Table des matières

Dédicaces ii
Dédicaces iii
Résumé : iv
Table des matières vi
Liste des figures x
Liste des tableaux xii
Introduction générale xiii
Introduction générale 1
Chapitre I : 3
Matériaux à changement de phase et leur utilisation dans le secteur du bâtiment 3
1.1. Introduction 4
1.2. Efficacité énergétique dans les bâtiments 5
1.2.1 Gestion Active de l'énergie 5
1.2.2. Gestion Passive de l'énergie 6
1.2.3. Classification des bâtiments à efficacité énergétique : 8
1.2.4. Efficacité énergétique dans le bâtiment en Algérie : 9
1.3. Stockage d'énergie 10
1.3.1 Stockage de l'énergie thermique : 11
1.4. Matériaux à changement de phase 16
1.4.1 Description : 16
1.4.2. Classification des matériaux à changement de phase : 19
1.4.2.1 MCP organiques à base de paraffine : 19
1.4.2.2. MCP à forme stable MCPP : 22
1.4.3 MCP dans les matériaux de construction : applications et réalisations 23
1.5 Quelques réalisations de projet avec les MCP : 24
1.6 Conclusion 28
Références Bibliographiques du Chapitre 1 29
Chapitre II : 31
Identification des propriétés thermo-physiques des MCP 31
2.1. INTRODUCTION 32
2.2 Matériaux 32
2.3. Mesures physiques 34
2.3.1. Analyse granulométrique 34
2.3.2. Observations microscopiques 36
2.3.3. Mesure de la masse volumique absolue et apparente 36

2.3.4. Mesure de la teneur en eau 38
2.4. Mesures Thermiques 39
2.4.1 Chaleur spécifique.....40
2.5. Formulation du Béton-MCP 43
2.6. Mesure de l'affaissement 43
2.7. Résistance à la compression 43
2.8. Propriétés thermiques des bétons-MCP 44
2.8.1 Méthode du fil chaud.....44
2.8.2. Méthode du plan chaud 45
2.9. Conclusion.....46
Références Bibliographiques du Chapitre 2 47
Chapitre III : 48
Modélisation numérique d'une paroi en Béton-MCP 48
3.1. Introduction 49
3.2. Méthodes de résolution du problème de transfert avec changement de phase.....49
3.3. Description du modèle numérique 52
3.4. Géométrie, Maillage et outil de résolution 53
3.4.1. Géométrie étudiée 53
3.4.2 Conditions aux limites.....54
3.4.3 Description de GAMBIT 2.4.6 56
3.4.4. Génération du maillage par GAMBIT 58
3.4.5 Code Fluent :.....61
3.5. Simulation numérique de la paroi en béton-MCP 65
3.6. Conclusion.....65
Chapitre IV :.....67
Résultats et Interprétation 67
4.1. Introduction 68
4.2. Formulation mathématique du problème 2D.....68
4.3. Problème physique étudié. 69
4.4 Résultats et discussions.....73
4.5. Conclusion.....76
Conclusion générale.....78

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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]
L	Chaleur latente	[kJ/Kg]
m	Masse de l'échantillon	[Kg]
mMCP	Masse des MCP	[Kg]
ms	Masse sèche	[Kg]
mh	Masse humide	[Kg]
q*rad*	Flux radiatif solaire	[W/m²]
R*c*	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 horizontal	[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]
$.\lambda$	Conductivité thermique	[W/m.°K]
$.\lambda_{béton}$	Conductivité thermique du béton	[W/m°K]
$.\rho$	Masse volumique	[Kg/m^3]
$\rho_{MCP\text{-}absolue}$	Masse volumique absolue des MCP	[Kg/m^3]
$\rho_{MCP\text{-}apparente}$	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

Liste des figures

CHAPITRE 1 N° de Page

Figure 1.1 : Schéma habitat passif.....8
Figure 1.2 : Evolution d'un kilogramme de glace à la pression atmosphérique…… 12
Figure 1.3 : Les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique [9] 13
Figure 1.4 : Evolution de la température d'un corps pur, homogène avec changement d'état.15
Figure 1.5 : Processus de solidification et fusion (Fleischer, A.S., Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials) 15
Figure 1.6 : Exemple des MCP macro-encapsulés : conditionnement en nodule, en balle 21
Figure 1.7 : Exemple des MCP microencapsulés : à l'état poudre et à l'état liquide (BASF). 22
Figure 1.8 : Intégratio de MCP dans l'habitat.....23
Figure 1.9 : Quelques réalisations de bâtiments par BASF en utilisant des MCP (BASF). 25
Figure 1.10 : Lycée de Diekirch au Luxembourg (BASF [25]).....25
Figure 1.11 : Palais de Tokyo à Paris (Nomiya). 26
Figure 1.12 : Plaque Energain commercialisée par Dupont de Nemours (DupontTM Energain [26]).. 27

CHAPITRE 2 N° de page

Figure 2.1 : Observations microscopiques des MCP utilisés dans cette étude.[4].....33
Figure 2.2 : Granulométrie Laser (Drissi, [5]) 35
Figure 2.3 : Mastersizer 2000 (Malvern Panalytical, [7]) 35
Figure 2.4 : Mastersizer 3000 (Malvern Panalytical, [8]) 36
Figure 2.5 : Schéma du dispositif de mesure de la masse volumique. 37
Figure 2.6 : Appareil de filtration sous vide. 38
Figure 2.7 : Schéma descriptif de la DSC (Drissi, [5]).....39
Figure 2.8 : DSC modèle 204 F1 Phoenix Netzsch.....40
Figure 2.9 : Le principe de la conductivité thermique.....40
Figure 2.10 : la conductivité thermique de différents matériaux 41
Figure 2.11 : Le LFA 457 MicroFlash® NETZSCH (NETZSCH, [12]). 41
Figure 2.12 : Exemple de signal enregistré par LFA (NETZSCH, [12]). 42
Figure 2.13 : Mesure de l'affaissement (Slump) selon la norme SN EN 12350-2 43
Figure 2.14 : Presse (modèle 3R-RP 3000 TCT) 44
Figure 2.15 : Montage de fil chaud 45
Figure 2.16 : Vue d'une sonde de type fil chaud 45
Figure 2.1 : Le montage de plan chaud 45

CHAPITRE 3 N° de page

Figure 3.1 : Capacité thermique incluant l'effet de la chaleur latente dans un petit intervalle51

Figure 3.2 : Modèle géométrique avec conditions aux limites 53
Figure 3.3 : Paroi Béton – MCP.....55
Figure 3.4 : Ceff effective du Béton_MCP introduit dans le modèle de calcul [5]. 56
Figure 3.5 : Description Gambit 2.4.6. 57
Figure 3.6 : Vue globale 58
Figure 3.7 : Type de solver. 58
Figure 3.8 : Modélisation sous Gambit 59
Figure 3.9 : Maillage du modèle étudié. 59
Figure 3.10 : Conditions aux limites numériques 60
Figure 3.11 : Fenêtre d'exportation du maillage. 60
Figure 3.12 : Vue globale de Fluent. 61
Figure 3.13 : Importation de la géométrie 63
Figure 3.14 : Choix du pas de temps, le nombre d'itérations 63
Figure 3.15 Residual.....64

CHAPITRE 4 **N° de page**

Figure 4.1 : Structure de la cellule test 69
Figure 4.2 : Propriétés thermiques des MCP étudiés : Capacité calorifique spécifique0,.....70
Figure 4.3 : Maillage utilisé pour la Cellule test. 71
Figure 4.4 : Variation temporelle de la température pendant 24h.....72
Figure 4.5 : Evolution temporelle de la température. 75

Liste des tableaux

CHAPITRE 1 **N° de page**

Tableau 1.1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C [8] 14

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des différents Changements d'état [16].....19

Tableau 1.3 : MCP commercialisés.....27

CHAPITRE 3 **N° de page**

Tableau 3.1 : Propriétés thermo-physiques des deux matériaux.....55

CHAPITRE 4 **N° de page**

Tableau 4.1 : Propriétés thermo-physiques des deux matériaux.....69

Rapport-Gratuit.com

Introduction générale

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Introduction générale

Dans un contexte de réchauffement climatique, nous sommes invités plus encore à réduire la consommation des énergies fossiles et leur remplacement par des ressources inépuisables comme le soleil ou le vent nécessitant un stockage de l'énergie dans un volume réduit. Afin de surmonter ce défi, plusieurs centres de recherche, œuvrent pour une meilleure gestion de l'énergie et au développement de systèmes innovants pour la préservation de l'environnement, l'économie d'énergie, la protection des ressources énergétiques et la promotion des énergies renouvelables propres.

Au sujet de la consommation énergétique nationale, les combustibles utilisés sont essentiellement de nature fossile (pétrole et gaz). Aussi, il est à noter que le secteur le plus consommateur d'énergie est celui du bâtiment avec une proportion d'environ 45% [1]. Une grande partie de cette consommation provient des systèmes de chauffage et de climatisation qui assurent une température intérieure compatible avec les conditions de confort, quelles que soient la nature et l'efficacité des systèmes de chauffage. La meilleure façon de diminuer les besoins énergétiques d'un bâtiment demeure la réduction des pertes et par conséquent l'amélioration de l'isolation thermique des parois. L'enveloppe des bâtiments traditionnels est restée pendant très longtemps un moyen passif permettant d'une part de limiter les pertes ou les apports thermiques et d'assurer d'autre part une certaine climatisation par son inertie thermique. Cependant, l'énergie thermique stockée dans les murs pendant les périodes chaudes est restituée pendant les périodes froides. Dans les bâtiments actuels, on s'efforce de diminuer l'épaisseur des parois par instauration des matériaux isolants pour réduit les coûts de construction. Toutefois, de telles structures ne permettent pas d'avoir une inertie thermique suffisante capable d'amortir les fluctuations de la température extérieure. Les améliorations continues dans les technologies d'enveloppe du bâtiment suggèrent que les résidences seront bientôt construites avec de faibles charges de chauffage et de refroidissement, par l'utilisation de nouveaux matériaux de construction intelligents basés sur le stockage d'énergie pour vaincre les conditions climatiques et conserver le confort interne avec un moindre coût énergétique.

L'un de ces nouveaux matériaux connus sous le nom des matériaux à changement de phase (MCP), sont des matériaux intelligents basés sur un principe physique simple, ils liquéfient l'énergie absorbante à partir d'une certaine caractéristique de température pour chaque type de matériaux et restituent l'énergie lorsque la température de leur environnement diminue.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Lors de la sélection d'un MCP, ses températures de fusion et de solidification doivent être proches de la plage de température moyenne de l'air ambiant.

Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) sont utilisés pour apporter une inertie suffisante afin d'utiliser la fraîcheur nocturne aux heures les plus chaudes de la journée. L'utilisation proposée de MCP passe par la constitution d'un système d'échangeur air/MCP couplé à la ventilation naturelle du bâtiment. Ainsi les échanges thermiques entre les parois de MCP et l'air ambiant se font par convection naturelle pour assurer des échanges plus importants. Le stockage se fait par chaleur latente avec des températures de fusion/solidification du MCP adaptée.

Pour cela un modèle *2D* du dispositif basé sur une modélisation aux volumes finis avec une capacité thermique équivalente C_{eff} pour le MCP a été développé. Ce modèle numérique validé, est couplé à un modèle global de bâtiment sous Ansys Fluent pour simuler et évaluer le fonctionnement de plusieurs configurations d'échangeur air/MCP sous les différentes sollicitations thermiques.

Pour atteindre cet objectif, l'étendue de cette étude est subdivisée en quatre chapitres.

Le premier chapitre, est consacrée à une revue bibliographique traitant des Matériaux à Changement de Phase et leur utilisation dans le secteur du bâtiment, en particulier ceux incorporés dans le béton,

Le deuxième chapitre est dédié à l'analyse des Matériaux à Changement de Phase, aux techniques de caractérisation de leurs propriétés thermiques, notamment, la technique de Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC),

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 :

Matériaux à changement de phase et leur utilisation dans le secteur du bâtiment

1.1. Introduction

La consommation d'énergie est le principal défi des années à venir. En effet, la demande énergétique des sociétés industrialisées continue d'augmenter. En outre, les pays en développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour se développer. Aujourd'hui, la majeure partie de la production énergétique mondiale provient de ressources fossiles. La consommation de ces ressources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre (GES) qui augmentent par conséquent la pollution atmosphérique.

Aujourd'hui, le secteur du bâtiment, est devenu un enjeu central de deux défis planétaires majeurs : le changement climatique et l'approvisionnement énergétique. Le secteur de la construction en Algérie (industries résidentielles et tertiaires) consomme plus de 40% de l'énergie totale, tandis que l'Europe en consomme 46% et émet 19% de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, et la consommation d'énergie ailleurs est de 25%. L'industrie représente un grand potentiel pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les gaz à effet de serre. Avec l'évolution des exigences relatives à la performance thermique du bâtiment et des nouvelles contraintes réglementaires de la RT 2020 visant la réduction de la consommation d'énergie et des émissions des gaz à effet de serre, une politique d'efficacité énergétique est mise en place pour répondre à ces objectifs. La diminution de la consommation d'énergie induit généralement un confort thermique acceptable et une baisse des émissions des Gaz à effet de serre.

La mise en place de ces exigences doit être suivie par une évolution à la fois scientifique, technologique, culturelle et industrielle dans le domaine de la rénovation, de la conception des bâtiments (isolations, orientation, parois vitrées, gestion de l'éclairage, installations de chauffage/ventilation/climatisation (CVC), etc.)

Certains chercheurs, se sont intéressées à l'utilisation de matériaux intelligents permettant de contrôler les échanges thermiques au sein du bâtiment et de rationaliser le recours aux systèmes de chauffage et de climatisation conventionnels.

