REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} cycle

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : Thermo-énergétique

Par

SARRI Abdelkader

THÈME

Etude du Stockage d'Energie Thermique par Matériaux à Changements de Phase dans le Sud-Est Algérien

Soutenue publiquement le 14 / 01 / 2021

Devant le jury:

SETTOU Noureddine	Professeur	Université de Ouargla	Président
BEN MOUSSA Hocine	Professeur	Université de Batna 2	Examinateur
ATTIA Mohammed El Hadi	M.C.A	Université de El-Oued	Examinateur
NEGROU Belkhir	M.C.A.	Université de Ouargla	Examinateur
BECHKI Djamel	Professeur	Université de Ouargla	Encadreur
BOUGUETTAIA Hamza	Professeur	Université de Ouargla	Co- Encadreur

2020/2021

Dédicace

Je dédie cet humble travail à mes chers parents, À toute la famille généreuse, Et à tous les êtres chers et amis.

Remerciements

Toutes les louanges et remerciements sont dus à mon Seigneur: ALLAH Tout-Puissant pour m'avoir donné la santé, la connaissance et la patience pour terminer ce travail.

Cette thèse de doctorat représente un travail très complexe qui aurait été difficile à réaliser sans l'aide et le soutien de nombreux professeurs et experts respectés dans le domaine des énergies renouvelables et du stockage thermique que j'ai rencontrés lors de mes années de préparation de thèse de doctorat.

Tout d'abord, je suis très reconnaissant à mon directeur de thèse, le professeur Bechki Djamel, pour son soutien et confiance qu'il a placée en moi pendant mes études de doctorat. Ses conseils amicaux, son questionnement constant et l'expérience ont été inestimables pour moi, qui m'a traité comme un père et son fils avant de traiter avec moi en tant que professeur avec son étudiant. Je me souviendrai toujours de ses précieux conseils lors de mon toute la carrière.

Je tiens également à remercier le superviseur adjoint, le professeur Bouguettaia Hamza et le professeur Boughali Slimane, pour m'avoir aidé à mettre en œuvre de nombreux travaux scientifiques. J'apprécie vivement leurs précieux conseils tirés de leur longue expérience et de leur brillance dans le domaine du stockage thermique. Je remercie aussi tout particulièrement le chef du laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides, M. Boukraa Aommar, et en général tous les doctorants et personnels du laboratoire pour l'accueil chaleureux, l'affection et l'assistance tout au long des années de travail.

Remerciements particuliers et profonde gratitude au professeur Settou Noureddine, président du Comité CFD, au professeur Boubkri Abdelghani, Monsieur Dokar Boubaker et Monsieur Negrou Belkhir, et à tous les membres du Comité de formation doctorale, sur le temps précieux qu'ils nous ont consacré et sur toutes les informations précieuses dont j'ai bénéficié tout au long de la préparation au doctorat, qui résulte d'une longue expérience dans de nombreux domaines scientifiques et d'un haut niveau académique. Je remercie également tous les membres de l'administration et les enseignants avec lesquels j'ai interagi tout au long du parcours d'enseignement au Collège des Sciences et Technologies et au Collège de Mathématiques et Sciences des Matière de l'Université de Kasdi Merbah Ouargla.

Tous nos remerciements et notre gratitude au professeur respecté et cher frère Monsieur Nasser Saleh Al-Saadi enseignant chercheur à l'Université Sultan Qaboos, Sultanat d'Oman, pour son accueil chaleureux dans le cadre de ma bourse universitaire, pour le grand soutien et l'assistance qu'il m'a apporté dans l'étude de la modélisation en utilisant le programme Matlab et pour son temps précieux et tous les précieux conseils et assistance dans nombreux travaux scientifiques. Je remercie également beaucoup le professeur Mohammed M. Farid de l'Université de Nouvelle-Zélande pour son aide et ses conseils précieux dans le cadre de la réalisation d'une recherche académique commune. Enfin, je voudrais adresser mes sincères remerciements et ma gratitude aux professeurs Monsieur Settou Noureddine, Monsieur Ben Moussa Hocine, Monsieur ATTIA Mohammed El Hadi et Monsieur Negrou Belkhir pour leur acceptation de faire partie du comité de soutenance de doctorat. تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة استخدام حلول سلبية مختلفة لزيادة كفاءة استهلاك الطاقة في قطاع البناء. يتركز الاستقصاء أساسا على دراسة استخدام مواد تغيير الطور في مغلفات المباني. تستخدم هذه المواد في تخزين الطاقة الحرارية الكامنة حيث تتيح عزل حراري عالي و اقتصاد هام لاستهلاك الطاقة. بناءا على الأدبيات السابقة تم التركيز على دراسات النمذجة و المحاكاة للمواد في البنايات، حيث يمكن من خلال هذه الطرق دراسة الستهلاك الطاقة. بناءا على الأدبيات السابقة تم التركيز على دراسات النمذجة و المحاكاة للمواد في البنايات، حيث يمكن من خلال هذه الطرق دراسة التأثير الحقيقي لمواد تغيير الطور في هياكل البناء بعيدا عن البروتوكول التجريبي، و هذا ما يتيح تخطيط محكم عند استثمار مواد تغيير الطور. تمت من خلال الدراسة نمذجة مرحلة تباطؤ الطور في مواد تغيير الطور . تمت من خلال الدراسة نمذجة مرحلة تباطؤ الطور في مواد تغيير الطور . ستخدام برنامج ماتلاب و تحقق من استثمار مواد تغيير الطور. تمت من خلال الدراسة نمذجة مرحلة تباطؤ الطور في مواد تغيير الطور بستخدام برنامج ماتلاب و تحقق من صحة النموذج رقميا. من جهة أخرى تم التطرق لأول مرة لدراسة تأثير التصميم المعماري على القدرات الحرارية لمواد تغيير الطور لزيادة الموذج رقميا. من جهة أخرى تم التطرق لأول مرة لدراسة تأثير التصميم المعماري على القدرات الحرارية لمواد تغيير الطور لزيادة المتهدام نتائج الدراسة يمكن أن تهم الباحثين في مجال البناء و الطاقة و المصمين المعماريين. يمكن أيضا من حلال الموذ من الخلول المحامي المعماري على الفرر من أيضا على أيضا على ألفور من ذلار المائة في النايات، حيث أن نتائج الدراسة يمكن أن تهم الباحثين في مجال البناء و الطاقة و المصمين المعماريين. يمكن أيضا استخدام نتائج العمل لتطوير إر أرشادات التصميم الحصائص الحرارية لمواد تغيير الطور في ظل الظروف المناذي المعارين. يمكن أين المواد في نتائج المور في ظل النار و المان و المائر. المعماريين المعارين إلفور من ألفور من ألفور من الخرار الفرد من أيض ألفور المود الزرين المود المردات أصمينا لمعماريين على ألفور م الحافية و المائون و المان و المائونو و المعمانيين. يمكن أيضا استخدام نتائج العمل لتطوير إر ألفور م احتماني المامي المائورة المائور و المول م الفور من ألفور من ألفوا الماني المائورى. الموليان المالفي مل مالفو، الفووماني اللووم الفور مال

RESUME

Cette thèse vise à étudier l'utilisation de diverses solutions passives pour augmenter l'efficacité énergétique dans le secteur de la construction. L'investigation se concentre principalement sur l'étude de l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) dans les enveloppes de bâtiments. Ces matériaux sont utilisés pour stocker l'énergie thermique latente, car ils fournissent une isolation thermique élevée et des économies d'énergie importantes. Sur la base de la littérature précédente, l'accent a été mis sur les études de modélisation et de simulation des MCP dans les bâtiments. Grâce à ces méthodes, il est possible d'étudier l'effet réel des MCP sur le comportement thermique des structures des bâtiments en dehors du protocole expérimental, ce qui permet une planification serrée lors de l'investissement de matériaux à changement de phase. Grâce à l'étude, l'hystérésis de phase a été modélisée dans les MCP à l'aide du logiciel MATLAB et le modèle a été validé numériquement. D'autre part, pour la première fois, l'étude de l'effet de la conception architecturale sur les performances thermiques des MCP pour augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments a été abordée, car les résultats de l'étude pourraient intéresser les chercheurs dans le domaine de la construction et de l'énergie et les concepteurs architecturaux. Les résultats des travaux peuvent également être utilisés pour développer des directives de conception pour les propriétés thermiques des MCP dans diverses conditions climatiques en Algérie. Ces directives aideront les parties prenantes désignées à sélectionner des MCP avec une forte probabilité de succès lorsqu'ils sont utilisés dans des applications de construction. De plus, des directives de conception aideront les entreprises locales à développer les MCP les plus adaptés à leur climat local.

Table des matières

Remerciements	V
Résumé	V
Liste des figures	V
Liste des tableaux	V
Nomenclature	V
Introduction générale	1

Chapitre 1 Généralités sur les Matériaux à Changement de Phase

1. Introduction	4
2. Le stockage d'énergie thermique	4
2.1 Définition	4
2.1 Le stockage par chaleur sensible	5
2.3 Le stockage par chaleur latente	6
2.3.1 Généralités	6
3 Théorie de changement de phase : Solide – liquide	9
3.1 La solidification d'un corps pur	10
3.2 La solidification d'un mélange homogène	10
4. Les MCP couramment utilisés	12
4.1 Classification des MCP	12
4.2 Critères de sélection MCP	12
4.3 Mesure des propriétés thermiques des MCP	13
4.3.1 La calorimétrie différentielle à balayage (DSC)	13
4.3.2 L'analyse thermique différentielle (DTA)	14
4.3.3 Méthode de « T-history »	14
4.4 Amélioration du transfert de chaleur des MCP	14
5. Application des MCP dans l'enveloppe des bâtiments	14
6. Synthèse des travaux d'intégration des MCP dans les bâtiments	16

6.1 Les méthodes traditionnelles d'incorporation	16
6.2 Micro-encapsulation	16
6.3 MCP à forme stabilisées	17
6.4 Plaques murales à MCP (PCM wallboard)	17
7. Synthèse des travaux expérimentaux et numériques	18
8. Conclusion	21

Chapitre 2 Modélisation Mathématique et Simulation Numérique d'une Paroi Complexe Contenant une Couche MCP

1. Introduction	23
2. Etudes expérimentales sur l'hystérésis des MCP	24
3. Etudes de modélisation de l'hystérésis des MCP	27
3.1 Hystérésis de changement de phase avec des cycles complets	28
3.2 Hystérésis de changement de phase avec des cycles partiels	29
4. Etude de cas: Modélisation mathématique et simulation numérique d'un mur contenant d'une couche MCP prise en compte du phénomène d'hystérésis	34
4.1 Description du problème physique	34
4.2 Approches numériques des phénomènes de solidification et de fusion des MCP	35
4.2.1 Modélisation des matériaux à changement de phase	35
4.2.2 Formulation mathématique	36
4.3 Hypothèses générales et description du modèle numérique	39
4.4.2 Description de l'algorithme ICSH-TDMA	41
5. Résultats et discussion	44
6. Conclusion	45

Chapitre 3 Effet de l'utilisation des MCP sur la réduction de la consommation d'énergie dans un modèle d'immeuble de bureaux selon les conditions climatiques d'Ouargla

1. Introduction	48
2. Présentation de la Région de Ouargla	48
3. Les programmes de simulation dynamique des bâtiments avec MCP	49

4. Présentation de l'outil de simulation EnergyPlus	51
5. Méthodologies	54
5.1 Prototype de bâtiment de référence	54
5.2 Caractérisation et MCP utilités	55
6. le système CVC du modèle bâtiment	58
6.1 Group - Objets de conception	58
6.1.1 Entrée pour les calculs de conception et le dimensionnement automatique des composants	58
6.1.2 Dimensionnement automatique des composants	60
6.1.3 Sortie de dimensionnement des composants	61
6.2 Zone HVAC Air Loop Terminal Units	63
6.3 Bobines de chauffage et de refroidissement	65
7. Résultats et discussion	69
7.1 L'effet de l'utilisation des MCP sur la consommation totale d'énergie des systèmes CVC	69
7.1.1 Analyse de l'impact des MCP sur la consommation d'énergie électrique des systèmes DX serpentin de refroidissement pour chaque étage	72
7.1.2 Analyse de l'impact des MCP sur la charge de refroidissement mensuelle pour chaque zone du bâtiment	73
7.2 Discussion sur les stratégies passives utilisées en plus des MCP	79
7.2.1 L'effet de la réduction du gain de chaleur solaire par les fenêtres sur la consommation d'énergie du bâtiment et les performances thermiques du MCP	79
7.2.2 Effet de la conception des zones internes sur la consommation d'énergie du bâtiment et les performances thermiques des MCP	85
7.2.3 Effet de l'utilisation des MCP sur la consommation d'énergie avec des modèles combinés utilisant les deux stratégies passives ensemble	91
7.3 Audit économique	93
8. Conclusion	95

Chapitre 4 Effet de l'utilisation des MCP et les dispositifs d'ombrage sur les performances thermique des bâtiments sous différents climats algériens. Une optimisation basée sur la simulation

1. Introduction	98
2. Méthodologie	99

2.1 Description du modèle numérique	99
2.2 Caractérisation du MCP	100
2.3 Approche d'optimisation	101
2.4 Caractérisation des climats algériens	103
2.5 Description du bâtiment simulé	104
2.6.1 Système CVC	106
2.6.2 Confort thermique et fonctionnement du point de consigne du thermostat	107
3. Résultats et discussion	109
3.1. Analyse système incontrôlée	109
3.2 Refroidissement unique pour la période estivale	112
3. 3 Chauffage unique pour la période d'hiver	118
3.4 Refroidissement et chauffage pour les périodes d'été et d'hiver	121
4. Conclusion	123
Conclusion générale	125
Référence	127
Annexe	136

Liste des figures

Figure 1.1	Comparaison des volumes requis pour le stockage des besoins d'énergie annuelle d'un système Eco-house de 1800 kWh	5
Figure 1.2	Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état	6
Figure 1.3	Phénomène de fusion/solidification dans les MCP. (a) Processus de fusion de la glace d'eau. (b) Solidification/fusion à l'échelle atomique	7
Figure 1.4	Processus de solidification/fusion, vaporisation/condensation d'un MCP	8
Figure 1.5	Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un	
Figure 1.6	corps pur ; (b) pour un mélange Représentation de l'interface de changement de phase solide-liquide	8 9
Figure 1.7	Solidification d'une substance pure dans un milieu semi-infini	10
Figure 1.8	Évolution de la fraction solide et de l'enthalpie au cours de la solidification d'une substance pure	10
Figure 1.9	Solidification d'un produit homogène	12
Figure 1.10	Température de fusion et de l'enthalpie de changement de phase des MCP existants	13
Figure 1.11	Phénomène de surfusion d'un matériau à changement de phase	13
Figure 1.14	Applications de MCP/enveloppes bâtiment	15
Figure 1.15	Panneau CSM contenant le MCP	17
Figure 1.16	Plaque MCP à forme stabilisées	17
Figure 1.17	Cabine d'expérimentations (dimensions 2.4 m \times 2.4 m \times 2.4 m)	19
Figure 1.18	(a) Cabane expérimentale au campus Tamaki, Université d'Auckland et (b) Le système de chauffage par le sol utilisé	19
Figure 2.1	Courbe <i>h</i> - <i>T</i> pour un modèle asymétrique prenant en compte l'hystérésis de changement de phase	24
Figure 2.2	Courbes DSC de fusion à solidification partielle d'un MCP à base de paraffine	25
	Résultats expérimentaux obtenus dans les tests DSC d'un PCM micro-encapsulé	
Figure 2.3	sous cycle complet et solidification incomplète: (a) premier cycle de test DSC, (b) troisième cycle de test DSC	26
Figure 2.4	Modélisation de l'hystérésis à changement de phase dans la transition de phase partiel selon Bony et Citherlet	30
Figure 2.5	Modélisation de la surfusion proposée par Bony et Citherlet	30
Figure 2.6	Schéma de la MAP optimale de la transition de phase en termes de courbes $h(T)$	2.1
Figure 2.7	comparaison du comportement des modèles indépendants et dépendant de la vitesse pour la modélisation de l'hystérésis à changement de phase rapportée par	31
Figure 2.8	Barz et Sommer	33
T' 20		34
Figure 2.9	Grille de volume de controle typique	37

Figure 2.10	Schéma correctif non itératif dans la méthode de quasi-enthalpie à un nœud	28
Figure 2.11	Schéma itératif correctif dans la méthode Enthalpie à un nœud pendant un pas de temps	38
Figure 2.12	Emplacement des points de grille pour les modèles numériques utilisant la méthode des volumes finis: (a) des points de grille pour un système de couches de murs comprenant des nœuds internes et des nœuds de limite, (b) points de grille typiques pour la couche intermédiaire	39
Figure 2.13	Les courbes de chaleur spécifiques, $C1$ (T) état de fusion, $C2$ (T) état de solidification	42
Figure 2.14	Algorithme de calcule	43
Figure 2.15	Validation numérique de l'algorithme ICS-TDMA	44
Figure 2.16	Validation numérique de l'algorithme ICSH-TDMA	45
Figure 3.1	Situation géographique de la région de Ouargla	49
Figure 3.2	Structure globale du programme EnergyPlus	52
Figure 3.3	Vue perspective du modèle Mid-Rise-Office modifié	54
Figure 3.4	Matériaux à changement de phase utilisés: (a) Panneau RUBITHERM® CSM, (b) MCP avec gypse (Knauf smartboard)	55
Figure 3.5	Courbe d'enthalpie-température: (A) corps pur, (B) corps homogène	56
Figure 3.6	Les courbes <i>h</i> - <i>T</i> des MCP utilisés	58
Figure 3.7	Example simple de "Air Loop Heating & Cooling Coil System"	65
Figure 3.8	Consommation d'énergie électrique due au système de refroidissement pour chaque étage	73
Figure 3.9	Effet des MCP sur la charge de refroidissement du noyau de rez-de-chaussée	74
Figure 3.10	Effet des MCP sur la charge de refroidissement de périmètre de rez-de-chaussée	75
Figure 3.11	Effet des MCP sur la charge de refroidissement du noyau de premier étage	76
Figure 3.12	Effet des MCP sur la charge de refroidissement de périmètre de premier étage	77
Figure 3.13	Effet des MCP sur la charge de refroidissement du noyau de deuxième étage	78
Figure 3.14	Effet des MCP sur la charge de refroidissement de périmètre de deuxième étage	78
Figure 3.15	Schéma descriptif montrant les tailles de fenêtres selon chaque modèle	79
Figure 3.16	Vue de dessus du bâtiment avec différents designs	86
Figure 3.17	Effet des MCP sur la consommation d'énergie dans les nouveaux modèles améliorés	92
Figure 3.18	Résultats de l'analyse technico-économique	94

Figure 4.1	Courbes d'enthalpie-température approximatives en fonction des différentes températures de pointe de fusion	101
Figure 4.2	Boucle de couplage enthalpie-température appliquée au processus d'optimisation	103
Figure 4.3	(a) Vue en perspective de modèle de bâtiment avec les dispositifs d'ombrage et (b) description de la fenêtre	104
Figure 4.4	Horaires d'occupation, d'éclairage et d'équipement	106
Figure 4.5	Pourcentage estimé d'insatisfaits (PPD) en fonction du vote moyen prévu (PMV)	108
Figure 4.6	Pourcentage annuel de temps passé dans les conditions de confort thermique de chaque modèle de bâtiment	110
Figure 4.7	Pourcentage saisonnier du temps passé dans les conditions de confort thermique de chaque modèle de bâtiment	112
Figure 4.8	(a) transfert de chaleur à travers les murs sud en conjonction avec la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire et (b) gain de chaleur solaire et consommation d'énergie de refroidissement de chaque modèle de bâtiment. À Alger	114
Figure 4.9	(a) transfert de chaleur à travers les murs sud en conjonction avec la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire et (b) gain de chaleur solaire et consommation d'énergie de refroidissement de chaque modèle de bâtiment. La ville de Ouargla	116
Figure 4.10	(a) transfert de chaleur à travers les murs sud en conjonction avec la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire et (b) gain de chaleur solaire et consommation d'énergie de refroidissement de chaque modèle de bâtiment. À Tamanrasset	117
Figure 4.11	Point de consigne du thermostat pour le chauffage en période d'hiver à Tlemcen et El Bayad	120
Figure 4.12	Fonctionnement du thermostat et température de l'air intérieur en modèle simple avec MCP à Bou Saâda	121

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Propriétés thermo-physique de béton et MCP	35
Tableau 3.1	Méthodes numériques pour l'évolution de MCP dans les programmes de simulation de bâtiments	50
Tableau 3.2	Propriétés thermo-physiques de Knauf smartboard	57
Tableau 3.3	Propriétés thermo-physiques de RUBITHERM [®] CSM-Panel	57
Tableau 3.4 Tableau 3.5	Les zones déclarées pour l'Object "DesignSpecification" Rapports de dimensionnement de chauffage et de refroidissement "Sizing	61
Tableau 3.6	Parameters" Les données pour effectuer le calcul de débit d'air "Sizing Zone object"	62 62
Tableau 3.7	Les données pour effectuer les calculs de dimensionnement "Sizing system object".	63
Tableau 3.8	Données pour le calcul du débit d'eau maximal "Sizing Plant object"	63
Tableau 3.9	Les options choisit pour "Air Terminal Single Duct VAV-Reheat object"	64
Tableau 3.10	Plan de l'unité DX à deux vitesses "Coil Cooling DX Two Speed schedule"	67
Tableau 3.11	Chauffage par serpentin électrique "Coil Heating Electric component"	68
Tableau 3.12	Serpentin de chauffage au fuel "Coil Heating Fuel"	68
Tableau 3.13	Réduction de la consommation des différentes catégories d'énergies en fonction d'épaisseur des panneaux RUBITHERM [®] CSM	70
Tableau 3.14(a)	Effet de l'utilisation des fenêtres de $(1.31 \times 2 \text{ m})$ sur la consommation d'énergie	80
Tableau 3.14(b)	Effet de l'utilisation des MCP sur la consommation d'énergie dans le modèle (A-1).	80
Tableau 3.14(c)	Consommation d'énergie de modèle (A-1) avec MCP par rapport au modèle de référence	81
Tableau 3.15(a)	Effet de l'utilisation des fenêtres de $(1.31 \times 1 \text{ m})$ sur la consommation d'énergie	83
Tableau 3.15(b)	Effet des MCP sur la consommation d'énergie dans le modèle (A-2)	83
Tableau 3.15(c)	Conservation d'énergie de modèle (A-2) avec MCP par rapport au modèle de	0.4
Tableau 3.16(a)	Effet de changement de plan de référence en modèle (B-1) sans MCP sur la	84 07
Tableau 3.16(b)	Effet des MCP sur la consommation d'énergie dans le modèle (B-1)	87 87
Tableau 3.16(c)	Conservation d'énergie de modèle (B-1) avec MCP par rapport au modèle de	0.0
Tableau 3.17(a)	Effet de changement de plan de référence en modèle (B-2) sans MCP sur la	88
Tableau 3.17(b)	Effet des MCP sur la consommation d'énergie dans le modèle (B-2)	89 89
Tableau 3.17(c)	Conservation d'énergie de modèle (B-2) avec MCP par rapport au modèle de	

référence	90
-----------	----

Tableau 4.1 Tableau 4.2	Emplacements sélectionnés et caractéristiques climatiques Composition du mur extérieur	104 105
Tableau 4.3	Composition du toit	105
Tableau 4.4	Composition du sol	105
Tableau 4.5	Description des fenêtres	105
Tableau 4.6	Composition de la porte	105
Tableau 4.7	Contrôle mensuel du système CVC	107
Tableau 4.8	Calendriers des valeurs PMV mensuels	109
Tableau 4.9	Point de fusion optimale de MCP pour la consommation d'énergie de refroidissement en été	113
Tableau 4.10	Largeur optimale pour les dispositifs d'ombrage et les températures de fusion de MCP pour réduire la consommation d'énergie en été	118
Tableau 4.11	Température de fusion optimale de MCP pour la consommation d'énergie de chauffage en hiver	120
Tableau 4.12	Température de fusion optimale de MCP pour les besoins en énergie de chauffage et de refroidissement en hiver et en été	122

NOMENCLATURE

Caractères latin

С	Capacité thermique	[KJ/kg K]
е	Epaisseur	[m]
f_s	Fraction solide dans une région diphasique	-
h_i	Coefficient d'échange convectif intérieur	$[W/m^2 K]$
h_m	Enthalpie de changement de phase	[KJ/kg]
h_o	Enthalpie massique à la température de référence	[KJ/kg]
k	Conductivité thermique	[W/m K]
т	Masse	[kg]
MCP	Matériau à changement de phase	-
Q	Quantité de chaleur	[J]
R	Résistance thermique	[m ² K/W]
t	Temps	[s]
Tair	Température de l'atmosphère de la zone étudiée	[°C]
T_m	Température de fusion	[°C]
T _{m, opt}	Température optimale de fusion	[°C]
T_{MCP}	Température de la paroi à MCP	[°C]
W_{opt}	Largeur optimale	[m]
Caractère	s grecs	
ϵ_T	Ecart de température	[°C]
$\Delta h_{\rm f}$	Chaleur latente (chaleur de fusion /solidification)	[KJ/kg]
Δt	Intervalle de temps	[s]
ΔT	Intervalle de température	[°C]
Δx	Intervalle de distance	[m]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]

Indices	
f	final
M	moyenne
max	maximal
min	minimal
i	initial, intérieur
l	liquide
S	solide

Introduction générale

Parmi les défis majeurs au monde est l'épuisement des réserves d'énergie traditionnel de source fossile et leur conséquence à l'environnement, cette source d'énergie est le premier responsable au réchauffement planétaire par le phénomène de l'effet de serre à cause des gaz d'échappement, ou par la pollution direct à cause des différents déchets ce qui obligent les pays du monde surtout les major aux domaines industrielles à faire des engagement pour résoudre ces problèmes, par des recherches approfondies vers l'utilisation des énergies renouvelables et le développement de systèmes durables plus efficaces, permettant plus d'économies d'énergie.

L'Algérie coexiste ces problèmes, avec les problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile et les défis environnementaux ,il y'a une dépendance total à cette énergie qui représentent la majorité des importations national, donc qui estime la tripette du développement dans les différents secteurs et les futurs engagements, de plus ces recettes connais une diminution alarmiste après la régression du brut dans le marché mondiale qui fait perturber totalement l'économie national. Par conséquent, notre pays doit diversifier ses ressources énergétiques et exploiter les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire et éolienne (Boughali et al., 2013) . En revanche, comme c'est le cas dans de nombreux pays du monde, les bâtiments sont le principal consommateur d'énergie en Algérie, représentant environ 43% de la consommation totale d'énergie (Bilan Energétique National. 2018) et le support des prix d'électricité par le gouvernement augmente la consommation et les pertes économiques.

La réduction de la consommation d'énergie est le moyen le plus efficace pour économiser l'énergie aux bâtiments. Cela peut se faire simplement en renforçant l'inertie thermique des bâtiments, car leur enveloppe est un moyen passif permettant de limiter les pertes ou les apports thermiques. Ainsi, il garantit dans une certaine mesure le confort thermique humain, mais reste incapable et insuffisant pour amortir les fluctuations de la température extérieure. Dans le même contexte, il y a un intérêt croissant de nos jours pour des matériaux de construction plus efficaces et l'utilisation de diverses stratégies de construction passive pour atteindre les objectifs définis par les politiques énergétiques.

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) est une méthode intéressante pour développer une enveloppe de bâtiment à haute performance thermique, car ces matériaux ont la capacité d'absorber et de libérer une chaleur latente massive pendant la transition de phase dans une plage de température étroite et de fonctionner comme une masse thermique. De plus, l'utilisation des MCP est devenu une des technologies les plus prometteuses pour le développement des bâtiments éco-énergétiques par intégration aux murs, plafond et plancher des bâtiments, ce qui offre des possibilités considérables pour l'isolation et assurer un certain confort thermique, tel que le stockage par chaleur latente est un moyen efficace de stockage de l'énergie thermique. Contrairement à la méthode de stockage de chaleur sensible, grâce à leur densité de stockage beaucoup plus élevé, avec une plus petite différence de température entre l'entreposage et de la chaleur libérer.

Donc le stockage important de la chaleur par l'intégration des MCP aux enveloppes des bâtiments est très attirant pour le développement des structures innovantes à basse consommation d'énergie et qui

en implicitement l'impact sur l'environnement par la réduction de pollution. Dans ce cadre l'objectif de cette thèse est d'étudier l'intégration des MCP aux bâtiments pour un système passif dans les conditions climatiques de Sud-est Algérien.

Le travail est devisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre représente une étude bibliographique dans laquelle on classe les différents MCP, leurs propriétés physiques focalisant aux applications à l'enveloppe des bâtiments pour le système passif.
- Le deuxième chapitre consacré aux méthodes théorique pour l'étude numérique du changement de phase; afin d'élaborer un algorithme sous l'environnement MATLAB validé numériquement, qui considère l'hystérésis des MCP dans les parois muraux complexes.
- Le troisième chapitre discute sur la simulation numérique dynamique; afin d'estimer l'avantage de l'utilisation des MCP dans un modèle de bâtiment commerciale dans les conditions climatiques saharienne utilisant EnergyPlus software.
- Le quatrième chapitre représente une analyse sur l'impact de design extérieure (l'ombrage) sur l'efficacité énergétique dans l'habitat et les performances thermiques de MCP, selon différents région climatiques Algériennes.

Chapitre 1 Généralités sur les Matériaux à Changement de Phase

Chapitre 1 Généralités sur les Matériaux à Changement de Phase.

1. Introduction

Dans de nombreux pays, la consommation d'énergie des bâtiments représente environ 40% de la demande d'énergie mondiale, et le besoin en énergie pour le chauffage et le refroidissement d'un bâtiment est d'environ 60% de l'énergie totale consommée dans les bâtiments, qui représentent le plus fort pourcentage de l'utilisation de l'énergie (IEA. 2017). En plus, le monde aujourd'hui face à des problèmes environnementaux à savoir le réchauffement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone. L'Algérie coexiste ces problèmes, avec les problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile, en plus il y'a une dépendance total à cette énergie qui représentent la majorité des exportations.

La bonne conception et la sélection d'une enveloppe du bâtiment et ses composants sont un moyen efficace pour réduire l'espace chauffage-refroidissement. En tant que tel, l'isolation thermique est l'un des outils les plus précieux dans la réalisation de la conservation de l'énergie dans les bâtiments (Ogulata, 2002). L'intérêt de l'utilisation des MCP dans les matériaux de construction est dans la capacité de stockage d'énergie par la chaleur latente de changement de phase au lieu par chaleur sensible. Le principal avantage de ces matériaux est la grande densité énergétique lors du stockage d'énergie par transition de phase, ce qui signifie que plus d'énergie peut être stockée dans un volume constant. Ce chapitre est dévoué une revue sur les MCP, application au bâtiment couvrant la théorie de changement de phase, les MCP couramment utilisés, Les méthodes d'intégrations des MCP dans l'enveloppe de bâtiment, littératures sur l'application des MCP dans l'enveloppe bâtiment, afin d'élaborer l'état de l'art dans ce présent travaille.

2. Stockage d'énergie thermique

2.1 Définition

Le stockage de l'énergie thermique peut être classé par mécanisme de stockage (sensible, latent ou chimique) et par concept de stockage (actif ou passif). Les systèmes de stockage thermique actif sont caractérisés par convection forcée dans les matériaux de stockage d'énergie. Les systèmes passifs, un moyen de transport de chaleur passe par le magasin pour transporter l'énergie vers et depuis un support de stockage. Le moyen de stockage peut être un solide, un liquide, un matériau à changement de phase (MCP) ou les réactifs d'une réaction chimique ou absorption. Le principal avantage de ce type de système est que l'entreposage, le différentiel de température de la conduite le transfert de chaleur diminue à mesure que le magasin est chargé ou déchargé. De tels systèmes peuvent également être limités par la faible conductivité thermique de certains supports de stockage.

Les systèmes de stockage actif et passif ne doit pas être confondue avec l'énergie solaire thermique actif et passif les systèmes décrits par certains auteurs comme celui de Dincer et Rosen (2011). Un système solaire actif est un système qui utilise un système mécanique (pompe ou ventilateur) pour faire circuler la chaleur liquide transport tandis qu'un système passif utilise les gradients de densité (forces gravitationnelles) pour faire circuler le fluide. Les mécanismes de stockage ont fait l'objet de

recherche très intensivement. La figure 1.1 représente les besoins d'énergie par volume entre les différents mécanismes de stockage annuel pour améliorer l'efficacité énergétique d'une maison.



Figure 1.1 Comparaison des volumes requis pour le stockage des besoins d'énergie annuelle d'un système Eco-house de 1800 kWh.

2.2 Stockage par chaleur sensible

Dans le stockage par chaleur sensible, il faut utiliser des matériaux à forte capacité thermique qui emmagasineront un maximum d'énergie. L'énergie thermique transférée fait varier la température du matériau (figure 1.2, zone sensible). La variation de la quantité de chaleur 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 s'écrit comme suit :

Où : *m* est la masse du matériau [kg],

 h_i est l'enthalpie massique initiale [$J kg^{-1}$], h_f est l'enthalpie massique finale [$J kg^{-1}$].

Si la capacité thermique massique du matériau C_p (ou chaleur spécifique massique, en $J kg^{-1} K^{-1}$) est constante, l'expression de l'enthalpie massique permet d'écrire:

Où T_i est la température initiale [K],

 T_f est la température finale [K].

La quantité d'énergie stockée est donc proportionnelle au volume, à l'élévation de température et à la capacité thermique du matériau de stockage. Ce type de stockage est limité par la capacité de stockage de matériaux avant le changement d'état (fusion ou solidification), et les déperditions thermiques liées à la qualité de l'isolation. Plusieurs types d'installations de stockage par chaleur sensible ont été développés, soit de courte durée comme dans les chauffe-eau solaires, soit intersaisonniers (stockage pendant l'été pour une utilisation en hiver) utilisés généralement pour le chauffage des bâtiments (Maha, 2004).

Le classement du type de stockage par chaleur sensible dépend du milieu de stockage, en particulier de son état physique. On définira ainsi le stockage par un fluide (l'eau, l'huile, des sels fondus); le stockage par un solide (pierre, métaux ect.).



Figure 1.2 Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

2.3 Stockage par chaleur latente

2.3.1 Généralités

Le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande densité d'énergie, cette technique est attractive, car l'énergie stockée/déstockée par la chaleur latente de fusion /solidification s'effectue à une température constante ou presque, lors de la phase de transition du matériau. Contrairement au stockage par chaleur sensible l'énergie stockée dépend de la chaleur latente et de la masse du matériau à changement de phase. Ce type offre une densité de stockage de l'énergie beaucoup plus élevé avec une petite oscillation de température par rapport à la méthode de stockage de chaleur sensible, notant les différents difficultés pratiques dans l'application des MCP en raison de la faible conductivité thermique, variation de la densité, de la stabilité des propriétés sous cyclage étendu et parfois la séparation de phase et le problème de surfusion (sous-refroidissement) du matériaux à changement de phase.

Physiquement l'énergie qui est absorbée par le matériau agit pour renforcer l'énergie des constituants des atomes ou molécules, augmentant leur état vibratoire. À la température de fusion les liaisons atomiques desserrer. La solidification est l'inverse de ce processus, au cours de laquelle le transfert des matières de l'énergie à son environnement et les molécules perdent de l'énergie et de l'ordre euxmêmes dans leur phase solide (figure 1.3(a)).

Prenant les glaces de l'eau à titre d'exemple, l'énergie demandée pour fondre 1 kg de glace est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température de 1 kg d'eau de 1°C, on a besoin d'une

énergie de 4.2 kJ pour diminuer la température de 1 kg d'eau d'une température de 1 °C à 0°C, il faut 335 kJ pour compléter sa solidification en glace à T = 0°C (figure 1.3(b)).



Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit:

 $Q = m (h_f - h_i) = m h_f$ [J](1.3)

Où h_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, il faut porter le matériau initialement à T_i à sa température de fusion T_F et l'on écrit :

$$Q = m (h_f - h_i) = m C_p (T_F - T_i) + m h_f [J] \dots (1.4)$$

Lorsque le processus de fusion terminé le liquide augmente sa température par chaleur sensible jusqu'à le point d'ébullition. Une fois que l'ébullition est atteinte, le liquide passe à un vapeur à travers la chaleur latente de vaporisation jusqu'à ce que le processus de changement de phase soit terminé. Chauffage supplémentaire est désormais sous forme de chaleur sensible qui agit à sa chaleur de la vapeur. Ce processus est représenté dans la figure 1.4.

Il est très clair que la chaleur latente de vaporisation est un processus d'énergie plus élevée que la chaleur latente de fusion. Mais généralement les MCP sont utilisés pour leur chaleur latente de fusion plutôt que de leur chaleur latente de vaporisation. En effet généralement le processus d'ébullition/condensation absorbe et libère plus d'énergie, mais le changement de la densité de liquide à un gaz est grand, par conséquent une augmentation importante de pression dans le système ce qui exige un système de contrôle, une quantité importante de support matériel qui n'est pas toujours pratique. Il y a bien entendu de nombreuses applications pour bouillir le transfert de chaleur, mais dans ce travaille on concentrera sur les applications pour lesquelles un changement de phase solide-liquide est le plus avantageux.



Figure 1.4 Processus de solidification/fusion, vaporisation/condensation d'un MCP.

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée figure 1.1. Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante. Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient donc la courbe (a) de la figure 1.5, on remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température). Dans le cas d'un mélange, la variation d'enthalpie ne présente plus de discontinuité (courbe (b) de la figure 1.5) sauf dans le cas où l'on a formation d'un composé défini avec fusion (ou solidification) congruente (Maha A., 2004).



Figure 1. 5 Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur ; (b) pour un mélange. (Maha, 2004)

3. Théorie de changement de phase : Solide – liquide

Le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande densité d'énergie, car l'énergie stockée/déstockée par la chaleur latente de fusion/solidification s'effectue à une température presque constante, lors de la phase de transition du matériau. Contrairement au stockage par chaleur sensible l'énergie stockée dépend de la chaleur latente et de la masse du matériau à changement de phase. Ce type offre une densité de stockage de l'énergie beaucoup plus élevé avec une petite oscillation de température par rapport à la méthode de stockage de chaleur sensible. Prenant les glaces de l'éau à titre d'exemple, l'énergie demandée pour fondre 1 kg de glace est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température de 1 kg d'eau de 1°C, on a besoin d'une énergie de 4.2 kJ pour diminuer la température de 1 kg d'eau d'une température de 1°C à 0°C, il faut 335 kJ pour compléter sa solidification en glace à T = 0°C. Physiquement l'énergie qui est absorbée par le matériau agit pour renforcer l'énergie des constituants des atomes ou molécules, augmentant leur état vibratoire. À la température de fusion les liaisons atomiques desserrer (Fleischer, 2015). La solidification est l'inverse de ce processus.

D'un point de vue pratique, seul le changement de phase solide-liquide est utilisé dans l'enveloppe du bâtiment. Le matériau peut être une substance pur, un mélange eutectique ou un mélange noneutectique. Le Différence entre mélange eutectique et non-eutectique est la température de changement phase: pour un mélange eutectique, l'état physique change à température constante alors que, pour un mélange non-eutectique, le changement de phase se produire pendant un intervalle de température (Kuznik et al., 2011). Généralement, dans la littérature les MCP utilisés à l'enveloppe de bâtiment ont une plage de température entre 20°C et 30°C.

Au cours du changement de phase liquide-solide d'un corps pur ou d'un mélange (cas des alliages), il y a existence d'une zone de transition entre les deux phases (Bianchi et al., 2004). A l'échelle microscopique, la zone de transition (ou interface) Γ correspond à une discontinuité des propriétés physiques (figure 1.6). A l'échelle macroscopique, elle peut être diffuse et continue comme c'est le cas pour la « zone pâteuse » lors de la solidification. On parlera de *solidification* par le passage de l'état liquide à l'état solide et de *fusion* par la transition s'effectuant de la phase solide à la phase liquide.





Les deux principales caractéristiques du changement de phase sont (Bianchi et al., 2004) :

• l'interface est à une température déterminée par les relations locales d'équilibre thermodynamique ;

• le changement d'état donne lieu à un dégagement de chaleur pour la solidification (une absorption de chaleur dans le cas de la fusion) proportionnel à la vitesse de changement de phase et localisé à l'interface.

3.1 Solidification d'un corps pur

On qualifie de solidification (ou fusion) d'un corps pur lorsque le dégagement (ou absorption) de la chaleur latente de transition de phase se réalise à une température bien définie et précise. La température T_F de changement de phase à l'interface est une constante physique (Guichard, 2013). Le phénomène de solidification dans un milieu semi-infini d'un produit pur est schématisé par la figure 1.7. Le seul mode de transfert thermique considéré est la conduction. D'après la figure 1.7, la chaleur est évacuée lentement par la surface d'échange. On note T_{sol} , la température de la surface d'échange ($T_{sol} < T_F$) et T_{liq} la température du fluide loin de l'interface solide-liquide et plane ($T_F < T_{liq}$). Pour le changement de phase d'une substance pure, l'interface solide-liquide est un front « *plan* » ou encore « *lisse* ». Cette interface est appelée « front de solidification ». Durant le processus de changement de phase, celle-ci va progresser au cours du temps *t* et est localisée à tout instant à l'abscisse XF(t). Dans le cas à front lisse, la fraction solide va varier de $f_{sol} = 0$ pour la zone liquide à $f_{sol} = 1$ pour la zone solide, comme le montre la figure 1.8. Généralement, l'enthalpie massique *H* qui est fonction de la température est utilisée pour décrire le phénomène.

Avec :

i=s ou lDésigne la phase solide ou la phase liquide;cCapacité thermique massique à pression constante $[J kg^{-1} K^{-1}];$ TTempérature [K]; $H_{réf}$ Constante $[J kg^{-1}].$



Figure 1.7 Solidification d'une substance pure dans un milieu semi-infini. (Bianchi et al., 2004)



Figure 1.8 Évolution de la fraction solide et de l'enthalpie au cours de la solidification d'une substance pure. (Bianchi et al., 2004)

3.2 Solidification d'un mélange homogène

La solidification (ou fusion) d'un mélange homogène a lieu dans une plage de température définie où il y a coexistence des phases solide et liquide. Dans l'intervalle de température, la chaleur latente est dégagée (ou absorbée) en fonction des proportions et des propriétés des constituants du mélange. Le processus de solidification d'un mélange homogène peut être illustré par la figure 1.9. Les hypothèses dans lesquelles nous nous plaçons sont identiques à celles précédentes, c'est- à-dire que les transferts thermiques par convection et rayonnement sont négligés et la conduction est seule prise en compte.

