

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER** en **GENIE-CIVIL**

Option : Structure

Par : CHAIBA ABDELALI et ZOUHRI IBRAHIM

Sujet

ETUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE ET DYNAMIQUE D'UNE PAROI EN BETON A CHANGEMENT DE PHASES (BCP).

Soutenu, , devant le 05/07/2021 jury composé de :

Mr LOBYED A
Mr SELKA G
M^{lle} KHLIFI Z

MAA
MAB
MCB

UABT
UABT
UABT

Président
Encadreur
Examinatrice

Année académique : 2020-2021

Remerciements :

Toute notre parfaite gratitude et remerciements à Allah le Tout Puissant, qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre encadrant, qui sans lui, ce projet de fin d'étude n'aurait pas été possible. Il s'agit particulièrement de **M.SELKA Ghouti**, enseignant à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen.

Nous remercions également les membres de jury **Mr le président LOBYED . A** et **M^{lle} l'examinatrice KHELIFI . Z** d'avoir voulu accepter de juger ce travail, nous vous en sommes reconnaissantes et en espérant être à la hauteur de votre confiance.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, on remercie tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Merci à toutes et à tous !

Dédicace :

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A toutes personnes qui ma aider à poursuivre mes études

A mes très chers frères et sœur

A mes cousins ABDERRAHIM ET SAMIA

A toute ma famille

A tous mes amis

A mon Encadreur SELKA ghouti

Enfin à tous ceux qui nous sont très chers

CHAIBA ABDELALI

Dédicace :

A ma chère mère et mon cher père.

Qui m'a gardé jusqu'à ce que je suis aujourd'hui. Et je ne suis pas en mesure de répondre
ne serait-ce qu'une partie de leur faveur

A mes frères et amis, mes professeurs et tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Je vous présente cette recherche, et j'espère qu'elle vous plaira

ZOUHRI Ibrahim

Résumé:

Cette étude nous présente de nouveaux horizons pour faire avancer le domaine de la construction en alliant confort thermique, efficacité énergétique et faible consommation. Il met en évidence un nouveau type de matériau appelé matériau à changement de phase (**MCP**) qui promet de révolutionner le concept de construction. D'après notre étude, nous allons connaître le comportement d'un type de MCP associé au béton et faire une comparaison entre celui-ci et le béton ordinaire à l'aide du programme **Fluent**.

En fonction des résultats, l'effet du MCP sur les propriétés thermiques du béton sera évalué et donc son efficacité et son efficience dans le maintien du confort thermique avec une consommation d'énergie minimale.

Mots clés : MCP, béton-MCP, caractérisation, transfert de chaleur, efficacité énergétique, Stockage thermique, chaleur latente.

ملخص:

تقدم لنا هذه الدراسة أفاق جديدة للرقى بمجال البناء من خلال المجز بين الراحة الحرارية و كفاءة الطاقة و قليل استهلاكها. وتسلط الضوء على نوع جديد من المواد المسماة بمواد متغيرة الطور MCP التي تعد بتقديم تغيير جذري في مفهوم البناء. وفقا لدراستنا نحن بصدد معرفة سلوك نوع من MCP المرتبط بالخرسانة و إجراء مقارنة بينه و بين الخرسانة العادية باستخدام برنامج

[fluent]

اعتمادا على النتائج سيتم تقييم تأثير MCP على الخصائص الحرارية للخرسانة وبالتالي مدى فعاليته وكفاءته في الحفاظ على الراحة الحرارية مع أقل استخدام للطاقة.

الكلمات المفتاحية: MCP، الخرسانة، التوصيف، نقل الحرارة، كفاءة الطاقة، الراحة الحرارية، التوصيل الحراري.

Abstract :

This study presents us with new horizons for advancing the field of construction by combining thermal comfort, energy efficiency and low consumption. It highlights a new type of material called phase change material (PCM) that promises to revolutionize the concept of construction. From our study, we will know the behavior of a type of MCP associated with concrete and make a comparison between it and ordinary concrete using the Fluent program.

Depending on the results, the effect of MCP on the thermal properties of concrete will be evaluated and therefore its effectiveness and efficiency in maintaining thermal comfort with minimal energy consumption.

Keywords: MCP, concrete-MCP, characterization, heat transfer, energy efficiency, thermal comfort, thermal conductivity

Sommaire

Remerciement	I
Dédicace	II
Dédicace	III
Résumé	IV
ملخص	V
Abstract	VI
Sommaire	VII
Liste des figures	X
Liste des tableaux.....	XII
Nomenclature.....	XIII
Introduction générale	1
Chapitre I : Efficacité Énergétique Dans Le Bâtiment	4
1 Introduction :	5
2 Efficacité énergétique dans le bâtiment :.....	5
2.1 Maison passive:	6
2.2 Bâtiment basse énergie:.....	7
2.3 Bâtiment très basse énergie:	7
2.4 Bâtiment à énergie zéro :.....	8
2.5 Bâtiment à énergie positive :	8
3 Le besoin d'énergie dans le bâtiment :	8
3.1 Réduction des consommations énergétique dans le bâtiments :.....	9
3.1.1 Le bâtiment est un gros consommateur d'énergie :.....	9
3.1.2 Le bâtiment devrait être confortable	10
3.2 Comment réduire la consommation en énergies des bâtiments ?.....	10
3.2.1 Diagnostiquer les bâtiments :.....	10
3.2.2 Réaliser des travaux d'isolation	11
3.2.3 Privilégier les énergies renouvelables :.....	11
3.2.4 Choisir un éclairage à basse consommation :	11
3.3 Economie d'énergie dans le processus de gestion énergétique :.....	12

3.4	Perspective sur le besoin de maitrise de la demande énergétique :.....	13
4	conclusion.....	13
Chapitre II : Introduction Sur Les Matériaux A Changement De Phase En Bâtiment.....		15
1	Introduction :	16
2	Le contexte énergétique du secteur du bâtiment :	16
2.1	Contexte énergétique mondial.....	16
2.2	Contexte environnemental :.....	19
2.2.1	Effet de serre et changements climatiques :.....	19
2.2.2	Impact du secteur bâtiment :	20
3	Repères historiques pour l'utilisation de la chaleur latente :.....	20
4	Les matériaux à changement de phase et les systèmes associés :.....	22
4.1	Introduction :	22
4.2	Eléments sur les MCP en général :.....	22
4.2.1	Le stockage d'énergie thermique :.....	22
4.2.2	Le changement de phase d'un point de vue énergétique :	23
□	Changement de phase d'un corps pur réel :	25
4.2.3	Potentiel de stockage par chaleur latente et sensible :	26
4.3	Matériaux utilisables pour le stockage d'énergie par chaleur latente :	27
4.3.1	Les paraffines comme MCP :.....	28
4.3.2	Les non-paraffines comme MCP :	29
4.3.3	Les Acides gras :	30
4.3.4	Les sels hydratés :	31
4.3.5	Les eutectiques :.....	32
4.4	Le conditionnement des MCP :.....	32
5	Les systèmes intégrant des MCP dans la littérature scientifique :.....	35
6	Conclusion :.....	37
Chapitre III : Modélisation Numérique D'une Paroi En Béton MCP.....		37
1	Introduction :	39

2	Méthodes de résolution du problème de transfert avec changement de phase :.....	39
3	Description du modèle numérique	42
4	Géométrie, Maillage et outil de résolution	42
4.1	Géométrie étudiée.....	42
4.2	Conditions aux limites.....	43
4.3	Description de GAMBIT	45
4.4	Génération du maillage par GAMBIT.....	47
4.5	Code Fluent :	50
5	Simulation numérique de la paroi en béton-MCP	53
6	Conclusion	54
	Chapitre IV : Résultats Et Discussions.....	54
1.	Introduction.....	56
2.	Formulation mathématique du problème 2D	56
3.	Problème physique étudié :.....	56
3.1	Test de maillage.....	60
4.	Résultats et discussions.....	60
5.	Conclusion	67
	Conclusion générale.....	67
	Conclusion générale	68
	Références bibliographie.....	70

Liste des figures

Figure :

Figure 1-1: Schema habitat passive [12].....	7
Figure 1-2 : Demande de l'énergie finale dans le cas du chauffage domestique.[7]	9
Figure 1.3 : Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, sans effet des installations techniques de chauffage ou climatisation [8]	10
Figure 2-1 : Répartition de la consommation mondiale d'énergie finale par secteurs en 2008, (Agence internationale de l'énergie, 2010).	17
Figure 2-2 : Les Pays du Sud et de l'Est Méditerranéen (PSEM).[15]	17
Figure 2-3 : Structure du potentiel d'efficacité énergétique dans la région de la méditerranée du sud sur la période 2010-2030. (Étude régionale sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment, Plan Bleu, 2009). [15].....	18
Figure 2-4 : Accumulateurs de froid à base de gel eutectique [17]	21
Figure 2-5 : Schéma de fonctionnement des thermocules PCM OUTLAST® .[17]	22
Figure 2-6 : Nomenclature des changements d'état.[17]	23
Figure 2-7 : Transformation représentée dans le diagramme des phases.[17].....	24
Figure 2-8: Réponse en température et en flux d'un corps pur idéal lors d'une solidification (source : (David, 2010) .[20]	25
Figure 2-9 : Solidification d'un corps réel (source: (David, 2010)). [20]	25
Figure 2-10 : Classification des substances pour le stockage d'énergie (traduit de (Cabeza, Castell, Barreneche, De Gracia, & Fernandez, 2011)) [19]	27
Figure 2-11 : Illustration de MCP macro encapsules avec de l'aluminium, des capsules rigides, des poches souples en polymère ou des sphères plastiques (source : IEA ECES Annex 17 : Advanced Thermal Energy Storage Techniques) [17]	33
Figure 2-12 : Illustration de MCP micro-encapsulés (sources : en haut Rubi-therm™, en bas Climator®)	34
Figure 2-13 : MCP micro-encapsulé à forme stabilisé utilisé par Zhou (Zhou, Yang, Wang, & Zhou, 2009) et (Zhou, Zhang, Wang, Lin, & Xiao, 2007)	34
Figure 2-14 : Spheres cotenants du MCP pour le rafraichissement d'air (Arkar, Vidrih, & Medved, Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building, 2007)	36
Figure 2-15 : Echangeurs de Zalba (Zalba B. , Marin, Cabeza, & Mehling, 2004).....	36
Figure 3-1 : Capacité thermique incluant l'effet de la chaleur latente dans un petit intervalle.	41

Figure 3-2 : Modèle géométrique avec conditions aux limites	43
Figure 3-3: Paroi Béton – MCP	44
Figure 3-4 : Propriétés thermiques des MCP [28].	45
Figure 3-5 : Description Gambit	46
Figure 3-6 : Vue globale.	47
Figure 3-7 : Type de solver.	47
Figure 3-8 : Modélisation sous Gambit.....	48
Figure 3-9 : Maillage du modèle étudié.	49
Figure 3-10 : Conditions aux limites numériques	49
Figure 3-11 : Fenêtre d’exportation de maillage.....	50
Figure 3-12 : Vue globale de Fluent.	51
Figure 3-13 : Importation de la géométrie	52
Figure 3-14 : Choix de pas de temps le nombre itérations.....	53
Figure 3-15 : Residuals	53
Figure 4-1 : Structure de la paroi du béton	57
Figure 4-2 : Variation journalière de la température extérieure.....	58
Figure 4-3 : Propriétés thermiques des MCP étudiés : Capacité calorifique spécifique.....	59
Figure 4-4 : Maillage utilisé pour la Paroi en béton.	60
Figure 4-5 : Variation temporelle de la température pendant 24h	63
Figure 4-6 : Evolution des champs de températures durant cinq jours.....	65
Figure 4-7 : Variation de la température moyenne	66
Figure 4-8 : Evolution temporelle de la température le long de l’axe X.	67

Liste des tableaux :

Tableau :

Tableau 2-1 : les valeurs de capacité de stockage de chaleur sensible de certains matériaux sélectionnés [18]	Error! Bookmark not defined.
Tableau 2-2 : Points de fusion et chaleur latente pour quelques paraffines pures, solides sous forme de cires ((Abhat, 1983)et (Younsi, 2008)) [17]	29
Tableau 2-3 : Chaleur latente et température de fusion de quelques substances organiques non-paraffines (traduit de (Sharma &Sagara, 2005))	Error! Bookmark not defined.
Tableau 2-4 : Chaleur latente et température de fusion pour quelques acides gras (traduit et extrait de (Sharma &Sagara, 2005)) [23]	Error! Bookmark not defined.
Tableau 2-5 : Points de fusion et chaleur latente d'une sélection de sels hydratés (traduit et extrait de (Sharma &Sagara, 2005)) [23]	Error! Bookmark not defined.
Tableau 2-6 : Sélection d'eutectiques organiques et inorganiques (extrait et traduit de (Sharma &Sagara, 2005)) [23]	Error! Bookmark not defined.
Tableau 4-1 : Propriétés thermo-physiques des deux matériaux.....	58

Nomenclature

Caractères Latins :

Symbole	Description	Unité
a	Diffusivité thermique	[m²/s]
A	Surface	[m²]
Cp	Chaleur spécifique	[J/Kg.K]
Capp	Chaleur massique apparente	[J/Kg.K]
Cpl	Capacité thermique massique moyenne de la phase liquide	[J/Kg.K]
Cps	Capacité thermique massique moyenne de la phase solide	[J/Kg.K]
Ceff	Capacité effective	[J/Kg.K]
c	Capacité thermique totale de calorimètre	[J/K]
ep	Epaisseur de l'échantillon	[m]
e	Effusivité thermique	[W/K.m².s ^{1/2}]
F	Fraction volumique liquide des MCP	[%]
he	Coefficient d'échange convectif	[W/m².K]
H	Enthalpie	[J/Kg]
hl	enthalpie massique de la phase liquide	[J/Kg]
hs	enthalpie massique de la phase solide	[J/Kg]
L	Chaleur latente	[kJ/Kg]
m	Masse de l'échantillon	[Kg]
mM _{cp}	Masse des MCP	[Kg]
ms	Masse sèche	[Kg]
mh	Masse humide	[Kg]
qrad	Flux radiatif solaire	[W/m²]
Rc	Résistance de contact à l'interface résistance	[m².K/W]
Rc	Résistance à la compression	[MPa)
T	Température	[K, °C]
Tfusion	Température de fusion	[K, °C]
t _{0.5}	Temps à mi-hauteur	[s]
t	Temps	[s]
u	Vitesse suivant x	[m/s]
v	Vitesse suivant y	[m/s]
x	Cordonnée verticale	[m]
y	Cordonnée horizontale	[m]
Wa	Coefficient d'absorption	[%]

Caractères Grecs :

Symbole	Description	Unité
Δx	Pas spatial	[m]
Δt	Pas temporel	[s]
ΔT	Différence entre température finale et initiale	[K, °C]
λ	Conductivité thermique	[W/m.°K]
$\lambda_{\text{béton}}$	Conductivité thermique du béton	[W/m°K]
ρ	Masse volumique	[Kg/m ³]
$\rho_{\text{MCP-absolue}}$	Masse volumique absolue des MCP	[Kg/m ³]
$\rho_{\text{MCP-apparente}}$	Masse volumique apparente des MCP	[Kg/m ³]

Indices et exposants :

c	Ciment
ech	Echantillon
f	Fusion
MCP	Matériaux à changement de phase
l	Liquide
r	Référence
s	Solide

Introduction générale

En ce début de XXI^e siècle, l'environnement énergétique rappelle en quelque sorte les années 1980, au cours desquelles la question énergétique à la suite du deuxième choc pétrolier est devenue un enjeu majeur de préoccupation mondiale. Cette crise énergétique va soudainement mettre en évidence l'importance de la quantité de combustible utilisé pour le chauffage et la climatisation des bâtiments et son impact sur l'économie nationale en termes de coûts d'exploitation et d'impacts écologiques et environnementaux. Le secteur de la construction est l'un des secteurs économiques qui consomme le plus d'énergie en raison de la forte croissance démographique et de la demande croissante de bâtiments.

À l'échelle mondiale, le secteur de la construction représente 30 à 40 % de la consommation totale d'énergie et représente une grande partie des impacts environnementaux anthropiques. Par conséquent, il a un grand potentiel d'amélioration de l'énergie et de l'environnement. Pour faire face à ces enjeux énergétiques et environnementaux, plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre de manière complémentaire, la réduction de la consommation énergétique des bâtiments est un enjeu majeur du tournant du siècle. Réaliser des bâtiments à basse consommation d'énergie est un processus complexe qui nécessite le développement d'outils efficaces pour aider à sa conception, sa construction et sa maintenance. Ainsi, l'efficacité énergétique des bâtiments est un indicateur important pour une partie des enjeux énergétiques actuels (conservation des ressources, réduction de l'empreinte carbone et gaz à effet de serre, utilisation d'énergies renouvelables, etc.), et l'isolation thermique est un des points clés pour atteindre l'objectif. pour réduire la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. Car ce type de matériau isolant est au cœur de l'ensemble de solutions utilisé pour réaliser de futures économies d'énergie. En agissant sur les déperditions thermiques, l'isolation permet de réduire la chaleur en hiver et d'éviter l'utilisation de la climatisation en été.

La plupart des maisons construire en Algérie aujourd'hui sont relativement peu isolées, ce qui signifie que ces bâtiments ont des déperditions thermiques élevées et donc consomment beaucoup plus d'énergie, et l'efficacité énergétique n'est toujours pas appliquée à la production de bâtiments. De plus, ils sont chauffés par des combustibles fossiles et sont donc de gros pourvoyeurs de gaz à effet de serre, en partie à cause du changement climatique. L'élévation de la température globale et la forte consommation d'énergie nécessitent le développement de concepts d'efficacité énergétique applicables aux bâtiments. L'isolation est complexe et très diversifiée. Selon les matériaux utilisés et les pièces à isoler, les économies apportées par l'isolation sont très variables.

L'amélioration continue de la technologie de l'enveloppe du bâtiment montre qu'en utilisant de nouveaux matériaux de construction intelligents basés sur le stockage d'énergie pour surmonter les conditions climatiques et maintenir le confort intérieur à un coût énergétique inférieur, les

bâtiments résidentiels seront bientôt construits avec de faibles charges de chauffage et de refroidissement. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux intelligents basés sur des principes physiques simples, ils absorbent de l'énergie et se liquéfient, à partir des caractéristiques de température spécifiques de chaque matériau, et récupèrent de l'énergie lorsque sa température ambiante baisse. Lors du choix du MCP, sa température de fusion et de solidification doit être proche de la plage de température moyenne de l'air ambiant. Les matériaux à changement de phase (PCM) sont utilisés pour fournir une inertie suffisante pour profiter de la fraîcheur nocturne pendant les heures les plus chaudes de la journée. L'utilisation proposée du MCP comprend la construction d'un système d'échangeur d'air/MCP combiné à la ventilation naturelle du bâtiment. Ainsi, l'échange thermique entre la paroi MCP et l'air ambiant s'effectue par convection naturelle pour assurer un plus grand échange. Le stockage est effectué par chaleur latente à la bonne température de fusion/solidification du MCP. Pour cette raison, un modèle 2D du dispositif basé sur la modélisation des volumes finis a été développé, un MCP avec une capacité calorifique équivalente C_{eff} . Ce modèle numérique validé est combiné au modèle global du bâtiment sous Ansys Fluent pour simuler et évaluer le fonctionnement de plusieurs configurations d'échangeurs air/MCP sous différentes contraintes thermiques. Pour atteindre cet objectif, l'étendue de cette étude est subdivisée en quatre chapitres.

Le premier chapitre, concerne l'efficacité énergétique dans le bâtiment. Ce chapitre expose les besoins d'énergie dans les bâtiments.

Le deuxième chapitre est dédié sur les matériaux à changements de phase en bâtiments. Ce chapitre expose le contexte énergétique du secteur du bâtiment et les repères historique pour l'utilisation de la chaleur lente, avec explication des matériaux à changement des phases et les systèmes associés.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude numérique par la méthode des volumes finis (MVF) d'une paroi en béton à changement de phase. Le logiciel « Fluent » est utilisé afin de résoudre ce problème,

Le quatrième chapitre traite la simulation numérique, discussion et interprétation des résultats obtenus à l'aide du logiciel Fluent.

Une conclusion générale et des perspectives sont présentées à la fin de ce mémoire.

Chapitre I : Efficacité Énergétique Dans Le Bâtiment

1 Introduction :

L'efficacité énergétique est un état de fonctionnement du système dans lequel la consommation d'énergie est minimale. Les études climatiques ont confirmé que d'ici la fin de ce siècle, la température moyenne de l'atmosphère terrestre augmentera entre 1,5 et 6°C [1]. Ce type de réchauffement a provoqué des perturbations climatiques et a eu un impact extrêmement grave sur l'homme. Il ne fait aucun doute que cela deviendra de plus en plus important à l'avenir. Afin de les limiter et d'assurer le développement durable de notre société, il est désormais largement admis que d'ici 2050, les émissions de gaz à effet de serre de la planète doivent être réduites de moitié. Par conséquent, l'efficacité énergétique elle-même est un objectif politique reconnu. Tous les pays, quel que soit leur statut énergétique, doivent baser leurs développements sur d'autres types d'énergie tout en essayant de maîtriser par ailleurs leur consommation énergétique par la mise en place de politiques d'efficacité énergétique volontaristes et adaptées.

2 Efficacité énergétique dans le bâtiment :

L'efficacité énergétique fait référence à la réduction de la consommation d'énergie sans compromettre le confort du bâtiment ou la qualité du service. La consommation d'énergie du secteur de la construction représente plus de 40 % de l'énergie totale et 20 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre et se positionne comme un acteur clé pour relever avec succès les défis préoccupants auxquels il est confronté. Ce secteur est susceptible d'être le seul qui offre une possibilité suffisamment forte pour réaliser la promesse de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ces opportunités d'avancement sont maintenant mieux reconnues qu'au cours des dernières années, et les bâtiments peuvent utiliser une variété de sources d'énergie, y compris les énergies renouvelables. Le bâtiment peut être construit à deux fins différentes :

- Usage tertiaire (tel que commerce, bureau, éducation, santé, etc.)
- Usage résidentiel (bâtiments d'habitation, maisons unifamiliales ou maisons collectives).