Le matériau à changement de phase (MCP) est une solution de plus en plus attractive pour les constructeurs. En effet, ces matériaux ont la capacité de stocker et de libérer de l'énergie grâce à la chaleur latente lors du changement de phase, réduisant ainsi la consommation d'énergie, réduisant ainsi les émissions de gaz nocifs, améliorant le confort thermique et optimisant l'épaisseur des parois.

1.2. Efficacité énergétique dans les bâtiments

L'objectif de toute notion d'efficacité énergétique est la mise en place de solutions d'efficacité énergétique permettant de consommer moins et mieux tout en assurant un bon niveau de confort (psychique et physique) [2]. C'est pourquoi, il est nécessaire de sensibiliser les consommateurs à leur consommation énergétique et de les impliquer activement dans la démarche de concrétisation de l'efficacité énergétique, en les incitant à revoir leurs pratiques et habitudes et à s'investir sans crainte dans l'utilisation des énergies renouvelables et des produits performants.

La consommation globale de l'énergie ne cesse de s'accroître, l'agence internationale de l'énergie estime qu'elle pourrait doubler d'ici 2050, [3]. Cette augmentation est engendrée par le biais des moyens énergivores, ou par le biais du comportement de l'homme. Elle entraine alors des conséquences néfastes sur lui, son environnement ainsi que sur le plan économique. Pour réduire ces conséquences, tout en préservant l'environnement et en répondant au confort de l'usager, l'efficacité énergétique est apparue comme une réponse à ces différents enjeux. Elle constitue une priorité dans le secteur du bâtiment car ce dernier est un grand consommateur de l'énergie. La gestion énergétique globale des bâtiments peut se faire à deux niveaux :

- Gestion Active
- Gestion Passive.

En effet, la gestion énergétique dite « **active** » touche à la régulation, et la supervision de l'énergie et la gestion technique du bâtiment. A contrario, la gestion énergétique dite « **passive** » vise à diminuer les besoins énergétiques à travers l'amélioration de l'isolation de l'enveloppe du bâtiment et sa perméabilité à l'air, la ventilation et les équipements de chauffage [4].

1.2.1 Gestion Active de l'énergie

La gestion de l'énergie « **Active** » dans un bâtiment est essentielle pour diminuer sa consommation énergétique à travers l'utilisation d'équipements ayant un meilleur rendement énergétique, l'intégration des énergies renouvelables (solaire, éolienne …) qui permettent d'apporter les besoins d'un bâtiment en énergie propre, le suivi et l'affichage de la consommation énergétique temporelle au sein du bâtiment.

L'efficacité énergétique « active » est un levier d'action qui devient primordial pour atteindre des niveaux dit de « basse consommation » de 50 kWh/m²/an. Elle représente un « gisement clé » provenant de la domotique qui vise à rendre chaque habitant maître de sa consommation [5]

Les solutions de gestion active de bâtiment permettent de :

1- Réduire la facture énergétique.

2- Réduire les consommations d'énergie.

3- Améliorer la qualité de l'énergie en consommant l'énergie juste nécessaire.

La mise en œuvre de ces solutions est rapide, nécessite peu de temps. Elle s'inscrit dans une approche « clé en main », qui demande une réponse aux besoins de chaque client, de la performance et de la durabilité. Elle se fait avec :

1- Mesure des consommations.

2- Régulation CVC.

3- Gestion de la protection solaire.

4- Production de l'énergie renouvelable.

5- Installation des équipements performants.

6- La domotique.

1.2.2. Gestion Passive de l'énergie

Il existe plusieurs moyens de gestion énergétique « **Passive** » des bâtiments telles que :

- Protection solaire et thermique des bâtiments,
- Technique de régulation thermique.
- Technique de dissipation de chaleur.
- Technique de récupération de chaleur.

L'enveloppe d'un bâtiment stocke généralement une grande quantité d'énergie solaire sous forme de chaleur. Sa capacité de stockage dépend des propriétés du matériau constituant

l'enveloppe. Le bon choix des matériaux de construction améliorera l'inertie thermique du mur. Par ailleurs, l'un des facteurs permettant de réduire la consommation énergétique dans un bâtiment est l'utilisation de l'éclairage naturel. L'orientation de ces façades ainsi que le choix du site ont une influence non - négligeable sur le confort thermique des occupants. [2]

Cependant, il faut toujours l'optimiser. En effet, plus l'apport solaire est important, plus les besoins thermiques pour le chauffage et le risque d'un réchauffement excessif durant l'hiver sont réduits et plus il faut veiller à limiter ces apports solaires l'été. Ces défaillances peuvent être compensées par une isolation en hiver comme en été. La réduction des déperditions thermiques améliore les apports thermiques dans la pièce. Grâce à l'utilisation de formes de construction compactes, de structures multicouches et à l'utilisation de matériaux d'isolation thermique à faible conductivité thermique, par exemple :

- La mousse rigide
- Le polystyrène et polystyrène expansé,
- Le chanvre,
- La laine de verre et la fibre de bois.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Par ailleurs, l'isolation thermique estivale permet d'éviter le réchauffement excessif des pièces. La température des locaux dépend essentiellement de l'orientation des façades, des dimensions des surfaces vitrées, du type de vitrage et de la protection solaire.

Une conception et un choix avisé de ces paramètres aident à la réduction de la consommation énergétique et le maintien d'un niveau de température acceptable dans les locaux. En effet, le recours à des vitrages à isolation renforcée, dont la surface vitrée ne dépasse pas 30 % de la surface de la façade, permet d'améliorer significativement l'isolation estivale [6]. Des solutions d'efficacité énergétique passive peuvent être obtenues par :

- L'amélioration de l'isolation (murs extérieurs, toiture).
- La pose d'une menuiserie performante avec un double vitrage.
- Le choix d'équipements plus performants.
- La qualité de l'isolation thermique.
- Le bâti et son inertie.

.

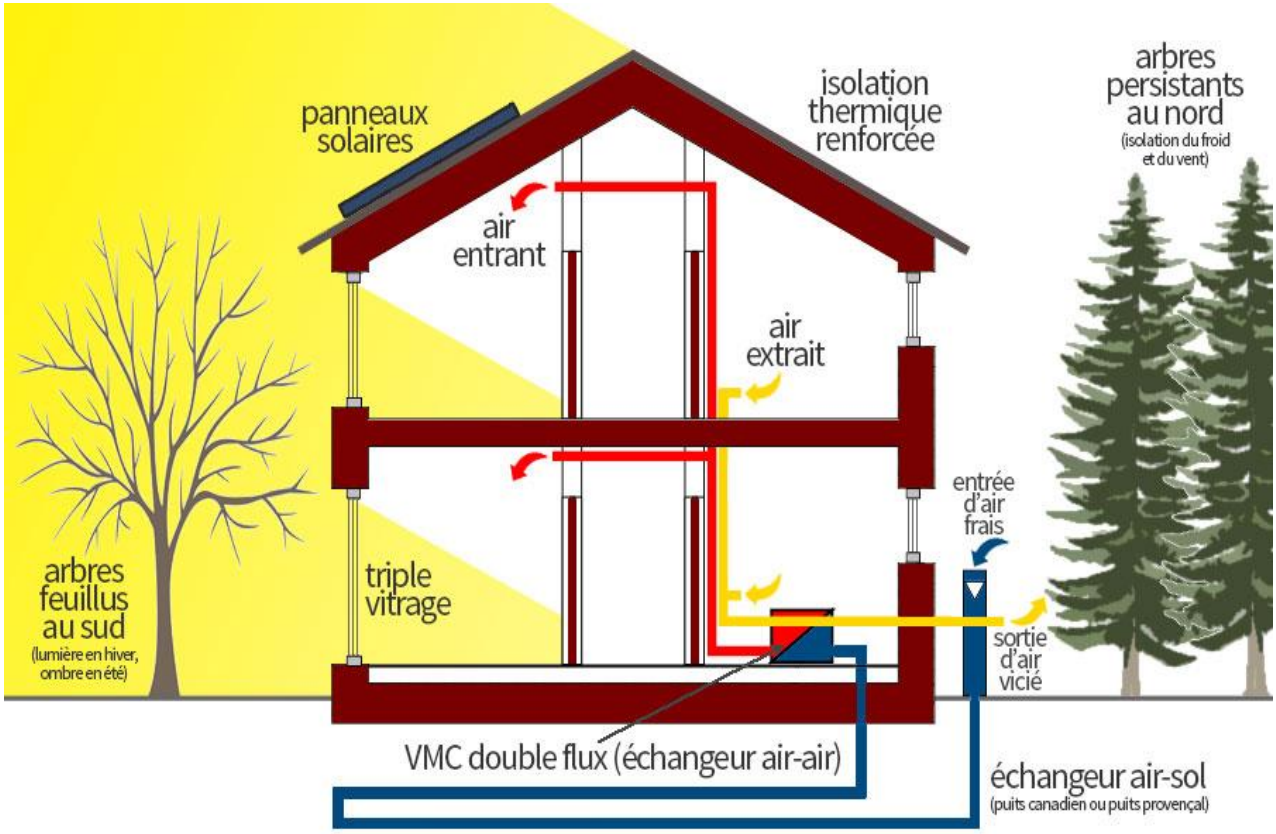


Figure 1.1 : Schéma habitat passif [7]

1.2.3. Classification des bâtiments à efficacité énergétique :

Le concept de la performance énergétique dans le bâtiment est apparu pour donner suite à l'utilisation non responsable des énergies fossiles pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage…etc. Les bâtiments efficaces sont définis par une série d'objectifs et de solutions techniques conçus pour guider les concepteurs. Ce dernier s'appuie sur différents outils d'aide à la conception qui combinent technologie, matériaux, structure et équipement pour atteindre au mieux les objectifs fixés.

Selon Thiers S., les bâtiments performants doivent pouvoir limiter au maximum la demande de chauffage en hiver et la surchauffe en été. La forte isolation thermique et l'étanchéité à l'air de la coque sont conçues pour réduire les échanges thermiques avec l'extérieur.

. La conception des bâtiments performants à faible consommation d'énergie est un processus complexe, il nécessite une approche particulière. En effet, les choix technologiques

et architecturaux réservés à ce type de conception ont un impact très important sur la performance énergétique du bâtiment. Par conséquent, la forme, la compacité et l'orientation d'un bâtiment peuvent avoir un impact significatif sur sa performance énergétique. Il en va de même pour le choix des systèmes de chauffage, de ventilation...etc. [7].

Les bâtiments performants à faible consommation se classifient comme suit :

A. Bâtiment à basse consommation (BBC) :

Par rapport aux bâtiments standards, les besoins énergétiques de ce bâtiment sont inférieurs. Le premier niveau de performance peut être atteint en optimisant l'isolation, en réduisant les ponts thermiques et en augmentant les contributions passives.

B. Bâtiment « passif » (BP) :

Ce bâtiment très faiblement consommateur d'énergie ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de rafraîchissement actifs ainsi qu'une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables. En fait, un petit système de secours est nécessaire pour maintenir le confort thermique pendant les jours les plus froids. Il est le plus souvent lié à la ventilation.

C. Bâtiment « zéro énergie » (BZE) :

Le bâtiment combine des exigences de faible consommation d'énergie avec des méthodes de production d'énergie locales. Si vous considérez plus d'un an, sa production d'énergie équilibrera sa consommation. Son bilan énergétique net annuel est donc nul.

D. Bâtiment « à énergie positive » (BEP) :

Ce bâtiment générateur d'énergie dépasse le niveau de « consommation d'énergie nulle », et l'énergie totale qu'il produit dépasse l'énergie qu'il consomme. Comme le bâtiment précédent, le bâtiment est également connecté au réseau de distribution d'énergie et l'énergie restante peut être fournie au réseau de distribution d'énergie.

1.2.4. Efficacité énergétique dans le bâtiment en Algérie :

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

Rapport-Gratuit.com

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 œuvre 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.

1.3. Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie consiste à économiser une certaine quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, cette déclaration fait également référence au stockage de

matériaux contenant de l'énergie. Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux d'aujourd'hui, qu'il s'agisse d'optimiser l'énergie ou de faciliter l'accès à l'énergie. Cela permet de réguler la « production » et la « consommation » d'énergie tout en limitant les pertes. L'énergie stockée lorsque la disponibilité dépasse la demande peut être restituée lorsque la demande est plus élevée. Face à une production intermittente ou fluctuante de certaines sources d'énergie (comme les énergies renouvelables), cette opération peut également répondre à une demande constante [8].

1.3.1 Stockage de l'énergie thermique :

Le chauffage et la climatisation représentent près de 50% de la consommation énergétique. Les sources de chaleur proviennent essentiellement du soleil et de la chaleur produite par certaines industries. L'énergie thermique peut être stockée suite à l'élévation de la température qui modifie l'énergie interne du matériau.

