâtre-MCP standard (sans perforations).
- (8) et enfin, une ouverture de sortie d'air.

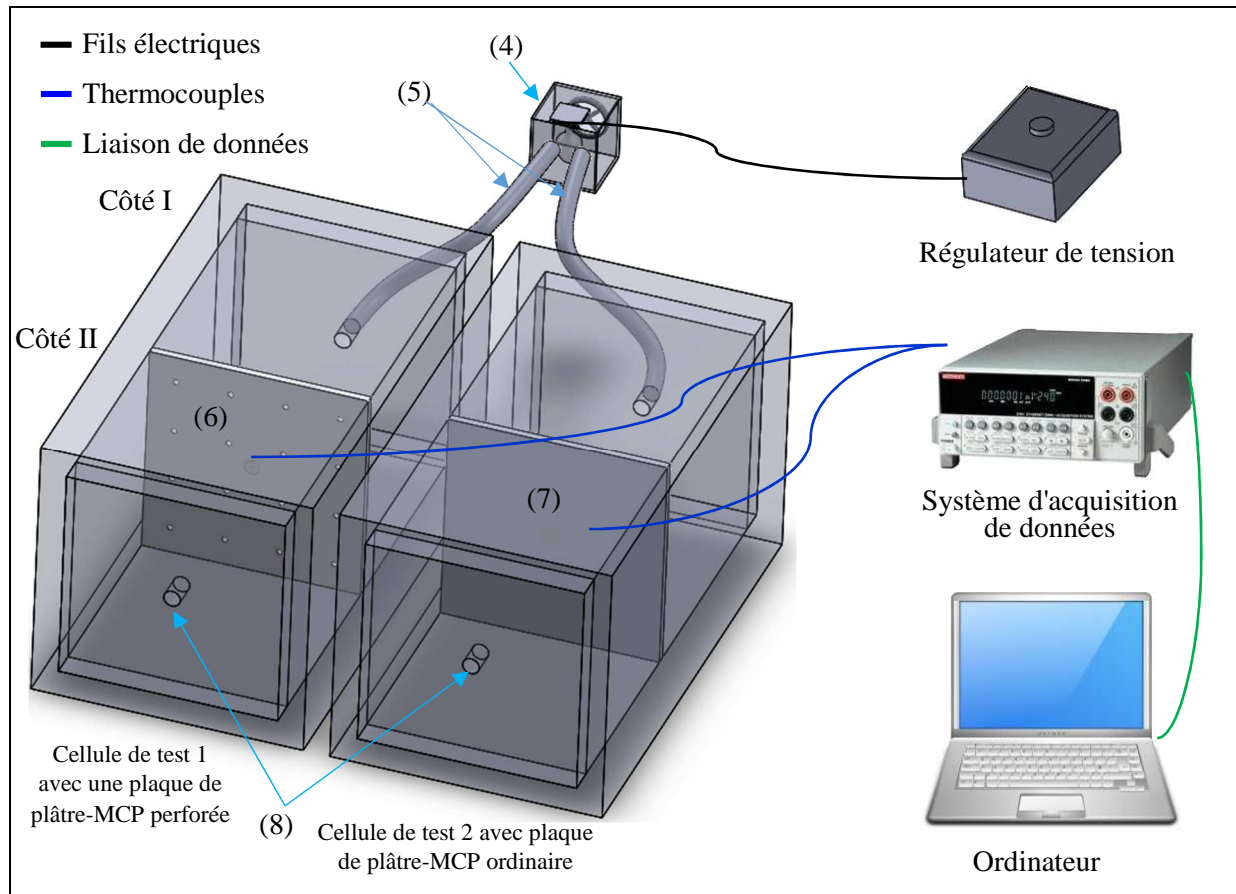


Figure V.1. Installation expérimentale pour l'étude du comportement thermique des cellules.

V.2.2. Description des panneaux MCP implémentés dans la cellule de test

Deux panneaux de MCP contenant 30 % en masse de Micronal DS 5001, mélangés à du plâtre, ont été fabriqués à l'aide d'un moule de dimensions 330 mm × 330 mm × 12 mm. Le choix d'un pourcentage en masse de MCP de 30 % dans le plâtre résulte d'une recherche effectuée par Derradji et al. [105]. La procédure suivie pour la préparation des panneaux est la même que celle utilisée pour préparer les échantillons pour les tests de caractéristiques physiques décrits précédemment dans le chapitre III. Après séchage des panneaux à l'air

ambiant, 36 perforations de 3 mm de diamètre ont été percées dans un panneau et réparties comme indiqué sur la Figure V.2. Ces perforations alignées sont disposés selon un pas de 47 mm.



Figure V.2. Panneau de plâtre-MCP contenant 36 perforations.

V.2.3. Equipements d'instrumentation utilisés

En plus des équipements installés pour le dispositif expérimental du chapitre IV, un appareil de mesure de la qualité de l'air intérieur multifonction Testo 435-2 a été aussi installé pour la mesure de la vitesse de l'air (Figure V.3). Cette appareil est équipé d'une sonde à fil chaud pour la détermination de la vitesse de l'air et l'ajustement de la vitesse de l'air dans les deux cellules (plage de mesure 0 à 20 m/s et précision $\pm 0,03$ m/s + 5 %).



Figure V.3. Appareil de mesure multifonction Testo 435-2.

V.3. Modélisation numérique du comportement thermique

V.3.1. Équations gouvernantes

Les variables principales impliquées dans les équations sont la pression (P), la température (T), la densité (ρ) et les vitesses (u, v, w). Ces équations sont appelées ensemble d'équations de Navier-Stokes (équations (V.1), (V.2) et (V.3)), qui sont des équations différentielles non linéaires, couplées et partielles représentant les lois physiques et le mouvement des fluides. Elles sont difficiles à résoudre avec les méthodes de calcul classiques. Elles doivent alors être résolues de manière discrétionnaire, linéarisées et avec l'aide d'un solveur CFD. La convergence d'une solution est atteinte une fois que la précision entre 2 itérations successives se situe dans les limites définies au préalable par le solveur.

Équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (\text{V.1})$$

Équation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (P) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_j \quad (\text{V.2})$$

Équation d'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j c_{pm} T) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + S \quad (\text{V.3})$$

V.3.2. Cas étudiés, les conditions d'essai et les hypothèses de simulation

V.3.2.1. Cas d'étude

Pour effectuer une étude paramétrique, les paramètres variables de cette étude sont donnés dans le Tableau V.1.

Tableau V.1. Paramètres d'études variables.

Epaisseur E_{p_i} (mm)	Vitesse de l'air v_i (mm/s)	Distance entre perforations D_i (mm)
$E_{p_1} = 10$	$v_1 = 3$	$D_1 = 300$ ($n_1 = 1$ perforation) $\rightarrow l_1 = 20/n_1 = 20$ mm
$E_{p_2} = 30$	$v_2 = 4$	$D_2 = 150$ ($n_2 = 2$ perforations) $\rightarrow l_2 = 20/n_2 = 10$ mm

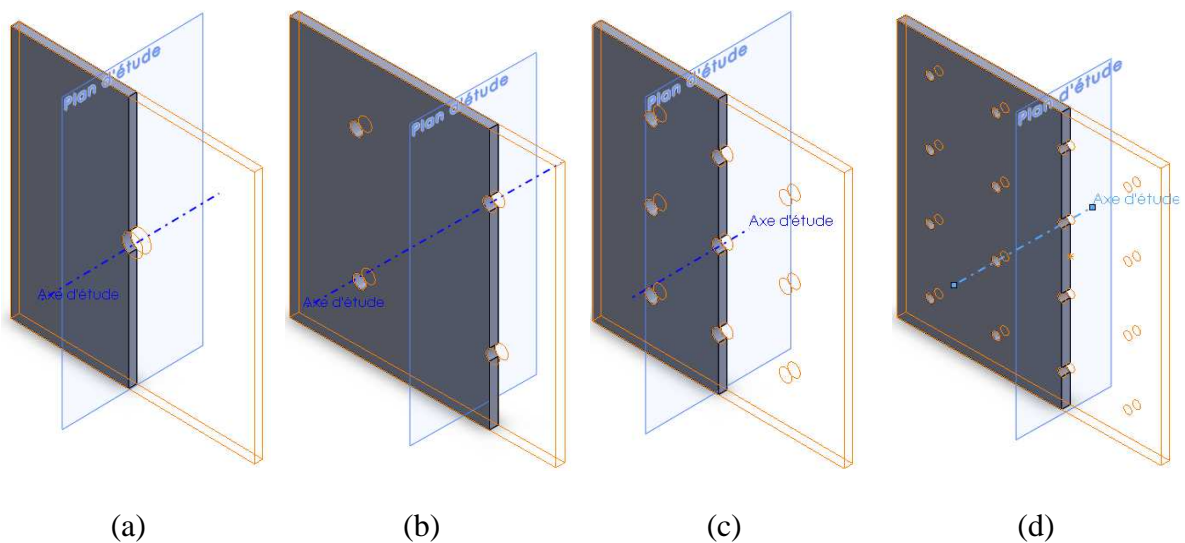
$Ep_3 = 50$	$v_3 = 5$	$D_3 = 100$ ($n_3 = 3$ perforations) $\rightarrow l_3=20/n_3= 6,67$ mm
$Ep_4 = 70$	$v_4 = 6$	$D_4 = 75$ ($n_4 = 4$ perforations) $\rightarrow l_4=20/n_4= 5$ mm
$Ep_5 = 90$	$v_5 = 7$	$D_5 = 60$ ($n_5 = 5$ perforations) $\rightarrow l_5=20/n_5= 4$ mm
-	-	$D_6 = 50$ ($n_6 = 6$ perforations) $\rightarrow l_6=20/n_6= 3,33$ mm
-	-	$D_7 = 43$ ($n_7 = 7$ perforations) $\rightarrow l_7=20/n_7= 2,86$ mm

Avec :

- Les vitesses de l'air sont déterminées à partir du débit d'air imposé dans le bâtiment par le document technique de réglementation DTR C 3-31 [106].
- La distance entre deux perforations $D_i = L/n_i$ avec : L, la longueur du panneau et n_i , le nombre de perforations.

La largeur de passage totale de l'air (l_T) à travers les perforations de différents panneaux de plâtre est identique ($l_T = l_i \times n_i$) avec l_i , distance de passage de l'air pour une perforation (voir Figure V.5).

Les cas de simulations sont présentés sur la Figure V.4. Les simulations se feront en 2D sur les plans d'études présentés sur ladite figure.



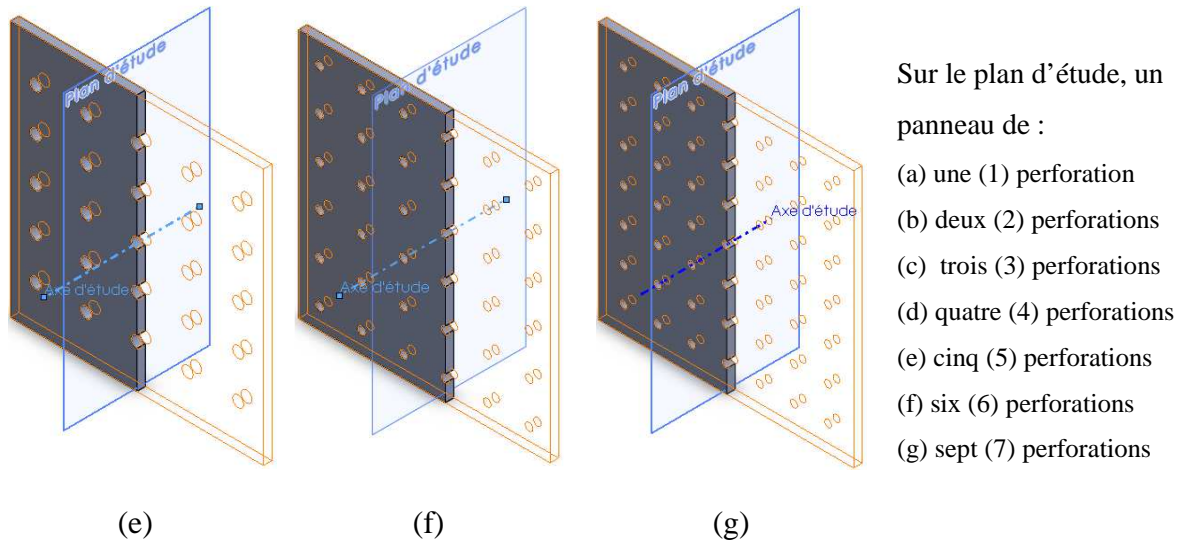


Figure V.4. Présentation des cas de simulations sur les plans d'études.

V.3.2.2. Modèle d'étude

L'étude du transfert thermique à travers un panneau en plâtre incorporant un MCP est confrontée à des problèmes de modélisation qui sont dus essentiellement au phénomène de changement de phase qui se produit sur une plage de température, d'une part et à la résolution des équations non linéaires, d'autre part. La configuration du modèle étudié dans cette étude, présenté dans la Figure V.5, correspond à des simulations numériques de transfert de chaleur par conduction et convection à travers un panneau en plâtre-MCP dont le pourcentage massique de MCP est de 30 %, d'une longueur de 30 cm, pour différentes épaisseurs, différentes distances entre les perforations et pour différentes valeurs de débit d'air (Tableau V.1). La composition de 30 % de MCP dans le plâtre présente un bon compromis entre les propriétés mécaniques et thermiques [105]. Un panneau en plâtre sans MCP sera aussi modélisé et servira comme un panneau de référence. La matière considérée est composée de deux constituants : le plâtre (la matrice) et les MCP (les inclusions), ayant chacun des propriétés physiques et thermiques différentes. Ce modèle en 2D permet de déterminer, à partir des conditions aux limites imposées sur son contour (Figure V.5), le transfert de chaleur à l'intérieur du panneau. En effet, l'air traverse le panneau perforé de plâtre-MCP à une vitesse d'entrée moyenne v_{imp} (déterminée à partir d'un débit fixé au préalable) et une température imposée d'entrée T_{imp} (température variable de forme sinusoïdale). Le panneau perforé absorbera/libèrera une partie de la chaleur transmise par l'air. Finalement, l'air, à la sortie, a une vitesse de sortie moyenne v_{sort} et une température de sortie T_{sort} .

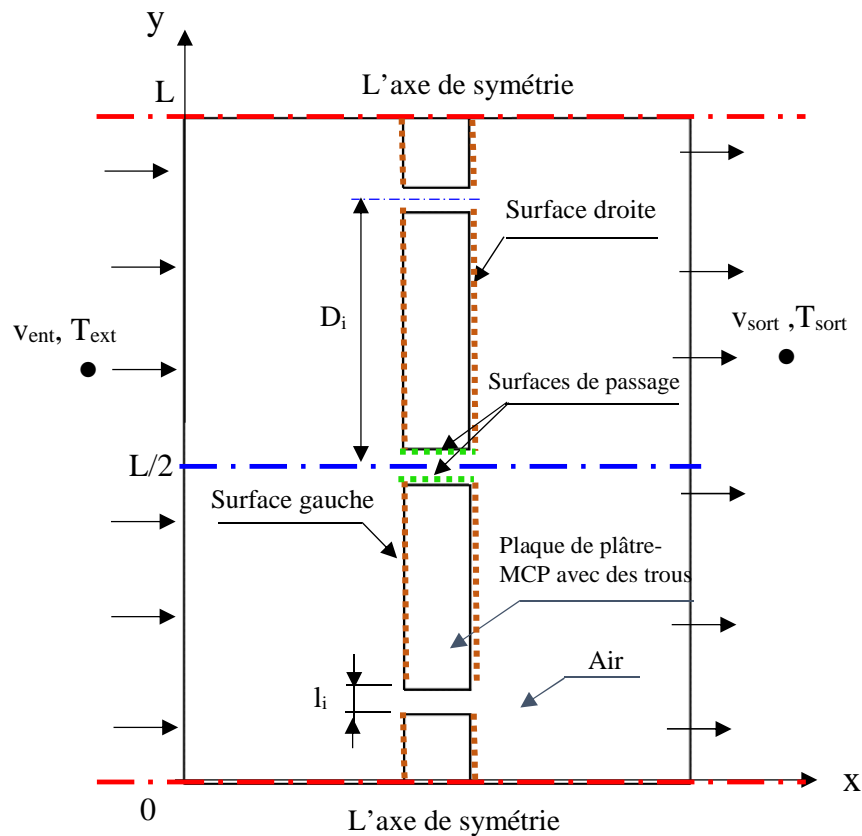


Figure V.5. Modèle géométrique de la paroi de plâtre-MCP perforée.

V.3.2.3. Les conditions d'essais

Pour ce modèle d'étude, le transfert de chaleur à travers le panneau perforée est supposé être bidimensionnel et transitoire, par convection et conduction. Ces conditions aux limites sont résumées à la Figure V.5.

A l'instant $t = 0$, les conditions aux limites à l'entrée et à la sortie sont respectivement :

- $v(x = 0, y, t) = v_i$ (la vitesse de l'air à l'entrée est variable).
- La température de l'air intérieur est constante : $T_{int} = 24 \text{ °C}$.
- Le long des lignes de symétrie ($y = 0$ and $y = L$) :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=L} = 0 \quad (\text{V.4})$$

- La température de l'air entrant varie selon une fonction sinusoïdale (Figure V.6). Cette variation de température correspond à la variation d'une journée chaude de la période estivale au nord de l'Algérie :

$$T_{ext} = 29 + 7 \times \sin\left(\frac{2 \times \pi \times t}{86400}\right) \quad (V.5)$$

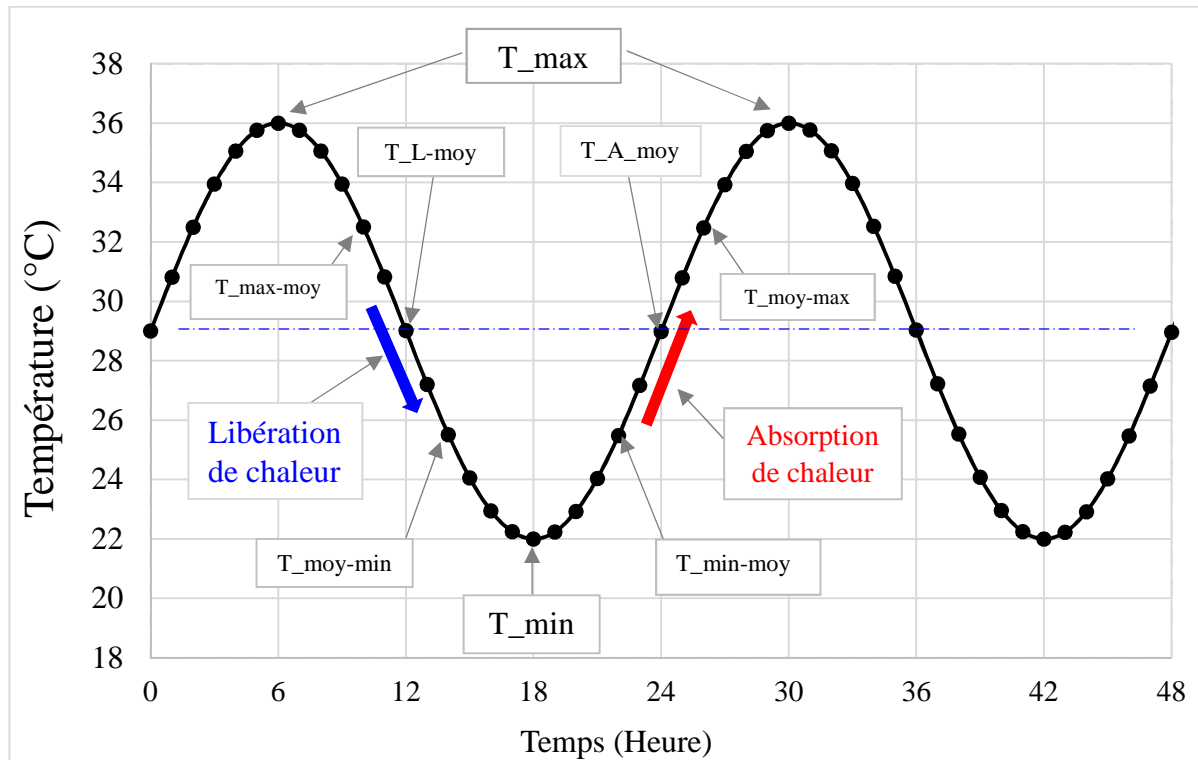


Figure V.6. Profil de variation de température extérieure.

V.3.2.4. Hypothèses simplificatrices

Dans cette étude, les hypothèses suivantes ont été formulées pour les modèles mathématiques adoptés :

- L'écoulement est bidimensionnel.
- Le MCP est considéré comme homogène et isotrope.
- Le fluide est newtonien et incompressible.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- La densité et la conductivité thermique du MCP sont les mêmes pour les phases solide et liquide.

V.3.3. Maillage et outil de résolution

Le choix du maillage a un impact direct sur la précision de la solution, la convergence, et le temps de calcul. Etant donné que la géométrie du panneau est rectangulaire, un maillage

structuré permet d'avoir un maillage régulier et bien adapté pour la discrétisation. Cependant, le maillage de la géométrie de l'air se fait par un maillage non structuré de type triangulaire avec un maillage affiné dans la zone d'interface entre l'air et le panneau dans lequel des structures de fluide plus complexes étaient prévues (Figure V.7). Les modèles physiques sont générés à l'aide du logiciel de prétraitement Gambit 2.4, puis les domaines de calcul sont divisés en grilles uniformes avec des mailles structurées pour la zone du panneau et en grilles non uniformes avec des mailles non structurées pour la zone de l'air.

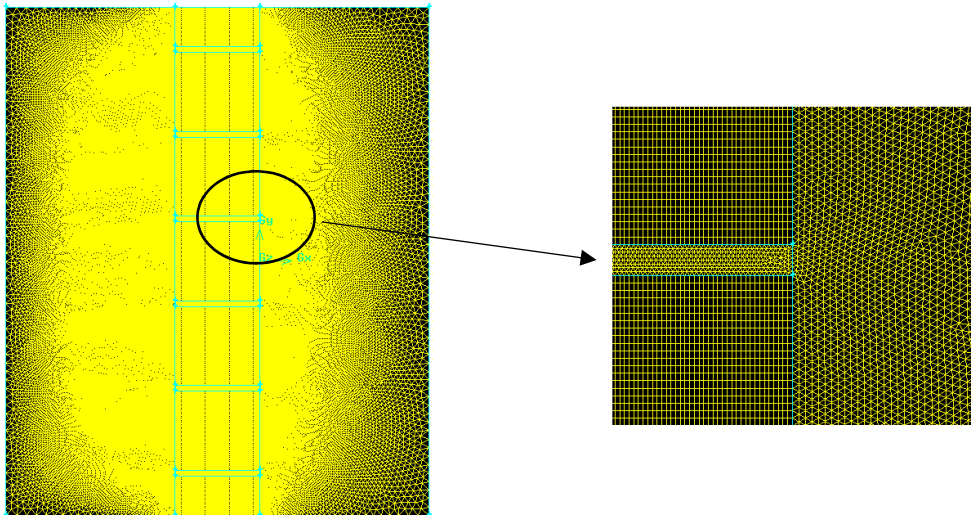


Figure V.7. Maillage du modèle de simulation 2D.

V.3.4. Modélisation numérique

Dans cette partie d'étude, le modèle source d'absorption/libération de chaleur, qui considère séparément le processus de fusion et de solidification a été utilisé. Ce modèle utilise une approche des relations entre enthalpie spécifiques et la température pour la fusion et la solidification dans le modèle CFD et permet de prendre en compte le comportement d'hystérésis du MCP [103]. Le modèle considéré dans cette étude est un modèle CFD en 2D du dispositif de stockage d'énergie thermique (TES). Il est développé dans le logiciel Ansys Fluent pour analyser les performances de changement de phase du panneau de plâtre-MCP. Les détails et les explications sur ce modèle ainsi que sur la modélisation de la turbulence sont donnés dans le chapitre II. Avec ce logiciel, les champs de vitesse de l'air et de température à travers une paroi sont résolus numériquement à l'aide de la CFD (Computational Fluid Dynamics), afin de résoudre l'ensemble des équations différentielles de Navier-Stokes : i) équation de continuité, ii) équation de quantité de mouvement et iii) équation d'énergie. Pour obtenir une solution aux

champs de vitesse et de température, ces équations sont linéarisées et discrétisées par une méthode de volume fini sur un maillage cartésien dans le solveur. Dans cette partie d'étude, le schéma de discrétisation Second Order Upwind a été utilisé. Les critères absolus de convergence utilisés pour la résolution de l'équation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie étaient respectivement 1×10^{-3} , 1×10^{-3} , 1×10^{-8} . L'algorithme SIMPLE avec un solveur a été utilisé pour résoudre numériquement les équations principales ci-dessus (V.1), (V.2) et (V.3) avec les conditions initiales et aux limites. Le principe de l'algorithme SIMPLE est de considérer un champ de pression arbitraire P^* , qui, par le biais des équations de conservation de la quantité de mouvement, conduit à un champ de vitesse approché U^* . Des corrections successives sont ensuite apportées à l'un et à l'autre de façon à se rapprocher petit à petit d'une solution qui satisfasse de mieux en mieux l'équation de continuité. La procédure itérative de résolution est décrite dans (PATANKAR, 1980). Les différentes étapes sont répétées jusqu'à ce que l'erreur sur chaque équation de conservation, sur chaque volume de contrôle, et sur le domaine tout entier, soit inférieure à une valeur définie au préalable.

V.3.5. Validation du modèle numérique proposé

Afin de vérifier la fiabilité des résultats numériques sur le modèle proposé et présenté sur la Figure V.5, une expérience à petite échelle a été mise en place afin de réaliser les différentes mesures. Les résultats des mesures ont été intégrés dans un modèle numérique approprié à cette expérimentation. Pour valider ce modèle numérique, une comparaison des résultats de la simulation avec les données expérimentales a été réalisée. La Figure V.8 montre la comparaison entre la température issue des mesures expérimentales et les résultats de la modélisation numérique en 2D. Le modèle géométrique utilisé pour la validation correspond à un modèle en 2D avec 6 perforations. La vitesse d'écoulement de l'air à travers ces perforations est la même que pour le modèle expérimental. Les données de mesure expérimentales sont enregistrées avec des intervalles de temps réguliers de 6 minutes, soit 10 mesures par heure. Il a été observé qualitativement que malgré le fait qu'il y ait de petites fluctuations de la température d'entrée, la simulation numérique est en bonne concordance avec les données expérimentales. Globalement, le modèle numérique semble fiable. La différence entre les données numériques et expérimentales a été quantifiée par les mêmes écarts présentés dans le Chapitre IV.

Les comparaisons des valeurs de température de surface à partir de mesures expérimentales et de simulations numériques montrent que le modèle numérique proposé est capable de prédire la température de surface avec une précision de :

- +0,7 °C de EAMA et -0,1 °C d'AMIE pour la température de surface des panneaux de plâtre-MCP du côté I et pour une précision moyenne de $\pm 0,2$ °C, soit un écart moyen relatif de 2,3 % pour une différence de température de 7,2 °C entre le maximum et le minimum de cette température de surface.
- +0,3 °C de EAMA et -0,1 °C de EAMI pour la température de surface des panneaux de plâtre-MCP du côté II et pour une précision moyenne de $\pm 0,1$ °C, soit un écart moyen relatif de 2,7 % pour une différence de température de 4 °C entre le maximum et le minimum de cette température de surface.
- +0,3 °C de EAMA et -0,1 °C de EAMI pour la température de sortie du côté II et pour une précision moyenne de $\pm 0,1$ °C, soit un écart moyen relatif de 4,2 % pour une différence de température de 2,4 °C entre le maximum et le minimum de cette température de l'air.