Soit $T_{solidus}$ et $T_{liquidus}$ les variables des températures respectives aux interfaces solide/mélange et liquide/mélange. La différence de température entre $T_{solidus}$ et $T_{liquidus}$ est notée ε_T . Cet écart de température est appelé *intervalle de solidification*. Spatialement, cela correspond à la zone pâteuse. Les positions respectives de ces interfaces au cours du temps sont repérées par les abscisses $X_{f1}(t)$ et $X_{f2}(t)$. D'un point vue macroscopique, le problème peut être traité par le biais de variables moyennes macroscopiques telles que la fraction solide (ou liquide) et l'enthalpie du mélange (solide+liquide) définies comme suit (Bianchi et al., 2004):

Avec:

 $\begin{aligned} f_{sol} + f_{liq} &= 1\\ \overline{\rho} &= \rho_{sol} f_{sol} + \rho_{liq} f l_{iq} \end{aligned}$

Avec : $\overline{\rho}$ masse volumique du mélange [kg m⁻³];

*f*_{sol} et *f*_{liq} Respectivement fraction solide et fraction liquide.

Dans le cas d'une interface à morphologie plane, La résolution de problème de solidification consiste à déterminer les champs de températures ainsi que la position de l'interface. Considérons d'un point de vue local, un front à morphologie « plane » bien défini. Sous les hypothèses suivantes:

• absence de sources internes de chaleur;

• effets de compressibilités négligés;

• transferts thermiques par convection et rayonnement négligés par rapport au transfert thermique par conduction.

L'équations dans les phases liquide (l) et solide (s) est donnée par:

$$\rho_i \frac{dH_i}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (k_i \vec{\nabla} T_i)....(1.7)$$

D'un point vu mathématique, deux formulations peuvent être établies pour traiter le cas de la solidification à front bien défini. Il s'agit de: (Guichard, 2013)

- la formulation enthalpique qui ne nécessite pas le suivi de l'interface de changement de phase. On peut qualifier cette méthode d'approche Eulérienne ;

- la formulation de Stefan qui requiert la connaissance du front de changement de phase à chaque instant. Cette méthode peut être considérée comme une approche Lagrangienne.



Figure 1.9 Solidification d'un produit homogène. (Guichard, 2013)

Plus de détailles ont discutées sur les notions théoriques des matériaux à changement de phase dans peuvent être trouver dans l'article de revue de Kuznik et al. (2011).

4. Les MCP couramment utilisés

Plusieurs MCP et leurs propriétés associées à leurs applications spécifiques ont déjà été répertoriés dans de nombreuses publications. On pourra donc consulter utilement les articles de revue de Hasnain (1997), Zalba et al. (2003), Zhou et al. (2012), ainsi que celui de Khudhair et Farid (2004). De nombreux livres sont spécifiés aux MCP avec leur application à l'enveloppe de bâtiment comme celui de Jan Kośny (2015).

4.1 Classification des MCP

En fonction de l'état, les MCP se répartissent en trois groupes : solide- solide, solide-liquide, liquidegaz. Parmi eux les MCP solide-liquide sont plus appropriés pour le stockage de l'énergie thermique, les MCP solide-liquide se repartissent selon leur composé en organiques, inorganiques et eutectiques (Zhou et al., 2012).

En fonction des applications, le MCP devrait être d'abord sélectionnés en fonction de leur température de fusion. Faire fondre les matériaux ci-dessous 15°C sont utilisés pour stocker de la fraîcheur dans les applications de conditionnement d'air, tandis que les matériaux qui fondent audessus de 90°C sont utilisés pour la réfrigération d'absorption. Tous les autres matériaux qui fondent entre ces deux températures peut être appliquée dans le chauffage solaire et de la chaleur pour la régulation de la charge des applications. On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories comme suit:

- 1- Les corps inorganiques: hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- 2- Les corps organiques: paraffines, acides gras, corps non-paraffiniques, polyalcools.
- 3- Eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

4.2 Critères de sélection des MCP

Il faut que les matériaux utilisés pour le stockage de l'énergie thermique à changement de phase doit avoir une grande chaleur latente et une haute conductivité thermique. Ils doivent avoir une température de fusion située dans la gamme de fonctionnement (figure 1.10), faire fondre par ailleurs avec le minimum de surfusion (sous-refroidissement) comme il est indiqué en figure 1.11, et être chimiquement stable, de faible coût, non toxique et non corrosif. Les composés organiques paraffiniques et non-paraffiniques semblent offrir plus d'avantages que les hydrates salins et les MCP eutectiques. Leur principal inconvénient est d'avoir une faible conductivité thermique.



Figure 1.10 Température de fusion et de l'enthalpie de changement de phase des MCP existants. (Dipl.-Ing., Dieckmann J.H., 2006)



Figure 1.11 Phénomène de surfusion d'un matériau à changement de phase.

4.3. Mesure des propriétés thermiques des MCP

Les méthodes de mesure les propriétés thermiques de MCP sont très importantes. En effet le processus de sélection d'un MCP approprié est très complexe mais crucial pour le stockage d'énergie thermique. Le potentiel MCP doit avoir une température de fusion approprié, chaleur de fusion souhaitable et d'une conductivité thermique spécifié par l'application pratique. Il existe de nombreuses techniques de mesure, parmi lesquels la calorimétrie différentielle à balayage (*DSC*), l'analyse thermique différentielle (*DTA*) et thermogravimétrie (*TG*) sont les plus couramment utilisées. Ainsi « *T-history method* » la nouvelle méthode développée par (Zhang et Jiang, 1999).

4.3.1 La calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

Dans le test (DSC), l'échantillon et la référence (dont on connait les propriétés thermique) sont maintenus à la même température presque tout au long de processus de mesure et en mesurant la différence de température entre l'échantillon peut être obtenu, comme la chaleur de fusion, la capacité calorifique et la chaleur de fusion/solidification.

L'appel de méthode peut aussi être utilisé pour analyser les propriétés thermiques du MCP-panneaux muraux. Via DSC test, non seulement la température de fusion et chaleur de fusion de MCP être obtenu, mais aussi la distribution de MCP dans les panneaux muraux, la capacité d'accumulation de la chaleur du MCP-panneaux muraux et de l'effet des multiples cycles thermique sur les propriétés thermiques de MCP peut être testée (Zhou et al., 2012).

4.3.2 L'analyse thermique différentielle (DTA)

C'est une technique dans laquelle la différence de température entre le MCP échantillon et la référence sont mesurée en fonction du temps, lorsque l'ensemble est programmée dans une atmosphère bien contrôlée. Cette technique est fréquemment utilisée pour mesurer les températures de fusion et d'ébullition des matériaux organique et inorganique.

4.3.3 Méthode de «T-history »

(Zhang et Jiang, 1999) ont analysé les limites des méthodes classiques y compris la méthode DSC et DTA classiques, puis ont présenté une nouvelle méthode appelée «*T-history method*» pour déterminer la température de fusion, degré de surfusion, chaleur de fusion, la chaleur spécifique et la conductivité thermique de MCP. Ils ont pris la mesure de certains MCP par cette méthode et ont trouvés un accord souhaitable entre les résultats des tests et les résultats disponibles dans la littérature. (Hong et al., 2004) modifiés la méthode *T-history* par l'amélioration de certaines hypothèses inappropriées dans la méthode par (Zhang et Jiang, 1999; Peck et al., 2011) également amélioré cette méthode de mesure en fixant le tube à essai à l'horizontale qui peut réduire au minimum la différence de température le long de la direction longitudinal du tube à essai d'obtenir des données plus précises à partir de la méthode *T-history*.

4.4 Amélioration du transfert de chaleur des MCP

La plupart des MCP ayant un problème commun, la faible conductivité thermique, étant autour de 0.2 *W/m K* pour la cire de paraffine et 0.5 *W/m K* pour les eutectiques et les sels hydraté, qui prolongent les périodes de charge et de décharge. Différentes techniques ont été proposées pour améliorer la conductivité thermique des MCP, comme le remplissage haute conductivité des particules dans MCP, l'intégration des matériaux à matrice poreuse dans MCP, l'insertion des matières fibreuses, ainsi que de macro et micro encapsulation des MCP. En plus des publications mentionnées précédemment, il existe un excellent article de revue spécifié à l'amélioration de conductivité thermique des MCP (Liwu et Khodadadi, 2011), les différents études expérimentales et computationnelles dans la littérature sont discutés.

Donc il faut que les matériaux utilisés pour le stockage de l'énergie thermique à changement de phase doit avoir une grande chaleur latente et une haute conductivité thermique. Ils doivent avoir une température de fusion située dans la gamme de fonctionnement, faire fondre par ailleurs avec le minimum sous refroidissement et être chimiquement stable, de faible coût, non toxique et non corrosif. Les matériaux qui ont été étudiés au cours des 40 dernières années sont les sels hydratés, cires de paraffine, d'acides gras et d'eutectiques organiques et non-organiques volatils.

5. Application des MCP dans l'enveloppe des bâtiments

L'utilisation des MCP dans le secteur de bâtiment a pour objectif d'augmenter l'inertie thermique des bâtiments. De réduire la consommation d'énergie, due aux systèmes de chauffage et de climatisation qui assurent une température intérieure compatible avec l'état de confort. Elle consiste à augmenter la capacité de stockage thermique dans les différentes configurations de l'enveloppe de l'habitat par intégration des MCP. Ces matériaux se distinguent par un échange de chaleur important

et isotherme, par changement de phase. En se basant sur la propriété de stockage de chaleur par voie latente, ces matériaux permettent une isolation thermique de l'habitat vis-à-vis de l'influence des fluctuations de température extérieure.

La première maison résidentielle avec MCP a été construite à Dover, au Massachusetts, aux États-Unis par Mr Talkes M. (1947). Il contenait environ 4 m³ de sels de Glauber, qui étaient emballés dans des fûts en acier situés dans les espaces verts glacés du sud qui ont été ventilés avec des ventilateurs pour déplacer l'air chaud dans l'espace de vie pendant l'hiver. En été, le stockage thermique MCP a également permis de refroidir les salles environnantes. La maison Dover a très bien fonctionné pendant deux demi-saisons. Malheureusement, le sel de Glauber se désintègre pendant une période de courte durée et perd sa capacité de transition de phase, sinon scellé et chimiquement amélioré. Pendant la troisième saison d'hiver dans la maison de Dover, les conteneurs avec les sels de Glauber ont cessé définitivement de fonctionner. En conséquence, l'expérience a été terminée. Cependant, le Dr Telkes est resté stable pour le temps de journalisation pour l'application MCP dans les applications de chauffage solaire. En 1951, elle a écrit: «La lumière du soleil sera utilisée comme source d'énergie tôt ou tard ».

Depuis les années 80, plusieurs études ont été effectuées sur l'utilisation des MCP dans le bâtiment (Wang X et al., 2009). Ces études ont amené à l'élaboration et à l'intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment, par l'inclusion des systèmes de stockage d'énergie, parmi lesquels, on distingue les systèmes actifs et les systèmes passifs (figure 1.12).



Figure 1.12 Applications de MCP/enveloppes bâtiment. (Wang X et al., 2009)

6. Synthèse des travaux d'intégration des MCP dans les bâtiments

Les MCP peuvent directement être intégrés dans les différentes parois d'un bâtiment afin que celui-ci puisse atteindre de hautes performances énergétiques. Les MCP ont permis de faciliter leur intégration dans les murs Trombe, les toitures, les volets, les plafonds et les systèmes de chauffage par plancher. Leur intégration dans les enveloppes des bâtiments dépend essentiellement des différentes applications visées, recourant ainsi à des configurations et des caractéristiques uniques (Guichard, 2013). L'utilisation des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois façons différentes (Sharma et al, 2009):

- Intégration dans les murs du bâtiment ;
- Intégration dans les éléments de constructions autres que les murs ;
- Intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

6.1 Les méthodes traditionnelles d'incorporation

Les trois méthodes les plus prometteuses de MCP à incorporer dans les matériaux de construction conventionnelle étaient l'incorporation directe, l'immersion et l'encapsulation (Hawes et al., 1993).

Intégration directe

C'est la méthode la plus simple dans laquelle les MCP liquides ou en poudre sont directement ajoutés aux matériaux de construction tels que le gypse, le béton ou le plâtre pendant la production. Les pertes thermiques et l'incompatibilité entre les MCP et Les matériaux de construction peuvent être les plus gros problèmes.

➢ Immersion

C'est une technologie dans laquelle les composants de la structure du bâtiment, tels que le gypse, la brique ou le béton, sont plongés dans les MCP fondus et ensuite absorber les MCP dans leurs pores internes à l'aide de l'élévation capillaire. Alors que certains chercheurs ont souligné que cette méthode peut avoir un problème de perte pour l'utilisation à long terme.

➢ Macro-encapsulation

La technologie avec les MCP encapsulés dans un récipient (des tubes, des sphères ou des panneaux), s'appelle macro-encapsulation. Le RUBITHERM® produit une sorte de MCP panneaux appelés (CSM modules) fabriqués en aluminium avec un revêtement anticorrosion efficace, illustré dans la figure 1.13. Ils peuvent s'adapter de nombreux MCP commerciaux avec les MCP macro- encapsulés, le problème de perte peut être évité. Il présente les inconvénients d'une mauvaise conductivité thermique, d'une tendance à la solidification des bords et d'une intégration compliquée aux matériaux de construction.

6.2 Micro-encapsulation

Les MCP micro-encapsulés ont été utilisés dans des conditions thermiques pour le stockage d'énergie des bâtiments, ou les MCP sont enfermées dans un film polymère mince, scellé et de poids moléculaire élevé, en maintenant la forme et en empêchant le MCP par perte pendant le processus de

changement de phase. Il est facile et plus économique d'intégrer les MCP micro-encapsulés dans les matériaux de construction. Des analyses des tests thermiques cycliques sur la paraffine microencapsulée a effectué par (Hawlader et al., 2002), ils ont constatés que La paraffine microencapsulée a toujours conservé son profil géométrique et sa capacité calorifique après 1000 cycles.

Certains chercheurs pensent que le MCP micro-encapsulés incorporés dans les structures de bâtiments peut affecter la résistance mécanique de la structure. Cabeza et al. (2005) a conçu deux cabines en béton de même forme et taille, avec un MCP micro-encapsulé appelé béton Mopcon et le l'autre sans MCP respectivement, afin de trouver la possibilité d'utiliser des MCP micro-encapsulés dans des matériaux de construction pour réaliser une économie d'énergie considérable sans diminuer de manière significative la résistance mécanique des structures en béton au même temps. Ils ont trouvé que le béton de Mopcon a atteint une résistance à la compression plus de 25 MPa et une résistance à la rupture de traction sur 6 MPa qui avait a déjà satisfait aux exigences en termes de structure générale. Cependant, les applications des MCP micro-encapsulés ont encore besoin de plus enquête sur l'aspect de la sécurité.

6.3 MCP à forme stabilisées

Les MCP à forme stabilisées, dans lesquels le MCP est dispersé dans une autre phase de matériau support (polyéthylène haute densité, etc.) pour former un matériau composite stable figure 1.14, qui attirent une attention accrue en raison de leur grande chaleur apparente spécifique, de leur conductivité thermique appropriée, de la stabilité de MCP dans le processus de changement de phase, ainsi que d'une bonne performance de cycles thermiques multiples sur une longue période.



Figure 1.13 Panneau CSM contenant le MCP. (Rubitherm Technologies GmbH)



Figure 1.14 Plaque MCP à forme stabilisées. (Zhang et al., 2006)

6.4 Plaques murales à MCP (PCM wallboard)

Le panneau mural de MCP est considéré un remplacement efficace et moins couteux de la masse thermique standard pour stocker la chaleur solaire dans les bâtiments, dans lesquels le MCP est enfoncé dans un panneau de gypse, le plâtre ou autres fondations. Les caractéristiques thermiques du panneau mural de MCP sont très proches de ceux des MCP seuls, et quand un panneau mural de MCP est coupé, une plus grande concentration de MCP se situe dans le tiers externe de l'épaisseur de panneau mural prés de chaque visage dû au procédé de diffusion (Athienitis et al., 1997). Kuznik et al. (2011) ont employés des panneaux muraux de Dupont de Nemours pour la rénovation d'un

bâtiment tertiaire et ont constatés qu'ils étaient vraiment efficaces si la température extérieure variait dans la température de fonte des MCP.

7. Synthèse des travaux expérimentaux et numériques

Parmi les travaux expérimentaux et dans le cadre d'un projet Union Européenne Cabeza et al. (2005) ont étudié les principaux effets des MCP micro-encapsulés mélangés avec du ciment pour évaluer les performances thermiques d'une petite cabine (figure 1.15), pour un climat méditerranéen et dans le but de développer un produit qui permettrait d'obtenir des économies d'énergie importantes dans les bâtiments. Le MCP commercial de MicronalPCM (BASF) a été utilisé pour cette expérimentation dont la température de changement de phase est de 26°C et l'enthalpie de changement de phase est de 110 kJ \cdot kg⁻¹. En comparaison avec un mur traditionnel, les résultats de l'étude montrent que le stockage de l'énergie thermique pour le mélange *(*béton + MCP) a une meilleur inertie thermique et donc qu'il permet des fluctuations de températures réduites.

Toujours dans le cadre du projet d'Union Européenne, Castell et al. (2010) ont mené des études en associant des MCP à des constructions en brique. Pour montrer l'influence des MCP, cinq cabines ont été construites avec des enveloppes de constructions et des matériaux différents. Trois des cinq cabines sont construites avec des briques perforées et les deux autres en briques alvéolaires. Les MCP utilisés avec les briques perforées sont le RT-27 et pour les briques alvéolaires le SP-25 A8. Les expérimentations sont classées en deux catégories. L'une correspond à une (fluctuation libre en température) sans aucun système de refroidissement et l'autre peut être associée à un (environnement contrôlé) associé à un système de refroidissement afin d'obtenir une température intérieure constante et fixée à 24°C. Les résultats ont conduit à des conclusions semblables à Cabeza et al. (2005).

En effet, ils ont observé une atténuation de 1°C de la température et des fluctuations à l'intérieur de la cabine cubique. De plus, cette expérience à permis de soulever un problème lié à la solidification durant la nuit. Ce problème est une mauvaise régulation de la température pour le jour suivant. Afin de pallier cet inconvénient, une des solutions proposées est de mettre en place un système de refroidissement passif ou actif, ou également utiliser un système de ventilation associé à l'enveloppe de la cabine intégrant le MCP. Concernant les expérimentations pour un (environnement contrôlé) les résultats sont concluants d'un point vu des économies d'énergies. La comparaison entre une cabine intégrant des MCP (RT-27) et une cabine sans MCP conduit à une réduction de 15 % de la consommation électrique. Pour la cabine intégrant un MCP ayant une température de changement de phase de 25°C (SP-25), une réduction de 17 % de la consommation électrique a été obtenue. Ainsi, une réduction d'émissions de C0₂ d'environ 1 - 1.5 kg an⁻¹ m⁻² a pu être déduite.

Une évaluation expérimentale et numérique de l'effet de l'incorporation d'une couche de MCP dans les trous carrés d'un mur extérieur d'un bâtiment constitué de briques rouges a déjà été discutée (Necib et al., 2013). Le modèle a été testée pour les conditions climatiques de Ouargla, en Algérie, ce qui fait de cette étude une référence très importante pour ceux qui s'intéressent à l'étude des applications des MCP dans les zones arides. Les résultats du modèle numérique ont été validés expérimentalement avec succès. Les résultats ont montré que les MCP peut augmenter

considérablement l'inertie thermique de la brique, et la réduction du gain de chaleur du mur est fortement influencée par la quantité de MCP et son emplacement dans les trous.

Une recherche sur l'application de MCP sous la forme de panneaux muraux DuPont Energain, en combinaison avec un système de chauffage par le sol incorporant des MCP élaborés par Reza et al. (2015). Cette étude expérimentale a été réalisée par l'utilisation de deux huttes d'essai identiques au campus de Tamaki (figure 1.16), Université d'Auckland. Les résultats utilisant une méthode basée sur les prix (*A price-based method*) ont montré des économies d'électricité en termes de consommation et de coûts allant jusqu'à 35% et 44.4% respectivement.



Figure 1.15 Cabine d'expérimentations (dimensions 2.4 m × 2.4 m × 2.4 m). (Cabeza et al., 2005)



Figure 1.16 (a) Cabane expérimentale au campus Tamaki, Université d'Auckland et (b) Le système de chauffage par le sol utilisé. (Reza et al., 2015)

Ce qui concerne la modélisation des MCP, très peu de solutions analytiques sont disponibles sous forme fermées pour les problèmes de changement de phase et peuvent être trouvées dans des livres de transfert de chaleur avancés comme ceux de (Crank, 1984; Alexiades et Solomon, 1993). Par conséquent, des solutions numériques approximatives sont généralement utilisées pour traiter cette classe de problèmes. Les méthodes numériques pour résoudre ces problèmes ont été révisées dans la littérature et peuvent être généralement divisé en (AL-Saadi et Zhiqiang, 2013) :

1. Méthode à grille fixe : Ces méthodes consistent en grilles d'espace fixe où la limite est suivie par l'utilisation d'une fonction auxiliaire. Différentes approches sont utilisées pour tenir compte de l'évolution de la chaleur latente, Cette classe de méthodes a été largement utilisée.

2. Méthode de grille de déformation ou schéma de suivi avant (c'est-à-dire solution classique ou solution numérique forte) : Ces méthodes permettent aux nœuds de grille de se déplacer le long de la couche limite mobile et ainsi les ceintures spatiales se déforment au fur et à mesure que la solution se développe. Ici, l'interface est explicitement suivie en utilisant la condition de Stefan (Alexiades et Solomon, 1993).

3. Méthode hybride: Ces méthodes utilisent les caractéristiques des grilles fixes et de déformation qui utilisent une grille de fond fixe et emploient des schémas locaux de suivi avant pour suivre le mouvement de la frontière.

La méthode de la grille fixe est simple par rapport aux autres, la plus souple, pratique, adaptable et facilement programmable (Alexiades et Solomon, 1993). L'évolution de la chaleur latente est prise en compte dans l'équation de référence (Equation 5) en utilisant soit la méthode de l'enthalpie, la méthode de la capacité calorifique, la méthode de la source de chaleur Ou d'autres méthodes (AL-Saadi et Zhiqiang, 2013).

Plusieurs outils de simulation de dynamique des fluides (CFD) disponibles ont été utilisés pour analyser numériquement des technologies de construction utilisant des MCP. Les modèles CFD sont généralement utilisés pour prédire les champs de flux d'air et de température dans les environnements intérieurs en résolvant numériquement l'ensemble des équations aux dérivées partielles de Navier-Stokes pour la masse, l'énergie et la quantité de mouvement (Jan Kośny, 2015). Ces équations sont linéarisées, discrétisées et appliquées à des volumes finis dans le solveur pour obtenir une solution numérique détaillée, y compris les champs de vitesse et de température. Dans les applications MCP, l'analyse CFD est très souvent combinée avec les simulations énergétiques TRNSYS pour l'ensemble du bâtiment comme discuté dans (Gowreesunker et al., 2013). ANSYS Fluent à titre d'exemple est l'un des outils CFD qui a été utilisé pour l'analyse thermique des enveloppes de bâtiment améliorées par MCP. Il résout la forme approximative des équations gouvernantes afin de fournir différents champs de solution pour un domaine particulier (Jan Kośny, 2015). Susman et al. (2011) et Ye et al. (2011) ont utilisé la méthode enthalpie-porosité pour simuler des unités de voile et de plaques MCP et ont trouvé une précision raisonnable dans les prévisions de température pour l'espace de construction interne. La voile de MCP est une feuille ou un tissu contenant le MCP suspendu au plafond et fonctionnant en tant qu'un

échangeur de chaleur passif. Il est généralement fabriqué avec l'utilisation de MCP disponibles dans le commerce et de supports composites légers.

En termes d'analyse des MCP, l'environnement de simulation MATLAB permet le développement de soit des modèles numériques autonomes (Chen et al., 2008; Guichard, 2013; Ghedamsi et al., 2014), soit des composants de simulation relativement simples qui collaborent avec des modèles énergétiques plus complexes tels que ESP-r ou TRNSYS. Plusieurs avantages de la plate-forme de modélisation MATLAB/Simulink, qui peuvent être utiles dans l'analyse paramétrique des enveloppes de bâtiment améliorées par MCP. Chen et al. (2008) ont utilisé MATLAB pour le développement d'un modèle de différence finie unidimensionnelle implicite. Ce modèle ensuite a été utilisé pour l'analyse de performance thermique du panneau mural, du plafond et du plancher améliorés par MCP. Dans ce développement, la méthode de la capacité thermique a été utilisée. L'équation discrétisée a été résolue en utilisant la méthode itérative de Gauss-Seidel.

Concernant les outils de simulation de bâtiments à packages complets, quelques programmes ont l'aptitude de gérer les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment avec des MCP tels que TRNSYS, EnergyPlus, ESP-r et BSim. En outre, certains autres programmes avec des capacités limitées sont disponibles pour modéliser le changement de phase dans les bâtiments tels que RADCOOL, ESim et CoDyBa.

8. Conclusion

Ce chapitre donne un aperçu sur les matériaux à changement de phase (MCP) couramment utilisés aux bâtiments, quelques notions théoriques importantes sont discutées, des études antérieures relatives aux propriétés thermo-physiques et les différentes méthodes d'incorporation des MCP. Selon la littérature, plus de connaissances théoriques et travaux expérimentaux sont nécessaire pour choisir des MCP souhaitables aux applications des bâtiments. Une telle analyse peut être numérique mais il faut prêter attention aux hypothèses de modélisation des MCP aux enveloppes de bâtiment.

L'étude de la modélisation des matériaux à changement de phase dans les structures du bâtiment est très importante, car il permet une meilleure compréhension des phénomènes physiques entourant le changement de phase qui sont généralement négligés. Cela peut affecter les résultats de la simulation par rapport aux résultats expérimentaux, tels que le phénomène d'hystérésis et de surfusion des MCP. Ainsi, le chapitre 1 traite d'une étude détaillée de la modélisation des matériaux à changement de phase, prenant en compte le phénomène d'hystérésis. En revanche, la simulation thermique dynamique des bâtiments est très importantes pour étudier l'effet du changement de phase sur l'économie d'énergie, avant de mener des travaux expérimentaux ou d'appliquer cette technologie. Par conséquent, les chapitres 3 et 4 traitent d'une étude de simulation et d'optimisation des modèles de construction en conditions désertiques arides.
Chapitre 2 Modélisation Mathématique et Simulation Numérique d'une Paroi Complexe Contenant une Couche MCP

Chapitre 2 Formulation Mathématique et Simulation Numérique d'une Paroi Complexe Contenant une Couche MCP.

1. Introduction

L'isolation thermique des enveloppes de bâtiments est cruciale pour réduire la consommation d'énergie, c'est pourquoi de nombreux chercheurs et experts envisagent d'utiliser des moyens intelligents et plus créatifs pour fournir plus d'énergie grâce à la climatisation, en particulier dans les régions aux conditions climatiques durs; par conséquent, l'isolation thermique des structures de bâtiments à l'aide de matériaux à changement de phase (MCP) a suscité beaucoup d'intérêt au cours de la dernière décennie. D'autre part, en ce qui concerne le développement de modèles numériques pour étudier l'effet de l'utilisation des MCP dans les structures du bâtiment sur la consommation d'énergie et/ou le transfert de chaleur; de nombreux phénomènes physiques associés au changement de phase sont souvent négligés. On mentionne par exemple l'écoulement de fluide (convection naturelle) à l'intérieur du MCP qui est directement lié au transfert de chaleur de ce genre des matériaux. Par conséquent, ces hypothèses simplificatrices peuvent conduire à une incohérence des résultats de la simulation avec les résultats expérimentaux et peuvent ainsi rendre les résultats de la simulation inexacts ou éloignés des applications réelles des MCP dans les bâtiments.

En cas de stockage thermique latent, deux autres phénomènes fortement liés au transfert de chaleur sont discutés dans de nombreuses références, à savoir l'hystérésis (le ralentissement du changement de phase) et la surfusion des MCP. Il convient de noter que l'hystérésis des MCP représente la quantité totale de chaleur latente absorbée ou évacuée lors du passage du solide au liquide ou inversement. Les formes des courbes d'enthalpie diffèrent en fonction de la direction comme le montre la figure 2.1, en fin de compte, la quantité totale d'énergie d'un état à l'autre reste conservée. Tandis que le problème de surfusion n'apparaît que pour certains types de MCP comme les matériaux inorganiques. Comme la surfusion correspond à l'état liquide d'un corps alors que sa température est inférieure à la température de cristallisation. Ce qui rend l'étude numérique du comportement thermique des MCP un problème mathématique très difficile à modéliser, pour obtenir des résultats plus précis ou plus proches des résultats expérimentaux. Sur cette base, ce chapitre aborde certaines des publications les plus importantes qui incluent l'étude expérimentale et/ou numérique des matériaux à changement de phase, en tenant compte du phénomène d'hystérésis. Avant de mener une étude numérique du comportement thermique d'une paroi complexe contenant une couche de MCP, prise en compte du phénomène d'hystérésis à l'aide du logiciel MATLAB.



Figure 2.1 Courbe *h*-*T* pour un modèle asymétrique prenant en compte l'hystérésis de changement de phase.

2. Etudes expérimentales sur l'hystérésis des MCP

Les changements de phase de MCP sont souvent considérés comme des processus isothermes. En réalité, une telle hypothèse n'est correcte que pour les éléments purs. Dans le cas d'une transition de phase isotherme, les propriétés thermiques utilisées pour la description de la transition de phase sont: la température de changement de phase (T_m) , la chaleur spécifique à l'état solide (C_s) , la chaleur spécifique à l'état liquide (C_l) et la chaleur de fusion (h). Cependant, la plupart des MCP fondent et se solidifient à certains intervalles de température plutôt qu'à une température constante (Klimeš et al., 2020). Dans de tels cas, la connaissance de la relation de température d'enthalpie h(T) (ou de la température de chaleur spécifique C(T)) est nécessaire (Klimeš et al., 2020). Plusieurs techniques expérimentales peuvent être utilisées pour obtenir des relations h(T) et d'autres propriétés thermophysiques des MCP. Cette section répertorie certaines des techniques expérimentales les plus couramment utilisées pour obtenir des relations h(T) et d'autres propriétés thermo-physiques des MCP.

La méthode la plus largement utilisée pour obtenir des courbes h(T) à partir des MCP est la technique DSC qui a été adoptée comme technique d'analyse thermique bien établie et assez précise. Néanmoins, cette méthode peut impliquer de nombreuses difficultés et défauts, dont le faible masse des échantillons de MCP utilisés en analyse thermique (généralement de 10 à 50 mg), et de plus le problème d'hétérogénéité à l'échelle macroscopique ou microscopique de certains matériaux à changement de phase. Ce problème peut entraîner des divergences dans les résultats des tests entre différents échantillons de la même substance. En revanche, la méthode suggérée par Zhang Y.P. et Jiang Y. (1999) ('T-history method'), est considéré comme une méthode simple et très efficace avec certaines limites pour déterminer la chaleur de fusion, la chaleur spécifique et la conductivité thermique des MCP, car la masse des échantillons MCP dans la méthode T-history est beaucoup plus grande que la masse d'échantillons utilisée en DSC, mais en tenant compte du nombre de Biot, qui ne devrait pas dépasser 0.1. Cette méthode a été assez rapidement adoptée et améliorée par d'autres travaux expérimentaux (Klimeš et al., 2020). Notamment, les avantages de la méthode T-history par rapport à d'autres méthodes d'analyse thermique incluant le DSC et l'analyse différentiel thermique (DTA) présentées par Solé et al. (2013). Les résultats ont prouvé que la méthode T-history avait un grand potentiel pour la caractérisation thermique des MCP. Une comparaison des modes dynamiques et pas à pas du DSC pour la caractérisation de trois types de MCP (deux hydrates de sel et une

paraffine) a été présentée par Barreneche et al. (2013). Les auteurs ont recommandé l'utilisation d'un mode DSC dynamique à faible débit pour la caractérisation des hydrates de sel, alors qu'aucune différence entre les modes dynamiques et pas à pas du DSC n'a été observée dans l'analyse de la paraffine. (Cabeza et al., 2015) ont présenté un aperçu des techniques expérimentales, qui peuvent être utilisées pour la caractérisation des propriétés thermiques des MCP. Ils ont rapporté que la méthode *T-history*, par rapport au DSC et à la méthode de calorimétrie adiabatique, est bien adaptée pour l'étude de la surfusion et de l'hystérésis à changement de phase.

Outre la température de fin du changement de phase, (Jin X et al., 2014) ont également fourni des informations importantes sur le comportement thermique des MCP en cas de changements de phase partiel. La figure 2.2 représente la courbe h(T) décrivant une transition de fusion à solidification particulière utilisant la technique DSC. Par conséquent, les courbes h(T) pour tous les processus de fusion et de solidification partiels et complets et leur intégration dans le modèle informatique devraient fournir une modélisation précise et réaliste des cas avec des changements de phase complets et partiels. Cependant, cette approche nécessiterait une analyse DSC complète du MCP utilisé dans une application particulière. De plus, l'utilisation d'une courbe h(T) appropriée pourrait nécessiter des prédictions mathématiques compatibles sur le processus de fusion/solidification particulier à l'avance, ce qui n'est pas le cas dans les applications pratiques avec plutôt des conditions stochastiques.



Figure 2.2 Courbes DSC de fusion à solidification partielle d'un MCP à base de paraffine. (Jin X et al., 2014)

Divers types de matériaux à changement de phase organique ont été étudiés par (Li et al., 2016), qui portait sur le processus de changement de phase incomplet et incohérent du MCP. Les tests utilisant DSC ont confirmé que pour les cires de paraffine, les résultats dépendent fortement des vitesses de chauffage/refroidissement appliquées. Les résultats sont cohérents avec d'autres études, c'est-à-dire que plus la vitesse de chauffage/refroidissement est élevée, plus la plage de température du changement de phase est grande et plus la différence de température entre les pics des processus de

fusion et de solidification est élevée. Cependant, dans le cas de l'acide caprylique, une forte surfusion et une séparation des pics (plusieurs pics apparaissant dans la courbe de température de flux de chaleur du DSC) ont été observés pendant la partie de solidification du cycle, ce qui a été aggravé en abaissant les vitesses de chauffage/refroidissement malgré la grande pureté des échantillons. Un comportement similaire a également été observé pour d'autres MCP organiques étudiés. Il a été rapporté qu'un tel comportement à plusieurs pics provoque une différence significative entre la fusion et la solidification, ce qui rend les courbes h(T) pour les processus inverses non identiques.

Quant aux transitions de phase incomplètes, Li et al. (2016) ont étudié un MCP micro-encapsulé au cours de trois cycles suivants. Il a été rapporté que le comportement du MCP dans un cycle était différent de celui des autres cycles comme indiqué sur la figure 2.3 avec deux cas de solidification partielle. De plus, l'asymétrie de changement de phase observée était plus prononcée qu'avec transition de phase complète. Pour les cycles avec le changement de phase incomplet, les courbes DSC ne coïncidaient plus avec celles des cycles complets (traits pleins), comme le montre la figure 2.3. Les auteurs ont également souligné que bien que les résultats DSC devenaient presque identiques pour un chauffage/refroidissement à des vitesses suffisamment faibles, il n'est pas raisonnable de supposer que ce sont les "réelles" dans des applications pratiques avec des taux beaucoup plus élevés. Une conclusion similaire s'applique également aux processus avec des cycles de changement de phase incomplets, car ils sont certainement courants dans la pratique, en particulier pour les MCP intégrés dans des structures de bâtiment. Dans la modélisation numérique de systèmes incorporant des MCP, cependant, ces problèmes n'ont pas reçu suffisamment d'attention et n'ont pas été fréquemment pris en considération. Comme l'ont démontré les auteurs, ces problèmes peuvent en particulier influencer la plage de température de fonctionnement des systèmes équipés de MCP, ce qui peut conduire à de grandes erreurs de simulation dans certains cas.



Figure 2.3 Résultats expérimentaux obtenus dans les tests DSC d'un PCM micro-encapsulé sous cycle complet et solidification incomplète: (a) premier cycle de test DSC, (b) troisième cycle de test DSC. (Li et al., 2016)

Dans une autre étude, l'effet de l'utilisation de différentes méthodes d'essai sur la capacité thermique et l'enthalpie des matériaux à changement de phase a été évalué en menant plusieurs études expérimentales utilisant un bio-MCP dans une chambre à double température et au moyen d'une

cellule d'essai à grande échelle (Delcroix et al., 2015(a)). Une méthode employant un solveur d'optimisation génétique a ensuite été proposée et utilisée pour la détermination inverse de la capacité thermique et de l'enthalpie en fonction de la température. Des processus complets de fusion et de solidification ont été envisagés. Les résultats d'optimisation ont montré que l'hystérésis du changement de phase est fonction du taux de transfert de chaleur, car plus le taux de transfert de chaleur est élevé, plus l'hystérésis en termes de changement de température entre les courbes h(T)pour le chauffage et le refroidissement est important. En revanche, les auteurs ont noté que pour le MCP incorporé dans les structures du bâtiment, les résultats obtenus par DSC et T-history ne semblaient pas être directement applicables et nécessitaient un traitement supplémentaire. En outre, après un examen approfondis de plusieurs résultats de travaux expérimentaux liés à la caractérisation thermique des MCP, (Mehling et al., 2017) ont indiqué que les vitesses de chauffage/refroidissement affectent de manière significative les résultats expérimentaux des courbes h(T). Où il a été conclu que l'hystérésis de changement de phase semble être dans une large mesure causée artificiellement par les vitesses appliquées, plutôt que d'être une propriété du matériau. En général, une diminution des taux de transfert de chaleur conduit à une diminution apparente de l'hystérésis. Cependant, les données expérimentales de différents matériaux indiquent la présence de l'hystérésis à changement de phase même à des vitesses de chauffage/refroidissement très faibles. D'autre part, les auteurs ont également souligné que la surfusion ne devrait pas être entièrement considérée comme une propriété de MCP, car elle dépend également des impuretés et des parois des conteneurs. Par conséquent, la température de nucléation caractérisant la surfusion doit être fournie en tant que paramètre distinct reflétant une application particulière.

3. Etudes de modélisation de l'hystérésis des MCP

Différentes études simulant le comportement thermique des matériaux à changement de phase qui prennent en compte la modélisation mathématique de l'hystérésis dans les MCP, diffèrent selon le degré de complexité et se divisent à leur tour en deux types principaux: (Klimeš et al., 2020)

1 - Etudes portant sur la modélisation et la simulation de l'hystérésis du changement de phase dans les MCP qui subissent un changement de phase complet. Cela signifie que les changements transitoires consistent en des transitions de phase complètes du solide au liquide et vice versa, et le gradient de température dans le MCP reste continuellement positif ou négatif, respectivement, jusqu'à ce que la transformation soit complète. La modélisation numérique de telles situations n'est pas un problème particulièrement difficile.

2- Etudes portant sur la modélisation et la simulation de l'hystérésis du changement de phase dans les MCP qui subissent un changement de phase incomplet. Ce type d'étude simule de manière plus réaliste les applications pratiques des MCP dans les enveloppes de bâtiments. Mais la modélisation mathématique du comportement thermique des matériaux dans ce cas est beaucoup plus difficile, car elle nécessite une détermination précise du trajet dans la zone h(T) de la partie de refroidissement du processus. La congélation s'arrête en tenant compte de la surfusion puis du chauffage (décongélation) ce qui rend le problème encore plus difficile.

Cette partie passe en revue une partie de la littérature basé sur le travail de Klimeš et al. (2020) traitant de l'étude de la simulation et de la modélisation de l'hystérésis du changement de phase à l'aide des deux méthodes.

3.1. Hystérésis de changement de phase avec des cycles complets

Une étude expérimentale basée sur l'analyse DSC pour obtenir des courbes h (*T*) d'un MCP micro-encapsulé. Un modèle numérique développé et résolu par Kuznik et Virgone (2009), basé sur la méthode de la capacité thermique effective utilisant la méthode des différences finies implicites. Pour capturer l'hystérésis, la capacité thermique effective de la fusion ou de la solidification a été utilisée pour la fusion ponctuelle, la solidification ponctuelle ainsi que la masse fondue ultérieure suivie de la solidification. Les résultats démontrent que la capacité thermique effective obtenue à partir de la fusion (ou de la solidification) ne peut pas prédire avec précision les données de température expérimentales pendant la fusion (ou la solidification), respectivement. De plus, pour une fusion et une solidification successives, aucune des capacités thermiques effectives ne peut prédire avec précision le profil de température. Par conséquent, les auteurs rapportent que l'hystérésis doit être prise en compte dans la modélisation numérique du changement de phase.

Dolado et al. (2011) ont mené d'une étude expérimentale d'un échangeur de chaleur à air avec des plaques CSM contenant d'un MCP à base paraffinique. Une série de cycles complets de chauffage et de refroidissement ont été effectués pour analyser le comportement thermique de l'unité de stockage pour différentes températures d'air d'entrée et différents débits d'air. Les données acquises expérimentalement ont été utilisées pour le développement d'un modèle empirique des courbes h-T. Les résultats ont démontré que l'hystérésis était évidente dans le comportement thermique des MCP incorporés dans l'unité de stockage thermique, car le modèle expérimental est applicable aux cas qui contiennent des cycles de transition complets uniquement. D'autre part, dans le cas de changements de phase partiels, les auteurs suggèrent l'utilisation de la technique de transition proposée par (Bony et Citherlet, 2007). Dans le cas de changements de phase partiels, les auteurs suggèrent l'utilisation de la technique de transition proposée par Bony et Citherlet, (2007). Simultanément, Dolado et al. (2011) ont rapporté un modèle numérique de l'unité de stockage de chaleur à air-MCP, qui tenait compte de l'hystérésis de changement de phase. L'utilisation de deux courbes h (T) déterminées expérimentalement avec la méthode de transition proposée par Bony et Citherlet, (2007) a été adoptée dans leur modèle. Le modèle a été validé au moyen de données expérimentales. Un bon accord entre le modèle et les données expérimentales a été signalé. Cependant, seuls les cas avec des processus complets de fusion et de solidification du MCP intégrés dans l'unité de stockage de chaleur ont été analysés dans le travail, ce qui ne permet pas d'évaluer la modélisation de l'hystérésis à changement de phase dans le cas partiels.