Le cycle de vie du bâtiment est divisé en plusieurs étapes, toutes impliquant de nombreuses industries et utilisateurs, qui ont un impact direct ou indirect sur l'environnement : la production des matériaux, le transport des matériaux, la construction des bâtiments, l'utilisation des bâtiments et la durée de vie finale de déchets. Cependant, mener des actions efficaces pour réduire significativement la consommation d'énergie nécessite d'identifier les facteurs de gaspillage afin de les maîtriser dans le futur. De nombreuses recherches et retours empiriques indiquent que la réduction de la consommation énergétique des bâtiments nécessite une conception du bâtiment qui prend en compte la compacité du bâtiment, la gestion des apports solaires passifs et l'isolation

excessive de la structure enveloppe. Un certain nombre de terme sont utilisés pour désigner les bâtiments présentant une forte efficacité énergétique:

2.1 Maison passive:

Les bâtiments passifs, souvent appelés « maisons sans chauffage », reposent sur un concept architectural très basse consommation, basé sur l'utilisation d'apports thermiques « passifs » du soleil, sur des matériaux isolants très résistants (murs, fenêtres, etc.), en termes d'absence de pont thermique, de bonne étanchéité à l'air et de maîtrise de la ventilation. Les maisons passives consomment 90 % moins d'énergie thermique que les bâtiments existants et 50 % moins que les maisons neuves. [1].

Quels que soient son mode de construction et sa situation géographique, une maison passive avec tous les niveaux de confort actuels ne nécessitera pas plus de 15 kWh de chauffage par mètre carré et par an. [1]. Quatre critères permettent de juger si un bâtiment peut obtenir un label « bâtiment passif » :

- Besoins de chauffage $< 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2.\text{a})$ ou puissance de chauffage $< 10 \text{ W}/\text{m}^2$
- Demande totale d'énergie primaire (y compris les appareils électroménagers) $< 120 \text{ kWh} / (\text{m}^2.\text{a})$
- Moins de 10 % d'heures de surchauffe annuelles ($> 25 \text{ }^\circ\text{C}$) [2] .

Afin d'assurer le confort été comme hiver, la conception des Maisons Passives doit éviter les pertes incontrôlées (appelées « parasites »), notamment l'air chaud. Par conséquent, son étanchéité à l'air est très importante. Les maisons passives n'aiment pas non plus les ponts thermiques, les endroits dans le bâtiment où la chaleur est perdue plus rapidement... et inutile. Ils sont généralement causés par l'assemblage non étanche à l'air des éléments porteurs du bâtiment. Les maisons passives réduisent considérablement ces zones de déchets.

Techniquement parlant, les bâtiments passifs sont :
l'isolation renforcée, les fenêtres dites « chaudes », la ventilation récupérateur de chaleur, l'étanchéité à l'air, la suppression des ponts thermiques, l'optimisation des apports solaires gratuits, et l'utilisation d'équipements économes en énergie. Financièrement, les bâtiments passifs sont le meilleur compromis architectural entre coût global d'exploitation et investissement. Voir la figure 1-1 ci-dessous :

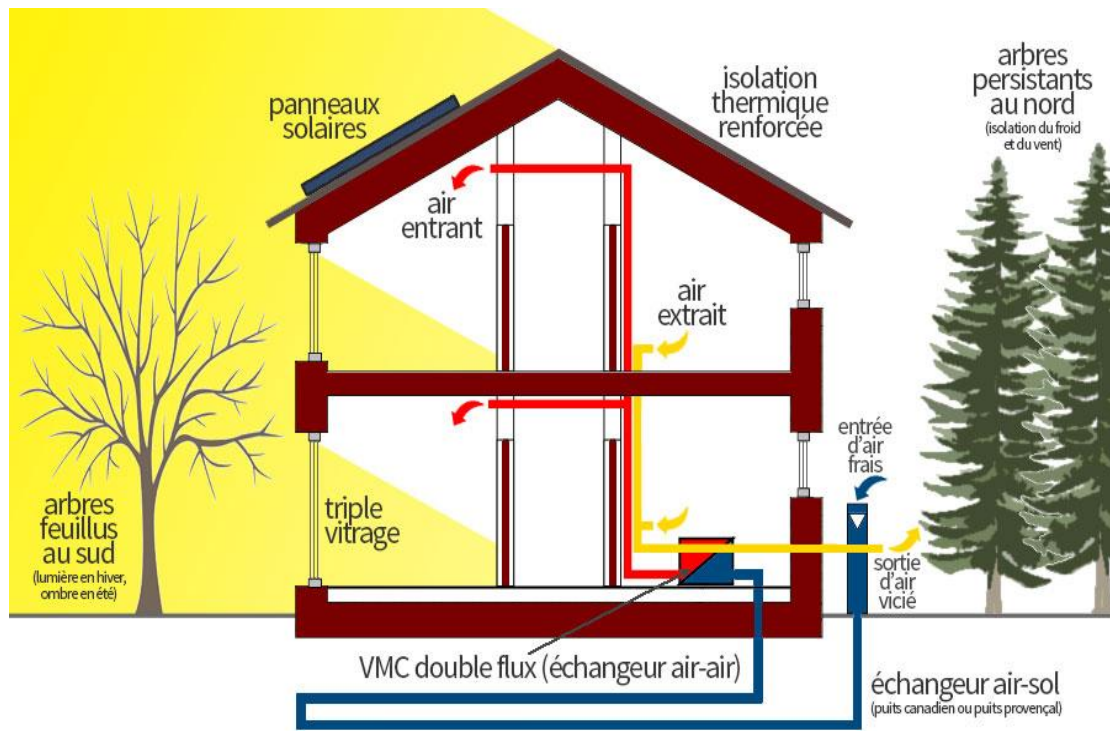


Figure 1-1: Schema habitat passive [12]

2.2 Bâtiment basse énergie:

Bâtiment Basse Consommation (BBC) est un label attribué aux bâtiments à faible consommation énergétique en termes de chauffage, de climatisation, d'éclairage, d'eau chaude sanitaire et de ventilation. La BBC House est donc un bâtiment performant en termes de consommation énergétique, et l'énergie nécessaire est réduite de 50 %. Pour cela, elle a mis en œuvre une conception bioclimatique, une bonne isolation thermique et une bonne étanchéité à l'air, et la sélection du mode de chauffage le plus adapté. Ce label BBC présente de nombreux avantages : il permet la baisse des taxes foncières et réduit la dilapidation du coefficient d'occupation des sols (COS). Selon l'ancienneté de la maison, il y a deux conditions pour l'octroi du label BBC : -Les maisons neuves ne doivent pas excéder 50kWh/m².an. -La consommation du logement existant doit être inférieure à 50% de la consommation conventionnelle. L'objectif de consommation est fixé pour eux à 80 kWh/m².an.[3].

2.3 Bâtiment très basse énergie:

Ces bâtiments à très basse consommation d'énergie ne nécessitent pas de systèmes de chauffage ou de refroidissement actifs : apport solaire passif et l'intérieur et le système de ventilation sont suffisants pour maintenir une atmosphère intérieure confortable tout au long de l'année[4]. Il s'agit généralement de bâtiments passifs, dont le concept a été défini par le Dr Wolfgang Feist de l'institut de recherche allemand Passiv haus. Ils sont définis comme des bâtiments qui ont une atmosphère intérieure confortable en hiver et en été et ne nécessitent aucune

méthode de chauffage ou de refroidissement. Ceci peut être obtenu grâce à une forte isolation thermique, une réduction significative des ponts thermiques et une très bonne étanchéité à l'air. De plus, un système de ventilation double flux qui récupère la chaleur de l'air extrait réduit les pertes de ventilation. [4]

2.4 Bâtiment à énergie zéro :

Bâtiment à consommation énergétique nette nulle, ce qui signifie que la quantité totale d'énergie utilisée, calculée sur une base annuelle, est à peu près égale à la quantité d'énergies renouvelables externes. Ces bâtiments contribuent par conséquent moins aux gaz à effet de serre dans l'atmosphère que les bâtiments similaires. Ils consomment parfois de l'énergie non renouvelable et produisent des gaz à effet de serre, mais à d'autres moments ils réduisent ailleurs la consommation d'énergie et la production de gaz à effet de serre. Le principe de la consommation d'énergie nette zéro est considéré comme un moyen de réduire les émissions de carbone et de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et bien que les bâtiments à énergie nulle restent rares. [5]

2.5 Bâtiment à énergie positive :

Bâtiment à énergie positive (BEPOS) est un bâtiment qui produit plus d'énergie (électricité, chaleur) qu'il n'en consomme pour son fonctionnement. Cette différence de consommation est généralement considérée sur une période lissée d'un an. Si la période est très courte, on parle plutôt de bâtiment autonome. Il s'agit généralement d'un bâtiment passif très performant et fortement équipé en moyens de production d'énergie par rapport à ses besoins en énergie. Les toits, murs, voire les fenêtres ou d'autres éléments (verrières de véranda ou balcons, murs d'enceinte, toiture de Garage ou appentis, fondations, etc.). Le caractère excédentaire en énergie (« positif ») est permis par des principes Construction ifs et bioclimatiques, mais aussi par le comportement des usages (gestion efficace des usages, des consommations de l'électroménager et de l'informatique, de la mobilité...).

La quantité d'énergie produite sur le toit, murs, Combrières..Etc., doit au moins compenser la somme des consommations énergétiques moyennes annuelles sous le toit. [6]

3 Le besoin d'énergie dans le bâtiment :

Le besoin brut du bâtiment est la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir, pendant une période de temps donnée, un climat intérieur convenable et satisfaire les prestations du bâtiment (eau chaude, cuisson, éclairage ... différentes formes, c'est Pourquoi elle est appelée «protéiforme ».

Dans le bâtiment, le maintien d'un confort thermique agréable s'oppose aux recherches d'économie d'énergie. D'où, on ne pourra répondre à cet aspect contrasté que par une conception "globaliste" du bâtiment. Pour se faire, il faut posséder de bonnes notions sur les paramètres climatiques, l'inertie thermique des bâtiments et leur localisation. Cette approche du besoin d'énergie de chauffage et de climatisation renvoie trois facteurs explicatifs [7]:

- Le besoin en température; est un besoin de climat intérieur, caractérisé par la température intérieure moyenne (qui explique principalement de façon quantitative le besoin d'énergie de chauffage ou climatisation) ce besoin en température est, un besoin « social ».
- Les caractéristiques physiques du logement qui interviennent de façon prépondérante dans la création du besoin d'énergie sont le volume et le degré d'isolation. D'autres caractéristiques importantes distribuent que l'exposition au soleil, au vent, le vitrage qu'on doit prendre en considération dès la conception et l'implantation;
- Le climat du site, qui détermine la période du besoin. Le besoin d'énergie se traduit par la demande d'énergie finale, par exemple les besoins de chaleur pour le chauffage d'une maison donnent naissance à une demande d'électricité, du Essence ou de gaz .

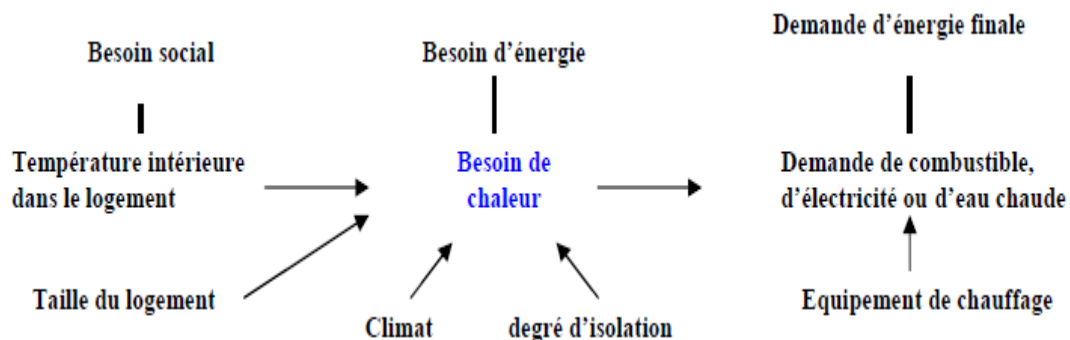


Figure 1-2 : Demande de l'énergie finale dans le cas du chauffage domestique.[7]

3.1 Réduction des consommations énergétique dans le bâtiments :

3.1.1 Le bâtiment est un gros consommateur d'énergie :

Le bâtiment est classé comme étant un secteur énergivore ; en conséquence, il est source d'une partie non négligeable de la pollution .Cette énergie est l'objet de nombreux usages, notamment :

- **Le chauffage** et/ou le **refroidissement**, pour assurer un climat intérieur confortable ;
- **La circulation** de fluides tels que l'air (ventilation), l'eau (eau chaude, chauffage) ;
- **Les transports** (ascenseurs) ;
- **L'éclairage** ;
- **Les communications** (téléphone, radio, télévision) ;
- **La production** de biens (fabriques, cuisines, couture, etc.).

Dans les **climats tempérés et froids**, la plus grande part de l'énergie utilisée par un bâtiment sert au chauffage. Le flux de chaleur généré dans le système de chauffage aboutit inévitablement à l'extérieur par différentes voies plus ou moins directes.

Dans les **climats plus chauds**, il peut être nécessaire et en tous cas confortable d'abaisser la température intérieure des bâtiments. Ce refroidissement, et l'assèchement de l'air (sous les tropiques) peut aussi être un grand consommateur d'énergie.

3.1.2 Le bâtiment devrait être confortable

Si un bâtiment est bien conçu et construit, il peut fournir un confort nettement supérieur (courbe de la Figure 1-3). Un tel bâtiment ne surchauffe pas ou peu en été et profite des gains solaires pendant les périodes froides, pour raccourcir la saison de chauffage [8]

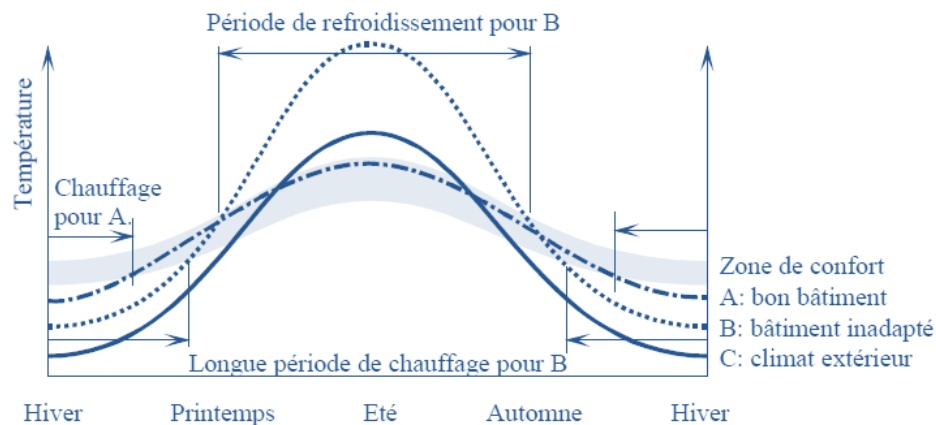


Figure 1-3 : Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, sans effet des installations techniques de chauffage ou climatisation [8].

La bande grisée représente les exigences de confort. C'est représentée la température extérieure, A un bâtiment bien conçu et B un bâtiment inadapté à son climat.

Un bâtiment inadapté à son climat, a tendance à surchauffer en saison chaude et à être glacial en saison froide. Ces bâtiments consomment de grandes quantités d'énergie pour assurer un confort acceptable [8].

3.2 Comment réduire la consommation en énergies des bâtiments ?

3.2.1 Diagnostiquer les bâtiments :

C'est la première étape de la mise en œuvre de méthodes de réduction de la consommation d'énergie. Vous pouvez réaliser un diagnostic de performance énergétique (dpe) ou un audit énergétique. Les deux peuvent évaluer les dépenses énergétiques (et leurs coûts) des bâtiments liés à votre industrie et déterminer des actions pour réduire la consommation d'énergie liée aux

équipements du bâtiment. La DPE elle-même veille à ce que les pièces soient classées selon leur statut énergétique. Il est associé à des informations sur la faiblesse du bâtiment obtenues à partir des mesures prises sur place. Ainsi, le diagnostic a développé des pistes améliorées pour améliorer vos performances énergétiques et initier une démarche de réduction de consommation, puis effectuer une conversion d'énergie conformément à la réglementation en vigueur.

3.2.2 Réaliser des travaux d'isolation

Dans les recommandations efficaces formulées dans le diagnostic de performance énergétique ou le rapport d'audit énergétique, il est quasi systématique de réaliser des travaux de rénovation, notamment l'isolation ou le système de chauffage. Cependant, tous les types de bâtiments n'en ont pas besoin. Certaines personnes peuvent réduire considérablement leur consommation d'énergie en installant des solutions de mesure et d'analyse des données énergétiques. Travailler à une meilleure isolation permet également d'optimiser l'utilisation des sources d'énergie telles que la climatisation, la ventilation et le chauffage, très nocives pour l'environnement. Une bonne isolation peut réduire le risque de perte d'énergie et de sur utilisation. Bref, l'isolation réduit les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. De quoi réduire votre consommation finale d'énergie en été comme en hiver.

3.2.3 Privilégier les énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables font des progrès significatifs. Ils deviennent une nouvelle référence qui devient de plus en plus courante parmi les choix chauds des entreprises. Dans l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et géothermique, vous pouvez réduire considérablement les coûts de construction. Cependant, il faut avoir un bon niveau d'isolation et intégrer les bonnes pratiques pour réduire la consommation d'énergie pour tirer le meilleur parti des énergies renouvelables. Réutiliser l'énergie existante pour répondre à sa consommation est une réponse au défi climatique actuel. Les entreprises impliquées sont pleinement intéressées à leur prêter attention afin d'approfondir les moyens d'améliorer l'efficacité énergétique.

3.2.4 Choisir un éclairage à basse consommation :

L'éclairage n'est pas la seule source de dépenses énergétiques des entreprises. Mais il est commun à tous les départements d'activité. Comme le gaz naturel, l'électricité est en effet une source d'énergie et nécessite d'importantes réserves pour sa production. Par conséquent, afin de réduire la consommation électrique du bâtiment, il est fortement recommandé de choisir un système d'éclairage qui consomme peu. Les ampoules basse consommation, en particulier les LED, sont idéales pour réduire la consommation d'énergie. Idéalement, vous pouvez installer des solutions de

contrôle d'éclairage dans les bâtiments pour contrôler la consommation d'énergie. D'autres solutions, telles que l'installation de détecteurs de présence, vous aideront à atteindre vos objectifs d'économie d'énergie. [9]

3.3 Economie d'énergie dans le processus de gestion énergétique :

La consommation d'énergie des bâtiments commerciaux et résidentiels peut être réduite en améliorant l'isolation des murs et des toits et en prenant des mesures pour réduire la consommation d'énergie incontrôlée. Mais toute discussion sur l'efficacité énergétique ne peut se limiter à une utilisation plus efficace de l'énergie ou à une « technologie passive ». En particulier, il est jugé nécessaire d'adopter une approche plus globale qui combine l'utilisation de technologies de pointe. L'efficacité énergétique fait partie de l'intelligence énergétique. L'utilisation intelligente de l'énergie signifie utiliser pleinement l'énergie primaire utilisée. Il combine des économies d'énergie intelligentes avec une facilité d'utilisation améliorée et des économies de coûts durables. Les systèmes d'automatisation Intelligents tels que les systèmes de gestion de l'énergie (EMS) et les systèmes utilisant de l'énergie replaces ont un Grand potentiel pour gagner considérablement l'efficacité énergétique dans les bâtiments

La consommation d'énergie des bâtiments résidentiels et commerciaux dépend en grande partie de la façon dont divers appareils consommateurs d'énergie (pompes, moteurs, ventilateurs, radiateurs, refroidisseurs, équipements d'éclairage, etc.) sont assemblés dans un système, plutôt que de l'efficacité des appareils individuels. Au niveau du système, les opportunités d'économies sont généralement plusieurs fois supérieures à ce qui peut être réalisé au niveau de l'appareil, et ces économies au niveau du système peuvent généralement être réalisées à un coût en capital net. L'idée de construire un bâtiment économe en énergie nécessite un processus de conception dès le début, dans lequel les performances du bâtiment et de ses composants de système d'ingénierie doivent être sélectionnées par le biais d'un processus itératif impliquant tous les membres de l'équipe de conception. [5- 6] .

Les décisions et solutions de base qui ont un grand impact sur l'efficacité énergétique des bâtiments commerciaux ou résidentiels pendant le processus de conception sont :

- orientation, forme et masse thermique du bâtiment
- performance thermique de l'enveloppe du bâtiment
- solutions pour le chauffage passif, le refroidissement, la ventilation et l'éclairage naturel

- sélection d'appareils consommateurs d'énergie individuels en fonction de leur efficacité énergétique et si possible correctement dimensionnés
- intégration de tous les systèmes d'ingénierie dans un EMS avec des scénarios définis pour l'efficacité énergétique

Ces étapes permettent généralement d'économiser 35 à 50 % d'énergie dans les nouveaux bâtiments commerciaux. D'une manière générale, en choisissant une forme de bâtiment appropriée et en enfermant des performances élevées, les charges de chauffage et de refroidissement peuvent être minimisées et la possibilité d'éclairage naturel peut être maximisée. Les systèmes mécaniques associés peuvent être considérablement réduits, ce qui permet de réduire les coûts, ce qui peut compenser les coûts supplémentaires des enceintes hautes performances et les coûts supplémentaires liés à l'installation d'équipements de haute qualité (efficaces) dans tout le bâtiment. Au stade de la conception, la solution ci-dessus est formulée par l'architecte en tenant compte de la forme, de l'orientation, de l'auto-ombrage, du rapport hauteur/terrain, du rapport fenêtre/mur, du niveau du bâtiment, de l'isolation et des caractéristiques du bâtiment. Utilisation intensive des fenêtres, de l'intérieur des bâtiments et des décisions qui affectent les opportunités et l'efficacité de la ventilation et du refroidissement passifs. La ventilation passive réduit la demande d'énergie mécanique en expulsant directement l'air chaud lorsque l'air inhalé est plus froid que l'air extérieur, réduisant ainsi la température perçue en raison de l'effet rafraîchissant du mouvement de l'air, et augmentant la température acceptable grâce à un ajustement psychologique. Lors de l'utilisation de Windows. La ventilation passive peut non seulement réduire la consommation d'énergie, mais aussi améliorer la qualité de l'air pour répondre aux besoins des personnes généralement: une connexion. [10].

3.4 Perspective sur le besoin de maîtrise de la demande énergétique :

Afin de contrôler la croissance rapide de la consommation d'énergie des bâtiments, de nombreux gouvernements ont établi des objectifs d'efficacité énergétique des bâtiments. Par conséquent, les cibles de consommation d'énergie fixées par les propriétaires et les concepteurs ne devraient pas dépasser les cibles fixées par les spécifications et normes cibles du gouvernement. De manière générale, il n'y a pas de différence entre les performances énergétiques simulées et prévues d'un bâtiment, car la valeur prévue est dérivée de la valeur simulée. Au stade de la conception, le bâtiment est conçu en fonction des objectifs fixés par le propriétaire et le concepteur, et la consommation énergétique attendue du bâtiment est obtenue par modélisation et simulation. Il convient de noter que la conception est un processus qui peut être optimisé en permanence. Si la performance énergétique prévue ou simulée ne répond pas aux objectifs fixés par le propriétaire et

le concepteur, la conception doit être ajustée. Cependant, en raison de contraintes de temps et de ressources, les normes cibles définies par les propriétaires et les concepteurs peuvent également être abaissées. Avec le développement de la technologie de surveillance de l'énergie, la précision de la surveillance de l'énergie des bâtiments continue de s'améliorer. On peut dire que la performance énergétique mesurée est la performance énergétique réelle[11] .