Le stockage thermique par changement d'état est une technologie innovante et prometteuse en matière d'économie d'énergie. Il s'agit d'un domaine de recherche relativement nouveau qui a commencé avec le Dr Telkes dans les années 1940. Ses travaux n'ont pas suscité au début beaucoup d'intérêt et ce jusqu'à la crise énergétique de la fin des années 1970 et le début des années 80. Par conséquent, l'eau est le plus connu des accumulateurs de chaleur latente : par exemple, elle peut être utilisée pour le refroidissement sous forme de glace. Pour augmenter ou diminuer la température d'un corps, nous devons soit retirer, sois ajouter une certaine quantité d'énergie, l'unité qui permet de quantifier cette énergie est le Joule (J), et plus exactement le kiloJoule (kJ).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

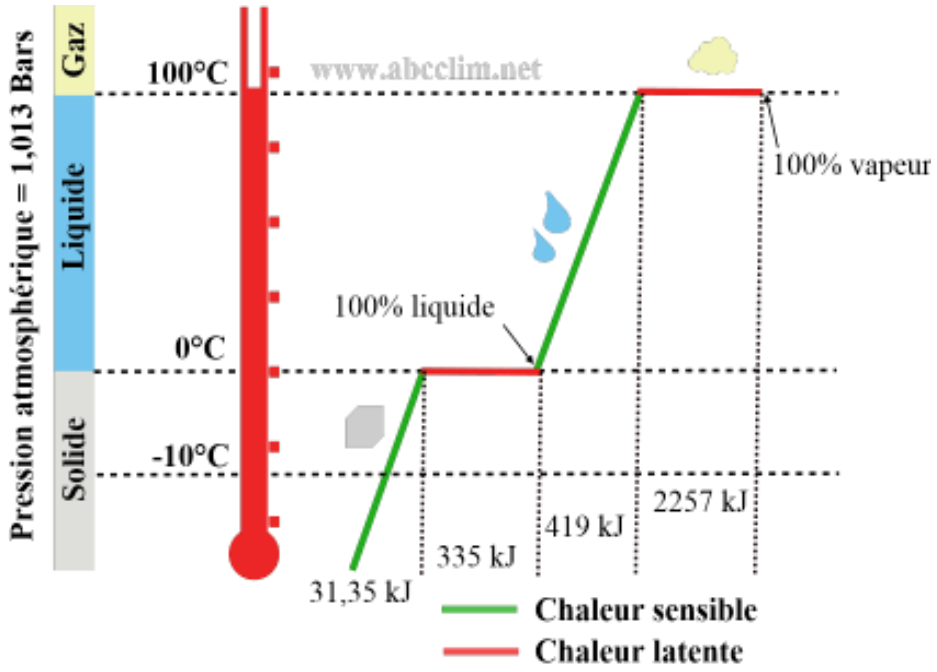


Figure 1.2 : Evolution d'un kilogramme de glace à la pression atmosphérique [10]
.

Le stockage d'énergie thermique est généralement réalisé sous deux formes :

<u>Stockage par chaleur sensible</u> : où on utilise un matériau ayant une grande capacité thermique, tel que l'eau et autres fluides, les briques de céramique, les pierres, les galets et le béton,

<u>Stockage par chaleur latente</u> de fusion ou un matériau à changement de phase (MCP) est utilisé.

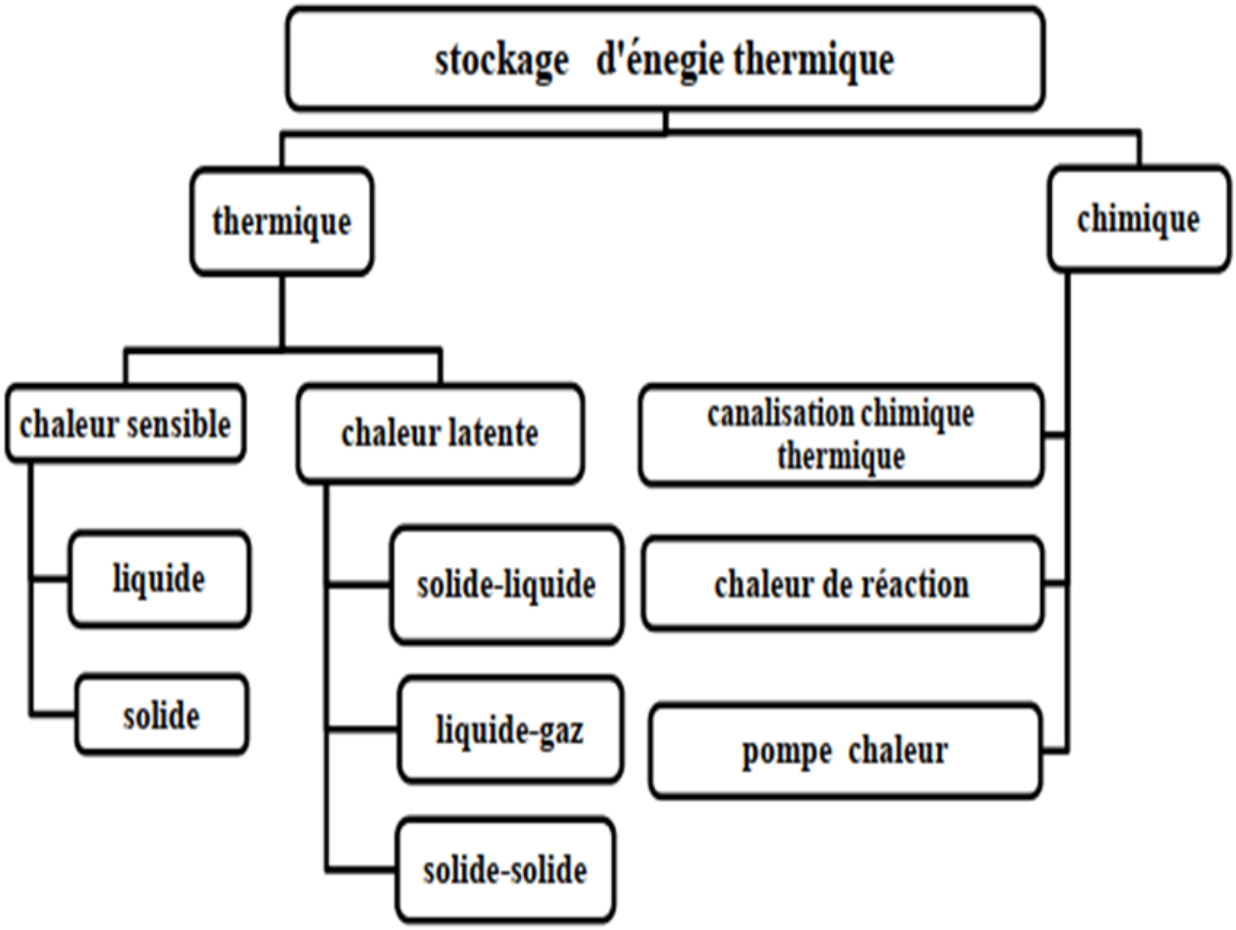


Figure 1.3 : Différentes techniques de stockage de l'énergie thermique [9]

- **Chaleur sensible** :

Lorsque le corps humain est chauffé ou refroidi, l'augmentation ou la diminution de la température sans modifier l'état physique est appelée chaleur sensible.

Pour le stockage par la chaleur sensible, la température des matériaux de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée. La pierre, le métal, le béton, le sable et les briques sont des matériaux couramment utilisés pour le stockage de chaleur à basse et haute température, car ils ne peuvent ni se congeler ni entrer en ébullition [10].

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau 1.1. Les propriétés thermiques de ces matériaux sont intimement liées à leur masse volumique.

Tableau 1. 1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C [9]

Matériaux	Masse volumique (Kg/m^3)	Chaleur Spécifique (J/Kg.K)	Capacité thermique volumétrique ($J/m^3.K$)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Acier	7840	465	3.57
Eau	988	4182	4.17

Un stockage de chaleur raisonnable est plus économique que les avantages de la chaleur, comme l'obtention de matériaux de stockage de chaleur à un prix bon marché.

- **Chaleur latente :**

Toutes les substances pures ont la capacité de changer leur état physique. Les solides peuvent devenir des liquides et les liquides peuvent devenir des gaz. Ces changements d'état nécessitent une augmentation ou une diminution de l'énergie sans modifier la température. Par conséquent, la chaleur qui peut changer d'état sans changer la température est appelée chaleur latente. Par exemple, lorsque vous ajoutez la chaleur nécessaire pour convertir l'eau liquide en vapeur, il s'agit de chaleur latente car l'eau reste à 100 °C.

Pendant ce processus de conversion. Le stockage par la chaleur latente se caractérise par l'utilisation de l'énergie emmagasinée ou restituée. Le déroulement du processus thermique lorsqu'un corps solide reçoit de la chaleur, la chaleur sensible augmente alors sa température jusqu'au point de fusion. Au fur et à mesure que le processus de chauffage continue, le solide se transforme en liquide à travers la chaleur latente de fusion où la température de fusion est relativement constante. En effet, l'évolution continue de la chaleur sensible dans la phase liquide, jusqu'au point l'ébullition, permet au liquide de passer à l'état de vapeur à travers la chaleur latente de vaporisation jusqu'à ce que le processus de changement de phase soit terminé.

Tout chauffage supplémentaire pour surchauffer la vapeur agit sous la forme de chaleur sensible. Ce processus est illustré par les Figures 1.4 et 1.5

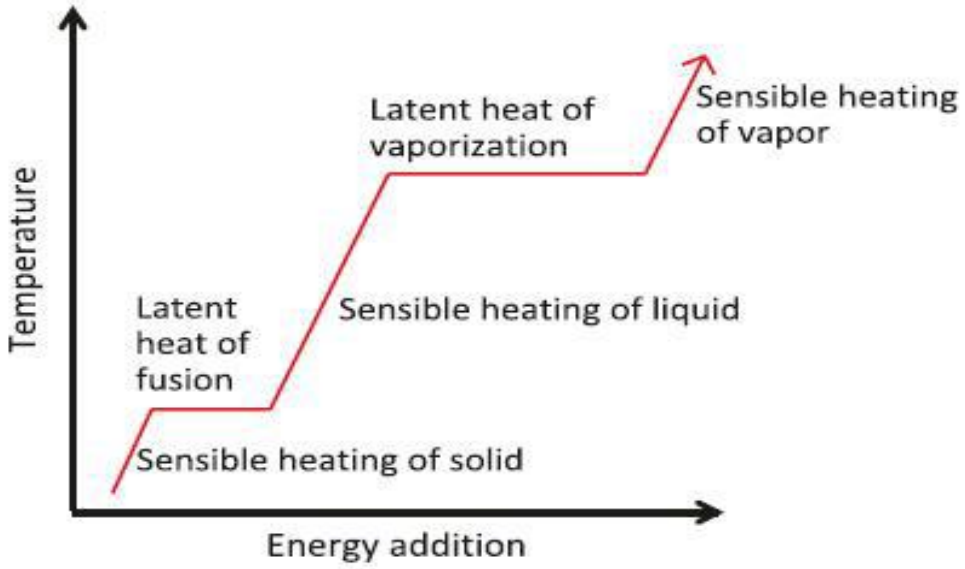


Figure 1.4 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état

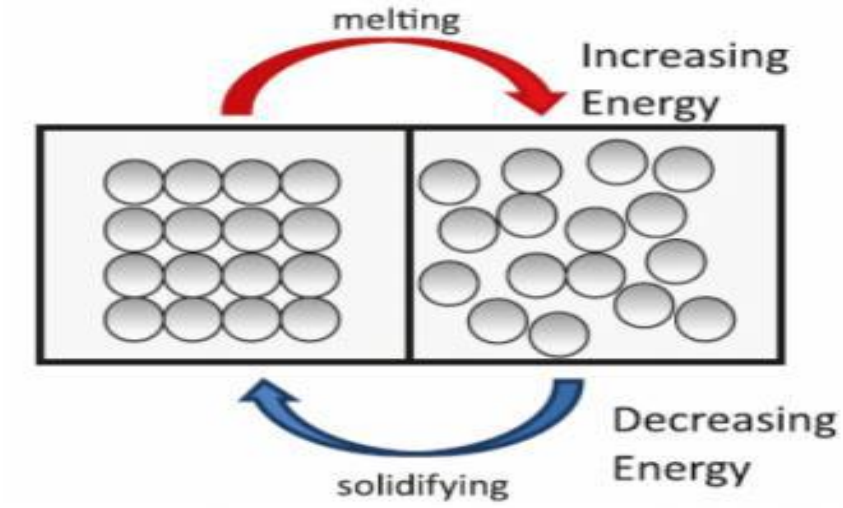


Figure 1.5 : Processus de solidification et fusion (Fleischer, A.S., Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials)

Cependant, le stockage par chaleur latente offre plus d'avantages thermique qu'économique, tels que l'isotherme ou faible plage de température de fonctionnement, une grande capacité de stockage par unité de masse ou de volume et un meilleur contrôle thermique des systèmes.

L'utilisation des MCP pour la gestion thermique transitoire a l'avantage de maintenir une température constante du système tout au long du processus de fusion indépendamment de la chaleur appliquée. Les MCP sont légers, portables et hautement fiables, ne dépendant que des caractéristiques du matériau et ne dépendent pas nécessairement d'une source d'écoulement externe telle qu'un ventilateur ou une pompe pour assurer le processus de stockage et/ou décharge. Le stockage par chaleur latente a une densité d'énergie beaucoup plus élevée que le stockage par chaleur sensible. De plus, l'avantage de la suppression des fluctuations de température dans le processus permet aux concepteurs de réaliser des applications parfaitement adaptées à différentes disciplines.

1.4. Matériaux à changement de phase

Aujourd'hui, le problème actuel dans le domaine de la construction est d'assurer un bon confort thermique en optimisant la montée et la descente de température dans la pièce du fait de l'augmentation de l'inertie thermique. Dans les bâtiments aux structures légères. L'une des méthodes proposées consiste à utiliser des matériaux capables de stocker et de libérer une grande quantité de chaleur dans la plage de température ambiante. Ces matériaux, de plus en plus utilisés dans les bâtiments, sont appelés « matériaux à changement de phase » ou MCP. Ils peuvent stocker et libérer de grandes quantités de chaleur grâce à la chaleur latente

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont été utilisés pour le stockage thermique dans les bâtiments avant 1980. Des MCP sont mis en œuvre dans les plaques de plâtre, le béton ou autre matériau de revêtement mural. Ainsi le stockage thermique peut faire partie de la structure du bâtiment même pour les bâtiments légers. Des tests, selon la littérature, ont été effectués sur des prototypes de panneaux muraux MCP et des systèmes de béton MCP où la capacité de stockage d'énergie thermique (TES) a été améliorée.