Dans l'ensemble, les comparaisons montrent qu'il n'y a qu'une petite différence de température et que le modèle peut être considéré comme fiable.

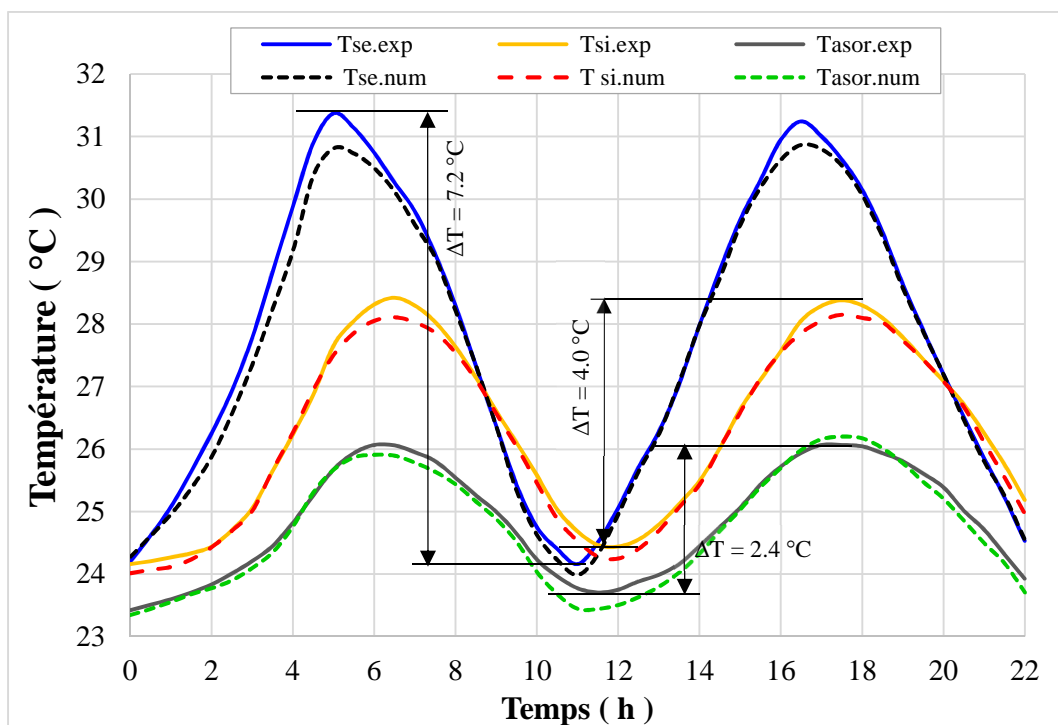


Figure V.8. Comparaison du modèle numérique et des résultats expérimentaux pour la paroi perforée de plâtre avec 30 % de MCP.

Les températures tracées sont :

- $T_{se,exp}$: La température de surface externe du panneau de plâtre-MCP mesurée (côté I).

- $T_{si.exp}$: La température de surface interne du panneau de plâtre-MCP mesurée (côté II).
- $T_{asor.exp}$: La température de l'air à la sortie mesurée (côté II).
- $T_{asor.num}$: La température de l'air à la sortie déterminée numériquement.
- $T_{se.num}$: La température de surface externe du panneau de plâtre-MCP déterminée numériquement.
- $T_{si.num}$: La température de surface interne du panneau de plâtre-MCP déterminée numériquement.

V.4. Résultat et interprétation

V.4.1. Comportement thermique expérimental des panneaux de plâtre-MCP

Les expériences ont été réalisées comme décrit dans § V.2.1. Pour permettre une comparaison entre deux types de panneaux, deux cellules de test identiques ont été utilisées simultanément afin de garantir les mêmes conditions de test. La première cellule contient un panneau de plâtre-MCP perforé (P.P.) avec 36 perforations de 3 mm de diamètre et la deuxième cellule contient un panneau de plâtre-MCP ordinaire sans perforations (P.O.). Le débit d'air d'entrée utilisé pour les deux cellules était de 0,49 m³/h.

Sur la Figure V.9, il est clairement montré que la variation de la température de surface est plus importante pour le panneau perforé que pour le panneau ordinaire, tandis que pour la température de l'air de sortie, la variation est plus faible pour le panneau perforé que pour le panneau ordinaire. Cela s'explique par l'augmentation de la quantité de chaleur stocké par le panneau perforé.

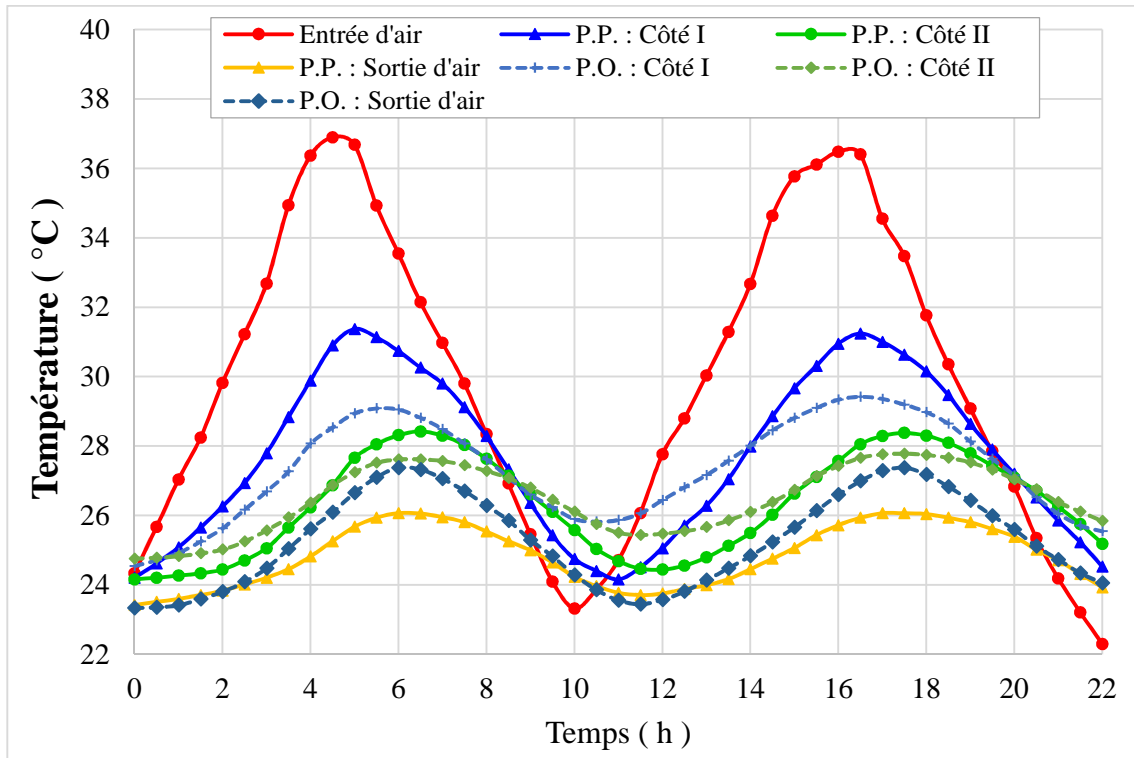


Figure V.9. Comportement thermique expérimental d'un panneau perforé et d'un panneau ordinaire.

Pour estimer la densité de flux de chaleur stockée par le panneau de plâtre-MCP de la Figure V.9, l'équation (V.6) suivante a été utilisée :

$$\varphi_{ab} = \frac{\dot{m}_{air} \times C_{p,air} \times (T_{sor} - T_{ent})}{A_p} \quad (V.6)$$

Les résultats indiquent que la densité de flux de chaleur absorbée à travers le panneau de plâtre (P.O.) est de 396 W/m², tandis que pour le panneau de plâtre-MCP perforée (P.P.), elle est de 435 W/m², ce qui représente une augmentation de 9,5 %. Ce pourcentage d'augmentation de la chaleur absorbée ne reflète pas totalement la capacité d'absorption du panneau perforé car une grande quantité de chaleur est perdue à travers les parois des cellules de test pendant les expériences.

Pour cette raison, dans la partie numérique présentée par le modèle de la Figure V.5, nous avons supposé des conditions aux limites de symétrie de sorte qu'il n'y ait pas de pertes thermiques dans la direction y.

V.4.2. Modélisation numérique du comportement thermiques

Pour étudier l'amélioration du comportement thermique des panneaux de plâtre-MCP, des panneaux contenant 30 % de MCP ont été choisis avec différentes épaisseurs ($E_p = 10$ mm à $E_p = 90$ mm).

La technique d'amélioration consiste à perforer de petits trous équidistants dans les panneaux afin que l'air de ventilation les traverse. Par conséquent, la surface en contact avec l'air est augmentée, ce qui permet aux panneaux d'absorber et de libérer plus de chaleur en augmentant la convection autour du panneau.

V.4.2.1. Distribution de la vitesse de l'air

La Figure V.10 montre l'évolution du profil de vitesse v_x à $y=L/2$ déterminée pour un panneau de 50 mm d'épaisseur et pour une distance entre les perforations de 43 mm. Comme il est montré dans cette figure, la vitesse d'écoulement de l'air sur l'axe $y = L/2$ change suivant la direction x (principe de conservation de masse). Nous pouvons diviser l'axe x en trois zones :

1. la zone 1 entre $x = 0$ et $x = 0,1$ m où nous pouvons observer que la vitesse de l'air commence à augmenter jusqu'à l'atteindre la zone 2 de rétrécissement brusque.
2. la zone 2 entre $x = 0,1$ m et $x = 0,15$ m où cette zone peut être divisée, elle-même, à son tour, en trois intervalles :
 - a) l'intervalle 1 à $x = 0,1+\Delta x_1$ m où nous observons à l'entrée de la deuxième zone un léger décollement des veines fluides proches des parois sur une distance Δx_1 et des légères zones de recirculation ce qui engendre une augmentation de la vitesse dans cet intervalle de la deuxième zone (voir Figure V.11). Sur cette partie, la vitesse est maximale sur l'axe.
 - b) l'intervalle 2 entre $x = 0,1+\Delta x_1$ m et $x = 0,15-\Delta x_2$ m où nous observons une stabilisation de la vitesse à travers les perforations.
 - c) l'intervalle 3 à $x = 0,15-\Delta x_2$ m à $x = 0,15$ m où nous observons à la sortie de cette deuxième zone un développement d'une légères zones de recirculation augmentant ainsi la vitesse sur cet intervalle de la deuxième zone (voir Figure V.11).
3. Finalement, la zone 3 entre $x = 0,15$ m et $x = 0,25$ m, où nous pouvons observer que la vitesse de l'air commence à diminuer jusqu'à la sortie de l'air.

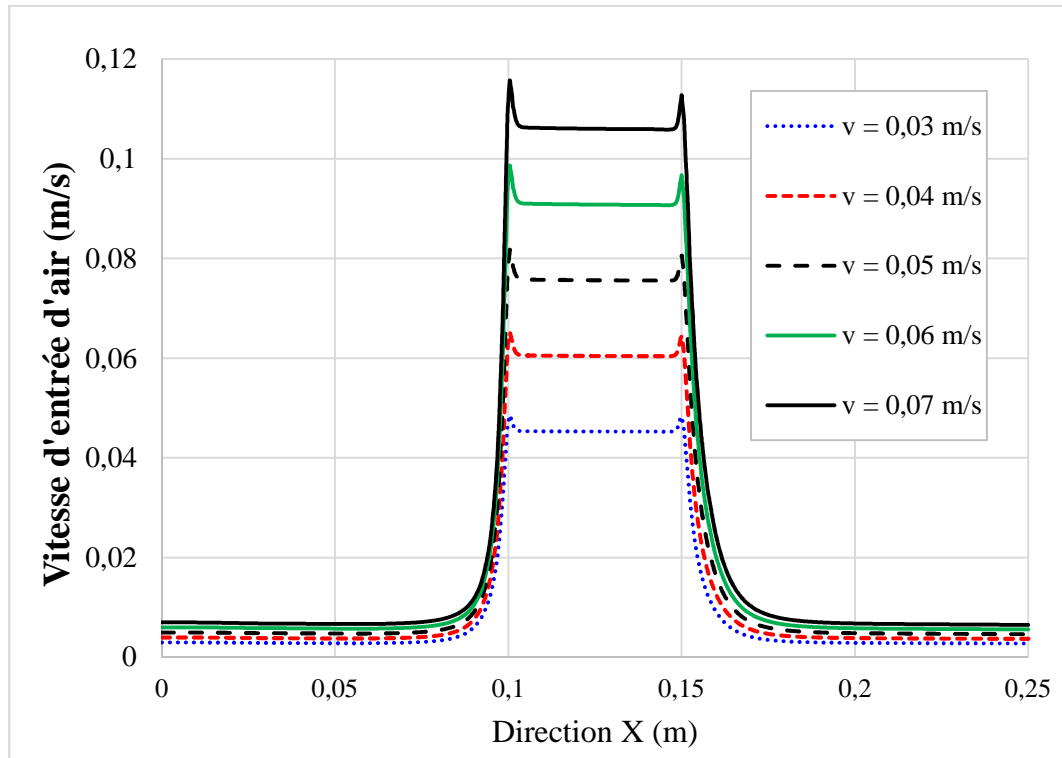


Figure V.10. Vitesse le long de l'axe $y = L/2$ pour différentes vitesses d'entrée d'air (v_i) sur un panneau de 50 mm d'épaisseur et une distance entre les perforations de 43 mm.

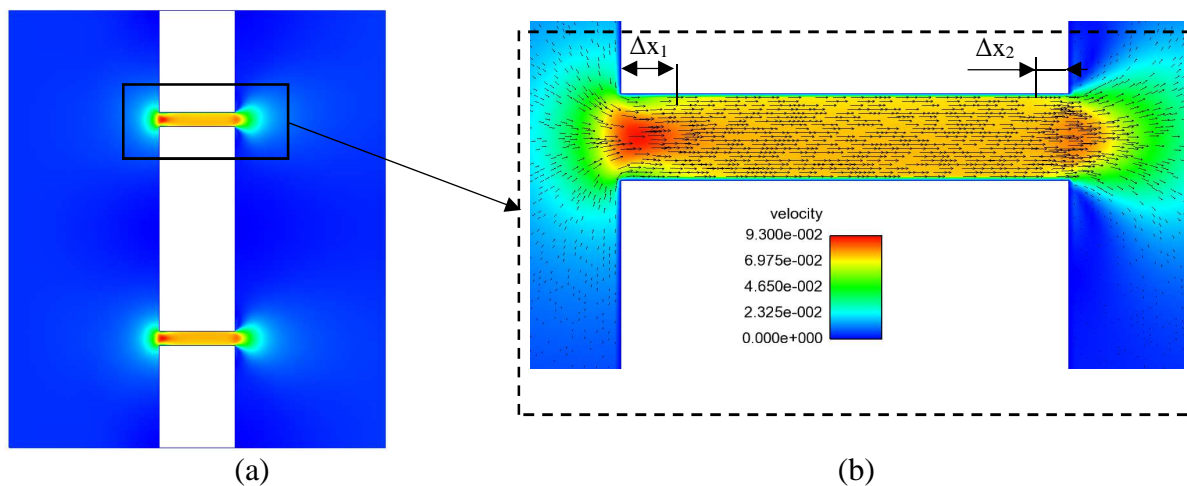


Figure V.11. Représentation du : (a) contours de vitesse et (b) vecteur de vitesse.

De même que pour la Figure V.10, La Figure V.12 montre l'évolution du profil de vitesse v_x sur l'axe d'étude passant par une zone de perforation (voir Figure V.4) pour différentes distance entre les perforations D_i . Nous pouvons observer globalement que l'augmentation de la vitesse est importante sur l'axe d'étude quand la distance entre les perforations est importante. Ceci peut être expliqué par l'augmentation des pertes de charges à

travers les perforations. En effet, dans le cas de $D = 43$ mm, nous avons sept (7) perforations et chaque perforation a une largeur de passage $l_7 = 2,86$ mm, dans le cas de $D = 50$ mm nous avons six (6) perforations et chaque perforation a une largeur de passage $l_6 = 3,33$ mm jusqu'au $D = 300$ mm qui présente une (1) perforation d'une largeur de passage $l_1 = 22$ mm (voir Tableau VI.1).

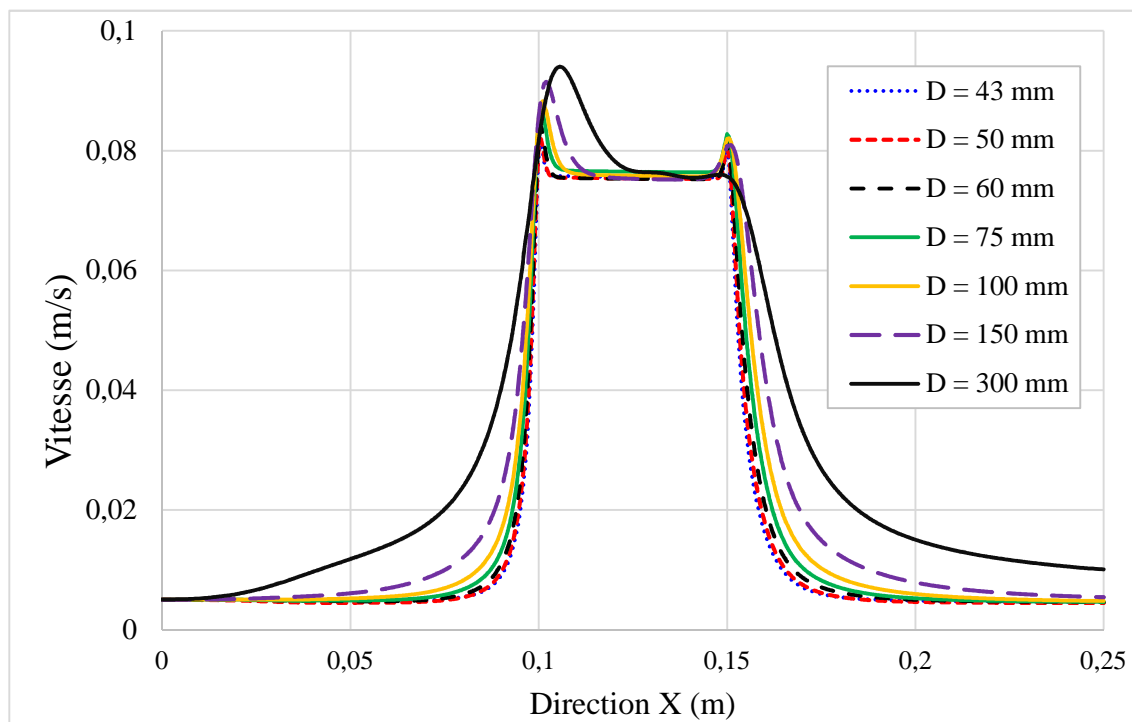


Figure V.12. Vitesse sur l'axe d'étude pour différentes distances entre les perforations (D_i) pour un panneau de 50 mm d'épaisseur et une vitesse d'entrée d'air de 5 mm/s.

V.4.2.2. Distribution de la température

L'absorption de la chaleur peut être clairement illustrée par les courbes de variation des températures moyennes pour les différents cas étudiés. En effet, la Figure V.13 présente la variation des températures moyennes pour différentes vitesses d'entrée d'air. On peut observer que l'augmentation de la vitesse engendre d'un côté une augmentation des températures moyennes maximales de la surface gauche, de la surface droite et de l'air à la sortie et d'un autre côté, une diminution des températures moyennes minimales des surfaces du panneau et de l'air à la sortie (augmentation des amplitudes). En d'autres termes, les températures du panneau et de l'air à la sortie ont tendance à se rapprocher, de plus en plus, du profil de température extérieure. Globalement, cette figure montre que la vitesse de l'entrée d'air influence sur l'amplitude des températures moyennes des surfaces et de l'air à la sortie.

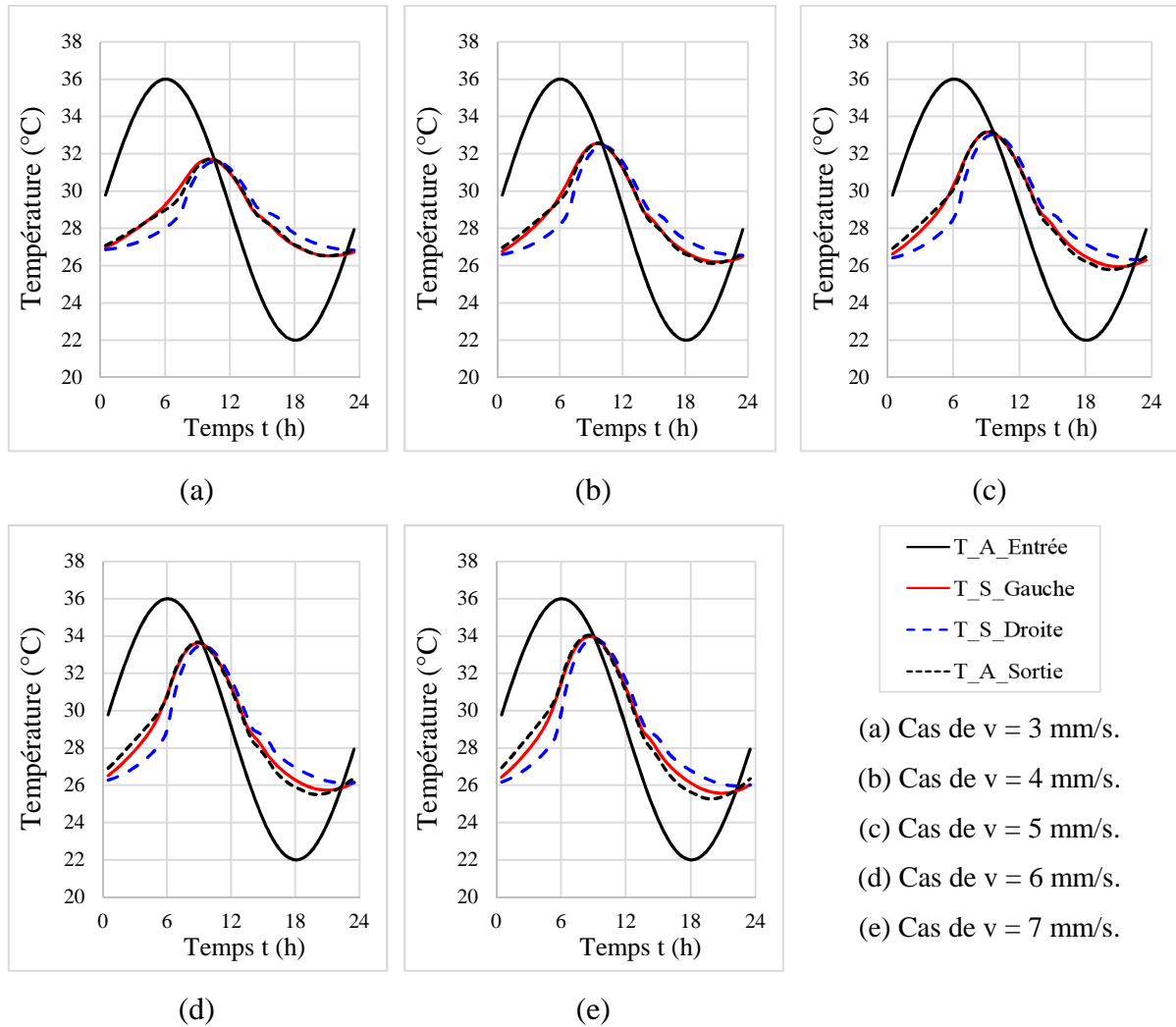


Figure V.13. Variation des températures moyennes pour différentes vitesses de l'air.

Comme il a été présenté dans la figure précédente, la Figure V.14 présente une comparaison des profils de la température moyenne pour différentes distances entre les perforations. On observe que la distance entre les perforations influe d'un côté sur le déphasage thermique entre la température de l'air à l'entrée et les températures de surfaces et de l'air à la sortie. D'un autre côté, la distance entre les perforations influe sur l'amplitude des températures moyennes des surfaces et de l'air à la sortie. En effet, les amplitudes thermiques des températures surfaciques moyennes diminuent avec l'augmentation de l'espace entre les perforations, tandis que l'amplitude de la température de l'air à la sortie augmente.

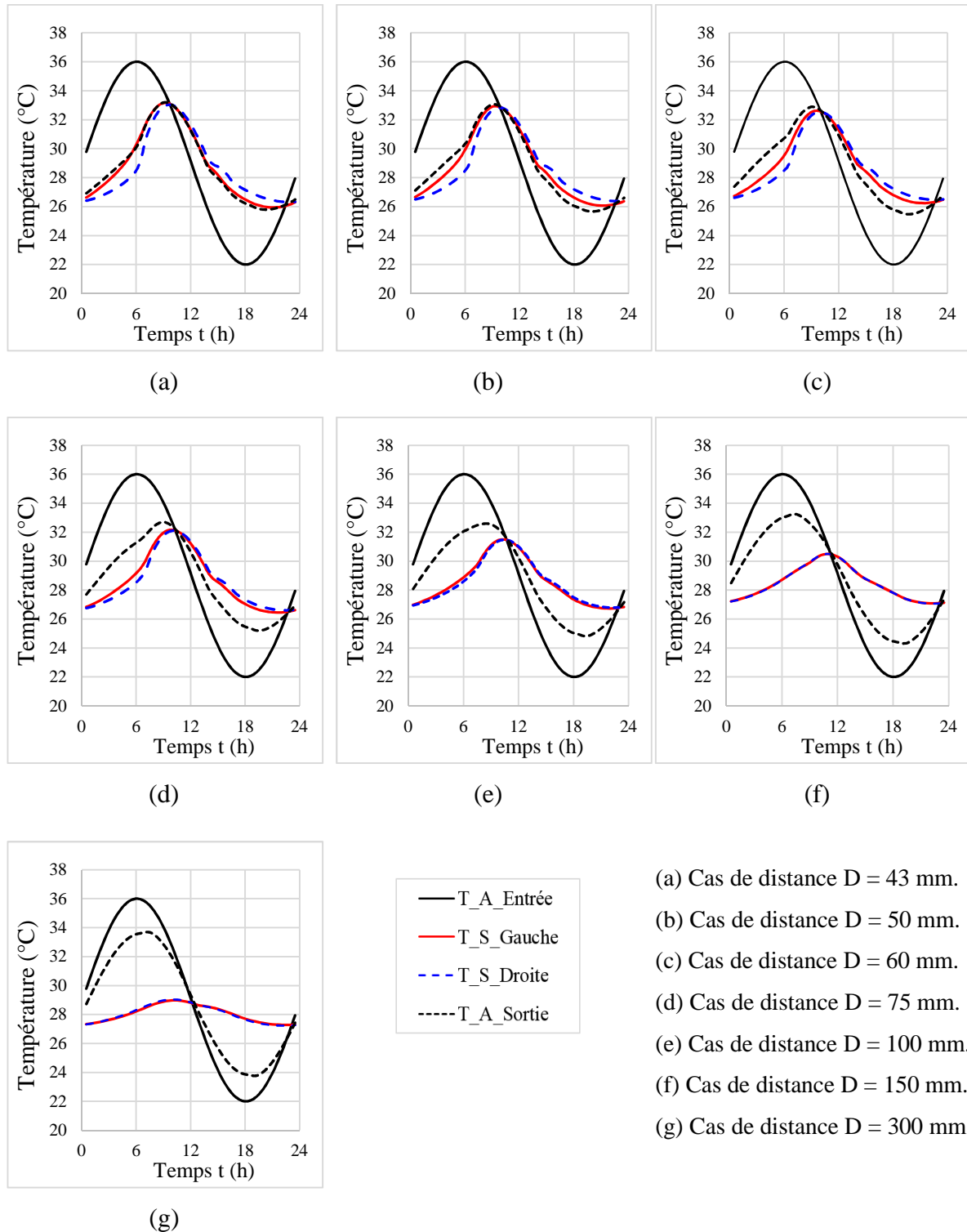


Figure V.14. Variation des températures moyennes pour différentes distances entre les perforations.