Moreles et al. (2018) ont étudié numériquement l'influence de l'hystérésis à changement de phase sur le comportement thermique et les performances d'un mur contenant un bio-MCP macroencapsulé. L'hystérésis du changement de phase a été prise en compte au moyen de deux courbes h(T). La courbe de fusion a été définie à l'aide des paramètres de MCP fournis par son fabricant. La courbe de solidification a été déterminée lorsque la courbe de fusion se déplaçait par rapport à la température. Dans cette investigation, seuls les cycles complets de fusion à solidification ont été considérés. Les résultats de la simulation ont démontré que l'hystérésis à changement de phase avait une influence positive sur les performances thermiques de la paroi intégrant le MCP. Autrement dit, plus l'hystérésis est importante, les performances thermiques du mur serons meilleurs. Les auteurs ont signalé que la performance thermique maximale était atteinte lorsque des processus complets de fusion et de solidification se déroulaient en dehors de la plage de températures de la zone de confort thermique considérée.

3.2. Hystérésis de changement de phase avec des cycles partiels

Dans une étude numérique du comportement thermique des MCP, Bony et Citherlet, (2007) ont suggéré une méthode intelligente pour simuler l'hystérésis du changement de phase. La méthode d'enthalpie a été utilisée pour la modélisation de changement de phase, la technique a été définie en termes de relation de deux courbes h (T) liées linéairement avec le décalage de température de ΔT , qui commence avec le début du changement de phase (fusion/solidification) ont été définies comme le montre la figure 2.4(a). Pour mieux déterminer le concept, en dehors de la plage de température de changement de phase, les deux courbes h(T) sont identiques. Dans le cas de la fusion à partir de l'état solide au point 1, le processus suit une courbe de fusion et un trajet de 1-m. Lorsque la fusion cesse pendant la transition de phase vers l'état m et le début du processus inverse (refroidissement), le processus suit d'abord le chemin de transition m - s, qui a une pente comme les courbes h(T). Une fois la transition de la courbe de fusion à la courbe de solidification (dans l'état s) terminée, le processus de trempe suit la courbe de solidification et le chemin s - 1, qui ramène le matériau à son état initial au point 1. Cela signifie que la fusion avec les deux états initiaux et finaux au point 1 suit le chemin 1 - m - s - 1. De même, dans le cas du processus de solidification suivant s - 2, le chemin s'arrête à l'état s et le processus inverse (chauffage) commence, et la transition suit d'abord le chemin s - m. Une fois que l'état m de la courbe de fusion est atteint, la fusion se poursuit le long du chemin m - 2 jusqu'à l'état initial au point 2. Lors de la solidification partielle avec les états initiaux et finaux au point 2a, il suit le chemin 2 - s - m - 2.

La méthode a été formulée à l'origine en termes de relations h(T) mais il est également intéressant d'analyser le chemin des transitions de phase incomplètes (et en particulier le processus m - s) en termes de dépendance C(T), comme illustré sur la figure 2.4(b). Lors du passage de la fusion à la solidification dans un cycle de changement de phase partiel, en suivant le chemin 1 - m - s - 1. Bien que le chemin suivi par le processus soit continu en termes d'enthalpie illustré à la figure 2.4(a), une discontinuité de la capacité thermique apparaît aux états de transition m et s, comme le montre la figure 2.4(b). La raison d'un tel comportement est un changement soudain de $(\partial h / \partial T)$ au voisinage des états m et s, qui est lié à la capacité calorifique comme $C = (1 / \rho) (\partial h / \partial T)$. En conséquence, la capacité calorifique diminue et augmente instantanément (et de manière isotherme) aux états m et s, respectivement. La capacité thermique dans la transition de m à s est égale à la capacité thermique en dehors de l'intervalle de température de changement de phase, comme indiqué par la ligne en pointillés entre les points m et s sur la figure 2.4(b).

En outre, Bony et Citherlet, (2007) ont également proposé une solution pour considérer le problème de surfusion dans la simulation numérique, ce qui est démontré sur la figure 2.5(a). Le processus de solidification à partir de l'état liquide au point 1 suit la courbe de solidification h(T) et le trajet 1–2. Dans l'état 2, le changement de phase est initialisé. Si les conditions nécessaires à l'apparition d'une surfusion ne sont pas satisfaites, le processus de solidification suit simplement la courbe de

solidification. Cependant, si les conditions de surfusion sont remplies, la solidification à l'état 2 avec la température de solidification T_s ne suit plus la courbe de solidification. Au lieu de cela, la surfusion entraîne la poursuite du processus le long du chemin 2-3, qui est une extension linéaire du chemin 1–2 ayant la même pente. Lors de la surfusion (la différence de température ΔT_{SC} entre les états 2 et 3) atteint une valeur définie, le processus continue de l'état 3 dans un processus isenthalpique à l'état 4, qui se trouve à nouveau sur la courbe de solidification. Une fois l'état 4 atteint, le processus de solidification suit alors la courbe de solidification régulière et le chemin 4–5. Les auteurs ont souligné que la transition isenthalpique 3-4 était supposée se produire instantanément dans leur modèle (entre deux pas de temps consécutifs), bien qu'elle nécessite une certaine période de temps en pratique comme le démontrent leurs résultats expérimentaux. Dans le cas de la fusion à partir de l'état 5, le processus suit la courbe de fusion régulière, sans influence de la surfusion et sans considération de l'état de surfusion 3. La figure 2.5(b) montre comment le traitement proposé avec surfusion se comporte en termes de capacité thermique. Similaire au changement de phase partiel, il y a une discontinuité de la capacité thermique entre les états 3 et 4. La transition isenthalpique 3-4, représentée sur la figure 2.5(a), est en fait équivalent à la transition 3–4 de la figure 2.5(b) avec une capacité thermique nulle comme $C = (1 / \rho) (\partial h / \partial T)$. Il en résulte une baisse et une augmentation instantanées (isothermes) de la capacité thermique entre les points 3-3 et 4–4, respectivement.



Figure 2.4 Modélisation de l'hystérésis à changement de phase dans la transition de phase partiel selon (Bony et Citherlet, 2007).



Figure 2.5 Modélisation de la surfusion proposée par (Bony et Citherlet, 2007).

Le comportement thermique d'un mur en deux contreplaqués, comprend des poches de MCP macroencapsulées au milieu a été étudié expérimentalement et numériquement par (Delcroix et al., 2015(b)). Deux modèles numériques unidimensionnels ont été utilisés pour étudier l'effet de l'hystérésis de changement de phase. L'un est basé sur le même modèle proposé par Bony et Citherlet, (2007) avec une courbe h(T) avec une transition inégale entre eux. L'autre modèle n'utilisait qu'une seule courbe h(T) pour la fusion et la solidification. Il convient de souligner que les auteurs ont considéré les courbes h (T) comme linéaires par morceaux, comme le montre la figure 2.6. Cela signifie que chaque courbe h(T) se composait de trois parties linéaires pour la phase solide, le changement de phase et la phase liquide. Les résultats de simulation ont été comparé avec les résultats d'une data expérimentale, et il a été conclu que l'hystérésis du changement de phase avait une influence significative, qui ne devrait pas être négligée avec l'utilisation d'une seule courbe h (T). En plus, les auteurs ont en outre signalé que les résultats de simulation obtenus avec l'utilisation de la méthode proposée par Bony et Citherlet, (2007) étaient en bon accord avec les données expérimentales pour le cas de la transition solidification-fusion. Cependant, dans le cas de la transition de fusion à solidification, un écart significatif entre le modèle et l'expérience a été observé. Pour cette raison, une procédure d'optimisation a été proposée pour déterminer les courbes h(T)optimales sous forme linéaires, pour la transition de phase, ce qui minimiserait l'écart entre la simulation et l'expérience, comme le montre la figure 2.6(a). Le meilleur accord avec les résultats expérimentaux était obtenu avec la courbe h(T) située quelque part entre les courbes h(T) pour une fusion complète et une solidification complète. La figure 2.6(b) indique alors que dans le cas de la transition de solidification à fusion, la courbe h(T) optimale est très proche de celle pour une fusion complète, c'est-à-dire du procédé proposé par Bony et Citherlet, (2007). Les résultats ont également montré que dans le cas du procédé de fusion à solidification, le meilleur accord était obtenu pour la pente de transition de phase (chemin m - s) non identique à celle correspondant aux courbes h(T) en dehors de l'écart de température du changement de phase.



Figure 2.6 Schéma de la MAP optimale de la transition de phase en termes de courbes h(T) présenté par (Delcroix et al., 2015(b)).

Finalement, parmi les études numériques les plus intéressantes, Barz et Sommer, (2018) ont modélisé la phénoménologie de l'hystérésis du changement de phase dans les MCP d'une manière plus détaillée que les études numériques précédentes, où l'hystérésis était implicitement formulé dans les équations plutôt que le basculement explicite entre les courbes de fusion et de solidification. La

modélisation du MCP a été formulé en fonction de la fraction liquide $\xi \in \{0, 1\}$, qui est liée à la fraction solide comme $\xi = l f_s$. La fraction liquide a été utilisée comme paramètre décrivant l'état du MCP, et les auteurs se sont appuyés dans l'étude sur quatre méthodes: un modèle de cartographie directe statique (Static Direct Mapping Model: SDMM), un modèle d'hystérésis statique (SHM), un modèle cinétique de fusion/solidification (MSKM), et un modèle cinétique de solidification (SKM). Le terme «statique» dans le cas de SDMM et SHM indique que la fraction liquide était indépendante du taux de transfert de chaleur et était supposée fonction de la température comme $\xi = f(T)$ (SDMM), et une fonction de la température et du signe de gradient de température dans le temps (mais pas son ampleur) comme $\xi = f(T, sgn(\partial T/\partial t))$ (SHM). D'autre part, le MSKM et le SKM représentaient des modèles dynamiques, ce qui signifie que la fraction liquide dépendait de la température ainsi que du gradient de température dans le temps comme $\xi = f(T, \partial T/\partial t)$. Comme pour le SDMM, la distribution de densité de Weibull a été utilisée pour définir la relation entre la fraction liquide et la température. Étant donné que la fraction liquide ne dépendait que de la température, le SDMM ne pouvait pratiquement pas simuler l'hystérésis de changement de phase dans le sens commun car une seule cartographie (MAP) entre la température et la fraction liquide était utilisée. En termes de relation h(T), cette approche correspond à la modélisation avec une seule courbe h(T) sans hystérésis. Dans le cas de SHK, les informations sur le sens du processus (augmentation/diminution de la température) via sgn $(\partial T/\partial t)$ ont été prises en compte à travers des fonctions de transition, qui sont liées aux courbes h(T) pour une fusion complète et une solidification complète. Les fonctions de transition proposées par (Ivshin et Pence, 1994) ont été adoptées et discutées. Comme le montre la figure 2.7(b), les résultats obtenus en utilisant cette approche sont très similaires à ceux de (Bony et Citherlet, 2007) et (Delcroix et al., 2015(b)). Le MSKM et le SKM dépendant de la vitesse dynamique ont été définis au moyen des fonctions de vitesse et de réaction, ce qui les rend plus compliqués que dans le cas des modèles statiques. Leur principal inconvénient est qu'il existe divers modèles macro-cinétiques alternatifs comprenant un nombre relativement important de paramètres, difficiles à identifier. Les auteurs ont rapporté que ces paramètres sont généralement déterminés indirectement en ajustant des modèles macro-cinétiques dans des données expérimentales. Dans la méthode MKSM, Il a été supposé que les processus de fusion et de solidification dépendaient de la vitesse et étaient entraînés par des mécanismes cinétiques. D'autre part, le SKM a adopté des mécanismes cinétiques uniquement pour la solidification, et la fusion a été considérée comme indépendante de la vitesse et ne dépend à la cinétique.

Barz et Sommer, (2018) ont adopté une formulation de type 'Arrhenuis' de la fonction de vitesse et de la fonction de réaction d'Avrami-Erofeev pour le MSKM. Alors que la même fonction de vitesse suggérée par (Kousksou et al., 2012) a été utilisée pour SKM. La figure 2.7 montre le comportement des quatre modèles pour un processus avec un changement de phase complet (solide-liquide solide) suivi d'un changement de phase incomplet. Les couleurs rouge et bleu indiquent respectivement le chauffage et le refroidissement, T est la température et t est le temps. Le SDMM, représenté sur la figure 2.7(a), correspond à la modélisation avec une seule courbe h (T) sans tenir compte de l'hystérésis de changement de phase. Le comportement de SHM, présenté sur la figure 2.7(b), semble être assez similaire au comportement proposé et étudié par (Bony et Citherlet, 2007) et (Delcroix et al., 2015(b)). Le comportement du MSKM, illustré sur la figure 2.7(c), est en quelque sorte similaire à celui du SHK. Une différence peut être observée pour la période de temps de $t \in [12, 15 min]$, dans laquelle la température du MCP est constante. Contrairement au SHM, la

fraction liquide du MSKM ne devient pas immédiatement constante et a besoin d'un certain temps pour se rapprocher de l'équilibre en raison de sa dépendance nominale. Le comportement du SKM, indiqué sur la figure 2.7(d), est assez différent des autres modèles, et il indique clairement une surfusion, similaire à celle décrite par Bony et Citherlet, (2007).



Figure 2.7 Comparaison du comportement des modèles indépendants et dépendant de la vitesse pour la modélisation de l'hystérésis à changement de phase rapportée par (Barz et Sommer, 2018).

De plus, et à travers cette étude, les résultats de simulation d'une unité de stockage thermique avec des matériaux à changement de phase utilisant les quatre modèles ont été comparés aux résultats de données expérimentales. Les modèles indépendants du débit (SDMM et SHM) ont été paramétrés à l'aide des données du DSC, tandis que les modèles dépendant du débit (MSKM et SKM) ont été ajustés aux données expérimentales au moyen de la régression non linéaire. Où les résultats ont montré que l'adoption du modèle SDMM conduit à des écarts clairs entre la simulation et l'expérience, tandis que l'adoption de la méthode SHM est encore mieux en termes de validation expérimentale. En outre, les résultats de simulation ont indiqué que les modèles dépendant du taux de chauffage/refroidissement ont fourni une concordance encore meilleure avec les données expérimentales que dans le cas du SHM. D'autre part, les auteurs ont conclu que les modèles indépendants du taux sont directement applicables et peuvent être paramétrés au moyen de données DSC. D'un autre côté, ils négligent la vitesse du changement de température, ce qui pourrait être un problème dans les cas où le processus de changement de phase est considérablement influencé par la vitesse de température. Les modèles dépendant de la vitesse sont capables de faire face à l'hystérésis ainsi qu'à la surfusion (en particulier l'augmentation de la température pendant la surfusion) mais leur paramétrage est lourd et nécessite des données acquises expérimentalement. Les auteurs ont conclu que le SHM semble être, parmi les quatre modèles considérés, un bon compromis pour des applications pratiques.

4. Etude de cas: Modélisation mathématique et simulation numérique d'un mur contenant d'une couche MCP prise en compte du phénomène d'hystérésis

4.1 Description du problème physique

La modélisation permettra de créer une représentation simplifiée d'un problème que l'on est généralement considéré comme un modèle. Ce modèle simulera les phénomènes physiques impliqués et transcrites sous forme mathématique ou physique pour prédire les contraintes particulières d'une situation donnée. On outre, peu des travaux de simulation numérique considèrent le phénomène d'hystérésis des MCP dans la littérature.

En effet l'étude de la modélisation, prenant en compte ce phénomène, rend l'évaluation des performances des MCP plus objective et fiable dans les études de simulation. Il permet également une meilleure compréhension des phénomènes entourant les exploits de ces matériaux, et il permet plus d'efficacité lors de l'application (Sarri et al., 2019(a)). Par conséquent, le principal objectif de ce chapitre est de fournir une méthode de simulation avec l'environnement Matlab/Simulink pour les différents phénomènes physiques impliqués dans la modélisation thermique du bâtiment pour adapter son comportement énergétique, en tenant compte des conditions environnementales, à travers les étapes suivantes:

- Discussion sur la méthode numérique utilisée pour modéliser le comportement thermique du MCP;

- Etude de l'évolution de la température à travers une paroi complexe contenant une couche MCP en couplant les modèles conduction, convection et radiation; où l'hystérésis est prise en compte dans la modélisation de MCP.

- Validation du modèle utilisant le programme de la simulation dynamique EnergyPlus Software.



Figure 2.8 Paroi complexe contenant d'une couche de MCP.

La figure 2.8 montre le problème physique traité dans le processus de modélisation, la structure considérée dans l'étude est un mur de bâtiment constitué d'une couche de béton d'une épaisseur de 0.15 m, recouverte d'une fine couche de MCP d'une épaisseur de 0.02 m sur la face interne, où le tableau 1 passe en revue les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans la simulation. Il convient de noter que la température intérieure était considérée constante égale à 24°C, Il en va de même pour les coefficients de convection interne et externe, estimée respectivement à 3.079 et 11 $W/m^2 K$. Quant aux autres facteurs liés aux conditions météorologiques tels que le rayonnement solaire, la température du ciel, sa clarté, etc., pour établir les conditions aux limites sur la face extérieure, ils sont implicitement calculés dans l'algorithme selon les formules de la littérature, que Saleh Al-Saadi a évoquées en détail (Al-Saadi, 2014). C'est ce qui rend les résultats de l'étude très utiles pour les applications pratiques réalistes des MCP dans les structures des bâtiments.

Nom de matériau	Béton	МСР	
Conductivité thermique (W/m K)	0.7330	0.7264	
Densité (kg/m ³)	2315	1601.85	
Chaleur spécifique (J/kg K)	800	836.86	
Chaleur latente de processus total de phase (J/kg)	-	13740	
Température de fusion (°C)	-	22 (ou 20 en cas de solidification)	

Tableau 2.1 Propriétés thermo-physique de béton et MCP.

4.2 Approches numériques des phénomènes de solidification et de fusion des MCP

4.2.1 Modélisation des matériaux à changement de phase

Dans la littérature, deux grandes classes de méthodes sont confrontées pour étudier numériquement les phénomènes de changement de phase: (AL-Saadi et Zhiqiang, 2013)

A. Méthode à suivi de l'interface

Cela correspond en particulier aux méthodes à maillage mobile et fixe. Le principe de la méthode à maillage mobile est que le pas de temps est fixe et on réitère sur le pas d'espace de sorte que l'interface de changement de phase coïncide toujours avec un nœud du maillage au cours du temps. En utilisant une méthode à maillage fixe, le principe repose cette fois ci sur le fait que le pas d'espace reste fixe et seul le pas de temps est recalculé à chaque itération pour que la frontière de changement de phase puisse se déplacer de nœud en nœud pour chaque pas de temps recalculé. La mise en œuvre de ces méthodes est très complexe et très lourde. En effet, les équations de transfert de chaleur doivent être discrétisées dans chacune des phases et elles sont liées par la discrétisation de l'équation du bilan d'énergie à l'interface solide-liquide. L'une des méthodes la plus connue est la méthode de Landau qui consiste à immobiliser l'interface en utilisant une transformation de coordonnées. Cette méthode conduit à la résolution d'un système d'équations non linéaires de type transport-diffusion.

B. La non connaissance de la position de l'interface.

Les méthodes les plus connues pour ce type de solutions sont la méthode de la capacité thermique apparente C_{app} et la méthode enthalpique. Les principes de ces méthodes reposent sur le fait que le pas d'espace est considéré comme constant au cours du temps et le front de changement de phase peut se déplacer à l'intérieur du maillage. Cependant, des instabilités numériques peuvent être provoquées par la discontinuité des gradients de température (non-linéarités) dans la zone de changement de phase. Si tel est le cas, une connaissance approchée de la position de l'interface est requise pour corriger le pas de temps afin de minimiser ces instabilités numériques. L'intérêt de ces méthodes est leur facilité de mise en œuvre car le système d'équation est réduit à une équation classique du transfert de chaleur par conduction. Également, elles sont applicable quelques soit le type de mélange, pur ou homogène.

Dans le cadre de ce présent travaille la méthode choisi est la méthode enthalpique, car cette méthode est simple, dans laquelle résulte du fait qu'elle permet de déterminer le champ de température sans avoir recours à la connaissance de la progression du front de solidification dans le temps. Elle permet ainsi de résoudre des problèmes de changement de phase lorsqu'il y a existence d'une zone pâteuse. Plus que ça, elle a été l'objet de l'étude approfondie pour de nombreux auteurs. Cela fournit des références fortes pour une meilleure compréhension de cette méthode, il est à noter que c'est aussi la même méthode qui a été adoptée par Al-Saadi, (2014) dans le programme MATLAB dont dépend la simulation dans l'étude actuelle.

4.2.2 Formulation mathématique

Dans la méthode d'enthalpie, la chaleur latente et spécifique sont combinées en un terme d'enthalpie dans l'équation directrice. La méthode d'enthalpie a été proposée par (Eyres et al., 1946) pour faire face aux variations des propriétés thermiques par rapport à la température. Pour le transfert de chaleur dominé par conduction, les équations régissantes (2.1: 3) peuvent être reformulées en une équation où la chaleur latente est absorbée dans le terme d'enthalpie comme suit:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right).$$
 (2.1)

Pour démontrer cette méthode, une approximation totalement implicite du volume de contrôle de l'équation (2.1) pour une grille typique illustrée à la figure 2.9 conduit à l'équation discrétisée suivante:

$$h_p^{n+1} = h_p^n + a_w^{n+1} \times T_w^{n+1} + a_p^{n+1} \times T_p^{n+1} + a_e^{n+1} \times T_e^{n+1}....(2.2)$$



Figure 2.9 Grille de volume de contrôle typique.

Selon l'équation (2.2), il est clair que l'enthalpie actuelle (h_p^{n+1}) dépend de la valeur actuelle de la température (T_p^{n+1}) et donc le terme d'enthalpie est non linéaire. L'équation ne peut pas être résolue sans utiliser des techniques numériques appropriées pour gérer cette non-linéarité. Cela doit être résolu soit par des solveurs non linéaires tels que la méthode de Newton, soit en linéarisant les termes non linéaires et en utilisant des méthodes itératives comme expliqué en détail par (Shamsundar et Sparrow, 1975; Furzeland, 1980; Alexiades et Solomon, 1993; Swaminathan et Voller, 1993; Knoll et Keyes, 2004). Si un solveur non linéaire est sélectionné, une fonction auxiliaire de température-enthalpie est requise pour l'équation (2.3) et peut être écrite pour les matériaux qui changent de phase à une plage de température spécifique comme suit: (Voller, 1997)

$$T_{p} = \begin{cases} \frac{h_{p}}{C_{s}} \dots h_{p} \leq C_{s} \times (T_{m} - \varepsilon) \\ \frac{h_{p} + \left[\frac{C_{l} - C_{s}}{2} + \frac{L}{2 \times \varepsilon}\right] \times (T_{m} - \varepsilon)}{\left[\frac{C_{l} - C_{s}}{2} + \frac{L}{2 \times \varepsilon}\right]} \dots C_{s} \times (T_{m} - \varepsilon) < h_{p} < C_{l} \times (T_{m} + \varepsilon) + L \dots (2.3) \\ \frac{h_{p} - (C_{s} - C_{l}) \times T_{m} - L}{C_{l}} \dots h_{p} \geq C_{l} \times (T_{m} + \varepsilon) + L \end{cases}$$

r

Alexiades et Solomon, (1993) ont décrit les schémas numériques pour résoudre les problèmes de changement de phase avec la méthode d'enthalpie en utilisant des approches linéaires et non linéaires. Knoll et Keyes, (2004), d'autre part, a passé en revue diverses approches utilisant des solveurs non linéaires pour résoudre le problème de Stefan. Ils ont en particulier développé un algorithme pour résoudre le problème de Stefan en utilisant la méthode *Jacobian-free Newton-Krylove* (Knoll et Keyes, 2004), et appliqué pour deux scénarios: (1) les matériaux purs où la fusion se produit à température isotherme et (2) le cas non isotherme où le changement de phase se produit à une plage de température de fusion.

Une approche alternative pour résoudre l'équation discrétisée (2-2) consiste à linéariser le terme non linéaire $h_p^{n+1}(T)$, en utilisant les méthodes expliquées par (Patankar, 1980). L'équation non linéaire discrétisée devient linéaire avec une variable dépendante primaire «température» qui peut être résolu

de manière itérative par enthalpie en utilisant des solveurs linéaires courants tels que des méthodes directes (par exemple, élimination de Gauss ou algorithme tri-diagonal) ou des méthodes itératives (par exemple, méthode de Gauss-Seidel). Par exemple, Shamsundar et Sparrow, (1975) ont proposé un schéma itératif de Gauss-Seidel où la solution balaye d'ouest en est pour déterminer l'état du changement de phase et ensuite déterminer la nouvelle enthalpie nodale. Les températures nodales sont ensuite déterminées sur la base de la forme discrète de la relation enthalpie-température. Pour éviter des itérations excessives, le schéma a ensuite été amélioré en introduisant un paramètre de sur-relaxation qui est utilisé aux nœuds où aucun changement de phase ne se produit (Shamsundar et Rooz, 1988). Le schéma était cependant destiné à un changement de phase qui se produit à température isotherme. Furzeland, (1980) a introduit un schéma de linéarisation itératif de Newton. Le processus de solution est le même que celui de Shamsundar et Sparrow, (1975), sauf que le paramètre de sur-relaxation peut être appliqué à tous les nœuds.

Les méthodes itératives telles que Gauss-Seidel sont intrinsèquement lentes et inefficaces sur le plan des calculs. Par conséquent, des schémas numériques rapides ont été introduits pour améliorer l'efficacité de calcul (Pham, 1985; Voller, 1990; Swaminathan et Voller, 1993). Pham, (1985) a proposé une méthode qui combine les caractéristiques des méthodes d'enthalpie et de capacité thermique. La méthode comprend deux étapes: une étape de prédiction suivie d'une étape de correction comme illustré à la figure 2.10. Basé sur des valeurs devinées, le nouveau nodal les températures sont prévues (point (2) sur le graphique). L'enthalpie est déterminée sur la base des valeurs de température prévues. Les températures prévues sont ensuite corrigées pour être cohérente avec la courbe enthalpie-température (point (3) sur le graphique). Cette étape de correction de température est la clé de cette méthode. Cette méthode est connue plus tard comme la méthode de «quasi-enthalpie» (Pham, 2006). Voller, (1997) a souligné que cette méthode pourrait ne pas conserver l'énergie à chaque pas de temps, et un meilleur schéma itératif conservateur a été proposé par Swaminathan et Voller, (1993) comme illustré dans la figure 2.11. La méthode réitère les valeurs intermédiaires prévues et corrigées jusqu'à ce que la convergence soit atteinte. La méthode a récemment été étudiée comme une alternative pour surmonter les limites de l'algorithme de simulation MCP implémenté dans ESP-r (Sadasivam et al., 2011).



Figure 2.10 Schéma correctif non itératif dans la méthode de quasi-enthalpie à un nœud pendant un pas de temps. (Al-Saadi, 2014)



Figure 2.11 Schéma itératif correctif dans la méthode Enthalpie à un nœud pendant un pas de temps. (Al-Saadi, 2014)

4.3 Hypothèses générales et description du modèle numérique

Les modèles et schémas numériques considérés dans le cadre de cette étude sont basés sur des hypothèses. La majorité des programmes de simulation de construction sont basés sur un modèle de transfert de chaleur unidimensionnel et donc la même chose est supposée dans ce travail. Un pas de temps totalement implicite. Le schéma est utilisé pour tous les modèles car il est plus stable quel que soit le pas de temps. La discrétisation spatiale est basée sur la méthode des volumes finis et la moyenne harmonique suggérée par Patankar, (1980) pour la conductivité des matériaux est utilisée. Les points de grille typiques d'un système de couches de murs utilisant la méthode des volumes finis sont illustrés à la figure 2.12.



Figure 2.12 Emplacement des points de grille pour les modèles numériques utilisant la méthode des volumes finis: (a) des points de grille pour un système de couches de murs comprenant des nœuds internes et des nœuds de limite, (b) points de grille typiques pour la couche intermédiaire.

Soulignant que la convergence est déclarée en utilisant la relation suivante: $Erreur = \left| \frac{\sum (T - T_{new})}{\sum (T_{new})} \right|$

Où T est le vecteur de température des nœuds de l'itération précédente et T_{new} est les nouveaux résultats. Notant que cette relation de convergence est adoptée à partir de l'algorithme de solution de différence finie de conduction EnergyPlus qui s'est avéré satisfaisant pour la méthode de capacité thermique.

En utilisant la figure 2.12(b), une approximation totalement implicite du volume de contrôle est utilisée. Par conséquent, pour les nœuds internes, l'équation (2.1) peut être discrétisée comme suit:

$$\rho \frac{h_{p}^{n+1} - h_{p}^{n}}{\Delta t} = k_{w} \frac{T_{w}^{n+1} - T_{p}^{n+1}}{\Delta X \times \delta X_{w}} + k_{e} \frac{T_{e}^{n+1} - T_{p}^{n+1}}{\Delta X \times \delta X_{e}}.....(2.4)$$

Avec :

n: indiquer un pas de temps, w: nœud ouest, p: nœud point, e: nœud est. En rassemblant les termes et en les réorganisant, l'équation (2.4) devient:

$$h_p^{n+1} = h_p^n + a_w \times T_w^{n+1} + a_p \times T_p^{n+1} + a_e \times T_e^{n+1}.$$
(2.5)

Avec:

$$a_{w} = \frac{k_{w} \times \Delta t}{\rho \times \Delta X \times \delta X_{w}}, a_{e} = \frac{k_{e} \times \Delta t}{\rho \times \Delta X \times \delta X_{e}}, a_{p} = -(a_{w} + a_{e})$$

L'équation discrétisée (équation (2.5)) est non linéaire car h_p^{n+1} et T^{n+1} sont inconnus à ce pas de temps. Par conséquent, la technique de linéarisation est utilisée pour résoudre l'équation en utilisant les techniques proposées par Patankar, (1980). Le terme h_p^{n+1} peut être développé en utilisant l'approximation du premier ordre de la série Taylor:

$$h_p^{n+1} = h_p^n + C(T)^{n+1,m} \times \left(T_p^{n+1} - T_p^n\right).$$
(2.6)

Au début de la simulation, les champs de température sont basés sur des valeurs approximatives. Par conséquent, C_p (valeurs provisoires qui seront mises à jour au début de l'itération) peut être trouvée en utilisant:

$$C(T) = \begin{cases} C_s \dots T \leq T_m - \varepsilon \\ \frac{C_s + C_l}{2} + \frac{L}{2 \times \varepsilon} \dots T_m - \varepsilon < T < T_m + \varepsilon \dots (2.7) \\ C_l \dots T \geq T_m + \varepsilon \end{cases}$$

Lorsque l'équation (2.6) est remplacée par l'équation (2.5) et après le réarrangement des termes et de collecte, l'équation linéaire discrétisée suivante est dérivée:

Ou

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{w}^{n+1,m} &= -\frac{k_{w} \times \Delta t}{\rho \times \Delta X \times \delta X_{w}}, \ a_{e}^{n+1,m} &= -\frac{k_{e} \times \Delta t}{\rho \times \Delta X \times \delta X_{e}}, \\ a_{p}^{n+1,m} &= \left(C\left(T\right)^{n+1,m} + a_{w}^{n+1,m} + a_{e}^{n+1,m}\right) \\ R^{n+1,m} &= \left(h_{p}^{n} - h_{p}^{n+1,m} + C\left(T\right)^{n+1,m} \times T_{p}^{n+1,m}\right) \end{aligned}$$

L'équation (2-8) discrétisée peut être résolue en utilisant nouveau schéma considèrent l'hystérise du MCP (ICSH-TDMA : Iterative Correction Scheme with PCM Hysteresis using TDMA Solver) comme décrit dans la section 4.4.

4.4 Description de l'algorithme ICSH-TDMA

Les programmes de simulation modélisés dans les deux cas (avec ou sans prise en compte l'hystérésis de changement de phase) fonctionnent suivant la procédure de la méthode d'enthalpie généralisée évoquée précédemment, dans laquelle le schéma de correction itératif développé par Swaminathan et Voller, (1993) a été utilisé, qui peut être écrit dans un format matriciel et à résoudre par un solveur direct. L'équation (2.8) peut alors s'écrire comme suit:

$$[A]^{n+1,m} \times T^{n+1,m+1} = R^{n+1,m}....(2.9)$$

Cette équation peut être résolue pour $T^{n+1, m+1}$ en utilisant l'algorithme de matrice à tri-diagonale (TDMA). Une fois le champ de température déterminé, l'enthalpie du nœud est mise à jour sur la base de l'équation (2.6). À ce moment de répétition, l'enthalpie est connue et par conséquent, le champ de température est corrigé pour être cohérent avec la courbe de performance de température d'enthalpie en utilisant la relation suivante: (Voller, 1997)

$$T_{p} = \begin{cases} \frac{h_{p}}{C_{s}} \dots, h_{p} \leq C_{s} \times (T_{m} - \varepsilon) \\ \frac{h_{p} + \left[\frac{C_{l} - C_{s}}{2} + \frac{L}{2 \times \varepsilon}\right]}{\left[\frac{C_{l} - C_{s}}{2} + \frac{L}{2 \times \varepsilon}\right]} \times (T_{m} - \varepsilon) \dots, C_{s} \times (T_{m} - \varepsilon) < h_{p} < C_{l} \times (T_{m} + \varepsilon) + L \dots (2.10) \\ \frac{h_{p} - (C_{s} - C_{l}) \times T_{m} - L}{C_{l}} \dots, h_{p} \geq C_{l} \times (T_{m} + \varepsilon) + L \end{cases}$$

Le processus d'itération se poursuit dans ce cycle de correction de prédiction jusqu'à ce que le point de convergence soit atteint. Il convient de noter que la prise en compte de l'hystérésis partiel du changement de phase a été adoptée de la même manière que celle proposée par Bony et Citherlet, (2007), car la mise à jour des paramètres dans l'algorithme comme le montre la figure 2.14 (dans l'encadré rouge) se fait selon un nouveau graphique de capacité thermique comme indiqué sur la figure 2.13. L'hystérésis de changement de phase de MCP a été envisagé en utilisant une courbe de capacité thermique en termes de deux points de fusion, 22°C dans le cas de la fusion et 20°C dans le cas de la solidification selon le modèle proposé par Feustel, (1995) (une explication détaillée de cette méthode est fournie au chapitre trois). Après avoir résolu l'équation de transfert de chaleur et calculé l'enthalpie, l'algorithme vérifie les nouvelles valeurs d'enthalpie, où si ($h_{new} \ge h_{old}$) le programme ICSH-TDMA enregistre les mêmes valeurs pour faire l'itération suivante, si ($h_{new} < h_{old}$) l'algorithme ICSH-TDMA corrige les valeurs d'enthalpie en fonction de la courbe de capacité thermique (courbe de solidification). Avant de calculer la température finale et de la stocker dans les données.



Figure 2.13 Les courbes de chaleur spécifiques, C1 (T) état de fusion, C2 (T) état de solidification.

Pour plus de détails concernant les algorithmes de calcul, comme les données météorologiques qui reposent principalement sur le fichier EPW (EnergyPlus Weather file), sont reportés en détail dans (Al-Saadi, 2014), que ce soit en langage Matlab ou Simulink.



Figure 2.14 Algorithme de calcul.

5. Résultats et discussion

Après un travail acharné très apprécié dans la modélisation du comportement thermique des structures bâtiments contenant des matériaux à changement de phase, l'algorithme ICS-TDMA a été validé avec succès par Al-Saadi, (2014), utilisant le programme EnergyPlus v7.0 selon les conditions climatiques de Golden Colorado, USA, similaire à de nombreux modèles numériques qu'il a développés. Dans ce paragraphe, nous revoyons la vérification numérique de l'algorithme ICS-TDMA à l'aide du programme EnergyPlus v8.8 selon les conditions climatiques de Ouargla entre le 2 et le 6 janvier, car cette période correspond au rang de transition de phase de MCP utilisé pour le chauffage thermique passif.

Comme le montre la figure 2.15, les résultats de la simulation utilisant l'algorithme ICS-TDMA se révèlent efficaces pour prédire le profil de température externe et interne dans le mur renforcé avec des matériaux à changement de phase qui atteignent presque la congruence. Les résultats montrent clairement l'effet de l'utilisation de la couche de MCP les journées du 2 et 3 janvier, qui maintiennent la température intérieure de la paroi dans une plage de 22°C (la plage de transition de MCP) pendant une période de plus de 6 heures par jour. Ceci est principalement dû au stockage de l'énergie thermique par chaleur latente, qui est captée par la face extérieure du mur (rayonnement solaire et température de l'air ambiant).



Figure 2.15 Validation numérique de l'algorithme ICS-TDMA.

D'autre part, la figure 2.16 montre la validation numérique à l'aide du programme EnergyPlus v9.0 du modèle amélioré qui prend en compte le phénomène de l'hystérésis partiel du changement de phase de MCP (algorithme ICSH-TDMA). Comme il est indiqué dans la figure 2.16, les résultats montrent le succès de l'algorithme (ICSH-TDMA) dans le calcul des températures de la paroi, ce qui semble au point de correspondre aux résultats de la simulation utilisant le programme EnergyPlus v9.0, sauf pour les premières heures où un léger décalage apparaît principalement résultant des conditions d'initialisation (telles que la température et l'enthalpie initiales) pour exécuter l'algorithme.



Figure 2.16 Validation numérique de l'algorithme ICSH-TDMA.

Les résultats montrent clairement la prise en compte de l'hystérésis de changement de phase sur le comportement thermique de MCP, puisque lorsqu'on compare les résultats entre les figures 2.15 et 2.16, la confusion aléatoire dans le comportement thermique de la couche MCP résultant de l'hystérésis du changement de phase dans la période comprise entre le 2 et le 3 janvier, en particulier le premier jour. Il ressort clairement de la figure 2.16 que le 3 janvier et pendant une période de plus de quatre heures, la température interne de la paroi reste presque constante dans la plage de 20°C (C.à.d., au point de fusion du MCP dans la courbe de solidification), puis le comportement de stockage thermique du matériau change dans le sens de la courbe *h*-*T* de fusion. Ces résultats montrent que ce processus est principalement influencé par les fluctuations climatiques externes.

On peut conclure des résultats que les études de modélisation qui négligent le phénomène de l'hystérésis du changement de phase dans les MCP, similaires à d'autres propriétés thermo-physiques souvent négligées (telles que la convection et la surfusion), et qui ont été couvertes dans la littérature précédente, peuvent influencer considérablement aux résultats de simulation par rapport aux résultats expérimentaux. Cela peut également affecter la crédibilité des résultats des études basées sur la simulation pour des applications réelles de matériaux à changement de phase dans les enveloppes de bâtiments.

6. Conclusion

La modélisation mathématique de divers phénomènes physiques en général et le transfert thermique dans les MCP en particulier est extrêmement importante, car elle permet une compréhension approfondie des lois physiques entourant le stockage thermique latent, et d'autre part, la génération de modèles pour les études numériques qui simulent le protocole expérimental avec moins d'erreurs possibles. En revanche, la modélisation numérique des matériaux à changement de phase dans les structures de bâtiment est extrêmement difficile, surtout lorsque les phénomènes généralement négligés sont considérés comme l'hystérésis de changement de phase et la surfusion.

Sur cette base, ce chapitre présente une revue de quelques publications importantes sur les études expérimentales et numériques de l'hystérésis de changement de phase et de surfusion. Avant d'aborder une étude d'une paroi complexe qui contient une couche de matériaux à changement de phase sans et en tenant compte l'hystérésis partiel de changement de la phase.

On peut conclure de la présente étude, similaire aux études précédentes, que le phénomène de l'hystérésis de changement de phase doit être pris en compte pour définir plus précisément le transfert de chaleur lors de l'utilisation des MCP dans des structures de construction. Cela peut fournir des résultats plus fiables et simuler de manière rationnelle les applications pratiques des matériaux à changement de phase dans les bâtiments. Cette étude peut également être considérée comme un véritable point de départ pour approfondir les recherches sur l'effet des phénomènes physiques de changement de phase souvent négligée sur l'impact énergétique et économique.

Chapitre 3 Effet de l'utilisation des MCP sur la réduction de la consommation d'énergie dans un modèle d'immeuble de bureaux selon les conditions climatiques de Ouargla

Chapitre 3 Effet de l'utilisation des MCP sur la réduction de la consommation d'énergie dans un modèle d'immeuble de bureaux selon les conditions climatiques de Ouargla.

1. Introduction

De nos jours, une plus grande attention est accordée à l'utilisation de différentes stratégies pour réduire les besoins énergétiques dans le secteur du bâtiment, en particulier avec l'évolution générale du niveau de vie et des exigences de confort, ainsi que des conditions météorologiques de plus en plus imprévisibles. De plus, ces dernières années, le Sahara algérien en général et la région de Ouargla en particulier connaissent une croissance urbaine remarquable, notamment en ce qui concerne les bâtiments administratifs. Ceci est principalement dû à la nature économique de la région et à l'essor des investissements, notamment dans le domaine des hydrocarbures et de l'agriculture.

En effet, l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) dans l'enveloppe du bâtiment est apparue comme une stratégie de conception passive attractive qui peut être utilisée pour améliorer les performances énergétique des bâtiments. Par ailleurs, plusieurs études ont prouvé que l'utilisation de cette technologie dans l'isolation thermique des bâtiments est inefficace et insuffisante pour réduire la demande de consommation d'énergie des systèmes de climatisation dans le climat désertique aride, surtout en période estivale, caractérisée par des températures ambiantes très élevées (Sarri et al., 2019(b)). À partir de cela, une analyse basée sur la simulation à l'aide du logiciel EnergyPlus est effectuée, pour analyser l'effet de l'épaisseur et du type de MCP sur l'économie d'énergie en fonction de chaque modèle de bâtiment. De plus, le modèle de bâtiment idéal de point vue économique est déduit en utilisant une optimisation basée sur le prix d'investissement total.