1.4.1 Description :

Les matériaux à changement de phase sont utilisés pour stocker la chaleur grâce à la chaleur latente. Lorsque la température ambiante atteint leur point de fusion, ces matériaux se liquéfient et absorbent l'énergie par chaleur latente. Une fois que la température baisse, les MCP se cristallisent, libérant leur énergie stockée. Ainsi, leur utilisation améliore le confort thermique des bâtiments en réduisant la consommation de chaleur en hiver et les besoins en climatisation en été.

Plusieurs travaux de recherches, se sont intéressés à l'étude de ces matériaux ainsi que leur stabilité dans la matrice cimentaire et en particulier l'effet d'incorporation des MCP sur les propriétés thermiques et mécaniques du béton-MCP [11] [8] [12].

Les matériaux à changement de phase assurent le stockage de l'énergie selon la méthode LHS. Dans ce cas, un matériau à changement de phase absorbe l'énergie thermique de son environnement pour changer d'état, et dans le processus inverse, l'énergie stockée est libérée dans l'environnement. Les MCP se comportent initialement de la même manière que les autres matériaux conventionnels lorsque la température augmente, mais l'énergie est absorbée lorsque le matériau reçoit de la chaleur à des températures plus élevées et proches de la transformation de phase. Contrairement aux matériaux conventionnels, dans les MCP, l'absorption ou la libération de l'énergie thermique se fait à une température constante. Un MCP absorbe et libère normalement de l'énergie thermique 5 à 14 fois plus que d'autres matériaux de stockage tels que l'eau ou la roche [13] [14]

Le choix des MCP dépend principalement de l'application attendue et des besoins des utilisateurs. Il faut ainsi définir les critères qui permettent de faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée [15]. Lors du choix du type de MCP à utiliser, la température de transition et la plage de fusion sont encore des critères importants. La plage de fusion peut être déterminée en fonction de l'application souhaitée (construction, énergie nucléaire, transport, alimentation, textile, etc.). En revanche, ces matériaux doivent présenter une chaleur latente de fusion élevée.

La température de fusion d'un grand nombre de matériaux à changement de phase se situe dans la plage de températures (0 ° - 120 °C). Cependant, ils ne peuvent être utilisé comme matériaux de stockage que lorsque certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques sont définies à partir d'un certain nombre de critères. [16]

- **Critères thermodynamiques :**

  Les matériaux à changement de phase doivent avoir :

  - Une température de fusion dans la gamme de la température souhaitée ;
  - Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur) ;

- Chaleur spécifique élevée, de sorte que le matériau peut avoir une chaleur sensible ;

– Une fusion appropriée ;

– Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.**[17]**

- **Critères Chimiques :**

Le matériau à changement de phase ne devrait avoir pratiquement pas de surfusion. Le matériau fondu doit cristalliser à la température de solidification indiquée par le tableau thermodynamique. **[17]**

- **Critères économiques :**

Le matériau à changement de phase doit être :

- Disponible en grande quantité
- Bon marché **[17]**

Différents types de changement de phase :

Les MCP peuvent subir trois types de changement de phase :

Solide-solide (peu utilisé pour le stockage d'énergie), ce changement de phase se traduit par une transformation structurelle liée à une variation du volume molaire donc à une variation des distances inter atomiques du matériau,

Liquide-gaz (chaleur à conversion élevée, mais un changement de volume s'ensuit, il est donc rarement utilisé),

Liquide-solide (Petite taille, petite plage de température, grande capacité de stockage, donc le plus couramment utilisé)

Solide-gaz (généralement développé dans le cas des systèmes d'air conditionné et de réfrigération).**[18]**

Le tableau 1.2 résume les avantages et les inconvénients des différents changements de phases :

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des différents changements d'état **[17]**

Changement de phase	Avantage	Inconvénients
Liquide /Gaz	Grande valeur de la chaleur latente	Grand changement de volume
Solide/Solide	Faible changement de volume Pas de formation de fluide	Faible valeur de la chaleur latente
Solide/Liquide	Faible changement de volume	Faible valeur de la chaleur latente
Solide/Gaz	Grande valeur de la chaleur latente	Grand changement de volume

1.4.2. Classification des matériaux à changement de phase :

Les MCP sont classés en trois grandes familles selon leur nature chimique à savoir les MCP organiques (paraffines, corps non-paraffinées, Polyalcools), inorganiques (hydrates salins, sels, métaux, alliages) et eutectiques (corps inorganiques et/ou organiques) [19]

Dans notre travail on s'intéresse particulièrement aux MCP organiques adaptés à la problématique des bâtiments. Ces matériaux sont chimiquement stables, faciles à utiliser et s'échangent lors des changements de phase en raison de leur chaleur latente élevée, contribuant ainsi au renforcement thermique de la structure.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.4.2.1 MCP organiques à base de paraffine :

Les paraffines de type C_nH_{n+2} sont un groupe d'hydrocarbures saturés. Le nombre d'atomes de carbone entre 5 et 15 de la chaîne sont à l'état liquide dans les conditions ambiantes et le reste ont des solides cireux. Les paraffines ont généralement une grande capacité de chaleur latente. Ils ont une longueur grande de la chaîne, les plages de fusion augmentent également, tandis que la capacité de chaleur latente de la fusion n'est soumise à aucun ordre particulier.

En général, les paraffines sont des substances sûres, fiables, peu coûteuses et non irritantes, relativement obtenues dans une large gamme de températures. En ce qui concerne les questions économiques, la plupart des paraffines de qualité technique peuvent être utilisées comme MCP dans les systèmes de stockage de la chaleur latente. D'un point de vue chimique, les paraffines sont inactives et stables. Elles présentent des changements de volume modérés (10 à 20 %) lors de la fusion, mais leur pression de vapeur est faible. Les MCP à base de paraffine ont généralement une grande stabilité pour les très longs cycles de cristallisation-fusion.

Outre leurs propriétés favorables, les paraffines présentent également des propriétés indésirables telles qu'une faible conductivité thermique, des températures de fusion basses et une inflammabilité modérée à élever. Certains de ces inconvénients, en particulier la conductivité thermique et l'inflammabilité, peuvent être partiellement éliminées à l'aide d'additifs ou de composites de paraffine.

Méthodes d'utilisation des MCP à base de paraffine :

Il existe plusieurs méthodes pour stabiliser les formes des MCP paraffiniques. Deux de ces méthodes principales sont examinées ci-dessous.

- **Encapsulation des MCP :**

L'encapsulation est généralement une technique valable pour protéger et prévenir les fuites de MCP à l'état liquide. Les capsules se composent de deux parties, l'enveloppe et le noyau. La partie centrale contient les MCP, tandis que la partie enveloppe est généralement composée de matériaux polymériques aux propriétés mécaniques et thermiques améliorées. La partie enveloppe joue un rôle de protection, de transfert de chaleur et parfois de prévention de la libération de matières toxiques dans l'environnement. Dans ces cas, l'enveloppe doit avoir une conductivité thermique appropriée. Les coques polymères sont également couramment utilisées pour l'encapsulation des MCPP. Le choix de la partie centrale dépend de son domaine d'application. L'encapsulation des MCPP est classée en deux grandes parties : la macro-encapsulation, la micro-encapsulation.

La macro-encapsulation est l'un des moyens les plus simples d'encapsuler les paraffines. Cette méthode a un coût inférieur à celui des autres méthodes. Ces produits sont utilisés dans les transports, les bâtiments, les systèmes de stockage de l'énergie solaire et les échangeurs de chaleur. Parfois, des métaux sont également utilisés comme matériaux d'enveloppe [20]. Afin

d'augmenter l'efficacité du transfert de chaleur dans ces types de capsules, il convient soit de choisir la taille des capsules de manière appropriée, soit d'utiliser des modificateurs appropriés. En général, plus le diamètre des capsules sphériques ou des cylindres est petit, plus le transfert de chaleur est important. Dans certains cas, des mousses métalliques sont utilisées pour améliorer les propriétés de transfert de chaleur de la paraffine. Les mousses d'aluminium et de cuivre à cellules ouvertes sont parmi les plus étudiées, tandis que dans d'autres cas, des oxydes métalliques, des métaux et du graphite sont utilisés [20], [21]. Il existe différentes formes de macro-encapsulation, telles que la forme sphérique, cylindrique, plate, tubulaire, etc. [21]. Les tubes cylindriques sont l'une des formes les plus connues de MCPP macro-encapsulés. Ce type d'encapsulation est le plus souvent utilisé dans les bâtiments ou dans les systèmes de stockage de l'énergie solaire.

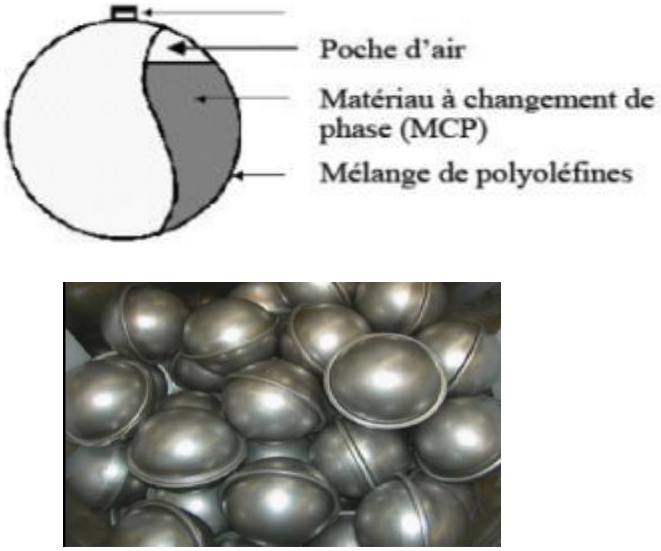


Figure 1. 2 : Exemple des MCP macro-encapsulés : conditionnement en nodule, en balle

La micro encapsulation de MCP est une autre méthode appropriée pour améliorer l'efficacité et augmenter la conductivité thermique. La taille des microcapsules varie généralement entre 1 µm et 1 mm. La micro-encapsulation des paraffines est un processus relativement difficile, mais il est plus performant que la macro-encapsulation. Cela est dû à la surface de contact accrue, à la réduction du temps de décharge et de charge et à une conductivité thermique améliorée. Différents matériaux sont utilisés pour la partie coque des microcapsules.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 1.3 : Exemple des MCP microencapsulés : à l'état poudre et à l'état liquide (BASF).

1.4.2.2. MCP à forme stable MCPP :

Ces dernières années, la recherche sur les MCP à matrice polymérique et à forme stable a pris une grande importance. Parmi ces types de matériaux à changement de phase, le composite paraffine-polymère est particulièrement intéressant. La combinaison de la paraffine et des polymères en tant que nouveaux MCP ayant une structure contrôlable unique peut être largement utilisée. Ce composé reste solide au point de fusion de la paraffine et même au-delà sans aucun ramollissement, c'est pourquoi ce type de MCP est appelé "shape-stable". Ces matériaux sont bien formés et ont une capacité d'absorption d'énergie élevée ; ils peuvent donc être largement utilisés comme MCP stables avec des propriétés spécifiques. D'autre part, certains problèmes tels que le coût élevé et la difficulté d'encapsuler les particules pourraient être résolus. Malgré ces avantages, certains inconvénients communs tels qu'une faible stabilité thermique, une faible conductivité thermique et une inflammabilité relativement élevée peuvent restreindre leur application, notamment dans les matériaux de construction. Pour cette raison, des études complémentaires sont nécessaires pour éliminer ces inconvénients et améliorer les propriétés de ces matériaux.

De nos jours, le MCP paraffinique (MCPP) est largement utilisé comme matériau de stockage d'énergie thermique, y compris le système de stockage d'énergie solaire, l'industrie alimentaire, le domaine médical, la protection des équipements électriques, les véhicules, la construction, l'industrie automobile, etc.

1.4.3 MCP dans les matériaux de construction : applications et réalisations

Le rôle primaire des bâtiments est de protéger les humains contre les variations extrêmes du climat. Une manière efficace pour réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment est de mettre en œuvre des systèmes solaires passifs ou actifs (figure 1.8). Dans ce qui suit, nous nous concentrerons sur les systèmes solaires passifs.