La Figure V.15 présente une comparaison des profils de la température moyenne pour différentes épaisseurs de panneaux pour une distance entre les perforations $D = 43$ mm (nombre de perforation $n = 7$). De même que pour la figure précédente, on observe que l'épaisseur du

panneau influe d'un côté sur le déphasage thermique entre la température de l'air à l'entrée et les températures des surfaces et de l'air à la sortie. D'un autre côté, l'épaisseur du panneau influe sur l'amplitude des températures moyennes des surfaces et de l'air à la sortie. En effet, les amplitudes thermiques diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur du panneau.

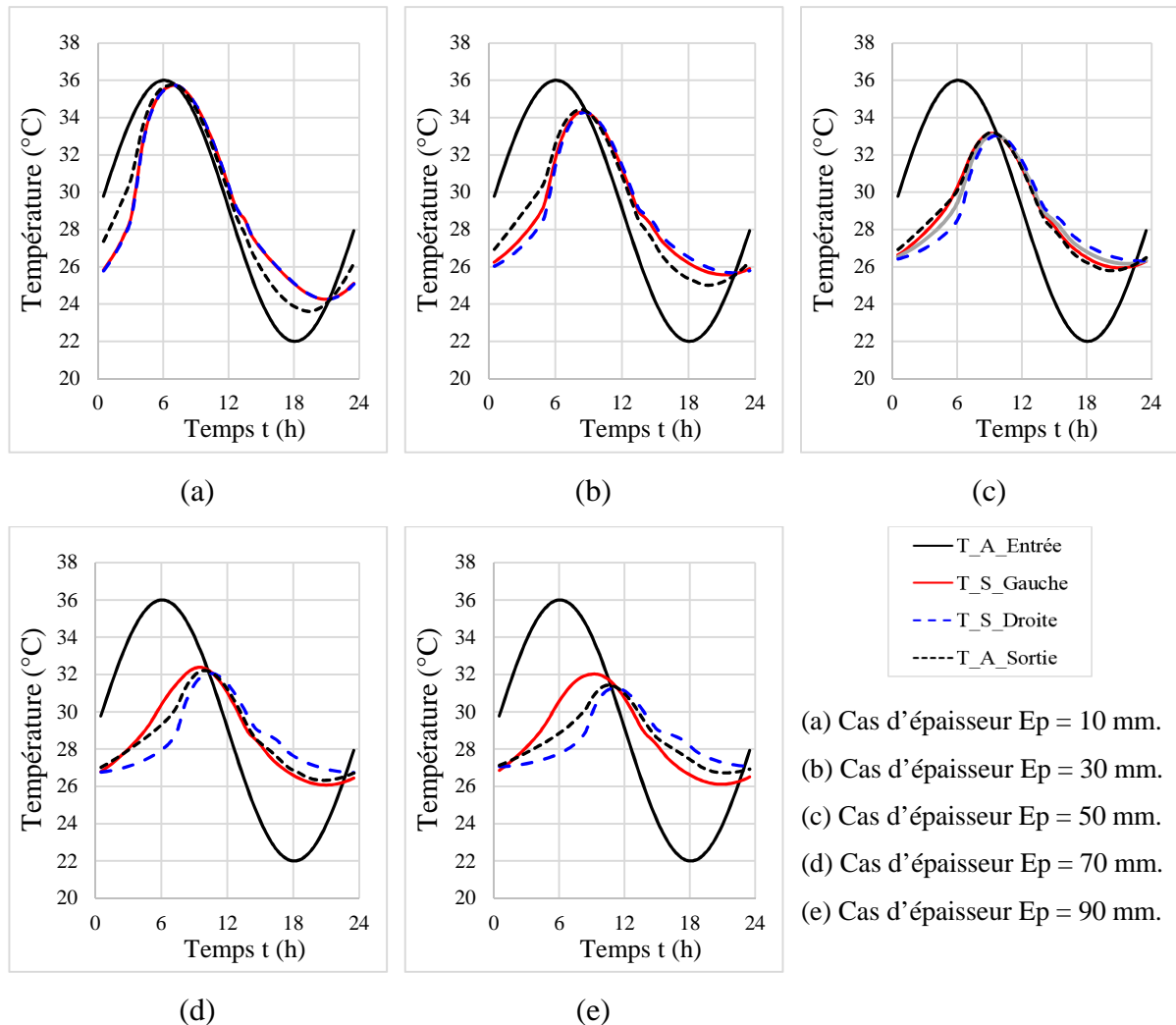


Figure V.15. Variation des températures pour différentes épaisseurs de parois.

Pour résumer ce qui a été présenté en terme d'amplitude de température sur les trois précédentes figures, la Figure V.16 montre l'amplitude (oscillation) de température moyenne sur la surface interne (droite) pour différents cas présentés dans le Tableau V.1 et avec un pourcentage en poids de MCP de 30 % et une épaisseur de 50 mm pour cinq vitesses d'entrée d'air. On peut observer que la réalisation de perforations dans le panneau de plâtre-MCP provoque une augmentation de la variation de température de la surface interne. L'augmentation du nombre de perforations (ou la réduction de la distance entre les perforations) dans un

panneau augmente les oscillations de température. Cette augmentation de la température peut être expliquée par l'absorption accrue de chaleur par le panneau.

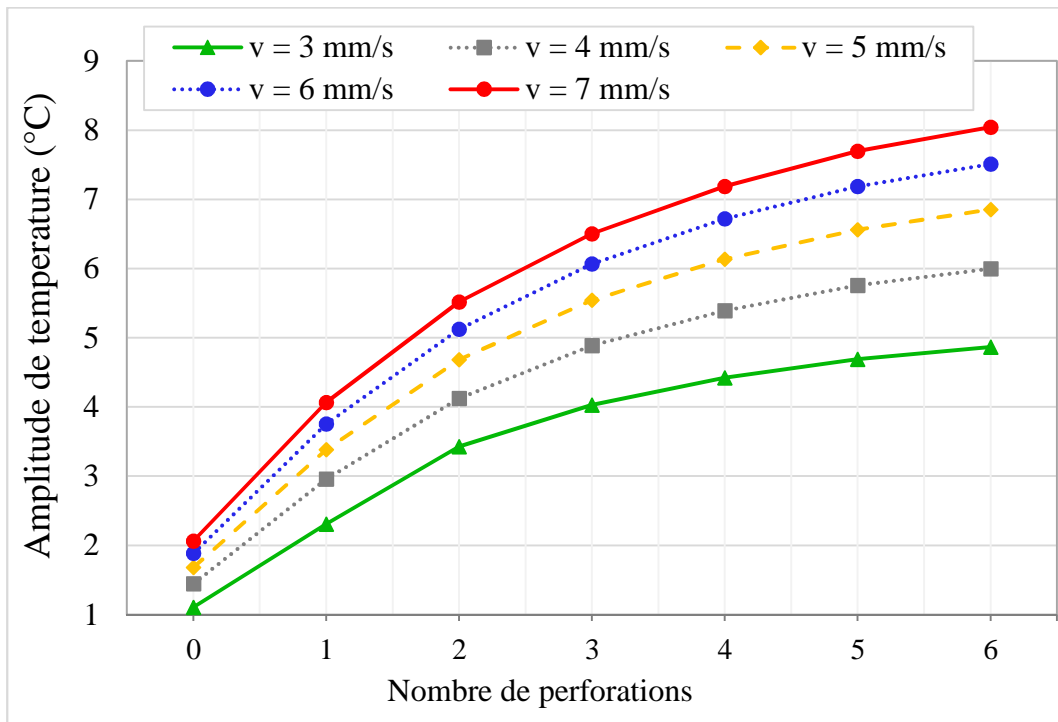


Figure V.16. Oscillation de la température moyenne de la surface droite en fonction de D_i pour 30 % de MCP dans le plâtre et pour 50 mm d'épaisseur et pour différents débits d'air.

Pour mieux expliquer les résultats de la Figure V.16, le champ de température dans le panneau de plâtre-MCP est présenté dans la Figure V.17 pour un espacement différent entre les perforations et pour une vitesse d'entrée d'air $v = 3$ mm/s. Sur ces figures, le côté gauche est soumis à une variation sinusoïdale de la température extérieure et à une vitesse de l'air (T_{ext} et $v = 3$ mm/s) et le côté droit est soumis à une température intérieure constante, tandis que les côtés supérieur et inférieur sont sous la condition de symétrie. Dans les tracés de contour, la température moyenne des panneaux de plâtre-MCP à un temps $t = 12$ h est de $T_{\text{moy}} = 28,4$ °C pour $D = 300$ mm. Cette valeur de température moyenne augmente avec la diminution de la distance D entre les perforations pour atteindre la valeur de $T_{\text{moy}} = 31,2$ °C pour $D = 43$ mm. Les contours de température indiquent que la surface des perforations est la région à partir de laquelle la chaleur se propage le plus. Ceci s'explique par le fait que dans ces zones, la vitesse de l'air augmente, augmentant ainsi l'échange thermique convectif autour de cette zone (sachant que la surface totale des perforations est la même pour les différents cas). Par ailleurs, la

différence entre les températures maximale et minimale sur les différents points du panneau de plâtre-MCP diminue avec l'augmentation du nombre de perforations, comme indiqué sur la Figure V.17.

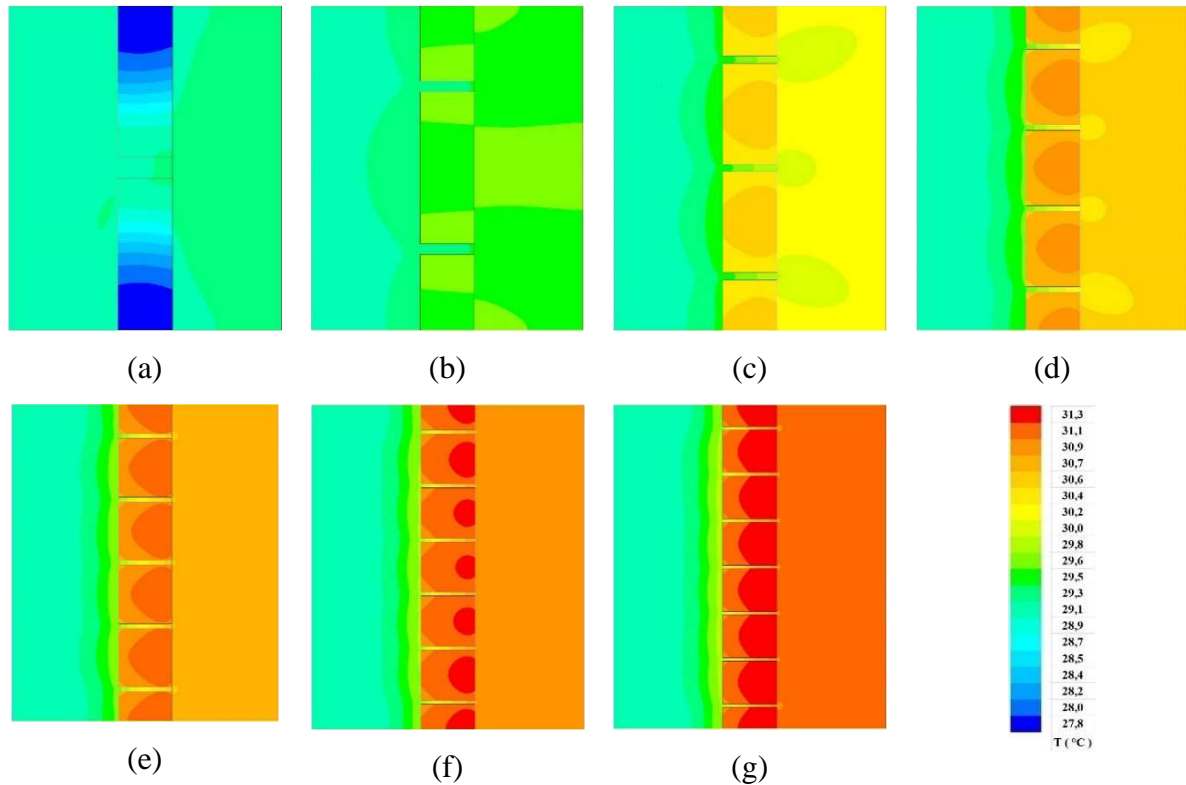


Figure V.17. Contours de température des panneaux de plâtre-MCP perforés à $t = 12$ h et pour $v = 3$ mm/s pour : (a) $D = 300$ mm, (b) $D = 150$ mm, (c) $D = 100$ mm, (d) $D = 75$ mm, (e) $D = 60$ mm, (f) $D = 50$ mm, (g) $D = 43$ mm.

V.4.2.3. Détermination du nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt représente le rapport entre le transfert de chaleur par convection et le transfert de chaleur en absence de mouvement de l'air (conduction pure). En d'autres termes, ce nombre exprime l'efficacité du transfert convectif de chaleur.

V.4.2.3.1. Nombre de Nusselt en fonction de la distance entre les perforations

La Figure V.18 montre l'effet de la variation du nombre de Nusselt (Nu_y) sur les surfaces des parois (surfaces gauche et droite présentées sur la Figure V.5) pour les différentes distances entre les perforations. L'écoulement pour ces différents cas est en convection forcée et en régime laminaire. De prime abord, nous remarquons que les valeurs du nombre de Nusselt sont importantes au voisinage des perforations (endroits où la vitesse augmente). Nous observons

aussi que les valeurs du nombre de Nusselt sont plus importantes sur la surface gauche que sur la surface droite. De plus, l'augmentation du nombre de perforations (diminution de la distance entre les perforations) engendre une augmentation du Nu_y sur la surface gauche, tandis que Nu_y diminue pour la surface de droite. Cela signifie que l'échange de chaleur par convection augmente avec la diminution de la distance entre les perforations et l'air qui travers les perforations, cède une plus grande quantité de la chaleur du côté de l'entrée. Ceci peut être expliqué par le fait que le nombre de Nusselt augmente près de la paroi froide et diminue près de la paroi chaude.

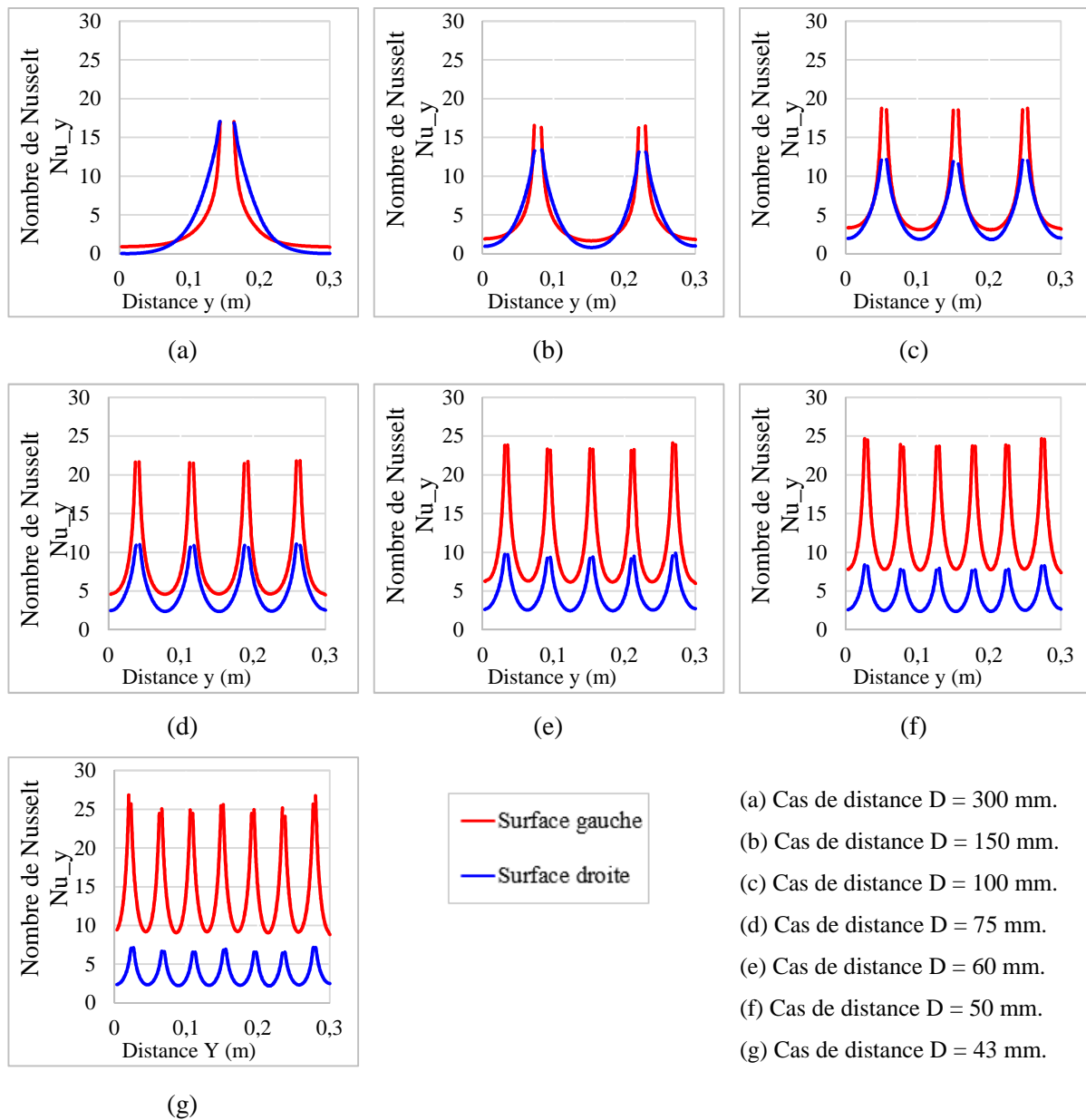


Figure V.18. Nombre de Nusselt sur l'axe y (surfaces de parois gauche et droite) pour différentes distance entre les perforations.

De même, la Figure V.19 présente le profil de la variation du nombre de Nusselt (Nu_x) sur une surface de passage à travers une perforation pour les différentes distances entre les perforations. Nous pouvons observer que Nu_x indique un échange de chaleur important juste à l'entrée de la zone du rétrécissement. En effet, dans cette zone la couche thermique devient très mince et est plaquée contre la paroi par l'air. Ensuite, la valeur du nombre de Nusselt diminue au fur et à mesure que l'air traverse les perforations vers la sortie (jusqu'à la zone d'élargissement). Par conséquent, la température du fluide diminue, ce qui provoque une diminution d'échange thermique par convection et donc une diminution du nombre de Nusselt. Au niveau de l'élargissement brusque à la fin de perforation, une légère augmentation est observée sur la valeur du nombre de Nusselt. Cette augmentation est provoquée par l'accélération de l'air dans cette zone provoquant ainsi une augmentation sur l'échange de chaleur convectif. En augmentant l'espace entre les perforations (diminuant le nombre de perforations dans le panneau), nous avons observé une diminution du nombre de Nusselt près de la paroi chaude (au niveau de rétrécissement) et son augmentation près de la paroi froide (au niveau de l'élargissement).

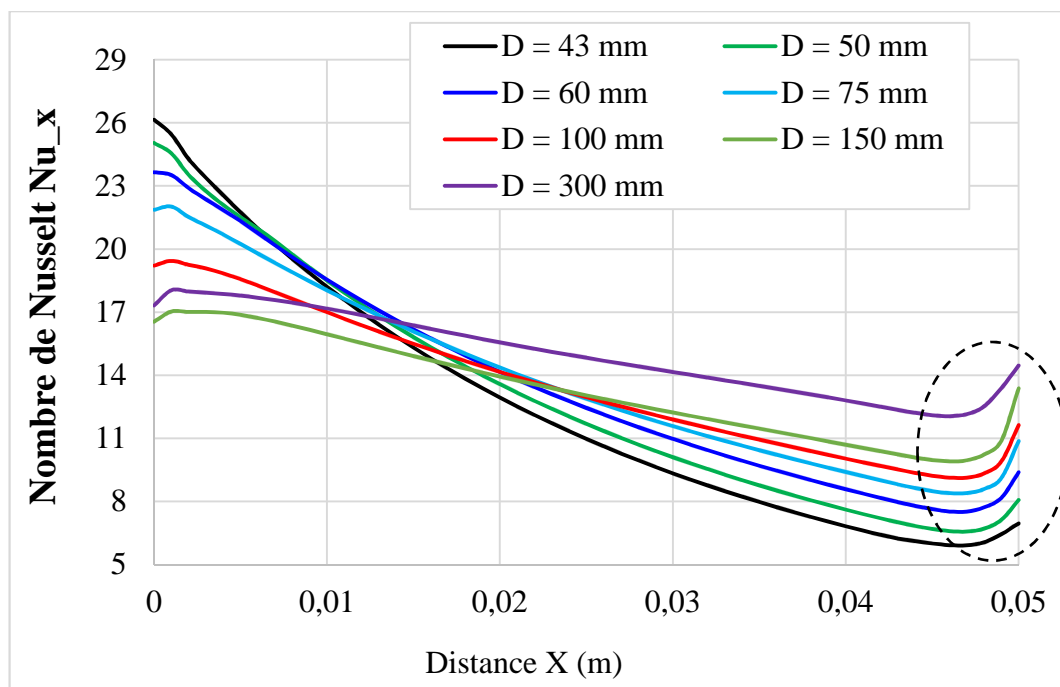


Figure V.19. Nombre de Nusselt sur l'axe x à travers les perforations pour différentes distances entre les perforations.

V.4.2.3.2. Nombre de Nusselt en fonction de la vitesse de l'air

La Figure V.20 montre l'effet de la variation du nombre de Nusselt (Nu_y) sur les surfaces des parois gauche et droite (Figure V.20a et VI.20b) et la variation du nombre de Nusselt (Nu_x) à travers la perforation (Figure V.20c) pour les différents vitesses d'entrée d'air pour le cas d'un panneau perforé avec une distance entre les perforations $D = 43$ mm. Sur cette figure, on constate que plus la vitesse de l'air est importante plus le nombre de Nusselt est important sur toutes les surfaces en contact avec l'air.

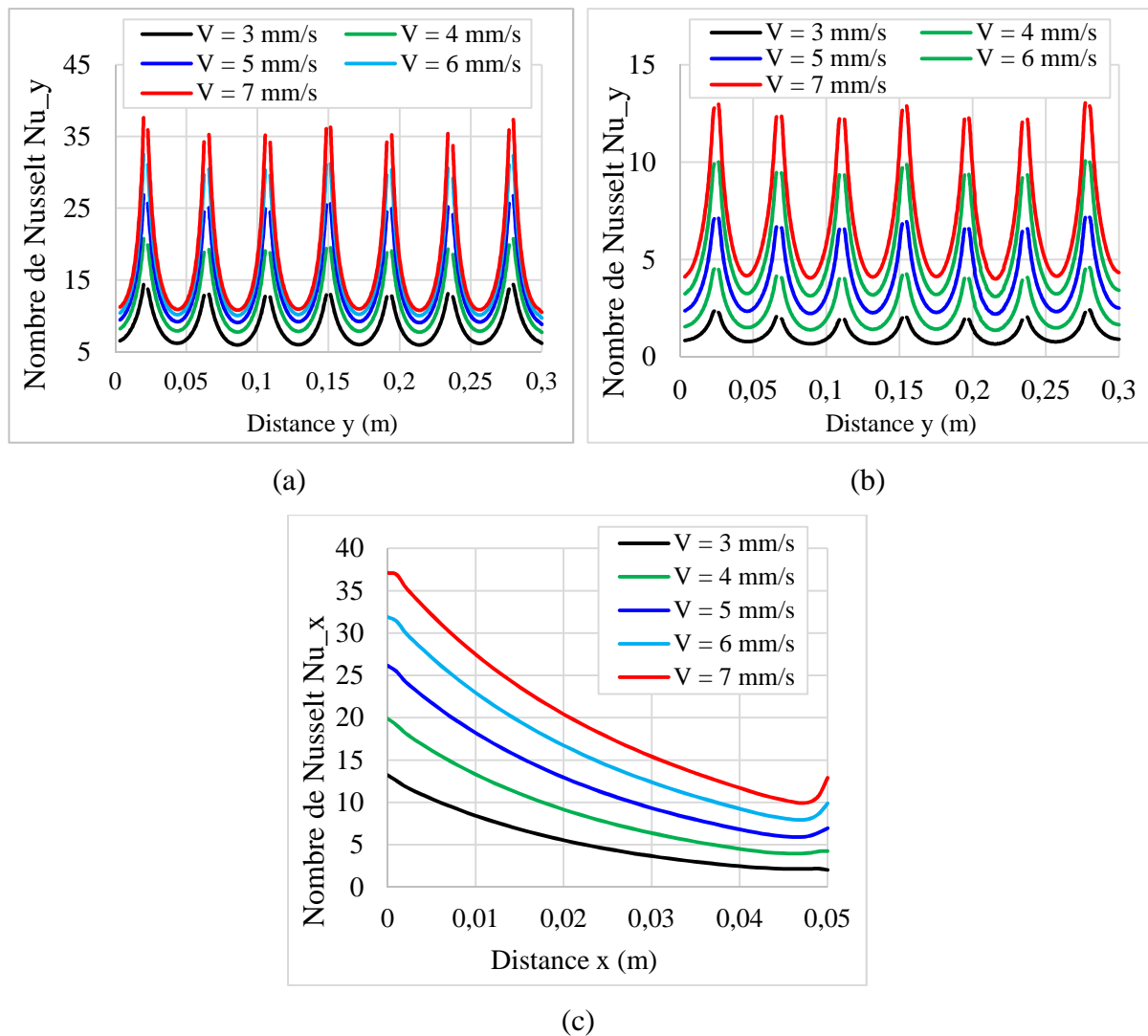


Figure V.20. Nombre de Nusselt pour différente vitesses de l'air pour la : (a) surface de gauche, (b) surface de droite, (c) surface de passage de l'air.

V.4.2.3.3. Nombre de Nusselt moyen en fonction de la variation de la température

La Figure V.21 présente l'effet de la variation du nombre de Nusselt moyen (Nu_{moy}) sur les surfaces des parois (surface gauche, surface droite et surface de passage) par rapport à la variation de la température de l'air à l'entrée. Nous constatons sur cette figure que le nombre de Nusselt moyen prend des valeurs maximales lorsque la température de l'air tend vers le maximum ou le minimum (lorsque la différence entre les températures de l'air et de la paroi est maximale) avec un léger décalage dû au déphasage thermique (tel qu'il sera présenté dans le paragraphe § V.4.2.4. suivant), tandis que le nombre de Nusselt moyen prend des valeurs faibles lorsque la température de l'air est au voisinage de la température moyenne (autour de 29 °C).