4.Conclusion

Le bâtiment est considéré comme un secteur économique clé, fortement consommateur d'énergies et émetteur de gaz à effet de serre. On constate que la climatisation et le chauffage consomme une portion non négligeable en matière d'énergies. Pour une meilleure efficacité énergétique des bâtiments, l'exploitation rationnelle et le remplacement progressif des sources d'énergies traditionnelles par des énergies renouvelables, doivent figurer parmi les objectifs de toute politique énergétique viable.

La conception des bâtiments à faible consommation d'énergie est un processus complexe qui nécessite une approche particulière. En effet, les choix techniques et architecturaux retenus pour ce genre de conception influent de manière très importante sur le comportement énergétique du bâtiment. Ainsi, la forme du bâtiment, sa compacité, son orientation, ont des conséquences significatives sur sa performance énergétique.

L'efficacité énergétique peut aider à lever cet obstacle. Il peut sembler paradoxal de promouvoir les économies d'énergie pour ceux qui n'ont pas d'énergie à économiser.

Chapitre II : Introduction Sur Les Matériaux A Changement De Phase En Bâtiment

1 Introduction :

L'une des solutions bien connue pour limiter l'impact du réchauffement climatique consiste à réduire la consommation énergétique globale, notamment dans le secteur du bâtiment qui représente une part non négligeable de cette dernière, où il existe donc un potentiel important lié à l'amélioration de l'efficacité énergétique. C'est la raison pour laquelle de nombreuses études se sont intéressées (et s'intéressent encore) aux diverses possibilités techniques permettant d'atteindre cet objectif de diminution des besoins. L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) a été avancée comme l'une des solutions potentielles pour satisfaire une partie de ces attentes. Cependant, il apparaît que les conclusions quant à leur efficacité réelle sont assez contradictoires. On s'aperçoit dans un premier temps que les conditions d'utilisation sont souvent mal renseignées, par ailleurs, on constate aussi régulièrement que la modélisation des MCP dans les logiciels de simulation thermique dynamique (STD) n'est pas adéquate. Pour ce qui relève de la deuxième difficulté, il paraît donc judicieux de se doter d'une méthode de détermination efficace des propriétés thermo physiques des MCP mais aussi d'estimer l'impact qu'une telle erreur peut induire sur les conclusions de l'utilisation de MCP dans le bâtiment [13].

On nomme **Matériau à Changement de Phase** - ou **MCP** - tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement localisée entre 10 et 80 degrés. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...) [13].

2 Le contexte énergétique du secteur du bâtiment :

2.1 Contexte énergétique mondial

Le secteur des bâtiments a des enjeux énergétiques mondiaux et régionaux importants. Au niveau mondial, Le secteur des bâtiments représente à lui seul autour de 32 % de la consommation d'énergie finale et contribue à hauteur d'un tiers environ des émissions de CO₂, comme le montre la figure 2-1 suivante :

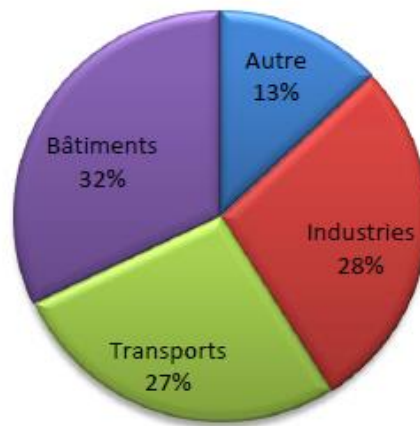


Figure 2-1 : Répartition de la consommation mondiale d'énergie finale par secteurs en 2008, (Agence internationale de l'énergie, 2010).

Le potentiel d'économies d'énergie dans le secteur du bâtiment est estimé autour de 40 %. [14].

Dans les pays du Sud méditerranéen, le bâtiment est responsable de plus d'un tiers de la consommation d'énergie (38 % en moyenne, variant entre 27 % et 65 % dans les PSEM (figure 2-2) pour l'énergie, et entre 21 % et 51 % pour l'électricité). Agir sur ce secteur constitue donc un levier d'action significatif pour intervenir à la fois sur la demande (mesures d'efficacité énergétique) et sur l'offre (intégration d'énergies renouvelables).



Figure 2-2 : Les Pays du Sud et de l'Est Méditerranéen (PSEM).[15]

Parmi les différents types de bâtiments actuellement disponibles dans les PSEM, les bâtiments résidentiels, administratifs et commerciaux représentent à eux seuls plus de 60 % des émissions de gaz à effet de serre de ce secteur. Compte tenu de la croissance démographique attendue dans la région et de l'amélioration globale prévisible du niveau de vie, ces tendances ne devraient pas s'atténuer au cours des prochaines années. Par conséquent, le secteur résidentiel a un grand potentiel d'économie d'énergie à des coûts relativement compétitifs. Par conséquent, le projet pilote montre que si 10 à 25 % supplémentaires du coût de construction sont augmentés, jusqu'à 60 % d'économies d'énergie (principalement liées à l'utilisation de la climatisation et du chauffage) peuvent être réalisées . [15]

La région sud de la Méditerranée ne fait pas exception, car, en moyenne, le secteur de la construction représente environ 38 % de la consommation d'énergie (le pourcentage varie d'un pays à l'autre et se situe entre 27 % et 65 %). Il représente également la source d'épargne la plus importante : dans la plupart des pays de la région, le taux d'épargne est généralement d'environ 40 %. Comme le montre la figure ci-dessous (Figure 2-3) issue d'une étude menée par le Plan Bleu en 2009, ce potentiel peut être réalisé en agrégeant les effets de plusieurs mesures individuelles.

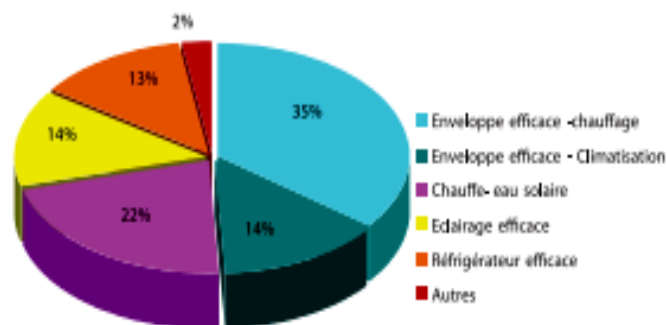


Figure 2-3 : Structure du potentiel d'efficacité énergétique dans la région de la méditerranée du sud sur la période 2010-2030. (Étude régionale sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment, Plan Bleu, 2009). [15]

A noter que la mesure de l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment couvre à elle seule 50 % de ce potentiel, grâce à elle signifie des économies d'énergie sur les besoins de chauffage et de climatisation. Cela montre l'importance des mesures réglementaires liées à la performance thermique des bâtiments. [15]

L'Algérie pays exportateur de pétrole et disposant d'importantes ressources en gaz naturel et en pétrole, a tout intérêt à mettre en place une politique visant à renforcer l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment. En effet, la hausse continue de la consommation domestique en énergie contribue à la diminution des exportations d'hydrocarbures et par là même à une réduction des capacités de financement de l'activité économique. S'engager dans une politique d'efficacité

énergétique permettrait ainsi à l'Algérie de préserver ses ressources en hydrocarbures, qui constituent leur axe principal de développement économique, et de préserver dans le même temps la capacité de financement de l'activité économique. Avec le programme triennal d'efficacité énergétique 2011-2013, partie de son programme national ambitieux des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique adopté par le conseil des ministres en Février 2011, l'Algérie s'ouvre la voie pour devenir un leader dynamique dans la région par rapport à l'énergie propre. Ce programme permettra un développement social et économique durable et instaurera un nouveau modèle de croissance à travers l'implantation d'industries créatrices de richesses.

L'Algérie s'engage dans la transition énergétique, mais ne compte pas pour autant abandonner les énergies fossiles dont son sous-sol regorge. Le pays continuera de s'appuyer sur le pétrole et le gaz, mais entend diversifier ses sources de production d'énergie par un recours massif au solaire et à l'éolien.

Ainsi, un plan d'investissements de 40 milliards de dinars a été signé fin 2018. Le plan prendra fin en 2020 et prévoit d'alimenter 1 541 écoles et 148 mosquées en électricité produite à partir du solaire, d'installer 100 000 poteaux d'éclairage public alimentés par des panneaux solaires.

Après la mise en oeuvre de cette politique, des changements technologiques et industriels doivent être apportés dans les domaines de la recherche, de la conception et de l'isolation des bâtiments. Pour répondre à ces défis, des Matériaux intelligents à Changement de Phase (MCP) ont fait leur apparition sur le marché de la construction. Grâce à leur capacité de stockage de l'énergie, les MCP sont de plus en plus associés aux matériaux de construction classiques (béton, plâtre, chaux etc.) afin d'améliorer leur inertie thermique et apporter un meilleur confort aux occupants.[30].

2.2 Contexte environnemental :

2.2.1 Effet de serre et changements climatiques :

L'énergie est au cœur des enjeux du changement climatique. L'augmentation de la teneur en dioxyde de carbone observée dans l'atmosphère est liée aux activités humaines, principalement liées à la production d'énergie ; d'autre part, à la consommation énergétique finale du secteur du bâtiment (climatisation des bâtiments, chauffage, etc.). Près des deux tiers sont directement attribuables au secteur de la construction, principalement des installations de chauffage et de la production d'eau chaude et froide. Elles ont augmenté de plus de 23 % en 2012 ; on considère ici les seules émissions de dioxyde de carbone relativement stables dans les secteurs résidentiel et tertiaire, y compris les réseaux d'électricité et de chauffage dans le secteur du chauffage. Industrie de l'énergie. Nous estimons que la consommation énergétique de cette industrie se traduit par environ 120 millions de tonnes d'émissions de dioxyde de carbone.

2.2.2 Impact du secteur bâtiment :

L'augmentation du nombre de bâtiments est un facteur explicatif de l'augmentation de la consommation d'énergie dans le tertiaire. Le secteur de la construction se classe au deuxième rang avec seulement 23 % d'émissions, juste derrière le secteur des transports, mais c'est toujours un secteur à très forte contribution. Sa contribution plus faible est en partie due à sa consommation d'énergie et d'émissions moindres, et il est plus diversifié que le secteur des transports qui utilise plus de 90 % du pétrole. [16]

Le bâtiment peut être considéré comme un nœud énergétique complexe car il est relié à de nombreux flux énergétiques : réseaux de chaleur, réseau électrique, réseau de gaz et apport gratuit (solaire, vent).

3 Repères historiques pour l'utilisation de la chaleur latente :

L'histoire des MCP est assez ancienne, puisqu'il apparaît que la glace était déjà utilisée au Moyen Âge, aux alentours des années 1200, comme stockage d'énergie thermique en Iran pour refroidir les aliments. La glace était prélevée des lacs ou rivières gelées en hiver, et la fonte était limitée par des dispositifs d'isolation à base de sciures de bois et/ou de paille. De nos jours, l'utilisation de la glace pour refroidir les bâtiments est la seule application véritablement diffusée du stockage d'énergie thermique par chaleur latente. Le développement des MCP est quant à lui plus récent puisqu'il a fallu attendre l'année 1949 pour que Maria Telkes, ingénieur hongroise, ne conçoive une maison solaire à Boston, aux Etats Unis, dans laquelle un système de chauffage utilisant les MCP soit intégré. Parmi les premières installations réalisées à base de MCP, 3 containers en acier de 21 tonnes (au total) de sulfate de sodium déca hydraté (ou sel de Glauber) ont été utilisés pour chauffer une zone de 135 m² de plancher. Le système tel qu'il était conçu, permettait de stocker l'équivalent de 12 jours de chauffage et a relativement bien fonctionné durant 2 saisons de chauffage. Ensuite, le fonctionnement a été altéré à cause de la ségrégation et de la déshydratation du sel. A la suite de ces constats, Maria Telkes ainsi que nombreux chercheurs ont orienté leurs recherches sur l'encapsulation et la stabilisation des MCP. En parallèle, à partir du milieu des années 1940, les industries alimentaires ont commencé à comprendre l'intérêt des MCP pour la conservation de la nourriture pendant le transport et le stockage. Pour cette application des MCP ont été encapsulés dans du métal. Les héritiers directs de cette technologie sont les accumulateurs de froid que chacun a déjà placé dans sa glacière comme ceux présentés sur la Figure 2-4. Ces accumulateurs sont composés d'un gel eutectique, c'est-à-dire un mélange de 2 corps purs capables de changer d'état, protégé par une enveloppe rigide en polyéthylène.



Figure 2-4 : Accumulateurs de froid à base de gel eutectique [17]

Des blocs de chaleur à usage thérapeutique ont été également commercialisés à la même période, et des produits similaires sont toujours utilisés actuellement pour conserver la chaleur des pizzas pendant la livraison par exemple. Au milieu des années 1950, les MCP ont été utilisés avec succès pour stocker l'électricité aux heures de pointe, comme par exemple par Philadelphia Electric Company. Aussi des accumulateurs de froids constitués de sels à basse température de fusion (sulfates de magnésium, de sodium, de potassium, et/ ou chlorures de sodium, d'ammonium, de calcium et de magnésium) ont servi à stocker les produits pharmaceutiques et les denrées médicales périssables telles que le sang par exemple. Des dérivés de ces produits sont toujours en cours d'utilisation. Au cours des années 1960, ce sont les applications pour réchauffer et refroidir le corps humain qui ont vu le jour comme une combinaison de plongée chauffante. Cette application est également toujours utilisée avec notamment des gammes de vêtements, dont les fibres conçues par la société américaine Outlast Technologies, initialement pour protéger les astronautes de la NASA des variations extrêmes de températures de l'espace, sont constituées de microbilles encapsulées à l'intérieur desquelles se trouve un MCP comme indiqué sur la Figure 2-5. Lors de la mission d'Apollo 15 en 1971, la NASA a déjà utilisé les MCP pour refroidir les équipements électriques de la navette. A fur et à mesure que les préoccupations envers l'approvisionnement en énergie grandissaient, les programmes de recherche s'orientaient, d'une manière générale, vers le développement durable et dans une moindre mesure vers les MCP. Aussi les crises énergétiques des années 70 ont eu pour effet de recentrer les domaines de recherche sur le stockage d'énergie thermique. Depuis, différents programmes de recherche ont été menés dans différents pays, que ce soit de la part de laboratoires privés ou universitaires, et une base de données importante sur les MCP a été constituée.[17]

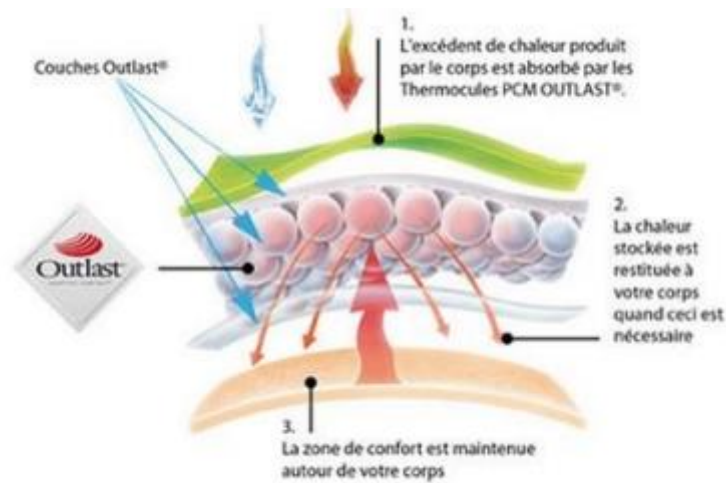


Figure 2-5 : Schéma de fonctionnement des thermocules PCM OUTLAST® .[17]

4 Les matériaux à changement de phase et les systèmes associés :

4.1 Introduction :

Depuis des décennies, le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente suscite l'intérêt de la communauté scientifique. L'utilisation et le développement sont multiformes, impliquant de nombreux domaines. Les matériaux à changement de phase (PCM) sont un matériau prometteur pour le stockage de la chaleur car ils permettent le stockage de la chaleur sensible et latente. Il permet de définir clairement la technologie. La dernière technologie des matériaux à changement de phase et leur application dans la construction peuvent être divisées en trois parties. D'abord, décrivez les matériaux qui composent le groupe MCP et les matériaux qui ont attiré l'attention du département de la construction. Ensuite, il présente l'application directe ou système de la construction à l'aide de MCP. Puis les travaux scientifiques publiés sur l'intégration des matériaux à changement de phase dans les bâtiments ont été revus en termes de modélisation et d'expérimentations.

4.2 Eléments sur les MCP en général :

4.2.1 Le stockage d'énergie thermique :

Le stockage de l'énergie thermique présente de nombreux avantages. En particulier, il peut surmonter l'inadéquation entre l'offre et la demande d'énergie. Tout matériau emmagasine de l'énergie thermique en élevant la température ambiante. Ce stockage peut être sensible ou latent. Dans les bâtiments, le stockage d'énergie dans les matériaux à changement de phase peut tirer parti du comportement énergétique du matériau lors du changement d'état de solide à liquide (et vice versa) de liquide à solide. D'autres changements d'état présentent d'autres avantages qui ne sont pas compatibles avec le cadre de l'habitat et du bâtiment. .

La chaleur latente représente une grande quantité de chaleur dégagée lors de la solidification du matériau, au contraire, l'énergie absorbée lors de la fusion du matériau est la même. [17]

4.2.2 Le changement de phase d'un point de vue énergétique :

➤ Changement de phase d'un corps pur idéal :

La phase d'un corps pur est définie comme : « une région dans l'espace des paramètres thermodynamiques (T, P, V) d'un système composé uniquement de corps purs, dans laquelle l'énergie libre est une fonction analytique. Pour un corps pur de volume V, le diagramme de phases représente l'espace occupé par chaque phase dans le plan des abscisses de température et des ordonnées de pression. Les trois états les plus courants de la matière sont solide, liquide et gazeux. Ces états sont directement liés aux phases du diagramme de phases. La frontière entre les différentes phases représente le changement d'état, la transition de l'état liquide à l'état solide à la solidification et la transition de l'état solide à l'état liquide à la fusion. Tous les changements d'état sont illustrés sur la figure 2-6.

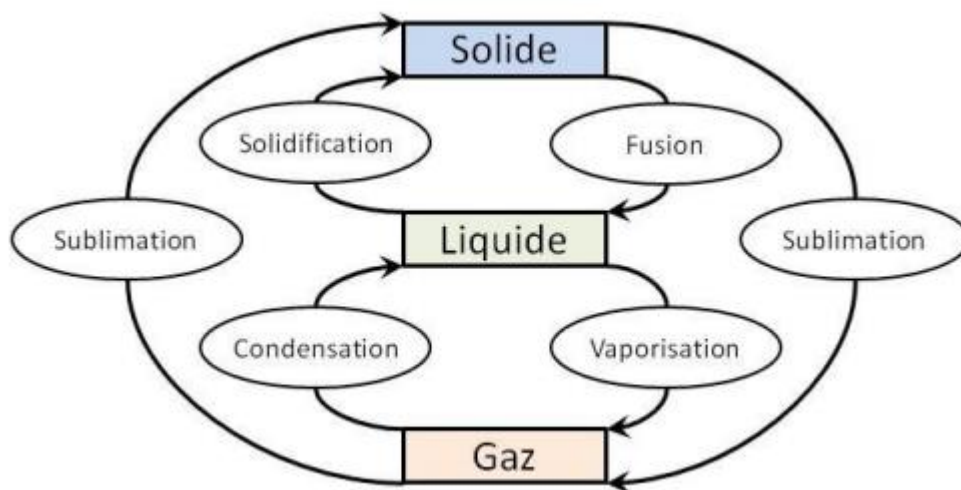


Figure 2-6 : Nomenclature des changements d'état.[17]

La pression peut être considérée comme constante pendant le processus de transformation de l'application du matériau qui nous intéresse. Pour l'intégration du MCP dans les systèmes actifs, il s'agit de la pression atmosphérique ou de la pression du système. La figure 2-7 montre le changement d'état de solide à liquide marqué sur le diagramme de phases à une pression donnée. L'évolution de la température du système provoque un déplacement sur la ligne bleue horizontale. Cette ligne coupe la frontière liquide/solide, donc lorsque la température du système atteint ce point sur la frontière, un changement de phase se produit. Cette température est appelée température de fusion.

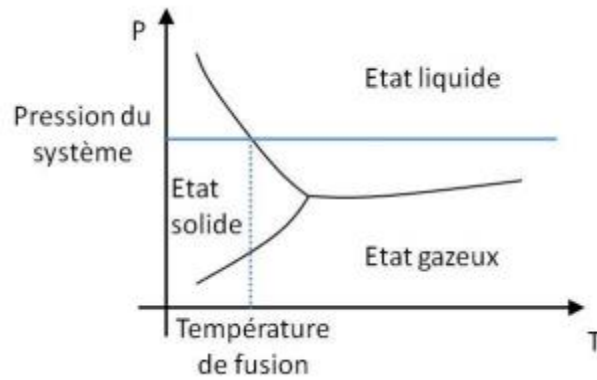


Figure 2-7 : Transformation représentée dans le diagramme des phases.[17]

Du point de vue de la cinétique, du passage d'un équilibre thermodynamique à un autre équilibre thermodynamique, la perturbation du temps t se terminera à $t + \Delta t$. Soit un échelon de température T imposé à un corps pur idéal de masse m . Cette étape permet au matériau de durcir. La transition de l'état thermodynamique stable initial à l'état thermodynamique stable final s'effectue en trois étapes, comme le montre la figure 2-8. Tout d'abord, le liquide est refroidi, moment auquel le corps pur libère de la chaleur sensible pour abaisser sa température. Retournant ainsi à l'équilibre. Lorsque la température de fusion est atteinte, cette étape se termine. Alors le changement de phase à isotherme est égal à la température de fusion. La chaleur latente est dégagée. Cette étape s'achève quand tout le corps pur est en phase solide. Troisième étape, le corps pur à l'état solide se refroidit en libérant de la chaleur sensible pour atteindre la température finale d'équilibre T_2 . L'énergie totale libérée pendant cette transformation avec le passage de T_1 à T_2 vaut :

$$\text{- 1ère étape : } h_l = m \times c_{pl} \times (T_1 - T_f) \quad (1)$$

$$\text{- 2ème étape : } m \times L_f \quad (2)$$

$$\text{- 3ème étape : } h_s = m \times c_{ps} \times (T_f - T_2) \quad (3)$$

Avec c_{pl} la capacité calorifique massique du liquide, c_{ps} la capacité calorifique massique du solide et L_f la chaleur latente de fusion. L'aire sous la courbe de flux représente cette énergie échangée.