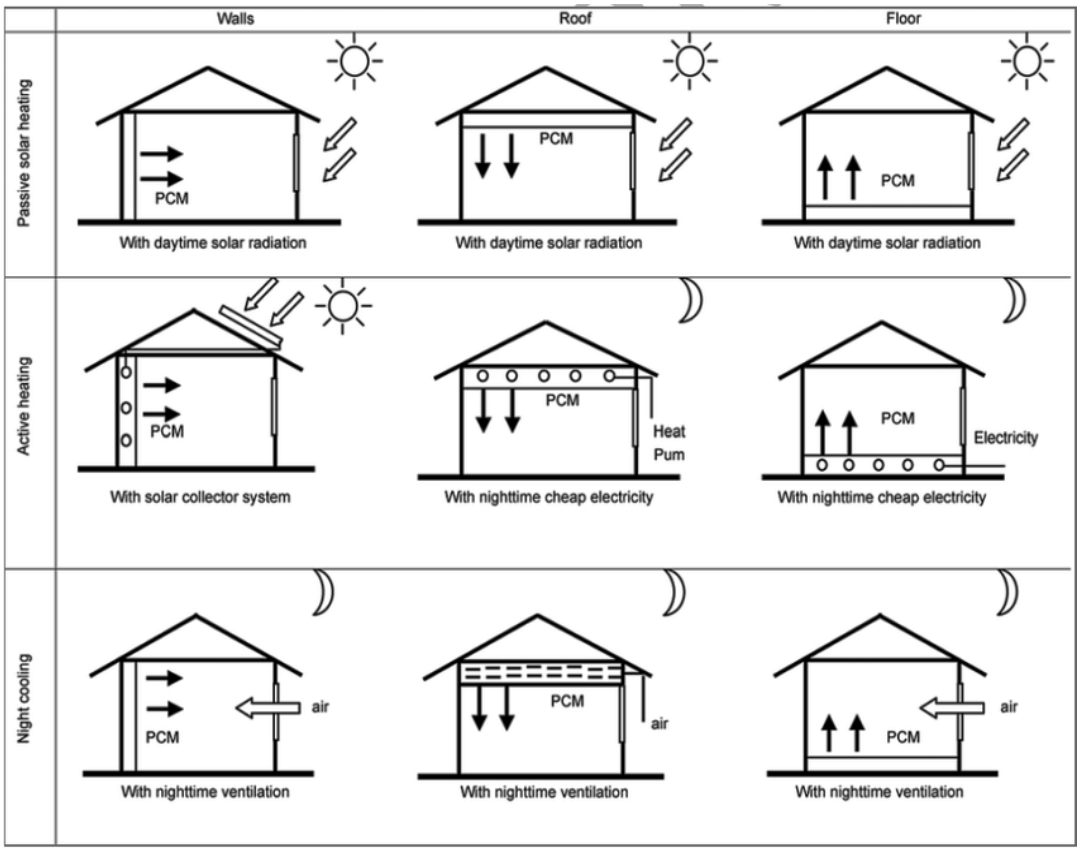


Figure 1.4 : Intégration de MCP dans l'habitat.

.

Il y a certaines limitations à l'intégration d'un système de chauffage solaire passif dans un bâtiment résidentiel classique. Le rayonnement solaire étant intermittent, variable et imprévisible, le concept de construction solaire passive implique généralement le besoin d'un grand nombre de structures pour stocker la chaleur [22]. Cette structure volumineuse limite la flexibilité dans la disposition et l'adaptation ultérieure du bâtiment [23]. En outre, parce que l'énergie est stockée en tant que chaleur sensible, la surchauffe se produit de temps en temps pendant des périodes de rayonnement solaire élevé. Cette surchauffe dégrade les conditions de confort. Le stockage de chaleur potentiel peut être utilisé pour réduire considérablement les

problèmes causés par les conceptions solaires passives traditionnelles. Dans les systèmes de stockage par chaleur latente, les MCP sont employés pour absorber (ou dégager) une quantité significative d'énergie thermique pendant le changement de phase solide - liquide tout en subissant de petites variations de température. L'avantage essentiel du système de stockage thermique utilisant les MCP est qu'il peut être sensiblement plus léger et moins volumineux pour une même quantité d'énergie stockée.

L'intégration du MCP dans le bâtiment peut se faire à travers des planchers chauffants, des plafonds, des fenêtres ou des murs [24].

- **Parois à MCP**

1) La nature du MCP : le matériau devra avoir une température de fusion/solidification inférieure et proche de celle du confort thermique (dans le cadre d'un mur solaire une température plus élevée est souhaitable), des conductivités thermiques et capacités calorifiques les plus grandes possibles, une chaleur latente de fusion élevée et un prix faible.
2) La répartition du MCP dans la paroi : Si on désire éviter la surchauffe de la surface extérieure des murs, on placera le MCP proche de la surface extérieure. Si vous souhaitez régler la température interne, placez le MCP près de la surface interne.
3) Les variations de températures de chaque côté du mur. Rappelons qu'il existe quatre méthodes économiques de conditionnement des MCP dans les matériaux du bâtiment.

- Une incorporation directe de MCP dans le mélange liquide des matériaux du bâtiment.
- Une incorporation indirecte par encapsulation.
- Mélangez le MCP directement dans la peinture (plastique ou caoutchouc).

1.5 Quelques réalisations de projet avec les MCP :

Les projets élaborés par BASF ont été effectués en utilisant également des Matériaux à Changement de Phase. Un exemple de ces projets est présenté sur la figure 1.9.

Figure 1.9 : Quelques réalisations de bâtiments par BASF en utilisant des MCP (BASF)

4500 mètres carrés de dalles de plafond et de murs secs dans le Lycée de Diekirch au Luxembourg (figure 1.10) sont modifiés avec des MCP de BASF. Cette technologie permet d'améliorer l'inertie thermique des bâtiments et de réduire la consommation d'énergie et stocker le surplus.

Figure 1.0 : Lycée de Diekirch au Luxembourg (BASF [25]).

Le palais de Tokyo à Paris présenté sur la figure 1.11 est un bâtiment construit en verre transparent. Ce bâtiment à faible inertie thermique a été réaménagé avec des panneaux Dupont Energain en 2009 pour augmenter son inertie thermique. Ces panneaux sont installés dans le faux plafond.

Figure 1.11 : Palais de Tokyo à Paris (Nomiya).

Exemple des MCP commerciaux :

Il existe plusieurs types de produit commercialisés parmi lesquels on cite les produits DUPONT et BASF. En effet, ces deux leaders de l'industrie chimique ont chacun commercialisé leur version des MCP dont ils sont les principaux fournisseurs en Europe. Le produit Dupont se présente sous la forme d'une plaque (figure 1.12) 1 m x 1,2 m et d'une épaisseur de 5,26 mm.

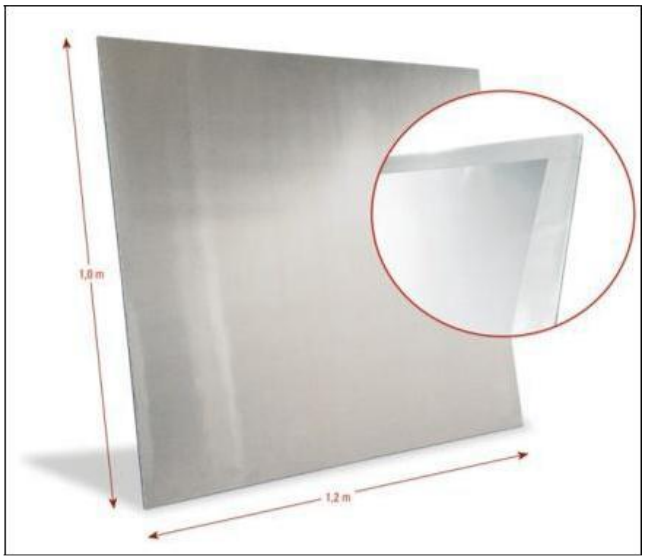


Figure 1.12 : Plaque Energain commercialisée par Dupont de Nemours (Dupont TM Energain [26]).

Ces panneaux sont constitués d'un mélange polymère (éthylène) / MCP à base de paraffine, enveloppé dans deux fines couches d'aluminium pour rendre le tout dur. Ces panneaux peuvent être facilement découpés à la taille souhaitée puis simplement collés, agrafés ou vissés au mur ou au plafond pour augmenter l'inertie thermique du mur dont ils sont composés.

Il existe plusieurs autres types de produits commercialisés. Le tableau 1.3 résume les produits autres que BASF et DUPONT.

Tableau 1. 3 : MCP commercialisés

MCP	Type de produit	T_{fusion} (°C)	Chaleur de fusion (Kj/Kg)
Astorstat HA17	Paraffine et cire	21,7 - 22,8	-
Rubitherm RT26 **Rubitherm RT27**	Paraffine	24-26 28	32 206
Climsel C23 **STL27** **TH29**	Sel hydraté	23 27 29	148 213 188

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une définition des matériaux à changement de phase et ainsi le stockage de l'énergie et des applications du MCP dans le secteur du bâtiment.

Nous avons entamé tout d'abord les aspects liés à l'économie de l'énergie et l'évolution de la consommation d'énergie à l'échelle mondiale, après nous sommes passé à l'efficacité énergétique et les méthodes suivies pour l'appliquer. Par la suite, nous avons présenté le stockage de l'énergie thermique et ses différents modes et nous avons terminé par la description des matériaux à changement de phase et particulièrement les MCP organiques à base de paraffine ainsi que leurs domaines d'application.

Références Bibliographiques du Chapitre 1

[1] APRUE, La situation énergétique régionale. 2015.

[2] **Sharma, Atul**. «Review on thermal energy storage with phase change material and Renewable and sustainable ». 2009. 13.

[3] **AHMAD, Maha**. « Couplage matériaux à changement de phase », supe isolation, apports.

[4] **ORTOLAS, Jacques**. « Efficacité énergétique passive », http://www.filiere/efficacite-energetiqueactive-et-passive, (Consulté le 22-11-2014)

[5] www.**MCI6TECH.com**. [En ligne]

[6] **D. Feldman, D. Banu, D. Hawes A. Athientis and C. Liu**. "Energy storage building materials with organic MCPs". Georgia: s.n., 1993. Vol. 2

[7] **L.F. Cabeza et H. Mehling**. "Heat and cold storage with PMC". Berlin: Heidelberg,2008

[8] **Abhat**. "Low temperature latent heat thermal energy storage". Heat storage matérials .1983. Vol. 30, 4

[9] **A. Akrouche** « Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase » Mémoire de Magister : Systèmes Energétiques Avancés, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, 2011

[10] **D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, A. Athienitis and C. Liu**. Energy storage building materials with organic PCM's. 28th Intersociety energy conversion engineering, Georgia: s.n., August8-13,1993. Vol. 2, 143-148.

[11] **L.F. Cabeza, G. Svensson, S. Hiebler et H. Mehling.** Thermal performance of sodium acetate trihydrate thickened with different materials as phase change energy storage material. 2003. Vol. 23, 1697-1704.

[12] **M.M. Farid et. al**, "A review on phase change energy storage". Materials and applications. 2004. Vol. 45, 1597-1615

[13] Bilan énergétique national. 2017

[14] **J.C. Petinelli**. « Produits paraffineux dans le domaine du stockage de l'énergie thermique, communication à Stockage d'Energie par Chaleur Latente. La baule, France : s.n., 12-13, juin 1980.

[15] **C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlison.** "Solar thermal energy storage in phase change materials". ASES Annual conf. USA: s.n., 1992.

[16] **A. Sharma, V.V. Tyagi, C. Chen et C.R. Buddhi**. "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications". Renewable and sustainable energy reviews. 2009. 13

[17] **K. Peippo, P. Kauranen and P. D. Lund.** "A multicomponent PCM wall optimized for solar heating". Energy and buildings. 1991. Vol. 17, 259-270.

rapport-gratuit.com

[18] **GmbH, RUBITHERM**. “Paraffin in thermal energy storage application”. s.l.: www.rubitherm.com

[19] **P. Meshgin, Y. Xi,** “Effect of Phase-Change Materials on Properties of Concrete”, ACI Materials Journal, vol.109, 2012, p.71-80.

[20] **K. Almadhoni,** “A review—An optimization of macro-encapsulated paraffin used in solar latent heat storage unit”. International Journal of Engineering Research and Technology. 2016;5(1):729-736

[21] **N. Calvet, X. Py, et al.,** “Enhanced performances of macro-encapsulated phase change materials (PCMs) by intensification of the internal effective thermal conductivity”. Energy. 2013; 55:956-964

[22] **S.M. Husnain**, “Part I: Heat Storage Material and Technique”, Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Energy Research, Vol. 39, pp. 1127-1138, 1998

[23] **B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza**, **H. Melhing,** “Heat Transfer Analysis and Applications”, Review on Thermal Energy Storage Technologies, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 251-283, 2003

[24] **D. Buddhi, R.L. Sawhney**, “Proceeding of Thermal Energy Storage and Energy Conversion”, School of Energy and Environmental Studies, Devi Ahilya University, Indore, India. 1994

[25] BASF, We create chemistry. [En ligne]. Disponible sur : http://www.basf.fr/ecp2/France/fr/ (page consultée 01 Janvier 2014).

[26] DupontTM Energain®, Energy saving thermal mass system, 2007.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Chapitre II :

Identification des propriétés thermo-physiques des MCP

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.1. INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, l'utilisation des matériaux intelligents appelés « matériaux à changement de phase » dans la construction de bâtiments a été une solution intéressante visant à réduire la consommation d'énergie et à fournir de meilleures conditions de confort thermique pour les usagers.

Bien qu'il existe de nombreuses recherches effectuées sur ce sujet, il convient de noter qu'il y a une grande dispersion concernant les propriétés efficaces des MCP. Ces incertitudes sont notamment dues à la variabilité de la conception du mélange des matériaux de base, du type et de la quantité de MCP, de la procédure de fabrication, des différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation thermique et mécanique de ces matériaux, etc. [1]. Afin de comprendre le comportement des matériaux à changement de phase et leur utilisation dans le secteur de la construction, il faut maîtriser les méthodes d'investigation pour éviter de mauvaises estimations de leurs performances et optimiser au maximum leur intégration.

Ce chapitre détaille la campagne d'essais qui doit être menée pour caractériser ces matériaux, à travers leurs propriétés morphologiques (taille, forme et granulométrie), physiques (masse volumique, absorption d'eau) et enfin thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique).