2. Présentation de la Région de Ouargla

Ouargla est située dans le Sud-Est Algérien, précisément dans la partie septentrionale du Sahara algérien. Elle se place à 190 km à l'est de Ghardaïa, 160 km au sud-ouest de Touggourt, 388 km au sud de Biskra (figure 3.1). Son climat est désertique chaud (Classification de Koppën BWh) typique du désert du Sahara dans lequel elle se trouve, sa superficie est de 211 980 km², et sa population est estimée à 633 967 habitants. Cette ville saharienne possède des étés très longs et extrêmement chauds et des hivers courts et tempérés. Les températures moyennes de la ville sont les plus élevées des grandes villes d'Algérie dont Ouargla fait partie. La température du mois de juillet qui est le mois le plus chaud est d'environ 43°C. La chaleur prend un caractère persistant et désagréable en été avec des températures qui dépassent parfois les 49°C. Le climat est particulièrement sec et très peu pluvieux avec un ciel clair la plupart du temps. La pluviométrie moyenne enregistrée à Ouargla n'est que de 55 mm en moyenne. Ces conditions climatiques peuvent rendre cette ville antique très agréable pendant l'hiver, comparativement à un hiver glacial au nord du pays.



Figure 3.1 Situation géographique de la région de Ouargla.

Malgré son caractère désertique, la wilaya de Ouargla est considéré le cœur battant de l'économie algérienne grâce à ses fortunes ésotériques (pétrole et gaz) surtout dans la région de Hassi Messaoud. De plus, la région de Ouargla connaît une reprise économique dans d'autres domaines, notamment ces dernières années, comme l'agriculture, les énergies renouvelables et dans les secteurs culturels et touristiques, ceci est dû aux considérations historiques et climatiques de la région. Par conséquent, le secteur urbain connaît une forte augmentation, en particulier les bâtiments administratifs. C'est la raison du choix d'un modèle de bâtiment administratif dans le présent travail, où les résultats peuvent être adoptés lors de la planification de la conception des bâtiments administratifs typiques ou du renouvellement de bâtiments existants en utilisant la technologie des matériaux à changement de phase dans l'isolation thermique de leurs enveloppes extérieures.

3. Les programmes de simulation dynamique des bâtiments avec MCP

De nombreux outils de simulation de bâtiments sont répertoriés dans le répertoire Web du Département américain de l'énergie (DOE) (Crawley et al., 2001). Cependant, il existe peu de programmes de simulation de bâtiments à package complet peuvant gérer les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment avec les MCP tels que EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r et BSim. Dans l'une des premières études sur l'ensemble du bâtiment réalisée par le Oak Ridge National Laboratory (ORNL), États-Unis, TRNSYS, un modèle transitoire, a été modifié pour permettre des simulations thermiques des plaques de plâtre imprégnées de paraffine (Tomlinson et Heberle, 1990). Plus tard, Lawrence Berkeley a utilisé un programme RADCOOL à zone unique, combiné avec DOE-2, un outil de simulation énergétique pour l'ensemble du bâtiment. National Laboratory (LBNL), USA, pour l'analyse énergétique dans plusieurs études théoriques des plaques de plâtre renforcées PCM (Stetiu et Feustel, 1996; Feustel et Stetiu, 1997). De plus, certains autres programmes aux capacités limitées sont disponibles pour modéliser le changement de phase dans les bâtiments.

Au cours des trois dernières décennies, de nombreux projets de recherche axés sur les économies d'énergie et la diminution de la charge de pointe associés aux applications d'enveloppe de bâtiment avec MCP ont utilisé un certain nombre d'outils de simulation énergétique pour l'ensemble du bâtiment. Le tableau 3.1 résume et compare les conditions de ces programmes. Effectivement,

Energyplus software est considéré comme l'un des programmes de simulation les plus importants développés pour plusieurs considérations, qui sera brièvement présenté dans la section suivante.

Tableau 3.1 Méthodes numériques pour l'évolution de MCP dans les programmes de simulation de bâtiments.

Programme	Identification du module	Formulation numérique	Méthode numérique	Schéma de pas de temps	Limitations Contraintes	Validation
EnergyPlus	CondFD	FDM: 1D	Heat capacity method	1. Implicit 2. Semi- implicit	 Pas de temps o3 min Petites grilles Le changement de phase à température isotherme n'est pas modélisé 	Analytique, comparatif et expérimental
TRNSYS	Modified ''TYPE36''	FDM: 1D	Enthalpy method	Explicit	 Pas de temps bas Pas d'accès au code 	Validation limitée à l'aide de résultats expérimentaux pour le béton
	"TYPE58"	FDM: 2D	Enthalpy method	Explicit	Pas d'accès au code	Expérimental
	"TYPE101"	FDM: 1D	Heat Capacity Method	Semi-implicit (Crank– Nicolson)	Un facteur de correction pour tenir compte des ponts froids doit être utilisé pour la précision du modèle	Expérimental
	TRNSYS "Active Wall"	Equivalent heat transfer coefficients	Variable heat source function mimicking PCM behavior	-	La physique réelle du transfert de chaleur dans PCM n'est pas modélisée	Expérimental
	"TYPE241"	FDM: 1D	Heat source		Aucune donnée publiée	N/A
	"TYPE260"	FDM: 1D	Heat capacity method	Implicit	Les propriétés thermiques, y compris la capacité thermique, sont basées sur le pas de temps précédent (cà-d. Schéma explicite)	Expérimental
	Modified "TYPE101"	FDM: 1D	Heat capacity method	Implicit	Développé pour cloison interne	Expérimental
	"TYPE1270"	Lumped method using heat balance	Quasi-heat source method	-	 Modèle très simplifié Couche interne dans une enveloppe Basé sur un bilan thermique regroupé (pas un volume fini), une faible précision Pour changement de phase à température fixe 	N/A
	"TYPE285"					N/A
	"TYPE3258"					Expérimental
ESP-r	SPMCMP53- SPMCMP56	FDM: 1D	Heat capacity and heat source method	-	Pas de temps bas	N/A
BSim	-	FVM: 1D	Heat capacity method	Implicit	Pas de temps bas pour éviter l'instabilité	Expérimental
RADCOOL		FDM: 1D	Heat capacity method	Explicit	Le schéma explicite nécessite un pas de temps bas pour éviter l'instabilité	Expérimental

4. Présentation de l'outil de simulation EnergyPlus

EnergyPlus est un logiciel de simulation énergétique à package complet développé par le département américain de l'Énergie (DOE) où il peut être téléchargé gratuitement. Il fournit aux ingénieurs, architectes et chercheurs les outils pour modéliser le chauffage, le refroidissement, l'éclairage, la ventilation, les flux d'énergie et la consommation d'eau. En modélisant les performances d'un bâtiment, ce logiciel permet d'optimiser la conception du bâtiment pour une utilisation moindre d'énergie.

En plus, ses nombreuses options de conception de bâtiments en font un logiciel très puissant et idéal pour les études énergétiques de ces derniers. Le programme EnergyPlus est une collection de nombreux modules de programme qui travaillent ensemble pour calculer l'énergie requise pour le chauffage et refroidissement d'un bâtiment en utilisant une variété de systèmes et de sources d'énergie. Bien que basé sur les fonctionnalités et capacités les plus populaires des outils énergétiques de bâtiment entier développés précédemment tels que BLAST ou DOE-2, EnergyPlus comprend de nombreuses capacités de simulation innovantes telles que des pas de temps inférieurs à une heure, des systèmes modulaires et fonctionnalités intégrées avec simulation de zone basée sur le bilan thermique, flux d'air multizone, confort thermique, simulations d'utilisation de l'eau, ventilation naturelle et systèmes photovoltaïques.

Concernant le langage de programmation, à l'origine E+ était basé sur le langage FORTRAN, puis il a été converti en langage C ++. Il convient de noter que les fichiers suivants sont nécessaires pour exécuter la simulation:

(1) le fichier IDF (fichier de données d'entrée EnergyPlus), qui contient toutes les informations sur l'emplacement, la géométrie, les matériaux, la structure et tous les équipements CVC du bâtiment ect,

(2) le fichier epw désigne le fichier météo.

La figure 3.2 ci-dessous montre la structure globale du programme, les liens vers divers autres programmes et la possibilité d'ajouter de futurs modules. EnergyPlus a trois exigences de base: un gestionnaire de simulation, un module de bilan thermique et massique et un module de simulation de systèmes de construction. Le gestionnaire de simulation contrôle l'ensemble du processus de simulation. Les calculs de bilan thermique sont basés sur IBLAST - une version de recherche de BLAST avec des systèmes CVC intégrés et une simulation des charges du bâtiment.

Les modèles EnergyPlus suivent de très près les principes fondamentaux du bilan thermique dans presque tous les aspects. Cependant, la simulation des constructions de surface de bâtiment s'est appuyée sur une méthode de fonction de transfert de conduction (CTF) héritée de BLAST. Ce fait conduit à un certain nombre de restrictions de programme telles que les propriétés ou les valeurs fixes des paramètres de simulation. Étant donné que les technologies d'enveloppe et d'isolation des bâtiments évoluent aujourd'hui vers l'utilisation de composants dynamiques avancés, la modélisation thermique et énergétique, tels que les matériaux commutables, les MCP ou les isolations à conductivité thermique variable, il devient nécessaire d'utiliser également des méthodes numériques plus avancées dans les analyses thermiques et énergétiques.

En conséquence, une méthode de conduction de différence finie (CondFD) a été intégrée à EnergyPlus. Il ne remplace pas complètement un algorithme de solution CTF relativement rapide, qui peut toujours être utilisé pour des configurations de matériaux plus simples. Cependant, elle complète la méthode CTF dans les cas où EnergyPlus est utilisé pour simuler des PCM ou d'autres matériaux aux propriétés physiques variables. Il est également possible d'utiliser l'algorithme de différence finie où de très petits pas de temps sont nécessaires.



Figure 3.2 Structure globale du programme EnergyPlus. (EnergyPlus Engineering Reference, 2017).

La capacité de modélisation des MCP a été facilitée dans V 2.0 du programme EnergyPlus publiée en avril 2007 en ajoutant l'algorithme de solution CondFD (U.S.A. Department of Energy New Features in Version 2.0.0). Cet algorithme utilise un schéma de différences finies semi-implicite basé sur la méthode de la capacité calorifique avec manipulation de données enthalpie-température auxiliaire pour tenir compte de l'évolution de la chaleur latente (AL-Saadi et al., 2013). En utilisant cet ensemble de données, la capacité calorifique est approximée en utilisant une approche de moyenne temporelle similaire à celle proposée par Morgan et al. (1978). Alors que les versions précédentes d'EnergyPlus avaient un schéma semi-implicite de modélisation des PCM, un schéma totalement implicite a été récemment ajouté à la version 7 du programme avec plus flexibilité numérique (EnergyPlus Engineering Reference, 2017). Pour les deux régimes, il est cependant recommandé d'utiliser un petit pas de temps pour des résultats précis. La formule présentée cidessous (équation 3.1) décrit le calcul pour le schéma totalement implicite dans EnergyPlus qui a été utilisé pour la simulation dans ce chapitre.

$$C_{p}\rho\Delta x \frac{T_{i}^{j+1} - T_{i}^{j}}{\Delta t} = k_{W} \frac{\left(T_{i+1}^{j+1} - T_{i}^{j+1}\right)}{\Delta x} + k_{E} \frac{\left(T_{i-1}^{j+1} - T_{i}^{j+1}\right)}{\Delta x} \dots \dots \dots (3.1)$$

Avec :

$$k_{W} = \frac{\left(k_{i+1}^{j+1} + k_{i}^{j+1}\right)}{2}$$
$$k_{E} = \frac{\left(k_{i-1}^{j+1} + k_{i}^{j+1}\right)}{2}$$
$$k_{i} = k\left(T_{i}^{j+1}\right)$$

Avec :

- k_W : kW: conductivité thermique pour l'interface entre i nœud et i + 1 nœud,
- k_E : conductivité thermique pour l'interface entre le nœud i et le nœud i 1.

 Cp, ρ : chaleur et densité spécifiques d'un matériau, respectivement.

 Δt : pas de temps.

 Δx : épaisseur de couche à différences finies.

La notation de numérotation des nœuds suivante est utilisée:

i: simulation d'un certain nombre de nœuds,

- i + 1: nœud adjacent à l'intérieur de la construction,
- i 1: nœud adjacent à l'extérieur de la construction,
- j + 1: une nouvelle température en fin de pas de temps, et
- j: température à la fin du pas de temps précédent.

Des validations expérimentales ont été menées pour cet algorithme avec des sentiments mitigés de précision. Par exemple, Castell et al. (2009) ont constaté que les résultats de la simulation EnergyPlus ne montraient pas un bon accord avec les expériences lorsque les matériaux à changement de phase ont été réalisés en blocs de béton. L'étude a conclu que les résultats de la simulation ne reflètent pas l'amélioration thermique de MCP observé dans les cellules d'essai. Cependant, l'étude a mis en évidence que les données météorologiques utilisées dans cette simulation n'étaient pas représentatives des données météorologiques réelles.

Ainsi, une validation réussite également signalé de l'algorithme CondFD a été rapportée par (Zhuang et al., 2010), utilisant deux systèmes d'enveloppe avec MCP; l'enveloppe «A» (une couche de MCP avec une température de fusion à 40°C) et enveloppe «B» (avec deux couches de MCP une température de fusion à 40°C et une autre à 33°C). L'étude montre que la plus grande différence relative de la température est de 12.41% et le moins est de 0.71% entre les résultats de simulation et de test sur une période séquentielle de 36 h enveloppe «A». Pour la condition «B» de l'enveloppe, le plus grand la différence relative est de 8.33% et le moins est de 0.33% dans une séquence 72 h. Il a été conclu que les facteurs les plus importants pour réduire les écarts entre la simulation et les

résultats des tests doivent utiliser les données météorologiques réelles appropriées ainsi que l'utilisation appropriée des caractéristiques thermiques du matériau. Autres validations réussies de L'algorithme CondFD pour MCP a été réalisé par (Campbell, 2011) et (Chan, 2011) utilisant des données expérimentales publiées par (Kuznik et al., 2008). Pour les deux études de validation, la température de l'air intérieur était en bon accord avec les résultats expérimentaux.

5. Méthodologies

5.1 Prototype de bâtiment de référence

Pour analyser l'étendue de l'impact de l'utilisation des MCP sur la réduction de la consommation d'énergie selon le climat de Ouargla, un bureau de taille moyenne a été sélectionné à ASHRAE Modèles de construction de prototypes standard 90.1–2013 et légèrement modifiés pour adapter le bâtiment aux rudes conditions du désert comme le montre la figure 3.3. Les modèles de bâtiments prototypes de la norme 90.1 ASHRAE ont été développés par le Pacific Northwest National Laboratory à l'appui du programme des codes énergétiques du bâtiment du département américain de l'Énergie (DOE). Ces prototypes de construction sont simulés dans différentes zones climatiques et pourraient être mappés à d'autres régions climatiques à usage international (Thornton et al., 2011).



Figure 3.3 Vue perspective du modèle Mid-Rise-Office modifié.

L'immeuble a une forme rectangulaire (46.32 m \times 16.91 m), est de trois étages de hauteur total de 3100 m². Chaque niveau contient quatre unités latérales fenêtrés (avec 5 fenêtres au nord et au sud avec un ratio totale de 30% par rapport à la superficie de chaque mur, et 4 fenêtres avec une moyenne de 20% pour chacun des côtés est et ouest respectivement) et une unité principale au milieu pour chaque étage. Notons que toutes les unités ont une forme symétrique et conditionnées. Pour plus de détail concernant la géométrie, les occupants, les horaires etc. Ils peuvent être trouvés sur un fichier IDF sur le site Web du Département américain de l'énergie (DOE).

5.2 Caractérisation et MCP utilités

La méthode d'enthalpie a été utilisée sur la base de l'équation simplifiée de Feustel, (1995) (voir l'équation (3.6)) pour construire des courbes *h*-*T* des MCP, introduisant les propriétés thermiques des matériaux à changement de phase utilisés comme le montre la figure 3.4, (a) RUBITHERM® RT organic MCP pour les surfaces des murs externes et (b) Knauf smartboard au lieu de gypse ordinaire pour les murs internes.



Figure 3.4 Matériaux à changement de phase utilisés: (a) Panneau RUBITHERM® CSM, (b) MCP avec gypse (Knauf smartboard).

La chaleur spécifique étant prise comme dérivée de la température de l'enthalpie spécifique h, la chaleur spécifique en fonction de la température présente une discontinuité à la température de fusion T_m .

La chaleur spécifique peut être décrite par l'équation (3.2) comme suit:

$$C_{p}\left(T\right) = \frac{dh}{dT}....(3.2)$$

Et l'enthalpie par l'équation (3.3):

$$\mathbf{h} = \int_{0}^{T} \int C_{p} \left(T \right) dT \dots (3.3)$$

Au point de fusion T_m , la chaleur spécifique présente des valeurs positives très élevées. La diffusivité thermique α (*T*) est constante à des températures élevées et basses, où nous trouvons les régimes de température linéaires. Alors que les substances cristallines et les eutectiques présentent une transition discontinue, de nombreux matériaux (par exemple les mélanges) présentent des courbes d'enthalpie continues en fonction de la température. Cela conduit à une «région pâteuse», la diffusivité

thermique diminue, avec différents dérivés des deux côtés du point de fusion. (Egolf et Manz, 1993) ont formulé la description suivante pour l'enthalpie spécifique (équation (3.4) et (3.5)):

$$h(T) = C_{p}T + \eta_{1}$$
....(3.4)

avec: $T \leq T_m$

$$h(T) = C_{p1}T_m + (h_2 - h_1) + C_{p2}(T - T_m) - \eta_2....(3.5)$$

avec: $T > T_m$

Tel que:

$$\eta_n = (\frac{h_2 - h_1}{2})e^{(-2\frac{|T - T_m|}{\tau_n})}$$
 avec : n $\in [1, 2]$

Le modèle de simulation thermique dynamique des bâtiments EnergyPlus utilisé pour l'analyse impose certaines restrictions concernant l'utilisation de CondFD algorithme. Alors, Il est aussi nécessaire de trouver une équation continue pour l'enthalpie, qui décrit l'enthalpie en fonction de la température pour toute la plage de température trouvée pour sélectionner des points bien déterminés pour la simulation.



Figure 3.5 Courbe d'enthalpie-température: (A) corps pur, (B) corps homogène.

Pour les matériaux à changement de phase qui présentent une distribution symétrique de la chaleur spécifique pour la zone de fusion (figure 3.5).

$$\frac{\tau}{2} = \tau_1 = \tau_2$$

La tangente hyperbolique présente une certaine similitude avec la région pâteuse de la courbe d'enthalpie. Feustel (1995) décrit les simplifications qui permettent de décrire l'enthalpie et la capacité thermique spécifique comme une fonction hyperbolique et sa dérivée. L'enthalpie peut être décrite comme:

$$h(T) = C_{p,const}T + \frac{h_2 - h_1}{2} \times \left\{1 + \tanh\left[\frac{2\beta}{\tau}(T - T_m)\right]\right\}.$$
(3.6)

Et, comme la capacité thermique spécifique est la première dérivée de l'enthalpie spécifique, nous obtenons:

$$C_{p}(T) = C_{p,const} + \frac{h_{2} - h_{1}}{2} \times \frac{\frac{2\beta}{\tau}}{\cosh^{2}\left[\frac{2\beta}{\tau}(T - T_{m})\right]}....(3.7)$$

Tableau 3.2 Propriétés thermo-physiques de Knauf smartboard. (Kośny, 2015)

Physical property	Value
Chaleur spécifique	1.2 kJ/kg.K
Conductivité thermique à 20°C	0.20 W/m.K
Conductivité thermique à 19°C	0.19 W/m.K
Enthalpie de fusion de PCM	110 J/g
Capacité de la chaleur latente	330 kJ/m^2

Tableau 3.3 Propriétés thermo-physiques de RUBITHERM[®] CSM-Panel. (Rubitherm Technologies GmbH)

Physical property	Value
Chaleur spécifique	2 kJ/kg.K
<i>Conductivité thermique à 20°C</i>	0.20 W/m.K
Conductivité thermique à 19°C	0.20 W/m.K
Enthalpie de fusion de PCM	250 J/g
Capacité de la chaleur latente	-
En utilisant les propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phase et en remplaçant dans l'équation de l'enthalpie, les deux courbes h-T peuvent être obtenues comme indiqué sur la figure 3.6. Les caractéristiques techniques des MCP utilisés sont jointes à l'annexe 1.



Figure 3.6 Les courbes h-T des MCP utilisés.

6. le système CVC du modèle bâtiment

Le système CVC sélectionné pour assurer la climatisation, la ventilation et le chauffage dans les pièces comme suit: une pompe à chaleur terminale monobloc (PTHP) avec commande de ventilateur à volume variable, serpentin de refroidissement à expansion de direction (DX) et pompe à chaleur électrique conformément aux recommandations de types de systèmes de CVC du bâtiment de référence de la norme ANSI/ASHRAE/IES 90.1-2013. Le système HVAC dans le bâtiment est très compliqué. Par conséquent, cette section est consacrée à la définition des composants, des paramètres et de certaines des entrées/sorties importantes utilisées à partir des fichiers IDF, sur la base de la documentation disponible sur EnergyPlus. (EnergyPlus Input Output Reference, 2017; EnergyPlus Engineering Reference, 2017).

6.1 Group - Objets de conception

6.1.1 Entrée pour les calculs de conception et le dimensionnement automatique des composants

Afin qu'EnergyPlus réussisse à calculer les charges de chauffage et de refroidissement de la conception de zone et les débits d'air et pour que le programme utilise ces résultats pour dimensionner automatiquement les composants CVC, un certain nombre d'objets d'entrée doivent être présents et certains champs d'entrée d'objet doivent être entrés.

- Le fichier d'entrée doit contenir un objet « *SimulationControl* ». Le 1er champ « *Do Zone Sizing Calculation* » doit être défini sur Oui. Cela entraînera une simulation de dimensionnement de zone à utiliser comme toutes les périodes de dimensionnement dans le fichier d'entrée. S'il n'y a pas de boucles d'air ou d'eau dans les champs d'entrée CVC 2 et 3, nous pouvons régler sur Non. S'il y a un ou plusieurs boucles d'air (c'est-à-dire qu'il y a au moins un objet '*AirLoopHVAC'* dans le fichier d'entrée), le deuxième champ « *Do System Sizing Calculation* » doit être entré comme Oui. S'il y a un ou plusieurs boucles d'eau (*objets Plant Loop*), le troisième champ « *Do Plant Sizing*

Calculation » doit être défini sur Oui. Enfin, le quatrième champ (Exécuter la simulation pour les périodes de dimensionnement) ou le 5ème (Exécuter la simulation pour les périodes d'exécution du fichier météo) doit être défini sur Oui afin de dimensionner automatiquement les composants et de faire une simulation réelle à l'aide des composants dimensionnés automatiquement. Les calculs de dimensionnement automatique des composants sont effectués lors du premier passage dans le système CVC dans la simulation réelle.

- Il doit y avoir au moins 2 (jusqu'à n'importe quel nombre) objets « *SizingPeriod* » présents. Normalement, on sera pour les conditions estivales et une pour l'hiver. Le jour d'été doit normalement avoir le champ type de jour défini sur '*SummerDesignDay*'. Le jour de conception d'hiver doit normalement avoir le champ type de jour défini sur '*WinterDesignDay*'.

- Pour appliquer un facteur de dimensionnement global, il faut inclure l'objet Dimensionnement: Paramètres.

- Pour chaque zone contrôlée dans le fichier d'entrée, il doit y avoir un objet « *Sizing: Zone* » correspondant. De même, pour chaque '*AirLoopHVAC*', il devrait y avoir un objet « *Sizing: System* ». Et pour chaque boucle de plante ou de condensateur, il devrait y avoir un objet Dimensionnement: Plante. Notez cependant que si une zone contrôlée n'a pas d'objet de dimensionnement de zone correspondant, les données du premier objet de dimensionnement de zone seront utilisées. Ainsi, si toutes les informations de dimensionnement de zone sont les mêmes, un seul objet dimensionnement de zone doit être entré.

- Seules les zones contrôlées sont incluses dans les calculs de dimensionnement de zone et de système. Ainsi, pour qu'un débit d'air de conception soit calculé pour une zone, il doit contenir un thermostat même s'il peut ne pas avoir besoin ou avoir un thermostat dans la simulation complète. Une illustration serait un bâtiment à trois zones avec un système mono-zone monobloc et un thermostat dans l'une des zones. Pour que les deux zones esclaves soient incluses dans les calculs de débit d'air de conception, elles doivent être traitées comme si elles avaient un thermostat: il doit y avoir une 'ZoneControl: Thermostat' pour chacune des zones esclaves.

- Une certaine attention devrait être accordée aux horaires. Dans un objet de programme hebdomadaire, les programmes de 9e et 10e jours sont respectivement pour les jours de conception d'été et d'hiver. Cela signifie que si un objet '*SizingPeriod*' a le champ type de jour défini sur '*SummerDesignDay*', la planification des jours pour les périodes de dimensionnement d'été sera en vigueur. De même, si un objet '*SizingPeriod*' a le champ type de jour défini sur '*WinterDesignDay*', la planification journalière pour les périodes de dimensionnement d'hiver sera en vigueur. Certaines applications possibles de cette capacité sont:

- 1- réglage des charges internes (lumières, équipement, occupation) au maximum toute la journée pour le refroidissement et à zéro toute la journée pour le chauffage;
- 2- réglage des points de consigne des thermostats de chauffage et de refroidissement à des valeurs constantes (pas de réglage ou de retrait);
- 3- régler l'équipement de chauffage et de refroidissement pour qu'il soit toujours allumé.

Aucune de ces applications n'est nécessairement recommandée, mais celles-ci et d'autres utilisations des horaires spéciaux de conception été/hiver peuvent s'avérer utiles dans des situations spécifiques.

À part les points de consigne du thermostat de zone, les calculs de dimensionnement ne savent généralement rien des entrées de commande du système telles que les points de consigne et les calendriers de disponibilité. L'utilisateur doit coordonner le dimensionnement entré avec les entrées de contrôle de simulation réelles.

Les calculs de dimensionnement ne reconnaissent que la présence de serpentins de chauffage et de refroidissement centraux, de serpentins de préchauffage et de pré refroidissement et de serpentins de réchauffage. Ceux-ci sont supposés fournir les différentes températures d'alimentation spécifiées dans les objets 'Sizing: System' et 'Sizing: Zone'. L'impact d'autres composants tels que la récupération de chaleur, les déshumidificateurs et les pompes ne sont pas pris en compte dans les calculs de dimensionnement. L'élévation de la température du ventilateur central d'alimentation et de retour est prise en compte dans le dimensionnement des serpentins de refroidissement central.

6.1.2 Dimensionnement automatique des composants

Pour que le redimensionnement automatique se produise au niveau du composant, l'utilisateur doit entrer la valeur spéciale redimensionnement automatique dans les champs numériques pour lesquels le redimensionnement automatique est disponible. Ces champs peuvent être trouvés en consultant le fichier du dictionnaire de données Energy + .idd ou sous les détails des objets individuels dans ce document. Les champs qui peuvent être redimensionnés automatiquement sont indiqués par 'le commentaire \ redimensionnable' automatiquement.

Les entrées mixtes spécifiées par l'utilisateur et redimensionnées automatiquement peuvent être utilisées avec succès si les points et suggestions suivants sont suivis.

1. Chaque composant est dimensionné automatiquement indépendamment. Ainsi, la saisie par l'utilisateur d'un débit dans un composant n'aura aucun effet sur les débits automatiques des autres composants. Par exemple, spécifier la boucle d'eau glacée Le débit nominal de la pompe n'aura aucun effet sur le dimensionnement automatique du débit d'évaporateur de conception du refroidisseur ni sur le débit maximum de boucle automatique de la boucle de la centrale.

2. Dans un composant, il est préférable de redimensionner automatiquement toutes les entrées en entrant des valeurs spécifiées pour toutes les entrées. Par exemple, dans un refroidisseur, si seule la capacité nominale est spécifiée par l'utilisateur, le débit d'eau glacée automatisé peut ne pas être cohérent avec la capacité spécifiée.

3. Les informations de dimensionnement ne circulent que des objets de dimensionnement vers les composants. Les calculs de dimensionnement n'ont aucune connaissance des valeurs spécifiées par l'utilisateur dans un composant. La seule exception à cette règle est que le dimensionnement de la boucle de l'usine collectera tous les débits d'eau de conception des composants, qu'ils soient automatiques ou spécifiés par l'utilisateur.

4. Si l'utilisateur souhaite spécifier une zone ou un débit d'air du système, cela doit être fait à l'aide des objets Dimensionnement: Zone et Dimensionnement: Système plutôt que dans les composants individuels.

5. Les débits de boucle de l'installation sont dimensionnés à partir de la demande de conception totale des composants connectés à chaque boucle. Il n'est pas nécessaire de dimensionner automatiquement les composants nécessitant de l'eau pour que le dimensionnement automatique de la boucle de l'usine fonctionne correctement. L'utilisateur peut ainsi spécifier tous les composants côté air et redimensionner automatiquement toutes les boucles et composants de l'installation. Ou spécifiez le débit de la boucle d'eau glacée, les entrées de la pompe à eau glacée et les entrées du refroidisseur et laissez la boucle du condenseur et la tour se redimensionner automatiquement.

6.1.3 Sortie de dimensionnement des composants

Les résultats des calculs de dimensionnement automatique des composants sont consignés dans le fichier eplusout.eio . Pour chaque champ de composant qui a été redimensionné automatiquement, le type d'objet, le nom de l'objet, la description du champ avec l'unité et la valeur sont imprimés sous forme de données séparées par des virgules sur une ligne commençant par Dimensionnement des composants.

Les paramètres de simulation entrée en IDF file sont :

DesignSpecification :OutdoorAir

Cet objet est utilisé pour décrire les besoins généraux en air extérieur qui sont référencés par d'autres objets. Cet objet peut être référencé par son nom à partir d'autres objets (par exemple, 'unités terminales VAV', 'AirTerminal: SingleDuct: Uncontrolled' et 'AirTerminal: SingleDuct: Mixer') comme requis pour identifier une quantité d'air extérieur à utiliser par cet objet. Dans notre modèle, cet objet est déclaré pour chaque zone (tableau 3.4), utilisant la méthode de débit par personne.

Nom	Méthode de l'air extérieur	Débit d'air extérieur par pers
SZ DSOA Core_bottom	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Core_mid	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Core top	Débit par personne	0.125

Tableau 3.4 Les zones déclarées pour l'object "DesignSpecification".

Nom	Methode de l'air exterieur	Debit d'air exterieur par personne (m3/s par pers)
SZ DSOA Core_bottom	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Core_mid	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Core_top	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_bot_ZN_1	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_bot_ZN_2	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_bot_ZN_3	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_bot_ZN_4	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_mid_ZN_1	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_mid_ZN_2	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_mid_ZN_3	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_mid_ZN_4	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_top_ZN_1	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_top_ZN_2	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_top_ZN_3	Débit par personne	0.125
SZ DSOA Perimeter_top_ZN_4	Débit par personne	0.125

Sizing Parameters

Ces paramètres on été estimés comme il est démontré dans le tableau 3.5. Cet objet permet de spécifier des rapports globaux de dimensionnement de chauffage et de refroidissement: facteurs/ratios. Ces ratios sont appliqués au niveau de la zone à toutes les charges de chauffage et de refroidissement de zone et les débits d'air. Ces nouvelles charges et débits d'air sont ensuite utilisés pour calculer les débits et les capacités au niveau du système et sont utilisés dans tous les calculs de dimensionnement des composants. Ainsi de spécifier la largeur (en pas de temps de charge) d'une fenêtre de moyenne mobile qui est utilisée pour lisser la charge de pointe sur plus d'un pas de temps.

Tableau 3.5 Rapports de dimensionnement de chauffage et de refroidissement "Sizing Parameters".

Champ	Valeur
Facteur de dimensionnement de chauffage	1.33
Facteur de dimensionnement de refroidissement	1.33
Pas de temps dans la fenêtre de calcul de moyenne	20

Sizing Zone

Ce champ comme indiqué dans le tableau 3.6, permettre de spécifier les données nécessaires pour effectuer un calcul de débit d'air de conception de zone. Le calcul est effectué pour chaque période de dimensionnement incluse dans l'entrée. La charge maximale de refroidissement et de chauffage et les débits d'air de refroidissement, de chauffage et de ventilation sont ensuite enregistrés pour les calculs de conception du niveau du système et des composants de zone.

Tableau 3.6 Les données p	pour effectuer le calcul de débit d	d'air "Sizing Zone object".
---------------------------	-------------------------------------	-----------------------------

Zanas	Méthode/conception	T _{Refroit}	Méthode/conception	T_{Chauf}	Taux d'humidité	Taux d'humidité
Zones	refroidissement	[°C]	chauffage	[°C]	de l'air (Refroid)	de l'air (Chauf)
Core_bottom	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Core_mid	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Core_top	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_bot_ZN_1	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_bot_ZN_2	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_bot_ZN_3	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_bot_ZN_4	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_mid_ZN_1	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_mid_ZN_2	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_mid_ZN_3	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_mid_ZN_4	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_top_ZN_1	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_top_ZN_2	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter_top_ZN_3	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008
Perimeter top ZN 4	SupplyAirTemperature	12.8	SupplyAirTemperature	50	0.0085	0.008

Sizing System

L'objet dimensionnement de zone fournit les données nécessaires pour effectuer des calculs de dimensionnement pour un système d'air forcé central. Le débit d'air, la capacité de chauffage et la capacité de refroidissement de la conception du système seront calculés à l'aide de ces données d'entrée comme il est indiqué au tableau 3.7. Ces données sont enregistrées pour être utilisées dans le

calcul du dimensionnement du système ou pour dimensionner des composants de zone qui utilisent de l'air extérieur.

Tableau 3.7 Les données pour effectuer les calculs de dimensionnement "Sizing system object".

Nom de la boucle aérienne	Unité	VAV_1	VAV_2	VAV_3
Type de charge à dimensionner	-	Sensible	Sensible	Sensible
Ratio air maximal du système de Chauf.C	-	0.3	0.3	0.3
Température de préchauffage	[°C]	7	7	7
Taux d'humidité de préchauffage	[kg eau/kg eau sèche]	0.008	0.008	0.008
Température de pré-refroidissement	[°C]	12.8	12.8	12.8
Taux d'humidité de pré-refroidissement	[kg eau/kg eau sèche]	0.008	0.008	0.008
Temp air d'alimentation (Refroidissement central)	[°C]	12.8	12.8	12.8
Temp air d'alimentation (Chauffage central)	[°C]	16.7	16.7	16.7
Ration d'humidité de l'air d'alimentation (Ref.C)	-	0.0085	0.0085	0.0085
Ration d'humidité de l'air d'alimentation (Chf.C)	-	0.008	0.008	0.008
Fraction maximale de l'air extérieur par zone	adimensionnelle	1	1	1
		Cooling	Cooling	Cooling
Méthode de capacité de conception de refroi	-	Design	Design	Design
		Capacity	Capacity	Capacity
		Heating	Heating	Heating
Méthode de calcul de la capacité de chauffage	-	Design	Design	Design
		Capacity	Capacity	Capacity
Méthode de contrôle de la capacité de Reffroit.C	-	VAV	VAV	VAV

➢ Sizing Plant

Spécifie l'entrée nécessaire pour dimensionner automatiquement les débits de boucle de l'installation et les capacités de l'équipement. Ces informations sont initialement utilisées par les composants qui utilisent de l'eau pour le chauffage ou le refroidissement, tels que les serpentins à eau chaude ou réfrigérée, pour calculer leurs débits d'eau maximum voir tableau 3.8. Ces débits sont ensuite additionnés pour être utilisés dans le calcul des débits de boucle d'usine.

Tableau 3.8 Données pour le calcul du débit d'eau maximal "Sizing Plant object".

Nom de la boucle de l'installation ou du condenseur	Unité	SWHSys1
Type de boucle	-	Heating
Température de sortie de boucle	[°C]	60
Différence de température de conception de boucle	delta °C	5

6.2 Zone HVAC Air Loop Terminal Units

Une variété d'unités terminales d'air sont disponibles pour connecter les systèmes d'air aux zones thermiques. Les unités de distribution d'air (UDA's) ont une description unique contiennent la référence aux composants et aux commandes réelles dans un bloc d'entrée. L'idée est que le volume de contrôle est étroitement dessiné autour des contrôles et lâche autour des composants. Cela permet à des interactions complexes de se produire entre tous les composants qui répondent à la sortie du contrôle thermostatique de zone. Les bobines référencées dans les UDA's sont expliquées en détail dans (EnergyPlus Engineering Reference, 2017). Les systèmes décrits dans les unités de distribution d'air dans cette simulation sont indiqués dans les parties suivantes.

➢ Air Terminal Single Duct VAV-Reheat

Les objectives de cette option est dans les systèmes à volume d'air variable (VAV) contrôlent la température du bulbe sec à l'intérieur d'une zone en faisant varier le volume d'air d'alimentation au lieu de la température de l'air. Au refroidissement complet, le registre VAV est complètement ouvert, fournissant le débit d'air maximum spécifié. Lorsque la charge de refroidissement diminue, le registre se ferme jusqu'à ce qu'il atteigne la butée minimale spécifiée par la fraction de débit d'air minimum de la zone. Les systèmes VAV peuvent être utilisés pour des zones intérieures ou périphériques avec un système de ventilation commun, un contrôle de la température de l'air et des dispositifs de réchauffage. Le concept VAV peut varier en fonction de l'emplacement des boîtes VAV, des commandes de température de l'air et des types d'éléments chauffants. Le chauffage peut généralement être assuré par l'utilisation de serpentins de réchauffage ou de plinthes thermostatiques. Le tableau 3.9 illustre toutes les options utilisées pour lier et construire la simulation.

Nom	Damper Air Outlet Node Name	Air Inlet Node Name	Reheat Coil Object Type	Reheat Coil Name	Air Outlet Node Name
Core_bottom VAV Box Component	Core_bottom VAV Box Outlet Node	Core_bottom VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Core_bottom VAV Box Reheat Coil	Core_bottom VAV Box Outlet Node
Core_mid VAV Box Component	Core_mid VAV Box Outlet Node	Core_mid VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Core_mid VAV Box Reheat Coil	Core_mid VAV Box Outlet Node
Core_top VAV Box Component	Core_top VAV Box Outlet Node	Core_top VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Core_top VAV Box Reheat Coil	Core_top VAV Box Outlet Node
Perimeter_top_ZN_3 VAV Box Component	Perimeter_top_ZN_3 VAV Box Outlet Node	Perimeter_top_ZN_3 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_top_ZN_3 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_top_ZN_3 VAV Box Outlet Node
Perimeter_top_ZN_2 VAV Box Component	Perimeter_top_ZN_2 VAV Box Outlet Node	Perimeter_top_ZN_2 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_top_ZN_2 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_top_ZN_2 VAV Box Outlet Node
Perimeter_top_ZN_1 VAV Box Component	Perimeter_top_ZN_1 VAV Box Outlet Node	Perimeter_top_ZN_1 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_top_ZN_1 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_top_ZN_1 VAV Box Outlet Node
Perimeter_top_ZN_4 VAV Box Component	Perimeter_top_ZN_4 VAV Box Outlet Node	Perimeter_top_ZN_4 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_top_ZN_4 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_top_ZN_4 VAV Box Outlet Node
Perimeter_bot_ZN_3 VAV Box Component	Perimeter_bot_ZN_3 VAV Box Outlet Node	Perimeter_bot_ZN_3 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_bot_ZN_3 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_bot_ZN_3 VAV Box Outlet Node
Perimeter_bot_ZN_2 VAV Box Component	Perimeter_bot_ZN_2 VAV Box Outlet Node	Perimeter_bot_ZN_2 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_bot_ZN_2 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_bot_ZN_2 VAV Box Outlet Node
Perimeter_bot_ZN_1 VAV Box Component	Perimeter_bot_ZN_1 VAV Box Outlet Node	Perimeter_bot_ZN_1 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_bot_ZN_1 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_bot_ZN_1 VAV Box Outlet Node
Perimeter_bot_ZN_4 VAV Box Component	Perimeter_bot_ZN_4 VAV Box Outlet Node	Perimeter_bot_ZN_4 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_bot_ZN_4 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_bot_ZN_4 VAV Box Outlet Node
Perimeter_mid_ZN_3 VAV Box Component	Perimeter_mid_ZN_3 VAV Box Outlet Node	Perimeter_mid_ZN_3 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_mid_ZN_3 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_mid_ZN_3 VAV Box Outlet Node
Perimeter_mid_ZN_2 VAV Box Component	Perimeter_mid_ZN_2 VAV Box Outlet Node	Perimeter_mid_ZN_2 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_mid_ZN_2 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_mid_ZN_2 VAV Box Outlet Node
Perimeter_mid_ZN_1 VAV Box Component	Perimeter_mid_ZN_1 VAV Box Outlet Node	Perimeter_mid_ZN_1 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_mid_ZN_1 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_mid_ZN_1 VAV Box Outlet Node
Perimeter_mid_ZN_4 VAV Box Component	Perimeter_mid_ZN_4 VAV Box Outlet Node	Perimeter_mid_ZN_4 VAV Box Inlet Nodes	Coil:Heating:Electric	Perimeter_mid_ZN_4 VAV Box Reheat Coil	Perimeter_mid_ZN_4 VAV Box Outlet Node

Tableau 3.9 Les options choisit pour "Air Terminal Single Duct VAV-Reheat object".

Zone HVAC Air Distribution Unit

Liste d'équipement 'ZoneHVAC: AirDistributionUnit' doit être répertorié dans l'objet 'ZoneHVAC: EquipementList', s'il existe un système d'air forcé desservant la zone à partir de la boucle d'air. L'équipement est simulé dans l'ordre spécifié par la séquence de refroidissement de l'équipement de zone et la séquence de chauffage ou de non-charge de l'équipement de zone, selon la demande du thermostat. Pour les équipements de type similaire, il faut affecter la séquence 1 au premier système destiné à desservir ce type de charge. Pour les situations où un ou plusieurs types d'équipement ont une capacité limitée ou un contrôle limité, il faut commander la séquence de sorte que l'équipement le plus contrôlable fonctionne en dernier. Par exemple, avec un système d'air extérieur dédié (DOAS), le terminal d'air pour le DOAS doit être affecté à la séquence de chauffage = 1 et à la séquence de refroidissement = 1. Tout autre équipement doit être affecté aux séquences 2 ou supérieures afin qu'il puisse voir la charge nette après que l'air DOAS est ajouté à la zone. Il faut également en tenir compte de spécifier les connexions d'équipement HVAC pour une zone. Les noms de nœuds sont spécifiés pour le nœud d'air de zone, les nœuds d'entrée d'air, les nœuds d'échappement d'air et le nœud de retour d'air. Une liste d'équipements de zone est référencée qui répertorie tous les équipements HVAC connectés à la zone.