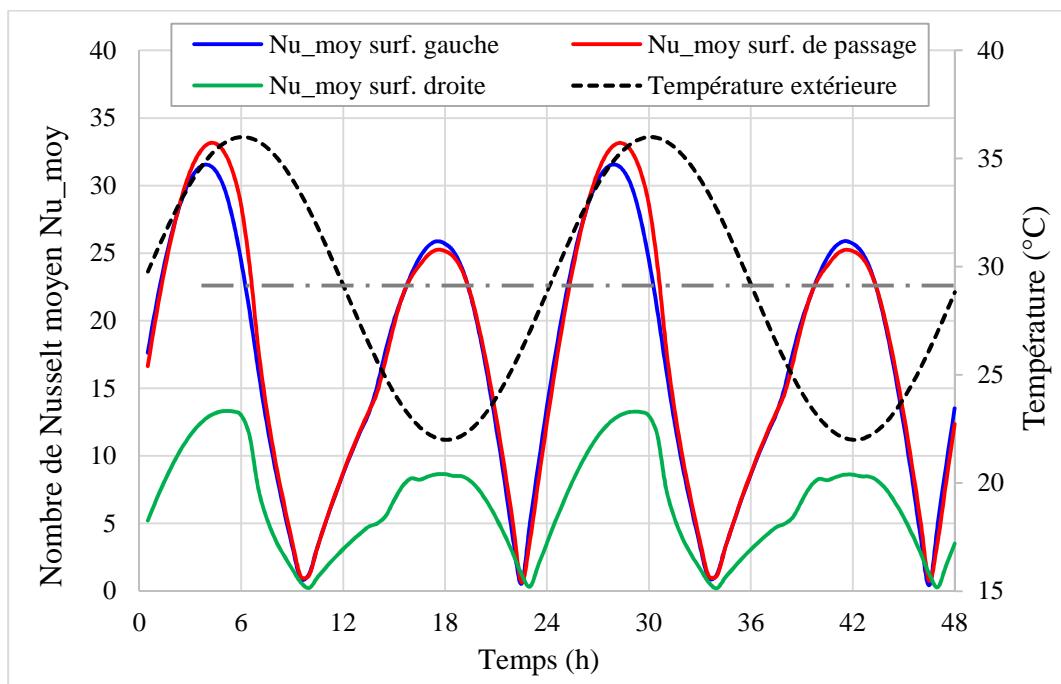


Figure V.21. Nombre de Nusselt moyen en fonction de la variation de la température.

V.4.2.4. Déphasage thermique des panneaux plâtre-MCP

Le déphasage est un facteur important dans l'étude du comportement thermique et du phénomène d'absorption et de libération de chaleur d'un panneau de plâtre-MCP. La Figure V.22a et la Figure V.22b présentent respectivement le déphasage entre la température de l'air à l'entrée et la température de l'air à la sortie en fonction de l'espacement des perforations pour une épaisseur de 90 mm et en fonction de l'épaisseur du panneau pour un espacement $D = 43$ mm.

Nous observons sur la Figure V.22a que la diminution de l'espacement entre les perforations entraîne une augmentation du déphasage et que le déphasage devient court pour un espacement entre les perforations supérieur à 100 mm, c'est-à-dire inférieur à 2 heures. De plus, la valeur du déphasage est importante pour les faibles vitesses d'admission. Il a également été constaté que le déphasage thermique avait augmenté en moyenne de 3,5 heures pour un panneau perforé avec un espacement des perforations de 43 mm par rapport au panneau non perforé. Aussi, lorsque l'espacement atteint la valeur de 100 mm, le déphasage devient faible et presque constant avec une valeur moyenne de 1,5 heures, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'à partir d'une distance de 100 mm, la capacité d'absorption/libération de chaleur devient faible.

La Figure V.22b montre les courbes de déphasages en fonction des épaisseurs des panneaux. Il est montré qu'au-dessus d'une épaisseur de 30 mm, la variation devient presque linéaire et que les panneaux plus épais engendrent une augmentation du déphasage thermique entre les températures de l'air à l'entrée et de l'air à la sortie. La valeur de déphasage thermique peut être de 1,3 heures dans le cas d'un panneau de 10 mm d'épaisseur et augmente pour presque atteindre 6 heures dans le cas d'un panneau de 90 mm d'épaisseur pour une vitesse de ventilation de 3 mm/s.

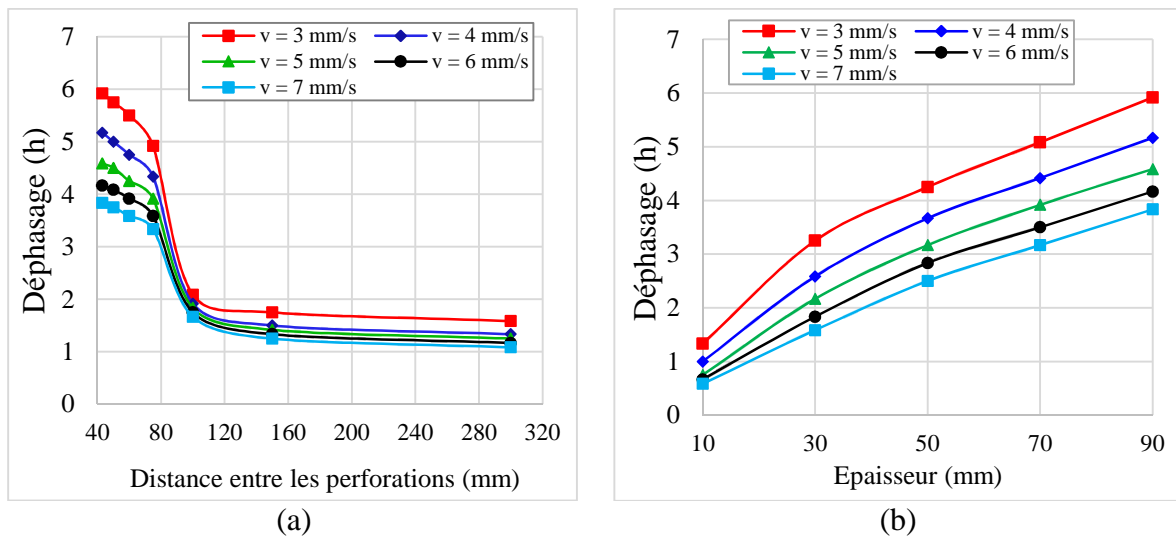


Figure V.22. Déphasage en fonction de : (a) distance entre les perforations pour $E_p = 90$ mm, (b) épaisseurs pour distance entre les perforations $D = 43$ mm.

V.4.2.5. Flux de chaleur absorbé et libéré

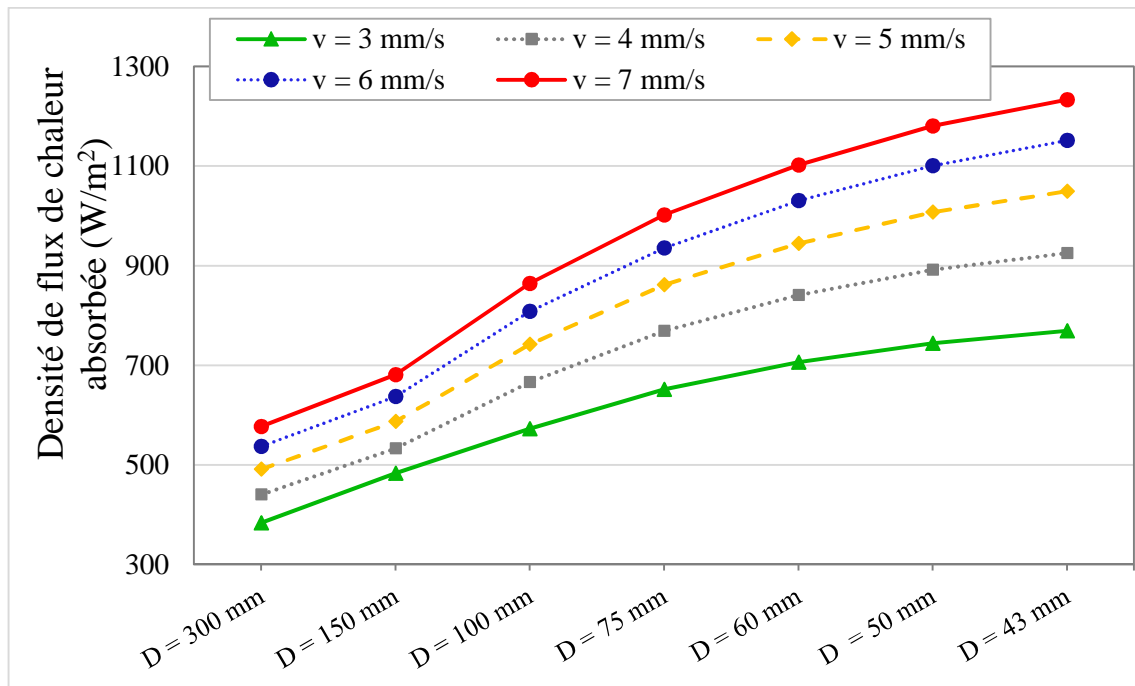
Les résultats de trois facteurs, à savoir l'espacement entre les perforations, l'épaisseur des panneaux plâtre-MCP et la vitesse de l'air, influant sur l'absorption/libération de chaleur, sont discutés dans ce qui suit.

V.4.2.5.1. Effet de l'espacement entre les perforations pour différentes vitesses d'air

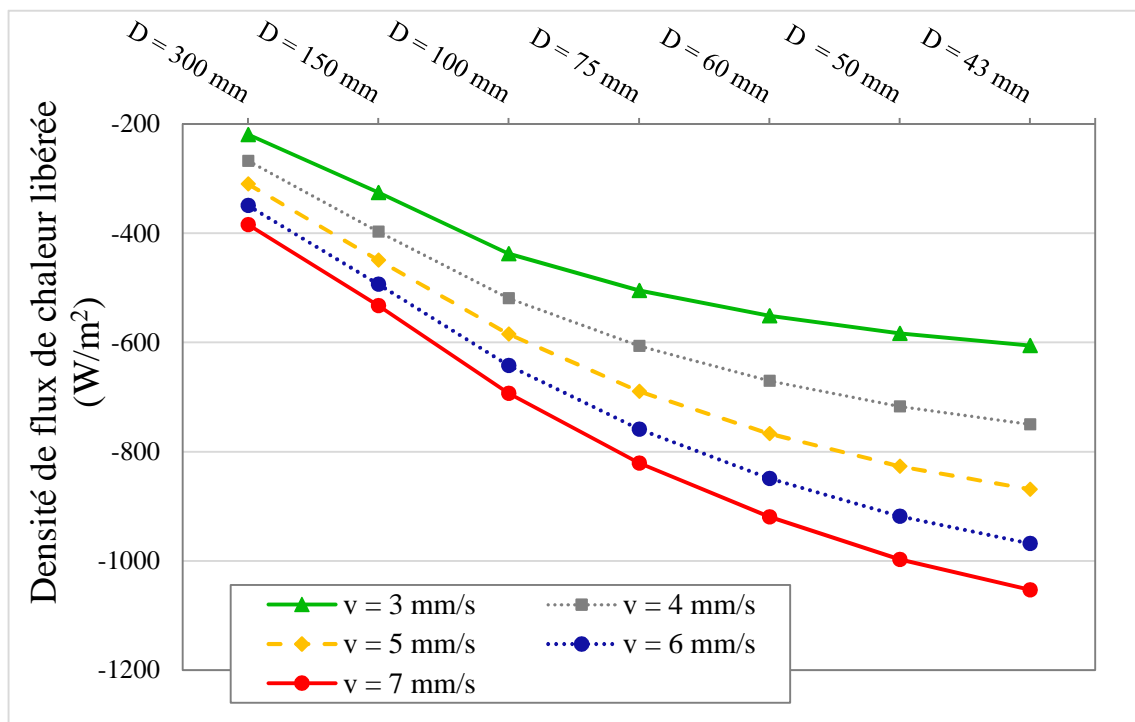
La Figure V.23a et la Figure V.23b présentent respectivement la densité de flux thermique absorbée et libérée, pour différents cas présentés dans le Tableau V.1 et ceux pour un pourcentage en poids de MCP de 30 % et une épaisseur de 50 mm. Les densités de flux de chaleur absorbé et libéré pendant 48 heures ont été obtenues pour les différentes valeurs de l'espacement entre les perforations de 43 mm à 300 mm et pour différentes vitesses d'air. Les densités de flux ont été déterminées à partir de l'équation (V.6). Les résultats obtenus indiquent que l'absorption et la libération de flux de chaleur à travers les panneaux de plâtre-MCP sont plus élevées lorsque la distance entre les perforations est petite. Ceci est dû à l'amélioration de la transmission de chaleur à travers et autour des perforations du panneau. Lorsque le panneau ne contient pas de perforations, le flux de chaleur absorbé et libéré sera inférieur à celui du panneau perforé.

Par rapport à la capacité d'absorption et de libération de chaleur, la densité de flux de chaleur augmente avec la diminution de l'espacement entre les perforations dans le panneau. Comme montré sur la Figure V.23a, la densité de flux de chaleur absorbée passe de 384 à 769 W/m^2 , lorsque l'espacement entre les perforations est réduit de 300 mm à 43 mm pour $v = 3$ mm/s, ce qui correspond à une augmentation en pourcentage de 100 %. Cette augmentation en pourcentage n'est que de 3 % lors de la réduction de l'espacement des perforations de 50 mm à 43 mm. De plus, une augmentation de la vitesse de l'air de 4 mm/s à 7 mm/s génère un doublement du flux de chaleur absorbé.

Le même effet est produit pour la densité de flux de chaleur libéré, comme illustré sur la Figure V.23b. Les valeurs absolues indiquent une augmentation de 219 à 606 W/m^2 pour $v = 3$ mm/s lorsque l'espacement est réduit de 300 mm à 43 mm, c'est-à-dire que le flux de chaleur libéré a été multiplié par 2,7, soit une augmentation en pourcentage de 175 %. Cette augmentation reste presque constante lorsque la vitesse de l'air augmente de 4 mm/s à 7 mm/s, alors que, le pourcentage n'est que de 4 % si l'espacement est réduit de 50 mm à 43 mm.



(a)



(b)

Figure V.23. Densité de flux de chaleur en fonction de $D = 300$ mm à $D = 43$ mm pour $E_p = 50$ mm et pour $v = 3$ mm/s à $v = 7$ mm/s : (a) absorption de chaleur, (b) libération de chaleur.

V.4.2.5.2. Comparaison de la densité de flux de chaleur absorbée en fonction de l'épaisseur et de l'espacement entre les perforations

La Figure V.23 montre que la forme des courbes d'absorption et de libération suit la même tendance en termes d'augmentation et de diminution, le choix de la représentation du transfert de chaleur ne sera effectué par la suite que pour le flux de chaleur absorbé (Figure V.24 et Figure V.25).

La remarque importante déduite de la Figure V.24 est qu'un panneau de plâtre-MCP avec plusieurs perforations peut absorber autant de chaleur qu'un autre panneau de plâtre-MCP avec un petit nombre de perforations, en fonction de la distance entre les perforations et de l'épaisseur du panneau. En effet, un panneau d'une épaisseur $E_p = 10$ mm et avec une distance entre perforations $D = 43$ mm peut absorber plus de chaleur qu'un panneau d'une épaisseur $E_p = 30$ mm sans perforations (cas de $D = 300$ mm). De même, un panneau d'une épaisseur $E_p = 30$ mm et une distance entre les perforations $D = 43$ mm peut absorber plus de chaleur qu'un panneau d'une épaisseur $E_p = 90$ mm sans perforations ou pour le cas de perforations où $D = 150$ mm comme indiqué par les lignes horizontales en pointillés sur la Figure V.24. Ce qui signifie qu'un panneau perforé peut absorber un flux de chaleur supérieur à un panneau sans perforations et dont l'épaisseur est trois fois supérieure à l'épaisseur du panneau perforé.

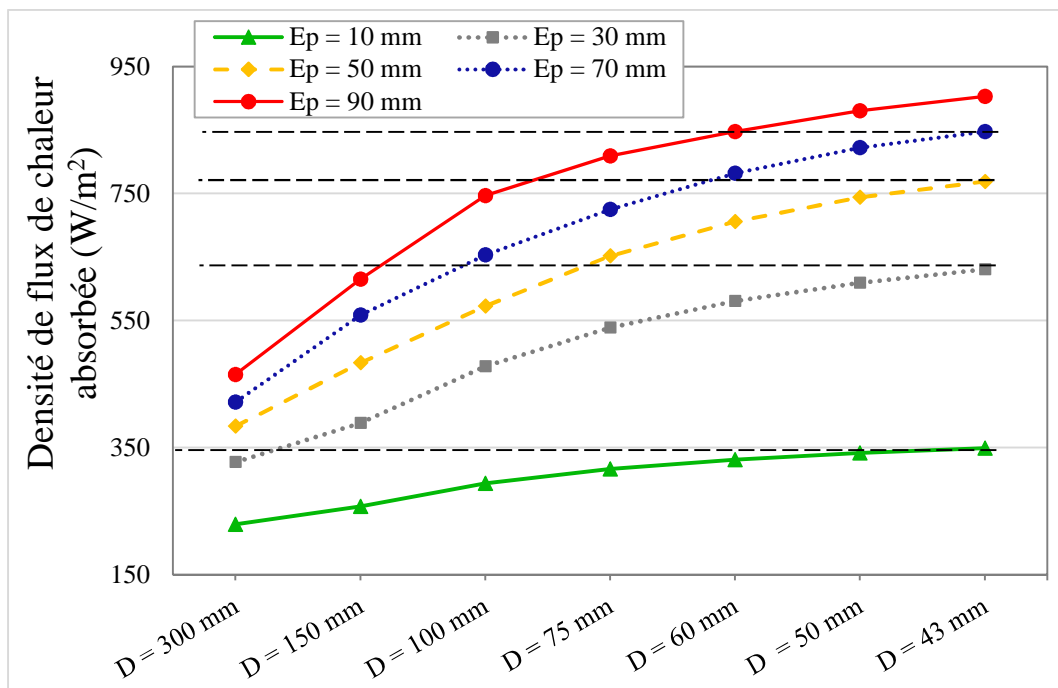


Figure V.24. Densité de flux de chaleur absorbée en fonction de $D = 300$ mm à $D = 43$ mm pour $E_p = 10$ mm à $E_p = 90$ mm et pour $v = 3$ mm/s.

V.4.2.5.3. Relation entre le flux thermique absorbé, l'épaisseur et l'espacement entre les perforations pour différentes vitesses d'air

Il a été montré sur la Figure V.23 et la Figure V.24 qu'une relation étroite a été observée entre l'absorption/libération du flux de chaleur d'une part et l'épaisseur de panneau (E_{pi}), ainsi que l'espacement entre les perforations (D_i) d'autre part. Par conséquent, il est nécessaire de tracer la courbe qui exprime la densité de flux de chaleur absorbé en fonction de ces deux paramètres et de déduire une équation de la forme de $\varphi_{ab} = f\left(\frac{E_{pi}}{D_i}\right)$ pour tous les cas étudiés (à partir de $D = 300$ mm à $D = 43$ mm, pour des épaisseurs de $E_p = 10$ mm à $E_p = 90$ mm et également pour des vitesses d'air comprises entre $v = 3$ mm/s et $v = 7$ mm/s), comme indiqué dans la Figure V.25. Les coefficients de détermination (R^2) trouvés pour les différentes vitesses de l'air sont compris entre $R^2 = 0.981$ et 0.992 , soit des valeurs très proche de 1, ce qui signifie que les équations de régression peuvent expliquer l'absorption du flux thermique en fonction de la variable sans dimension $\left(\frac{E_{pi}}{D_i}\right)$. Les équations de régression peuvent être écrites comme un polynôme du 3^{ème} degré comme suit :

$$\varphi_{ab} = a \times \left(\frac{E_{pi}}{D_i}\right)^3 + b \times \left(\frac{E_{pi}}{D_i}\right)^2 + c \times \left(\frac{E_{pi}}{D_i}\right) + d \quad (V.7)$$

Avec a, b, c et d qui sont des constantes déterminées à partir de la courbe de chaque vitesse d'air et présentées dans le Tableau V.2.

Tableau V.2. Constantes des équations polynomiales du 3^{ème} degré.

Coefficients constants Vitesses de l'air	a	b	c	d
	v = 3 mm/s	106,7	-522,5	963,1
v = 4 mm/s	105,3	-539,3	1106,1	222,6
v = 5 mm/s	96,3	-524,9	1202,8	238,5
v = 6 mm/s	84,0	-498,1	1274,8	250,5
v = 7 mm/s	86,5	-511,8	1358,2	263,7

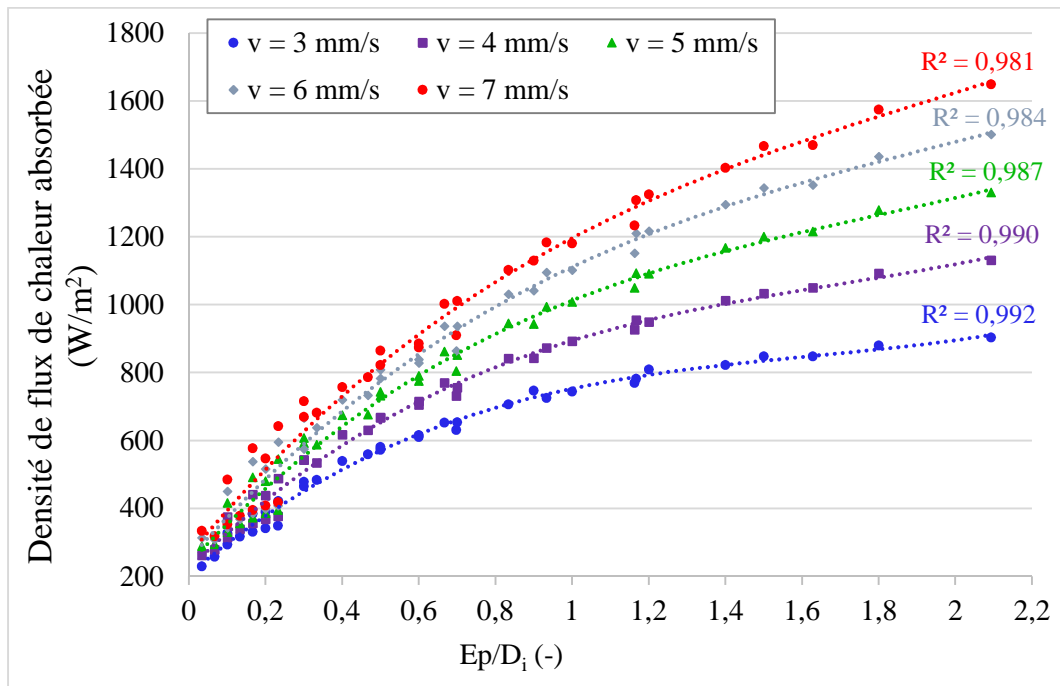


Figure V.25. Flux de chaleur absorbé en fonction du terme sans dimension ($\frac{Ep_i}{D_i}$).

V.5. Conclusion

Dans ce chapitre, des analyses numériques et expérimentales du comportement thermique des panneaux de plâtre-MCP ont été effectuées afin de valider une solution permettant d'améliorer le transfert de chaleur (absorption/libération de flux de chaleur) de ces derniers. Les principales conclusions sont présentées comme suit :

- La diminution de l'espacement entre les perforations entraîne une augmentation du déphasage.
- L'absorption/libération de chaleur augmente avec la diminution de l'espacement entre les perforations (D_i).
- L'augmentation maximale de l'absorption et de la libération de chaleur lors de la réduction de l'espacement des perforations de 300 mm à 43 mm.
- Un panneau de plâtre-MCP perforé peut absorber plus de chaleur qu'un panneau sans perforations et dont l'épaisseur est de 3 fois plus grande.
- Une relation étroite a été observée entre l'absorption/libération de flux de chaleur d'une part et l'épaisseur du panneau plâtre-MCP (E_{p_i}), ainsi que l'espacement entre les perforations (D_i), d'autre part.

**CHAPITRE VI. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN LOCAL
D'HABITATION EQUIPE DE PANNEAUX DE PLATRE-MCP**

VI.1.Introduction

Après avoir étudié le comportement thermique des panneaux de plâtre-MCP (chapitre IV) et proposé une technique pour améliorer l'absorption/libération de la chaleur par la perforation des panneaux de plâtre-MCP (chapitre V), il est important d'étudier leur comportement et leur potentiel d'économie d'énergie dans un local à échelle réelle. Le présent chapitre s'intéresse à l'examen du confort thermique et du potentiel d'économie d'énergie d'un local d'habitation présenté dans la Figure VI.1. Cette partie est particulièrement importante pour représenter avec précision le mouvement de l'air dans le local et calculer le potentiel d'économie d'énergie lié au chauffage et à la climatisation. Les paramètres d'entrées utilisés (température de confort, composition des parois et débit de renouvellement de l'air) ont été obtenus à partir des documents techniques réglementaires algériens.

VI.2. Description de la géométrie du local

Le local objet de cette simulation en 2D est un local dont les épaisseurs des parois, coefficients de transmission thermique global (K) et les conditions extérieures sont donnés dans le Tableau VI.1 suivant :

Tableau VI.1. Caractéristiques des parois du local.

Enveloppe	Epaisseur (m)	Coefficient K (W/m ² .K)	Température (°C)
Mur extérieur 1	0,115	2,72	Température extérieure : Fonction sinusoïdale (voir la section V.3.2.3.)
Mur extérieur 2	0,275	1,33	
Plancher haut	0,31	0,62	
Plancher bas (en contact avec un local)	0,21	1,95	Température intérieure : En été : 24 °C En hiver : 21 °C

La composition des parois correspond à celle utilisée le plus souvent dans les constructions en Algérie. Ces parois sont composées comme suit :

- Mur extérieur 1 : mur en double cloison, la cloison extérieure est en brique d'épaisseur de 10 cm avec une couche de mortier 1,5 cm du côté extérieur, la cloison intérieure est constituée du panneau de plâtre avec MCP. Une lame d'air de 5 cm sépare les 2 cloisons.

- Mur extérieur 2 : mur en double cloison avec deux rangées de briques de 10 cm pour chaque cloison, une lame d'air de 5 cm et avec des couches de mortier de 1 cm de côté intérieur et 1,5 cm du côté extérieur.
- Plancher haut : composé d'une couche de 1 cm de mortier en plâtre du côté intérieur, d'un hourdis de 16 cm, d'une dalle de compression en béton de 5 cm, d'une couche isolante de 5 cm en PSE, de 2,5 cm de mortier et de 1,5 cm de carrelage.
- Plancher bas (en contact avec un local conditionné), de même composition que le plancher haut mais sans la couche isolante.

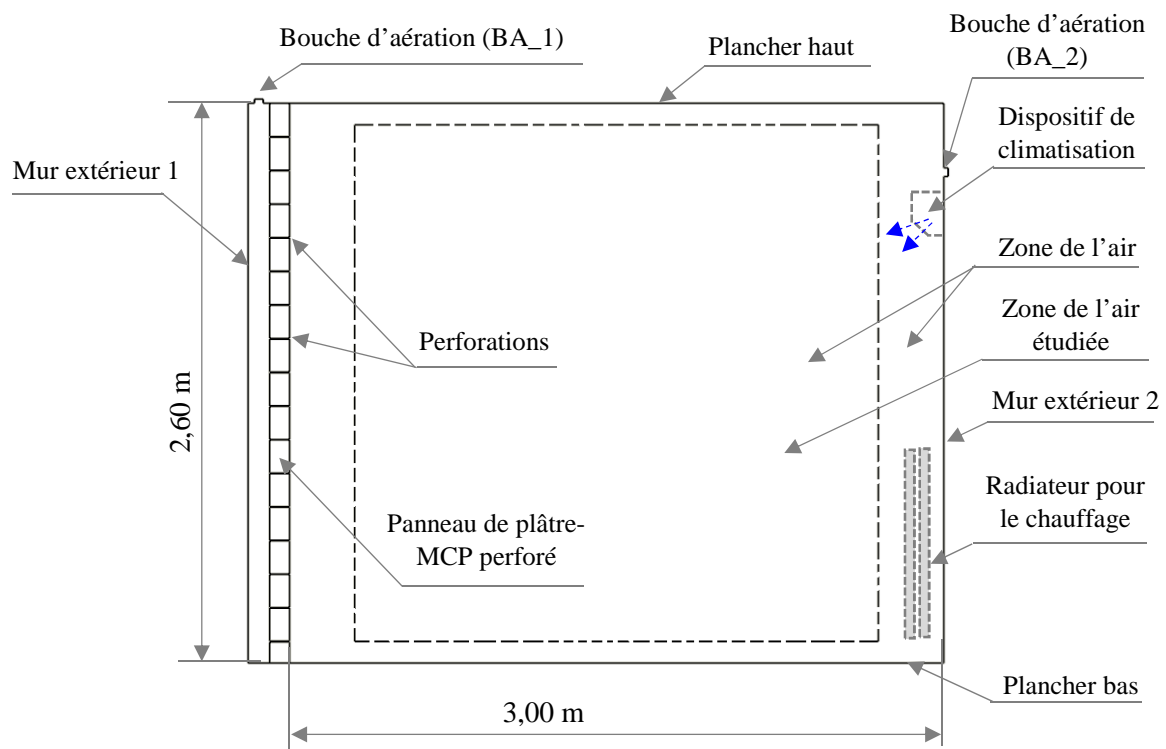


Figure VI.1. Modèle de géométrie du local.