2.2 Matériaux

Les MCP utilisés sont des MCP organiques en poudre commercialisés par BASF. Les MCP organiques sont largement utilisés dans le secteur du bâtiment grâce aux nombreux avantages qu'ils présentent tels que leur compatibilité avec les matériaux de construction, leur stabilité chimique, la diversification des propriétés thermiques (plages de fusions, enthalpies de transformations), leur disponibilité sur le marché de construction, etc. [2]

Les MCP étudiés sont constitués par une cire de paraffine microencapsulée dans une microbille en polymère. Ces matériaux sont caractérisés par une température de fusion de 25 °C et une enthalpie de transformation de 100 kJ/kg. Afin d'étudier la structure des MCP, des observations morphologiques doivent être effectuées par microscope électronique à balayage montrant que les MCP ont une forme sphérique (Figure 2.1) de diamètre variant entre 100 et 300 µm qui se présentent sous forme d'agglomérats de plusieurs milliers de microcapsules de

5 µm de taille moyenne. Les observations microscopiques ont révélé également la présence de quelques capsules endommagées et des fragments du polymère contenant la paraffine.[4]

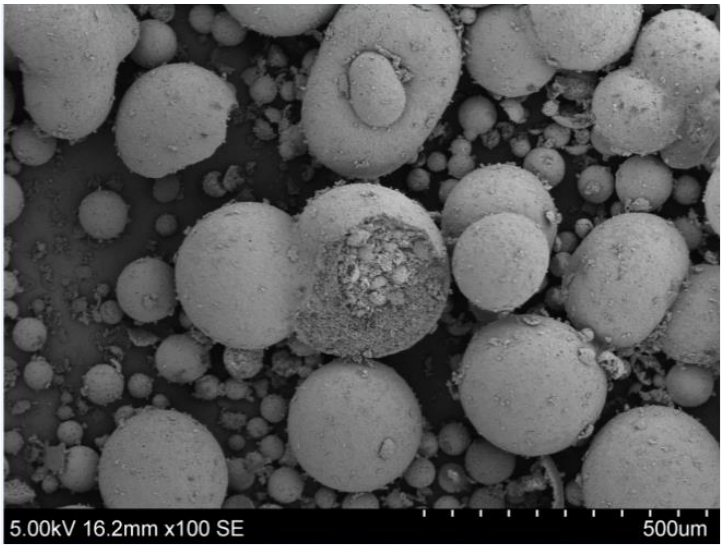


Figure 2.1 : Observations microscopiques des MCP utilisés dans cette étude.[4]

Afin de comprendre le comportement des matériaux à changement de phase et leur utilisation dans le secteur de la construction, il faut maîtriser les méthodes d'investigation pour éviter de mauvaises estimations de leurs performances et optimiser au maximum leur intégration. En tant que composant principal du MCP, la cire de paraffine est incompatible avec le béton, ce qui signifie nécessairement que ce composant doit être changé. Généralement, les changements sont davantage axés sur l'encapsulation de l'ingrédient actif. Après ce processus, la paraffine encapsulée est combinée en microcapsules, qui fusionnent pour former une grande capsule de plusieurs microcapsules.[5]

Ces points doivent être pris en compte quand on mélange MCP avec le béton :

- Ces matériaux sont considérés comme des poudres fines et peuvent être incorporés dans des matériaux à base de ciment ou matériaux cimentaires.
- Ces matériaux ne peuvent pas résister à des températures supérieures à 140 °C.
- Il est nécessaire d’augmenter la quantité d’eau ajoutée dans la matrice,

- Il est très important d'étudier la capacité d'absorption d'eau du MCP, en particulier lorsque le MCP est incorporé dans la matrice cimentaire, la quantité d'eau doit être bien contrôlée,
- Il faut tenir compte de la fragilité de ces matériaux dans la pratique, surtout quand ils sont incorporés dans le béton.

- Toute contrainte mécanique induite pendant le processus de malaxage peut les endommager, ce qui induit une fuite de la paraffine.

Remarque

Dans notre étude, on considère que les MCP restent stables et on néglige les fuites à travers la matrice.

2.3. Mesures physiques

Les caractéristiques physiques d'une poudre dépendent de plusieurs paramètres, par exemple :

- Sa taille.
- La forme des particules.
- La distribution granulométrique.
- La densité.
- La masse volumique.

2.3.1. Analyse granulométrique

La détermination de la taille des particules peut être effectuée de plusieurs manières. Le choix de la méthode dépend de la taille des particules. Mesurez les grosses particules (à partir de 63 mm diamètre) à la main et déterminez les petites particules (63 mm>D>63 microns) par tamisage. Si la plage des tailles devient plus petite, il faut envisager d'autres méthodes plus exigeantes techniquement, telles que la sédimentation et la diffraction laser.

- ✓ **Par Sédimentation :**

Cet essai convient aux particules passant à travers un tamis à trous carrés de 0,080 mm, mais les particules inférieures à 0,001 mm ne peuvent pas être distinguées par cet essai. Cet essai utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins à très fins est fonction de leurs dimensions. La granularité des particules est dans la plupart des cas

déterminée par sédimentation. Cependant, cette technique est délicate et difficile à mettre en œuvre. Les analyses classiques (tamisage et sédimentation) ne permettent pas l'élaboration de courbes de distribution granulométrique quand la quantité d'échantillon est faible. Par ailleurs, l'analyse par diffraction laser ne prend qu'une minute à la granulométrie contre 6 heures de sédimentation.

- ✓ **Par diffraction laser** :

La diffraction laser devient la technique de granulométrie standard dans de nombreux secteurs industriels, parce qu'elle est plus rapide, plus simple et offre une meilleure résolution que des techniques plus traditionnelles. Les particules traversent un faisceau laser fixe. Chaque particule diffracte la lumière selon un angle qui dépend de sa taille. La lumière diffractée est collectée par un détecteur multi-éléments [5].

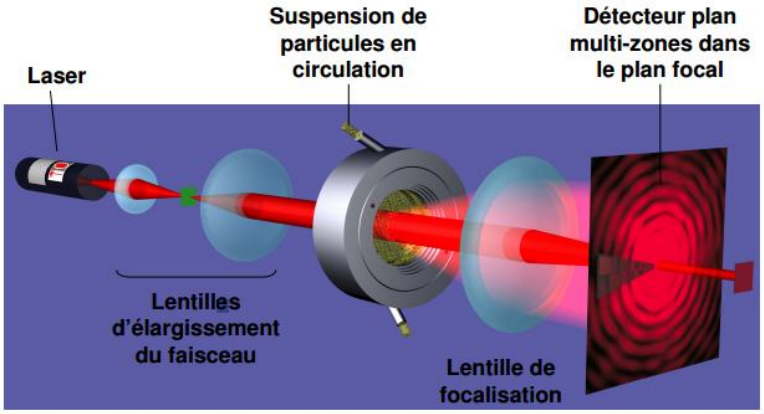


Figure 2.2 : Granulométrie Laser (Drissi, [5])

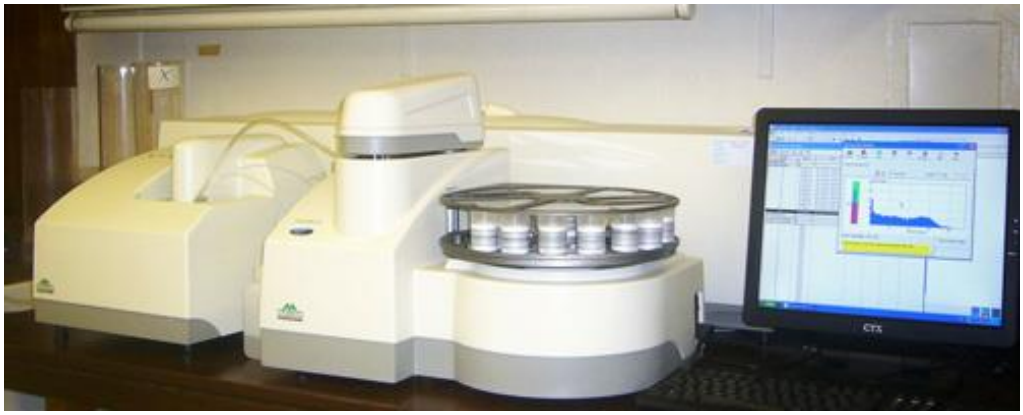


Figure 2.3 : Mastersizer 2000 (Malvern Panalytical, [7])

Figure 2.4 : Mastersizer 3000 (Malvern Panalytical, [8])

2.3.2. Observations microscopiques

La détermination de la morphologie des particules est effectuée par le microscope électronique à balayage (MEB). Le MEB utilise des faisceaux d'électrons émis par un canon à électrons. La lentille électromagnétique concentre le faisceau d'électrons sur l'échantillon. L'échantillon est séché à l'étuve, puis métallisé, puis placé sur un support recouvert de ruban adhésif double face pour l'observation. En fait, la métallisation peut rendre l'échantillon à l'étude conducteur en utilisant une fine couche de métal.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.3.3. Mesure de la masse volumique absolue et apparente

La connaissance de la masse volumique absolue des MCP est un point clé reliant différentes propriétés thermo-physiques entre elles, telles que la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité.

La masse volumique absolue $\rho_{MCP-absolue}$: c'est la masse par unité de volume du matériau constituant le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

Plusieurs techniques sont utilisées pour la détermination de la masse volumique absolue. Puisque dans notre béton on incorpore un MCP sous forme de poudre donc on va parler de la méthode du pycnomètre parce qu'elle est précise et simple.

Après la détermination de la masse sèche du pycnomètre (A), la masse du pycnomètre rempli du solvant jusqu'au repère (B), nous déterminons la masse (C) de ce dernier rempli d'une masse (mMCP) des MCP et de la masse du solvant complémentaire jusqu'au repère, en prenant soin de ne laisser aucune bulle d'air à l'intérieur du pycnomètre pendant cet essai. Les mesures sont réalisées sur trois essais successifs en utilisant un solvant inerte (alcool éthylique 96 %).[5] Et la masse volumique absolue des MCP est calculée en fonction de l'équation (2.1) suivante :

$$\rho_{MCP-absolue} = \frac{m_{MCP}}{m_{MCP}+(B-A)-(C-A)}\rho_{solvant} \qquad (2.1)$$

Avec : $\rho_{solvant}$ = 800 kg/m^3

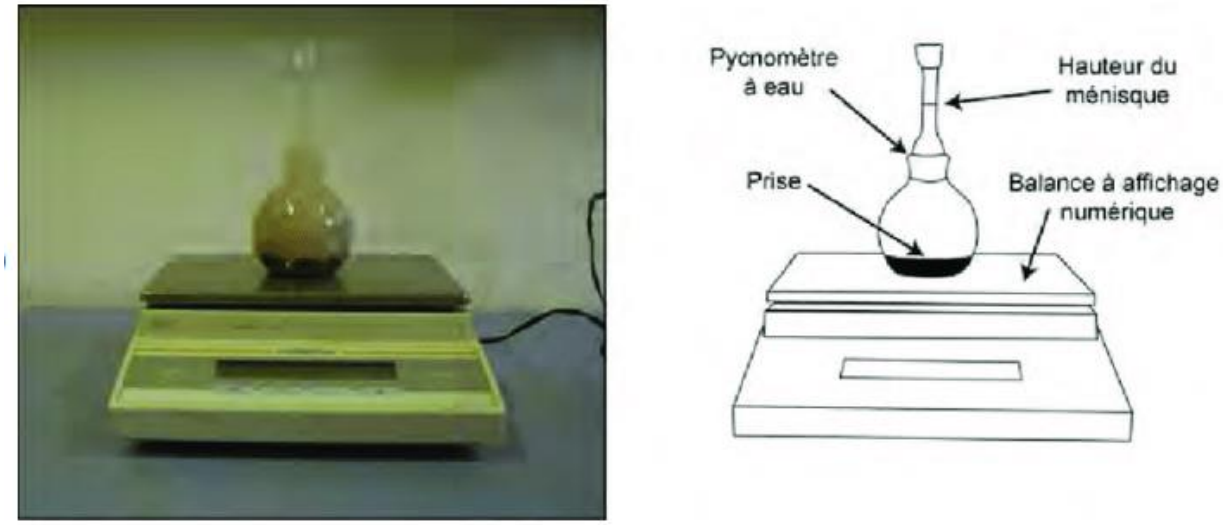


Figure 2.5 : Schéma du dispositif de mesure de la masse volumique

La masse volumique apparente d'un matériau $\rho_{MCP-apparente}$:

C'est la masse volumique d'un mètre cube du matériau. La masse volumique apparente des MCP est déterminée par le rapport de la masse des MCP au volume v du récipient qu'ils occupent (voir Eq. 2.2).

$$\rho_{MCP-apparente} = \frac{m_{MCP}}{V} \qquad (2.2)$$

2.3.4. Mesure de la teneur en eau

Les matériaux de construction à action capillaire très fine ou très rugueuse ne sont guère affectés par l'humidité. En effet, la teneur en eau est définie par la relation (2 .2) suivante :

$$W(\%) = \frac{mh-ms}{ms} \qquad (2.3)$$

Ms : la masse sèche

M*h* : la masse humide

Pour éviter le risque d'endommagement des MCP suite au processus de séchage, il faut alors supposer que la masse sèche des MCP est égale à la masse des MCP à l'état initial. Par la suite pour déterminer la masse humide des MCP après 24 heures d'immersion dans l'eau, il faut filtrer les MCP sous vide en utilisant le dispositif présenté dans la figure 2.6. Par conséquent, l'eau de gâchage des bétons-MCP sera ajustée en tenant en compte de l'eau qui sera absorbée par les MCP.[5]

Figure 2.6 : Appareil de filtration sous vide.

2.4. Mesures Thermiques

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour la mesure des performances thermiques des matériaux à changement de phase. On peut citer, à titre d'exemple,

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC),

L'analyse thermique différentielle (DTA),

La méthode T-history.