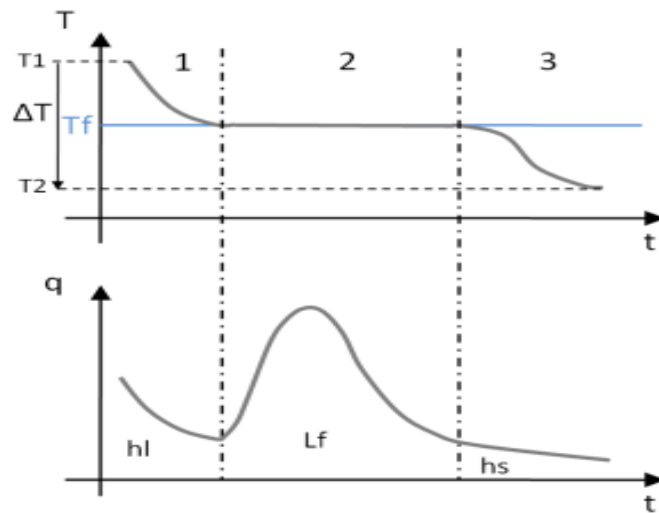


Figure 2-8 : Réponse en température et en flux d'un corps pur idéal lors d'une solidification (source : (David, 2010) .[20]

➤ **Changement de phase d'un corps pur réel :**

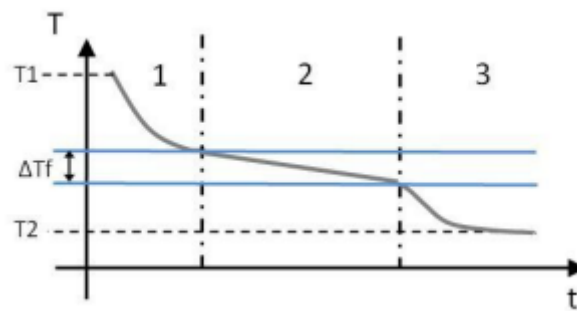


Figure 2-9 : Solidification d'un corps réel (source: (David, 2010)). [20]

Dans le cas de l'ancien corps pur idéal, le changement de phase se produit à une température constante. Dans le cas de substances vraiment pures, et plus encore pour les mélanges, le changement de phase se produit dans une plage de température plus ou moins étroite, selon la situation spécifique. La figure 2-9 montre cette plage de températures pour la deuxième étape. Un autre phénomène se produit lors du changement de phase de l'entité, c'est le phénomène de surfusion. La solidification du matériau est déclenchée par la formation de petits cristaux, et les noyaux de ces petits cristaux se dilatent pour former une phase solide. Le taux de nucléation d'un matériau est sa capacité à former des noyaux lorsque sa température est inférieure à son point de fusion. Si cette vitesse de nucléation est trop faible, la température du matériau peut descendre en dessous de la température de fusion et la phase liquide ne deviendra pas solide. Alors la solidification s'amorce un peu plus tard dès que le nombre de nucléés formé est suffisant et subitement la température interne du matériau remonte à la température de fusion

4.2.3 Potentiel de stockage par chaleur latente et sensible :

Par rapport à la chaleur sensible, le principal avantage de la chaleur latente est qu'une plus grande quantité d'énergie peut être stockée dans le même volume de matière. Pour le même changement de température, y compris la plage de fusion/solidification du MCP, par rapport aux matériaux de maçonnerie avec un MCP de performance pure, la chaleur latente peut stocker 15 fois plus d'énergie que la chaleur sensible.

Tableau 2-1 : les valeurs de capacité de stockage de chaleur sensible de certains matériaux sélectionnés [18]

Matière	Gamme de température (°C)	Densité (kg/m ³)	Capacité thermique massique (J/(kg.K))
Pierres communes	20	2560	879
Briques	20	1600	840
Béton	20	1900-2300	880
Eau 0-100 1000 4190	0-100	1000	4190
Caloria HT 43	12-260	867	2200
Huile de moteur	Jusqu'à 160	888	1880
Ethanol	Jusqu'à 78	790	2400

L'énergie stockée par la chaleur sensible dépend de la qualité, de la capacité thermique spécifique et de la différence de température du matériau. Le tableau 1 montre les valeurs de capacité de stockage de chaleur sensible de certains matériaux sélectionnés. Les valeurs sont tirées des commentaires de Sharma sur le stockage d'énergie thermique. [18]

Compte tenu de sa capacité thermique spécifique élevée et de sa disponibilité, l'eau semble être le meilleur milieu liquide pour le stockage de la chaleur sensible. Pour les applications qui nécessitent des supports solides, la roche fournit la paire la plus intéressante de densité et de capacité calorifique. Si l'on considère la différence de 30°C, 1 m³ d'eau peut stocker 125 700 kJ, et 1 m³ de roche peut stocker 67 507 kJ. En revanche, le MCP Energain® est constitué d'un mélange de cires de paraffine microencapsulées avec des polymères et a été étudié plus en détail au chapitre 2, s'il contient un intervalle de fusion :

- En chaleur sensible avec une densité de 900 kg/m³ et une capacité thermique massique de 2430 J/(Kg.K) : 65610 kJ.
- En chaleur latente (71 J/g) : 63900 kJ

Soit un total de 129510 kJ pour ce différentiel de 30°C avec fusion de la paraffine.

Sous cette différence de température de 30°C, le MCP peut stocker deux fois la chaleur de la roche et deux fois la chaleur de l'eau, tout en s'affranchissant de la nature liquide du milieu. Lorsque la différence de température près de la température de fusion maximale est plus étroite, le MCP sera plus important. En utilisant le MCP typique utilisé au chapitre 4, sa chaleur latente de fusion est de 170 J/g, sa densité est de 1000 kg/m³, et la plage de fusion est comprise entre 19 ° C et 24 ° C. La comparaison avec l'eau et la roche donne les 19 ° Résultat d'une différence de 5°C entre C et 24°C :

- Energie emmagasinée par 1 m³ de roche : 11251 kJ.
- Energie emmagasinée par 1 m³ d'eau : 20950 kJ.
- Energie emmagasinée par 1 m³ de MCP : 15850 kJ en sensible, 170000 kJ en latent et 185850 kJ au total.

Soit 16 fois plus que la roche et 9 fois plus que l'eau liquide.

4.3 Matériaux utilisables pour le stockage d'énergie par chaleur latente :

Dans le cadre du stockage par chaleur latente pour un système associé au bâtiment, sont retenus :

- Les matériaux organiques, notamment paraffines (C_nH_{2n+2}) et Acides gras ($CH_3(CH_2)_nCOOH$).
- Les matériaux inorganiques : notamment sels hydratés (MnH_2O).
- Les mélanges eutectiques de corps organiques et/ou inorganiques.

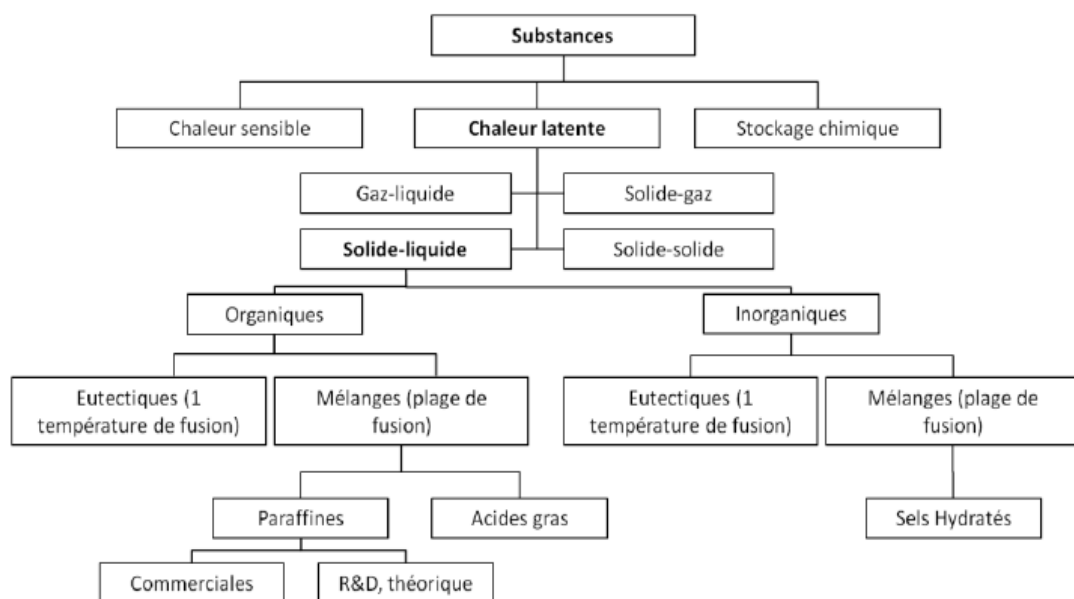


Figure 2-10 : Classification des substances pour le stockage d'énergie (traduit de (Cabeza, Castell, Barreneche, De Gracia, & Fernandez, 2011)) [19]

Sharma précise les différentes propriétés que devraient avoir les MCP utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie [18]. Il s'agit de propriétés thermo physiques, cinétiques et chimiques.

- Les propriétés thermiques recherchées couvrent :
 - Une plage ou une température de changement de phase adaptée.
 - La chaleur latente volumique doit être la plus grande possible.
 - La conductivité thermique doit être suffisante pour assurer les transferts de chaleur dans le matériau.
- Les propriétés physiques recherchées sont :
 - Une grande densité.
 - Une dilatation volumique raisonnable pour limiter les problèmes de conditionnement.
- Les propriétés cinétiques recherchées sont :
 - Pas d'effet de surfusion.
 - Un taux de cristallisation suffisant.
- Les propriétés chimiques recherchées regroupent :
 - Une stabilité chimique à long terme
 - Pas de toxicité.
 - Une résistance au feu suffisante pour les normes en vigueur dans la construction.
- Les prix pratiqués pour les MCP disponibles sur le marché varient de 0,5 à 10 € le kg [19]

4.3.1 Les paraffines comme MCP :

La cire de paraffine est un type d'hydrocarbure saturé. Au-dessus de $C_{15}H_{32}$, ce sont des solides cireux. En général, plus la chaîne carbonée est longue, plus la température de fusion est élevée et plus la chaleur latente est importante. La plupart des paraffines commerciales sont obtenues par distillation du pétrole, non pas pur, mais un mélange de plusieurs hydrocarbures. [17]

Le Tableau 2-2 indique les propriétés de paraffines pures usuelles.

Tableau 2-2 : Points de fusion et chaleur latente pour quelques paraffines pures, solides sous forme de cires ((Abhat, 1983)et (Younsi, 2008)) [17]

Nom	Point de fusion (°C)	Densité (kg/m ³)	Chaleur latente (J/g)
C ₁₆ H ₃₄	18,2	774	238
C ₁₇ H ₃₄	22	778	215
C ₁₈ H ₃₄	28,2	814 ^S -775 ^L	245
C ₁₉ H ₃₄	31,9	912 ^S -769 ^L	222
C ₂₀ H ₃₄	37	n.a.	247
C ₂₁ H ₃₄	41	n.a.	215
C ₂₂ H ₃₄	44	n.a.	249

L : Liquide ; S : Solide ; n.a. : pas de donnée

➤ **Les avantages et inconvénients des paraffines pour leur usage comme MCP :**

Les avantages est que les cires de paraffine sont très stables chimiquement, elles ne se séparent pas en phases, permettant ainsi un grand nombre de cycles continus de fusion/solidification. Il y a beaucoup de chaleur pour faire fondre/solidifier la tente. Il n'y a presque pas de fusion excessive avec la paraffine et aucun agent de nucléation n'est requis. De plus, la cire de paraffine est non toxique et 100% recyclable

Les inconvénients : est la source pétrolière de cire de paraffine commerciale et le fait que la conductivité thermique à l'état solide est très faible. Le volume occupé par la paraffine changera considérablement au fur et à mesure que l'état change. Contrairement au sel hydraté, la zone de température de transition de phase est assez dispersée à quelques degrés près, et les pics sont plus larges et plus bas. Enfin, les cires de paraffine sont inflammables, elles doivent donc être ajustées en conséquence avant de pouvoir être utilisées dans les bâtiments. [17]

4.3.2 Les non-paraffines comme MCP :

Les esters, les acides gras, les alcools et les glycols peuvent être utilisés comme supports organiques de stockage de chaleur latente. Ces matériaux doivent être emballés car ils sont inflammables et ne doivent pas être exposés aux oxydants. Contrairement à la paraffine, leurs propriétés sont complètement différentes d'une substance à l'autre. Le tableau 2-3 répertorie certaines substances organiques qui peuvent être utilisées comme MCP.

Tableau 2-3 : Chaleur latente et température de fusion de quelques substances organiques non-paraffines (traduit de (Sharma &Sagara, 2005))

Nom	Point de fusion (°C)	Densité (kg/m ³)	Chaleur latente (J/g)
Acide formique	7,8	1226,7 ^{15°C}	247
Acide Acétique	16,7	1050 ^{20°C}	187
Glycérine	17,9	1260 ^{20°C}	198,7
Ethanolate de chlorure de lithium	21	n.a.	188
Polyéthylène glycol 600	20-25	1100 ^{20°C}	146
Acide D-Lactique	26	1249 ^{20°C}	184
1-3 Methyl pentacosane	29	n.a.	197
Camphenilone	39	n.a.	205

4.3.3 Les Acides gras :

Les acides gras forment un ensemble avec des propriétés proches. Ils ressemblent aux paraffines avec des variances dans les avantages / inconvénients. Les voici :

Les avantages : est qu'il présente un pic de fusion généralement étroit et bien défini dans la plage de température réduite et une stabilité dans le cycle de fusion/solidification. La chaleur latente des acides gras est assez importante. Le tableau 2-4 présente les points de fusion et les valeurs de chaleur latente de certains acides gras.

Les inconvénients : sont les mêmes que la cire de paraffine, mais elle est moins corrosive et le coût est deux à trois fois plus élevé.

Tableau 2-4 : Chaleur latente et température de fusion pour quelques acides gras (traduit et extrait de (Sharma &Sagara, 2005)) [23]

Nom	Point de fusion (°C)	Densité (kg/m ³)	Chaleur latente (J/g)
Acide Oléique	13,5-16,3	863 ^{60°C}	n.a.
Isopropyle stéarate	14-19	n.a.	140-142
Butyle stéarate	19	n.a.	140
Diméthyle saba-cate	21	n.a.	120-135
Vinyle stéarate	27-29	n.a.	122
Méthyle palmi-tate	29	n.a.	205
Acide Caprique	32	878 ^{45°C}	152,7

4.3.4 Les sels hydratés :

Les sels d'hydratation constituent le réservoir de MCP, qui présente le plus d'avantages, mais présente également des inconvénients majeurs. Ces substances sont composées de sel et d'eau et forment une matrice cristalline lorsqu'elles se solidifient. Lors du processus de liquéfaction, certains sels hydratés forment un tout cohérent, mais pas tous, c'est une subtilité dans l'utilisation de ces matériaux. Le tableau 2-5 énumère certains des sels hydratés présentés dans la littérature

Tableau 2-5 : Points de fusion et chaleur latente d'une sélection de sels hydratés (traduit et extrait de (Sharma &Sagara, 2005)) [23]

Nom	Point de fusion (°C)	Densité (kg/m ³)	Chaleur latente (J/g)
LiClO ₃ .3H ₂ O	8	n.a	253
NH ₄ Cl.Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	11	n.a	163
K ₂ HO ₄ .6H ₂ O	14	n.a	108
NaCl.Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	18	n.a	286
KF.4H ₂ O	18	n.a	330
K ₂ HO ₄ .4H ₂ O	18,5	1447 ^{20°C}	231
Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25	1738 ^{20°C}	148
LiBO ₂ .8H ₂ O	25,7	n.a	289
FeBr ₃ .6H ₂ O	27	n.a	105
CaCl ₂ .6H ₂ O	29-30	1802 ^{24°C}	170-192

Les avantages : des sels hydratés sont un bilan d'énergie grise intéressant et des prix d'achat très bas par rapport aux autres MCP. La plage de température correspondent au pic de fusion est étroite et la chaleur latente volumique est très intéressante, plus élevée que pour les MCP organiques. La Conductivité thermique est aussi plus Grande que pour les autres MCP.

Les inconvénients : Sont une Tendance à la surfusion, d'où la nécessité d'ajouter des agent de nucléation au produit et les problèmes de corrosion notamment avec les métaux. Surtout la ségrégation des phases liquide et solide après un somme nombre de Cycles, dès les primes pour somme sels hydratés empêche le bon fonctionnement des Cycles fusion /solidification.

4.3.5 Les eutectiques :

Un eutectique est un mélange d'au minimum deux composants qui se solidifient et se liquéfient de façon congruente. Ils forment un cristal mixte des composants en version solide. Les composants ressent mixés aussi bien pendant la fusion que pendant la solidification et il n'y a pas de ségrégation des phase en général. Certain eutectiques peuvent faire of fices de MCP. Le Tableau 2-6 en répertorie une sélection dans la gamme de température 4-30°C. [17]

Tableau 2-6 : Sélection d'eutectiques organiques et inorganiques (extrait et traduit de (Sharma &Sagara, 2005)) [23]

Nom	Composition (en % respectifs)	Point de fusion (°C)	Chaleur latente (J/g)
$\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{NaCl}+\text{KCl}+\text{H}_2\text{O}$	31+13+16+40	4	234
$\text{C}_5\text{H}_5\text{C}_6\text{H}_5+(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{O}$	26,5+73,5	12	97,9
$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2+\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	34+66	24	147,7
$\text{Ca}(\text{NO})_3.4\text{H}_2\text{O}+\text{Mg}(\text{NO})_3.6\text{H}_2\text{O}$	47+53	30	136

4.4 Le conditionnement des MCP :

Les substances utilisées comme MCP doivent être conditionnées pour une intégration dans les bâtiments directement ou dans des systèmes actifs ou passifs. Il existe deux méthodes principales pour résoudre ce problème : la macro-encapsulation et la micro-encapsulation. Le MCP solide doit rester en place. Habituellement au moins un additif est intégré au MCP dans l'emballage pour améliorer une de ses caractéristiques ou pallier le défaut principal. Par exemple, l'ajout de graphite peut augmenter la conductivité thermique du milieu. Le package de macros doit contenir le MCP dans une « coque » robuste, qu'elle soit rigide ou non. Le flux de chaleur passera par cette enceinte, elle ne peut donc pas avoir une forte résistance thermique. Si le MCP présente une modification du volume occupé lors du changement d'état, l'espace libre correspondant doit être prévu dans l'enveloppe. La figure 2-11 montre un exemple de macro-emballage.



Figure 2-11 : Illustration de MCP macro encapsules avec de l'aluminium, des capsules rigides, des poches souples en polymère ou des sphères plastiques (source : IEA ECES Annex 17 : Advanced Thermal Energy Storage Techniques) [17]

La micro encapsulation consiste à encapsuler les particules sphériques ou allongées de MCP dans un film polymère moléculaire. Ces particules peuvent ensuite être insérées dans une matrice compatible avec le film pour former un composé homogène à l'échelle macroscopique. La figure 2-12 montre un schéma du MCP micro encapsulé. Sur la figure 16, le MCP est noyé dans une matrice en polyéthylène haute densité. L'avantage global est qu'il contient plus de 80% de paraffines et qu'il a une forme stérique ment stable tant que la température de fusion du polyéthylène n'est pas atteinte. [17]



Figure 2-124 : Illustration de MCP micro-encapsulés (sources : en haut Rubi-therm™, en bas Climator®)

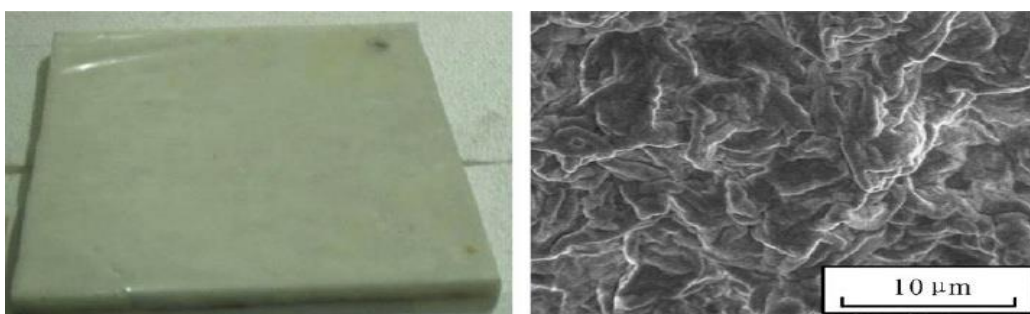


Figure 2-13 : MCP micro-encapsulé à forme stabilisé utilisé par Zhou (Zhou, Yang, Wang, & Zhou, 2009) et (Zhou, Zhang, Wang, Lin, & Xiao, 2007)

5 Les systèmes intégrant des MCP dans la littérature scientifique :

Les MCP en situation passive en paroi :

Le MCP dans le bâtiment peut être intégré en tant que composant passif dans le mur. Mathieu-Potevin a recherché le meilleur emplacement pour la couche MCP dans le mur multicouche. Dès 1996, Hamdam a modélisé le stockage de chaleur à travers la chaleur latente dans le panneau MCP vertical contre le mur et a calculé l'interface liquide/solide dans le matériau (Hamdam & Elwerr, 1996). Cette stratégie a fait l'objet de nombreuses publications répertoriées par Kuznik (Kuznik, David, Johannes et Roux, 2011). Les conclusions d'un grand nombre d'études sur ce procédé indiquent que l'activation de l'échange thermique entre l'air et le MCP par convection forcée améliorera les performances de stockage/récupération.

Les MCP en combinaison avec un système énergétique, solaire ou autre :

Pour les systèmes de chauffage solaire, la combinaison avec la capacité de stockage d'eau présente des avantages, surtout lorsqu'elle est utilisée en dehors des heures d'ensoleillement. L'équipe de recherche a étudié à plusieurs reprises le stockage basé sur le MCP en raison de son bon rapport volume/énergie de stockage. Pour des informations plus détaillées sur ce travail, Tyagi a publié une revue bibliographique (Tyagi & Buddhi, 2007). Par exemple, l'utilisation du PCM pour l'énergie solaire passive a également été étudiée à travers le mur de la trombe marine. Sur cette question, Younsi a rédigé une thèse de doctorat (Younsi, 2008). L'utilisation de capsules polymères contenant du MCP fait l'objet d'une revue de la littérature publiée par Felix Regin (Felix Regin, Solanki et Saini, Latent Heat Energy Storage Using Cylindrical Capsules: Numerical and Experimental Studies, 2006). Les rapports de recherche utilisent ces capsules dans des réservoirs d'eau chaude pour augmenter l'inertie thermique. Dans les systèmes de plancher de stockage à circulation de fluide, dans les systèmes d'échange d'air, tels que le système d'Arkar pour le refroidissement des maisons unifamiliales (Arkar et Medved, utilisent des accumulateurs de chaleur PCM intégrés au système de ventilation pour refroidir librement les bâtiments, année 2007). Dans un système utilisé pour conserver des médicaments ou des aliments.