VI.3. Maillage du local

Le maillage illustré sur la Figure VI.2 est conçu à l'aide de logiciel Gambit 2.4 et comprend principalement des cellules hexaédriques pour le panneau absorbant (plâtre-MCP) et pour le dispositif de chauffage. Le domaine de l'air est constitué de mailles non structurées, avec un taux de croissance de 1,1. Les mailles sont fines au niveau de l'interface entre le panneau et l'air, au niveau des perforations et au niveau des bouches d'aérations. Le maillage ensuite augmente progressivement vers la majeure partie du domaine de l'air. Un maillage plus grossier a été utilisé pour la zone de l'air au milieu du local.

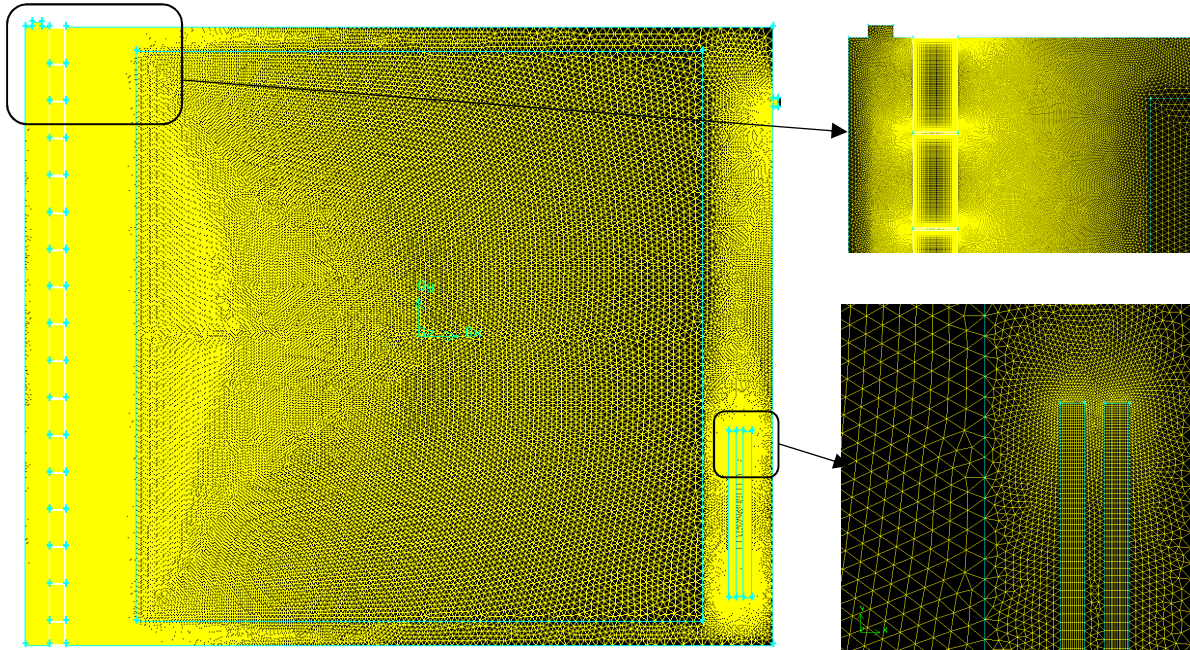


Figure VI.2. Maillage du panneau en 2D du local.

L'outil de résolution, la modélisation numérique et la modélisation de la turbulence utilisés pour cette partie d'études sont les mêmes que pour le chapitre V.

VI.4. Cas étudiés sur un local

Pour effectuer une étude paramétrique, les paramètres variables de cette étude sont donnés dans le Tableau VI.2. Le pourcentage en masse du MCP dans le plâtre utilisé est de 30 %.

Tableau VI.2. Différents cas d'études.

Epaisseur Ep_i (mm)	Sens d'écoulement d'air	Panneaux utilisés	Période	Type de panneaux
$Ep_1 = 10$	BA_1 vers BA_2	Plâtre sans MCP	Eté	Avec des perforations (type 1)
$Ep_2 = 30$	BA_2 vers BA_1	Plâtre avec MCP d'une $T_f = 23$ °C	Hiver	Sans perforations (Ordinaire type 2)
$Ep_3 = 50$	Mixte	Plâtre avec MCP d'une $T_f = 26$ °C	-	Sans perforations (Ordinaire type 3)
$Ep_4 = 70$	-	-	-	-
$Ep_5 = 90$	-	-	-	-

La comparaison entre un panneau perforé et un panneau ordinaire se fait pour trois (3) types. Dans le premier type, le panneau de plâtre-MCP est perforé (P.P.) de 16 perforations espacées de 15,6 cm (Figure VI.3a) tandis que les deux autres types, concernent des panneaux de plâtre-MCP ordinaires (sans perforations). Le premier panneau de plâtre-MCP ordinaire pour lequel le passage de l'air se fait par le côté bas est indiqué par P.O.B (Figure VI.3b), alors que le second panneau de plâtre-MCP ordinaire pour lequel le passage de l'air se fait par le côté haut est indiqué par P.O.H (Figure VI.3c).

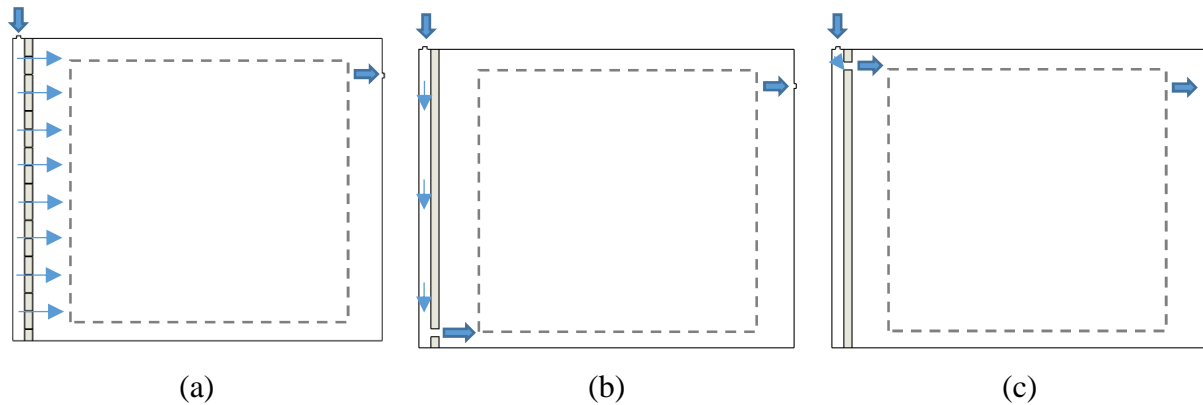


Figure VI.3. Les trois types de panneaux :(a) type 1 : panneau avec perforation, (b) type 2 : panneau ordinaire (P.O.B) et (c) type 3 : panneau ordinaire (P.O.H).

Le sens de ventilation des trois (3) cas étudiés est schématisé sur la Figure VI.4. Le premier sens de ventilation (Figure VI.4a) est lorsque l'air traverse le panneau de plâtre-MCP avant son entrée dans l'espace du local intérieur (BA_1 vers BA_2). Le deuxième sens de ventilation (Figure VI.4b) est lorsque l'air entre directement dans l'espace du local intérieur ensuite traverse le panneau de plâtre-MCP avant sa sortie à l'extérieur (BA_2 vers BA_1). Le troisième cas de ventilation (Figure VI.4c) est lorsque l'air traverse le panneau de plâtre-MCP avant son entrée dans l'espace du local quand la température extérieure de l'air est supérieure à 24 °C en période d'été et inférieure à 21 °C en période d'hiver avec un débit d'air réglementaire (0,6 Volume/heure). Si cette condition de température n'est pas vérifiée, le sens de la ventilation s'inverse et donc l'air passe directement dans l'espace du local intérieur ensuite traverse le panneau de plâtre-MCP avant sa sortie à l'extérieur avec un débit plus important (1 V/h, 2 V/h ou 3 V/h) pour bénéficier de la fraîcheur de l'air extérieur en période d'été ou pour bénéficier de l'air extérieur plus chaud en période d'hiver (sens mixte).

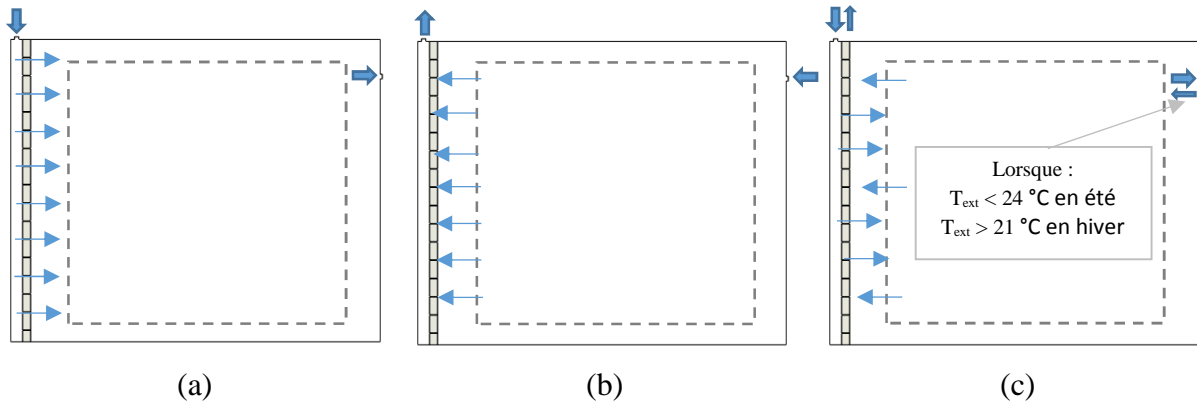


Figure VI.4. Sens d'écoulement d'air : (a) sens BA_1 vers BA_2, (b) sens BA_2 vers BA_1 et (c) sens Mixte.

VI.5. Résultats et interprétations

VI.5.1. Comportement thermique en période d'été sans climatisation

La température de l'air et la température des parois sont deux indicateurs importants du confort thermique d'un local d'habitation. A partir de l'oscillation des températures de l'air et de la paroi (panneau de plâtre-MCP), on peut déterminer les amplitudes de la variation de la température de l'air et de la paroi. Les températures présentées dans la Figure VI.1 concernent les températures moyennes de la zone de l'air étudiée et les températures moyennes du panneau de plâtre-MCP. Ces températures ont été déterminées pour la période d'été où la température extérieure oscille entre la température minimale $T_{\min} = 22 \text{ °C}$ et la température maximale $T_{\max} = 36 \text{ °C}$. Lorsqu'un local subit une variation de température extérieure, les matériaux de ce dernier interagissent en stockant et/ou en libérant de la chaleur de façon passive en participant ainsi à l'amélioration passive des conditions de l'environnement intérieure du local, donc à la limitation des besoins en climatisation.

La Figure VI.5 présente le contour de température du local à $t = 12 \text{ h}$ et pour un débit d'air de ventilation de $0,6 \text{ V/h}$ en période estivale sans climatisation. On remarque que dans la zone du milieu (zone de l'air étudiée), la température est entre 26 °C et 27 °C .

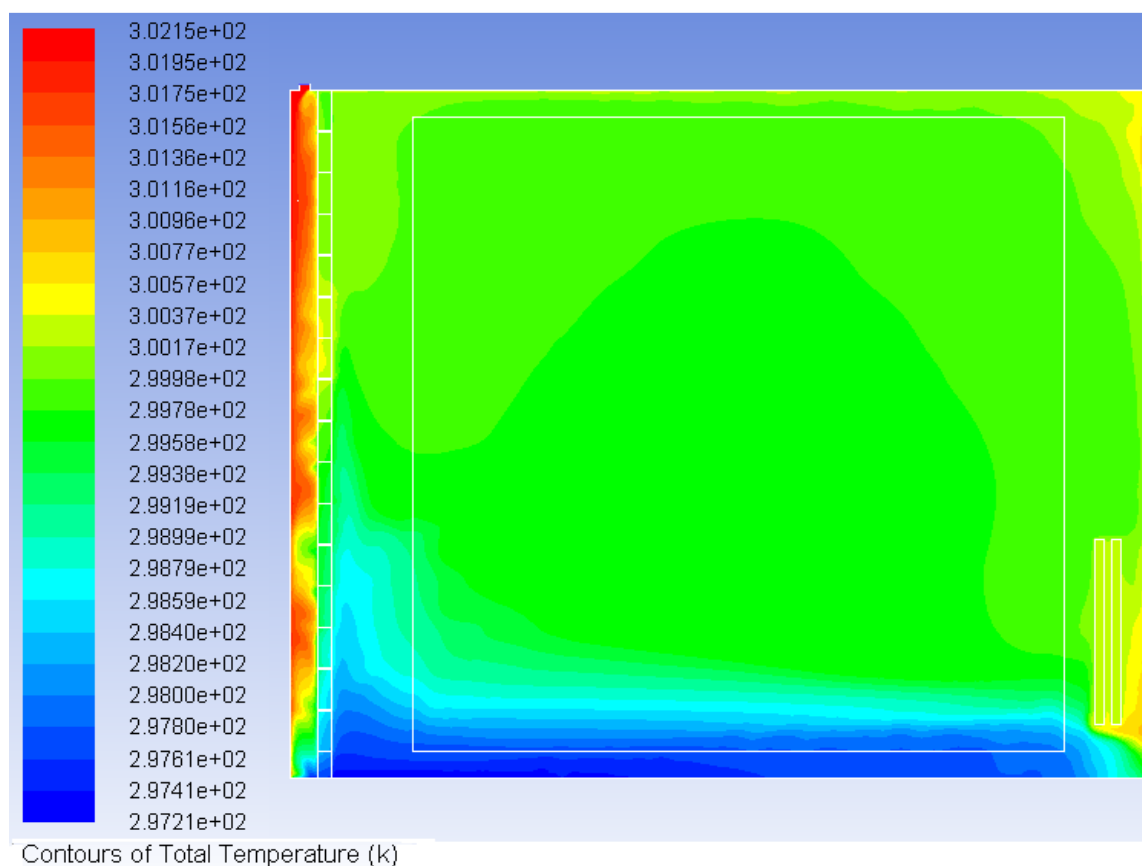
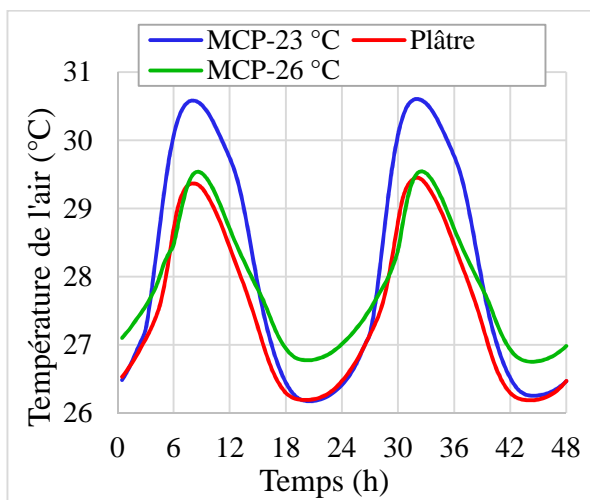


Figure VI.5. Contours de température du local à $t = 12$ h et pour un débit d'air de 0,6 V/h en période estivale sans climatisation.

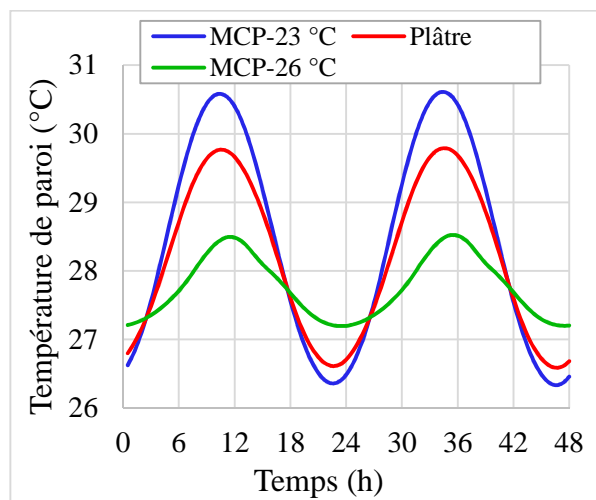
VI.5.1.1. Comportement thermique en fonction du choix du matériau

Le comportement thermique pour différents matériaux est présenté dans la Figure VI.6. Le pourcentage de MCP utilisé est 30 %, l'épaisseur des panneaux est de 50 mm, les panneaux sont perforés, le débit d'air de ventilation est de 0,6 volume/heure et le sens de la ventilation se fait du côté gauche vers le côté droit (BA_1 vers BA_2) tel qu'il est illustré sur la Figure VI.3a. Les températures moyennes des zones médianes (zones de l'air étudié) et les températures des parois (Figure VI.6a et Figure VI.6b) nous indiquent que pour une variation de température extérieure estivale, la température de l'air du local avec un panneau perforé en plâtre avec un MCP d'une $T_f = 26$ °C oscille moins fortement que pour un local contenant un panneau perforé plâtre avec un MCP d'une $T_f = 23$ °C. D'où les MCP, dont la plage de température de fusion se rapproche de la limite inférieure de la plage de variation de température intérieure désirée, se sont révélés plus utiles en termes de contrôle de la température ambiante du local (Figure VI.6c). Il a été observé aussi que le comportement thermique (oscillation de la température de l'air intérieur étudié) d'un local avec un panneau perforé en plâtre présente une variation de

température inférieure à celle trouvée dans un local avec un panneau en plâtre-MCP perforé dont la température de fusion du MCP utilisé est $T_f = 23 \text{ }^\circ\text{C}$. En effet, la température moyenne de ce panneau de MCP est tout le temps supérieure à $26 \text{ }^\circ\text{C}$, donc le MCP reste en permanence à l'état liquide. De plus, la densité et la conductivité thermique du panneau de plâtre sont plus élevées que celles du panneau de MCP dont $T_f = 23 \text{ }^\circ\text{C}$. Ces dernières engendrent respectivement une quantité d'énergie thermique absorbée/libérée plus importante et une absorption/libération de chaleur plus rapide, par rapport au panneau de MCP. Ces observations peuvent être confirmées à partir de la Figure VI.6d. En effet, sur ladite figure, un local muni d'un panneau de MCP de $T_f = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ peut assurer une température ambiante de l'air entre $26 \text{ }^\circ\text{C}$ et $27 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 44,8 % du temps alors que pour la même température ambiante de l'air, la durée est de 41 % pour un local muni d'un panneau de MCP de $T_f = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ et de 26 % pour un local muni d'un panneau de plâtre. Pour une température ambiante de l'air supérieure à $29 \text{ }^\circ\text{C}$, on constate que le local muni d'un panneau de MCP de $T_f = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ présente le pourcentage le plus élevé en durée pour cette température, ce qui signifie qu'il présente le cas le plus défavorable parmi les trois cas de panneaux en termes de confort thermique. Ceci peut être expliqué non seulement par la faible densité et la faible conductivité thermique du panneau mais aussi par la plage de température de changement de phase de ce panneau qui est inférieure aux oscillations de température moyenne de l'air et du panneau.



(a)



(b)

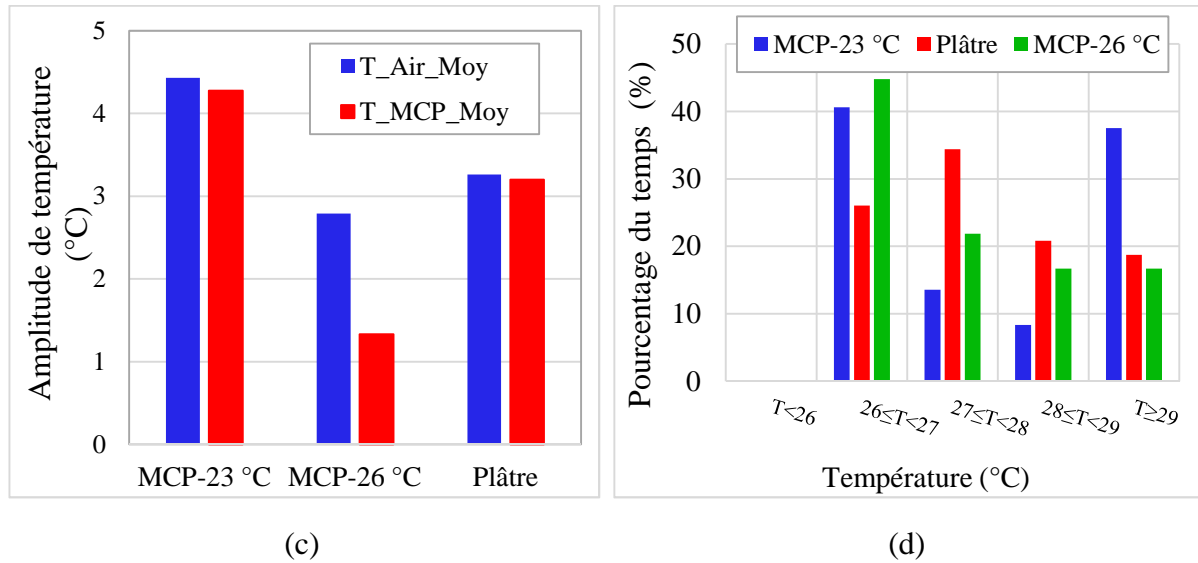


Figure VI.6. Comportement thermique pour différents matériaux.

(a) Température moyenne de l'air, (b) température moyenne des panneaux, (c) amplitude des oscillations des températures moyennes et (d) pourcentage en durée pour différentes températures moyennes de l'air intérieur.

VI.5.1.2. Comparaison entre un panneau perforé et des panneaux ordinaires

La comparaison entre les températures de l'air d'un local pour différentes utilisation du panneau de plâtre-MCP perforé et des panneaux de plâtre-MCP ordinaire (sans perforations) est présentée dans la Figure VI.7. Le pourcentage de MCP utilisé est 30 %, la température de fusion du MCP est $T_f = 26$ °C, l'épaisseur des panneaux est de 50 mm, le débit d'air de ventilation est de 0,6 volume/heure et le sens de la ventilation se fait du côté gauche vers le côté droit (BA_1 vers BA_2).

Deux dispositions ont été proposées pour le cas de l'utilisation des panneaux de plâtre-MCP sans perforations (P.O.B et P.O.H) et une seule proposition pour le cas d'un panneau de plâtre-MCP perforé. Ces dispositions sont présentées dans la Figure VI.3. On observe, à partir la Figure VI.7a et la Figure VI.7b, que les variations et les pics de température moyenne des panneaux de plâtre-MCP et de l'air du local sont pratiquement semblables pour les cas de l'utilisation d'un panneau de plâtre-MCP perforé et d'un panneau de plâtre-MCP ordinaire dont un passage de l'air de soufflage se fait par le bas (P.O.B). Tandis que pour le panneau plâtre-MCP ordinaire dont le passage de l'air de soufflage se fait par le haut (P.O.H), la variation des températures de l'air moyenne du local et du panneau de plâtre-MCP est importante. Donc, les dispositions d'un panneau de plâtre-MCP perforé et d'un panneau de plâtre-MCP ordinaire dont

un passage de l'air de soufflage se fait par le bas (P.O.B) se sont révélés plus utiles en termes de contrôle de la température ambiante du local (Figure VI.7c). Ces observations peuvent être confirmées à partir de la Figure VI.7d. En effet, un local muni d'un panneau de plâtre-MCP perforé peut assurer une température ambiante de l'air entre 26 °C et 27 °C pendant 44,8 % du temps alors que pour la même température ambiante de l'air, la durée est de 32,3 % pour un local muni d'un panneau de plâtre-MCP dont un passage de l'air de soufflage se fait par le bas (P.O.B) et de 25 % pour un local muni d'un panneau de plâtre-MCP dont un passage de l'air de soufflage se fait par le haut (P.O.H). Bien que pour l'utilisation des panneaux plâtre-MCP ordinaires, les températures moyennes de l'air peuvent être inférieures à 26 °C. Pour ces deux cas, l'utilisation de ces panneaux ordinaires peut engendrer un inconfort pour d'autres périodes dont la température moyenne de l'air du local est supérieure à 29 °C. En effet, on constate que la durée est de 33,3 % pour le cas P.O.H, 16,7 % pour le cas d'utilisation d'un panneau de plâtre-MCP perforé et 14,6 % pour le cas P.O.B.

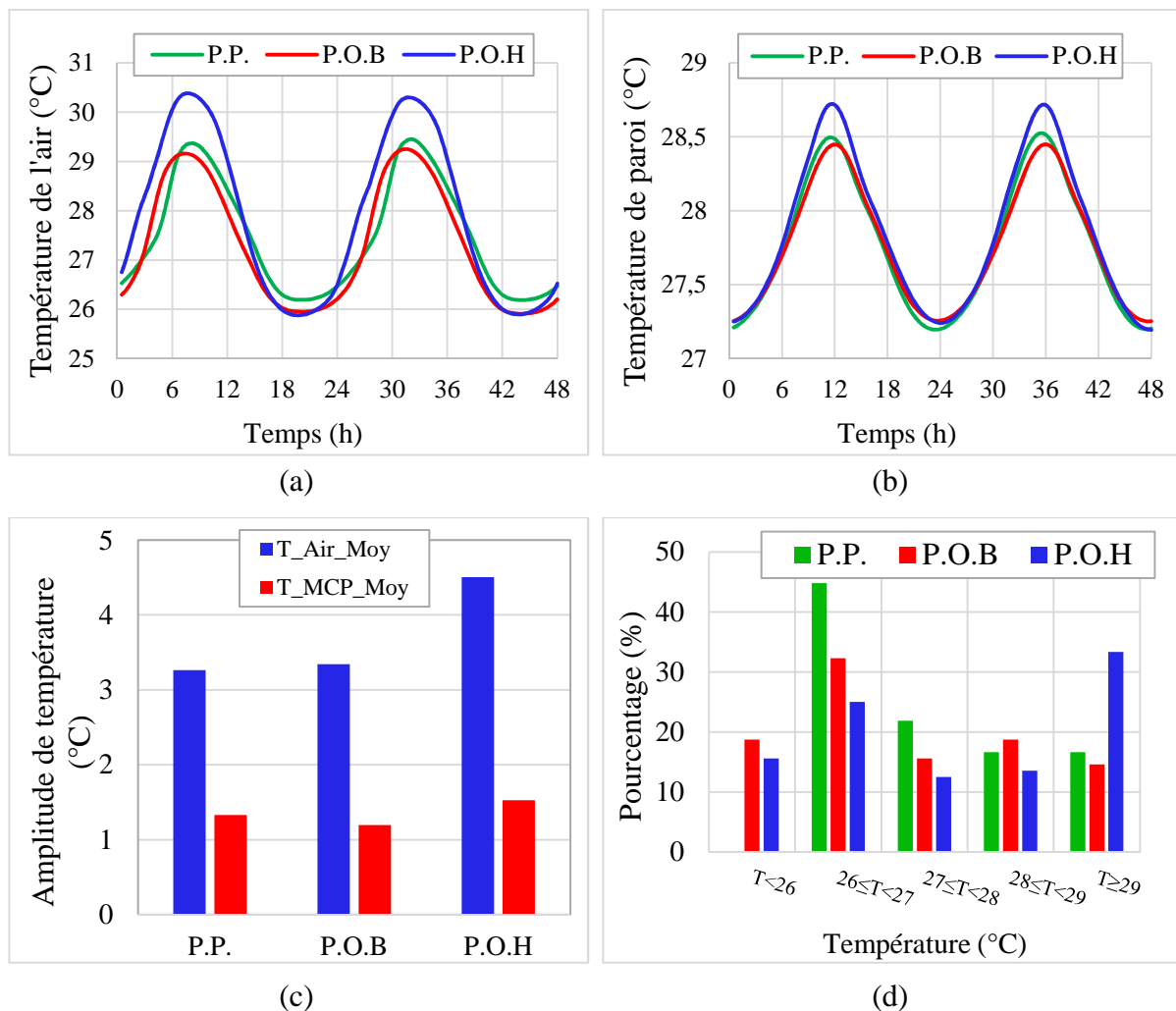


Figure VI.7. Comportement thermique entre un panneau perforé et des panneaux ordinaires.