La calorimétrie différentielle à balayage est devenue une technique de référence pour la caractérisation thermique de produits soumis au changement de phase. Cette technique permet de déterminer les propriétés thermodynamiques d'un matériau à savoir, ses températures de fusion, de cristallisation et de transition vitreuse, sa chaleur spécifique et ses enthalpies de transformations.[10]

La technique consiste à placer deux capsules, une capsule témoin où l'on place l'échantillon étudié, et une capsule de référence laissée vide comme l'illustre la figure 2.7. Les deux récipients se trouvent dans un four qui chauffe à une vitesse choisie. Ainsi, Cette technique mesure la différence de flux de chaleur entre les deux capsules.

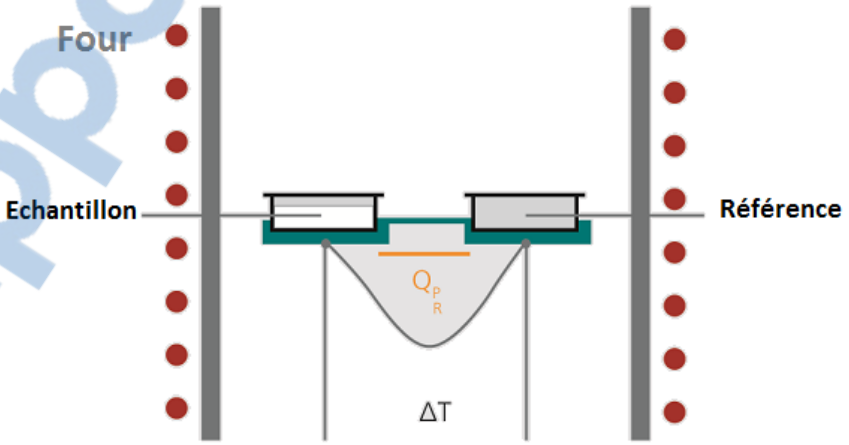


Figure 2.7 : Schéma descriptif de la DSC (Drissi, [5])

Rapport-Gratuit.com

2.4.1 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique *Cp* (ou capacité thermique massique) d'un corps est la quantité d'énergie à apporter pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse du corps. L'unité légale est donc (J/Kg.K). La mesure de la chaleur spécifique peut être effectuée par la technique de calorimétrie différentielle à balayage.

Figure 2.8 : DSC modèle 204 F1 Phoenix Netzsch pour mesure de *Cp*

2.4.2 Mesure de la conductivité thermique

La conductivité thermique (λ avec l'unité W/(m•K)) décrit le transport de l'énergie sous forme de chaleur à travers un échantillon soumis à un gradient de température (voir figure 2.9). Selon la deuxième loi de la thermodynamique, la chaleur se dirige toujours dans la direction de la température la plus faible.

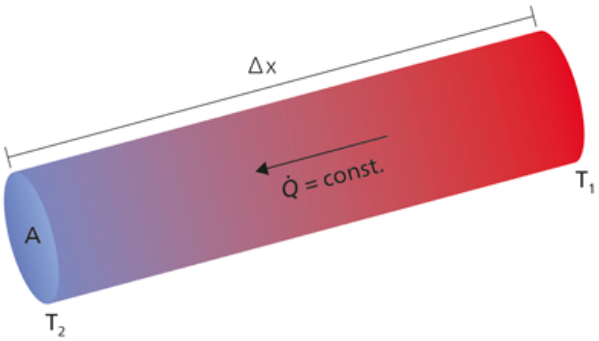


Figure 2.9 : Principe de la conductivité thermique

La figure 2.10 donne quelques valeurs de la conductivité thermique de différents matériaux.

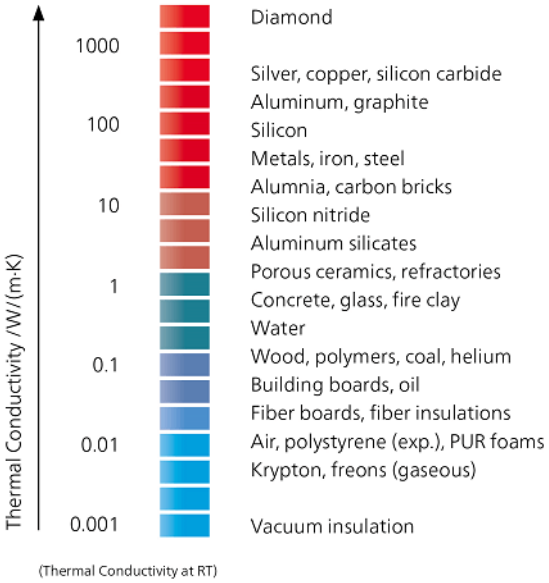


Figure 2.10 : La conductivité thermique de différents matériaux

.

La conductivité thermique du MCP est mesurée par la technique du Laser Flash en utilisant un appareil de mesure de diffusivité thermique MicroFlashTM, voir figure 2.11.

Figure 2.11 : Le LFA 457 MicroFlash® NETZSCH (NETZSCH, [12]).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

La conductivité thermique peut être obtenue par la relation suivante :

$$\lambda(T) = \rho(T) \cdot c_p(T) \cdot a(T)$$

Avec :

λ : la conductivité thermique de l'échantillon (W/m K)

Cp : la chaleur spécifique massique de l'échantillon (J/kg K)

ρ : la masse volumique de l'échantillon (kg/m^3)

α: la diffusivité thermique mesurée directement (m²/s)

La diffusivité thermique (*a* avec l'unité m^2/s) est une propriété spécifique des matériaux caractérisant la conduction de chaleur non constante. Cette valeur décrit comment un matériau réagit rapidement à un changement de température. Elle est calculée en fonction de l'épaisseur de l'échantillon (ep) en utilisant la formule (2.6) suivante [5] :

$$\alpha = 0{,}1388 \frac{e_p^2}{t_{0,5}} \qquad (2.6)$$

$t_{0,5}$ c'est le temps à mi-hauteur, il est calculé à partir du signal enregistré par le LFA présenté sur la figure 2.12.

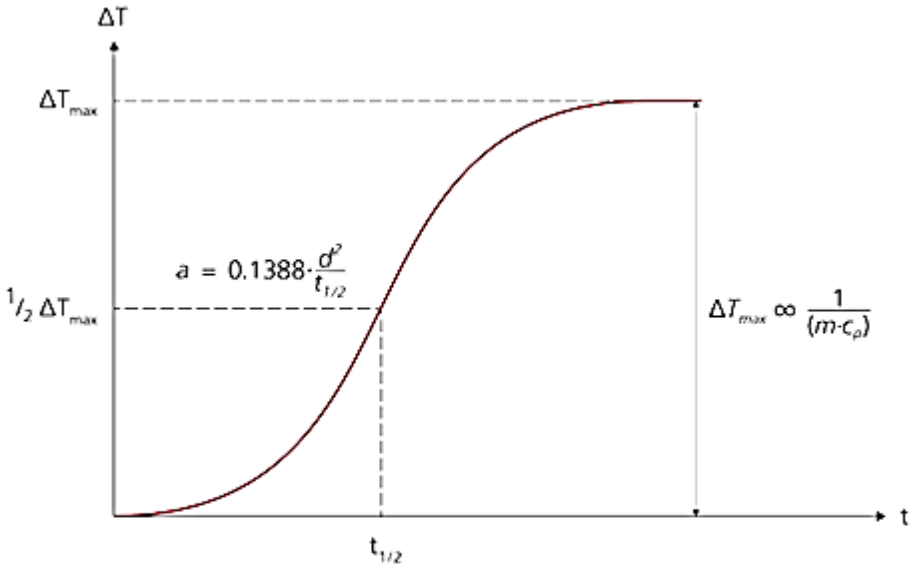


Figure 2.12 : Exemple de signal enregistré par LFA (NETZSCH, [12]).

2.5. Formulation du Béton-MCP

Dans ce paragraphe on va définir les étapes suivis pour formuler notre Béton-MCP.

La méthode utilisée pour formuler notre béton-MCP est de Dreux-Gorisse qui est simple et rapide et elle se base sur quatre critères sont :

- L'ouvrabilité ou la plasticité désirée est fixée par l'affaissement au cône d'Abrams.
- La résistance souhaitée à 28 jours R'28 (rupture en compression à 28j).
- La dimension maximale Dmax des granulats doit être fixée en premier lieu.
- La nature du ciment doit tenir compte de l'agressivité du milieu ambiant.

On considère que le Béton-MCP au cours de cette étude est composé de gravier (4/12), du sable (0/4) et du ciment CEM II/A-V 32.5R. Après avoir formulé avec la méthode de Dreux-Gorisse, on trouve les quantités des composants (Gravier, sable, ciment et l'eau).

Une fraction volumique des MCP est considérée : 3% par rapport au volume total du béton, ce qui équivaut à 9% par rapport à la masse totale de ciment.

2.6. Mesure de l'affaissement

L'affaissement décrit quantitativement l'affaissement libre du béton frais. La détermination de l'affaissement (h) est donnée par la norme SN EN 12350-2. La mesure nécessite le cône d'Abrams pour étudier l'effet de l'incorporation des MCP sur la maniabilité du mélange.

Figure 2.2 : Mesure de l'affaissement (Slump) selon la norme SN EN 12350-2

2.7. Résistance à la compression

Trois éprouvettes de béton sont fabriquées dans des moules cylindriques âgées de 28 jours. Ces éprouvettes sont conservées en atmosphère contrôlée à 20 °C et 50 % d'humidité relative (HR).

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture à l'aide d'une presse (modèle 3R-RP 3000 TCT) pilotée en incrément de charge. (Figure 2.14) [5]

Figure 2.14 : Une Presse (modèle 3R-RP 3000 TCT)

2.8. Propriétés thermiques des bétons-MCP

La conductivité thermique et la chaleur spécifique des bétons sont des propriétés caractérisant le transfert thermique des milieux. Il y a plusieurs méthodes ou des appareils qui mesurent ces dernières. Parmi ces méthodes :

- La technique du fil chaud,
- Plan chaud du conductivimètre FP2C de Néotime.

2.8.1 Méthode du fil chaud

On place le fil chauffant (sonde) entre les deux surfaces de l'échantillon du matériau à caractériser (Figure 2.15). Nous appliquons un pas de flux thermique constant au fil chauffant (si $t = t_0$ alors $\phi = \phi_0$), et faisons attention au changement de la température Ts (t) du fil chauffant. La modélisation de ce transfert thermique nous permet de calculer le changement de température au centre de l'échantillon. La méthode d'estimation des paramètres pour calculer les valeurs suivantes :

- La conductivité thermique λ.

- La capacitance thermique (mc)s de l'ensemble sonde + résistance chauffante,
- Résistance de contact Rc à l'interface sonde/échantillon.

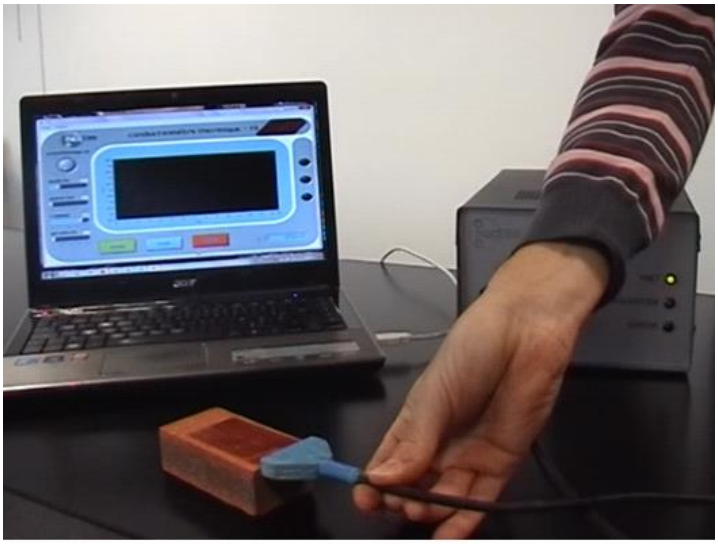


Figure 2.15 : Montage de fil chaud

Figure 2.16 : Vue d'une sonde de type fil chaud

2.8.2. Méthode du plan chaud

La méthode du plan chaud est faite pour mesurer l'effusivité thermique (e) d'un matériau. Pour mesurer cette dernière, on suit les mêmes étapes effectuées pour la mesure de la conductivité thermique en remplaçant la sonde « fil chaud » par une sonde « plan-chaud » (Figure 2.17)

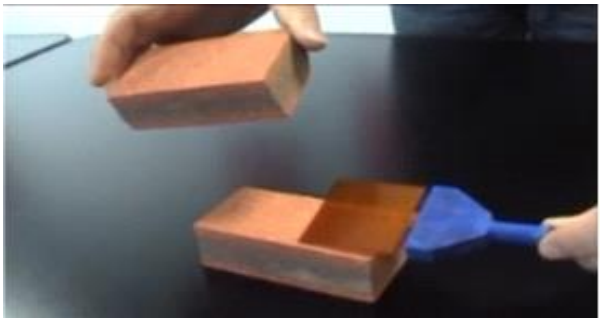


Figure 2.17 : Le montage du plan chaud

2.9. Conclusion

Plusieurs techniques de caractérisation sont présentées dans ce chapitre afin d'analyser les propriétés thermo physiques et la détermination de la morphologie des particules des MCP. Nous avons montré ensuite les essais normalisés utilisés au laboratoire pour mesurer : les masses volumiques absolue et apparente et la teneur en eau pour déterminer la quantité d'eau utilisée pour la formulation du béton. Par ailleurs, la technique de la DSC permet de déterminer les propriétés thermiques des MCP à l'état naturel.