Rafrachissement d'air à l'aide de MCP :

Le refroidissement par air par MCP est un domaine d'application de ces produits qui intéresse particulièrement les travaux de cette thèse. Certaines équipes de recherche étudient déjà ce sujet. Dans le paragraphe précédent, Arkar a été cité. Il utilise des cylindres en acier remplis de sphères en plastique remplies de paraffine, à travers lesquelles l'air de ventilation est refroidi. La figure 2-14 montre l'appareil.



Figure 2-14 : Spheres cotenants du MCP pour le rafraichissement d'air (Arkar, Vidrih, & Medved, Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building, 2007)

Un eautrepiste à explorer est l'échangeur air/MCP à plaques. Zalba a testé des boîtes avec des cartes MCP dans les quelles l'air ventilé était forcé de se refroidir lorsqu'ilétaiten contact avec les cartes. Le schéma de l'appareil est illustré à la figure 2-15

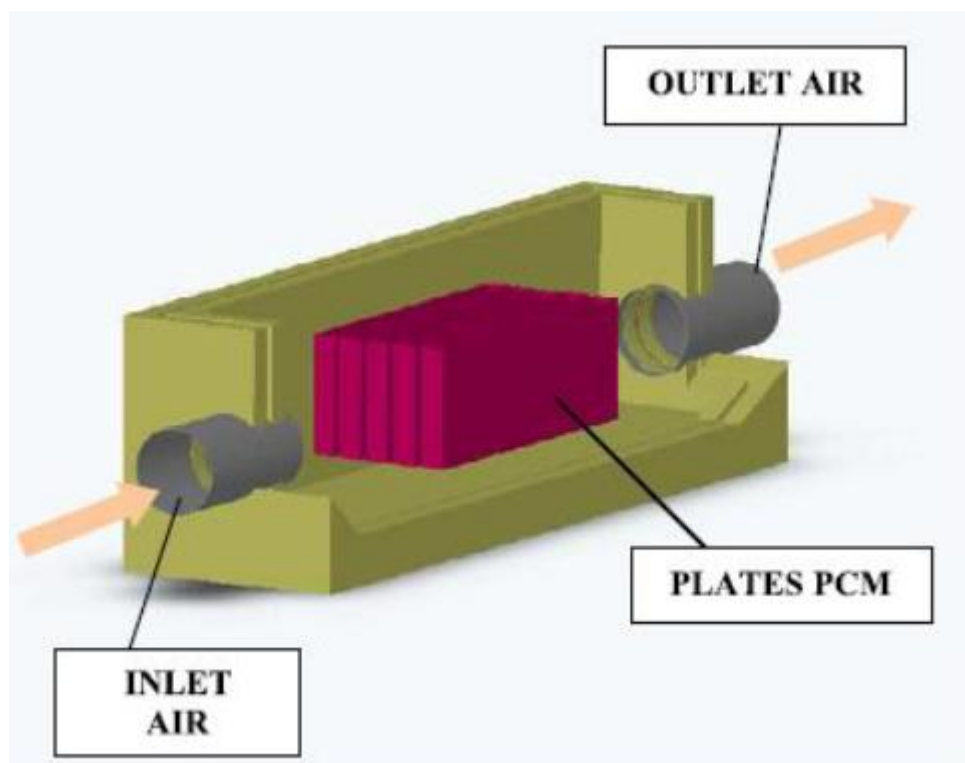


Figure 2-15 : Echangeurs de Zalba (Zalba B. , Marin, Cabeza, & Mehling, 2004)

L'Immeuble de Services du Grand Lyon a été construit en 2005, utilisant le système original de ventilation et de traitement d'air à double flux, et l'air soufflé traverse le vide sanitaire du bâtiment. En raison du sol, ce vide sanitaire fournit beaucoup de masse thermique. En plus du rack à plaques MCP Energain® de Dupont de Nemours, de l'air est placé sur la gaine de l'entrée d'air afin que l'air

soit toujours soufflé à une température confortable, qui correspond à la température de fusion du MCP, environ 21° C. Ce travail lié à ce bâtiment a été publié (Borderon J., Virgone, Cantin, & Kuznik, Full-scale study of a building equipped with multi-layer rack latent heat storage system, 2010) et (Borderon J., Virgone, Cantin, & Kuznik, 2011) Koshentz a fourni un système de plafond soigneusement conçu composé d'un composite MCP micro encapsulé sur une matrice de gypse rigide pour former un panneau. Ce volume est percé par le tube pour faire circuler le fluide dans la masse du composé. Des inserts en aluminium sont également intégrés pour améliorer l'échange conducteur à travers le panneau. La circulation du fluide "froid" doit solidifier le MCP. A l'aide de ce panneau de 5 cm d'épaisseur, Koshentz a mesuré une capacité de stockage de 290 Wh/m² après des charges de 8 à 40 W/m² (Koshentz & Lehmann, 2004). Lazaro et son équipe (Lazaro, Dolado, Marin et Zalba, échangeurs de chaleur PCM-air pour applications de refroidissement naturel) ont effectué diverses étapes de température et traitements de pente sur des prototypes expérimentaux contenant du sel hydraté et des panneaux MCP macro-encapsulés de type paraffine. Bâtiments : Résultats expérimentaux de deux prototypes à échelle réelle, 2009). Ces prototypes ont été préalablement dimensionnés et développés par modélisation (Lazaro, Dolado, Marin et Zalba, échangeurs de chaleur à air PCM pour applications de free cooling dans les bâtiments : modèles empiriques et applications de conception, 2009). Les conclusions de cette étude sont :

- Le sel hydraté a permis de stocker 30% d'énergie en plus que la paraffine dans les mêmes conditions.
- Après plusieurs essais, les performances du sel hydraté sont moins bonnes et l'enveloppe commence à fuir et à être corrodée.
- La faible conductivité thermique du MCP se révèle être une limite pour des montées en puissance rapides.
- Le débit d'air entre les plaques de MCP est le paramètre le plus influent sur la puissance thermique absorbée ou libérée. [17]

6 Conclusion :

Les matériaux à changement de phase font l'objet d'une étude depuis au moins trois décennies et la littérature sur le sujet est abondante.

L'intérêt de ces matériaux et du stockage thermique ne fait aucun doute pour l'industrie et le grand nombre de publications récentes qui vont dans ce sens.

Dans le cadre de ces activités, le rafraîchissement à l'aide d'une unité de stockage d'échange basée sur MCP a retenu notre attention.

Chapitre III : Modélisation Numérique D'une Paroi En Béton MCP

1 Introduction :

L'utilisation de matériaux à changement de phase dans les bâtiments est une solution. En raison de leur chaleur latente, les matériaux de phase sont considérés comme des réservoirs d'énergie et peuvent être intégrés dans la structure des bâtiments en les combinant avec des matériaux de meuble inertes tels que béton. Il s'agit de limiter l'utilisation permanente des systèmes de chauffage et de climatisation. Dans ce chapitre, nous étudierons le fonctionnement du Béton-MCP par des méthodes de modèles numériques.

2 Méthodes de résolution du problème de transfert avec changement de phase :

Il existe plusieurs méthodes d'analyse numérique dans la littérature qui peuvent décrire et résoudre les problèmes de transfert de chaleur dans les bâtiments. Ils permettent à un système d'équations algébriques d'approximer un système d'équations différentielles. On peut citer la méthode des différences finies, élément fini et volume fini,... [24]

Méthode des différences finies (MDF) est largement utilisée pour résoudre des problèmes physiques. Il permet une mise en œuvre simple de géométries simples et est basé sur l'approximation des dérivées impliquées dans les équations en utilisant le développement en série de Taylor. Cependant, cette approche n'est pas toujours conservatrice.

Méthode des éléments finis (MEF) est utilisée dans le domaine de la mécanique des solides; mais il est parfois difficile de l'utiliser pour résoudre des termes non linéaires. Il s'agit de déterminer le champ local à attribuer à chaque sous-domaine, afin que le champ total obtenu par l'approche parallèle soit proche de la solution exacte du problème.

Méthode des volumes finis (MVF) : est l'une des méthodes les plus robustes, développée par Patankar [25] au début des années 1980. Il est basé sur l'intégrale de l'équation de transport qui contrôle l'écoulement du fluide et l'équation de l'énergie qui contrôle le transfert de chaleur. Cette méthode se caractérise par la fiabilité de ses résultats, l'adaptabilité aux problèmes physiques, la possibilité de manipuler des formes géométriques complexes, la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de tout produit scalaire pouvant être transmis sur chaque volume de contrôle dans n'importe quel domaine.

Méthode Analytique : Les solutions analytiques disponibles dans la littérature pour résoudre le problème de transition de phase ne conviennent que pour les cas les plus simples (formes

géométries simples, conditions aux limites constantes, propriétés thermiques constantes dans chaque phase, etc.). Lorsque ces solutions deviennent inutilisables en raison de la complexité des problèmes réels, les solutions numériques les remplacent.

Nous utilisons MVF, puisque qu'elle est facile à concevoir et à implémenter surtout avec des géométries présentant la variation de quelques paramètres physiques à savoir la permittivité et la masse effective.

Les méthodes pour la résolution du problème de transfert de chaleur avec changement de phase :

- **Méthode de la capacité effective**

La méthode de la capacité effective introduit l'effet de la chaleur latente sur la capacité calorifique du matériau dans un petit intervalle de température au voisinage de la température de fusion (changement de phase). Globalement la méthode est assez simple :

L'équation d'énergie [26] est donnée par :

$$\rho C_{eff} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.1)$$

Avec :

$$C_{eff} = \begin{cases} C_{ps} & \text{pour } T < T_f - \Delta T \\ C_p + \frac{L_s}{2\Delta T} & \text{pour } T_f - \Delta T \leq T \leq T_f + \Delta T \\ C_{pl} & \text{pour } T > T_f + \Delta T \end{cases} \quad (3.2)$$

L'intervalle $2\Delta T$ vaut $T_l - T_s$

Où :

C_{eff} : Capacité effective

u et v : vitesse suivant x et y .

λ : Conductivité thermique.

ρ : masse volumique.

T : Température.

T_l : Température à l'état liquide.

T_s : Température à l'état solide.

T_f : Température de fusion.

$C_{p\ell}$ et C_{ps} sont les capacités thermiques du liquide et du solide.

s : solide

ℓ : Liquide

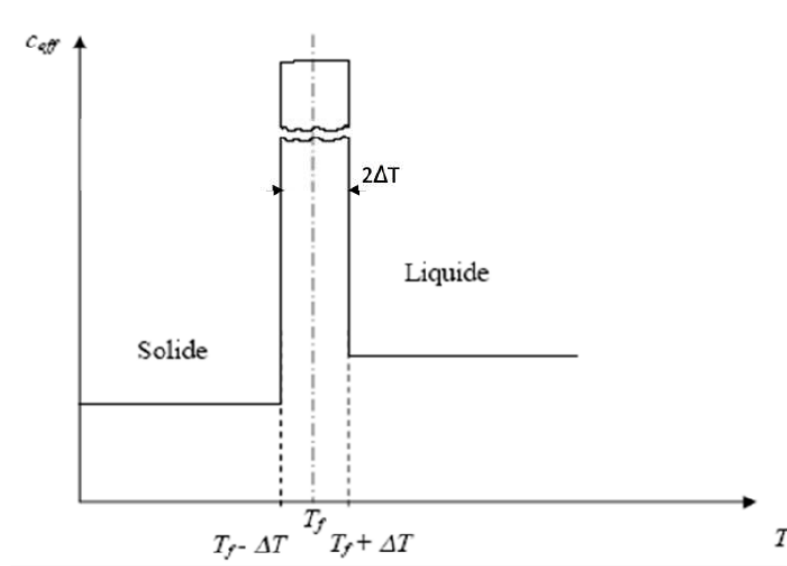


Figure 3-1 : Capacité thermique incluant l'effet de la chaleur latente dans un petit intervalle.

• Méthode enthalpique :

La méthode enthalpique traite l'enthalpie comme variable dépendante de la température, et l'équation de la chaleur est écrite en fonction de l'enthalpie et de la température. Le modèle de transfert thermique que nous adoptons est basé sur une formulation enthalpique qui est la plus adoptée à la résolution numérique des problèmes avec changement de phase.

La forme enthalpique de l'équation de la conduction thermique est formulée mathématiquement dans le cas bidimensionnel comme suit :

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.3)$$

H : L'enthalpie du système est donnée par :

$$H = C_p T + f_\ell L_s \quad (3.4)$$

Avec $f_\ell = 1$ dans la région liquide,

$f_\ell = 0$ dans la région solide

On suppose très souvent que la chaleur latente L varie linéairement avec la température comme suit :

$$f_{\ell} = \begin{cases} 1 & T > T_{\ell} \\ \frac{T-T_s}{T_{\ell}-T_s} & T_s \leq T \leq T_{\ell} \\ 0 & T < T_s \end{cases}$$

Après réarrangement on obtient :

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.5)$$

3 Description du modèle numérique

Compte tenu des modes de transfert de chaleur (convection et/ou rayonnement), même pour des géométries simples, le problème de changement de phase est plus compliqué et coûteux en temps de calcul. En effet, les équations à résoudre (conservation de la masse, conservation de la quantité de mouvement et conservation de l'énergie) sont non linéaires et doivent être résolues simultanément à différentes étapes du modèle. La solution proposée est de résoudre uniquement l'équation de l'énergie en considérant les caractéristiques thermiques équivalentes afin de considérer les effets de fusion et de solidification. [27] L'analyse thermique des murs Béton-MCP doit tenir compte de plusieurs facteurs, tels que la nature et les propriétés thermophysiques du MCP, la distribution et la répartition de ces matériaux dans le mur, et les changements de température de chaque côté du mur. conditions aux limites) et l'échange de chaleur. L'étude d'un modèle conductif simplifié de changement de phase permet d'alléger le nombre des équations à résoudre numériquement et réduire ainsi le temps de calcul.[27].

4 Géométrie, Maillage et outil de résolution

La modélisation du MCP est un sujet qui a été traité sous de multiples angles dans la littérature, car la recherche sur le transfert de chaleur des structures en béton combinée au MCP se heurte à des problèmes de modélisation. Ces problèmes sont principalement causés par le changement de phase qui se produit dans la plage de température et la non-linéarité de l'équation à résoudre.

4.1 Géométrie étudiée

Le modèle numérique considéré est présenté sur la figure 3-2 :

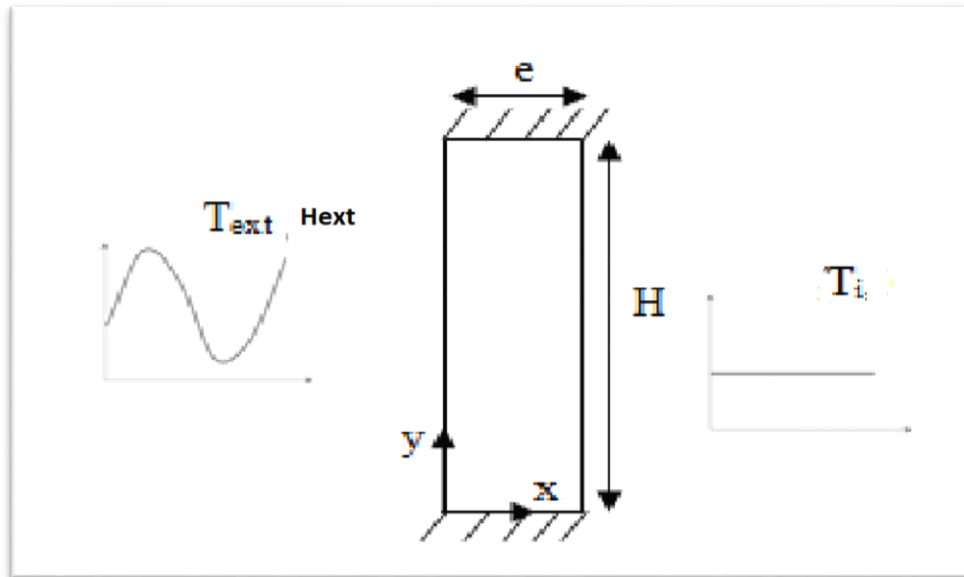


Figure 3-25 : Modèle géométrique avec conditions aux limites

4.2 Conditions aux limites

Une condition Mixte : Dirichlet-convection naturelle. La température imposée est généralement mesurée expérimentalement d'une journée type. Une approximation linéaire des données peut être considérée comme suffisante pour simuler la température extérieure. L'équation approximant la température extérieure est:

$$(T) = T_0 + \Delta T \quad (3.8)$$

Avec :

T_0 : Température initiale en Kelvin

ΔT est l'amplitude de l'excitation thermique

Initialement la paroi est à une température T_0 inférieure à la température de fusion des MCP T_f ($T_0 < T_f$, $t=0$). A $t=0$, la température de la face extérieure verticale est imposée à une température T_{ext} qui est constante pour simuler les fluctuations journalières (T_{ext} , $x=0$, $t > 0$) et échange avec lui par convection naturelle, alors que la face intérieure verticale est en contact avec l'air ambiant.

Les conditions thermiques (voir figure 3-3) d'une journée type imposée sur cette paroi sont :

- Les parois inférieure et supérieure sont considérées adiabatiques

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} = 0, y = 0, y = H\right).$$

- A l'intérieur, on impose une condition de transfert par conduction avec la température intérieure : $T_i = 15^\circ\text{C}$

- A l'extérieur, on impose une condition de flux solaire avec un échange convectif avec l'extérieur (milieu ambiant). (Paroi sud)

La température extérieure est constante : $T_{\text{ext}} = 27^\circ\text{C}$

Le coefficient d'échange convectif avec l'extérieur : $h_e = 13 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Le flux solaire moyen imposé : $q_{\text{rad}} = 700 \text{ W/m}^2$.

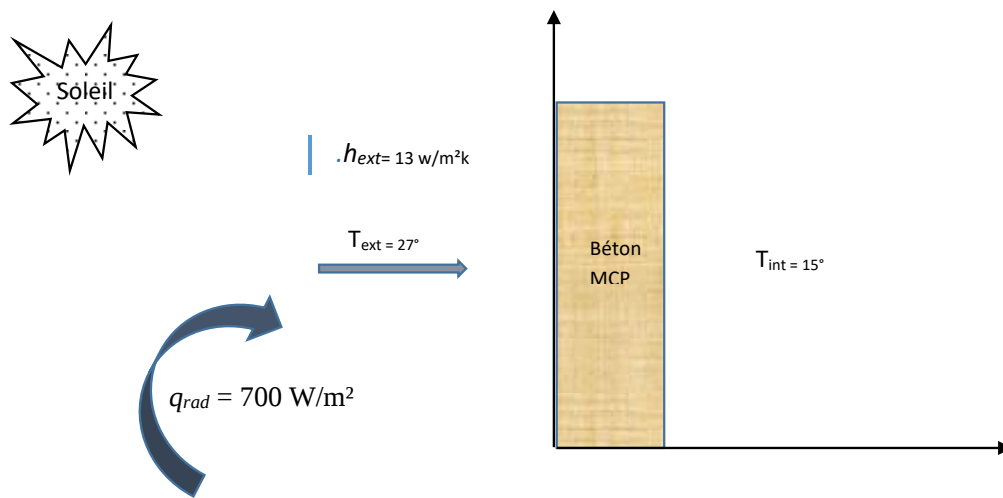


Figure 3-3: Paroi Béton – MCP

La grandeur qui nous intéresse principalement est la température au niveau de la paroi MCP. Alors les variations de cette grandeur qui seront analysées.

La chaleur spécifique apparente présentée sur la figure 3.4 a été obtenue expérimentalement [28] par le conductimètre et a été ajustée de telle sorte que l'augmentation de C_p soit centrée sur la valeur de température de fusion des MCP et que l'aire du pic de fusion obtenu soit égale à la chaleur latente :

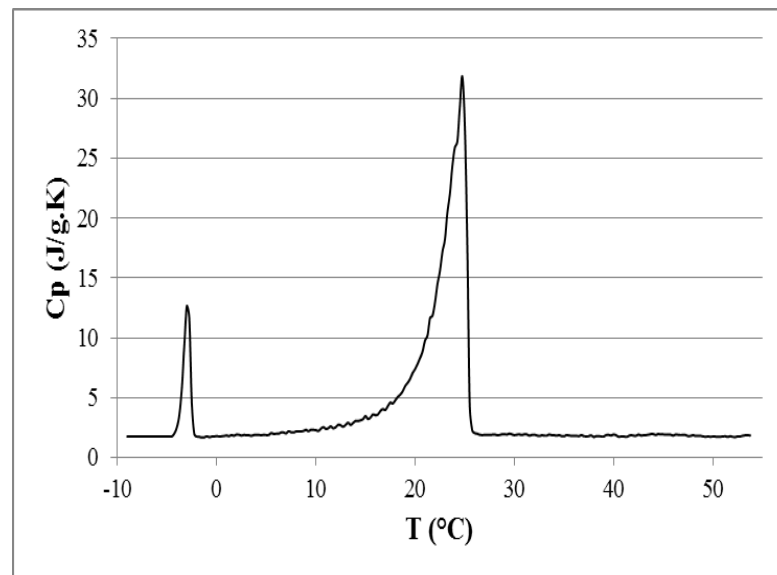


Figure 3-4 : Propriétés thermiques des MCP [28].

Quand le MCP fond ou se solidifie, le changement d'état est pris en compte par une capacité thermique effective C_{eff} . Pour le MCP considéré cette capacité thermique est déduite des mesures publiées dans la référence [29], voir figure (3-4).

Compte tenu de la géométrie rectangulaire simple de la paroi, un maillage structuré, permettant d'avoir un maillage régulier est bien adapté pour la discrétisation. Ensuite, nous notons par x la taille de la maille.

4.3 Description de GAMBIT

GAMBIT 2.4.6 est un logiciel de dessin assisté par ordinateur (CAO). Il permet la réalisation de formes géométriques 2D ou 3D et la construction de maillages. Les options de génération de réseau de GAMBIT offrent une flexibilité de sélection. La géométrie peut être décomposée en plusieurs parties pour générer une grille structurée, sinon GAMBIT générera automatiquement une grille non structurée adaptée au type de géométrie en cours de construction. Utilisez une interface avec plusieurs fenêtres d'outils pour détecter les défaillances. Ces fenêtres outils permettent de créer, générer et vérifier le maillage du modèle étudié et fusionner les conditions aux limites.