6.3 Bobines de chauffage et de refroidissement

Plusieurs bobines différentes peuvent être ajoutées à l'équipement de zone et aux boucles d'air. Cela comprend un chauffage simple (gaz, électrique et eau chaude) et un simple serpentin de refroidissement par eau ainsi qu'un modèle de serpentin de refroidissement par eau à ailettes plates plus détaillé. La figure 3.7 est un exemple de serpentin de chauffage et de refroidissement dans la simulation de boucle d'air dans un système à double conduit. Cela montre la structure de nœud de base qui sera référencée dans la description d'entrée. La figure 3.7 montre les serpentins à eau car ils sont les plus complexes à entrer dans la simulation par rapport aux serpentins électriques et à gaz qui n'ont que des connexions d'air.



Figure 3.7 Example simple de "Air Loop Heating & Cooling Coil System". (EnergyPlus Engineering Reference, 2017).

➢ Coil Cooling DX Two Speed

Ce composant modélise un compresseur et un ventilateur DX à deux vitesses (ou à vitesse variable), comme le montre le tableau 3.10. La méthode est basée sur le modèle utilisé pour l'unité DX cyclique à vitesse unique. L'unité à vitesse unique est décrite par une capacité de charge totale unique, un SHR, un COP et un débit d'air aux conditions nominales. Les performances hors charge à pleine charge sont obtenues en utilisant 4 courbes de modificateur. À charge partielle, l'unité se met en marche s'arrête et les pertes de cyclage sont décrites par une courbe de fraction de charge partielle.

L'unité à plusieurs vitesses est décrite en spécifiant les performances à deux états: compresseur haute vitesse, ventilateur haute vitesse; et compresseur à basse vitesse, ventilateur à basse vitesse. Lorsque la charge de l'unité est supérieure à la capacité de vitesse élevée, l'unité fonctionne avec un compresseur et un ventilateur à haute vitesse. Lorsque la charge de l'unité est inférieure à la capacité basse vitesse, l'unité fonctionnera avec des performances intermédiaires entre haute vitesse et basse vitesse. Lorsque la charge est inférieure à la capacité à basse vitesse, l'unité se met en marche/s'arrête comme l'unité à vitesse unique.

Le modèle d'unité à plusieurs vitesses nécessite 2 ensembles complets de données de performances. Il doit y avoir une capacité haute et basse vitesse, SHR, COP et un débit d'air de l'évaporateur; ainsi que les courbes de performance haute et basse vitesse, la courbe de modification de la capacité de refroidissement totale (fonction de la température) et la courbe de modification du rapport d'entrée d'énergie (fonction de la température). Le composant DX à plusieurs vitesses doit être utilisé dans tous les cas où un système DX VAV est simulé. De toute évidence, ce modèle dans lequel les performances sont obtenues par interpolation entre 2 états spécifiés - est une simplification excessive de la façon dont les unités de refroidissement DX à vitesse variable et à vitesse variable réelles sont contrôlées. Mais des descriptions détaillées de la façon dont les unités réelles fonctionnent et sont contrôlées ne sont pas disponibles. Ce modèle devrait donner une bonne prévision moyenne des performances des unités de refroidissement DX à plusieurs vitesses et à vitesse variable. Les quatres derniers champs d'entrée suivant le nom du programme de fonctionnement du chauffe-bassin sont le ratio de chaleur sensible (SHR), noms des courbes de modificateur pour la température et la fraction de débit pour les serpentins de refroidissement DX à haute et basse vitesse. Ces quatres champs d'entrée sont facultatifs et utilisés uniquement lorsqu'un utilisateur a l'intention de remplacer le SHR calculé en utilisant la méthode du point de rosée de l'appareil (ADP) et du facteur de contournement (BF). Voir la section Calcul SHR à l'aide des courbes de modificateur SHR spécifiées par l'utilisateur dans le document d'ingénierie pour plus de détails (EnergyPlus Engineering Reference, 2017).

	Unité	PACU_VAV_bot_CoolC	PACU_VAV_mid_CoolC	PACU_VAV_top_CoolC
		DXCoil	DXCoil	DACoil
High Speed Gross Rated Total Cooling COP	W/W	3,39928882E+00	3,39928882E+00	3,39928882E+00
		PACU VAV bot OA-	PACU VAV mid OA-	PACU VAV top OA-
Air Inlet Node Name		PACU VAV bot CoolCNode	PACU_VAV_mid_CoolCNode	PACU VAV top CoolCNode
		PACU VAV bot CoolC-	PACU VAV mid CoolC-	PACU VAV top CoolC-
Air Outlet Node Name		PACU VAV bot HeatCNode	PACU_VAV_mid_HeatCNode	PACU VAV top HeatCNode
Total Cooling Capacity Function		FURNACE PACU VAV CoolCC	FURNACE PACU VAV CoolC	FURNACE PACU VAV CoolC
of Temperature Curve Name		arrier48TM014 12tons CapFT	Carrier48TM014 12tons CapFT	Carrier48TM014 12tons CapFT
Total Cooling Capacity Function		FURNACE PACU VAV CoolCC	FURNACE PACU VAV CoolC	FURNACE PACU VAV CoolC
of Flow Fraction Curve Name		arrier48TM014 12tons FFF	Carrier48TM014 12tons FFF	Carrier48TM014 12tons FFF
Energy Input Ratio Function of		FURNACE PACU VAV CoolCC	FURNACE PACU VAV CoolC	FURNACE PACU VAV CoolC
Temperature Curve Name		arrier48TM014 12tons EIRFT	Carrier48TM014 12tons EIRFT	Carrier48TM014 12tons EIRFT
Energy Input Ratio Function of Flow Fraction Name		FURNACE_PACU_VAV_CoolCC arrier48TM014_12tons_EIRFFF	FURNACE_PACU_VAV_CoolC Carrier48TM014_12tons_EIRFF F	FURNACE_PACU_VAV_CoolC Carrier48TM014_12tons_EIRFFF
Part Load Fraction Correlation Curve Name		FURNACE_PACU_VAV_CoolCIE A_HVAC_BESTEST_9ton-PLR	FURNACE_PACU_VAV_CoolC IEA_HVAC_BESTEST_9ton- PLR	FURNACE_PACU_VAV_CoolCI EA_HVAC_BESTEST_9ton-PLR
Low Speed Gross Rated Total Cooling Capacity	W	autosize	autosize	autosize
Low Speed Gross Rated Sensible Heat Ratio		0.69	0.69	0.69
Low Speed Total Cooling Capacity Function of Temperature Curve Name		FURNACE_PACU_VAV_CoolCC arrier48TM014_12tons_CapFT	FURNACE_PACU_VAV_CoolC Carrier48TM014_12tons_CapFT	FURNACE_PACU_VAV_CoolC Carrier48TM014_12tons_CapFT
Low Speed Energy Input Ratio Function of Temperature Curve Name		FURNACE_PACU_VAV_CoolCC arrier48TM014_12tons_EIRFT	FURNACE_PACU_VAV_CoolC Carrier48TM014_12tons_EIRFT	FURNACE_PACU_VAV_CoolC Carrier48TM014_12tons_EIRFT

Table 3.10 Plan de l'unité DX à deux vitesses "Coil Cooling DX Two Speed schedule".

➢ Coil Heating Electric

Le chauffage par serpentin électrique est un modèle de capacité simple, de sorte que l'utilisateur peut entrer son efficacité. Dans de nombreux cas, ce rendement de la bobine électrique sera de 100%. Cette bobine sera plus simple que celle illustrée à la figure 3.7 car elle n'aura que des nœuds d'air pour la connecter au système (tableau 3.11). La bobine peut être utilisée dans la simulation de boucle d'air ou dans l'équipement de zone en tant que bobine de réchauffage. Selon l'endroit où il est utilisé, détermine si cette bobine est contrôlée en température ou en capacité. S'il est utilisé dans la simulation de la boucle d'air, il sera contrôlé à une température spécifiée programmée à partir du SetPoint Manager. S'il est utilisé dans l'équipement de zone, il sera contrôlé à partir du thermostat de zone en répondant à la demande de zone.

Name	Efficiency	Nominal Capacity [W]	Air Inlet Node Name	Air Outlet Node Name
Core_bottom VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Core_bottom VAV Box Damper Node	Core_bottom VAV Box Outlet Node
Core_mid VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Core_mid VAV Box Damper Node	Core_mid VAV Box Damper Node
Core_mid VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Core_top VAV Box Damper Node	Core_top VAV Box Outlet Node
Perimeter_top_ZN_3 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_top_ZN_3 VAV Box Damper Node	Perimeter_top_ZN_3 VAV Box Outlet Node
Perimeter_top_ZN_2 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_top_ZN_2 VAV Box Damper Node	Perimeter_top_ZN_2 VAV Box Outlet Node
Perimeter_top_ZN_1 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_top_ZN_1 VAV Box Damper Node	Perimeter_top_ZN_1 VAV Box Outlet Node
Perimeter_top_ZN_4 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_top_ZN_4 VAV Box Damper Node	Perimeter_top_ZN_4 VAV Box Outlet Node
Perimeter_bot_ZN_3 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_bot_ZN_3 VAV Box Damper Node	Perimeter_bot_ZN_3 VAV Box Outlet Node
Perimeter_bot_ZN_2 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_bot_ZN_2 VAV Box Damper Node	Perimeter_bot_ZN_2 VAV Box Outlet Node
Perimeter_bot_ZN_1 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_bot_ZN_1 VAV Box Damper Node	Perimeter_bot_ZN_1 VAV Box Outlet Node
Perimeter_bot_ZN_4 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_bot_ZN_4 VAV Box Damper Node	Perimeter_bot_ZN_4 VAV Box Outlet Node
Perimeter_mid_ZN_3 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_mid_ZN_3 VAV Box Damper Node	Perimeter_mid_ZN_3 VAV Box Outlet Node
Perimeter_mid_ZN_2 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_mid_ZN_2 VAV Box Damper Node	Perimeter_mid_ZN_2 VAV Box Outlet Node
Perimeter_mid_ZN_1 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_mid_ZN_1 VAV Box Damper Node	Perimeter_mid_ZN_1 VAV Box Outlet Node
Perimeter_mid_ZN_4 VAV Box Reheat Coil	1	autosize	Perimeter_mid_ZN_4 VAV Box Damper Node	Perimeter_mid_ZN_4 VAV Box Outlet Node

Tableau 3.11 Chauffage par serpentin électrique "Coil Heating Electric component".

> Coil Heating Fuel

Le serpentin de chauffage au fuel est un modèle de capacité simple avec une efficacité de brûleur à gaz afin qu'il puisse être saisi par l'utilisateur, comme le montre le tableau 3.12. La valeur par défaut de l'efficacité du brûleur est de 80%. Cette bobine sera plus simple que celle illustrée à la figure 3.7 car elle n'aura que des nœuds d'air pour la connecter au système. La bobine peut être utilisée dans la simulation de boucle d'air ou dans l'équipement de zone en tant que bobine de réchauffage. Selon l'endroit où il est utilisé, détermine si cette bobine est contrôlée en température ou en capacité. S'il est utilisé dans la simulation de la boucle d'air, il sera contrôlé à une température spécifiée programmée à partir du gestionnaire de point de consigne. S'il est utilisé dans l'équipement de zone, il sera contrôlé à partir du thermostat de zone en répondant à la demande de zone.

Tableau 3.12 Serpentin de chauffage au fuel "Coil Heating Fuel".

	PACU_VAV_bot_HeatC	PACU_VAV_mid_HeatC	PACU_VAV_top_HeatC
Fuel Type	NaturalGas	NaturalGas	NaturalGas
Burner Efficiency	0.8	0.8	0.8
Nominal Capacity [W]	autosize	autosize	autosize
Air Inlet Node Name	PACU_VAV_bot_CoolC-	PACU_VAV_mid_CoolC-	PACU_VAV_top_CoolC-
	PACU_VAV_bot_HeatCNode	PACU_VAV_mid_HeatCNode	PACU_VAV_top_HeatCNode
Air Inlet Node Name	PACU_VAV_bot_HeatC-	PACU_VAV_mid_HeatC-	PACU_VAV_top_HeatC-
	PACU_VAV_bot FanNode	PACU_VAV_mid FanNode	PACU_VAV_top FanNode
Tommonotime Sotroint Node None	PACU_VAV_bot_HeatC-	PACU_VAV_mid_HeatC-	PACU_VAV_top_HeatC-
remperature Scipoliti Node Name	PACU_VAV_bot FanNode	PACU_VAV_mid FanNode	PACU_VAV_top FanNode

Plus de détail concernant les contrôleurs, distribution d'air, nœuds des branchements, management d'énergie, pompes, chauffe-eau et stockage, installation des condenseurs et gestionnaire de disponibilité du système ect., sont disponibles sous forme IDF dans le site Web du Département américain de l'énergie (DOE). Et les définitions détaillés pour les Entrés/Sorties, théorie, pour chaque option dans (EnergyPlus Input Output Reference, 2017; EnergyPlus Engineering Reference, 2017).

7. Résultats et discussion

Le bâtiment est principalement affecté par diverses conditions extérieures en raison de différents facteurs climatiques et les sources de chaleur internes générée dans l'espace par les occupants, les lumières et les appareils, qui constituent les gains et/ou les pertes de chaleur. Ce qui rend ces facteurs cruciaux dans la demande d'énergie de chauffage, de refroidissement et de ventilation pour adapter le bâtiment au confort thermique approprié. En effet, le renforcement de l'isolation thermique de l'enveloppe extérieure du bâtiment et la conception rigoureuse des zones intérieures sont considérés comme l'une des méthodes passives efficaces les plus importantes pour réduire les charges thermiques dans les différentes parties, en particulier dans le processus de rénovation des bâtiments.

En conséquence, dans cette partie de l'étude, une évaluation détaillée de l'effet de l'utilisation de panneaux muraux MCP de différentes épaisseurs sur la consommation d'énergie du chauffage, de la climatisation et des ventilateurs est passée en revue. Avant de discuter d'autres stratégies passives pour réduire les charge de chauffage et de refroidissement, par le contrôle du gain de chaleur solaire en réduisant la surface des fenêtres et en modifiant la conception du bâtiment, et l'effet de ces possibilités sur la consommation d'énergie totale et les performances thermiques des MCP pour évaluer l'impact économique de ces matériaux avec l'identification du modèle bâtiment approprié.

7.1 L'effet de l'utilisation des MCP sur la consommation totale d'énergie des systèmes CVC

Comme discuté précédemment, le bâtiment est équipé de systèmes de CVC complets et intelligents installés dans toutes les pièces, pour adapter l'air intérieur en fonction des exigences du confort thermique humain recommandé. Les résultats de la simulation montrent la demande de consommation d'énergie annuelle par catégorie du modèle de base (refroidissement et ventilation électrique, et un système hybride pour le chauffage électrique et du gaz naturel), car la demande de consommation d'énergie de refroidissement représente la valeur la plus élevée à 84.72% de la consommation totale d'électricité suivie par les systèmes de ventilation à 13.17% et cela est principalement dû aux conditions climatiques extrêmement chaudes et sèches causées par la température externe et le rayonnement solaire élevé, et une humidité faible presque tout au long de l'année. Ces mêmes conditions, en plus des charges thermiques internes, rendent la demande d'énergie de chauffage si faible qu'elle ne dépasse pas les 13.11 Gj de consommation électrique, ce qui ne représente que 2.11% de cette source d'énergie en plus de 8.73 Gj de consommation de gaz naturel.

Type de	Chauffage	Chauffage	Refroidissement	Ventilation
bâtiment	(Gaz naturel)	(Electricité)	(Electricité)	(Electricité)
Modèle de				
référence				
E _{Consommée} [Gj]	8.73	13.11	525.86	81.73
Avec 10 mm de				
МСР				
E _{Consommée} [Gj]	5.95	5.67	516.98	76.09
E _{Conservée} [Gj]	2.78	7.44	8.88	5.64
E _{Conservée} [%]	31.84	56.75	1.69	6.90
Avec 20 mm de				
МСР				
E _{Consommée} [Gj]	5.68	4.86	512.50	75.96
E _{Conservée} [Gj]	3.05	8.25	13.36	5.77
E _{Conservée} [%]	34.94	62.93	2.54	7.06
Avec 30 mm de				
МСР				
E _{Consommée} [Gj]	5.66	4.30	508.58	75.98
E Conservée [Gj]	3.07	8.81	17.28	5.75
E Conservée [%]	35.17	67.20	3.28	7.04
Avec 40 mm de				
МСР				
E _{Consommée} [Gj]	5.67	3.94	505.56	75.95
E Conservée [Gj]	3.06	9.17	20.30	5.78
E _{Conservée} [%]	35.05	69.95	3.86	7.07
Avec 50 mm de				
MCP				
E _{Consommée} [Gj]	5.73	3.68	502.74	75.88
E _{Conservée} [Gj]	3.00	9.43	23.12	5.85
E _{Conservée} [%]	34.36	71.93	4.39	7.16

Tableau 3.13 Réduction de la consommation des différentes catégories d'énergies en fonction d'épaisseur des panneaux RUBITHERM[®] CSM.

Comme le montre le tableau 3.13, qui examine l'effet de l'utilisation des plaques Knauf smartboard à la place du gypse ordinaire dans les murs intérieurs et les panneaux de MCP RUBITHERM[®] CSM dans le revêtement extérieur du bâtiment en termes d'épaisseur, où les résultats montrent généralement de bons potentiels de conservation d'énergie dans les bâtiments renforcés avec des matériaux à changement de phase par rapport la consommation totale des sous-catégories, qui augmente avec le doublement de l'épaisseur, car la pose des panneaux des MCP d'une épaisseur de seulement 10 mm, maintient un pourcentage de 3.54% de la consommation totale d'énergie électrique et 31.84% de la consommation de gaz naturel, tandis que les panneaux des MCP d'une épaisseur de spaisseur de 50 mm fournissent ce que jusqu'à 6.18% et 34.36% de consommation d'électricité et de gaz naturel respectivement.

Compte tenu des économies d'énergie selon chaque catégorie, les résultats montrent que les MCP sont très prometteurs pour réduire la demande en énergie de chauffage notamment, comme le ratio d'économie d'énergie électrique à 71.93% et fournissant 34.36% des besoins en gaz naturel dans le bâtiment renforcé avec des MCP d'une épaisseur de 50 mm et qui constituent des proportions très élevées. Cela est dû à la capture du rayonnement solaire sur les quatre côtés du bâtiment, et au

stockage des charges thermiques internes, et les relâchez lorsque la solidification des MCP en raison de la diminution perçue des température extérieures. D'autre part, le concevoir de bâtiment qui rend le noyau moins demande en énergie de chauffage, compte tenu de sa superficie due aux quatre zones environnantes, cela augmente les capacités thermiques du MCP qu'il acquiert en auto-échauffement sans avoir besoin d'énergie.

Pour bien investiguer l'effet des MCP sur la réduction de la consommation d'énergie de chauffage, prenez le dernier étage du bâtiment, à titre d'exemple. Alors que la consommation totale d'énergie de chauffage des quatre côtés environnants est de 356.03 kWh, et ce sera pendant cinq mois de l'année janvier, février, novembre et décembre, tandis que les MCP fournissent un pourcentage de 91.28% là où les besoins en chauffage sont en janvier, notamment. En février et décembre, la demande d'énergie de chauffage dans le noyau interne du bâtiment de base atteint les valeurs de 17.63, 4.07 et 7.26 kWh avec un total de 28.96 kWh seulement pendant les mois de janvier et décembre respectivement, tandis que la valeur de 0.81 kWh dans le bâtiment renforcé avec des MCP ne dépasse pas la note que le besoin d'énergie est en seulement un mois de l'année et est Janvier, qui prouve l'efficacité des MCP pour stocker la chaleur et la pertinence de la conception du bâtiment.

D'autre part, les résultats montrent que les matériaux à changement de phase jouent un moindre rôle dans la réduction de la consommation des systèmes de ventilation par rapport aux systèmes de chauffage, où le rôle de l'épaisseur diminue également. Le taux de réduction varie entre 6.90 % dans le bâtiment renforcé avec des MCP de 10 mm d'épaisseur et augmente dans de très petites proportions pour atteindre le maximum de 7.16 % dans le bâtiment renforcé avec les panneaux de MCP avec une épaisseur de 50 mm. Cela peut être attribué au fonctionnement presque permanent des autres systèmes de climatisation en conjonction avec le travail des thermostats, en particulier les systèmes de refroidissement qui fonctionnent même pendant la saison hivernale pour éliminer l'excès de chaleur du bâtiment et le maintenir ainsi dans la zone du confort thermique.

En ce qui concerne l'énergie conservée pour le refroidissement, les résultats indiquent qu'il y a des quantités importantes lors de l'utilisation des MCP, qui doublent lorsque l'épaisseur des panneaux CSM augmente, de 8,88 GJ lors de l'utilisation des panneaux de 10 mm d'épaisseur à 23,12 GJ lors de l'utilisation des panneaux de 50 mm d'épaisseur. Néanmoins, compte tenu de la consommation totale d'énergie de refroidissement, ces quantités représentent des ratios économiques modestes, en particulier dans les bâtiments renforcés de 10 et 20 mm, où les MCP sont conservés par le rapport de 1.69% et 2.54% respectivement, et dans des proportions respectables à partir de 30 mm pour atteindre 4.39% dans le cas du bâtiment renforcé de 50 mm des plaques de MCP. Cela est dû à l'augmentation de la résistance thermique des murs et du plafond extérieur avec l'augmentation de l'épaisseur les plaques MCP les plus épais, qui sont fournis par les climatiseurs et les températures basses à l'extérieur, ce qui permet aux MCP de se solidifier et fournir un refroidissement passif.

Lorsque la température augmente dans la phase de fusion des MCP, de sorte qu'il soit logique que le phénomène de décalage et réduction de la demande de pointe fournie par les MCP soit directement proportionnel à l'augmentation d'épaisseur, mais il est probable que la demande de consommation d'énergie de refroidissement augmente également dans d'autres heures de la journée pour s'adapter le

bâtiment au confort humain et déstocker l'énergie de la chaleur latente acquis des MCP. Cela explique la légère augmentation des taux d'économie d'énergie, malgré l'augmentation d'épaisseur.

Les résultats obtenus nous amènent à utiliser d'autres méthodes passives en plus avec l'utilisation des MCP dans le cadre de la planification de la rénovation du bâtiment, pour réduire la consommation d'énergie de refroidissement. Mais pour que l'image devienne plus claire et pour une planification plus précise, il vaut la peine d'examiner de plus près les résultats liés à la consommation d'énergie de refroidissement, d'étage en étage et d'une zone à l'autre, afin d'analyser et de mieux comprendre les contraintes liés à la réduction de la consommation d'énergie et ainsi proposer des solutions disponibles dans un tel cas.

7.1.1 Analyse de l'impact des MCP sur la consommation d'énergie électrique des systèmes DX serpentin de refroidissement pour chaque étage

Une description détaillée des composants du système de refroidissement utilisé dans le bâtiment a été réalisée comme chaque étage est équipé de son propre système, qui est situé au-dessus du plafond dans l'espace désigné pour le retour de l'air intérieur à réintégrer et refroidir avec l'air extérieur. La figure 3.8 montre l'énergie électrique consommée par le système d'air DX à serpentin de refroidissement à chaque étage du bâtiment de base, et qui sont renforcés par des matériaux à changement de phase. Les résultats montrent que l'étage supérieur est le plus consommateur d'énergie de refroidissement. Cela est principalement dû au toit extérieur, qui est directement affecté par les fluctuations des températures externes et du rayonnement solaire, ce qui augmente le gain de chaleur, et alors la demande d'énergie de refroidissement dans cette zone du bâtiment.

Ces raisons rendent les MCP efficace pour réduire la consommation d'énergie dans cette partie du bâtiment, notamment avec une épaisseur croissante, car elle permet de décaler et réduire la demande de pointe. Là où les résultats montrent que les panneaux de MCP de 10 mm d'épaisseur fournissent 2.05% de l'énergie, tandis que l'augmentation de l'épaisseur peut fournir des quantités d'énergie importantes pour atteindre 5.97% dans le bâtiment renforcé avec des panneaux de MCP de 50 mm d'épaisseur.

Quant au rez-de-chaussée, le rayonnement solaire réfléchi, en plus du fait que la zone de retour d'air n'est présente que sur le toit, ce qui explique la consommation d'énergie électrique relativement plus élevée dans cette zone par rapport à l'étage intermédiaire, et cela aussi rend les MCP plus efficaces pour réduire la consommation d'énergie de refroidissement, comme fournir au bâtiment des panneaux de 10 mm, on économise seulement un pourcentage de 3.67%, alors que le rapport ne dépasse pas 5.38% avec des panneaux de MCP d'une épaisseur de 50 mm.



Figure 3.8 Consommation d'énergie électrique due au système de refroidissement pour chaque étage.

À l'étage intermédiaire, les MCP jouent un rôle quelque peu négatif dans l'économie d'énergie avec une épaisseur de 10 mm, et leur rôle est grandement diminué à une épaisseur de 30 et 50 mm, car il ne fournit qu'un pourcentage de 0.76% et 1.59% de l'économie d'énergie. Et c'est ce qui prouve que l'utilisation du système de retour d'air affecte sur les performances thermiques (stockage/déstockage de la chaleur latente), et donc sur les capacités des MCP à réduire la consommation d'énergie, en raison du refroidissement passif que cette technique offre dans les toits, en particulier dans le cas des étages intermédiaires et supérieurs, et dans une moindre mesure au rez-de-chaussée avec sol ordinaire.

Il est à noter que les MCP jouent un rôle inverse dans les espaces du toit avec espace de retour d'air, de sorte qu'il reste donc en fusion après le stockage de chaleur, ce qui en fait un isolant thermique qui empêche le refroidissement passif que le plafond fournit et donc la demande de plus d'énergie de refroidissement. Par exemple, pendant le mois de juillet, la température moyenne dans la zone de retour d'air dans l'étage intermédiaire est de 25.6°C, ce qui est proche de la plage de confort thermique d'une part, et proche du point de fusion des MCP d'autre part. Ceci explique le rôle décroissant des MCP dans la réduction de la consommation d'énergie de refroidissement en fonction de chaque étage.

7.1.2 Analyse de l'impact des MCP sur la charge de refroidissement mensuelle pour chaque zone du bâtiment

L'étude de la consommation énergétique des systèmes de refroidissement en fonction de chaque étage permet de choisir le système CVC optimal pour chaque cas, et en fonction des matériaux utilisés dans la construction, et donc l'utilisation la plus efficace des matériaux à changement de phase. Mais en raison de la multiplicité des zones à chaque étage, dont l'orientation solaire diffère, et par conséquent la différence de gain de chaleur qui varie d'une région à l'autre et d'une saison à

l'autre. Cela conduit à une étude de l'effet des MCP et de leur épaisseur sur la charge thermique de refroidissement mensuel pour chaque région séparément dans de tels cas. Pour arriver à des conclusions plus utiles en matière d'efficacité énergétique. Ainsi, dessiner le modèle de bâtiment idéal dans le cadre de la rénovation d'un bâtiment en présence des MCP.

La charge de refroidissement est la quantité d'énergie thermique (chaleur sensible et latente) qui devrait être retirée dans l'espace refroidit pour maintenir sa température dans une plage acceptable. Alors que la charge de chauffage est la quantité d'énergie thermique qui doit être ajoutée à une zone pour maintenir la température dans une plage acceptable. Les méthodes de calcul de la charge de refroidissement prennent en compte le transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement. Ces méthodologies comprennent le bilan thermique, les séries chronologiques radiantes, la différence de température de la charge de refroidissement, la fonction de transfert, et la température sol-air. Les méthodes calculent la charge de refroidissement en régime permanent ou en conditions dynamiques et certaines peuvent être plus impliquées que d'autres. Ces méthodologies et d'autres peuvent être trouvées dans les manuels ASHRAE, la norme ISO 11855, la norme européenne (EN) 15243 et la norme EN 15255. ASHRAE recommande la méthode du bilan thermique et les méthodes des séries chronologiques radiantes, il est à noter que la méthode du bilan thermique fournie par EnergyPlus a été utilisée dans la présente étude.



Figure 3.9 Effet des MCP sur la charge de refroidissement du noyau de rez-de-chaussée.



Figure 3.10 Effet des MCP sur la charge de refroidissement de périmètre de rez-de-chaussée.

En effet, le bilan thermique de la surface extérieure représente la somme de flux thermique de rayonnement solaire direct et diffus absorbé (longueur d'onde courte), flux de rayonnement de longue longueur d'onde (échange de flux de rayonnement avec l'air et l'environnement), échange de flux convectif avec l'air extérieur, et le flux thermique de conduction qui prend le signe moins. La température de l'air extérieur, le rayonnement solaire et le vent étant en contact direct avec l'enveloppe extérieure du bâtiment, donc les différentes conditions climatiques en plus les propriétés thermo-physiques des couches des murs et toiture affectent principalement sur les besoins énergétiques pour adapter le bâtiment au confort thermique.

Les figures 3.9 et 3.10 montrent les besoins en énergie pour la charge de refroidissement à la fois dans le noyau et le périmètre du premier étage. Où les valeurs de la demande d'énergie électrique diffèrent selon la superficie de chaque région et son orientation solaire. Comme le montre les figures 3.9, 3.11 et 3.13, le noyau est le plus consommateur d'énergie, même s'il n'est pas exposé au rayonnement solaire, en raison de la grande surface qu'il occupe à chaque étage (représentant 59.22% de la superficie totale de chaque étage). Comme la demande de consommation d'énergie de refroidissement augmente progressivement à partir de mois de mars, atteignant son maximum en août, puis diminuant progressivement pour atteindre les valeurs les plus basses pendant la saison d'hiver, en particulier en février.

Cette différence est due à l'augmentation des températures extérieures et du rayonnement solaire pendant les saisons de printemps, d'été et d'automne, contrairement à l'hiver qui connaît notamment une baisse des températures. Par exemple, la température journalière moyenne et le rayonnement solaire direct moyen pour le mois d'août sont respectivement de 35.67°C et 564.01 W/m², et prend les valeurs de 19.07°C et 554.94 W/m² en mars, tandis que la température moyenne ne dépasse pas 10.97°C pendant le mois de janvier, où la température ambiante diminue sensiblement la nuit.

Ces raisons expliquent le pourcentage élevé de réduction des besoins en énergie de refroidissement avec l'augmentation d'épaisseur des MCP au cours des mois chauds, en particulier le printemps, ou les MCP fournissent 8% d'économie d'énergie dans le noyau du rez-de-chaussée par exemple, et de bien plus grandes proportions dans les zones environnantes comme le montre les figures 3.10, 3.12 et 3.14, où il atteint 13.90% dans le périmètre-est de rez-de-chaussée au cours du mois de mai, et le ratio dépasse 29.3% au cours du mois de mars dans le périmètre sud pour l'étage supérieur. La différence de résultats entre les zones entourant de chaque étage est due à la différence d'orientation solaire et la superficie de chaque région, car le périmètre sud est le plus exposé au soleil pendant les périodes diurnes.



Figure 3.11 Effet des MCP sur la charge de refroidissement du noyau de premier étage.



Figure 3.12 Effet des MCP sur la charge de refroidissement de périmètre de premier étage.

Le rôle des MCP diminue considérablement pendant l'hiver à mesure que l'épaisseur augmente, alors que ces matériaux jouent un rôle négatif dans l'économie d'énergie dans les zones moins exposées au rayonnement solaire, en particulier dans le noyau. Par exemple, dans le noyau de l'étage intermédiaire, L'utilisation de MCP augmente la consommation d'énergie de refroidissement en novembre à un taux de 13.4% avec une épaisseur de 50 mm et seulement 5.83% avec une épaisseur de 10 mm (figure 3.11). Le rapport atteint 12.2% avec des MCP d'une épaisseur de 50 mm dans le périmètre nord en janvier, et ne dépasse pas 5.52% avec une épaisseur de 10 mm (figure 3.12). Le rôle réduit des MCP ou le rôle négatif qu'elles jouent dans certaines régions pendant les périodes froides, peut s'expliquer par le stockage des gains thermiques et/ou de dysfonctionnement dans les performances des MCP sur le stockage/décharge d'énergie de système de refroidissement, en raison du manque de rayonnement solaire pendant la journée dans ces régions. De plus, ces matériaux constituent un obstacle à la captation de la fraîcheur externe qui se situe dans le domaine du confort thermique, ce qui explique la plus inefficacité des MCP lorsque l'augmentions d'épaisseur.



Figure 3.13 Effet des MCP sur la charge de refroidissement du noyau de deuxième étage.



Figure 3.14 Effet des MCP sur la charge de refroidissement de périmètre de deuxième étage.

Il ressort clairement des résultats que le rôle des plaques de MCP dans la réduction de la consommation d'énergie se produit davantage dans les zones environnantes, et affecte à son tour la réduction de la consommation dans le noyau plus que les plaques MCP avec gypse, ce qui ne semble pas être très bénéfique pour le stockage de l'énergie en raison de la grande superficie de cette région. C'est ce qui nécessite une reconsidération sur le plan Architectural de bâtiment, en réduisant la zone centrale qui ne répond pas adéquatement à l'efficacité énergétique due à l'utilisant des matériaux à changement de phase. D'autre part, réduisant les gains de chaleur par la diminution des surfaces des fenêtres, ce qui augmente ainsi la quantité de MCP à utiliser dans les zones environnantes, qui sont des méthodes applicables et pratiques dans la rénovation des bâtiments.

7.2 Discussion sur les stratégies passives utilisées en plus des MCP

7.2.1 L'effet de la réduction du gain de chaleur solaire par les fenêtres sur la consommation d'énergie du bâtiment et les performances thermiques du MCP

Dans la première partie de l'étude, le modèle de construction de base Office_Medium ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016 a été modifié, qui comprend des fenêtres extérieures le long des murs, et il était destiné à être adapté aux conditions climatiques du désert, comme le montre la figure 3.3. En effet, les couches de construction utilisées dans les murs extérieurs et le toit conviennent parfaitement à de telles conditions climatiques et sont recommandées (avec $R_{mur externe} = 1.27 m^2 K/W$ et $R_{toit} = 3.53 m^2 K/W$). Même pour les fenêtres utilisées avec un système de double vitrage ($R_{totale} = 0.21 m^2 K/W$ avec 0.17 et 0.30 de transmission et réflectance solaire respectivement de la couche externe). Cependant, l'espace occupé par les fenêtres est encore assez important, comme ils forment les zones les plus faibles de l'isolation thermique du bâtiment et augmentent alors les gains thermiques solaires. Cette section discute sur l'effet de la surface des fenêtres sur la consommation d'énergie selon chaque catégorie. Comme le montre la figure 3.15, la surface de chaque fenêtre a été réduite de moitié pour obtenir le modèle (A-1), puis d'un quart dans le modèle (A-2), et ceci est basé sur le modèle d'origine pour déduire le modèle optimal parmi les trois.



Figure 3.15 Schéma descriptif montrant les tailles de fenêtres selon chaque modèle.

Tuna da hâtimant	Chauffage	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Eclairage Interne
Type de baliment	(Gaz)	(Elect)	(Elect)	(Elect)	(Elect)
Modèle de					
référence					
E _{Consommée} [Gj]	8.73	13.11	525.86	81.73	323.19
Modèle (A-1)					
sans MCP					
E _{Consommée} [Gj]	10.19	8.93	493.15	75.96	343.41
E _{Conservée} [Gj]	-1.46	4.18	32.71	5.77	-20.22
E _{Conservée} [%]	-16.72	31.88	6.22	7.06	-6.26

Tableau 3.14(a) Effet de l'utilisation des fenêtres de $(1.31 \times 2 \text{ m})$ sur la consommation d'énergie.

Tableau 3.14(b) Effet de l'utilisation des MCP sur la consommation d'énergie dans le modèle (A-1).

Type de bâtiment	Chauffage (Gaz)	Chauffage (Elect)	Refroidissement (Elect)	Ventilation (Elect)	Eclairage Interne (Elect)
Modèle (A-1)					
E _c [Gj]	10.19	8.93	493.15	75.96	343.41
Avec 10 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.60	4.30	483.42	70.89	343.85
E _{Conservée} [Gj]	3.59	4.63	9.73	5.07	-0.44
E _{Conservée} [%]	35.23	51.85	1.97	6.67	-0.13
Avec 20 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.30	3.82	478.21	70.83	343.85
E _{Conservée} [Gj]	3.89	5.11	14.94	5.13	-0.44
E _{Conservée} [%]	38.17	57.22	3.03	6.75	-0.13
Avec 30 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.29	3.54	474.27	70.83	343.85
E _{Conservée} [Gj]	3.90	5.39	18.88	5.13	-0.44
E _{Conservée} [%]	38.27	60.36	3.83	6.75	-0.13
Avec 40 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.32	3.40	470.96	70.78	343.85
E _{Conservée} [Gj]	3.87	5.53	22.19	5.18	-0.44
E _{Conservée} [%]	37.98	61.93	4.50	6.82	-0.13
Avec 50 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.38	3.34	467.76	70.69	343.85
E _{Conservée} [Gj]	3.81	5.59	25.39	5.27	-0.44
E _{Conservée} [%]	37.39	62.59	5.15	6.94	-0.13

Type de hâtiment	Chauffage	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Eclairage Interne
Type ac outment	(Gaz)	(Elect)	(Elect)	(Elect)	(Elect)
Modèle de					
référence					
$E_{C}[Gj]$	8.73	13.11	525.86	81.73	323.19
Modèle (A-1) avec					
10 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.60	4.30	483.42	70.89	343.85
E _{Conservée} [Gj]	2.13	8.81	42.44	10.84	-20.66
E _{Conservée} [%]	24.39	67.20	8.07	13.26	-6.39
Modèle (A-1) avec					
20 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.30	3.82	478.21	70.83	343.85
E _{Conservée} [Gj]	2.43	9.29	47.65	10.90	-20.66
E _{Conservée} [%]	27.83	70.86	9.06	13.34	-6.39
Modèle (A-1) avec					
30 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.29	3.54	474.27	70.83	343.85
E _{Conservée} [Gj]	2.44	9.57	51.59	10.90	-20.66
E _{Conservée} [%]	27.95	73.00	9.81	13.34	-6.39
Modèle (A-1) avec					
40 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.32	3.40	470.96	70.78	343.85
E _{Conservée} [Gj]	2.41	9.71	54.90	10.95	-20.66
E _{Conservée} [%]	27.60	74.06	10.44	13.39	-6.39
Modèle (A-1) avec					
50 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.38	3.34	467.76	70.69	343.85
E _{Conservée} [Gj]	2.35	9.77	58.10	11.04	-20.66
E _{Conservée} [%]	26.92	74.52	11.05	13.51	-6.39

Tableau 3.14(c) Consommation d'énergie de modèle (A-1) avec MCP par rapport au modèle de référence.

Le tableau 3.14(a) examine l'effet de la réduction de moitié de l'espace des fenêtres sur les besoins énergétiques par catégorie. Les résultats montrent une augmentation de la demande de gaz naturel pour le chauffage, contrairement à l'électricité, car l'utilisation de fenêtres mesurant 1.31×2 m au lieu de 1.31×4 m entraîne une augmentation de la demande de gaz naturel de 1.46 Gj, et en même temps économise une quantité importante d'énergie électrique pour le chauffage d'une valeur de 4.18 Gj, ce qui représente 31.88%. L'effet négatif apparaît également, bien sûr, lors de la réduction de la surface de la fenêtre sur la consommation d'énergie d'éclairage, car la demande de consommation d'énergie d'éclairage intérieur dans ce modèle augmente de 20.22 Gj par rapport au modèle de base, ce qui représente un taux de retard de 6.26%, en raison de la diminution du rayonnement solaire. Car, ce dernier permet d'un éclairage naturel sans besoin d'énergie électrique.

En ce qui concerne la demande en énergie de ventilation et de refroidissement, la réduction de moitié de la surface de la fenêtre montre des résultats très prometteurs, encore supérieurs à ce que permet l'utilisation de matériaux à changement de phase d'une épaisseur de 50 mm dans le modèle initial, où les taux d'économie d'énergie atteignent 6.22% et 7.06% pour la consommation d'énergie de refroidissement et de ventilation, respectivement. Cela est dû au gain de chaleur dans les zones environnantes du bâtiment à travers les fenêtres en raison du rayonnement solaire et les températures

élevées de l'air ambiant, car le taux annuel de gain de chaleur par les fenêtres est estimé à 89078.88 kWh dans le bâtiment de base, alors que la valeur ne dépasse pas 44735.92 kWh dans le bâtiment modifié avec des fenêtres miniatures en deux.

Les résultats ne diffèrent pas beaucoup dans les périodes de forte demande en énergie de ventilation et de refroidissement, qui se caractérisent par une augmentation significative des températures extérieures. En comparant les deux modèles entre mai et septembre, la valeur du gain de chaleur à travers les fenêtres a atteint 41788.70 kWh dans le bâtiment de base pendant cette période. Alors que la valeur ne dépasse pas les 20986.23 kWh dans le modèle modifié, soit environ de 49.78% de limite du gain de chaleur par les fenêtres du bâtiment. Ce qui explique la réduction significative de la consommation d'énergie de la ventilation et du refroidissement lorsque les fenêtres sont réduites de moitié.

L'utilisation des MCP dans le modèle (A-1) améliore les économies d'énergie de chauffage, comme le montre le tableau 3.14(b), alors que l'utilisation de gypse renforcé avec des MCP dans les murs intérieurs et les plaques CSM dans les murs extérieurs d'une épaisseur de seulement 10 mm permet d'économiser respectivement 35.23% et 51.85% de la demande de gaz naturel et d'électricité. Tandis que le rôle des MCP dans la réduction de la consommation d'énergie du refroidissement et de la ventilation est diminué dans ce modèle. Néanmoins, l'utilisation des MCP permettent une économie plus respectable de la demande de refroidissement dans le modèle (A-1) par rapport à lorsqu'il est utilisé dans le modèle de base. Par exemple, lors de l'utilisation des plaques CSM de 10 mm d'épaisseur dans le modèle (A-1), les MCP économisent 9.73 GJ d'énergie de refroidissement c'est à dire un ratio de 1.97%, tandis que la valeur ne dépasse pas 8.88 GJ (soit 1.69%) lorsqu'ils sont utilisés dans le modèle d'origine, et cette différence dans l'économie d'énergie de refroidissement reste même en augmentant l'épaisseur des MCP. Cela peut s'expliquer par l'augmentation de l'espace occupé par les matériaux à changement de phase lors de la réduction du gain de chaleur dans le bâtiment d'autre part.