(a) Température moyenne de l'air, (b) température moyenne des panneaux, (c) amplitude des oscillations des températures moyennes et (d) pourcentage en durée pour différentes températures moyennes de l'air intérieur.

VI.5.1.3. Différentes épaisseurs des panneaux absorbants

La température moyenne de la zone médiane du local en fonction de l'épaisseur de la paroi utilisée est présentée sur la Figure VI.8. Le pourcentage de MCP utilisé est 30 %, la température de fusion du MCP est $T_f = 26 \text{ °C}$, les panneaux de plâtre-MCP sont perforés, le débit d'air de ventilation est de 0,6 volume/heure et le sens de la ventilation se fait du côté gauche vers le côté droit (BA_1 vers BA_2).

La Figure VI.8a et la Figure VI.8b indiquent qu'à partir d'une épaisseur de 30 mm, l'amplitude de température moyenne de l'air du local ne varie pas beaucoup et l'augmentation de l'épaisseur du panneau peut aider à diminuer la température maximale du panneau de plâtre-MCP et de l'air du local. Les valeurs des amplitudes sont données sur la Figure VI.8c. Nous observons qu'au-delà d'une épaisseur de 30 mm la diminution de l'amplitude de la température moyenne de l'air est presque linéaire, elle est de 3,5 °C dans le cas d'un local dont l'épaisseur de panneau utilisé est de 30 mm et descend à 2,9 °C pour un panneau d'une épaisseur $E_p = 90$ mm. L'amplitude de la température moyenne du panneau perforé de plâtre-MCP passe de 2,2 °C pour un panneau d'épaisseur $E_p = 30$ mm à 0,7 °C pour un panneau d'épaisseur $E_p = 90$ mm. La Figure VI.8d indique que la température moyenne de l'air du local, muni d'un panneau dont l'épaisseur est de 10 mm, reste pendant 25 % du temps inférieure à 26 °C. En revanche, ce pourcentage en temps est de 35,4 % pour une température supérieure à 29 °C. Nous constatons donc que l'augmentation de l'épaisseur du panneau améliore le comportement thermique du local étudié, vu que la température moyenne de l'air a tendance à se situer majoritairement entre 26 °C et 27 °C.

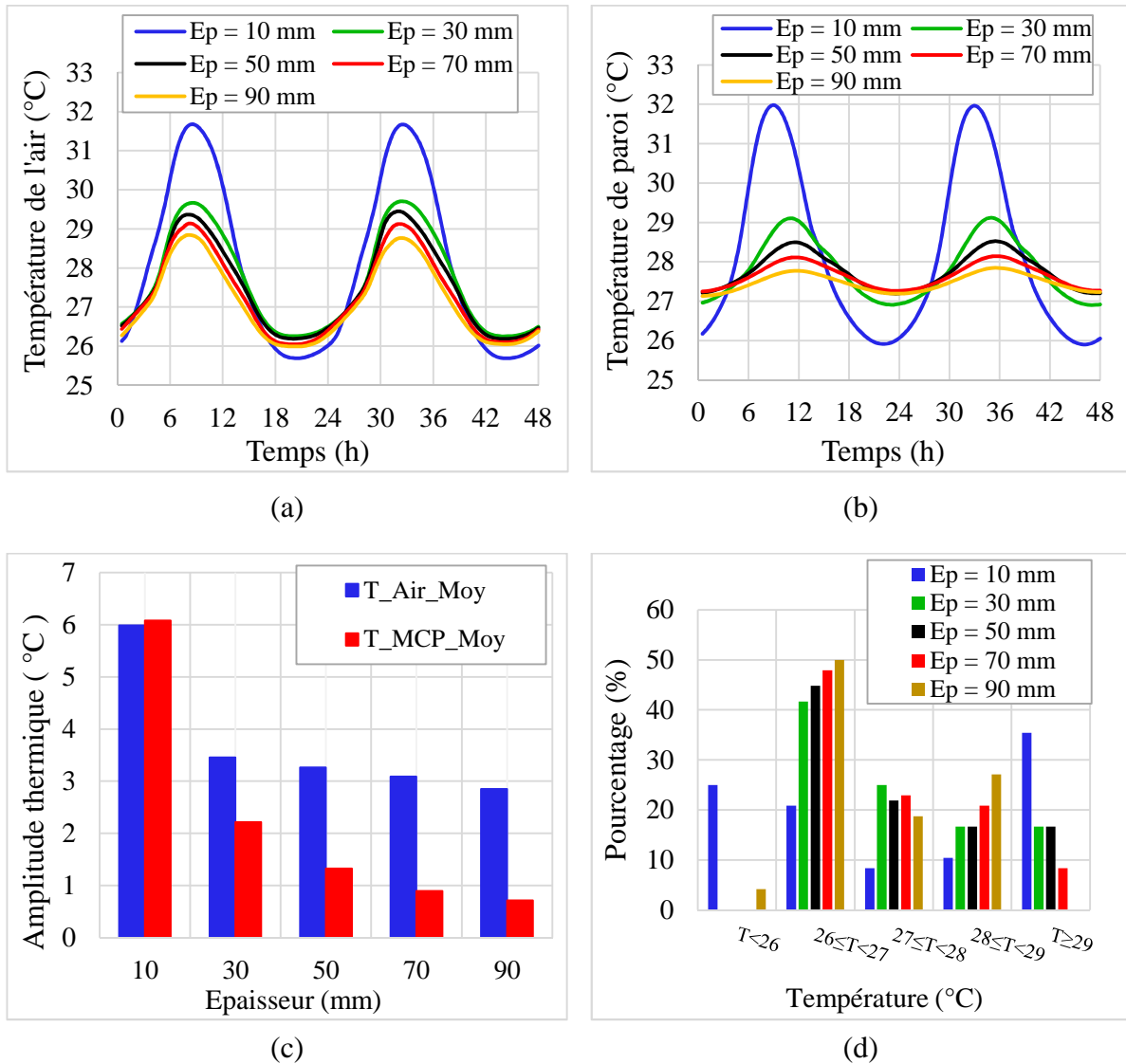


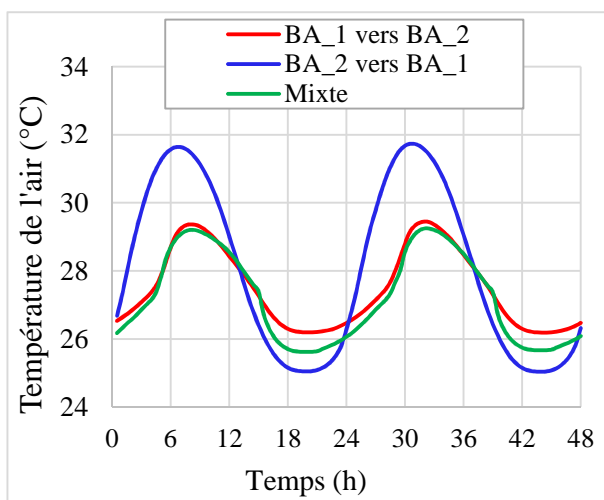
Figure VI.8. Comportement thermique pour différentes épaisseurs.

(a) Température moyenne de l'air, (b) température moyenne des panneaux, (c) amplitude des oscillations des températures moyennes et (d) pourcentage en durée pour différentes températures moyennes de l'air intérieur.

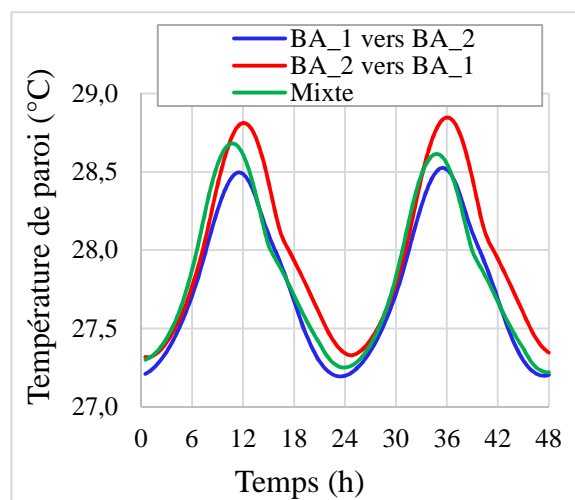
VI.5.1.4. Différents sens d'écoulement de l'air

Le sens de soufflage de l'air joue aussi un rôle très important pour améliorer la température de l'air à l'intérieur d'un local. Nous observons sur la Figure VI.9a et la Figure VI.9b que lorsque le soufflage de l'air lors de la ventilation ne passe pas à travers le panneau absorbant (BA_2 vers BA_1), l'évolution de la température moyenne de l'air du local suit presque la même tendance que la température de l'air de soufflage (température de l'air extérieur), donc la variation de température moyenne du l'air de local fluctue de façon importante. Alors que dans le cas où l'air de soufflage passe à travers le panneau absorbant

(BA_1 vers BA_2), l'air cède une partie de sa chaleur pour qu'elle soit absorbée par le panneau de plâtre-MCP, donc la température moyenne de l'air du local a tendance à rester stable (Figure VI.9c). Il est aussi intéressant de profiter de la fraîcheur extérieure lorsque la température de l'air extérieur est plus basse que la température moyenne de l'air du local. Pour cette raison, un troisième cas de ventilation noté Mixte est aussi présenté. En effet, sur la Figure VI.9d, on observe que parmi ces trois (3) cas de sens de ventilation, le sens de ventilation noté "mixte" apporte le meilleur confort d'après le pourcentage de durée pour des températures de l'air entre 26 °C et 29 °C. Ce pourcentage est 29,2 % pour une température moyenne inférieure à 26 °C et de 20,8 % pour une température moyenne comprise entre 26 °C et 27 °C, alors que pour une ventilation à travers le panneau de plâtre-MCP perforé le pourcentage est de 44,8 % pour une température moyenne comprise entre 26 °C et 27 °C et il est de 0 % pour une température moyenne inférieure à 26 °C. Le cas du sens de ventilation qui se fait directement à l'intérieur du local (BA_2 vers BA_1) est le cas le plus défavorable. En effet, bien que le pourcentage soit de 33,3 % pour une température moyenne inférieure à 26 °C, ce pourcentage reste élevé (41,7 %) pour des températures moyennes de l'air du local supérieures à 29 °C, ce qui représente un pourcentage élevé pour cet intervalle de températures.



(a)



(b)

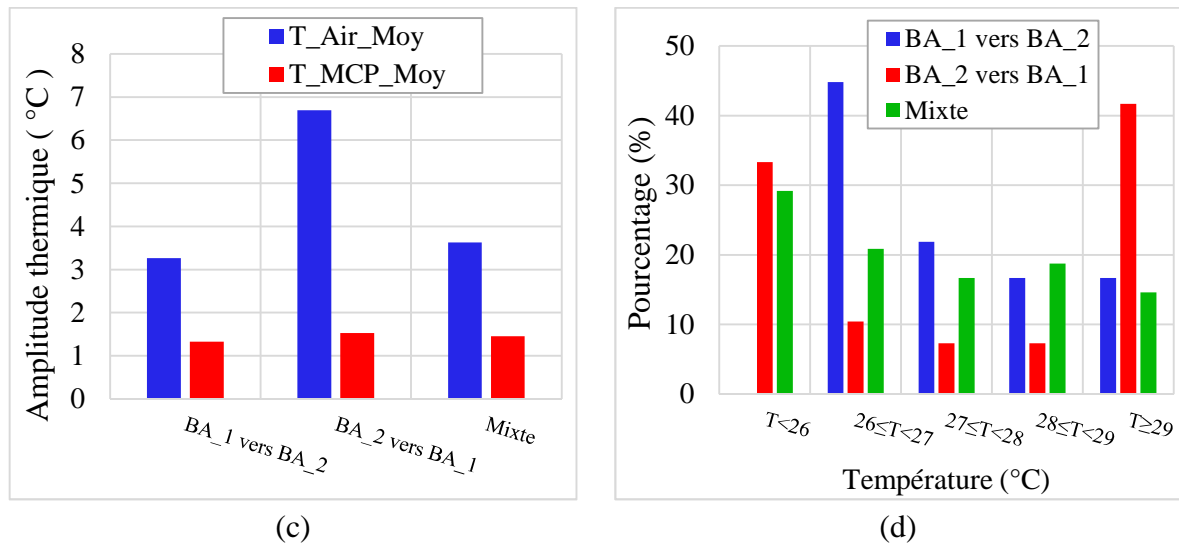


Figure VI.9. Comportement thermique pour différents sens d'écoulement de l'air.

(a) Température moyenne de l'air, (b) température moyenne des panneaux, (c) amplitude des oscillations des températures moyennes et (d) pourcentage en durée pour différentes températures moyennes de l'air intérieur.

VI.5.1.5. Différentes vitesse d'écoulement de l'air

Le débit de renouvellement d'air influence le confort thermique à l'intérieur d'une habitation. Le débit d'air réglementaire minimal selon réglementations algériennes est de 0,6 volume/heure [73,106]. Trois autres débits ont été choisis (1 V/h, 2 V/h et 3 V/h) pour étudier l'influence du débit sur le comportement thermique à l'intérieur d'un local muni d'un panneau de plâtre-MCP perforé. Les deux sens de ventilation qui ont été utilisés pour étudier l'influence du débit de ventilation sont : i) lorsque l'air travers le panneau de plâtre-MCP avant son entrée dans le local intérieur (BA_1 vers BA_2) et ii) le deuxième sens est mixte.

VI.5.1.5.1. Sens de ventilation : BA_1 vers BA_2

La Figure VI.10 illustre l'influence de la vitesse d'écoulement de l'air sur le comportement thermique d'un local muni d'un panneau perforé de plâtre-MCP d'une épaisseur $E_p = 50$ mm et un pourcentage de MCP dans le plâtre de 30 %. Le sens de soufflage se fait à travers le panneau plâtre-MCP (BA_1 vers BA_2). Globalement, l'augmentation du débit de ventilation, lorsque la température extérieure de l'air est inférieure à 24 °C engendre une amélioration dans l'environnement intérieure du local (Figure VI.10a) ainsi qu'une diminution de la température moyenne du panneau (Figure VI.10b et Figure VI.10c). Le pourcentage de durée, pour des températures moyennes de l'air du local comprises entre 26 °C et 27 °C

augmente avec l'augmentation du débit de ventilation et il diminue pour des températures moyennes de l'air élevées (Figure VI.10d).

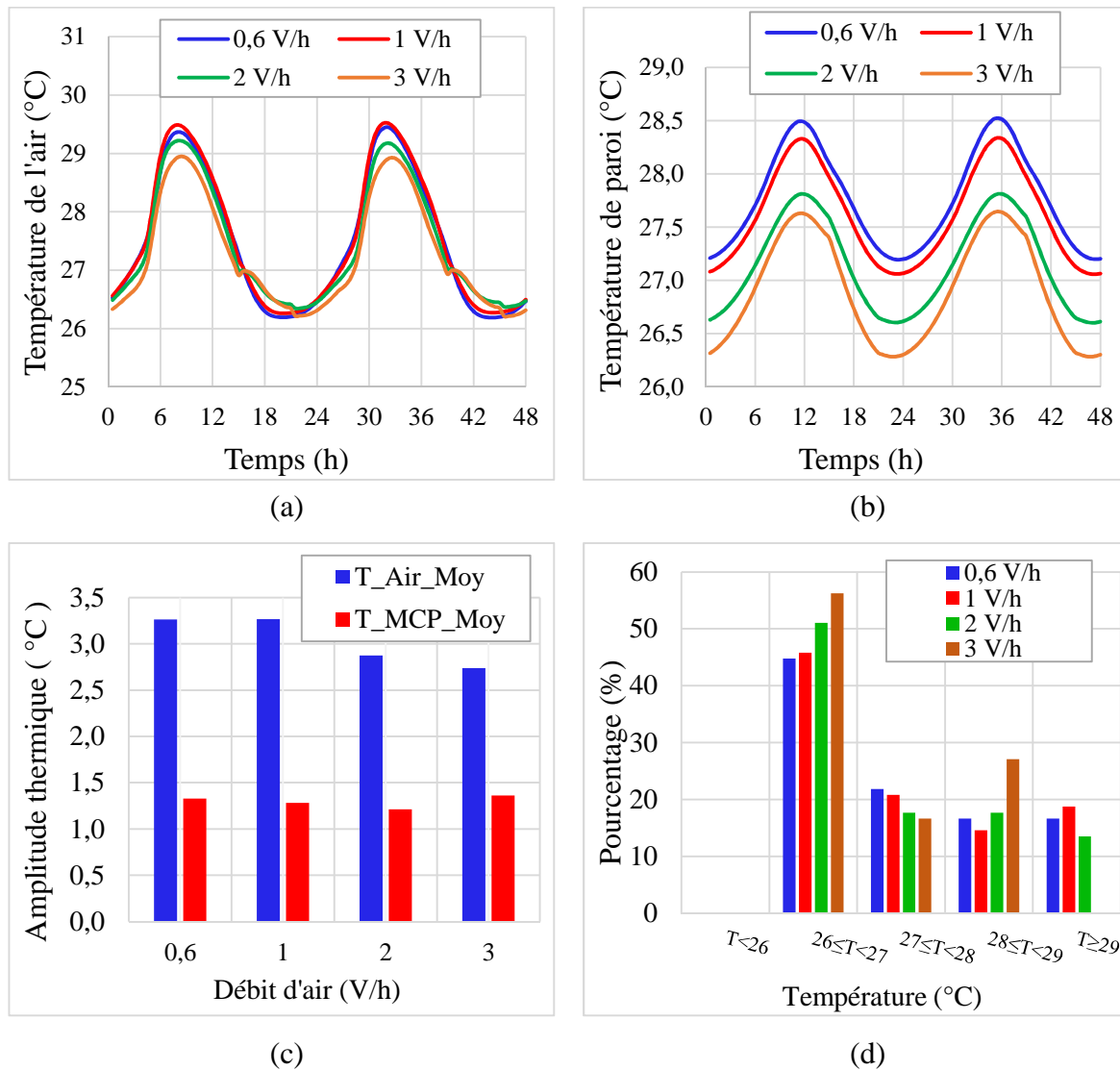


Figure VI.10. Comportement thermique pour différents sens d'écoulement de l'air lorsque la ventilation se fait de BA_1 vers BA_2.

(a) Température moyenne de l'air, (b) température moyenne des panneaux, (c) amplitude des oscillations des températures moyennes et (d) pourcentage en durée pour différentes températures moyennes de l'air.

VI.5.1.5.2. Sens de ventilation mixte

De même que pour le sens de ventilation (BA_1 vers BA_2), la Figure VI.11 illustre l'influence de la vitesse d'écoulement de l'air sur le comportement thermique d'un local muni d'un panneau perforé de plâtre-MCP d'une épaisseur $E_p = 50$ mm et un pourcentage de MCP

dans le plâtre de 30 %, mais avec un sens de soufflage est mixte tel qu'il est expliqué dans le § VI.4. Globalement, profiter de la fraîcheur de l'air extérieur pour ventiler un local directement est bénéfique en termes de confort thermique est clairement visible sur la Figure VI.11a et la Figure VI.11b. En revanche, on observe sur la Figure VI.11c une augmentation de l'amplitude de température moyenne de l'air et du panneau. Cette augmentation est bénéfique puisqu'elle permet de diminuer la température moyenne intérieure en période estivale et cela est clairement présenté sur la Figure VI.11d. En effet, on remarque que le pourcentage de durée est important lorsque la température moyenne de l'air intérieur est inférieure à 26 °C.

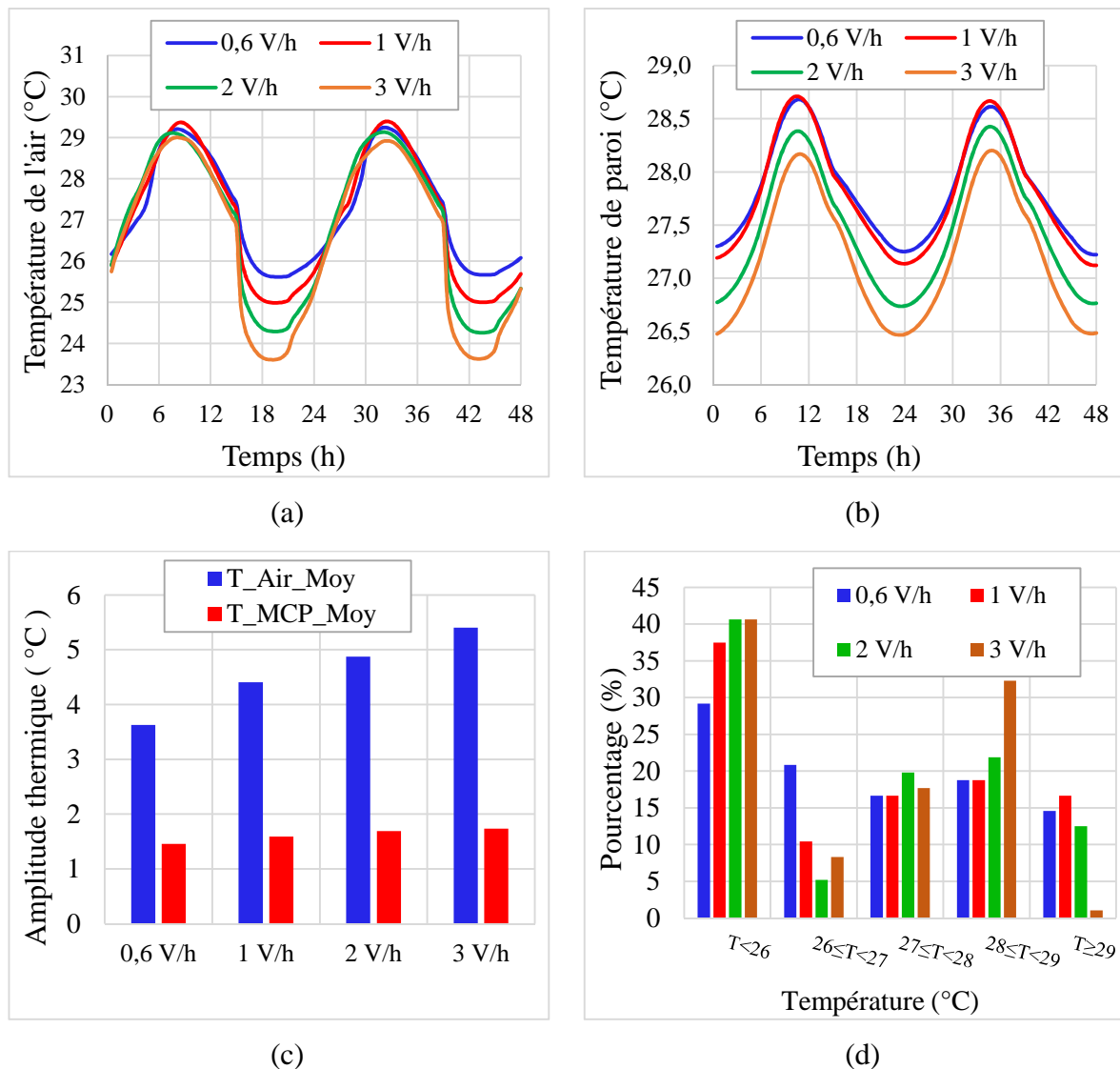


Figure VI.11. Comportement thermique pour différentes vitesses d'écoulement lorsque la ventilation est mixte.

(a) Température moyenne de l'air, (b) température moyenne des panneaux, (c) amplitude des oscillations des températures moyennes et (d) pourcentage en durée pour différentes températures moyennes de l'air.

VI.5.2. Gains d'énergie liés au chauffage

La consommation d'énergie du système de chauffage et les gains occasionnés par les différents cas étudiés ont été déterminés pour une période de 48 h. La température moyenne de l'air du local a été fixée à 21 °C (température de confort de base dans une habitation en période d'hiver). Lors de la simulation, si la température est au-dessous de 21 °C, un programme UDF impose un terme source pour augmenter la température de l'air, sinon le terme source est nul. La consommation d'énergie de chauffage et le pourcentage de gain sont présentés du Tableau VI.3 au Tableau VI.6.

La Figure VI.12 présente le contour de température du local à $t = 12$ h et pour un débit d'air de ventilation de 0,6 V/h en période hivernale avec l'utilisation du chauffage pour maintenir la température moyenne de l'air à 21 °C.

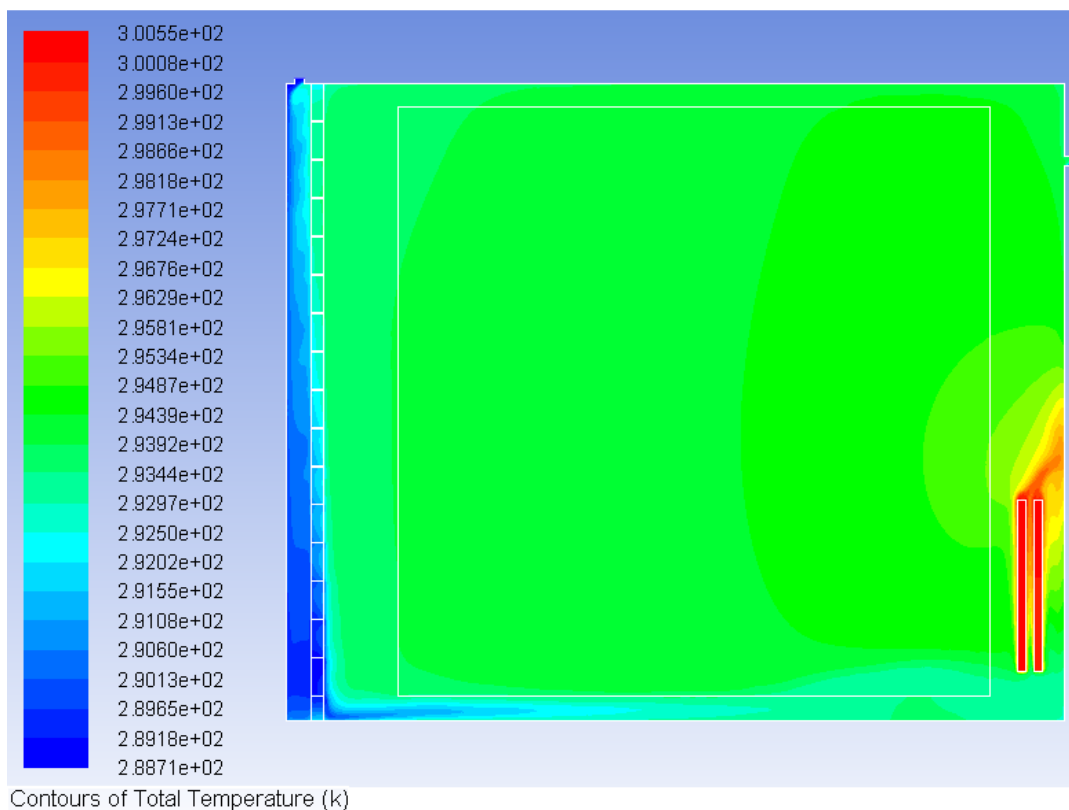


Figure VI.12. Contours de température du local à $t = 12$ h et pour un débit d'air de 0,6 V/h en période hivernale avec l'utilisation du chauffage.