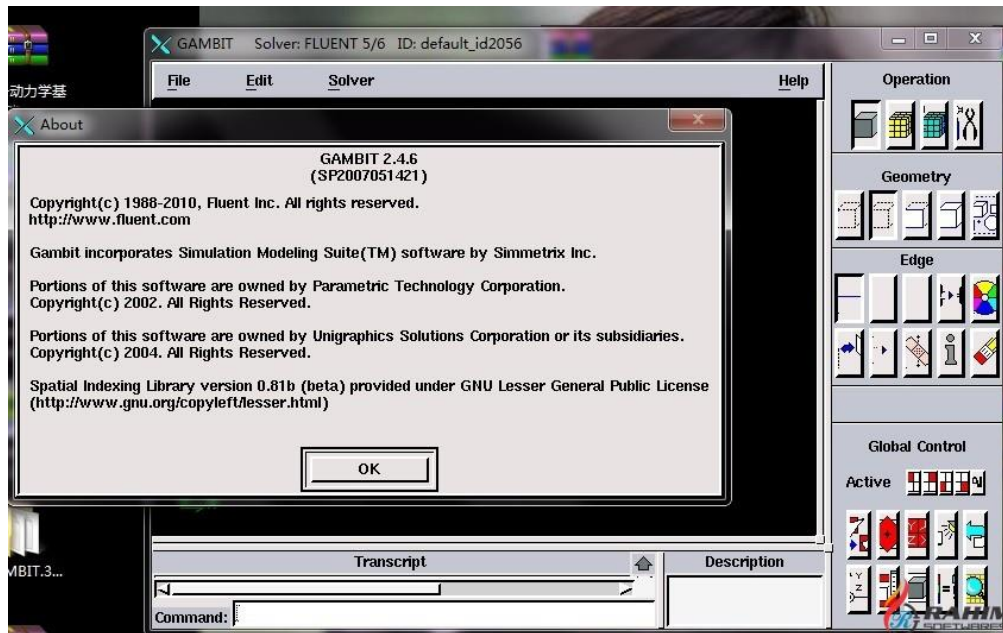


Figure 3-5 : Description Gambit

Fonctionnalités pour GAMBIT 2.4.6 :

- Conception géométrique.
- Générez un réseau pour résoudre le flux.
- Outils pour vérifier la qualité du maillage.
- Production de maille triangulaire et de maille matelassée de haute qualité.
- L'analyse de la théorie de la science des fluides.
- Structure appropriée des données et des informations.
- Contrôle informatique flexible.
- Améliorations du réseau.
- Modélisation du flux de fluide et du transfert de chaleur.
- Avoir une interface utilisateur conviviale.
- Compatibilité avec les systèmes d'exploitation Microsoft.
- Simulez le problème.
- Traitez et affichez les résultats du problème.
- Utilisez la mémoire dynamique.
- Avoir toutes sortes de mailles et d'éléments, y compris à quatre faces, à quatre côtés, à six facettes, pyramide ou à coin.

4.4 Génération du maillage par GAMBIT

La génération du maillage passe par les étapes suivantes :

A. Interface de Gambit :

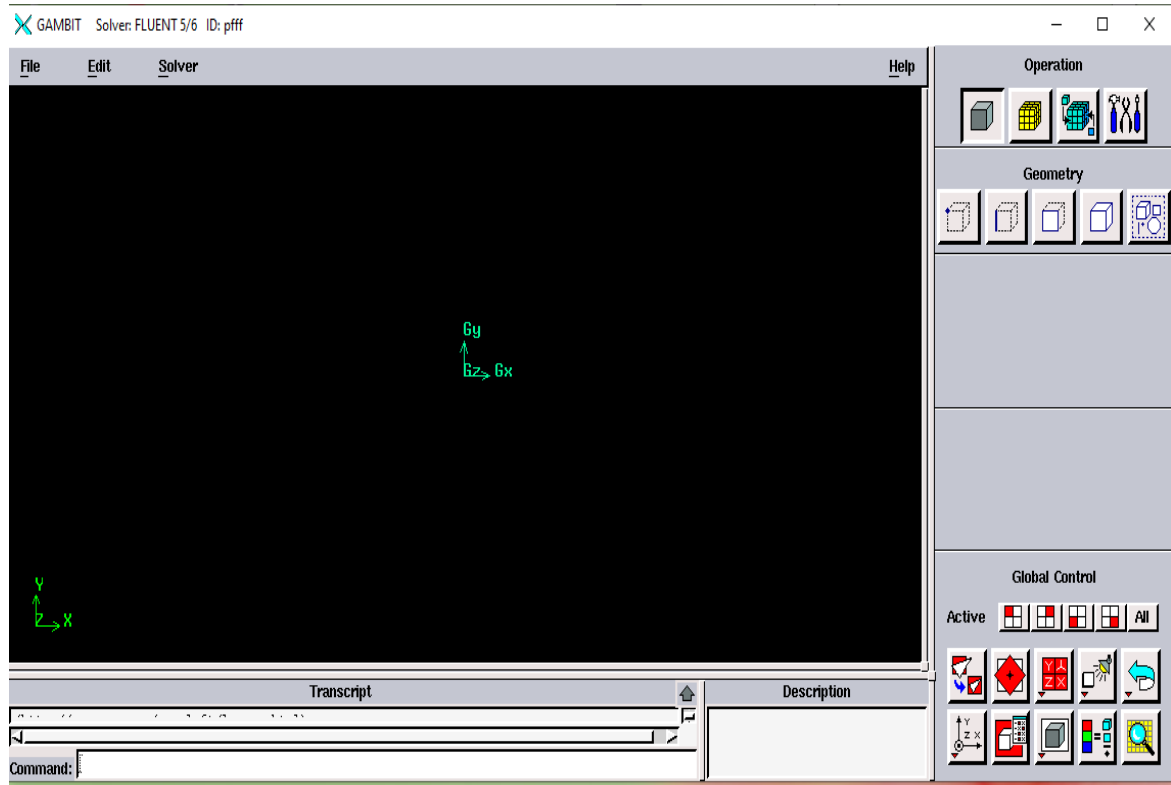


Figure 3-6 : Vue globale.

B. Choix du solver :

Le calcul numérique va être effectué à l'aide du logiciel *Fluent* 6.3, pour cela on doit définir le type de solver dans Gambit :

Solver----- FLUENT 5/6



Figure 3-7 : Type de solver.

C. Création de la géométrie

La forme géométrique comprend l'emplacement physique des points caractéristiques, qui définissent la zone où nous devons diviser les coordonnées spatiales des quatre sommets du carré, le début et la fin de la ligne. Il doit être possible de représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples interconnectées

On trace la géométrie sur logiciel gambit 2.4.6 comme indique la figure 3.8.

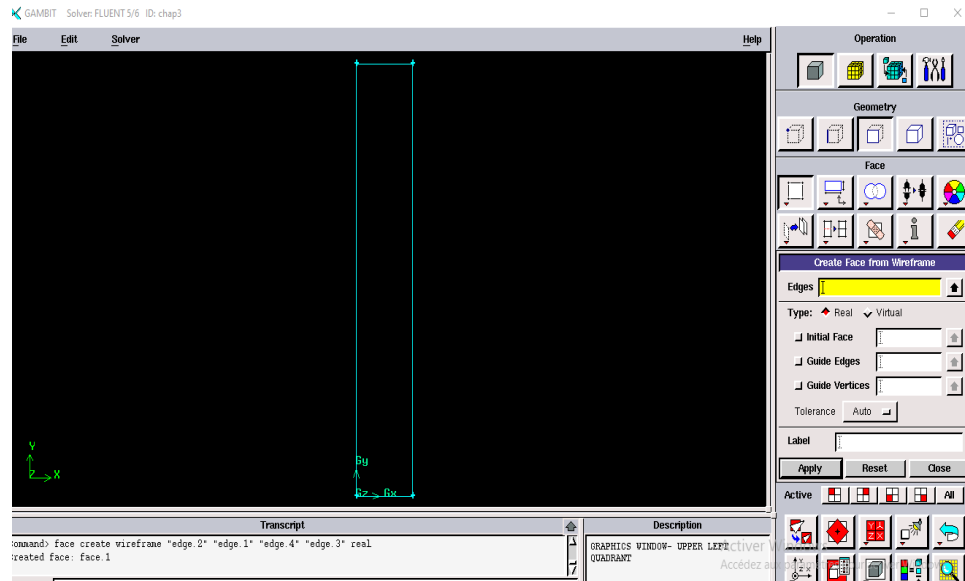


Figure 3-8 : Modélisation sous Gambit

D. Maillage du modèle.

La figure suivante représente la géométrie et le maillage qui est généré par le code Gambit.

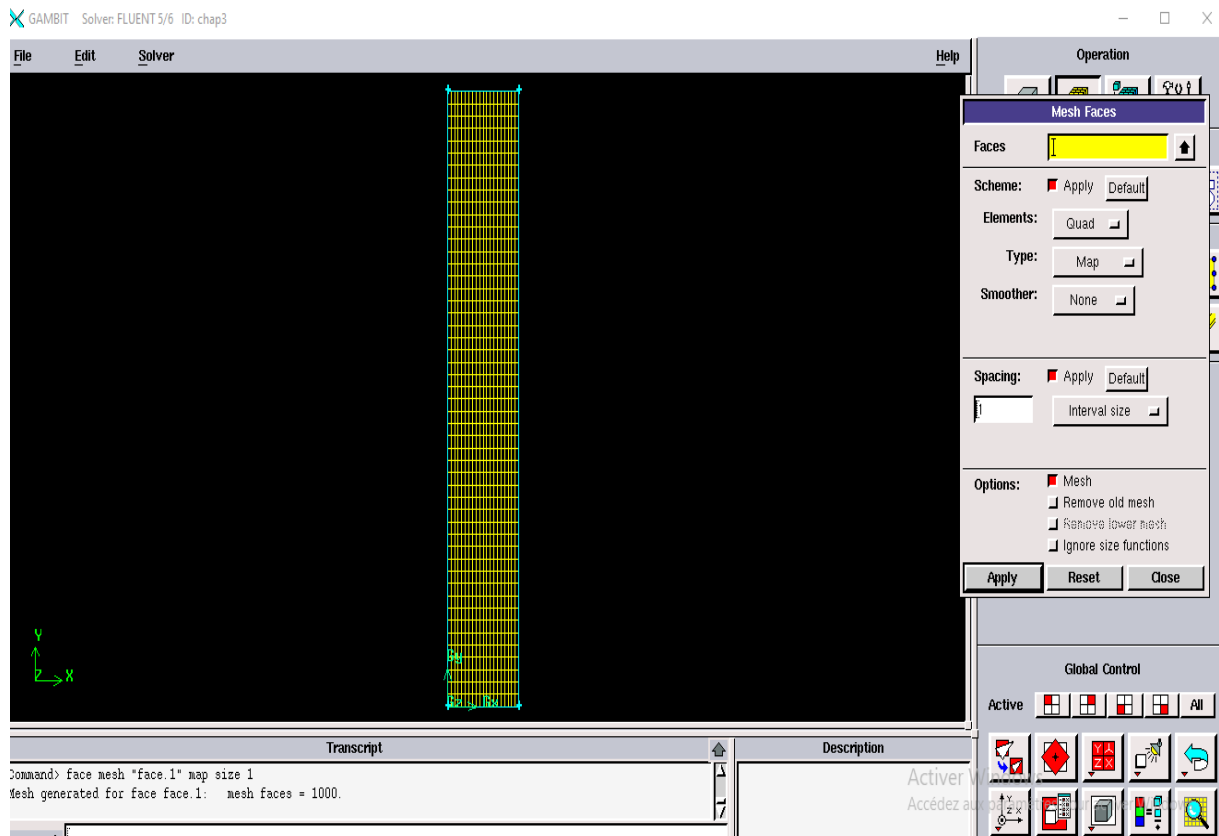


Figure 3-96 : Maillage du modèle étudié.

E. Les conditions aux limites numériques

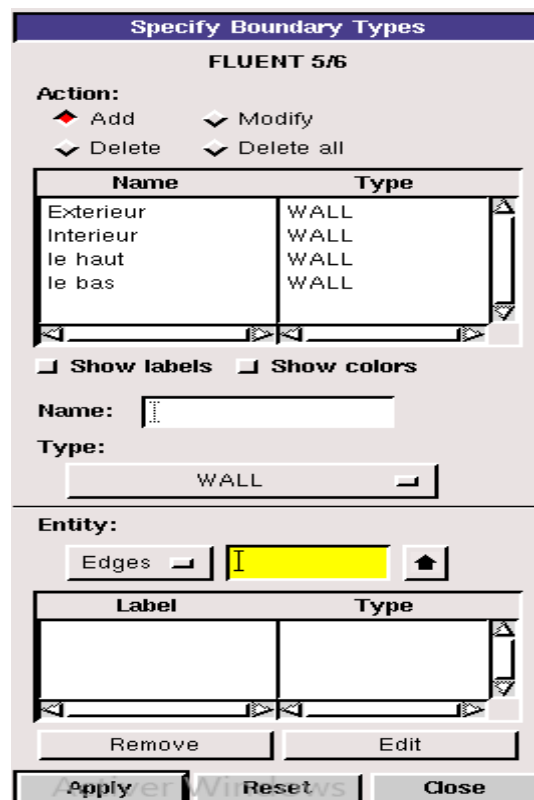


Figure 3-10 : Conditions aux limites numériques

Exporte un fichier contient le maillage de notre modèle physique étudié avec le nom essaiU1 :

File → export → msh

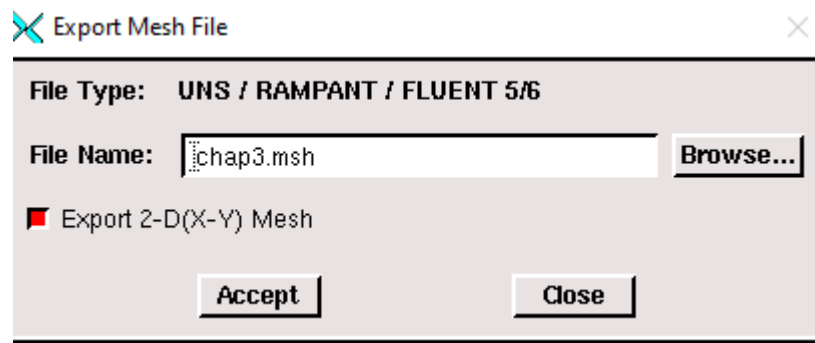


Figure 3-11 : Fenêtre d'exportation de maillage

4.5 Code Fluent :

Fluent code est un logiciel de dynamique des fluides computationnelle en dynamique des fluides computationnelle (CFD) conçu pour effectuer des simulations numériques de problèmes d'écoulement de fluides. Le progiciel Fluent est basé sur la méthode des volumes finis pour résoudre les équations qui contrôlent le mouvement du fluide en circulation et comprend différents modèles physiques, tels que :

- Ecoulements 2D ou 3D.
- Ecoulement stationnaire ou in stationnaire.
- Ecoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, Supersoniques ou hypersoniques).
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents.
- Fluide Newtonien ou non.
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (conjugue) ou radiatif.
- Ecoulements avec changements de phases.
- Ecoulements en milieu poreux.

➤ Interface du code Fluent :

La première chose à faire quand vous entrez sous fluent est de choisir le type de résolution que Fluent va avoir à faire : résolution 2D ou 3D, Puis d'ouvrir ou d'importer un maillage (fichier.msh), et ce en suivant la procédure suivante : File → Import → case

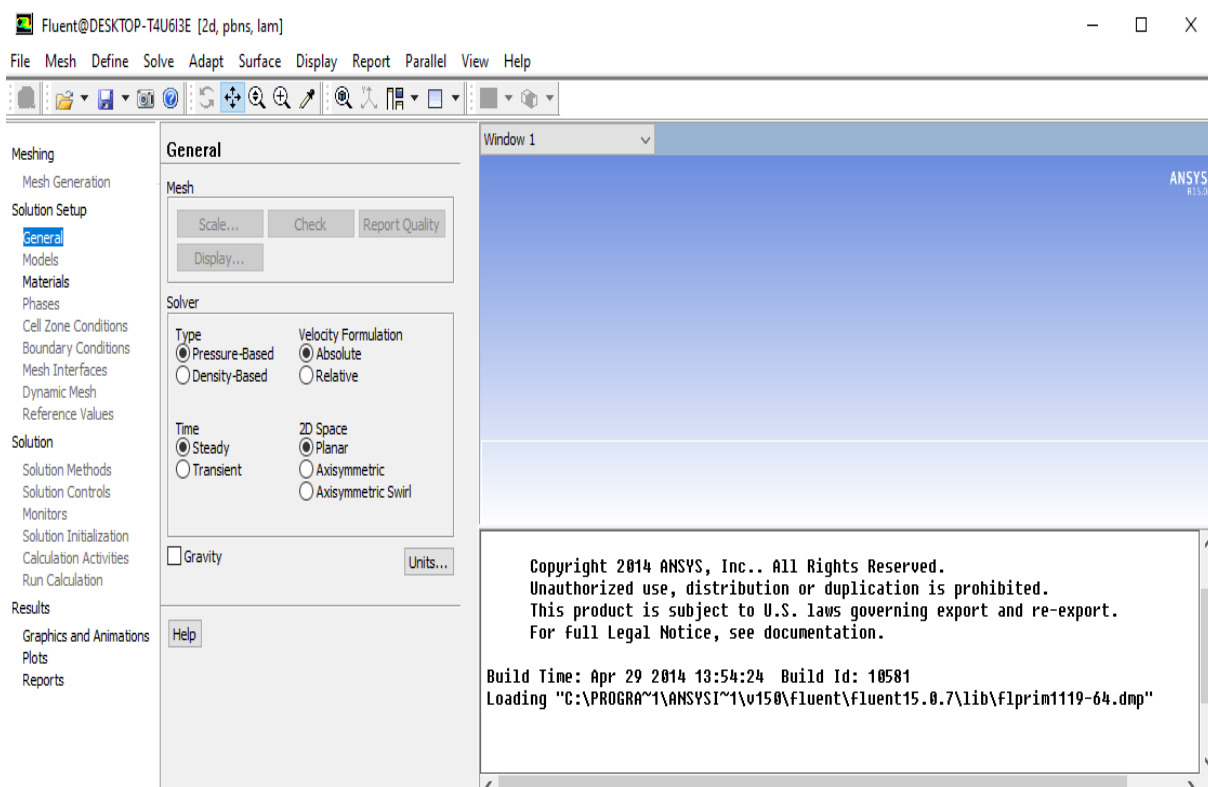


Figure 3-12 : Vue globale de Fluent.

➤ L'utilisation de Fluent

Ensuite l'utilisation de Fluent est simple, il suffit de suivre l'ordre des menus en partant de la gauche pour aller vers la droite :

- **File** : pour les opérations concernant les fichiers : lecture, sauvegarde, importation...etc.
- **Grid** : pour la vérification et la manipulation du maillage et de la géométrie.
- **Define**: pour définir les phénomènes physiques, les matériaux et les conditions aux limites.
- **Solve**: pour choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisations, les facteurs de sous relaxation, les critères de convergence et pour initialiser et procéder au calcul.
- **Adapt**: pour l'adaptation du maillage selon plusieurs paramètres.

- **Surface** : pour créer des points, des lignes et des plans nécessaires à l’affichage des résultats.
- **Display et plot** : pour l’exploitation des résultats.
- **Report** : pour afficher des rapports contenant les détails du problème traité.
- **Parallel**: pour le calcul parallèle.
- **Help** : pour l’exploitation du contenu du code

➤ **Importation de la géométrie (*. msh) :**

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File => Read =>Mesh...

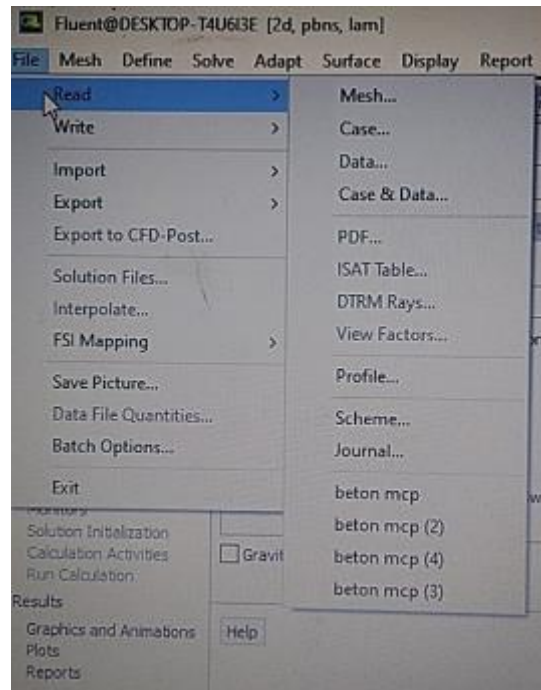


Figure 3-13 : Importation de la géométrie

➤ **Lancement des calculs :**

On commence les calculs après le choix du nombre des itérations, et le pas de temps.

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Fixed Time Step Size (s): 1 P

Settings... Number of Time Steps: 0

Options

☐ Extrapolate Variables

☐ Data Sampling for Time Statistics

Sampling Interval: 1 Sampling Options...

Time Sampled (s): 0

Max Iterations/Time Step: 15 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals...