Le tableau 3.14(c) montre la conservation de la consommation d'énergie du modèle (A-1) avec des MCP par rapport au modèle d'origine, car il est utile de l'utiliser pour comparer les résultats d'autres modèles améliorés avec des MCP pour estimer facilement le modèle optimal. Comme le montre le tableau, l'utilisation conjointe de deux stratégies passives améliore encore l'efficacité énergétique du bâtiment, car l'utilisation de panneaux CSM d'une épaisseur de seulement 10 mm avec miniaturisation des fenêtres permet d'économiser un taux de 8.07% et 13.26% de la demande d'énergie pour le refroidissement et la ventilation, respectivement, tandis que Le taux de rétention de l'énergie de refroidissement double à 11.05% dans le modèle (A-1) avec des MCP de 50 mm d'épaisseur, ce qui représente une valeur élevée de 58.10 GJ.

<i>Type de bâtiment</i>	Chauffage (Gaz)	Chauffage (Elect)	Refroidissement (Elect)	Ventilation (Elect)	Eclairage Interne (Elect)
Modèle de référence					
E _{Consommée} [Gj]	8.73	13.11	525.86	81.73	323.19
Modèle (A-2) sans MCP					
E _{Consommée} [Gj]	10.31	7.67	479.56	73.43	361.20
E _{Conservée} [Gj]	-1.58	5.44	46.30	8.30	-38.01
E _{Conservée} [%]	-18.09	41.49	8.80	10.15	-11.76

Tableau 3.15(a) Effet de l'utilisation des fenêtres de $(1.31 \times 1 \text{ m})$ sur la consommation d'énergie.

Tableau 3.15(b) Effet des MCP sur la consommation d'énergie dans le modèle (A-2).

Type de bâtiment	Chauffage	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Eclairage Interne
-) /	(Gaz)	(Elect)	(Elect)	(Elect)	(Elect)
Modèle (A-2)					
$E_{C}[Gj]$	10.31	7.67	479.56	73.43	361.20
Avec 10 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gi]	6.62	4.02	468.54	68.89	361.53
E _{Conservée} [Gj]	3.69	3.65	11.02	4.54	-0.33
E _{Conservée} [%]	35.79	47.59	2.30	6.18	-0.09
Avec 20 mm de					
МСР					
E _{Consommée} [Gj]	6.29	3.69	463.11	68.94	361.53
E _{Conservée} [Gj]	4.02	3.98	16.45	4.49	-0.33
E _{Conservée} [%]	39.00	51.89	3.43	6.11	-0.09
Avec 30 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.26	3.51	458.93	68.99	361.53
E _{Conservée} [Gj]	4.05	4.16	20.63	4.44	-0.33
E _{Conservée} [%]	39.28	54.24	4.30	6.05	-0.09
Avec 40 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.29	3.43	455.42	68.92	361.53
E _{Conservée} [Gj]	4.02	4.24	24.14	4.51	-0.33
E _{Conservée} [%]	39.00	55.28	5.03	6.14	-0.09
Avec 50 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.36	3.39	452.33	68.79	361.53
E _{Conservée} [Gj]	3.95	4.28	27.23	4.64	-0.33
E _{Conservée} [%]	38.31	55.80	5.68	6.32	-0.09

Type de hâtiment	Chauffage	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Eclairage Interne
	(Gaz)	(Elect)	(Elect)	(Elect)	(Elect)
Modèle de					
référence					
$E_{C}[Gj]$	8.73	13.11	525.86	81.73	323.19
Modèle (A-2) avec					
10 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.62	4.02	468.54	68.89	361.53
E _{Conservée} [Gj]	2.11	9.09	57.32	12.84	-38.34
E _{Conservée} [%]	24.17	69.34	10.90	15.71	-11.86
Modèle (A-2) avec					
20 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.29	3.69	463.11	68.94	361.53
E _{Conservée} [Gj]	2.44	9.42	62.75	12.79	-38.34
E _{Conservée} [%]	27.95	71.85	11.93	15.65	-11.86
Modèle (A-2) avec					
30 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.26	3.51	458.93	68.99	361.53
E _{Conservée} [Gj]	2.47	9.60	66.93	12.74	-38.34
E _{Conservée} [%]	28.29	73.23	12.73	15.58	-11.86
Modèle (A-2) avec					
40 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.29	3.43	455.42	68.92	361.53
E _{Conservée} [Gj]	2.44	9.68	70.44	12.81	-38.34
E _{Conservée} [%]	27.95	73.84	13.39	15.67	-11.86
Modèle (A-2) avec					
50 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	6.36	3.39	452.33	68.79	361.53
E _{Conservée} [Gj]	2.37	9.72	73.53	12.94	-38.34
E _{Conservée} [%]	27.15	74.14	13.98	15.83	-11.86

Tableau 3.15(c) Conservation d'énergie de modèle (A-2) avec MCP par rapport au modèle de référence.

Comme le montre le tableau 3.15(a), la demande d'énergie au gaz naturel pour chauffer le bâtiment augmente lorsque les fenêtres sont réduites à un quart, avec un retard de 1.58 GJ (18.09%), et en même temps cela rend la situation positive de la consommation d'énergie électrique pour le chauffage, avec une baisse de la demande d'électricité de 5.44 GJ. En ce qui concerne la demande sur la consommation d'énergie de la ventilation et du refroidissement dans le modèle modifié (A-2), les résultats montrent plus d'efficacité énergétique lorsque les fenêtres sont minimisées à un quart, ce qui représente des ratios de 8.80% et 10.15% de la réduction de la consommation d'énergie de refroidissement et de ventilation, respectivement, car cela permet d'économiser un total de 54.6 GJ de l'énergie électrique. Cela est dû à la réduction significative du gain de chaleur par les fenêtres, avec des valeurs ne dépassant pas 22425.98 kWh par an et 10520.25 kWh entre mai et septembre.

L'impact négatif est plus apparent lors de l'utilisation de fenêtres mesurant $1,31 \times 2$ m dans la demande de consommation d'énergie électrique pour l'éclairage intérieur du bâtiment, car la demande d'énergie électrique augmente de 38.01 GJ, ce qui représente une augmentation de la consommation d'énergie de 11.76%. D'autre part, les matériaux à changement de phase jouent un rôle très efficace dans l'économie d'énergie de climatisation du modèle (A-2), comme le montre le tableau 3.15(b), en particulier en ce qui concerne la consommation d'énergie de la ventilation et du refroidissement avec

les panneaux CSM d'une épaisseur de 50 mm, ce qui représente 31.87 GJ de conservation d'énergie électrique. De plus, il ressort des résultats que les performances thermiques des MCP sont plus affectées par le gain thermique dans le bâtiment que l'espace qu'il occupe lorsque les fenêtres sont minimisées, par exemple lors de la comparaison des modèles (A-1), (A-2) et du bâtiment initial, les panneaux CSM d'une épaisseur de 10 mm permettent d'économiser 2.30% de la consommation d'énergie de refroidissement, soit une différence de 0.61 et 0.33% d'économies d'énergie pour le bâtiment de base et le modèle (A-1) respectivement. Alors que la différence augmente de 1.29% et 0.53% lors de l'utilisation de panneaux d'une épaisseur de 50 mm. Ce qui est plus susceptible de faire l'hypothèse que la performance des matériaux dans l'économie d'énergie est plus affectée par la réduction du gain de chaleur dans les régions, plus que la surface compensée par la réduction de la surface des fenêtres. Le tableau 3.15(c) montre des résultats très prometteurs en matière de réduction de la consommation d'énergie notamment électrique pour climatiser le bâtiment. Comme le modèle (A-2), amélioré avec des matériaux à changement de phase dans les parois intérieures en gypse et des plaques CSM de 50 mm d'épaisseur, peut économiser jusqu'à 86.47 GJ d'énergie pour la ventilation et le refroidissement et 9.72 GJ d'énergie électrique pour le chauffage par rapport au modèle d'origine.

Indépendamment du caractère architectural et esthétique des bâtiments, les résultats montrent que les espaces alloués aux fenêtres en milieu désertique aride doivent être soigneusement pris en compte, car leur réduction contribue à l'économie de la consommation d'énergie de refroidissement et de ventilation en réduisant le gain de chaleur à travers les fenêtres, et cela contribue également grandement à rendre les matériaux à changement de phase plus efficaces pour réduire la demande d'énergie de refroidissement, en particulier pendant les périodes chaudes de l'année. Malgré le rôle négatif que la réduction de l'espace des fenêtres entraîne dans l'augmentation de la demande d'énergie d'éclairage intérieur, car cela peut être résolu en utilisant les technologies d'énergies renouvelables telle que fournir au bâtiment des lumières LED.

7.2.2 Effet de la conception des zones internes sur la consommation d'énergie du bâtiment et les performances thermiques des MCP

Cette partie passe en revue l'effet de la conception intérieure des étages, car le plan original du bâtiment avec la grande surface occupée par le noyau à chaque étage ne convient pas aux conditions climatiques arides du désert, ce qui conduit à une augmentation de la demande d'énergie de ventilation, de refroidissement et d'éclairage, contrairement à l'énergie de chauffage, comme a également été abordé précédemment. La figure 3.16 montre les modèles qui ont été inclus pour étudier l'effet de la réduction de la surface du noyau à partir du bâtiment de base. Les mesures ont été réduites à chaque coin de noyau d'une mesure constante de 4.57 m à chaque fois, pour obtenir le premier modèle (B-1) avec un noyau mesurant 40.76×24.13 m, occupant 28.58% de surface de chaque étage, et un deuxième modèle (B-2) avec un noyau occupant 7.89% de la surface totale de chaque étage, et mesurant 22.47×5.83 m. Il est à noter que la différence de miniaturisation entre les modèles est assez grande afin de faire une comparaison et de démontrer l'étendue de l'effet de la conception intérieur sur la consommation d'énergie du bâtiment, où des mesures plus petites peuvent être adoptées dans une autre étude pour déduire facilement le modèle optimal.



Figure 3.16 Vue de dessus du bâtiment avec différents designs.

Les résultats montrent un impact positif sur la consommation d'énergie du refroidissement, de la ventilation et de l'éclairage lors du changement de conception du bâtiment, même sans utiliser de matériaux à changement de phase par rapport au modèle d'origine, comme indiqué dans le tableau 3.16(a). Alors que le modèle (B-1) économise une quantité importante d'énergie électrique, estimée à 40.04 GJ, en raison de la réduction de la surface du noyau, qui nécessite une énergie de refroidissement et d'éclairage élevée en raison de la grande superficie qu'il occupe à chaque étage. En plus, l'augmentation de la surface des pièces environnantes de ce modèle, qui bénéficie d'un éclairage naturel à travers les fenêtres pendant la journée, réduit considérablement la demande d'énergie d'éclairage.

En outre, le ré-zonage des étages dans ce cas a un rôle efficace pour réduire les gains thermiques dans le bâtiment et donc réduire la consommation d'énergie de refroidissement. En revanche, les résultats montrent l'impact négatif de la modification de la conception du bâtiment sur la demande d'énergie de chauffage, car dans le modèle (B-1) la demande de gaz naturel augmente considérablement, estimée à 14.45 GJ, et elle est moindre sur l'électricité de 0.42 GJ par rapport au modèle d'origine. Ceci peut s'expliquer par l'espace occupé par le noyau, qui ne nécessite pas beaucoup d'énergie de chauffage, car les zones environnantes isolent et auto-chauffent cette région.

Le tableau 3.16(b) montre l'effet de l'utilisation de matériaux à changement de phase dans le modèle B, où les MCP d'une épaisseur de seulement 10 mm réduisent la consommation d'énergie de chauffage de taux significatifs de 15.53% et 54.39% pour la demande de gaz naturel et d'électricité, respectivement. Les plaques de MCP contribuent également efficacement à réduire la consommation d'énergie de ventilation et de refroidissement, qui augmente avec le doublement de l'épaisseur de ces matériaux, car l'utilisation de MCP avec gypse et des plaques CSM d'une épaisseur de 10 mm, par exemple, permet d'économiser 2.41% de la demande d'énergie de refroidissement. Il ressort clairement de ce résultat que les performances thermiques des MCP sont affectées par la conception interne du bâtiment (C.à.d., 2.41% d'économie d'énergie de refroidissement dans le modèle (B-1) par rapport à 1.69% dans le modèle de base avec des plaques d'une épaisseur de 10 mm, soit une différence significative de 0.72%), cela est dû à la réduction des gains thermiques dans le modèle (B-1)

est inférieure à ce qui est contenu dans le modèle de base, en raison de la diminution de la superficie totale des murs internes, c'est-à-dire avec une superficie de 1281 m² dans le bâtiment de base par rapport à 1193 m² de surface dans le modèle (B-1).

Tableau 3.16(a) Effet de changement de plan de référence en modèle (B-1) sans MCP sur la consommation d'énergie par catégorie.

<i>Type de bâtiment</i>	Chauffage (Gaz)	Chauffage (Elect)	Refroidissement (Elect)	Ventilation (Elect)	Eclairage Interne (Elect)
Modèle de					
référence					
E _{Consommée} [Gj]	8.73	13.11	525.86	81.73	323.19
Modèle 1/2 sans					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	23.18	13.53	512.68	81.20	296.86
E _{Conservée} [Gj]	-14.45	-0.42	13.18	0.53	26.33
E _{Conservée} [%]	-165.52	-3.20	2.51	0.65	8.15

Tableau 3.16(b) Effet des MCP sur la consommation d'énergie dans le modèle (B-1).

Type de hâtiment	Chauffage	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Eclairage Interne
Type we summeri	(Gaz)	(Elect)	(Elect)	(Elect)	(Elect)
Modèle (B-1)					
E _c [Gj]	23.18	13.53	512.68	81.20	296.86
Avec 10 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	19.58	6.17	500.34	76.38	297.36
E _{Conservée} [Gj]	3.60	7.36	12.34	4.82	-0.50
E _{Conservée} [%]	15.53	54.39	2.41	5.94	-0.17
Avec 20 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	19.53	5.37	496.23	76.31	297.36
E _{Conservée} [Gj]	3.65	8.16	16.45	4.89	-0.50
E _{Conservée} [%]	15.75	60.31	3.21	6.02	-0.17
Avec 30 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	19.65	4.80	492.69	76.34	297.36
E _{Conservée} [Gj]	3.53	8.73	19.99	4.86	-0.50
E _{Conservée} [%]	15.23	64.52	3.90	5.98	-0.17
Avec 40 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	19.90	4.45	489.85	76.26	297.36
E _{Conservée} [Gj]	3.28	9.08	22.83	4.94	-0.50
E _{Conservée} [%]	14.15	67.11	4.45	6.08	-0.17
Avec 50 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	20.16	4.27	487.26	76.15	297.36
E _{Conservée} [Gj]	3.02	9.26	25.42	5.05	-0.50
E _{Conservée} [%]	13.03	68.44	4.96	6.22	-0.17

Tuno do hâtimont	Chauffage	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Eclairage Interne
Type de baliment	(Gaz)	(Elect)	(Elect)	(Elect)	(Elect)
Modèle de					
référence					
E _c [Gj]	8.73	13.11	525.86	81.73	323.19
Modèle (B-1) avec					
10 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	19.58	6.17	500.34	76.38	297.36
E _{Conservée} [Gj]	-10.85	6.94	25.52	5.35	25.83
E _{Conservée} [%]	-124.28	52.94	4.85	6.55	7.99
Modèle (A-1) avec					
20 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	19.53	5.37	496.23	76.31	297.36
E _{Conservée} [Gj]	-10.80	7.74	29.63	5.42	25.83
E _{Conservée} [%]	-123.71	59.04	5.63	6.63	7.99
Modèle (A-1) avec					
30 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	19.65	4.80	492.69	76.34	297.36
E _{Conservée} [Gj]	-10.92	8.31	33.17	5.39	25.83
E _{Conservée} [%]	-125.08	63.38	6.31	6.59	7.99
Modèle (A-1) avec					
40 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	19.90	4.45	489.85	76.26	297.36
E _{Conservée} [Gj]	-11.17	8.66	36.01	5.47	25.83
E _{Conservée} [%]	-127.95	66.05	6.85	6.69	7.99
Modèle (A-1) avec					
50 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	20.16	4.27	487.26	76.15	297.36
E _{Conservée} [Gj]	-11.43	8.84	38.60	5.58	25.83
E _{Conservée} [%]	-130.93	67.43	7.34	6.83	7.99

Tableau 3.16(c) Conservation d'énergie de modèle (B-1) avec MCP par rapport au modèle de référence.

D'autre part, en comparant les résultats d'économie d'énergie entre les deux modèles (A-1), (A-2) et (B-1), qui sont améliorés avec des matériaux à changement de phase, Les résultats montrent que l'option de réduire l'espace des fenêtres est supérieure à la modification de la conception des étages en termes d'économie d'énergie, comme le montre le tableau 3.16(c). Cela suggère l'adoption des deux options ensemble pour réduire davantage les gains de chaleur dans le bâtiment, et donc obtenir des résultats plus positifs dans la réduction de la consommation d'énergie en général et de l'énergie de refroidissement et de ventilation en particulier.

Tableau 3.17(a) Effet de changement de plan de référence en modèle (B-2) sans MCP sur la consommation d'énergie par catégorie.

<i>Type de bâtiment</i>	Chauffage (Gaz)	Chauffage (Elect)	Refroidissement (Elect)	Ventilation (Elect)	Eclairage Interne (Elect)
Modèle de					
référence					
E _{Consommée} [Gj]	8.73	13.11	525.86	81.73	323.19
Modèle 1/2 sans					
МСР					
E _{Consommée} [Gj]	29.86	15.27	517.20	82.80	278.53
E _{Conservée} [Gj]	-21.13	-2.16	8.66	-1.07	44.66
E _{Conservée} [%]	-242.04	-16.47	1.65	-1.31	13.82

Tableau 3.17(b) Effet des MCP sur la consommation d'énergie dans le modèle (B-2).

Tuna da hâtimant	Chauffage	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Eclairage Interne
Type de buliment	(Gaz)	(Elect)	(Elect)	(Elect)	(Elect)
Modèle (B-2)					
E _c [Gj]	29.86	15.27	517.20	82.80	278.53
Avec 10 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	26.27	7.04	502.53	77.66	279.09
E _{Conservée} [Gj]	3.59	8.23	14.67	5.14	-0.56
E _{Conservée} [%]	12.02	53.89	2.84	6.21	-0.20
Avec 20 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	26.22	6.11	498.96	77.71	279.09
E _{Conservée} [Gj]	3.64	9.16	18.24	5.09	-0.56
E _{Conservée} [%]	12.19	59.98	3.53	6.15	-0.20
Avec 30 mm de					
МСР					
E _{Consommée} [Gj]	26.64	5.42	495.97	77.85	279.09
E _{Conservée} [Gj]	3.22	9.85	21.23	4.95	-0.56
E _{Conservée} [%]	10.78	64.51	4.10	5.98	-0.20
Avec 40 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	27.01	4.94	493.52	77.86	279.09
E _{Conservée} [Gj]	2.85	10.33	23.68	4.94	-0.56
E _{Conservée} [%]	9.54	67.65	4.58	5.96	-0.20
Avec 50 mm de					
MCP					
E _{Consommée} [Gj]	27.82	4.70	490.81	77.96	279.09
E _{Conservée} [Gj]	2.04	10.57	26.39	4.84	-0.56
E _{Conservée} [%]	6.83	69.22	5.10	5.85	-0.20

Tuna da hâtimant	Chauffage	Chauffage	Refroidissement	Ventilation	Eclairage Interne
Type de ballment	(Gaz)	(Elect)	(Elect)	(Elect)	(Elect)
Modèle de					
référence					
E _C [Gj]	8.73	13.11	525.86	81.73	323.19
Modèle (A-1) avec					
10 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	26.27	7.04	502.53	77.66	279.09
E _{Conservée} [Gj]	-17.54	6.07	23.33	4.07	44.10
E _{Conservée} [%]	-200.92	46.30	4.44	4.98	13.65
Modèle (A-1) avec					
20 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	26.22	6.11	498.96	77.71	279.09
E _{Conservée} [Gj]	-17.49	7.00	26.90	4.02	44.10
E _{Conservée} [%]	-200.34	53.39	5.12	4.92	13.65
Modèle (A-1) avec					
30 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	26.64	5.42	495.97	77.85	279.09
E _{Conservée} [Gj]	-17.91	7.69	29.89	3.88	44.10
E _{Conservée} [%]	-205.15	58.66	5.68	4.75	13.65
Modèle (A-1) avec					
40 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	27.01	4.94	493.52	77.86	279.09
E _{Conservée} [Gj]	-18.28	8.17	32.34	3.87	44.10
E _{Conservée} [%]	-209.39	62.32	6.15	4.73	13.65
Modèle (A-1) avec					
50 mm de MCP					
E _{Consommée} [Gj]	27.82	4.70	490.81	77.96	279.09
E _{Conservée} [Gj]	-19.09	8.41	35.05	3.77	44.10
E _{Conservée} [%]	-218.67	64.15	6.66	4.61	13.65

Tableau 3.17(c) Conservation d'énergie de modèle (B-2) avec MCP par rapport au modèle de référence.

La restructuration du bâtiment avec une réduction importante du noyau conduit à des résultats positifs plus importants en termes de réduction de la consommation d'énergie d'éclairage et d'économie d'énergie de refroidissement, mais moins que le modèle (B-1) comme indiqué dans le tableau 3.17(a), car l'augmentation de la superficie des zones environnantes augmente considérablement les gains de chaleur dans le bâtiment et donc augmente la demande de l'énergie de refroidissement. Il en va de même pour la demande d'énergie de chauffage, car la demande augmente jusqu'à 21.13 GJ et 2.16 GJ pour le gaz naturel et l'électricité, respectivement. Cela est dû à l'augmentation des superficies des zones entourant le noyau qui sont directement exposées aux fluctuations des températures externes. Les résultats montrent qu'il est nécessaire de diviser soigneusement les espaces lors de la conception du bâtiment avant d'extraire le modèle idéal en termes de consommation d'énergie, indépendamment des préoccupations administratives et organisationnelles et le caractère architectural et esthétique du bâtiment.

L'utilisation de MCP dans le modèle (B-2) entraîne une réduction de la consommation d'énergie des systèmes CVC, car les taux d'économie d'énergie augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur, comme le montrent les tableaux 3.17(b) et 3.17(c). Les résultats également confirment une fois de plus que les performances thermiques des MCP sont affectées par la conception du bâtiment comme

le montre le tableau 3.17(b), car l'utilisation des panneaux CSM d'une épaisseur de 10 mm permet d'économiser un taux de 2.84% de la consommation d'énergie de refroidissement, soit une augmentation de 1.15% de ce que les MCP conservent avec la même épaisseur dans le modèle de base. Alors que pour les panneaux CSM d'une épaisseur de 50 mm économisent 5.10% dans le modèle (B-2), une différence de 0.71% par rapport à ce qu'ils économisent dans le modèle de base. Les résultats prouvent généralement que la demande de consommation d'énergie dans le bâtiment et les performances thermiques des MCP sont affectées par la conception du bâtiment, ce qui conduit à étudier la modification de la conception des pièces et des fenêtres ensemble pour extraire le modèle optimal en termes d'économie d'énergie dans le bâtiment. Et cela avant d'aborder l'audit économique.

7.2.3 Effet de l'utilisation des MCP sur la consommation d'énergie avec des modèles combinés utilisant les deux stratégies passives ensemble

Ce paragraphe traite de l'étude de la collecte des stratégies passives précédemment étudiées séparément, dans des modèles unifiés avec ou sans MCP, afin d'extraire le modèle optimal en termes de consommation d'énergie selon chaque catégorie. Où le modèle (B-1) avec des fenêtres mesurant $(1.31 \times 2 \text{ m})$ est désigné par le symbole (B1-A1), et avec des fenêtres mesurant $(1.31 \times 1 \text{ m})$ par le symbole (B1-A2). Alors que le nouveau design du modèle (B-2), avec des fenêtres mesurant $(1.31 \times 2 \text{ m})$, est symbolisé par le symbole (B2-A1), et avec des fenêtres mesurant $(1.31 \times 1 \text{ m})$ par le symbole (B2-A2). La figure 3.17 montre la consommation des quatre nouveaux modèles avec ou sans MCP d'énergie de gaz naturel et d'électricité pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation et l'éclairage par rapport au modèle d'origine. Les résultats montrent que la modification de la conception des étages et des fenêtres ensemble fournit des résultats très prometteurs dans l'économie d'énergie globale de l'électricité, en particulier dans les modèles (B1-A1) et (B2-A1) comme le montre la figure 3.17(a) et la figure 3.17(c). L'utilisation des fenêtres mesurant $(1,31 \times 2 \text{ m})$ permet d'économiser jusqu'à 4.62% dans le modèle (B1-A1) même sans utiliser de matériaux à changement de phase. Cela est dû à la pertinence de cette conception pour réduire les gains de chaleur et fournir de l'éclairage naturelle en même temps. Ces raisons rendent l'utilisation des MCP dans ce modèle plus efficace car l'utilisation des plaques CSM d'une épaisseur de seulement 10 mm permet d'économiser un taux de 2.31% et 6.82% par rapport au nouveau modèle et au modèle d'origine respectivement.

Lors de l'examen du modèle idéal pour chaque catégorie d'énergie séparément, les résultats montrent que la modification de la conception des étages et des fenêtres des bâtiments a un impact négatif en augmentant la demande d'énergie au gaz naturel, en particulier dans les modèles modifiés avec des fenêtres mesurant (1. 31 × 2 m). En revanche, l'augmentation de la demande de gaz naturel coïncide avec une diminution de la consommation d'énergie électrique, en particulier dans les modèles renforcés par des MCP, le modèle (B1-A2) d'une épaisseur de 50 mm étant considéré comme le meilleur en termes de consommation d'énergie de chauffage car il consomme 19.6 GJ de gaz naturel uniquement et au même temps économise environ de 9.26 GJ d'électricité pour le chauffage, soit 70.63%. Concernant la consommation d'énergie électrique pour la ventilation, les résultats semblent très proches, en particulier lors de l'utilisation de matériaux de changement de phase, de sorte que le modèle (B1-A1) avec des panneaux CSM d'une épaisseur de 50 mm est également considéré comme le modèle idéal avec une économie significative d'énergie électrique, à un taux de 14.25%.



Figure 3.17 Effet des MCP sur la consommation d'énergie dans les nouveaux modèles améliorés.

D'autre part, les résultats montrent généralement un impact très négatif lors du changement de fenêtres et de la conception des étages sur la demande d'énergie électrique pour l'éclairage, surtout lors de l'utilisation de fenêtres de taille $(1,31 \times 1 \text{ m})$ dans les deux nouveaux modèles (B1-A1) et (B2-A2). Alors que la conception avec un noyau qui occupe 7.89% de la surface de chaque étage avec des fenêtres mesurant $(1,31 \times 2 \text{ m})$ est une exception, car elle est favorable dans une large mesure en termes d'économie d'énergie d'éclairage. En termes de consommation d'énergie de refroidissement, le modèle de bâtiment (B1-A2) est considéré comme le meilleur en termes d'économie d'énergie, en particulier lors de l'utilisation de matériaux à changement de phase, car l'utilisation des CSM d'une épaisseur de 50 mm fournit le taux le plus élevé, estimé à 14.54% par rapport au modèle d'origine. Cela est dû à la contribution de la nouvelle conception des pièces intérieures et des fenêtres pour réduire les gains thermiques, réduisant ainsi la consommation d'énergie et améliorant la capacité de stockage thermique des matériaux à changement de phase.

7.3 Audit économique

Lors de l'étude de l'utilisation de certaines stratégies passives pour réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments, l'étude économique représente un impératif pour connaître l'ampleur des résultats des investissements en termes purement financiers, à court ou long terme, et ainsi déterminer les options les plus réalistes pour concevoir ou rénover le bâtiment. De nombreuses publications traitent de diverses études économiques possibles et les plus utilisées, notamment l'ouvrage de Moncef Krarti (2011), considéré comme l'une des références les plus importantes dans ce domaine. D'autre part, de nombreuses études portent sur l'adoption de diverses méthodes spécialisées pour l'analyse de la faisabilité technico-économique des matériaux à changement de phase dans les bâtiments.

Dans le présent travail, avec des constructions différentes selon chaque modèle de bâtiment et la diversité des sources d'énergie (gaz naturel et électricité) dont les coût varies, la méthode d'analyse du coût du cycle de vie (Life cycle cost, symbolisée fréquemment par LCC) est la méthode la plus appropriée pour étudier l'optimisation et évaluer l'impact économique des MCP. Le but de LCC est d'estimer les coûts globaux des alternatives du projet et de sélectionner la conception qui garantit que l'optimisation fournira le coût global de possession le plus bas compatible avec sa qualité et sa fonction, de la période de construction à l'expiration. Cela peut être modélisé mathématiquement comme indiqué dans l'équation (3.8).

$$LCC = TotalInvestmentCost + \frac{1 - (1 + d)^{-N}}{d} \times AnnualEnergyCost \dots (3.8)$$

Où:

d: est le taux d'actualisation en fraction, etN: est le cycle de vie du paramètre de conception en années.

Malheureusement, l'étude d'optimisation ne peut pas être réalisée en utilisant la méthode LCC dans l'étude actuelle, car les informations sont insuffisantes pour calculer le coût des constructions dans le bâtiment d'origine. Ainsi, l'amélioration a été étudiée sur la base d'une analyse des résultats des montants économisés correspondant à l'économie d'énergie totale pour chaque modèle. En revanche, la période de récupération statique (SPP) a été aussi utilisée pour l'évaluation économique (équation 3.9). Cette méthode simple est largement utilisée dans de nombreuses analyses économiques techniques et permet donc de démontrer la valeur de l'utilisation des MCP d'un point de vue purement économique dans la littérature actuelle.

$$SPP = \frac{C_{PCM}}{S}....(3.9)$$
Avec:

SPP: est la période de récupération statique,

CMCP: c'est l'investissement initial supplémentaire pour l'application des MCP, et

S: est le revenu généré par les économies d'énergie.

En raison du coût élevé lors de l'utilisation des MCP dans les murs intérieurs et les plafonds, et la valeur modeste qu'ils fournissent en économie d'énergie. L'optimisation était basée sur l'analyse des résultats de simulation de nouveaux modèles de bâtiments contenant des panneaux CSM de différentes épaisseurs dans les murs extérieurs uniquement. Les périodes de récupération pour tous les modèles ont également été calculées par rapport au modèle de bâtiment d'origine. En d'autres termes, il a été supposé que l'économie d'énergie est due aux matériaux à changement de phase uniquement sans tenir compte de l'effet de conception sur la consommation d'énergie.

L'estimation monétaire de la consommation d'énergie due à la climatisation est basée sur le nouveau tarif d'électricité fourni par le ministère algérien de l'énergie et des mines. En revanche, le coût d'installation du MCP n'a pas été pris en compte. Alors que le coût du MCP par panneau (10 mm d'épaisseur) est de 4.52 USD/m² Selon le service contact de la société Rubitherm Technologies GmbH. Malgré ces nombreuses hypothèses, les résultats d'optimisation aident grandement à identifier le modèle de bâtiment optimal à adopter en utilisant des matériaux à changement de phase.



Figure 3.18 Résultats de l'analyse technico-économique.

La figure 3.18 montre les résultats de l'analyse économique pour l'utilisation de plaques CSM de différentes épaisseurs pour tous les modèles mentionnés précédemment par rapport au modèle de bâtiment d'origine. Comme le montrent les résultats, les matériaux à changement de phase fournissent des valeurs financières significatives d'économie d'énergie totale. Où le montant de l'économie d'énergie double selon chaque modèle de manière presque linéaire avec le croissement d'épaisseur, pour atteindre un pic lors de l'utilisation de panneaux CSM d'une épaisseur de 50 mm, où les résultats économiques généralement sont très proches quelle que soit la conception du bâtiment. À l'exception du modèle (B-2) avec des panneaux CSM de 50 mm d'épaisseur, qui représente le meilleur modèle économique, qui surpasse largement les autres modèles en termes d'économies financières pour la consommation d'énergie dans le bâtiment, car il permet d'économiser 400.34 USD/an en consommation totale d'énergie.

Aussi, il ressort des résultats que les périodes de récupération (PP) selon chaque modèle peuvent être interpolées linéairement, car leurs valeurs diminuent progressivement avec le décroissement d'épaisseur selon chaque modèle. De plus, il existe une grande distinction dans les valeurs de (PP) lorsque l'épaisseur est augmentée par rapport à l'utilisation de plaques CSM de 10 mm. Plus exactement, les périodes de récupération pour les modèles de construction renforcés de panneaux CSM d'une épaisseur de 20 mm et plus peut être en dehors du cadre du cycle de vie des matériaux à changement de phase. Par exemple, dans le modèle Bâtiment (B2-A2), la période de récupération est de 95.31 ans avec des panneaux CSM de 50 mm d'épaisseur. De plus, la période de récupération est de 61.24 ans dans le modèle simple renforcé avec des matériaux de changement de phase de seulement 20 mm d'épaisseur. La variation des résultats d'un modèle à l'autre est due à la différence entre la quantité d'énergie économisée et la quantité de matériaux utilisés qui varie selon la surface totale qu'ils occupent selon chaque modèle.

La préexcellence du modèle (B-2) apparaît à nouveau en termes des valeurs des périodes de récupération de l'investissement, car le modèle (B-2) avec des panneaux CSM de 10 mm d'épaisseur est considéré comme le meilleur, ou le montant de l'investissement est récupéré en 20.65 ans seulement. Alors que la période ne dépasse pas 61.32 ans, même en utilisant des matériaux d'une épaisseur de 50 mm, ce résultat est largement acceptable compte tenu de la quantité d'énergie fournie par ce modèle, qui réduit les émissions et est donc considéré comme le système le plus écologique. Cela prouve que la réduction de la surface des fenêtres sur les côtés extérieurs des structures dans les climats désertiques est de la plus haute nécessité pour réduire la demande d'énergie de climatisation, améliorer les capacités thermiques des matériaux à changement de phase et ainsi multiplier l'impact économique de cette technologie.

8. Conclusion

Une simulation thermique dynamique a été réalisée en utilisant le programme EnergyPlus pour examiner l'effet de l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP), la conception des étages et des fenêtres, sur le comportement thermique d'un prototype de bâtiment bureau situé dans les zones désertiques du sud est algérien (la ville de Ouargla).

Les résultats de la simulation ont prouvé que l'aménagement intérieur du bâtiment et les surfaces extérieures ont un rôle efficace dans la réduction de la consommation totale d'énergie et l'augmentation de l'efficacité des matériaux à changement de phase, notamment en ce qui concerne la consommation d'énergie de refroidissement. Les résultats indiquent également que l'épaisseur de MCP économiquement optimale est égale à 10 mm pour tous les modèles. La réduction de la surface des fenêtres extérieures est suffisante pour rendre cette technologie très prometteuse, notamment d'un point de vue économique.

Chapitre 4 Effet de l'utilisation des MCP et les dispositifs d'ombrage sur les performances thermiques des bâtiments sous différents climats algériens. Une optimisation basée sur la simulation

Chapitre 4 Effet de l'utilisation des MCP et les dispositifs d'ombrage sur les performances thermiques des bâtiments sous différents climats algériens. Une optimisation basée sur la simulation.

1. Introduction

Indépendamment de son caractère esthétique, la conception extérieure du bâtiment joue un rôle important dans la réduction des besoins énergétiques. En particulier, de nombreuses études portent sur l'impact de l'utilisation de différentes stratégies d'ombrage sur les façades extérieures des bâtiments. Par exemple, l'ombrage avec des plantes est une stratégie de conception attrayante pour le contrôle solaire qui influence par la suite l'environnement extérieur d'un bâtiment, entraînant une économie d'énergie de la charge de refroidissement. En outre, de nombreux auteurs ont souligné l'importance d'utiliser le classique des dispositifs d'ombrage, ou des méthodes plus créatives, y compris celles qui contiennent des MCP (Silva et al., 2016; Al-Masrani et al., 2018; Kirimtat et al., 2019), pour une meilleure efficacité énergétique dans les bâtiments. Bien qu'il soit prévu que l'ombrage des espaces extérieurs du bâtiment affectera les performances des MCP et donc le comportement thermique du bâtiment dans son ensemble, cela n'a pas encore été résolu. D'un autre point de vue, il est très important de connaître l'étendue de l'impact des deux stratégies passives sur la consommation d'énergie, en particulier pendant les périodes météorologiques extrêmes, qui connaissent le fonctionnement permanent des systèmes CVC.

La revue de la littérature a montré que les performances des PCM dépendent de nombreux facteurs tels que la température de fusion, la plage de fusion, la chaleur latente de fusion, les caractéristiques de fonctionnement du système de climatisation, le point de consigne du thermostat, les gains de chaleur internes et le rayonnement solaire. En raison de cette diversité, les MCP développés pour une condition ou une zone climatique peuvent ne pas convenir à une autre. Cela peut entraîner une mise en œuvre non concluante ou l'échec complet d'une technologie potentielle. L'objectif de cet article est donc d'évaluer les performances thermiques des bâtiments flottants (modèles ombragés / non ombragés) sous différents climats algériens. En outre, l'étude examinera l'impact de l'utilisation de dispositifs d'ombrage classiques et de panneaux PCM commerciaux sur les économies d'énergie totales lorsque le système CVC fonctionne conformément au confort thermique BS EN 15251: 2007 (Cat.3) pendant les périodes météorologiques extrêmes. Pour déterminer le point de fusion PCM optimal en fonction de la conception du bâtiment et des conditions aux limites extérieures, une approche d'optimisation unidimensionnelle est proposée en combinant Energyplus et l'outil GenOpt.

2. Méthodologie

2.1 Description du modèle numérique

La modélisation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel de simulation énergétique dynamique de bâtiment EnergyPlus v8.8 (Crawley et al., 2001). Peu de programmes de simulation de bâtiments entiers peuvent traiter le comportement thermique dynamique de l'enveloppe du bâtiment avec des MCP tels que EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r et BSim (AL-Saadi et Zhiqiang, 2013). EnergyPlus développé par le département américain de l'énergie (US DOE) est largement utilisé pour les simulations énergétiques de bâtiments entiers, où sa capacité à modéliser les MCP à l'aide d'un algorithme de solution Conduction Finite Difference (CondFD). L'algorithme CondFD discrétise les couches de l'enveloppe du bâtiment en différents nœuds et résout numériquement les équations de transfert de chaleur en utilisant une méthode de différence finie (FDM). Le logiciel offre à l'utilisateur la possibilité de choisir entre le schéma de Crank-Nicolson ou totalement implicite pour la simulation numérique (EnergyPlus Input Output Reference, 2017; EnergyPlus Engineering Reference, 2017).

Le schéma de différence finie entièrement implicite, couplé à une fonction enthalpie – température pour tenir compte de l'énergie de changement de phase a été adopté dans la présente étude. Ce modèle a été amélioré par Tabares Velasco et al. (2012). Il s'agit d'une version modifiée de la méthode d'enthalpie développée par Pedersen et al. (2007). L'équation (4.1) représente la méthode de calcul du schéma entièrement implicite utilisé dans EnergyPlus: (EnergyPlus Engineering Reference, 2017)

$$C_{p}\rho\Delta x \frac{T_{i}^{j+1} - T_{i}^{j}}{\Delta t} = k_{W} \frac{\left(T_{i+1}^{j+1} - T_{i}^{j+1}\right)}{\Delta x} + k_{E} \frac{\left(T_{i-1}^{j+1} - T_{i}^{j+1}\right)}{\Delta x} \dots \dots \dots (4.1)$$

Avec :

$$k_{W} = \frac{\left(k_{i+1}^{j+1} + k_{i}^{j+1}\right)}{2}$$
$$k_{E} = \frac{\left(k_{i-1}^{j+1} + k_{i}^{j+1}\right)}{2}$$
$$k_{i} = k\left(T_{i}^{j+1}\right)$$

Dans plusieurs études de recherche axées sur les produits de panneaux de construction améliorés par MCP, EnergyPlus a été utilisé pour analyser leurs performances thermiques et énergétiques à l'échelle de l'ensemble du bâtiment. En général, les études ont rapporté un accord relativement bon entre les résultats de la simulation et les données des tests (Kośny, 2015). Par exemple, EnergyPlus et les performances du module MCP ont été vérifiés par Morshed Alam et al. (2014) à partir des expériences rapportées par Kuznik and Virgone (2009). Tabares Velasco et al. (2012) recommandent des directives de modélisation pour l'utilisation du module MCP dans EnergyPlus. Pour une

modélisation précise, le pas de temps doit être réglé à 3 min (20 pas de temps par heure) avec une discrétisation de noeud de 3.

2.2 Caractérisation du MCP

Le MCP sélectionné comme matériau de référence pour construire des courbes h-T pour ce travail est le RT-27. Ce MCP est macro-encapsulé organique dans des plaques rigides en aluminium (panneaux CSM de 5 mm et 10 mm d'épaisseur), qui est disponible dans le marché chez Rubitherm (Rubitherm Technologies GmbH). Un modèle analytique sous forme de fonction sigmoïdale a été utilisé pour représenter les courbes h-T dans l'étude actuelle en utilisant l'équation (4.2), où il a déjà été utilisé dans des études antérieures (Dolado et al., 2012; Mazo et al., 2015) et validé à l'aide de résultats expérimentaux (Dolado et al., 2012) basés sur la méthode de T-history (Zhang and Jiang, 1999; Hong et al., 2004).

$$h(T) = h_0 + c_p \cdot (T - T_0) + \frac{h_m}{1 + e^{\left(\frac{T - T_m}{\Delta T_m}\right)}} \dots (4.2)$$

Où:

 C_p : capacité thermique du MCP, h_m : enthalpie à changement de phase,

 T_m : température à changement de phase, ΔT_m : plage de température, h_0 : enthalpie à la température de référence T_0 .

Les valeurs des paramètres de mesure prises à la courbe h_T analytique approximative de RT-27 comme mentionné dans (Mazo et al., 2015) sont:

$$h_m = 170 \ KJ/kg, T_m = 27^{\circ}C, \Delta T_m = 0.9^{\circ}C, C_p = 3 \ KJ/(kg \ K), \rho = 752 \ kg/m^3, k = 0.16 \ W/(m \ K).$$

Cette mise à l'échelle de la courbe interpole les points de droite à gauche tout en conservant la même forme. Courbes hypothétiques h-T en fonction des températures de fusion approchées comme le montre la figure 4.1.



Figure 4.1 Courbes d'enthalpie-température approximatives en fonction des différentes températures de pointe de fusion.