VI.5.2.1. Gains d'énergie de chauffage pour différents matériaux

Nous observons sur le Tableau VI.3 qu'un pourcentage de 1,7 % de gain en énergie de chauffage entre un panneau perforé de plâtre mélangé avec un MCP d'une $T_f = 26 \text{ °C}$ et un panneau perforé de plâtre. Ce pourcentage augmente à 5,1 % entre un panneau perforé de plâtre mélangé avec un MCP d'une $T_f = 23 \text{ °C}$ et un panneau perforé de plâtre.

Tableau VI.3. Comparaison pour différents matériaux.

	MCP-23 °C	MCP-26 °C	Plâtre
Consommation pour le chauffage (Wh)	1456,0	1508,4	1534,7
Pourcentage de gain (%)	-	↑ 1,7 ↑	
	↑ 5,1 ↑		

VI.5.2.2. Gains d'énergie de chauffage entre un panneau perforé et des panneaux ordinaires

Le Tableau VI.4 présente les gains d'énergie entre un panneau en plâtre-MCP perforé et deux panneaux de plâtre-MCP non perforé. Sur le premier, le passage de l'air de soufflage se fait par le bas alors que pour le second, il se fait par le haut. Un pourcentage de 6,5 % de gain d'énergie est obtenu entre les cas d'utilisation des deux panneaux ordinaires. Le pourcentage entre le local où se trouve le panneau perforé et le local où se trouve le panneau ordinaire (dont l'air souffle par le haut) est de 20,1 %.

Tableau VI.4. Comparaison entre un panneau perforé et des panneaux ordinaires.

	P.P.	P.O.B	P.O.H
Consommation pour le chauffage (Wh)	1456,0	1705,2	1823,2
Pourcentage de gain (%)	-	↑ 6,5 ↑	
	↑ 20,1 ↑		

VI.5.2.3. Gains d'énergie de chauffage pour différentes épaisseurs de panneaux

L'épaisseur du panneau de plâtre-MCP influe sur la quantité de chaleur absorbée/libérée et donc sur la consommation de chauffage. On remarque d'après le Tableau VI.5 qu'en augmentant l'épaisseur du panneau, la consommation d'énergie diminue pour des valeurs d'épaisseur du panneau de plâtre-MCP croissantes jusqu'à l'épaisseur 70 mm et après cette épaisseur la consommation d'énergie se stabilise.

Tableau VI.5. Comparaison pour différentes épaisseurs de panneaux absorbants.

	Ep = 10 mm	Ep = 30 mm	Ep = 50 mm	Ep = 70 mm	Ep = 90 mm
Consommation pour le chauffage (Wh)	1600,2	1521,5	1456,0	1442,8	1442,8
Pourcentage de gain (%)	↑ 4,9 ↑		-	-	-
	↑ 9,0 ↑			-	-
	↑ 9,8 ↑				-
	↑ 9,8 ↑				

VI.5.2.4. Gains d'énergie de chauffage entre différents sens d'écoulement de l'air

Dans le cas du sens de soufflage de l'air (Tableau VI.6), un pourcentage de gain de 17,2 % est réalisé avec un soufflage à partir de la bouche d'aération n°1 (BA_1) vers BA_2. Cette différence est expliquée par le fait que pour le cas de BA_1, l'air froid absorbe la chaleur stockée dans le panneau perforé, ce qui augmente la température de l'air à l'entrée du local alors que, pour le cas de BA_2, l'air passe directement à l'intérieur du local.

Tableau VI.6. Comparaison entre différents sens d'écoulement de l'air.

	BA_1 vers BA_2	Mixte	BA_2 vers BA_1
Consommation pour le chauffage (Wh)	1456,0	1456,0	1757,6
Pourcentage de gain (%)	↑ 0 ↑		-
	↑ 17,2 ↑		

VI.5.2.5. Gains d'énergie de chauffage pour différents débits d'air

Le débit de renouvellement d'air a une influence sur la quantité de chaleur absorbée/libérée et donc sur la consommation de chauffage. On remarque, d'après le Tableau VI.7, qu'en augmentant le débit d'air, la consommation d'énergie diminue. Néanmoins, cette diminution est très faible et peut être même négligée (< 2 %).

Tableau VI.7. Comparaison entre différents débits d'écoulement de l'air.

	v = 0,6 V/h	v = 1 V/h	v = 2 V/h	v = 3 V/h
Consommation pour le chauffage (Wh)	1456,0	1456,0	1442,8	1429,7
Pourcentage de gain (%)	-	-	▲ 0,9 ▲	
	-	▲ 1,8 ▲		
	▲ 1,8 ▲			

VI.5.2.6. Récapitulatif des résultats sur la consommation de chauffage

La Figure VI.13 illustre un récapitulatif des cas de simulations étudiés en présentant la consommation de chauffage pour maintenir une température moyenne intérieure à une température du confort 21 °C. La consommation est présentée de façon ascendante pour les différents cas présentés dans le Tableau VI.8. On peut observer globalement que la perforation des panneaux permet de réduire la consommation d'énergie de chauffage jusqu'à 20 %. En augmentant l'épaisseur du panneau de plâtre-MCP, la consommation d'énergie diminue jusqu'à 10 % entre un panneau de 10 mm d'épaisseur et un panneau de 70 mm d'épaisseur. A partir de cette épaisseur, la consommation reste constante. La surventilation, lorsque la température extérieure est supérieure à la température de confort (en hiver $T_{\text{confort}} = 21 \text{ °C}$), aide aussi à diminuer la consommation d'énergie, mais sa contribution est très faible (< 2 %). Le sens de la ventilation joue aussi un rôle très important, en effet, la ventilation qui se fait à travers le panneau perforé permet de réduire la consommation d'énergie de 17 % par rapport à la ventilation qui se fait directement à l'intérieur du local.

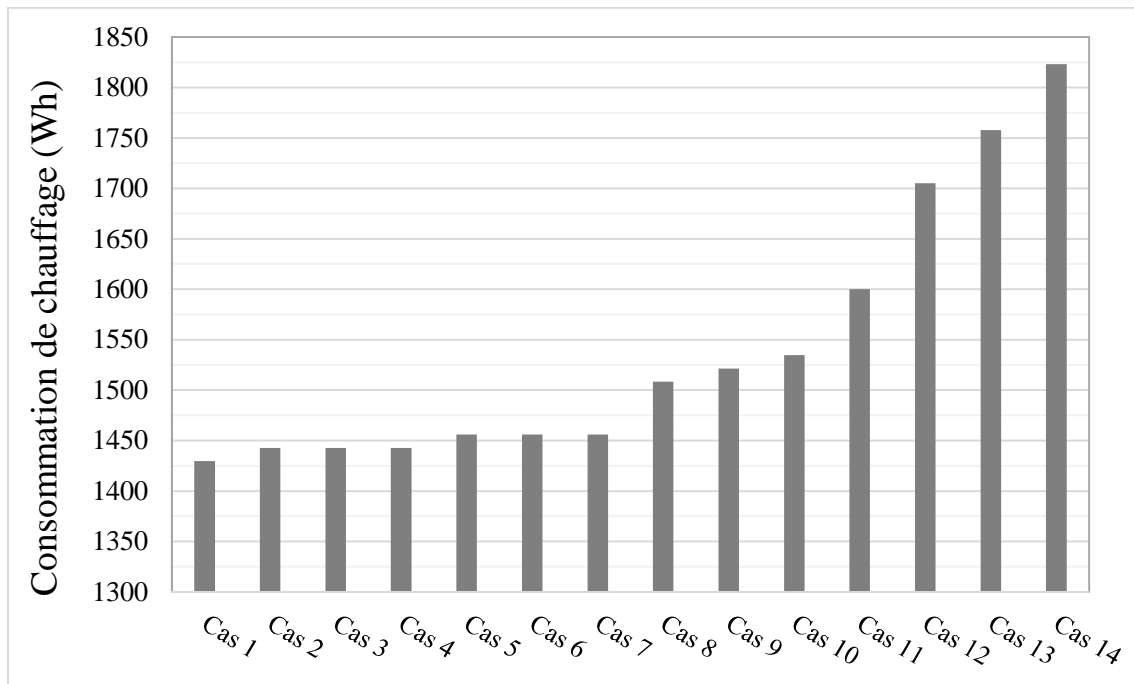


Figure VI.13. Récapitulatif des cas sur la consommation du chauffage.

Tableau VI.8. Désignation des cas d'étude pour le chauffage.

Cas n°	Epaisseur (mm)	Débit (V/h)	Type de panneau	Matériau utilisé	Sens de ventilation
1	50	3	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
2	50	2	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
3	70	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
4	90	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
5	50	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
6	50	1	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
7	50	0,6	Perforé	MCP-23 °C	Mixte
8	50	0,6	Perforé	MCP-26 °C	BA_1 vers BA_2
9	30	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
10	50	0,6	Perforé	Plâtre	BA_1 vers BA_2
11	10	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
12	50	0,6	P.O.B	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
13	50	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_2 vers BA_1
14	50	0,6	P.O.H	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2

VI.5.3. Gains d'énergie liés à la climatisation

La consommation d'énergie du système de climatisation et les gains occasionnés par les différents cas d'améliorations sont déterminés pour une période de 48 heures. La température moyenne de l'air du local a été fixée à 24 °C (température de confort de base dans une habitation en période d'été), donc si la température est au-dessus de cette valeur, un code UDF contrôle le soufflage d'un air à une température de 15 °C. La consommation d'énergie de la climatisation et le pourcentage de gain sont présentés entre le Tableau VI.9 et le Tableau VI.13.

La Figure VI.14 présente le contour de température du local à $t = 12$ h et pour un débit d'air de ventilation de 0,6 V/h en période estivale avec l'utilisation de la climatisation pour maintenir la température de l'air moyenne à 24 °C.

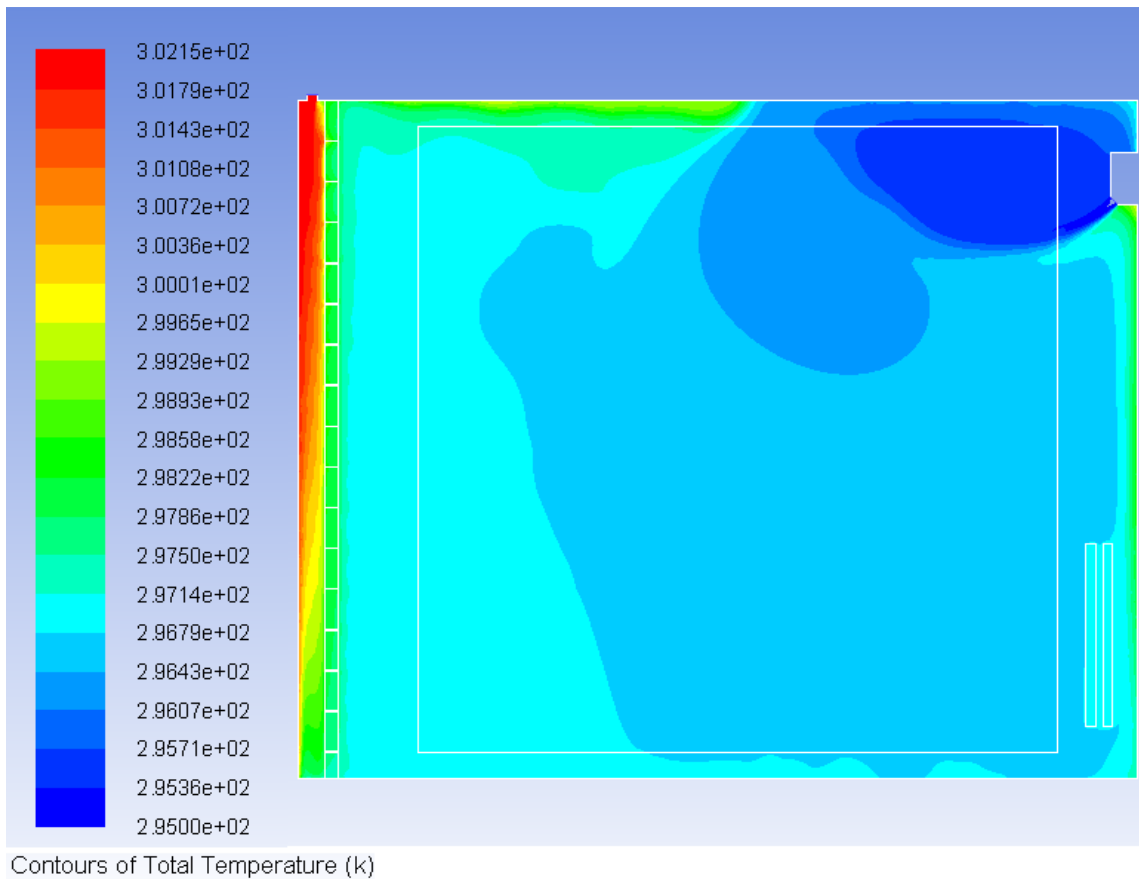


Figure VI.14. Contours de température du local à $t = 12$ h et pour un débit d'air de 0,6 V/h en période estivale avec l'utilisation de la climatisation.

VI.5.3.1. Gains d'énergie de climatisation pour différents matériaux

Nous pouvons observer sur le Tableau VI.9 un pourcentage de 11 % de gain en énergie de climatisation entre un panneau perforé de plâtre avec 30 % de MCP d'une $T_f = 26$ °C et un

panneau de plâtre perforé. Ce pourcentage augmente à 13,1 % entre un panneau perforé de plâtre avec 30 % de MCP d'une $T_f = 23$ °C et un panneau de plâtre perforé.

Tableau VI.9. Différents matériaux.

	MCP-23 °C	MCP-26 °C	Plâtre
Consommation pour la climatisation (Wh)	3370,1	3453,6	3878,3
Pourcentage de gain (%)	-	↑ 11,0 ↑	
	↑ 13,1 ↑		

VI.5.3.2. Gains d'énergie de climatisation entre un panneau perforé et des panneaux ordinaires

Le Tableau VI.10 présente les gains d'énergie entre un local possédant un panneau en plâtre-MCP perforé et deux autres locaux possédant des panneaux de plâtre-MCP non perforé (le premier local possède un panneau ordinaire dont l'air de soufflage se fait par le bas alors que le deuxième local possède un panneau ordinaire dont l'air de soufflage se fait par le haut). Un pourcentage de 2,6 % de gain d'énergie est obtenu entre les cas d'utilisation des deux panneaux ordinaires. Ce pourcentage atteint 16,2 % entre le local à panneau perforé comparé à l'autre panneau ordinaire dont l'air souffle par le haut.

Tableau VI.10. Comparaison entre un panneau perforé et des panneaux ordinaires.

	P.P.	P.O.B	P.O.H
Consommation pour la climatisation (Wh)	3370,1	3918,0	4021,2
Pourcentage de gain %	-	↑ 2,6 ↑	
	↑ 16,2 ↑		

VI.5.3.3. Gains d'énergie de climatisation pour différentes épaisseurs de panneaux

On remarque, d'après le Tableau VI.11, que la consommation d'énergie diminue faiblement avec des épaisseurs croissantes des panneaux perforés. Le gain d'énergie est de 6,5 % lorsque l'épaisseur varie de $E_p = 10$ mm à $E_p = 90$ mm.

Tableau VI.11. Différentes épaisseurs des panneaux absorbants.

	Ep = 10 mm	Ep = 30 mm	Ep = 50 mm	Ep = 70 mm	Ep = 90 mm
Consommation pour la climatisation (Wh)	3515,4	3443,8	3370,1	3320,1	3288,2
Pourcentage de gain %	↔ 2,0 ↔		-	-	-
	↔ 4,1 ↔			-	-
	↔ 5,6 ↔				-
	↔ 6,5 ↔				

VI.5.3.4. Gains d'énergie de climatisation entre différents sens d'écoulement de l'air

Le Tableau VI.12 présente la consommation et le gain selon le sens de soufflage de l'air. Un gain de 19,1 % est réalisé dans le cas d'un soufflage qui se fait à partir de la bouche d'aération n°1 (BA_1 vers BA_2). Cette différence est expliquée par le fait que pour le cas de BA_1 vers BA_2, l'air chaud cède sa chaleur directement au panneau perforé, ce qui diminue sa température à l'entrée du local alors que dans le cas d'un soufflage qui se fait de BA_2 vers BA_1, l'air pénètre directement à l'intérieur du local.

Tableau VI.12. Différents sens d'écoulement de l'air.

	BA_1 vers BA_2	Mixte	BA_2 vers BA_1
Consommation pour la climatisation (Wh)	3370,1	3485,5	4163,9
Pourcentage de gain %	-	↔ 16,3 ↔	
	↔ 19,1 ↔		

VI.5.3.5. Gains d'énergie de climatisation pour différents débits d'air

On remarque, d'après le Tableau VI.13, qu'en augmentant le débit d'air lorsque la température extérieure est inférieure à la température de confort (24 °C), la consommation d'énergie diminue, mais comme pour le cas du chauffage, la diminution est très faible et est négligeable (< 3,1 %).

Tableau VI.13. Comparaison entre différents débits d'écoulement de l'air.

	v = 0,6 V/h	v = 1 V/h	v = 2 V/h	v = 3 V/h
Consommation pour la climatisation (Wh)	3370,1	3342,5	3299,4	3265,6
Pourcentage de gain %	↑ 0,8 ↑		-	-
	↑ 2,1 ↑			-
	↑ 3,1 ↑			

VI.5.3.6. Récapitulatif des résultats sur la consommation de climatisation

La Figure VI.15 illustre un récapitulatif des cas de simulations étudiés en présentant la consommation d'énergie en climatisation pour maintenir une température moyenne intérieure à la température de confort (24 °C). La consommation est présentée de façon ascendante pour les différents cas présentés dans le Tableau VI.14 ci-dessous.

De même que dans le cas du chauffage, on peut observer globalement que la perforation des panneaux permet de réduire la consommation d'énergie de climatisation jusqu'à 16,2 % par rapport à un panneau sans perforations. En augmentant l'épaisseur du panneau de plâtre-MCP, de 10 mm à 90 mm, la consommation d'énergie diminue jusqu'à 6,5 %. Lorsque la température extérieure est inférieure à la température de confort (24 °C), la surventilation aide à diminuer la consommation d'énergie, mais sa contribution est très faible (3,1 % pour un débit de 3 V/h). La ventilation qui se fait à travers le panneau perforé permet de réduire la consommation d'énergie de 20 %, comparée à la ventilation qui se fait directement vers l'intérieur du local.

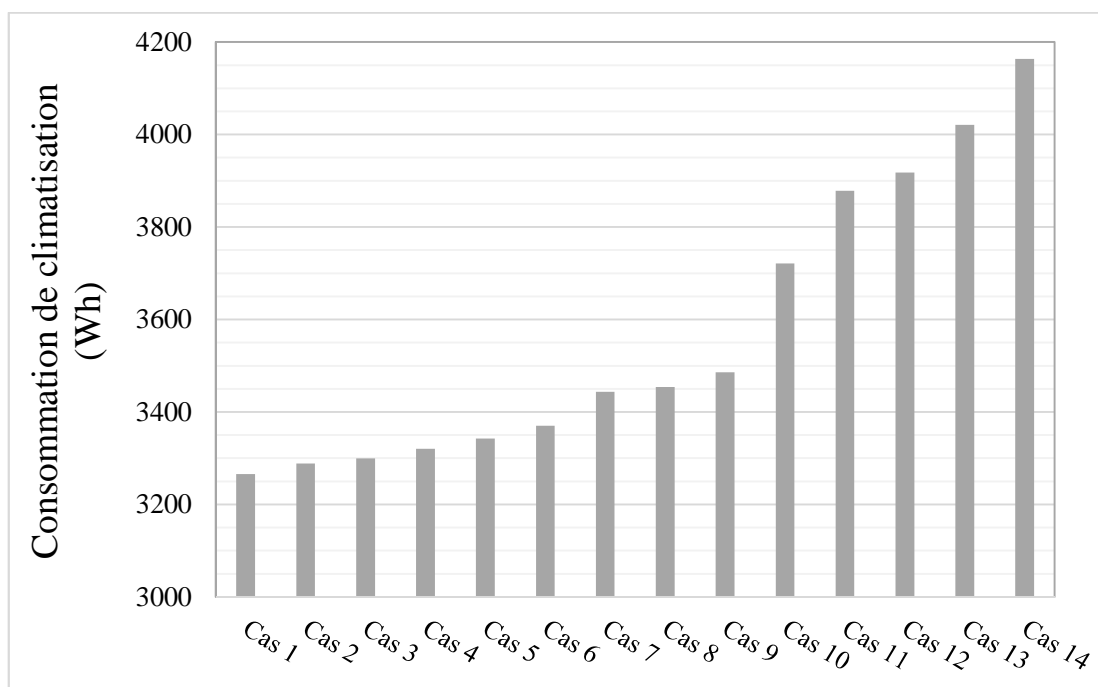


Figure VI.15. Récapitulatif des cas sur la consommation de la climatisation.

Tableau VI.14. Désignation des cas d'étude pour la climatisation.

Cas n°	Epaisseur (mm)	Débit (V/h)	Type de panneau	Matériau utilisé	Sens de ventilation
1	50	3	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
2	90	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
3	50	2	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
4	70	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
5	50	1	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
6	50	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
7	30	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
8	50	0,6	Perforé	MCP-26 °C	BA_1 vers BA_2
9	50	0,6	Perforé	MCP-23 °C	Mixte
10	10	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
11	50	0,6	Perforé	Plâtre	BA_1 vers BA_2
12	50	0,6	P.O.B	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
13	50	0,6	P.O.H	MCP-23 °C	BA_1 vers BA_2
14	50	0,6	Perforé	MCP-23 °C	BA_2 vers BA_1

VI.6. Conclusion

Dans ce chapitre, des simulations numériques du comportement thermique et de la consommation énergétique d'un local équipé d'un panneau de plâtre-MCP ont été effectuées

afin de valider une nouvelle solution permettant d'améliorer le transfert de chaleur (absorption/libération de la chaleur). Les principales conclusions sont présentées comme suit :

- les MCP dont la plage de température de fusion se rapproche de la limite inférieure de la plage de variation de température intérieure désirée se sont révélés plus utiles en termes de contrôle de la température ambiante du local.
- L'amplitude de température moyenne de l'air du local ne varie pas beaucoup quand l'épaisseur du panneau est supérieure à 3 cm.
- Le gain d'énergie pour le chauffage atteint 5,1 % pour un panneau perforé de plâtre mélangé avec un MCP d'une $T_f = 23$ °C comparé à un panneau de plâtre perforé. Ce gain est de 13,1 % pour la climatisation.
- Le gain d'énergie pour le chauffage est 20,1 % entre un panneau perforé et un panneau ordinaire. Ce gain est estimé à 16,2 % pour l'énergie de la climatisation.
- Le gain d'énergie pour le chauffage et la climatisation commence à se stabiliser lorsque l'épaisseur du panneau est de 70 mm.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans cette recherche, des mesures expérimentales des propriétés thermophysiques et des simulations numériques du comportement thermique des panneaux de plâtre-MCP ont été effectuées afin de valider une nouvelle solution permettant d'améliorer le transfert de chaleur (absorption/libération de chaleur) d'un panneau de plâtre-MCP. La solution proposée consiste en l'utilisation de petits perforations dans un panneau de plâtre-MCP afin d'augmenter la surface de contact du panneau avec l'air pour augmenter le transfert de chaleur par convection. Le modèle de stockage étudié concerne une simulation de transfert de chaleur par conduction et par convection des panneaux perforés. Dans un premier temps, la détermination de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la densité a été effectuée pour différents pourcentages de MCP dans le plâtre. Cette étape fut suivie par des mesures et des simulations numériques sur des panneaux et dans un local d'habitation en 2D, dont les principales conclusions sont présentées comme suit :

- La diminution de l'espacement entre les perforations entraîne une augmentation du déphasage de 3,5 heures en moyenne.
- L'absorption/libération de la chaleur augmente avec la diminution de l'espacement entre les perforations (D_i) dans un panneau de plâtre-MCP.
- L'augmentation maximale de l'absorption et du dégagement de chaleur lors de la réduction de l'espacement des perforations de 300 mm à 43 mm est respectivement de 100 % et 175 % pour les différentes vitesses de l'air.
- Un panneau de plâtre-MCP perforé peut absorber plus de chaleur qu'un panneau de plâtre MCP sans perforations et 3 fois plus épais. Cela permettra d'économiser entre 3 et 4 fois la quantité de matériaux utilisée pour la même quantité d'énergie stockée.
- Une relation étroite a été observée entre l'absorption / le dégagement de flux de chaleur d'une part et l'épaisseur du panneau de plâtre-MCP (E_{pi}), ainsi que l'espacement entre les perforations (D_i) d'autre part.
- Les MCP, dont la plage de température de fusion se rapproche de la limite inférieure de la plage de variation de température intérieure désirée, se sont révélés plus utiles en termes de contrôle de la température ambiante du local.

- L'amplitude de température moyenne de l'air du local ne varie pas beaucoup quand l'épaisseur est supérieure à 3 cm.
- Le gain d'énergie pour le chauffage atteint 5,1 % pour un panneau perforé de plâtre mélangé avec 30% de MCP d'une $T_f = 23$ °C comparé à un panneau de plâtre perforé, ce gain est de 13,1 % pour la climatisation.
- Le gain d'énergie pour le chauffage est 20,1 % entre un panneau perforé et un panneau ordinaire. Ce gain est estimé à 16,2 % pour l'énergie de la climatisation.
- Le gain d'énergie pour le chauffage et la climatisation commence à se stabiliser pour une épaisseur de 70 mm.

Les résultats présentés dans cette thèse sont très prometteurs et la solution proposée gagnera à être testée expérimentalement à l'échelle d'une pièce ou d'une maison. Le sujet de cette thèse est important aussi bien pour l'économie de l'énergie en Algérie que pour le reste du monde. L'exploration des perspectives qui s'ouvrent, suite à la conclusion de ce travail de recherche mené dans cette thèse, permettra de poursuivre les investigations dans cet axe de recherche qui est très utile.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès, L. Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18 (2013) 327–349.
- [2] A. Waqas, Z. Ud Din, Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings - A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18 (2013) 607–625.
- [3] APRUE, *Energie dans les zones*, 2015.
- [4] R. Cheng, X. Wang, Y. Zhang, Energy-efficient building envelopes with phase-change materials: New understanding and related research, in: *Heat Transf. Eng.*, 2014: pp. 970–984.
- [5] H. Zhang, Q. Xu, Z. Zhao, J. Zhang, Y. Sun, L. Sun, F. Xu, Y. Sawada, Preparation and thermal performance of gypsum boards incorporated with microencapsulated phase change materials for thermal regulation, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 102 (2012) 93–102.
- [6] D. Li, Y. Zheng, C. Liu, G. Wu, Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building, *Energy Convers. Manag.* 100 (2015) 147–156.
- [7] C. Barrenechea, H. Navarro, S. Serrano, L.F. Cabeza, A.I. Fernández, New database on phase change materials for thermal energy storage in buildings to help PCM selection, *Energy Procedia.* 57 (2014) 2408–2415.
- [8] T. Toppi, L. Mazzeola, Gypsum based composite materials with micro-encapsulated PCM: Experimental correlations for thermal properties estimation on the basis of the composition, *Energy Build.* 57 (2013) 227–236.
- [9] T.-C. Ling, C.-S. Poon, Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview, *Constr. Build. Mater.* 46 (2013) 55–62.
- [10] J. Borderon, J. Virgone, R. Cantin, Modeling and simulation of a phase change material system for improving summer comfort in domestic residence, *Appl. Energy.* 140 (2015) 288–296.
- [11] L. Derradji, F.B. Errebai, M. Amara, Effect of PCM in Improving the Thermal Comfort in Buildings, in: *Energy Procedia*, 2017: pp. 157–161.