Calculate

Help

Figure 3-14 : Choix de pas de temps le nombre itérations

Residuals

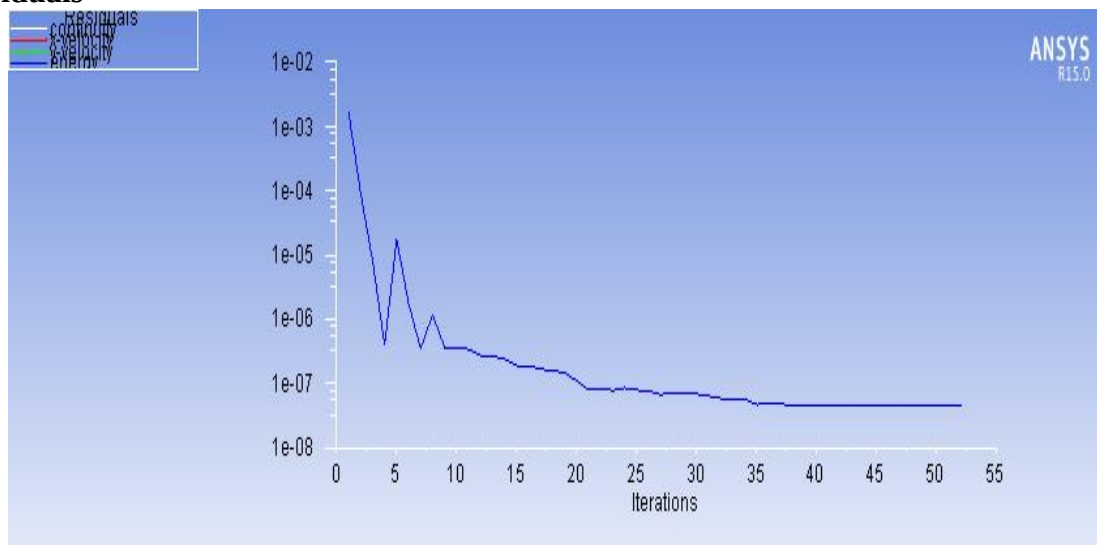


Figure 3-15 : Residuals

5 Simulation numérique de la paroi en béton-MCP

Les propriétés thermiques des murs en béton MCP ont été introduit dans le code *Fluent6.3.2* / Ansys. Ce code est basé sur la méthode des volumes finis (MVF). Il s'agit ensuite de discrétiser les équations par la Méthode des Volumes Finis (MVF) en découpant le domaine en plusieurs volumes de contrôle puis effectuer sur chacun d'entre eux Masse, quantité de mouvement et équilibre

énergétique. Cela nous conduit à un système d'équations algébriques qui peut être résolu de manière itérative.

En 2D, le profil de température dans la paroi est de la forme $T(x, y, t)$. Pour considérer le changement de phase, la méthode de la capacité effective C_{eff} décrite précédemment a été utilisée.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans un premier temps les méthodes de résolution du problème de transfert avec changement de phase. Nous avons alors adopté la méthode de la capacité effective C_{eff} . Puis nous avons décrit le modèle numérique développé pour la modélisation de la paroi en Béton-MCP. Enfin, nous avons présenté logiciel Gambit 2.4.6, le maillage et les conditions aux limites.

Chapitre IV : Résultats Et Discussions

1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats et les discussions faisant suite aux simulations menées sur la paroi test en béton, suivant les objectifs fixés dans l'orientation de l'étude.

En premier lieu, on présente la simulation numérique sur le stockage d'énergie solaire par chaleur latente avec un matériau BCP. La simulation numérique est exécutée à l'aide du code commercial *Fluent 6.3.2*.

Dans cette étude on considère deux type de béton : le premier un béton ordinaire et le second un béton BCP. Plusieurs simulations sont réalisées pour différentes configurations étudiées. Les résultats obtenus sont présentés sous formes de courbe de température.

2. Formulation mathématique du problème 2D

Dans ce paragraphe, nous allons décrire le modèle mathématique qui est utilisé pour résoudre le type de problèmes que nous avons présenté précédemment. Afin de simplifier la résolution mathématique du problème, les hypothèses suivantes ont été adoptées :

a) Hypothèses simplificatrices

Nous considérerons que :

- l'écoulement dans la phase liquide est laminaire, incompressible,
- in stationnaire et newtonien
- Les propriétés physiques du matériau seront considérées constantes et identiques dans la phase solide.

3. Problème physique étudié :

On propose l'analyse d'une paroi test composée de parois de faible inertie thermique représentant une structure d'une maison. Cette structure est formée d'un Mur de 15 cm d'épaisseur en en béton ordinaire et ou en béton-BCP qui peut changer d'état avec un front de fusion ou de solidification, voir figure 4-1

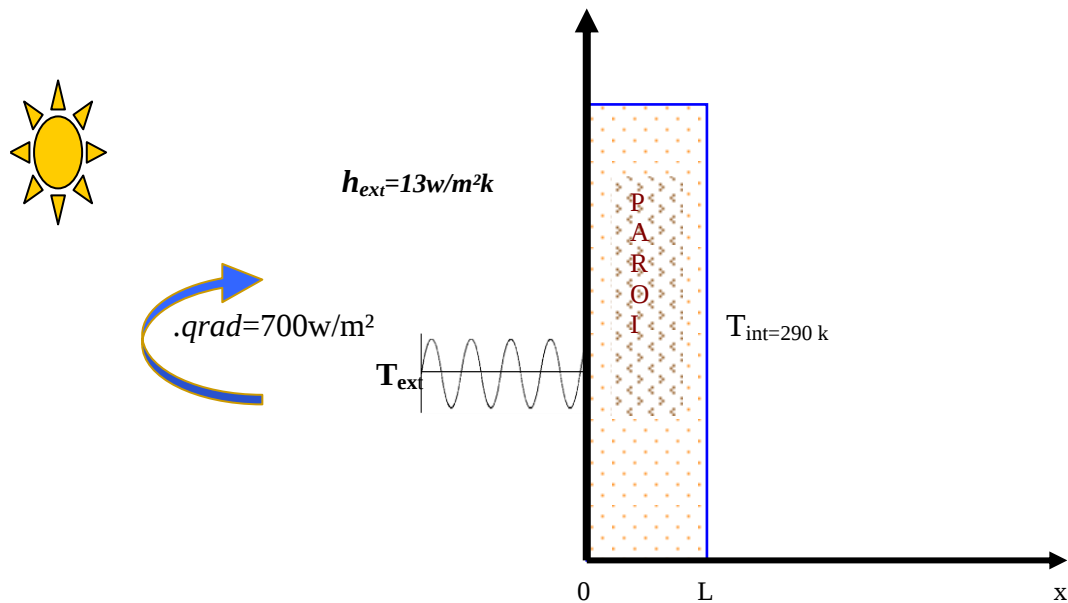


Figure 4-1 : Structure de la paroi du béton

Les conditions thermiques d’une journée type ont été imposées sur cette paroi.

- Les parois inférieure et supérieure sont supposées adiabatiques.
- A l’intérieur, on impose une condition de transfert par convection avec la température intérieure :

$$T_{int} = 290 \text{ kelvin}$$

$$h_{int} = 12 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=L} = h_{int} (T_{x=L} - T_{int}) \dots\dots\dots (4-1)$$

Avec :

λ : Conductivité thermique

h : Coefficient d’échange convectif.

T : Température.

int : Intérieure

- A l’extérieur, on impose une condition de flux solaire avec un échange convectif avec l’extérieure (milieu ambiant). (Paroi Extérieure).

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{rad} + h_{ext} (T_{\infty} - T_{x=0}) \quad (4-2)$$

Le coefficient d'échange convectif avec l'extérieur :

$$h_e = 13 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

Le flux solaire moyen imposé

$$q_{rad} = 700 \text{ W/m}^2.$$

La température extérieure est donnée par le graphe suivant :

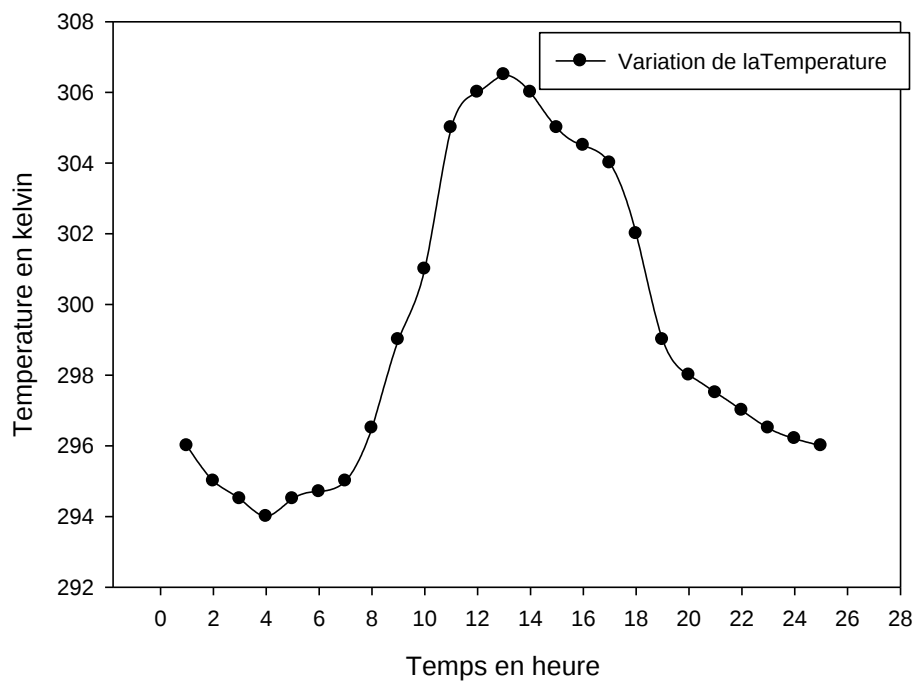


Figure 4-2 : Variation journalière de la température extérieure

La grandeur qui nous intéresse principalement est la température au niveau de la paroi en béton. Ce sont donc les variations de cette grandeur qui seront analysées.

La paroi en béton présente une hauteur $H = 1 \text{ m}$ et une épaisseur $e = 0.15 \text{ m}$ avec des conditions imposées type mixte. Le béton- BCP présente un bon compromis entre les propriétés mécaniques et thermiques.

Une paroi en béton de référence, sans MCP, sera aussi modélisée et servira comme témoin. La géométrie considérée est constituée de deux phases : le béton (la matrice) et les MCP (les inclusions) ayant chacune des propriétés physiques et thermiques différentes. Les propriétés thermo-physiques des deux matériaux utilisés sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4-1 : Propriétés thermo-physiques des deux matériaux.

Matériaux	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/Kg.K)
Béton-MCP	1.8	2200	Voir figure 4-3
Béton ordinaire	1.5	2300	800

ρ : Masse volumique [Kg/m³]

C_p : Capacité calorifique spécifique [J/Kg.K]

λ : Conductivité thermique [W/m.K]

La chaleur spécifique apparente présentée sur la figure (4-3) a été obtenue expérimentalement et a été ajustée de telle sorte que l'augmentation de C_p soit centrée sur la valeur de température de fusion des MCP et que l'aire du pic de fusion ainsi obtenu soit égale à la chaleur latente :

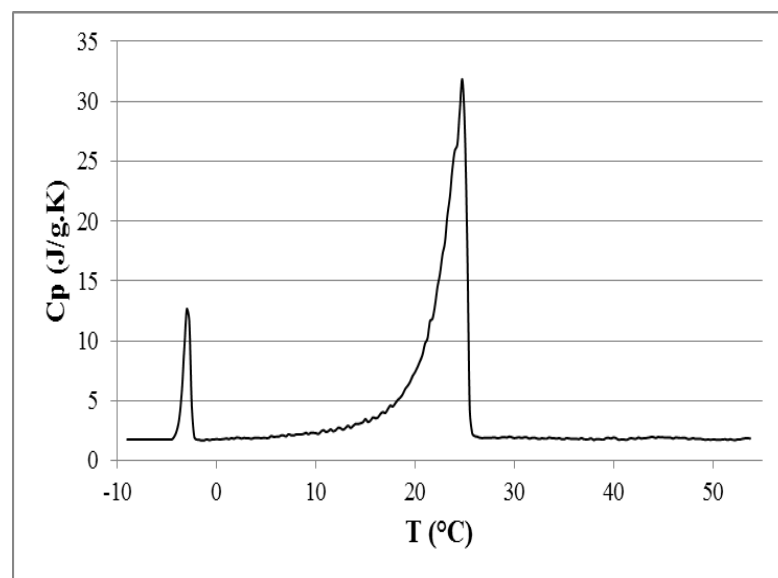


Figure 4-3 : Propriétés thermiques des MCP étudiés : Capacité calorifique spécifique

La figure 4.3 donne la variation de la capacité effective en fonction de la température. Quand le MCP fond ou se solidifie, le changement d'état est pris en compte par une capacité thermique effective C_{eff} .

6.1 Test de maillage

La précision des résultats dépend dans une large mesure de la qualité du maillage. Un exemple de grille est présenté sur la figure 4-4. Plusieurs maillages ont été opérés 2270, 3078 et 4290 nœuds.

La figure 4-4 représente la géométrie et le maillage qui est généré par le code Gambit, le maillage est de type quadratique structuré pour le domaine solide et fluide (béton et MCP).

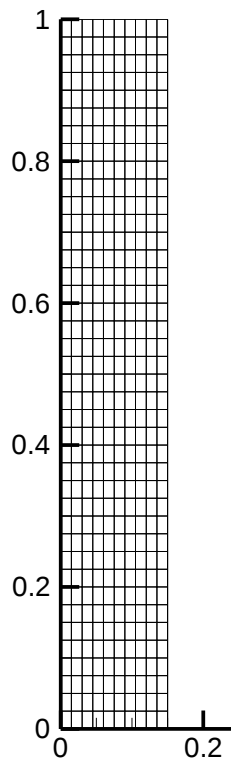
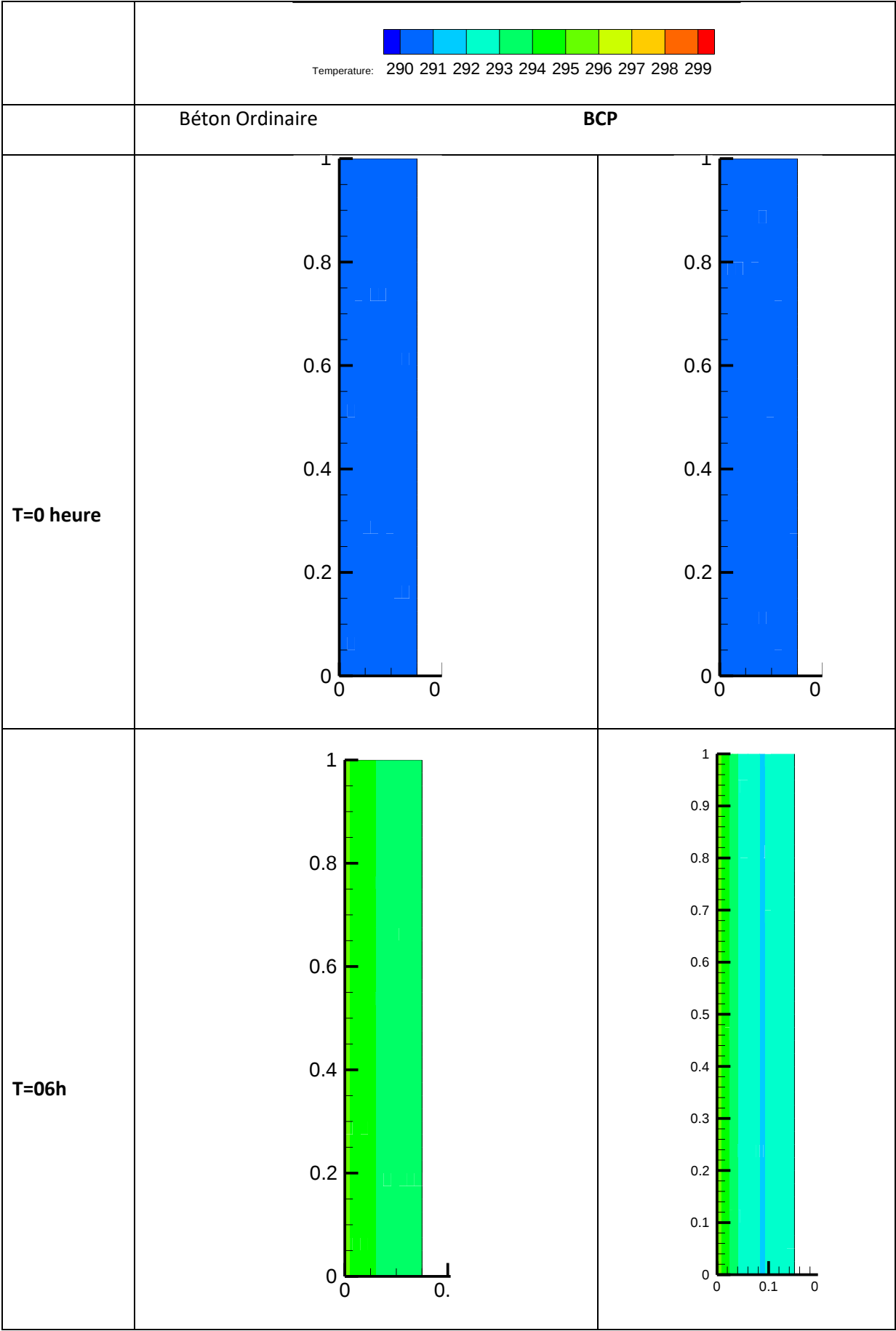


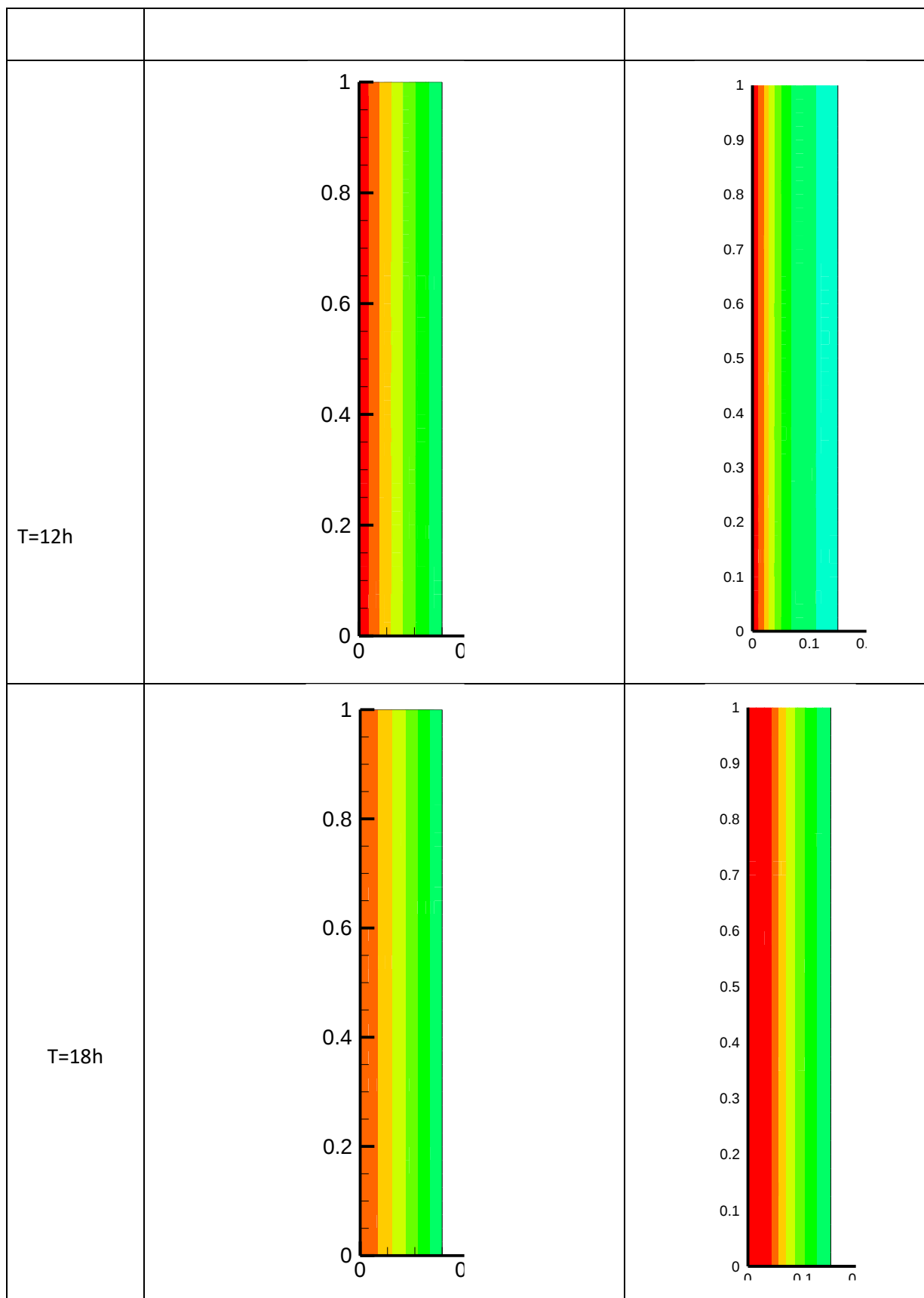
Figure 4-4 : Maillage utilisé pour la Paroi en béton.

Pour la suite, pendant l'étude précédente de [30] retenu une grille avec un maillage à 4290 nœuds qui donnent des résultats très satisfaisants. Deux configurations ont été analysées dans la présente étude. Une paroi test en béton BCP et l'autre en béton ordinaire.

4. Résultats et discussions

La figure 4-5 montre l'évolution des champs de température de la paroi avec et sans MCP aux instants 6h, 12h, 18h et 24h. La température extérieure imposée de façon variable (voir figure 4-2).





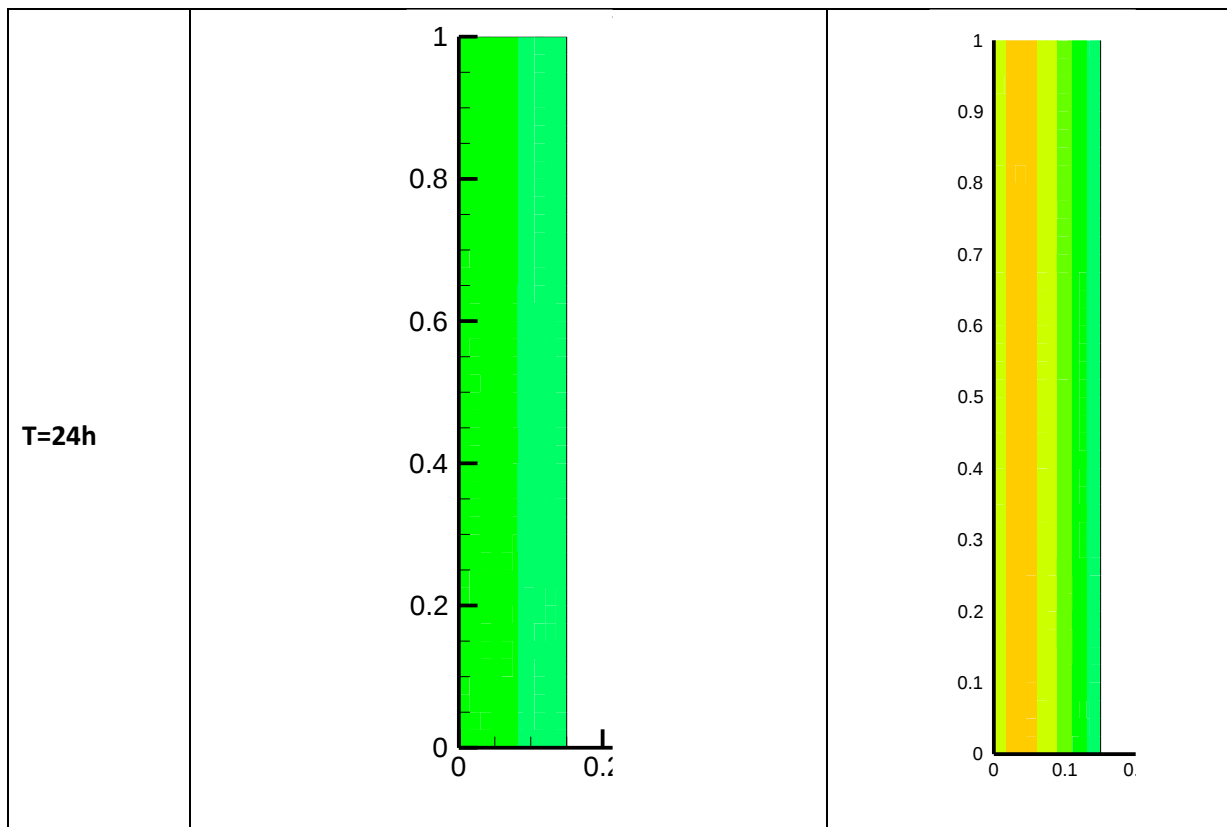


Figure 4-5 : Variation temporelle de la température pendant 24h

On constate d'après la figure 4-5 que la température dans la paroi varie en fonction de l'évolution du temps. Pendant le rayonnement solaire q_{rad} il y a un réchauffement de la paroi et plus intense dans la paroi du béton-BCP dus au stockage d'énergie thermique par chaleur latente. Cependant dans le cas avec béton ordinaire l'évolution de température est relativement faible par rapport au béton BCP parce qu'est entrain de ce chargé d'énergie thermique par chaleur sensible.