2.3 Approche d'optimisation

Un programme d'optimisation générique (GenOpt v3.1.1) a été sélectionné en raison de ses capacités de minimisation d'une fonction de coût évaluée en couplant tout programme de simulation externe (Wetter, 2001), tel que SPARK, EnergyPlus, DOE-2, TRNSYS, etc. De plus, il a été constaté qu'en plus de l'environnement MATLAB, GenOpt est l'outil le plus couramment utilisé dans l'optimisation des bâtiments (Nguyen et al., 2014). Ainsi, il est flexible à de nombreuses fins dans la simulation de performances de construction, y compris les enveloppes de construction améliorées par MCP avec une complexité acceptable (Soares et al., 2014; Saffari et al., 2017). Les problèmes de minimisation représentent une fonction objective, telle que la consommation annuelle d'énergie, la demande électrique de pointe ou le pourcentage prévu de personnes insatisfaites (valeur PPD) (Wetter, 2001), lié aux paramètres de conception qui peuvent être formellement déclarés comme suit:

$$\min_{x \in X} f(x) \dots (4.3a)$$
$$X \triangleq \left\{ x \in \mathbb{R}^n \mid 1^i \le x^i \le u^i; i \in \{1, \dots, n\}; l^i, u^i \in \mathbb{R} \cup \{\pm \infty\}, \forall i \} \dots (4.3b) \right\}$$

Avec :

 $f = \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ est la fonction objective, $x \in X \subset \mathbb{R}^n$ est l'ensemble des paramètres de conception, X est l'ensemble possible pour x, $l \in \mathbb{R}^n$ est la borne inférieure, et $u \in \mathbb{R}^n$ est la limite supérieure des options de conception.

Dans la littérature actuelle, la fonction objective à minimiser pour chaque climat est basée sur les économies d'énergie de la configuration de bâtiments proposée améliorée avec des panneaux MCP. En effet, pendant la période de refroidissement, la technologie MCP avec des propriétés thermophysiques spécifiques qui peut être très utile pour économiser de l'énergie et en même temps peut ne pas affecter ou provoquer des effets néfastes pendant la période de chauffage. Sur cette base, pour réaliser une étude comparative afin de trouver un point de fusion de MCP optimal, trois scénarios d'optimisation différents ont été envisagés pour optimiser la performance énergétique des bâtiments. Dans les premier et deuxième scénarios, la fonction objective à minimiser (équation (4.4) et (4.5)) pour chaque configuration est basée sur la demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement en hiver et en été, séparément. Concernant le troisième scénario, la fonction objectif a été formulée (équation (4.6)) pour minimiser à la fois la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement en hiver et en été.

$$f_{c}(x) = Q_{cool}(x)....(4.4)$$
$$f_{h}(x) = Q_{heat}(x)...(4.5)$$
$$f_{tot}(x) = Q_{total}(x)...(4.6)$$

Concernant les paramètres de conception, seule la température de fusion de MCP a été considérée pour l'optimisation. Lors du réglage de la courbe h-T du MCP de référence dans EnergyPlus, différentes courbes h-T sont créées et introduites de manière itérative dans le logiciel de simulation chaque fois qu'une nouvelle température est analysée. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la courbe h-T optimale soit déterminée comme indiqué sur la Figure 4.2. Pour mettre en œuvre cette méthode, les valeurs h-T ont été écrites sous la forme d'une série de fonctions continues. Pour que tous les points soient liés en termes de T_m à partir de la température de référence du MCP, la mise à l'échelle interpole les points de droite à gauche dans une plage illimitée tout en conservant la même forme que celle illustrée à la figure 4.1. Cela a été implémenté dans la phase de prétraitement de l'optimisation (équation (4.7)).

$$T \triangleq = \left\{ T_{opt} \in \mathbb{R}^n \mid T_{\min}i \le T_{opt}i \le T_{\max}i, i \in \{1, \dots, n\} \right\} \dots \dots \dots (4.7)$$

Avec :

 $20 \le T_{\min} < T_{\max} \le 28$, et $T_{opt} = T_{ref} \pm R$.

T est l'ensemble des températures de fusion maximales de MCP optimales, $(T_{opt}), T_{min}$ et T_{max} sont les températures minimales et maximales autorisées pour le point de fusion MCP.



Figure 4.2 Boucle de couplage enthalpie-température appliquée au processus d'optimisation.

Mentionnant que l'algorithme de Hooke-Jeeves avec des évaluations de fonction de coût de précision adaptative utilisant l'algorithme GPS avec plusieurs points de départ a été choisi pour minimiser les fonctions de coût dans le présent article (Wetter, 2016). Plus de détails concernant les avantages de cet algorithme ont été précédemment discutés par Saffari et al. (2017).

2.4 Caractérisation des climats algériens

L'Algérie est située dans la zone subtropicale de l'Afrique du Nord. Son climat varie selon les régions (Nord-Sud, Est-Ouest). Il est de type méditerranéen sur toute la frange nord qui comprend le littoral et l'Atlas talien (étés chauds et secs, hivers humides et frais), semi-aride sur les hauts plateaux du centre du pays, et désertique dès que l'on traverse la chaîne de l'Atlas saharien (National office of Meteorology). Dix villes différentes d'Algérie situées dans quatre zones climatiques différentes ont été sélectionnées pour la simulation. Le tableau 4.1 résume la classification de Köppen–Geiger (Kottek et al., 2006), la description de l'emplacement et des climats des différentes villes sélectionnées pour cette étude. Il est à noter que les fichiers météorologiques fournis par le programme meteonorm 7.3 ont été utilisés dans l'étude de simulation. Certaines données climatiques pour les régions sont jointes à l'annexe 2.

City	Latitude	Lon	gitude	Time zone	Elevation	Climate	CDD base	HDD base
5			0	(GMT)	[m]	zone	10°C	18°C
Alger	N 36° 45'	Е	3° 0'	+0.0	116	Csa	2891	1004
Constantine	N 36° 16'	Е	6° 37'	+1.0	694	Csa	2469	1620
Tlemcen- Zenata	N 35° 0'	W	1° 27'	+1.0	247	Csa	2906	992
Batna	N 35° 32'	Е	6° 10'	+1.0	1052	BSk	2516	1762
El Bayad	N 33° 39'	Е	1° 0'	+1.0	1341	BSk	2583	1886
Aïn Sefra	N 32° 45'	W	0° 36'	+0.0	1058	BWk	3605	1141
Bou Saâda	N 35° 19'	Е	4° 11'	+1.0	461	BWk	4339	821
Bechar	N 31° 37'	W	2° 13'	+1.0	772	BWh	4417	810
Ouargla	N 31° 54'	Е	5° 24'	+1.0	141	BWh	5028	611
Tamanrasset	N 22° 46'	Е	5° 31'	+1.0	1377	BWh	4657	368

Tableau 4.1 Emplacements sélectionnés et caractéristiques climatiques.

2.5 Description du bâtiment simulé

Le bâtiment de base est une salle rectangulaire de plain-pied (8 m de large \times 6 m de long \times 3 m de haut), sans cloisons internes. La pièce dispose de quatre fenêtres à simple vitrage sur le mur sud, avec un rapport fenêtre-mur de 25%. Une porte creuse en bois (1 \times 1.5 m) au centre se trouve sur la façade nord. Le deuxième prototype est exactement le même que le cas de base, sauf qu'un surplomb et des ailettes opaques sont ajoutés au mur sud dans le but d'ombrager les fenêtres externes comme indiqué sur figure 4.3(a). Les matériaux de construction utilisés dans les simulations sont ceux qui sont largement utilisés dans les modèles de construction légère en Algérie (RETA). De plus, les fenêtres utilisées dans les prototypes sont également similaires à l'utilisation courante dans les bâtiments algériens, qui se composent principalement de fenêtres à simple vitrage avec des cadres en bois (figure 4.3(b)), et ont été décrites à l'aide du logiciel programme Window 7.6 (WINDOW 7 User Manual). Les détails de construction, la description des fenêtres et des portes du modèle par cas sont présentés dans les tableaux 4.2 à 4.6.



Figure 4.3 (a) Vue en perspective de modèle de bâtiment avec les dispositifs d'ombrage et (b) description de la fenêtre.

Élément	Épaisseur [m]	<i>k</i> [W/m K]	ρ [kg/m³]	C _p [J/kg K]	$R [m^2 K/W]$
Mortier de ciment	0.025	1.40	2200	940	0.0178
Brique creuse 10	0.100	0.70	1600	840	0.1428
Lame d'air	0.013	-	-	-	0.1500
Brique creuse 10	0.100	0.70	1600	840	0.1428
Plâtre	0.015	1.20	1800	840	0.0125

Tableau 4.2 Composition du mur extérieur.

Tableau 4.3 Composition du toit.

Élément	Épaisseur [m]	<i>k</i> [W/m K]	ρ [kg/m ³]	C _p [J/kg K]	$R [m^2 K/W]$
Mortier de ciment	0.025	1.40	2200	940	0.0178
EPS	0.050	0.04	25	1380	1.2500
Béton	0.200	1.70	2500	840	0.1176
Plâtre	0.015	1.20	1800	840	0.0125

Tableau 4.4 Composition du sol.

Élément	Épaisseur [m]	<i>k</i> [W/m K]	ρ [kg/m³]	C _p [J/kg K]	R [m ² K/W]
Béton	0.050	1.70	2500	840	0.0294
EPS	0.050	0.04	25	1380	1.2500
Béton	0.150	1.70	2500	840	0.0882
Mortier + Sable	0.030	1.15	1900	950	0.0261
Carrelage	0.020	6.14	2300	700	0.0032

Tableau 4.5 Description des fenêtres.

Type de données optiques	Moyenne spectrale
Épaisseur [m]	0.00325
Transmission solaire à incidence normale	0.589606
Réflectance solaire frontale à incidence normale	0.06115466
Réflectance solaire arrière à incidence normale	0.05966994
Transmission visible à incidence normale	0.819852
Réflectance visible sur la face avant à incidence normale	0.076154
Réflexion visible sur la face arrière à incidence normale	0.075586
Transmission infrarouge à incidence normale	0
Émissivité hémisphérique infrarouge avant	0.84
Émissivité hémisphérique infrarouge arrière	0.84
Conductivité thermique [W/m K]	1
Propriété de la fenêtre	Cadre et séparateur
Largeur du cadre [m]	0.07
Conductance du cadre [W/m ² K]	3.54
Absorption solaire du cadre	0.9
Absorption visible du cadre	0.9
Émissivité hémisphérique thermique du cadre	0.9

Tableau 4.6 Composition de la porte.

Élément	Épaisseur [m]	<i>k</i> [W/m K]	$\rho [kg/m^3]$	C _p [J/kg K]	R [m ² K/W]
Hard wood 1 / 8 IN	0.004	0.16	721	1255	0.1428
Lame d'air	-	-	-	-	0.1604
Hard wood 1 / 8 IN	0.004	0.16	721	1255	0.1428

Le bâtiment est occupé par quatre personnes pendant la journée en activité sédentaire avec un taux métabolique constant de 1.2 rencontré (126 W/personne). Une valeur de vêtements de 0.5 (Clo) et 1 (Clo) pour la période estivale et hivernale, respectivement, et une valeur constante pour la vitesse de l'air (v) égale à 0.15 m/s sont supposées. La charge thermique due à l'équipement et à l'éclairage est de 200 W et 120 W au maximum, respectivement. La figure 4.4 montre les horaires quotidiens d'occupation, d'éclairage et d'équipement, tout au long de l'année. Une valeur constante pour le taux d'infiltration de 0.5 renouvellement d'air / heure est prise en compte dans la simulation.



Figure 4.4 Horaires d'occupation, d'éclairage et d'équipement.

2.6.1 Système CVC

Pour atteindre le confort souhaité dans les bâtiments simulés, le système CVC de charges idéales sans plénum a été sélectionné (EnergyPlus Input Output Reference, 2017; EnergyPlus Engineering Reference, 2017). Le principal avantage de ce système est qu'il peut être utilisé pour calculer les charges sans modéliser un système CVC complet. Ce système fournit un air chaud et froid idéal et c'est un système à air convectif à 100% avec un taux d'efficacité égal à 100% sans limitation de capacité afin de répondre aux contrôles spécifiés (Saffari et al., 2016). De plus, les horaires on/off peuvent être spécifiés pour contrôler la disponibilité du chauffage et du refroidissement. Il existe des commandes en option pour la déshumidification, l'humidification, l'économiseur et la récupération de chaleur (EnergyPlus Input Output Reference, 2017). Afin d'établir un refroidissement ou un chauffage progressif de la salle des modèles, en restant à la marge de température de fusion du MCP pour bénéficier au maximum des processus de charge/décharge de chaleur dans le domaine du confort thermique, les valeurs comprises entre [18-40°C] ont été sélectionnés pour la température minimale et maximale de l'air respectivement. De plus, un contrôle constant du taux d'humidité de l'alimentation a été spécifié pour la déshumidification et l'humidification. Trois scénarios ont été envisagés dans le fonctionnement du CVC (hiver seulement, été seulement, été et hiver). Il convient de noter que le système de climatisation fonctionne 24 heures par jour pendant les périodes spécifiées. Le tableau 4.7 montre le calendrier d'activation/désactivation pris en compte dans les opérations mensuelles de CVC.

Tableau 4.7 Contrôle mensuel du système CVC.

Fonctionnement du système CVC	Toujours ON	Toujours OFF
Scénario 1 (hiver uniquement)	1/11 au 28/2	1/3 au 31/10
Scénario 2 (été uniquement)	1/6 au 30/9	1/10 au 31/5
Scénario 3 (hiver & été)	(1/11 au 28/2) & (1/6 au 30/9)	(1/3 au 31/5) & (1/10 au 31/10)

2.6.2 Confort thermique et fonctionnement du point de consigne du thermostat

Le confort thermique décrit la sensation synthétisée de l'état thermique du corps (Holopainen, 2012), et a été défini par l'ASHRAE comme: «l'état d'esprit dans lequel la satisfaction s'exprime avec l'environnement thermique» (ANSI/ASHRAE Standard 55-2013). Le confort thermique est étroitement lié à l'équilibre thermique du corps, principalement lié aux paramètres environnementaux et personnels (Zhang, 2003). Les paramètres environnementaux sont la température de l'air, la température moyenne du rayonnement, la vitesse relative de l'air et l'humidité relative. Les paramètres personnels sont le niveau d'activité ou le taux métabolique et la résistance thermique des vêtements. Le confort thermique peut être mesuré par différentes méthodes telles que: la théorie du confort thermique adaptatif (ADT), la température opératoire (Toperative), le modèle de vote moyen prédit par Fanger (PMV) (EnergyPlus Input Output Reference, 2017; EnergyPlus Engineering Reference, 2017), la sensation thermique de Zhang et le modèle de confort thermique (Zhang, 2003) ect.

La méthode largement utilisée est le modèle PMV de Fanger développé en 1970 (Fanger, 1970), qui est basé sur un modèle de bilan thermique, également appelé modèle «statique» ou «à constance». La méthode PMV combine quatre variables physiques (température de l'air, vitesse de l'air, température moyenne du rayonnement et humidité relative) et deux variables personnelles (isolation des vêtements et niveau d'activité) en un indice qui peut être utilisé pour prédire la sensation thermique moyenne d'un grand groupe de personnes dans un espace (Holopainen, 2012).

L'indice PMV est calculé avec l'équation (4.8):

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \begin{cases} (M''-W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5773 - 6,99(M''-W) - p_a] \\ -0,42 \cdot [(M''-W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M''(5867 - p_a) \\ -0,0014M''(34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \\ \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\overline{t_r} + 273)^4] - f_{cl}h_c (t_{cl} - t_a) \end{cases}$$
.....(4.8)

où M " est le taux de génération de chaleur métabolique, W est le travail externe (égal à zéro pour la plupart des activités), p_a est la pression partielle de vapeur d'eau, f_{cl} est le facteur de surface des vêtements (rapport de la surface habillée/la surface nue), t_a est le température de l'air ambiant, $\overline{t_r}$ est

la température radiante moyenne, h_c est le coefficient de transfert de chaleur par convection et t_{cl} est la température de surface des vêtements.

L'indice de pourcentage prévu d'insatisfaction (PPD) est une mesure quantitative du confort thermique d'un groupe de personnes dans un environnement thermique particulier, développé également par Fanger qui est lié au PMV tel que défini dans l'équation 4.9 et illustré sur la figure 4.5.



$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2) \dots (4.9)$$

Figure 4.5 Pourcentage estimé d'insatisfaits (PPD) en fonction du vote moyen prévu (PMV).

Selon la norme ISO 7730 (EN ISO 7730, ISO 7730: 2005), le PMV est dérivé pour des conditions de régime permanent, mais il peut être appliqué avec une bonne approximation lors de fluctuations mineures d'une ou plusieurs des variables, à condition que les moyennes pondérées dans le temps des variables au cours de la précédente période d'heure sont appliquées. Il est également recommandé d'utiliser l'index PMV uniquement pour (Holopainen, 2012):

- Valeurs PMV entre -2 et +2

- Valeurs de taux de génération de chaleur métabolique entre 46 W/m^2 et 232 W/m^2 (0.8 rencontré et 4 rencontré)

- Résistance thermique des vêtements entre 0 clo et 2 clo
- Température de l'air ambiant entre 10°C et 30°C
- Température radiante moyenne entre 10°C et 40°C
- Vitesse relative de l'air entre 0 et 1 m/s.

Pour obtenir un confort thermique dans le bâtiment simulé avec un fonctionnement à point de consigne de thermostat selon un modèle Fanger au lieu de régler une température fixe pour le

chauffage et le refroidissement, les valeurs PMV ont été sélectionnées pour un environnement thermique acceptable pour le confort général (-0.5 <PMV <0.5) (ANSI/ASHRAE Standard 55-2013). L'algorithme EnergyPlus Fanger lit les valeurs PMV d'entrée horaires, les valeurs de vêtements pour la période estivale et hivernale, la vitesse de l'air (v) et le niveau d'activité (taux métabolique) pour contrôler automatiquement le fonctionnement du point de consigne du thermostat (EnergyPlus Input Output Reference, 2017; EnergyPlus Engineering Reference, 2017), conduisant à une plage de confort thermique de [20-27°C], classé Cat.3 dans la norme européenne BS EN 15251-2007 (BS EN 15251:2007) pendant le fonctionnement du système CVC. Cette norme est similaire à ASHRAE 55-2010, mais avec des courbes légèrement différentes de la température de fonctionnement intérieure et des limites d'acceptabilité (EnergyPlus Engineering Reference, 2017). De plus, dans la catégorie 3 du confort thermique, la plage de températures pour le chauffage et le refroidissement peut être dédiée à un niveau d'attente acceptable et modéré et peut être utilisée pour les bâtiments existants (EnergyPlus Engineering Reference, 2017; BS EN 15251:2007).

Le tableau 4.8 indique les valeurs PMV (24 heures) pour chaque scénario de fonctionnement du système CVC, afin d'étudier l'effet du MCP sur l'économie d'énergie.

Tableau 4.8 Calendriers des valeurs PMV mensuels.

Mois	Déc.	Jan.	Fév.	juin	Juil.	Aout		
Valeurs de PMV	-0.5	-0.5	-0.5	+0.5	+0.5	+0.5		
Scénario 1	Ch	Chauffage unique en hiver						
Scénario 2					efroidissement	unique en été		
Scénario 3	Chauffage et refroidissement pour l'hiver et l'été					té		

3. Résultats et discussion

3.1. Analyse système incontrôlée

D'une manière générale, il est très important d'étudier l'utilisation de stratégies passives en flottement libre, ce qui permet d'évaluer le confort thermique à différentes saisons de l'année du modèle de bâtiment. De plus, il permet une conception optimale du bâtiment du point de vue architectural et technique. Cela permet d'améliorer les conditions thermiques intérieures et ainsi de réduire la taille et les besoins énergétiques des systèmes de climatisation. Par conséquent, cette section est consacrée à une étude comparative du rapport de confort thermique de différents modèles dans chaque zone climatique en flottement libre. Le seul MCP utilisé dans tous les prototypes est le RT27 et la plage de confort thermique se situe entre 18°C et 27°C aux limites inférieures et supérieures, respectivement.

La figure 4.6 montre l'effet du MCP et de l'ombrage appliqué aux fenêtres, dans le rapport de temps où la température intérieure des bâtiments est dans la plage de confort, pendant une année entière. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence significative dans les proportions, où les bâtiments avec MCP et dispositifs d'ombrage représentent les performances idéales du modèle dans la plupart des zones. Le bâtiment ombragé avec MCP à Tlemcen et à Alger représente le nombre d'heures le plus élevé dans la fourchette de confort thermique de 59.11% et 56.53%, respectivement. Cela prouve que les bâtiments légers conviennent mieux dans ces villes que dans d'autres zones. Dans les zones désertiques arides, le MCP n'a pas d'effet ou peut jouer un rôle négatif dans le modèle de

construction simple, tandis que les dispositifs d'ombrage jouent un rôle assez efficace dans l'amélioration du confort thermique des bâtiments par rapport à d'autres zones. Ces zones sont connues pour avoir un rayonnement solaire élevé toute l'année. Dans la ville de Tamanrasset par exemple, le rapport de temps dans le confort thermique du modèle de bâtiment ombragé est de 46.98% avec une différence allant jusqu'à 7.24% par rapport à un modèle simple. Le bâtiment simple avec MCP représente le modèle idéal à Batna, Aïn Sefra et Al Bayad, en particulier dans ce dernier où la différence est de 3.59% par rapport à un modèle avec des dispositifs d'ombrage.



Figure 4.6 Pourcentage annuel de temps passé dans les conditions de confort thermique de chaque modèle de bâtiment.

Pour clarifier davantage les résultats, la réponse thermique des modèles de bâtiment doit être fournie en comparant le rapport de confort thermique de chaque saison séparément, comme le montre la figure 4.7. En automne, le rapport de confort thermique est élevé dans la plupart des zones, en particulier dans les villes au climat méditerranéen (classification Köppen-Geiger Csa). Le ratio de temps à l'intérieur de la plage de confort le plus élevé est enregistré à Tlemcen estimé à 78.24% dans le modèle ombré avec MCP. Dans un autre contexte, le MCP joue un rôle négatif dans les zones climatiques froid-sec et chaud-sec (classification Köppen-Geiger BWk et BWh) pendant cette période, car la température élevée de l'air extérieur et le rayonnement solaire pendant la journée font fondre rapidement le MCP, et l'absence de système de refroidissement ou de ventilation pour accélérer l'accès à l'état de solidification rend le MCP défavorable dans ce cas. Aussi, dans cette période, le bâtiment ombragé représente le modèle idéal, où le taux de confort thermique à Tamanrasset atteint 67.29% avec une différence de 3.98% et 20.66% par rapport au modèle ombragé et non ombragé avec MCP, respectivement. Par conséquent, les résultats confirment l'importance de l'utilisation des dispositifs d'ombrage sur les bâtiments de toutes les régions au cours de cette saison.

En hiver, le pourcentage de confort thermique est au plus haut niveau dans la plupart des régions, à l'exception des villes de Constantine, Batna et El Bayad, en raison des basses températures et de

l'intensité du rayonnement solaire. Dans la ville d'El Bayad par exemple, la température de l'air extérieur le 13 janvier atteint -13.13°C la nuit, avec une température maximale de seulement 6.46°C et 632.75 W/m² de rayonnement solaire direct pendant la journée. Dans l'ensemble, cette ville se caractérise par des hivers très froids, où la température quotidienne moyenne et le rayonnement solaire direct pendant l'hiver ne dépassent pas respectivement 5.66°C et 216.15 W/m². Ces conditions expliquent le faible pourcentage de temps de confort thermique dans ces zones, ce qui rend le MCP à l'état solide pendant de longues périodes en hiver. Contrairement aux zones désertiques arides où presque tous les modèles sont dans la plage de confort thermique au cours de cette saison, en particulier dans les bâtiments sans dispositifs d'ombrage, où ces zones sont connues pour avoir un rayonnement solaire élevé et des températures de l'air relativement élevées, dans la plage de confort thermique, permettant au MCP d'atteindre leur plage de fusion et lui permet de stocker l'énergie thermique et de la rejeter pendant la nuit ou lors des fluctuations climatiques quotidiennes. Dans la ville de Ouargla, le confort thermique dans le modèle simple avec MCP atteint 93.70% avec une différence de 2.82% par rapport au modèle simple. Le pourcentage d'heures dans la gamme de confort thermique est de 97.96% dans la ville de Tamanrasset pour le même modèle par différent de 2.04% du modèle simple. Il est à noter que les dispositifs d'ombrage jouent un rôle négatif en saison hivernale dans toutes les régions, dans une moindre mesure dans les villes de Ouargla et de Tamanrasset.

Au printemps, les résultats indiquent que le bâtiment avec des dispositifs d'ombrage représente le modèle approprié dans la plupart des régions avec un avantage modeste lors de l'ajout de MCP. Le confort thermique est élevé dans toutes les régions du climat méditerranéen et du climat de steppe (classification Köppen-Geiger BSk) en raison des conditions météorologiques appropriées dans ces régions. De 72.10% à 84.37%, ce qui représente le pourcentage inférieur et supérieur de confort thermique des bâtiments à Alger. Dans les zones classées froid-sec, le temps dans la plage de confort thermique est plus faible, atteignant 62.27% à Aïn Sefra et 49.55% à Bou Saâda dans le bâtiment ombragé avec MCP. Il en est de même dans les zones désertiques chaudes mais à un rythme moindre, notamment dans la région de Ouargla et de Tamanrasset. Le ratio dans la zone de confort thermique de la ville de Ouargla ne dépasse pas le seuil de 29.80% dans le modèle ombré avec MCP, avec une grande différence avec le modèle simple avec MCP jusqu'à 18.66%, ce qui prouve l'utilisation inefficace du MCP, et le besoin d'utiliser des dispositifs d'ombrage dans de telles conditions climatiques.

D'autre part, en été, tous les modèles de bâtiments sont complètement en dehors de la plage de confort dans les régions désertiques chaudes, tandis que le bâtiment ombragé sans MCP est le meilleur modèle dans les autres régions, avec de très petites proportions en raison des températures élevées et du rayonnement solaire. Cette saison de l'année, seulement 13.81% dans la commune d'El Bayad, soit une différence de 5.62% par rapport au bâtiment simple avec MCP, qui représente le pire modèle. Enfin, les résultats confirment que les MCP jouent un rôle négatif dans des conditions de chaleur extrême, nécessitant l'utilisation du système CVC. Cela améliorera les performances du MCP et donc l'exploitera dans l'économie d'énergie.



Figure 4.7 Pourcentage saisonnier du temps passé dans les conditions de confort thermique de chaque modèle de bâtiment.

3.2 Refroidissement unique pour la période estivale

La plupart du temps, le principal avantage de l'utilisation du MCP en été est de décaler et de réduire la demande d'énergie de pointe, et la conception aléatoire de la face sud peut entraîner une surchauffe des bâtiments pendant cette période. Dans cette section, le tableau 4.9 présente les performances énergétiques de refroidissement pendant la période estivale des prototypes des bâtiments dans différentes régions climatiques. Les résultats montrent que les MCP jouent un rôle positif dans la réduction de la consommation d'énergie dans tous les cas. Par exemple, à Constantine, les MCP permettent une réduction de l'énergie de refroidissement de 8.41% dans le modèle simple, tandis que le ratio dans le modèle ombré avec MCP atteint 6.34%.

En outre, diverses conditions environnementales extérieures autour du bâtiment font une différence dans la quantité de consommation d'énergie et le modèle approprié de zone climatique à l'autre. Le bâtiment dans les climats méditerranéens et steppiques est le moins énergivore avec des valeurs proches, et le prototype ombré avec MCP est le modèle idéal dans toutes les villes de ces régions. À Alger, par exemple, la consommation atteint 1112.60 kWh dans le bâtiment ombragé avec MCP pendant la période estivale, car l'utilisation du MCP dans ce modèle réduit la consommation d'énergie de 7.12% et jusqu'à 31.22% par rapport au modèle simple. De plus, l'utilisation de dispositifs d'ombrage dans cette zone climatique est de la plus haute importance, tandis que le modèle ombré même sans l'utilisation de MCP économise la consommation d'énergie dans des

proportions allant jusqu'à 21.78% et 25.94% à Alger, 15.85% et 21.64% à Batna, comparé au modèle simple avec ou sans utilisation des MCP, respectivement. Ceci peut s'expliquer par le fort gain de chaleur solaire dans les bâtiments non ombragés qui arrive à Alger à 862.74 kWh, alors qu'évalué à moins de la moitié de 413.40 kWh par rapport aux modèles avec fenêtres améliorées par ailettes latérales et surplomb. Cela contribue par la suite à repousser une grande quantité de rayonnement solaire transmis par les fenêtres et à réduire les charges radiatives et thermiques sur le mur sud pendant les périodes de jour.

Location	Modèle simple	Modèle simple avec MCP	Modèle ombré	Modèle ombré avec MCP
Alger				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	27.85
Consommation d'énergie [kWh]	1617.59	1531.46	1197.92	1112.60
Économie d'énergie [%]	-	5.32	-	7.12
Constantine				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	27.83
Consommation d'énergie [kWh]	1573.78	1474.56	1210.19	1114.08
Économie d'énergie [%]	-	6.30	-	7.94
Tlemcen-Zenata				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	28.00
Consommation d'énergie [kWh]	1577.83	1491.86	1218.74	1135.17
Économie d'énergie [%]	-	5.45	-	6.86
Batna				
Point de fusion optimale [°C]	-	27.94	-	27.78
Consommation d'énergie [kWh]	1517.03	1412.79	1188.79	1088.59
Économie d'énergie [%]	-	6.87	-	8.43
El Bayad				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	27.79
Consommation d'énergie [kWh]	1351.59	1262.22	1100.73	1015.87
Économie d'énergie [%]	-	6.61	-	7.71
Aïn Sefra				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	28.00
Consommation d'énergie [kWh]	2578.15	2474.34	2323.39	2221.65
Économie d'énergie [%]	-	4.03	-	4.38
Bou Saâda				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	28.00
Consommation d'énergie [kWh]	3612.76	3490.72	3255.93	3137.18
Économie d'énergie [%]	-	3.38	-	3.65
Bechar				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	28.00
Consommation d'énergie [kWh]	3153.63	3044.47	2957.30	2850.16
Économie d'énergie [%]	-	3.46	-	3.62
Ouargla				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	27.07
Consommation d'énergie [kWh]	4060.16	3923.19	3832.13	3701.84
Économie d'énergie [%]	-	3.37	-	3.40
Tamanrasset				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	28.00
Consommation d'énergie [kWh]	1532.20	1462.21	1551.69	1482.68
Économie d'énergie [%]	-	4.57	-	4.45

Tableau 4.9 Point de fusion optimale de MCP pour la consommation d'énergie de refroidissement en été.

La figure 4.8(b) montre la consommation d'énergie de refroidissement selon le modèle de confort thermique Fanger à Alger, pendant trois jours d'été typiques. Comme le montre la figure 4.8(a), la variation de température quotidienne et le rayonnement solaire influencent respectivement le flux de conduction thermique dans la paroi sud et le gain de chaleur à travers les fenêtres. Ce sont les principaux facteurs affectant la demande d'énergie de refroidissement. À travers les résultats, il s'avère que la demande de consommation d'énergie de refroidissement augmente progressivement dans tous les bâtiments pendant la journée, de sorte que les valeurs maximales atteignent les

températures maximales de l'air extérieur, puis diminue progressivement la consommation d'énergie surtout pendant la nuit, comme les MCP déplacer et économiser la demande d'énergie de pointe. Pendant les heures d'ensoleillement où la température de l'air extérieur est considérablement réduite, la consommation d'énergie de refroidissement pour les prototypes sans MCP est inférieure à celle des modèles avec MCP. Il est également évident que les dispositifs d'ombrage ont eu un impact positif sur l'économie d'énergie, en raison de la réduction significative du gain de chaleur solaire.



Figure 4.8 (a) transfert de chaleur à travers les murs sud en conjonction avec la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire et (b) gain de chaleur solaire et consommation d'énergie de refroidissement de chaque modèle de bâtiment. À Alger.

Les résultats de la simulation indiquent généralement que dans les zones désertiques et semidésertiques (classification BWk et BWh Köppen-Geiger), connues par des chaleurs extrêmes et des sécheresses tout au long de la période estivale, la demande de consommation d'énergie de refroidissement est doublée par rapport aux autres zones climatiques. Alors que le rôle des MCP diminue dans la réduction de la consommation d'énergie lors de la comparaison entre deux mêmes modèles (C.à.d., dans la même conception avec et sans MCP), bien que ces zones soient connues avec une large plage de températures diurnes, mais qu'il n'y ait pas suffisamment de différence de température entre le jour et la nuit, autoriser ou maintenir les MCP en état de solidification. Dans ce contexte, les MCP fournissent une quantité d'énergie assez faible à Aïn Sefra, à des taux de 4.03% et 4.38% dans les deux modèles non ombrés et ombrés, respectivement. Sans dépasser un seuil de 3% à Bou Saâda, Béchar et Ouargla. Cependant, les dispositifs d'ombrage jouent un rôle important dans la réduction de la consommation d'énergie, ainsi que dans l'amélioration de l'efficacité du MCP, car une grande quantité de rayonnement solaire dirigé vers le côté sud du bâtiment est bloquée tout au long de la journée. Les bâtiments ombragés avec MCP fournissent un ratio estimé de 13.83% et 8.82% de consommation d'énergie dans les villes d'Aïn Sefra et d'Ouargla, respectivement. Comme le montre la figure 4.9, l'impact des dispositifs d'ombrage est minime pour réduire le gain de chaleur solaire à travers les fenêtres et le transfert de chaleur depuis le mur sud de la ville de Ouargla, ce qui explique le déclin du rôle des MCP dans l'économie d'énergie par rapport à Alger au cours de la même période. Il est également évident que la demande d'énergie de refroidissement est doublée dans cette région climatique pour atteindre son maximum à la mi-journée du 21 juillet, en raison des températures élevées de l'air extérieur, qui culminent à 48.6°C ce jour-là. Comme on peut le voir sur la figure 4.9, il y a presque le même comportement de consommation d'énergie dans les deux modèles améliorés avec des MCP, de midi à tôt le matin, mais le MCP offre une meilleure performance thermique tout au long de cette période. Après cela, les modèles sans MCP consomment moins d'énergie jusqu'au matin, en raison de la réduction significative de la température de l'air extérieur, ce qui réduit la charge des climatiseurs pour maintenir le confort thermique du modèle Fanger.

La ville de Tamanrasset est une exception en termes de consommation d'énergie dans les zones désertiques arides à plusieurs égards. Le plus important est l'altitude à 1377 m, qui atténue les conditions drastiques de leur environnement saharien. Par exemple, la température moyenne de l'air extérieur en été ne dépasse pas 29.5°C à Tamanrasset, alors qu'elle est estimée à 33.4°C dans la ville de Béchar. Plus encore, la haute altitude augmente les écarts diurnes; en raison de la sécheresse et de la grande transparence de l'air, ce qui améliore l'efficacité du rayonnement solaire et accélère la perte de rayonnement la nuit (Leroux, 1991).



Figure 4.9 (a) transfert de chaleur à travers les murs sud en conjonction avec la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire et (b) gain de chaleur solaire et consommation d'énergie de refroidissement de chaque modèle de bâtiment. La ville de Ouargla.

En revanche, les MCP permettent une économie d'énergie considérable, notamment dans le bâtiment simple, qui est considéré comme le modèle idéal en fournissant un taux de 4.57% de consommation d'énergie par rapport au modèle de base. Contrairement à toutes les autres régions, l'effet des dispositifs d'ombrage n'est pas prometteur, probablement en raison de la conception des dispositifs d'ombrage (métriques de surplomb et d'ailettes) qui conduit à une rétention thermique indésirable. Comme le montre la figure 4.10, les dispositifs d'ombrage conduisent à une assez augmentation du transfert de chaleur dans le mur ombragé et du gain de chaleur par les fenêtres pendant la période de rayonnement solaire maximal, ceci augmente la consommation d'énergie pendant cette période, ce qui explique également le comportement de consommation d'énergie dans les prochaines heures, en particulier lors de la comparaison de modèles contenant des MCP.



Figure 4.10 (a) transfert de chaleur à travers les murs sud en conjonction avec la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire et (b) gain de chaleur solaire et consommation d'énergie de refroidissement de chaque modèle de bâtiment. À Tamanrasset.

Afin d'étudier plus en détail l'effet de la conception des dispositifs d'ombrage, dans la consommation d'énergie de refroidissement pendant la période estivale dans différentes zones climatiques, une optimisation basée sur la simulation multi-objectifs a été réalisée, pour connaître les métriques typiques des dispositifs d'ombrage, compte tenu de la largeur optimale de surplomb et d'ailettes, respectivement W_{oh} et W'_{fin} (équation (4.10a) et (4.10b)), en plus du point de fusion optimal T_m du MCP, en utilisant l'algorithme GPS Hooke-Jeeves, avec la même fonction objective que celle décrite précédemment.

$$W \triangleq = \left\{ W_{Oh} \in \mathbb{R}^{n} \mid W_{Oh,\min} \ i \le W_{Oh,\max} \ i, i \in \{1,...,n\} \right\}....(4.10a)$$
$$W' \triangleq = \left\{ W'_{fin} \in \mathbb{R}^{n} \mid W'_{fin,\min} \ i \le W'_{fin} \ i \le W'_{fin,\max} \ i, i \in \{1,...,n\} \right\}....(4.10b)$$

Où $0 \le W_{Oh,min} < W_{Oh,max} \le 1$, et $W_{Oh} = W_{ref} \pm R$. $0 \le W'_{fin,min} < W'_{fin,max} \le 0.3$, et $W'_{fin} = W'_{ref} \pm R$.

Où W, W est un ensemble de largeur optimale pour le surplomb et les ailettes, respectivement. $W_{Oh,\min}, W'_{fin,\min}$ et $W_{Oh,\max}, W'_{fin,\max}$ sont les valeurs de largeur minimale et maximale pour le surplomb et les ailettes.

Les résultats apparaissent comme le montre le tableau 4.10, que le point de fusion optimal du MCP n'est pas affecté par la conception de l'ombrage extérieur en façade sud du bâtiment sauf à Ouargla, où il augmente de 1°C. La façade sud ombragée, représente le modèle idéal selon l'étude précédente d'Alger. Alors que la largeur des dispositifs d'ombrage est légèrement diminuée à Bou Saâda, cependant, presque sans affecter la quantité de consommation d'énergie. Les zones à climat désertique chaud nécessitent une largeur de surplomb beaucoup plus faible, en particulier à Tamanrasset avec 0.34 m seulement. De plus, les ailettes latérales représentent un rôle négatif dans ces régions. Cela peut s'expliquer par la différence de vitesse et de direction du vent et du rayonnement solaire, qui est contrôlée par plusieurs facteurs tels que l'azimut et l'angle d'altitude solaire, la couverture du ciel, etc. qui varient d'une région à l'autre. Par conséquent, ces résultats nous donnent une alternative plus éco-énergétique, avec des taux allant jusqu'à 0.41% et 3.02% respectivement à Ouargla et Tamanrasset, par rapport au modèle original ombré.

Location Lar	Largeur optimale du	Largeur optimale des	Point de fusion	Consommation d'énergie
	surplomb [m]	ailettes [m]	optimale [°C]	[kWh]
Alger	1.00	0.30	27.87	1112.94
Bou Saâda	0.91	0.27	28.00	3136.08
Ouargla	0.76	0.08	28.00	3686.52
Tamanrasset	0.34	0.00	28.00	1437.95

Tableau 4.10 Largeur optimale pour les dispositifs d'ombrage et les températures de fusion de MCP pour réduire la consommation d'énergie en été.

Le point de fusion optimal des MCP se situe entre 27°C et 28°C indépendamment de la conception du bâtiment et du site climatique, comme indiqué dans les tableaux 4.9. Ainsi, fournissez une plage de fusion élevée, effectivement entre l'état de solidification et l'état de fusion (à partir de 25 à 28°C), compatible avec le modèle Fanger qui offre dans nos modèles une plage de confort thermique de 24°C à 27°C, lors des opérations de température de consigne de refroidissement du thermostat. En outre, la plage de fusion élevée facilite le chargement des MCP à des températures de l'air plus basses, et rend ainsi les MCP plus efficaces.

3. 3 Chauffage unique pour la période d'hiver

En hiver, le principal objectif de l'utilisation des MCP est de fournir un chauffage passif dans le bâtiment, en captant l'énergie solaire thermique tout au long de la journée et en la libérant la nuit lorsque la température baisse. Par conséquent, il est très logique que l'utilisation de dispositifs d'ombrage ait un effet négatif dans ces conditions. Là où les résultats apparaissent comme le montre le tableau 4.11. La demande de consommation d'énergie de chauffage augmente considérablement lorsque l'on compare les modèles ombrés et non ombragés, car le MCP dans ce cas permet une

réduction considérable de l'énergie varie d'une région climatique à l'autre, mais sans même atteindre le niveau du modèle de base. Par exemple, dans la ville de Constantine, la demande en énergie de chauffage atteint 1890.94 kWh dans le bâtiment ombragé, où les MCP permettent une réduction de 6.34% dans ce modèle, mais elle est plus consommée de 10.03% par rapport au modèle de base. Cela prouve l'effet très négatif des dispositifs d'ombrage même en présence de MCP.

En outre, le bâtiment simple amélioré avec des MCP est l'option de conception idéale dans toutes les régions, mais par rapport au modèle de base, les économies d'énergie varient en fonction de la demande d'énergie de chauffage. Où la demande de chauffage est plus faible dans les zones méditerranéennes et à climat froid-sec (classification Csa et BWk Köppen-Geiger) à l'exception de Constantine, où la demande d'énergie de chauffage dans cette ville est proche de la consommation d'énergie dans les zones climatiques semi-arides (BSk Classification Köppen-Geiger), qui représente les zones les plus demandées en énergie de chauffage, en particulier dans la ville d'El Bayad. Ces résultats peuvent s'expliquer par les différences de conditions climatiques d'un endroit à l'autre. Les zones chaudes du désert sont les moins consommatrices d'énergie, puisqu'elles ne dépassent pas 92 kWh dans la ville de Tamanrasset, où les MCP permettent le taux d'économie le plus élevé de 63.23%. Cette région est connue pour avoir des températures et un rayonnement solaire élevés pendant la journée, et des températures nocturnes plus basses que toutes les autres régions, la moyenne de la température de l'air extérieur et du rayonnement solaire est de 14.4°C et 666.20 W/m², ce qui explique la faible demande pour l'énergie de chauffage et les économies importantes réalisées par les MCP dans cette ville.