- [12] X. Wang, H. Yu, L. Li, M. Zhao, Experimental assessment on the use of phase change materials (PCMs)-bricks in the exterior wall of a full-scale room, *Energy Convers. Manag.* 120 (2016) 81–89.
- [13] S. Cunha, J. Aguiar, F. Pacheco-Torgal, Effect of temperature on mortars with incorporation of phase change materials, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 89–101.
- [14] N. Soares, C.F. Reinhart, A. Hajiah, Simulation-based analysis of the use of PCM-wallboards to reduce cooling energy demand and peak-loads in low-rise residential heavyweight buildings in Kuwait, *Build. Simul.* 10 (2017) 481–495.
- [15] L. Navarro, A. de Gracia, A. Castell, L.F. Cabeza, Thermal behaviour of insulation and phase change materials in buildings with internal heat loads: experimental study, *Energy Effic.* 8 (2015) 895–904.
- [16] 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.* (2004).
- [17] U. Berardi, S. Soudian, Benefits of latent thermal energy storage in the retrofit of Canadian high-rise residential buildings, *Build. Simul.* (2018).
- [18] F. Kuznik, J. Virgone, J. Noel, Optimization of a phase change material wallboard for building use, *Appl. Therm. Eng.* 28 (2008) 1291–1298.
- [19] Y. Lin, Y. Jia, G. Alva, G. Fang, Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 2730–2742.
- [20] M. Porfiri, N.Q. Nguyen, N. Gupta, Thermal conductivity of multiphase particulate composite materials, *J. Mater. Sci.* 44 (2009) 1540–1550.
- [21] S. Liu, Y. Li, Y. Zhang, Review on Heat Transfer Mechanisms and Characteristics in Encapsulated PCMs, *Heat Transf. Eng.* 36 (2015) 880–901.
- [22] A. Karaipekli, A. Biçer, A. Sarı, V.V. Tyagi, Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes, *Energy Convers. Manag.* 134 (2017) 373–381.
- [23] N. Şahan, M. Fois, H. Paksoy, Improving thermal conductivity phase change materials - A study of paraffin nanomagnetite composites, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* (2015).

- [24] T.D. Dao, H.M. Jeong, Novel stearic acid/graphene core-shell composite microcapsule as a phase change material exhibiting high shape stability and performance, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* (2015).
- [25] J. Koo, H. So, S.W. Hong, H. Hong, Effects of wallboard design parameters on the thermal storage in buildings, *Energy Build.* 43 (2011) 1947–1951.
- [26] D. David, F. Kuznik, J.J. Roux, Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behaviour of a phase change material wall, *Appl. Therm. Eng.* 31 (2011) 3117–3124.
- [27] D. David, F. Kuznik, J.-J. Roux, Experimental investigation of natural convection near a wall containing phase change material, *Int. J. Therm. Sci.* (2016).
- [28] A. De Gracia, D. David, A. Castell, L.F. Cabeza, J. Virgone, A correlation of the convective heat transfer coefficient between an air flow and a phase change material plate, *Appl. Therm. Eng.* 51 (2013) 1245–1254.
- [29] Z. Hu, W. He, J. Ji, S. Zhang, A review on the application of Trombe wall system in buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 70 (2017) 976–987.
- [30] P.G. Pinho, M. Pinto, R.M.S.F. Almeida, S.M. Lopes, L.T. Lemos, Aspects concerning the acoustical performance of school buildings in Portugal, *Appl. Acoust.* 106 (2016) 129–134.
- [31] S. Furbo, Using water for heat storage in thermal energy storage (TES) systems, *Adv. Therm. Energy Storage Syst.* (2015) 31–47.
- [32] M. AHMAD, Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l’enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, 2014.
- [33] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review, *Energy Build.* 42 (2010) 1361–1368.
- [34] 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.* (2010).
- [35] T. Khadiran, M.Z. Hussein, Z. Zainal, R. Rusli, Advanced energy storage materials for

- building applications and their thermal performance characterization: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57 (2016) 916–928.
- [36] S.E. Kalnæs, B.P. Jelle, Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Energy Build.* 94 (2015) 150–176.
- [37] S.A. Memon, Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 31 (2014) 870–906.
- [38] D.W. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Latent heat storage in concrete, *Sol. Energy Mater.* 19 (1989) 335–348.
- [39] F. Kuznik, D. David, K. Johannes, J.J. Roux, A review on phase change materials integrated in building walls, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 379–391.
- [40] A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12 (2008) 2438–2451.
- [41] A. Sharma, V. V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2009).
- [42] H. Mehling, L.F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications, 2008.
- [43] B.L.S. Gowreesunker, Phase change thermal energy storage for the thermal control of large thermally lightweight indoor spaces, Brunel University School of Engineering and Design PhD Theses, 2013.
- [44] S.B. Sadineni, S. Madala, R.F. Boehm, Passive building energy savings: A review of building envelope components, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2011).
- [45] N.B. Geetha, R. Velraj, Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage - A review, *Energy Educ. Sci. Technol. Part A Energy Sci. Res.* 29 (2012) 913–946.
- [46] S. Scalat, D. Banu, D. Hawes, J. Paris, F. Haghghata, D. Feldman, Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* (1996).
- [47] A.K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Investigation of the thermal

- performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage, *Build. Environ.* (1997).
- [48] D.A. Neeper, Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage, *Sol. Energy.* (2000).
- [49] F. Kuznik, J. Virgone, J.J. Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation, *Energy Build.* (2008).
- [50] F. Kuznik, J. Virgone, Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling, *Energy Build.* (2009).
- [51] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui, Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, *Energy Build.* (2006).
- [52] F. Kuznik, J. Virgone, K. Johannes, In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard, *Renew. Energy.* (2011).
- [53] D.P. Bentz, R. Turpin, Potential applications of phase change materials in concrete technology, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 527–532.
- [54] L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy Build.* 39 (2007) 113–119.
- [55] X. Xu, Y. Zhang, K. Lin, H. Di, R. Yang, Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings, *Energy Build.* 37 (2005) 1084–1091.
- [56] A. Pasupathy, R. Velraj, Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, *Energy Build.* 40 (2008) 193–203.
- [57] X. Fang, T. Yang, Regression methodology for sensitivity analysis of solar heating walls, *Appl. Therm. Eng.* 28 (2008) 2289–2294.
- [58] M. Moghiman, M. Hatami, M. Boghrati, Improvement the winter space heating by the effect of rotating thermal wall storage, *Proc. ECOS 2011, Novi Sad, Serbia, July 4-7.* (2011).
- [59] V.V. Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renew. Sustain.*

- Energy Rev. 11 (2007) 1146–1166.
- [60] J.-F. Su, X.-Y. Wang, S.-B. Wang, Y.-H. Zhao, Z. Huang, Fabrication and properties of microencapsulated-paraffin/gypsum-matrix building materials for thermal energy storage, *Energy Convers. Manag.* 55 (2012) 101–107.
- [61] F. Kuznik, K. Johannes, D. David, Integrating phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems for buildings, *Adv. Therm. Energy Storage Syst.* (2015) 325–353.
- [62] E. Günther, S. Hiebler, H. Mehling, R. Redlich, Enthalpy of phase change materials as a function of temperature: Required accuracy and suitable measurement methods, *Int. J. Thermophys.* (2009).
- [63] Z. Yinping, J. Yi, J. Yi, A simple method, the -history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, *Meas. Sci. Technol.* (1999).
- [64] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 1675–1695.
- [65] J.M. Marín, B. n Zalba, L.F. Cabeza, H. Mehling, Determination of enthalpy temperature curves of phase change materials with the temperature-history method: improvement to temperature dependent properties, *Meas. Sci. Technol.* (2003).
- [66] J.H. Peck, J.-J. Kim, C. Kang, H. Hong, A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method, *Int. J. Refrig.* 29 (2006) 1225–1232.
- [67] H. Hong, S.K. Kim, Y.-S. Kim, Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials, *Int. J. Refrig.* 27 (2004) 360–366.
- [68] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids.pdf*, Oxford Clarendon Press. 2nd. Ed. (1959).
- [69] F. Frusteri, V. Leonardi, S. Vasta, G. Restuccia, Thermal conductivity measurement of a PCM based storage system containing carbon fibers, *Appl. Therm. Eng.* 25 (2005) 1623–1633.

- [70] M.Z. Pomianowski, P. Heiselberg, R.L. Jensen, Experimental investigation of thermal conductivity of concrete containing micro-encapsulated phase change materials, in: 7th Int. Symp. Heating, Vent. Air Cond. - Proc. ISHVAC 2011, 2011.
- [71] K. Darkwa, J.S. Kim, Dynamics of energy storage in phase change drywall systems, Int. J. Energy Res. (2005).
- [72] Ashrae, ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2017.
- [73] CNERIB, Document Technique Réglementaire. DTR C3.2/4. Réglementation Thermique du bâtiment., 2016.
- [74] N.I. Ibrahim, F.A. Al-Sulaiman, S. Rahman, B.S. Yilbas, A.Z. Sahin, Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review, Renew. Sustain. Energy Rev. 74 (2017) 26–50.
- [75] Z. Ma, W. Lin, M.I. Sohel, Nano-enhanced phase change materials for improved building performance, Renew. Sustain. Energy Rev. 58 (2016) 1256–1268.
- [76] C. Amaral, R. Vicente, P.A.A.P. Marques, A. Barros-Timmons, Phase change materials and carbon nanostructures for thermal energy storage: A literature review, Renew. Sustain. Energy Rev. 79 (2017) 1212–1228.
- [77] A. Sari, C. Alkan, C. Bilgin, Micro/nano encapsulation of some paraffin eutectic mixtures with poly(methyl methacrylate) shell: Preparation, characterization and latent heat thermal energy storage properties, Appl. Energy. 136 (2014) 217–227.
- [78] N.S. Dhaidan, J.M. Khodadadi, Improved performance of latent heat energy storage systems utilizing high thermal conductivity fins: A review, J. Renew. Sustain. Energy. (2017).
- [79] Y. Zheng, J.L. Barton, K. Tuzla, J.C. Chen, S. Neti, A. Oztekin, W.Z. Misiolek, Experimental and computational study of thermal energy storage with encapsulated NaNO₃ for high temperature applications, Sol. Energy. 115 (2015) 180–194.
- [80] M. Fang, G. Chen, Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system, Appl. Therm. Eng. (2007).
- [81] R. V. Seeniraj, N. Lakshmi Narasimhan, Performance enhancement of a solar dynamic

- LHTS module having both fins and multiple PCMs, *Sol. Energy*. (2008).
- [82] Y.B. Tao, Y.L. He, A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2018).
- [83] S.H. Lee, S.J. Yoon, Y.G. Kim, Y.C. Choi, J.H. Kim, J.G. Lee, Development of building materials by using micro-encapsulated phase change material, *Korean J. Chem. Eng.* 24 (2007) 332–335.
- [84] S. Marchi, S. Pagliolico, G. Sassi, Characterization of panels containing micro-encapsulated Phase Change Materials, *Energy Convers. Manag.* 74 (2013) 261–268.
- [85] 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.
- [86] A.M. Borreguero, I. Garrido, J.L. Valverde, J.F. Rodríguez, M. Carmona, Development of smart gypsum composites by incorporating thermoregulating microcapsules, *Energy Build.* 76 (2014) 631–639.
- [87] 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.
- [88] S. Behzadi, M.M. Farid, Experimental and numerical investigations on the effect of using phase change materials for energy conservation in residential buildings, *HVAC&R Res.* 17 (2011) 366–376.
- [89] J.S. Sage-Lauck, D.J. Sailor, Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building, *Energy Build.* 79 (2014) 32–40.
- [90] N.T.A. Fernandes, V.A.F. Costa, Use of phase-change materials as passive elements for climatization purposes in summer: The Portuguese case, in: *Int. J. Green Energy*, 2009.
- [91] S.D. Zwanzig, Y. Lian, E.G. Brehob, Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope, *Energy Convers. Manag.* 69 (2013) 27–40.
- [92] D. Zhou, G.S.F. Shire, Y. Tian, Parametric analysis of influencing factors in Phase Change Material Wallboard (PCMW), *Appl. Energy*. 119 (2014) 33–42.

- [93] B.M. Diaconu, M. Cruceru, Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings, *Energy Build.* 42 (2010) 1759–1772.
- [94] S.N. Al-Saadi, Z. Zhai, Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 21 (2013) 659–673.
- [95] D. Poirier, M. Salcudean, On Numerical Methods Used in Mathematical Modeling of Phase Change in Liquid Metals, *J. Heat Transfer.* (1988).
- [96] H. Hashemi, C. Sliepcevich, A numerical method for solving two dimensional problems of heat conduction with change of phase, *Chem. Eng. ProgSymseries.* (1967).
- [97] G. Comini, S. Del Giudice, R.W. Lewis, O.C. Zienkiewicz, Finite element solution of non-linear heat conduction problems with special reference to phase change, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 8 (1974) 613–624.
- [98] K. Morgan, R.W. Lewis, O.C. Zienkiewicz, An improved algorithm for heat conduction problems with phase change, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 12 (1978) 1191–1195.
- [99] E.C. Lemmon, *Multidimensional Integral Phase Change Approximations for Finite Element Conduction Codes*, Numer. Methods Heat Transf. Wiley, Chichester. (1981) 201–213.
- [100] Q.T. Pham, COMPARISON OF GENERAL-PURPOSE FINITE-ELEMENT METHODS FOR THE STEFAN PROBLEM, *Numer. Heat Transf. Part B Fundam.* 27 (1995) 417–435.
- [101] Y. Cao, A. Faghri, A Numerical Analysis of Phase-Change Problems Including Natural Convection, *J. Heat Transfer.* 112 (1990) 812.
- [102] Z. Ma, Y. Zhang, Solid velocity correction schemes for a temperature transforming model for convection phase change, *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow.* 16 (2006) 204–225.
- [103] B.L. Gowreesunker, S.A. Tassou, M. Kolokotroni, Improved simulation of phase change processes in applications where conduction is the dominant heat transfer mode, *Energy Build.* 47 (2012) 353–359.
- [104] S. Hussain, P.H. Oosthuizen, A. Kalendar, Evaluation of various turbulence models for the prediction of the airflow and temperature distributions in atria, *Energy Build.* 48

(2012) 18–28.

- [105] A. Bouttout, M. Amara, L. Derradji, B. Zeghmati, A. Hamid, F.B. Errebai, Experimental Study on the Use of Microencapsulated Phase Change Material in Walls and Roofs for Energy Savings, *J. Energy Eng.* 141 (2014) 04014046.
- [106] CNERIB, Ventilation naturelle : Locaux à usage d’habitation. Document Technique Réglementaire DTR C 3-31, 2006. <http://www.cnerib.edu.dz/biblio.html>.

**ANNEXE A. CARACTERISTIQUES, EQUATIONS ENTHALPIE-
TEMPERATURE ET FONCTIONNEMENT DU CODE UDF**

A.1. Equations de l'enthalpie-température de fusion et de solidification

Les équations du 4^{ème} degré sont des relations enthalpie-température de fusion et de solidification avec leurs coefficients de détermination (R^2) pour 30 % de MCP dans le plâtre, elles sont données par les équations (A.1) et (A.2) en J/kg.

Pour une fusion (absorption de chaleur) :

$$f(T)_{ab} = a \times T^4 + b \times T^3 + c \times T^2 + d \times T + e \quad (A.1)$$

Pour une solidification (libération de chaleur) :

$$f(T)_{lib} = a \times T^4 + b \times T^3 + c \times T^2 + d \times T + e \quad (A.2)$$

Les coefficients a, b, c, d et e sont donnés dans les tableaux A.1 et A.2 suivants :

Tableau A.1. Coefficients de l'équation $f(T)_{ab}$ pour différents pourcentage de MCP dans le plâtre.

Coefficients % de MCP	a	b	c	d	e	R^2
10	-143,3	170769,6	-76315309,3	15157062291,4	-1128845742630,7	0,999
20	-110,7	131880,0	-58935940,5	11705328131,3	-871772522352,9	0,998
30	-83,8	99878,7	-44634836,4	8864971277,6	-660232576783,9	0,998
40	-56,5	67375,1	-30109275,4	5980034834,0	-445372498083,6	0,997
50	-29,2	34799,7	-15551649,2	3088729898,3	-230038120430,8	0,997

Tableau A.02. Coefficients de l'équation $f(T)_{lib}$ pour différents pourcentage de MCP dans le plâtre.

Coefficients % de MCP	a	b	c	d	e	R^2
10	106,5	-127775,6	57478455,3	-11490958267,2	861420010441,5	0,990
20	82,3	-98677,1	44388823,8	-8874109594,2	665247836532,6	0,990
30	62,3	-74732,6	33617651,1	-6720761754,9	503822014929,8	0,990
40	42,0	-50412,3	22677424,2	-4533616974,6	339862603653,8	0,992
50	21,7	-26038,3	11713046,6	-2341644039,1	175541245216,4	0,994

A.2. Organigramme de fonctionnement du code UDF

L'organigramme de fonctionnement du code UDF est présenté dans la Figure A.1 suivante :

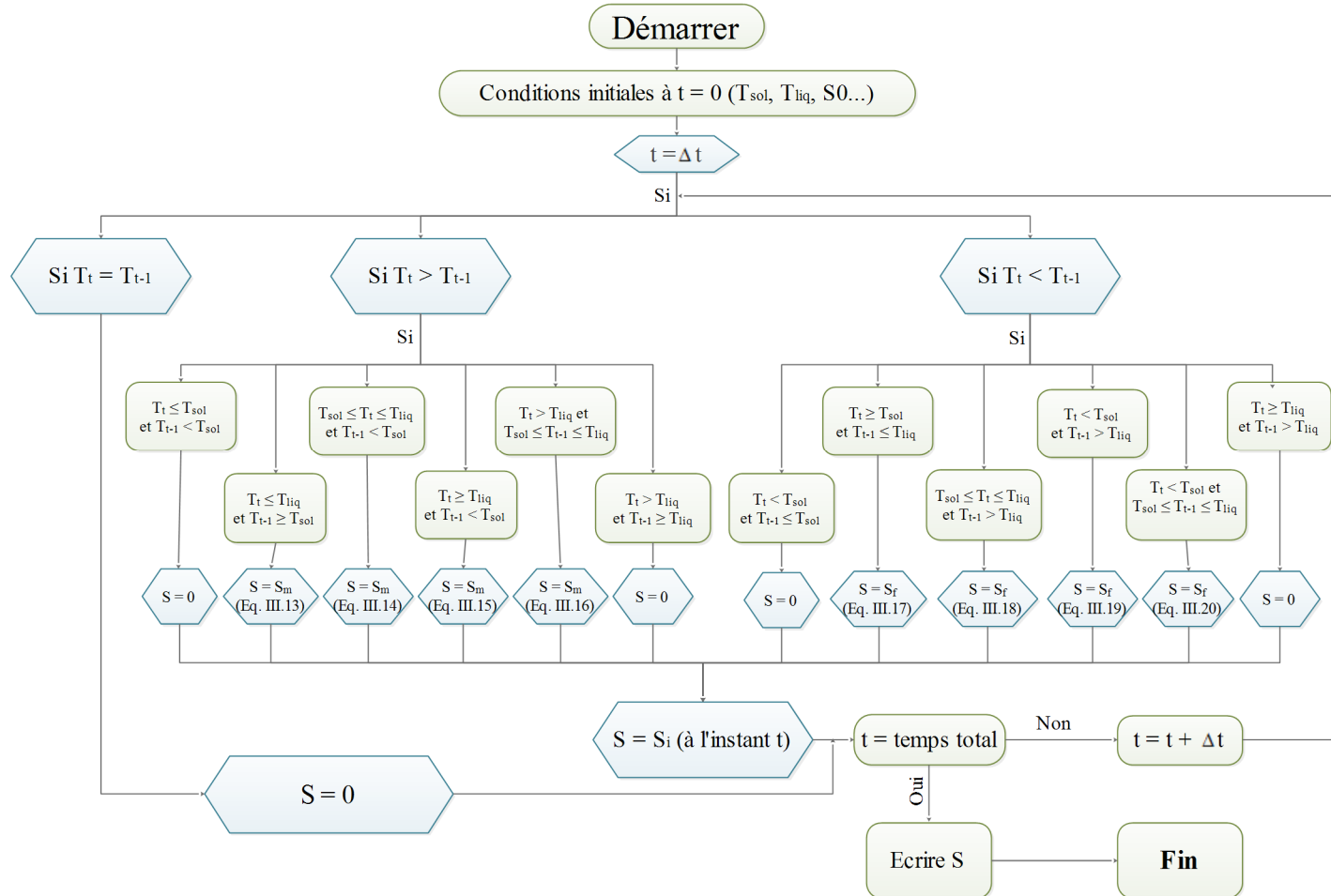


Figure A.1. Organigramme de fonctionnement du code UDF.

A.3. Propriétés du MCP Micronal DS 5040

Les principales propriétés du MCP microencapsulé Micronal DS 5040 sont présentées dans le Tableau A.3 suivant :

Tableau A.3. Caractéristiques thermophysiques du Micronal DS 5040 (source : BASF).

MCP	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Type de produit	Température de fusion (°C)	Chaleur de fusion latente (kJ/kg)	Capacité de stockage globale (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.K)
Micronal DS 5040	250–350	Poudre	23	100	135	0,17

**ANNEXE B. EQUIPEMENTS UTILISES POUR LA DETERMINATION
DES CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES**

B.1. Conductivité thermique

L'appareil Taurus TCA 300 DTX (Figure B.1) a été utilisé pour les mesures de conductivité thermique. L'appareil mesure la conductivité thermique d'une éprouvette avec le capteur de flux thermique selon plusieurs normes, à savoir ISO 8301, DIN 52616, DIN EN 1946-3, EN 12664, EN 12667 et EN 12939.

La plage de température mesurée dépend de l'épaisseur de l'échantillon (10 à 80 mm), la valeur de la conductivité thermique mesurée est comprise entre 0,01 et 1 W/m.K et la précision de la mesure est de l'ordre de 2 %.

Le grand avantage de cet appareil est sa capacité de mesurer la conductivité thermique de l'échantillon pour cinq températures différentes au cours du même test.



Figure B.1. Appareil de mesure de la conductivité thermique
Taurus TCA 300 DTX.

B.2. Chaleur spécifique

B.2.1. Chaleur spécifique à l'état solide du MCP

L'appareil CT-METRE (Figure B.2) a été utilisé pour les mesures de la chaleur spécifique volumétrique ($J/m^3.K$) des matériaux. En divisant la valeur de la chaleur spécifique volumétrique déterminée par la densité du matériau, nous obtenons la capacité thermique spécifique ($J/kg.K$). Pour mesurer la chaleur spécifique volumétrique, l'appareil utilise la méthode du fil chaud transitoire conformément à la norme ISO 8894-1 "Détermination de la conductivité thermique - Partie 1 : Méthodes du fil chaud ("croisillon" et "thermomètre à résistance"). Le principe de fonctionnement de cet appareil repose sur l'utilisation d'un élément

chauffant associé à une sonde de température dans la même bague de sonde thermique. Cette sonde mesure l'augmentation de la température pendant le temps de chauffage et pendant le temps de mesure. À la fin du test, l'appareil affiche la valeur de la chaleur spécifique volumétrique avec une précision de 95 % selon le fabricant. Cette méthode de détermination de chaleur spécifique du composite plâtre-MCP n'est valable que pour des plages en dehors de la température de changement de phase.

Cet appareil est utilisé pour déterminer la chaleur spécifique des différentes compositions à des températures en dehors de la zone de changement de phase, c'est-à-dire à 18 °C pour le cas du MCP à l'état solide et 34 °C pour le cas du MCP à l'état liquide.



Figure B.2. Appareil utilisé pour la mesure de la chaleur spécifique CT-METRE.

B.2.2. Chaleur spécifique en fonction de la température

Pour mesurer la chaleur spécifique en fonction de température du composite de plâtre et du MCP microencapsulé (Micronal DS5001), un analyseur calorimétrique différentiel à balayage à flux de chaleur de la marque NETZSCH DSC 214 Polyma (Figure B.3) a été utilisé. La démarche expérimentale utilisée pour cet essai, consiste à mesurer au cours du temps, simultanément, la température d'un petit échantillon (composition de plâtre-MCP de 10 mg environ) et le flux de chaleur fourni à celui-ci. Ce flux de chaleur est imposé de façon à ce que l'échantillon suive une montée ou une descente en température fixée par l'opérateur. Les échantillons de composites MCP-plâtre ont été chauffés et refroidis à une température comprise entre 15 °C et 32 °C à une vitesse de 2 °C/min. Au cours des mesures, deux pics de courbes ont

été mesurés, le premier était le pic du processus exothermique (température de fusion) et le second était le pic du processus endothermique (température de solidification).



Figure B.03. Appareil utilisé pour la mesure de la chaleur spécifique DSC Polyma 214.

B.3. Masse volumique

La masse volumique des plaques de plâtre-MCP était déterminée par le rapport masse/volume. La balance AND ER-180A (Figure B.4a) d'une erreur sur la mesure de 0,1 mg a été utilisée pour peser les échantillons, dont la taille approximative était de 100 mm × 100 mm × 20 mm. Pour la détermination du volume, un pied à coulisse numérique Metrica 10009 (Figure B.4b) a été utilisé pour mesurer les dimensions de différents échantillons, la précision des mesures de ce pied à coulisse numérique étant de 1/50 mm. La mesure de la densité a été effectuée selon les étapes recommandées dans la norme BS EN 12859 (Blocs de plâtre. Définitions, exigences et méthodes d'essai).



(a)



(b)

Figure B.4. Appareils pour la détermination de la masse volumique : (a) balance et (b) pied à coulisse.

**ANNEXE C. DETERMINATION DES INCERTITUDES SUR LES
MESURES**

C.1. Estimation des incertitudes sur la mesure de la conductivité thermique

L'incertitude sur la conductivité thermique et sur la température est donnée directement par l'équipement de mesure approprié.

C.2. Estimation des incertitudes sur la mesure de la densité

L'incertitude relative sur la densité est donnée comme suit :

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow \frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\frac{\Delta^2 m}{m^2} + \frac{\Delta^2 V}{V^2}} = \sqrt{\frac{\Delta^2 m}{m^2} + \frac{\Delta^2(L_1)}{L_1^2} + \frac{\Delta^2(L_2)}{L_2^2} + \frac{\Delta^2(e_1)}{e_1^2}} \quad (\text{C.1})$$

C.3. Estimation des incertitudes sur la chaleur spécifique

L'incertitude relative sur la chaleur spécifique est donnée comme suit :

$$c_{pm} = \frac{c_{pv}}{\rho} \Rightarrow \frac{\Delta c_{pm}}{c_{pm}} = \sqrt{\frac{\Delta^2 c_{pv}}{c_{pv}^2} + \frac{\Delta^2 \rho}{\rho^2}} \quad (\text{C.2})$$

C.4. Estimation des incertitudes sur la masse du MCP

L'incertitude relative sur la détermination de la masse du MCP est donnée comme suit :

$$R = \frac{m_{pcm}}{m_{mix}} = \frac{m_{pcm}}{m_{pl} + m_{pcm}} \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\frac{\Delta^2 m_{pcm}}{m_{pcm}^2} + \left(\frac{\Delta m_{pl}}{m_{pl}} + \frac{\Delta m_{pcm}}{m_{pcm}}\right)^2} \quad (\text{C.3})$$