A $t=6$ h, Correspond au début du réchauffement de la paroi BCP lorsque les MCP sont encore à leurs états solides. La température de l'extérieure commencer à influencer sur la température interne, la paroi en béton-BCP a été la plus influencé que celle du béton ordinaire, l'écart de la température tend à s'amplifier peu à peu par rapport au temps (h)

- A $t=12$ h, le rayonnement solaire est maximum provoque le réchauffement des parois spécialement celle en béton-BCP à cause de la présence des MCP qui se charge avec la température extérieure et de fusionner et la température à l'intérieure de la paroi commence à s'élargisse entre les deux parois (avec et sans MCP)

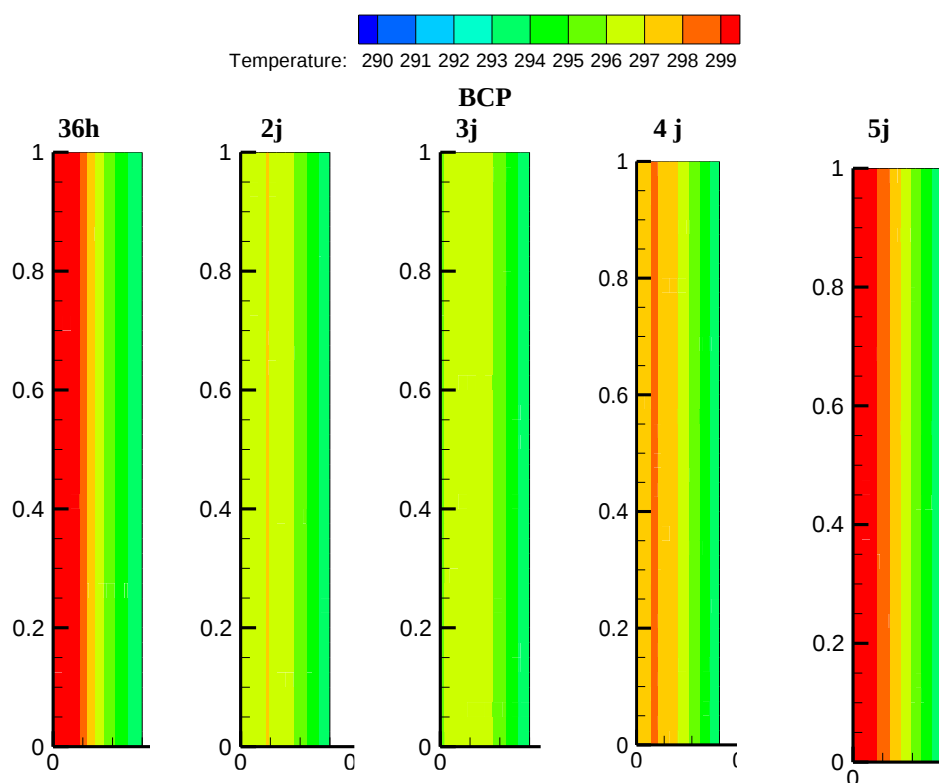
- A $t=18$ h, la température à l'intérieure de paroi (avec et sans MCP) continue à augmenter malgré que la température de l'extérieure et le rayonnement solaire reste constante mais

l'augmentation sur la paroi en béton BCP est plus supérieure qu'à la paroi avec béton simple. Ce phénomène du au stockage de la chaleur sensible dans le béton simple et le stockage de la chaleur latente dans le béton-MCP.

Le béton BCP permet de stocker l'énergie fournie par le Soleil et d'augmenter la capacité de stockage grâce à leur grande densité énergétique volumique.

A la fin de la journée ($t=24h$), la température interne des parois est plus homogène dans la paroi avec béton simple. Il est à noter la présence d'un gradient de température entre l'extérieur et l'intérieure la paroi béton, Par conséquent, il y a une influence significative de la conductivité thermique du béton ordinaire et du béton-MCP sur la température intérieure.

On signale que le transfert chaleur thermique du béton-BCP est bien plus importante que ce du béton ordinaire ceci est dû l'accumulation d'énergie thermique par chaleur latente



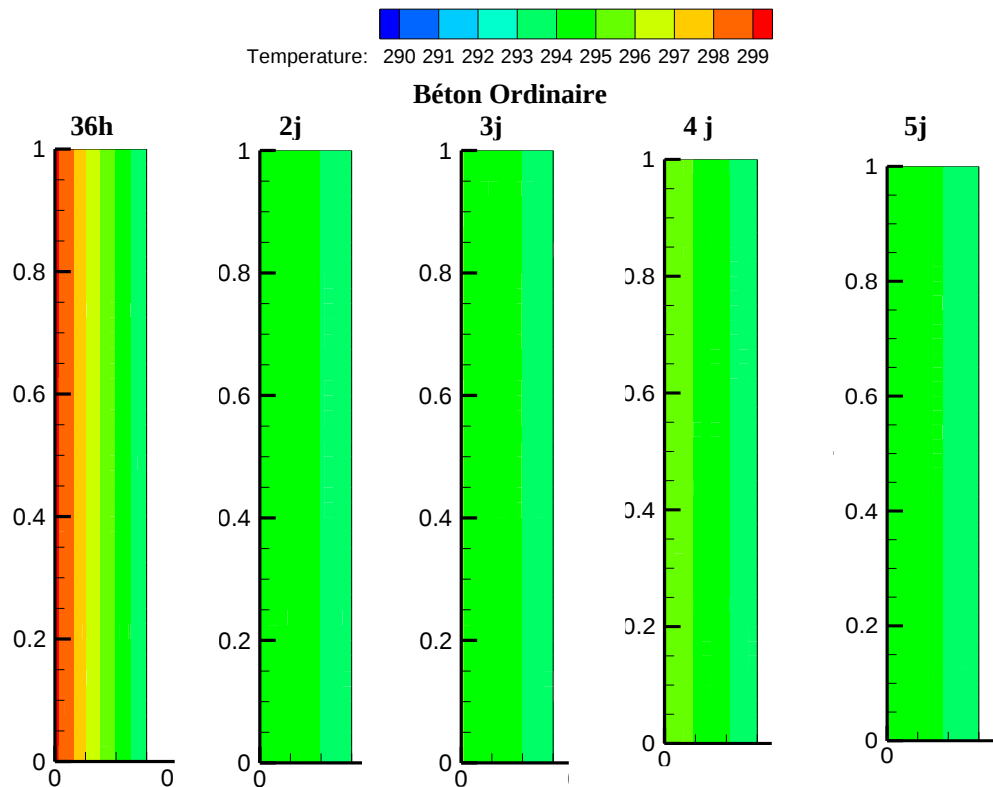


Figure 4-6 : Evolution des champs de températures durant cinq jours

La figure 4-6 présente l'évolution en fonction du temps (en heures) des températures de la paroi béton BCP pendant cinq jours. La température ambiante au niveau Béton BCP est stabilisée entre 295 k et 297.2 k et entre 293.4 k et 296.2 k pour le béton ordinaire avec une stabilisation de la température après le troisième jour.

D'autre part, pour accomplir le point discuté précédemment sur l'influence de la température extérieure de la paroi, en axant l'étude sur le flux de chaleur à la surface intérieure de la paroi . Initialement l'énergie thermique est transférée par conduction à travers la paroi extérieur cela est due à la différence de température entre $T_{ext} - T_{int}$ et par conséquence des valeurs élevées du flux de chaleur q_{rad} sont observés au début du processus. Quand le processus de chauffage se poursuit, la fusion du MCP commence, le phénomène de la convection naturelle sera dominant.

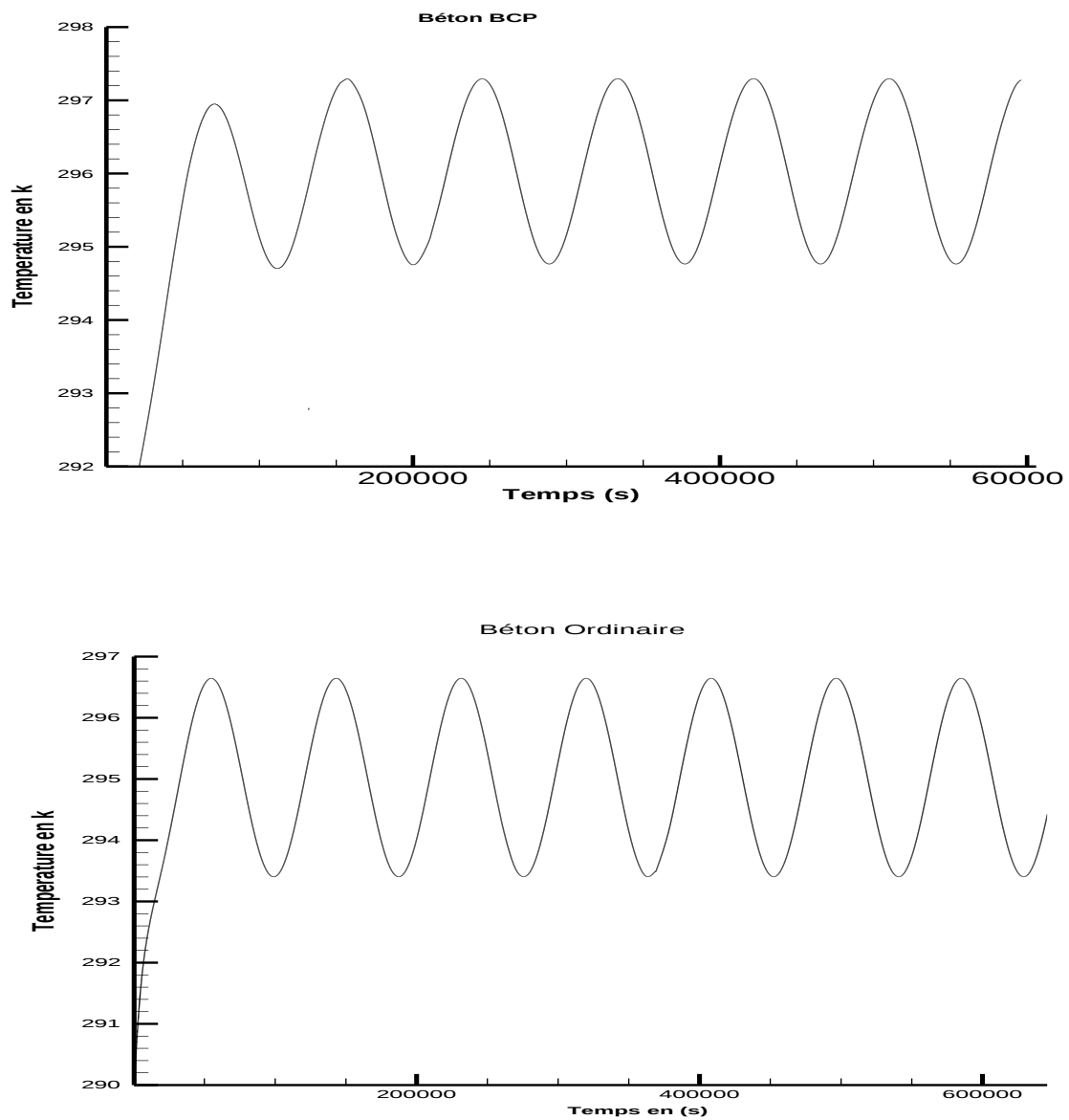


Figure 4-7 : Variation de la température moyenne

La figure 4-7 ci-dessus donne les évolutions des températures moyennes de la paroi béton BCP et béton ordinaire, durant sept journées consécutives. On voit que l'amplitude de la variation de la température de la paroi béton BCP est bien supérieure à celle du béton ordinaire avec un déphasage entre les températures de la paroi béton BCP et béton ordinaire. Cela indique clairement le lien entre le changement de phase et le stockage de la chaleur associé. On observe une réduction moyenne significative de la température entre l'extérieur et la paroi béton BCP d'environ 281 K.

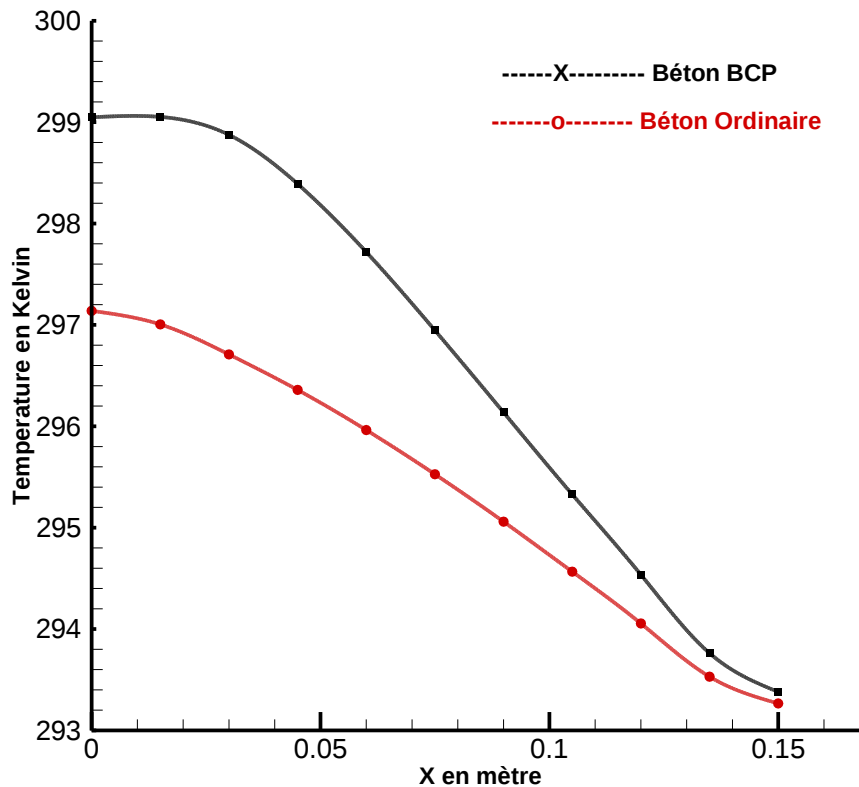


Figure 4.-8 : Evolution temporelle de la température le long de l'axe X.

La figure 4-8 présente l'évolution de la température dans les parois (avec et sans MCP) dans des périodes plus de 20heurs. On peut noter que l'évolution de température de la paroi en béton BCP est plus significative par rapport aux températures de la paroi du béton ordinaire avec une différence de température plus 2 kalven . Le gain de température obtenu par la paroi BCP réduit la consommation énergétique du chauffage qui se traduit par des économies d'énergie.

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié un modèle numérique pour le système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans une paroi en béton-BCP. Plusieurs simulations ont été effectuées dans la première partie pour étudier l'effet de : La température de la paroi, sur le stockage d'énergie thermique.

Dans la deuxième partie de simulation nous avons comparé les résultats obtenus avec les parois en béton ordinaire. Les aboutissements obtenus dans ce chapitre peuvent être résumés comme ci-dessous :

- Le béton-BCP permet de stocker l'énergie fournie par le Soleil et d'augmenter la capacité de stockage grâce à leur grande densité énergétique
- le transfert de chaleur thermique du béton-BCP est bien plus importante que ce du béton ordinaire ceci est dû l'accumulation d'énergie thermique par chaleur latente.
- .le stockage par chaleur latente semble être le plus adapté pour stocker l'énergie thermique par l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) qui ont des fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans le secteur de bâtiment.
- L'injection des particules de MCP dans le béton améliore la conductivité thermique de la paroi.

Conclusion générale

Dans ce projet, nous avons étudié l'une des méthodes de conservation de l'énergie dans le domaine de la construction en utilisant un matériau à changement de phase . Cette étude est divisée en 3 parties principales :

La première partie décrit l'efficacité énergétique des bâtiments, un aperçu de la MCP et des recherches antérieures sur ce sujet.

La deuxième partie donne une explication des matériaux à changement de phase et l'historique de leur utilisation avec les systèmes associés.

La troisième partie présente les résultats des transferts thermiques générés par le code "*Fluent*". Cette étude montre l'importance du MCP dans le domaine de la construction. Nous avons utilisé deux modèles : un mur est en béton ordinaire, et le second mur est en béton-MCP. Nous avons comparé la température entre ces deux cas Evolution.

Les résultats obtenus peuvent être résumés par les points suivants :

Les résultats ont montré l'effet de MCP sur la conservation de l'énergie, réduisant ainsi les gaz émis dans le domaine de la construction.

Le MCP peuvent être utilisés dans le domaine de la construction car ils sont disponibles sur le marché international.

En comparaison, nous remarquons qu'en incorporant des matériaux à changement de phase au béton, il devient plus économe en énergie que le béton ordinaire.

Grâce à l'isolation des matériaux à changement de phase, il est possible de maintenir la chaleur interne des bâtiments et de les isoler de la chaleur de l'environnement extérieur.

Références bibliographiques

- [1] www.energie-travaux.fr. [En ligne] 09 Mars 2017
- [2] www.lamaisonpassive.fr. [En ligne] mars 2012.
- [3] www.edfenr.com. [En ligne] 2016.
- [4] www.environnement.brussels/thematiques/batiments. [En ligne] 21 fevrier 2013.
- [5] A common definition for zero energy buildings. s.l. : US departement of energy , septembre 2015.
- [6] laboratoire de physique et ingénierie mathématique pour l'énergie et l'environnement et le bâtiment . www.univ-reunion.fr . [En ligne] 2013.
- [7] Bertrand CHATEAU & Bruno LAPPILONNE , La Prévision a Long Terme De La Demande D'énergie propositions méthodologiques éditions du centre national de la recherche scientifique, Paris 1977 p.90.)
- [8](Nicolas Morel et Edgard Gnansounou (nouvelle édition du cours précédemment donné par Claude-Alain Roulet et Arnaud Dauriat) Septembre 2008)page 14/15
- [9] <https://www.oze-energies.com/comment-reduire-consommation-en-energies-batiments/>
11/04/2021
- [10] Zavalani, O. (2011). Reducingenergy in buildings by usingenergy management systems and alternative energy-savingsystems. 2011 8th International Conference on the European EnergyMarket (EEM). doi:10.1109/eem.2011.5953039 page 370 – 371
- [11] Zou, P. X. W., Xu, X., Sanjayan, J., & Wang, J. .Review of 10 yearsresearch on building energy performance gap: life-cycle and stakeholder perspectives. Energy and Buildings. doi:10.1016/j.enbuild.2018.08.040 page 4 – 5
- [12] L.F.Cabeza et H.Mehling. "Heat and cold storage with PMC". Berlin: Heidelberg,2008

- [13] http://www.thermique-du-batiment.wikibis.com/materiau_a_changement_de_phase.php
19/04/2021 01.42
- [14] Selon ADEME 2010, en grande partie via des mesures économiquement viables selon l'Agence internationale de l'énergie (2009).
- [15] [Henri-Luc Thibault Et El Habib El Andaloussi, 2011
- [16] [ADEME, 2010]. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie « Bâtiment - énergie - environnement » ,2010
- [17] Julien Borderon / Thèse de doctorat / 2012 / Université de Lyon, ENTPE
- [18] Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(12), 318-345.
- [19] Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., De Gracia, A., & Fernandez, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(15), 1675-1695.
- [20] David, D. (2010). Etude expérimentale de la convection naturelle aux abords de parois contenant des matériaux à changement de phase. Insa de Lyon: Thèse de doctorat.
- [21] Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar Energy*(30), 313-332.
- [22] Younsi, Z. (2008). Etude expérimentale et numérique du comportement thermique de matériaux à changement de phase. Intégration dans un composant solaire passif pour l'habitat. Université d'Artois Faculté des sciences appliquées de Béthune: Thèse de Doctorat.
- [23] Sharma, S., & Sagara, K. (2005). Latent heat storage materials and systems: a review. *International Journal of Green Energy*(2), 1-56.

- [24] **A.Stoukov**, Introduction à la mécanique des fluides numérique : Méthode “Volumes Finis”. Disponible sur: <http://hmf.enseeiht.fr/coursenligne/stoukov/vf.pdf>.
- [25] M. M.Farid, Y.Kim, et A.Kanzawa, Thermal Performance of a Heat Storage Module using PCM's with Different ~MeltingTemperatures: Experimenta. ASME J. Solar Energy Eng. (1990).Vol. 112, pp. 125- 132.
- [26] A.Sharma, V.V.Tyagi, C.ChenetC.R.Buddhi. “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications”. Renewable and sustainableenergyreviews. 2009. 13
- [27] Y.Chataigner, « Modélisation du transfert thermique dans un remblai sur pergélisol etélaborations de stratégies pour faire face aux changements climatique ». Mémoire pourl’obtention du grade maître en sciences, 2008. Université Laval Québec.
- [28] N. ESSID, S. DRISSI, A. EDHAHAK, J. NEJI, « Etude expérimentale et numérique des Bétons à Changement de Phase (BCP) à l’échelle macro »
- [29] C. Comini, G. Nonino, "Thermal analysis of floor heating panels". NumericalHeatTransfe. 1994. Vol. 25, pp. 537-3150
- [30] HAMOU Nor el houda et BERROUACHINE Halima , Développement de nouveaux bétons ”accumulateurs d’énergie” investigations numérique du comportement thermique, Mémoire de Master Génie civil , université de Tlemcen,2020