Concernant le point de fusion optimal, qui varie d'une région à l'autre pendant cette période, il est lié à l'environnement extérieur du bâtiment, qui détermine le comportement de consommation d'énergie pour établir le confort thermique selon le modèle de Fanger. Comme le montre le tableau 4.11, le point de fusion optimal du MCP dans les zones climatiques méditerranéennes se situe entre 19.45°C et 20.45°C et ne dépasse pas 18°C dans les zones semi-arides, alors qu'il est entre 19.51°C et 21.25°C régions à climat chaud-sec et froid-sec.

De plus, la variation des conditions climatiques semble imposer et affecter le stockage d'énergie. La figure 4.11. représente les opérations de température de consigne de chauffage du thermostat, dans un bâtiment non ombragé avec MCP à Tlemcen et à El Bayad. Il est clair que la demande d'énergie de chauffage est élevée et moins interrompue à El Bayad pour fournir un thermique à l'intérieur du bâtiment avec une moyenne de 21°C. Ainsi, le point de fusion des MCP qui convient à ces conditions thermiques doit être petit pour exploiter la moitié de la plage de fusion (du point de fusion à l'état liquide). Cela peut améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment et tirer davantage parti de la charge/décharge d'énergie par MCP pendant le fonctionnement des besoins de chauffage. En revanche, et durant cette saison, la consommation d'énergie à Tlemcen est bien moindre avec plus d'interruption, pour atteindre la même moyenne de température à l'intérieur du bâtiment. Comme dans l'espace indiqué sur la figure, la température moyenne dans le bâtiment atteint 22°C sans besoin de chauffage (du 16 au 24 décembre). Cela prouve que le point de fusion du MCP doit être sélectionné en tenant compte de la plage de confort thermique.



Figure 4.11 Point de consigne du thermostat pour le chauffage en période d'hiver à Tlemcen et El Bayad.

Tableau 4.11	Température d	e fusion optimale	de MCP pour la conso	mmation d'énergie	de chauffage en hiver.
	1	1	1	\mathcal{O}	\mathcal{O}

Location	Modèle simple	Modèle simple avec MCP	Modèle ombré	Modèle ombré avec MCP
Alger				
Point de fusion optimale [°C]	-	19.56	-	19.51
Consommation d'énergie [kWh]	594.65	466.85	807.14	696.97
Économie d'énergie [%]	-	21.49	-	13.65
Constantine				
Point de fusion optimale [°C]	-	19.81	-	20.45
Consommation d'énergie [kWh]	1593.27	1459.32	1890.94	1770.95
Économie d'énergie [%]	-	8.41	-	6.34
Tlemcen-Zenata				
Point de fusion optimale [°C]	-	20.31	-	19.88
Consommation d'énergie [kWh]	423.11	283.55	641.25	518.10
Économie d'énergie [%]	-	32.98	-	19.20
Batna				
Point de fusion optimale [°C]	-	18.75	-	18.56
Consommation d'énergie [kWh]	1782.90	1631.48	2153.47	2016.20
Économie d'énergie [%]	-	8.49	-	6.37
El Bayad				
Point de fusion optimale [°C]	-	18.94	-	18.50
Consommation d'énergie [kWh]	1847.91	1684.36	2266.14	2121.49
Économie d'énergie [%]	-	8.85	-	6.38
Aïn Sefra				
Point de fusion optimale [°C]	-	20.12	-	19.72
Consommation d'énergie [kWh]	749.56	592.91	1099.20	964.11
Économie d'énergie [%]	-	20.90	-	12.29
Bou Saâda				
Point de fusion optimale [°C]	-	19.95	-	19.48
Consommation d'énergie [kWh]	534.62	404.85	758.66	643.11
Économie d'énergie [%]	-	24.27	-	15.23
Bechar				
Point de fusion optimale [°C]	-	20.5	-	19.97
Consommation d'énergie [kWh]	395.84	258.80	686.40	567.36
Économie d'énergie [%]	-	34.62	-	17.34
Ouargla				
Point de fusion optimale [°C]	-	20.94	-	20.6
Consommation d'énergie [kWh]	167.90	76.33	356.52	245.23
Économie d'énergie [%]	-	54.54	-	31.21
Tamanrasset				
Point de fusion optimale [°C]	-	21.25	-	20.92
Consommation d'énergie [kWh]	91.98	33.82	287.92	182.81
Économie d'énergie [%]	-	63.23	-	36.51

3.4 Refroidissement et chauffage pour les périodes d'été et d'hiver

Comme indiqué précédemment, le but de cette recherche est d'étudier le point de fusion optimal du MCP, en considérant la conception de modèles de bâtiments légers, avec/sans dispositifs d'ombrage. Dans les deux sections précédentes, l'impact des MCP et la conception de la façade sud dans des scénarios de demande énergétique extrême ont été discutés. Cependant, il est très important d'optimiser un bâtiment éco-énergétique typique dans les deux cas. De plus, en tenant compte des possibilités disponibles pour fournir le modèle approprié, qui va de pair avec un modèle de confort thermique acceptable, en fonction des opérations du thermostat de l'algorithme sélectionné La figure 4.12 illustre les points de consigne de refroidissement et de chauffage du thermostat calculés, en fonction des valeurs PMV programmées pour établir un modèle de confort Fanger dans un bâtiment non ombragé avec MCP dans la ville de Bou Saâda. Il est évident que la plage thermique de la température de l'air intérieur varie de l'hiver à l'été pendant le fonctionnement du système CVC. Ainsi, le comportement de consommation d'énergie tout au long des deux saisons, détermine le point de fusion optimal du MCP et la conception idéale des bâtiments par région.

Comme le montre le tableau 4.12, les MCP permettent des économies d'énergie dans tous les cas. Cependant, le point de fusion optimal du MCP différent, prend généralement des valeurs de seuil minimum et maximum des courbes approchées, en fonction de chaque région, où les différentes conditions météorologiques déterminent le potentiel d'économie d'énergie par MCP pour chaque modèle. Les résultats montrent que le point de fusion optimal des MCP dans les zones climatiques méditerranéennes et semi-arides prend des valeurs égales ou proches de 28°C, ce qui représente les points de fusion habituels du MCP pour les économies d'énergie en été. Où le point de fusion optimal dans les régions climatiques chaud-sec et froid-sec est généralement limité entre 19 et 21°C. Ceci est similaire aux points de fusion souhaitables pour l'économie d'énergie de chauffage pendant l'hiver, qui est une période de réduction d'énergie significative dans ces régions.



Figure 4.12 Fonctionnement du thermostat et température de l'air intérieur en modèle simple avec MCP à Bou Saâda.

Location	Modèle simple	Modèle simple avec MCP	Modèle ombré	Modèle ombré avec MCP
Alger				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	28.00
Consommation d'énergie [kWh]	2212.24	2056.12	2005.07	1852.30
Économie d'énergie [%]	-	7.06	-	7.62
Constantine				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	27.87
Consommation d'énergie [kWh]	3167.05	2982.93	3101.13	2913.33
Économie d'énergie [%]	-	5.81	-	6.05
Tlemcen-Zenata				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	28.00
Consommation d'énergie [kWh]	2000.94	1863.53	1870.00	1715.27
Économie d'énergie [%]	-	6.87	-	8.27
Batna				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	27.75
Consommation d'énergie [kWh]	3299.94	3091.90	3342.26	3136.05
Économie d'énergie [%]	-	6.30	-	6.17
El Bayad				
Point de fusion optimale [°C]	-	28.00	-	27.87
Consommation d'énergie [kWh]	3199.50	2999.09	3366.87	3177.51
Économie d'énergie [%]	-	6.26	-	5.62
Aïn Sefra				
Point de fusion optimale [°C]	-	19.94	-	19.37
Consommation d'énergie [kWh]	3327.71	3108.25	3422.60	3228.36
Économie d'énergie [%]	-	6.60	-	5.67
Bou Saâda				
Point de fusion optimale [°C]	-	20.12	-	19.87
Consommation d'énergie [kWh]	4147.38	3920.80	4014.60	3802.40
Économie d'énergie [%]	-	5.46	-	5.28
Bechar				
Point de fusion optimale [°C]	-	20.68	-	20.25
Consommation d'énergie [kWh]	3549.48	3328.72	3643.70	3440.42
Économie d'énergie [%]	-	6.22	-	5.58
Ouargla				
Point de fusion optimale [°C]	-	21.12	-	20.75
Consommation d'énergie [kWh]	4228.05	4049.58	4188.65	3979.76
Économie d'énergie [%]	-	4.22		4.98
Tamanrasset				
Point de fusion optimale [°C]	-	21.31	-	20.87
Consommation d'énergie [kWh]	1624.20	1535.53	1839.61	1708.81
Économie d'énergie [%]	_	5 46	_	7 11

Tableau 4.12 Température de fusion optimale de MCP pour les besoins en énergie de chauffage et de refroidissement en hiver et en été.

En outre, les points de fusion bas des MCP dans les zones désertiques et semi-désertiques permettent davantage d'économies d'énergie de chauffage, contrairement à d'autres zones climatiques avec des points de fusion optimaux élevés, ce qui permet une économie cohérente de la consommation d'énergie de refroidissement et de chauffage. Par exemple, le point de fusion optimal des MCP dans le bâtiment ombragé est de 20.87°C dans la ville de Tamanrasset. Cela conduit à une consommation d'énergie de refroidissement de 1520.35 kWh, où le rapport en économie d'énergie est considérablement réduit par rapport à un point de fusion optimal de 28°C, mais la consommation d'énergie ne dépasse pas 188.46 kWh en hiver, ce qui permet un taux de conservation élevé. Alors que dans la ville de Constantine, où le point de fusion optimal est de 27.87°C, les besoins en énergie de refroidissement et de chauffage sont respectivement de 1116.63 et 1796.70 kWh. Cela permet de réduire considérablement la consommation d'énergie pour les deux saisons.

Enfin, en regardant le modèle idéal, les résultats varient selon les régions climatiques, où dans les zones climatiques méditerranéennes, chaudes-sèches et froides-sèches à l'exclusion des villes d'Aïn Sefra et Tamanrasset, le bâtiment ombragé avec des MCP représente le modèle typique. Ces zones sont des climats dominés par le refroidissement, où les dispositifs d'ombrage jouent un rôle efficace dans la réduction des gains de chaleur dus au rayonnement solaire. Contrairement aux zones semi-arides, caractérisées par un hiver froid, les stores jouent un rôle très négatif dans la consommation d'énergie pendant la période de chauffage. Il augmente l'énergie totale et rend les bâtiments simples avec des MCP plus appropriés.

4. Conclusion

Cette recherche vise à étudier l'effet des MCP et des dispositifs d'ombrage sur le comportement thermique des bâtiments dans différentes zones climatiques de l'Algérie, en utilisant le logiciel EnergyPlus. Une méthode simple et utile a été proposée, en fonction de l'estimation du rapport temporel entre la température intérieure des modèles de bâtiments et la plage de confort des modèles en conditions de flottement libre. Dans un autre contexte, une optimisation basée sur la simulation a été réalisée en couplant EnergyPlus et l'outil GenpOpt, pour déterminer le point de fusion optimal du PCM pendant les périodes d'hiver et d'été pendant les opérations du système CVC, selon le modèle PMV de Fanger.

De l'analyse des modèles avec bâtiment flottant librement, il est conclu que les bâtiments améliorés avec des MCP permettent une grande plage d'heures de confort thermique pendant les périodes froides de l'année, en particulier dans les régions de climat chaud et sec, où le rapport dans le temps à l'intérieur la plage de confort est jusqu'à 97.96% à Tamanrasset pendant l'hiver, car le MCP stocke une importante énergie thermique, contrairement aux dispositifs d'ombrage qui repoussent le rayonnement solaire et jouent donc un rôle négatif pendant cette période, en particulier dans les zones semi-arides. Pendant les périodes de températures extrêmes et de rayonnement solaire élevé, la valeur des dispositifs d'ombrage améliore le confort thermique des bâtiments, tandis que le MCP joue un rôle très négatif, surtout en été, où il devient une source thermique indésirable. Cela confirme que les systèmes CVC doivent être utilisés tout au long de cette saison, ce qui améliorera inévitablement les performances des MCP.

Les résultats d'optimisation ont montré de manière générale que les MCP offrent des possibilités d'économie d'énergie dans toutes les situations, dont les points de fusion optimaux des MCP sont élevés lors de leur utilisation en été, avec des valeurs proches ou égales à 28°C dans toutes les zones climatiques. Le bâtiment ombragé avec MCP représente le modèle idéal en cette saison avec un faible potentiel de réduction de la consommation d'énergie. En revanche, les points de fusion optimaux des MCP ne dépassent pas 21°C en hiver, où les MCP offrent un potentiel élevé de réduction de la consommation d'énergie dans toutes les régions à l'exception des régions semi-arides et de la ville de Constantine. Ces zones sont caractérisées par un froid extrême et un faible rayonnement solaire pendant cette période. Les dispositifs d'ombrage ne devraient pas être pleinement adoptés pendant cette période de l'année, tandis que les bâtiments simples avec des MCP sont le modèle le moins consommateur d'énergie dans toutes les régions, où la réduction de la

demande d'énergie de chauffage atteint 8.85% dans la ville d'El Bayad, alors qu'elle dépasse 63% à Tamanrasset. Le modèle approprié de consommation d'énergie dans les deux saisons varie en fonction des économies d'énergie maximales. Il est à noter que la consommation d'énergie dans les deux périodes reste quelque peu insignifiante, en particulier dans les zones de climat chaud et sec. Cela nous amène à reconsidérer l'inertie thermique des bâtiments, l'épaisseur du MCP et à utiliser des stratégies plus passives sur les bâtiments en particulier dans des conditions climatiques extrêmes, telles que les plantes ombragées dans les murs, la ventilation naturelle ou des moyens encore plus innovants pour réduire la consommation d'énergie et rendre le MCP plus efficace.

Conclusion générale

La demande croissante d'énergie est au cœur des préoccupations dans le monde entier, d'autant plus que tous les secteurs (industriel, transports, résidentiel, agriculture, etc.) sont encore totalement dépendants des énergies fossiles, qui s'épuisent avec le temps et affectent terriblement à l'environnement en général, et au réchauffement planétaire en particulier. Contrairement à ce que beaucoup s'attendent, le secteur résidentiel est le premier consommateur d'énergie au monde, et il en va de même en Algérie, à un rythme pouvant dépasser 40%, tant d'études ces dernières années se concentrent sur le développement de systèmes éco-énergétiques alternatifs et durables. Néanmoins, la réduction de la consommation d'énergie reste la solution la plus simple et la plus efficace pour rendre ces systèmes suffisants pour nous fournir de l'énergie, et donc l'élimination définitive de la dépendance aux énergies fossiles, ce qui est possible en augmentant ce que l'on appelle l'efficacité énergétique. L'isolation thermique des bâtiments est un facteur critique pour réduire les charges thermiques dues aux fluctuations climatiques, cela permet d'améliorer encore l'efficacité énergétique des bâtiments. Sur cette base, de nombreuses publications traitent de l'étude de divers matériaux pouvant être incorporés dans des enveloppes de bâtiments, y compris des matériaux à changement de phase (MCP) qui stockent une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur latente, lors de la transition de phase à une température presque constante. L'utilisation de ces matériaux est une manière intelligente très prometteuse d'augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments.

En effet, l'étude expérimentale de l'incorporation des MCP dans les structures de bâtiments reste le premier et le plus fiable critère en termes d'extraction de résultats réels de comportement thermique et d'économie d'énergie dans le bâtiment, cependant l'étude basée sur la simulation n'est pas moins importante que l'expérimentation, mais en est plutôt complémentaire, où il permet de connaître la faisabilité technico-économique de l'utilisation des MCP dans les structures de l'habitat dans différentes conditions, d'autant plus que de nombreux programmes de simulation dynamiques se sont beaucoup développés et simulent les conditions réelles d'une manière inédite et ont été validées expérimentalement. En plus de cela, certains programmes sont interactifs avec d'autres programmes et offrent une espace de modélisation pour l'utilisateur afin de les développer et d'étudier d'autres conditions. Cela permet une connaissance préliminaire et une planification minutieuse lors de l'étude de l'effet de l'intégration des MCP dans les bâtiments. Sur cette base, dans ce travail, une étude basée sur la simulation de l'effet de l'utilisation de dispositifs MCP sur le comportement thermique et l'économie d'énergie des bâtiments est couverte. Où la thèse est divisée en quatre axes principaux:

Dans la première partie, un résumé complet sur les MCP les plus utilisés pour le chauffage/refroidissement passif dans les bâtiments est présenté. Les différentes méthodes de leur incorporation dans les structures de bâtiments ont été abordées, et quelques bases théoriques importantes pour comprendre le mécanisme de stockage thermique latent, et les différentes méthodes de caractérisation des propriétés thermo-physiques ont été discutées. Avant de présenter un examen de certains travaux expérimentaux et numériques importants. Enfin, il a conclu qu'une bonne connaissance théorique du stockage thermique latent et des études expérimentales sont nécessaires pour sélectionner les MCP souhaités pour les applications de construction dans des conditions

climatiques spécifiques. L'étude peut également être basée sur la simulation, mais il convient de prêter attention aux hypothèses de la modélisation MCP pour les enveloppes de bâtiments.

La littérature traitant les études expérimentales et numériques du phénomène de l'hystérésis du changement de phase et de la surfusion dans les MCP a été présentée dans le deuxième chapitre de la thèse, et il a été conclu que la prise en compte de ces deux phénomènes physiques devrait être considérée dans la modélisation numérique pour obtenir des résultats plus précis et évaluer l'effet réel attendu lors de l'utilisation des MCP aux enveloppes des bâtiments dans l'économie d'énergie. En plus, dans cet axe, la méthode de l'hystérésis de phase partiel a été adoptée pour modéliser le comportement thermique d'un mur de bâtiment contenant une couche de MCP utilisant l'environnement Matlab/Simulink. Le modèle a été vérifié numériquement à l'aide du programme EnergyPlus v9.0, qui offre la possibilité d'adopter l'hystérésis de phase lors de la simulation.

D'autre part, les objectifs définis au début de ce travail ont été atteints encore à travers les deux derniers axes de la thèse. Où des travaux originaux basés sur la simulation et l'optimisation ont été présentés pour étudier l'effet de la conception intérieure des bâtiments, et extérieure représentés par les surfaces de fenestration et les dispositifs d'ombrage sur l'amélioration de l'efficacité des MCP dans l'économie d'énergie, car ces études n'avaient pas été abordées auparavant. Dans le troisième chapitre de la thèse, la possibilité de rénover un bâtiment administratif avec des matériaux à changement de phase a été étudiée en fonction des conditions climatiques chaudes et arides du sudest Algérien (la ville de Ouargla), où l'aménagement intérieur planchers et extérieur des étages a été optimisé pour extraire le modèle idéal en termes d'économie d'énergie. Il a conclu à partir des résultats que la conception architecturale a un rôle très important dans l'augmentation de l'efficacité de stockage thermique des MCP, en particulier en termes de fenêtres qui à leur tour réduisent le gain de chaleur, et rendent l'utilisation des MCP très rentable en termes d'investissement financier.

Enfin, le quatrième chapitre a discuté de l'effet de la conception extérieure des bâtiments représentés par des dispositifs d'ombrage sur le comportement thermique des bâtiments renforcés avec des MCP dans différents climats algériens. Les résultats de l'analyse basée sur la simulation ont montré que le bâtiment ombragé et avec des MCP est le modèle idéal dans les conditions flottantes libres. En revanche, les résultats d'optimisation ont montré que les MCP permettent des économies d'énergie modestes en été, en particulier dans les climats chauds et secs avec des points de fusion optimaux égaux ou proches de 28°C. Le contrôle de gain de chaleur solaire à l'aide de dispositifs d'ombrage est extrêmement important pour rendre les bâtiments plus efficaces pendant cette période contrairement à la période hivernale, car les MCP permettent une économie significative surtout à Tamanrasset. En hiver, les points de fusion optimaux du MCP sont généralement compris entre 18.50 et 21.25°C. En considérant les deux périodes, le point de fusion optimal et la conception optimale de la façade d'un bâtiment diffèrent d'une zone climatique à l'autre.

REFERENCES

Alam M., Jamil H., Sanjayan J., Wilson J., 2014. Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities. Energy Build. 78:192–201.

Alexiades V., Solomon AD., 1993. Mathematical modeling of melting and freezing processes. Hemisphere Pub. Corp.

Al-Homoud MS., 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. Build. Environ. 40:353–66.

Al-Saadi NS., 2014. Modeling and simulation of PCM-enhanced façade systems. Ph. D. thesis, University of Colorado.

AL-Saadi SN., Zhiqiang Z., 2013. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 21:659–673.

ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2013.

Athienitis AK., Liu C., Hawes D., Banu D., Feldman D., 1997. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. Build. Environ. 2:3405–10.

Barreneche C., Solé A., Miró L., Martorell I., Fernández AI., Cabeza LF., 2013. Study on differential scanning calorimetry analysis with two operation modes and organic and inorganic phase change material (PCM). Thermochim Acta. 553:23–6.

Barz T., Sommer A., 2018. Modeling hysteresis in the phase transition of industrial-grade solid/liquid PCM for thermal energy storages. Int. J. Heat Mass Transf. 127:701–13.

Bellia L., De Falco F., Minichiello F., 2013. Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates. Appl Therm Eng. 54(1):190–201.

Bianchi AM., Fautrelle Y., Etay J., 2004. Transferts thermiques. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Bilan Energétique National de l'année. Edition 2018. Ministère de l'énergie, Algérie. https://doi.org/https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur

Bony J., Citherlet S., 2007. Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials. Energy Build. 39:1065–72.

Boughali S., Bechki D., Mennouche D., Mahcene H., Bouguettaia H., Bouchekima B., 2013. Opportunités et challenges de la promotion des énergies renouvelables en Algérie. Annales des Sciences et Technologie. Vol.5 p. 53–62.

BS EN 15251:2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics Contents. 2007 p. 1-52.

Cabeza LF., Barreneche C., Martorell I., Miró L., Sari-Bey S., Fois M., 2015. Unconventional experimental technologies available for phase change materials (PCM) characterization. Part 1. Thermophysical properties. Renew. Sustain. Energy Rev. 43:1399–414.

Cabeza LF., Castellon C., Nogues M., Medrano M., Leppers R., Zubillaga O., 2005. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. Energy and buildings, 39(2):113 – 119.

Campbell KR., 2011. Phase change material as a thermal storage device for passive houses. Portland State University.

Castell A., Martorell I., Medrano M., Perez G., Cabeza LF., 2010. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. Energy and buildings. 42(4):534 – 540.

Castell A., Medrano M., Castellón C., Cabeza LF., 2009. Analysis of the simulation models for the use of PCM in buildings. Effstock 2009 Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability. Stockholm (Sweden).

Chan ALS., 2011. Energy and environmental performance of building facades integrated with phase change material in subtropical Hong Kong. Energy and Buildings. 43:2947-55.

Chen C., Guo H., Liu Y., Yue H., Wang C., 2008. A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard. Energy Build. 40:882–890.

Crank J., 1984. Free and moving boundary problems. Clarendon Press.

Crawley DB., Lawrie LK., Winkelmann FC., Buhl WF., Huang YJ., Pedersen CO., 2001. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy Build. 33(4):319–31.

De Gracia A., Cabeza LF., 2015. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. Energy Build. 103:414–9.

Delcroix B., Kummert M., Daoud A., Bouchard J., 2015(a). Influence of experimental conditions on measured thermal properties used to model phase change materials. Build. Simul. 8:637–50.

Delcroix B., Kummert M., Daoud A., 2015(b). Thermal behavior mapping of a phase change material between the heating and cooling enthalpy-temperature curves. Energy Procedia 78:225–30.

Dincer I., Rosen MA., 2011. Thermal energy storage systems and applications, Second edition. John Wiley & Sons, Ltd.

Dipl.-Ing. Jens H. Dieckmann. Latent heat storage in concrete. University of Kaiserslautern, Germany; 2006. http://www.eurosolar.de/>.

Dolado P., Lazaro A., Marin JM., Zalba B., 2011. Characterization of melting and solidification in a real-scale PCM–air heat exchanger: Experimental results and empirical model. Renew. Energy 36:2906–17.

Dolado P., Mazo J., Lázaro A., Marín JM., Zalba B., 2012. Experimental validation of a theoretical model: Uncertainty propagation analysis to a PCM-air thermal energy storage unit. Energy Build. 45:124–31.

Egolf PW., Manz H., 1993. Theory of Phase Change Materials with and without Mushy Regions. International Journal of Heat and Mass Transfer.

EN ISO 7730, ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, Management. 3. BSI British Standards; 2005 p. 605–615. https://www.iso.org/standard/39155.html

EnergyPlus v8.8.0 Documentation, Engineering Reference, U.S. Department of Energy 2017. https://energyplus.net/documentation (accessed Dec 13, 2018).

EnergyPlus v8.8.0 Documentation, Input Output Reference, U.S. Department of Energy 2017. https://energyplus.net/documentation (accessed Dec 13, 2018).

Eyres NR., Hartree DR., Ingham J., Jackson R., Sarjant RJ., Wagstaff JB., 1946. The Calculation of Variable Heat Flow in Solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences. 240:1–57.

Fanger PO., 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen, Denmark: Copenhagen: Danish Technical Press.

Farid MM., Khudhair AM., Razack SAK., Al-Hallaj S., 2004. A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy Conversion and Management 45:1597–1615.

Feustel HE., 1995. Simplified Numerical Description of Latent Storage Characteristics for Phase Change Wallboard, Indoor Environment Program, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, California.

Fleischer AS., 2015. An Introduction to Phase Change Materials. Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications. Villanova, PA. Springer.

Furzeland RM., 1980. A Comparative Study of Numerical Methods for Moving Boundary Problems. IMA Journal of Applied Mathematics. 26:411–29.

Ghedamsi R., Settou N., Saifi N., Dokkar B., 2014. Contribution on buildings design with low consumption of energy incorporated PCMs. Energy Procedia. 50:322–332.

Gowreesunker BL., Tassou SA., Kolokotroni M., 2013. Coupled TRNSYS-CFD simulations evaluating the performance of PCM plate heat exchangers in an airport terminal building displacement conditioning system. Build. Environ. 65:132–145.
Guichard S., 2013. Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changements de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale. Ph. D. thesis, Université de La Réunion.

Hasan A., 1999. Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. Appl. Energy. 63:115–24.

Hasnain SM., 1997. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques, Energy research. 39(11):1127–1138.

Hawes DW., Feldman D., Banu D., 1993. Latent heat storage in building materials. Energy Build. 20:77-86.

Hawlader MN., Uddin MS., Zhu HJ., 2002. Encapsulated phase change materials for thermal energy storage: experiments and simulation. Int. J. Energy Res. 26:159–71.

Holopainen R., 2012. A human thermal model for improved thermal comfort. Ph.D thesis, Aalto University. http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-7949-5.

Hong H., Kim SK., Kim YS., 2004. Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials. Int. J. Refrig. 27(4):360–6.

IEA. Energy Efficiency: Buildings. The global exchange for energy efficiency policies, data and analysis. https://www.iea.org/topics/energyefficiency/buildings (accessed Sep 19, 2019).

Ivshin Y., Pence TJ., 1994. A constitutive model for hysteretic phase transition behavior. Int. J. Eng. Sci. 32:681–704.

Klimeš L., Charvát P., Joybari MM., Zálešák M., Haghighat F., Panchabikesan K., El Mankibi M., Yuan Y., 2020. Computer modelling and experimental investigation of phase change hysteresis of PCMs: The state-of-the-art review. Appl. Energy 263:114–572.

Knoll DA., Keyes DE., 2004. Jacobian-free Newton-Krylov methods: a survey of approaches and applications. J Comput Phys. 193:357-97.

Kośny J., 2015. PCM-enhanced building components - an application of phase change materials in building envelopes and internal structures. Switzerland: Springer International Publishing.

Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift. 15(3):259-263(5).

Kousksou T., El Rhafiki T., Mahdaoui M., Bruel P., Zeraouli Y., 2012. Crystallization of supercooled PCMs inside emulsions: DSC applications. Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 107:28–36.

Kuznik F., Damien D., Kevyn J., Roux JJ., 2011. A review on phase change materials integrated in building walls. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 15:379–391.

Kuznik F., J. Virgone J., 2009. Experimental assessment of a phase change material for wall building use. Appl. Energy. 86(10):2038–46.

Kuznik F., Virgone J., 2009. Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling. Energy Build. 41:561–70.

Kuznik F., Virgone J., Johannes K., 2011. Study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard. Renew. Energy. 36:1458–62.

Kuznik F., Virgone J., Roux J-J., 2008. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. Energy Build. 40:148-56.

Lei J., Yang J., Yang EH., 2016 Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. Appl. Energy. 162:207–17.

Leroux M., 1991. La spécificité climatique des montagnes sahariennes. Rev Géographie Alp. 79(1):23-42.

Li L., Yu H., Wang X., Zheng S., 2016. Thermal analysis of melting and freezing processes of phase change materials (PCMs) based on dynamic DSC test. Energy Build. 130:388–96.

Liwu Fan, Khodadadi JM., 2011. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15:24–46.

Maha A., 2004. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergetique de l'enveloppe légère des bâtiments. Ph. D. thesis, Université Joseph Fourier – Grenoble 1.

Manzan M., 2014. Genetic optimization of external fixed shading devices. Energy Build. 72:431-40.

Mazo J., El Badry AT., Carreras J., Delgado M., Boer D., Zalba B., 2015. Uncertainty propagation and sensitivity analysis of thermo-physical properties of phase change materials (PCM) in the energy demand calculations of a test cell with passive latent thermal storage. Appl. Therm. Eng. 90:596–608.

Mehling H., Barreneche C., Solé A., Cabeza LF., 2017. The connection between the heat storage capability of PCM as a material property and their performance in real scale applications. J. Storage Mater. 13:35–9.

Monsef K., 2011. Energy audit of building systems an engineering approach. Second edition, Taylor & Francis Group.

Moreles E., Huelsz G., Barrios G., 2018. Hysteresis effects on the thermal performance of building envelope PCM-walls. Build. Simul. 11:519–31.

Morgan K., Lewis RW., Zienkiewicz OC., 1978. An improved algorithm for heat conduction problems with phase change. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 12:1191-5.

Muruganantham K., Phelan P., Horwath P., Ludlam D., McDonald T., 2010. Experimental Investigation of a Bio-Based Phase Change Material to Improve Building Energy Performance. In: ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability, Phoenix, Arizona, USA: ASME; http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1607396.

National office of Meteorology. https://www.meteo.dz/climatenalgerie.php (accessed Nov 25, 2018).

Necib H., Settou N., Saifi N., Damene D., 2013. Experimental and numerical study of a usual brick filled with PCM to improve the thermal inertia of buildings. Energy Procedia. 36:766–775.

Nguyen AT., Reiter S., Rigo P., 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. Appl. Energy. 113:1043–58.

Ogulata RG., 2002 Sectoral energy consumption in Turkey. Renew. Sustain. Energy Rev. 6:471-80.

Papadakis G., Tsamis P., Kyritsis S., 2001. An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings. Energy Build. 33(8):831–6.

Patankar SV., 1980. Numerical heat transfer and fluid flow: Hemisphere Pub. Corp.

Peck JH., Kim JJ., Kang C., Hong H., 2006. A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using Thistory method. Int. J. Refrig. 29:1225–32.

Pedersen CO., 2007. Advannced zone simulation in EnergyPlus: incorporation of variable properties and phase change material (PCM) capability. Proc. Build. Simul. (10th International IBPSA Conference):1341–1345.

Pérez G., Rincón L., Vila A., González JM., Cabeza LF., 2011. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. Appl. Energy. 88(12):4854–9.

Pham QT., 1985. A fast, unconditionally stable finite-difference scheme for heat conduction with phase change. International Journal of Heat and Mass Transfer. 28:2079-84.

Pham QT., 2006. Modelling heat and mass transfer in frozen foods: a review. International Journal of Refrigeration. 29:876-88.

Réglementation Thermique Algérienne RETA - Centre de Développement des Energies Renouvelables. http://reta.cder.dz/ (accessed Aug 1, 2018).

Reza B., Chen JJ., Young BR., Farid MM., 2015. Application of PCM underfloor heating in combination with PCM wallboards for space heating using price based control system. Applied Energy. 148:39–48.

RUBITHERM, Rubitherm Technologies GmbH. http://www.rubitherm.de/ (accessed Jul 4, 2016).

Sadasivam S., Almeida F., Zhang D., Fung AS., 2011. An Iterative Enthalpy Method to Overcome the Limitations in ESP-r's PCM Solution Algorithm. Anglais. 117:100-7.

Sadineni SB., Madala S., Boehm RF., 2011. Passive building energy savings: A review of building envelope components. Renew Sustain Energy Rev. 15(8):3617–31.

Saffari M., De Gracia A., Fernández C., Cabeza LF., 2017 Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. Appl. Energy. 202:420–34.

Saffari M., De Gracia A., Ushak S., Cabeza LF., 2016. Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model. Energy Build. 112:159–72.

Saffari M., Piselli C., De Gracia A., Pisello AL., Cotana F., Cabeza LF., 2018. Thermal stress reduction in cool roof membranes using phase change materials (PCM). Energy Build. 158:1097–105.

Sarri A., Bechki D., Boughali S., Bouguettaia H., 2019(a). Review on thermal insulation of buildings with phase change materials: incorporation methods and applications. J. Fundam. Appl. Sci. 11(1):259-279.

Sarri A., Bechki D., Bouguettaia H., Boughali S., Al-Saadi SN., 2019(b). Simulation-based analysis of the use of PCM and shading devices to improve the thermal comfort in buildings. The First International Conference on Materials, Environment, Mechanical and Industrial Systems ICMEMIS'19.

Shamsundar N., Rooz E., 1988. Numerical methods for moving boundary problems. In: Minkowyex WJ., Sparrow EM., Schneider GE., Pletcher RH., editors. Handbook of Numerical Heat Transfer. New York: Wiley-Interscience.

Shamsundar N., Sparrow EM., 1975. Analysis of Multidimensional Conduction Phase Change Via the Enthalpy Model. Journal of Heat Transfer. 97:333-40.

Sharma A., Tyagi VV., Chen CR., Buddhi D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and sustainable energy reviews. 13:318–345.

Silva T., Vicente R., Rodrigues F., 2016. Literature review on the use of phase change materials in glazing and shading solutions. Renew Sustain Energy Rev. 53:515–35.

Soares N., Gaspar AR., Santos P., Costa JJ., 2014. Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates. Energy Build. 70:411–21.

Solé A., Miró L., Barreneche C., Martorell I., Cabeza LF., 2013. Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). Renew. Sustain. Energy Rev. 26:425–36.

Suliang C., 2010. State of the art thermal energy storage solutions for high performance buildings. Ph-D thesis, Université de Jyväskylä.

Susman G., Dehouche Z., Cheechern T., Craig S., 2011. Tests of prototype PCM ' sails' for office cooling. Appl. Therm. Eng. 31:717–726.

Swaminathan CR., Voller VR., 1993. On the enthalpy method. Int J Num Meth Heat Fluid Flow. 3:233-44.

Tabares-Velasco PC., Christensen C., Bianchi M., 2012. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. Build Environ. 54:186–96.

Telkes M., 1947 Solar house heating—a problem of heat storage. J. Heat Ventilating. 44:68–75.

Thornton BA., Rosenberg MI., Richman EE., Wang W., Xie Y., Zhang J., Cho H., Mendon VV., Athalye RA., Liu B., 2011. Achieving the 30% Goal: Energy and Cost Savings Analysis of Ashrae Standard 90. 1–2010, <u>http://www.osti.gov/scitech/biblio/1015277</u>

U.S.A. Department of Energy New Features in Version 2.0.0. URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_archives.cfm#v4.

Voller VR., 1990. Fast Implicit Finite-Difference Method for the Analysis of Phase Change Problems. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals. 17:155-69.

Voller VR., 1997. An Overview of Numerical Methods for Solving Phase Change Problems. In: Minkowycz WJ, Sparrow EM, editors. Advances in numerical heat transfer: Taylor & Francis; p. 341-80.

Wang X., Zhang Y., Xiao W., Zeng R., Zhang Q., Hong Fa., 2009. Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope. Chinese Science Bulletin. 54 (6):920-928.

Wang Y., Huang Z., Heng L., 2007. Cost-effectiveness assessment of insulated exterior walls of residential buildings in cold climate. Int. J. Project Manage. 25:143–9.

Wetter M., 2001. GenOpt - A Generic Optimization Program. Seventh Int IBPSA Conf Rio Jan Braz.

Wetter M., 2016. GenOpt v3.1.1, Generic Optimization Program User Manual. https://simulationresearch.lbl.gov/GO/download.html.

WINDOW 7 User Manual, Lawrence Berkeley National Laboratory (2019).

Wong NH., Kwang AYT., Chen Y., Sekar K., Tan PY., Chan D., 2010. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. Build Environ. 45(3):663–72.

Ye WB., Zhu DS., Wang N., 2011. Numerical simulation on phase-change thermal storage/release in a plate-fi n unit. Appl. Therm. Eng. 31:3871–3884.

Zalba B., Marín JM., Cabeza LF., Mehling H., 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Appl. Therm. Eng. 23(3):251–83.

Zhang H., 2003. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments.Ph.D thesis, University of California, Berkeley.

Zhang YP., Jiang Y., 1999. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. Measurement Science and Technology. 10(3):10:201–5.

Zhang YP., Lin KP., Yang R., Di HF., Jiang Y., 2006. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. Energy Build. 38:1262–9.

Zhou D., Zhao CY., Tian Y., 2012. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Appl. Energy. 92:593–605.

Zhuang C., Deng A., Chen Y., Li S., Zhang H., Fan G., 2010. Validation of Veracity on Simulating the Indoor Temperature in PCM Light Weight Building by EnergyPlus. In: Li K., Fei M., Jia L., Irwin G., editors. Life System Modeling and Intelligent Computing: Springer Berlin/Heidelberg; 2010. p. 486-96.

Zhuang C., Deng A., Chen Y., Li S., Zhang H., Fan G., 2010. Validation of veracity on simulating the indoor temperature in PCM light weight building by EnergyPlus. In: Li K., Fei M., Jia L., Irwin G., editors. Life system modeling and intelligent computing. Berlin/ Heidelberg: Springer. P: 486–96.

Data sheet

RT28HC



The most

RUBITHERM® RT est un MCP pur, ce matériau de stockage de chaleur utilisant les processus de changement de phase entre solide et liquide (fusion et congélation) pour stocker et libérer de grandes quantités d'énergie thermique à température presque constante. Les matériaux à changement de phase RUBITHERM® (MCP) constituent un moyen très efficace pour stocker la chaleur et le froid, même lorsque des volumes limités et de faibles différences de température de fonctionnement sont applicables.

Propriétés:

- capacité de stockage d'énergie thermique élevée,
- le stockage et la libération de chaleur ont lieu à des températures relativement constantes,
- pas d'effet de surfusion,
- chimiquement inerte
- produit de longue durée, avec des performances stables tout au long des cycles de changement de phase ,
- important data:
- plage de température de fusion entre -4 ° C et 100 ° C. Typical Values

	i ypical values	
Melting area	27–29 main peak.	[°C]
Congealing area	28 29–27	[°C]
Heat storage capacity \pm 7,5%	27 27	[kJ/kg]•
Combination of latent and sensible heat	250	Wh/kale
in a temperatur range of 21°C to 36°C.	70	
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid	0.00	[kg/1]
at 15 °C	0,00	-
Density liquid at 40 °C	0,77	[kg/1]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point	165	[°C]
Max operation temperature	50	[90]







Type/désignation	Micronal [®] PCM SmartBoard™		
Epaisseur	15 mm		
Longueur	2.000 mm		
Largeur	1.250 mm		
Constitution	Panneau de plâtre revêtu d'un non tissé de fibres de verre avec des produits à changement de phase dans le noyau en plâtre		
Forme des chants	Chant biseauté		

Critère	Spécifications
Poids par unité de surface	11,5 kg +/- 0,5 kg/m²
Humidité libre	≤ 2,0 %
Tolérance d'épaiss	
ur 1)	+/- 0,5 mm
Tolérance de longueur	+/- 8 mm
Tolérance de largeur ¹⁾	+ 0 mm, – 5 mm
Charge à la rupture transversale/parallèle ¹⁾	≥ 400 N/≥ 300 N
Flèche transversale/parallèle ¹⁾	≤ 2,5 mm/≤ 2,8 mm
Structure support	Distance des profilés 41,5 cm
Distance des vis plafond/mur	17 cm/25 cm
Type de vis	TN 3,5
Classe de matériau ²⁾	Euroclasse E selon DIN EN 13501-1,correspond à B2 selon DIN 4102 partie 1
Homologations	Comportement au feu: certificat de contrôle pour Euroclasse E; agrément technique général P-MPA-E-05-507 et P-MPA-E-06-509 pour la classe de

¹Contrôle dans les conditions de la norme DIN 18180

² Un double habillage avec une plaque de plâtre standard de 12,5 mm d'épaisseur ou l'application d'un revêtement ignifuge sur la face visible permet d'atteindre la classe de matériaux B1. Lors de la réalisation du chantier, il est impératif de respecter les prescriptions légales en vigueur en matière de protection contre l'incendie dans le sec- teur de la construction.

Classe de matériaux B1:

Matériaux de construction difficilement inflammables pour constructions spéciales

Classe de matériaux B2:

Matériaux de construction normalement inflammables pour bâtiments et utilisations de type normal

³ 3) Selon DIN EN 12664/App. Lola 5

Paramètre/critère	Micronal [®] PCM SmartBoard [™] 23	Micronal [®] PCM SmartBoard [™] 26	à titre de compa- raison : plaque de plâtrestandard
Température de changement de phase	23 °C	26 °C	-
Capacité de chaleur latente ⊗H idans la plage de changement de phase	env. 330 kJ/m²	env. 330 kJ/m²	0 kJ/m²
Capacité calorifique spécifique	env. 1,20 kJ/kgK	env. 1,20 kJ/kgK	env. 0,85 kJ/kgK
Conductivité thermique λ^3	env. 0,134 W/mK	env. 0,134 W/mK	env. 0,19 W/mK

Tél. : +33 14964 5621 Fax : +33 14964 5220 Mobile : +33 6877 11771

E-mail: sebastien.galtie@btc-fr.com www.btc-fr.com





Rayonnement [kWh/m²]