Ces techniques et méthodes citées sont réalisées à la fois le MCP en poudre et pour les constituants minéraux du béton. Quant à la composition du béton, on utilise une formulation simple utilisant la méthode de Dreux-Gorisse. L'ouvrabilité du béton est déterminée par l'affaissement au cône d'Abrams et la résistance est déterminée à la rupture d'échantillons soumis à l'essai de compression après 28 jours de cure. On a terminé par les propriétés thermiques du béton MCP qui sont la conductivité thermique, la chaleur spécifique et l'effusivité.

Références Bibliographiques du Chapitre 2

[1] **A. Eddhaha, S. Drissi, J. Colin, J. Neji, S. Care,** "Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated phase change materials (PCMs)". Appl Therm Eng. 2013; 64 : 32–9.

[2] **HAWES D.W., BANU D., FELDMAN D.,** "The stability of phase change materials in concrete", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 27, 1992, p.103-118.

[3] Microtek laboratories inc. [En ligne]. Disponible sur : https://cdn2.hubspot.net/hubfs/4153344/Microtek%20Laboratories%20December2017/PDF/MPDS3300-0044%20Rev%201.pdf?t=1516975227818

[4] **A. Eddhaha, S. Drissi, J. Neji, S. Care,** « Etude de l'impact des Matériaux à Changement de Phase (MCP) sur l'hydratation des bétons-MCP ». Journées scientifiques Franco-maghrébines-CMC, Tunisie

[5] **Sarra Drissi**, « Développement de nouveaux bétons "accumulateurs d'énergie" : investigations expérimentale, probabiliste et numérique du comportement thermique ». Matériaux. Université Paris-Est, 2015. France.

[6] Analyses & Surface. [En ligne]. Disponible sur : https://www.analyses-surface.com/laboratoire-analyse-granulometrique-laser.html

[7] Malvern Panalytical, a Spectris company. [En ligne]. Disponible sur :

https://www.malvernpanalytical.com/es/about-us/press-releases/news/PR1951Mastersizer2000TrinityCollegeDublin

[8] Malvern Panalytical, a Spectris company. [En ligne]. Disponible sur: https://www.malvernpanalytical.com/fr/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000

[9] Futura-Sciences. [En ligne]. Disponible sur : https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-microscope-electronique-balayage-7783/

[10] **S. Drissi, A. Eddhahak, S. Caré, J. Neji**, "Thermal analysis by DSC of phase change materials, study of the damage effect". Journal of building engineering, 2015.

[11] **A. Eddhaha, S. Drissi, J. Colin, J. Neji, "**Analysis by differential scanning calorimetry of concrete modified with microencapsulated phase change materials". Renewable and Sustainable Energy Conference 2012.

[12] Netzsch LFA 457 MicroFlasch® pour la détermination de la diffusivité et de la conductivité thermique, Technologie de pointe pour les propriétés thermophysiques. [En ligne]. Consultée le 01 janvier 2015. Disponible sur : http://www.netzsch-thermalanalysis.com/fr/produits-solutions/diffusivite-conductivite-thermiques/lfa-457-microflash.html.

Chapitre III :

Modélisation numérique d’une paroi en Béton-MCP

3.1. Introduction

L'utilisation des matériaux à changement de phase dans le domaine du bâtiment est une solution intéressante contribuant au stockage et à la réduction de la consommation d'énergie ainsi qu'à l'amélioration du confort thermique. En raison de sa chaleur latente, les matériaux à changement de phase sont considérés comme des réservoirs d'énergie pouvant être intégrés dans la structure du bâtiment par leur incorporation dans les matériaux de construction inertes comme le béton. Cela vise à limiter le recours permanent aux systèmes énergivores de chauffage et de conditionnement.

Nous aborderons dans ce chapitre l'étude du comportement d'une paroi en Béton-MCP via une approche de modélisation numérique et nous mettrons en exergue ses avantages d'un point de vue thermique par rapport à une paroi classique.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

3.2. Méthodes de résolution du problème de transfert avec changement de phase

Il existe plusieurs méthodes de résolution numériques dans la littérature permettant de décrire et résoudre le problème de transfert thermique dans le bâtiment. Elles permettent d'approximer un système d'équation différentielle par un système d'équation algébrique. Nous pouvons citer, la méthode des différences finies, les éléments finis et les volumes finis, … [1] :

Méthode des différences finies (MDF) est largement utilisée pour résoudre des problèmes physiques. Elle permet une mise en œuvre simple pour une géométrie simple et basée sur l'approximation des dérivées intervenant dans les équations à l'aide de développements en série de Taylor. Cependant, cette méthode n'est pas toujours conservative.

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

Méthode des volumes finis (**MVF**) : est l'une des méthodes les plus robustes, développée au début des années 80 par Patankar [2]. Elle est basée sur l'intégration des équations de transport qui gouvernent les écoulements des fluides et les équations d'énergie qui gouvernent le transfert de chaleur. Cette méthode est distinguée par sa fiabilité aux résultats, son adaptation aux

problèmes physiques, sa possibilité de traiter des géométries complexes, sa garantie pour la conservation de masse, de quantité de mouvement et de tout produit scalaire transportable sur chaque volume de contrôle dans tout domaine de calcul.

Méthode Analytique : les solutions analytiques disponibles dans la littérature pour résoudre les problèmes de changement de phase ne répondent qu'aux cas les plus simples (géométrie simple, conditions aux limites constantes, propriétés thermiques constantes dans chaque phase, etc). Lorsque ces solutions deviennent inutilisables, dû à la complexité des problèmes réels, les solutions numériques viennent les remplacer.

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 **[3]** est donnée par :

$$\rho C_{eff}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+v\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad (3.\ 1)$$

<u>Avec</u> :

$$C_{eff}=\begin{cases} C_{ps} & pour\ \ T<T_f-\Delta T \\ C_p+\frac{L_s}{2\Delta T} & pour\ \ T_f-\Delta T\leq T\leq T_f+\Delta T \\ C_{p\ell} & pour\ \ T>T_f+\Delta T \end{cases} \quad (3.\ 2)$$

Où :

$Ceff$: 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.*

Cpl et *Cps* sont les capacités thermiques du liquide et du solide.

s : solide
ℓ **:** Liquide

L'intervalle *2.*ΔT vaut T_l - T_s

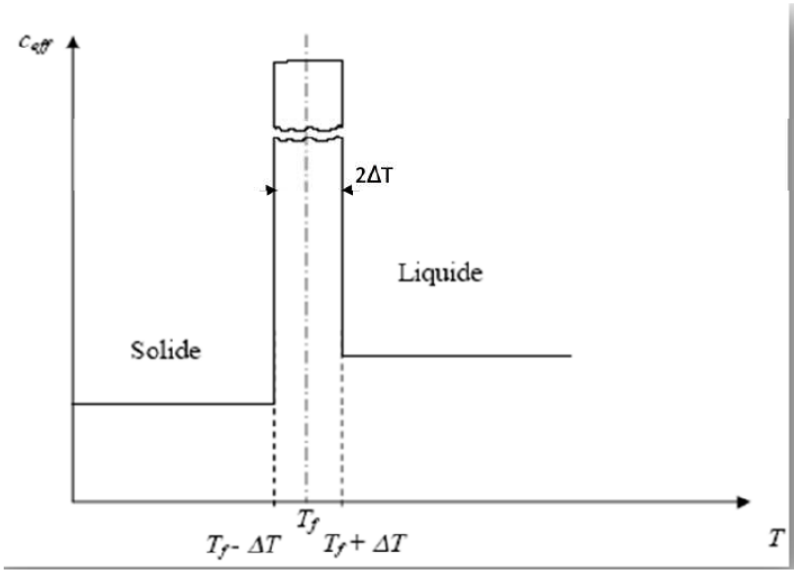


Figure 3.1 : Capacité thermique incluant l'effet de la chaleur latente dans un petit intervalle.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- **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 :

$$\rho\left(\frac{\partial H}{\partial t}+u\frac{\partial H}{\partial x}+v\frac{\partial H}{\partial y}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad \textbf{(3. 3)}$$

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 :

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

Après réarrangement on obtient :

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

3.3. Description du modèle numérique

La prise en compte des modes de transfert thermique (convection et/ou rayonnement) rend le problème de changement de phase plus complexe et très coûteux en termes de temps de calcul même pour des géométries simples. En effet, les équations à résoudre (conservation de la masse, conservation de la quantité de mouvement, conservation de l'énergie) sont non linéaires et

doivent être résolues simultanément dans les différentes phases du modèle. La solution proposée est de résoudre uniquement l'équation d'énergie en considérant des propriétés thermiques équivalentes afin de prendre en compte les effets de fusion et de solidification.[4]

L'analyse thermique de la paroi en Béton-MCP doit prendre en compte plusieurs facteurs tels que la nature et les caractéristiques thermo-physiques des MCP, la répartition et la distribution de ces matériaux dans le mur, la variation de la température de chaque côté de la paroi (conditions aux limites) et les échanges thermiques. 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.[4]

3.4. Géométrie, Maillage et outil de résolution

La modélisation des MCP est un sujet qui a été traité dans la littérature sous plusieurs angles, car l'étude du transfert thermique à travers une structure en béton incorporant des MCP est confronté à des problèmes de modélisation. Ces problèmes sont dus essentiellement au changement de phase qui se produit sur une plage de température et à la non linéarité des équations à résoudre.

3.4.1. Géométrie étudiée

Le modèle numérique considéré est présenté sur la figure 3.2 :

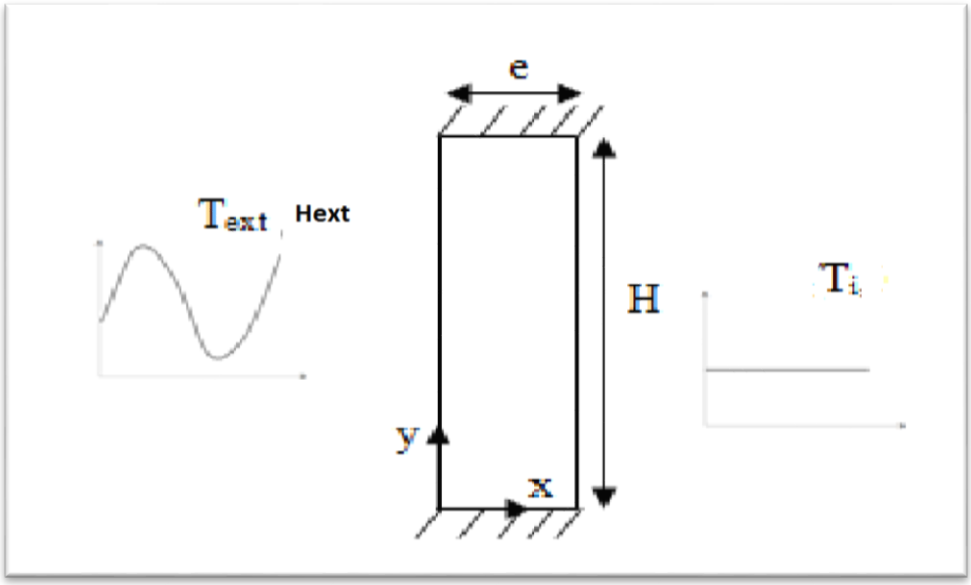


Figure 3.2 : Modèle géométrique avec conditions aux limites

.

3.4.2 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 :

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

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

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

- A l'intérieur, on impose une condition de transfert par conduction avec la température intérieure : T_i =15 °C

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

La température extérieure est constante : T_{ext} = 27 °C

Le coefficient d'échange convectif avec l'extérieur : h_e= 13 W/m²K.

Le flux solaire moyen imposé : q_{rad} = 700 W/m².

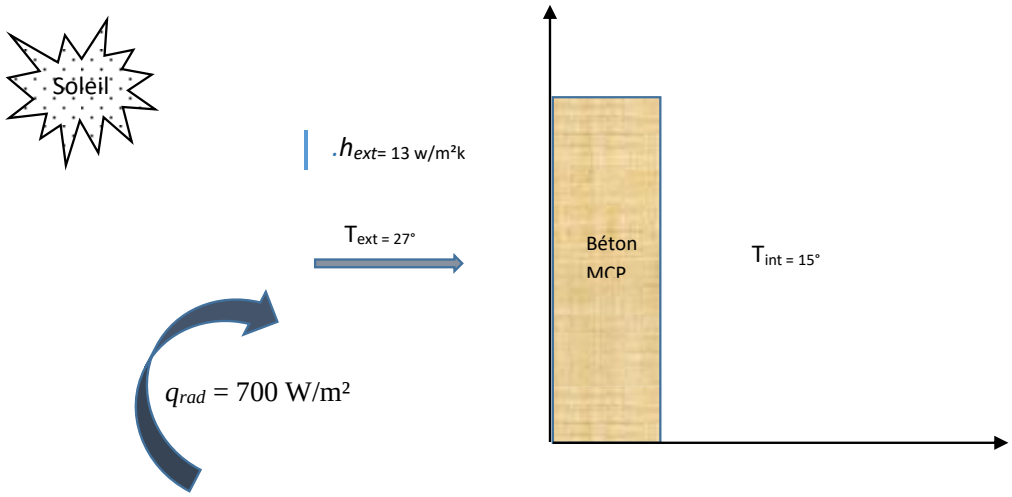


Figure 3.3 : Paroi Béton – MCP

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

Les propriétés thermo-physiques des deux matériaux utilisés sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Propriétés thermo-physiques des deux matériaux.

Matériaux	λ (W/mK)	$\boldsymbol{\rho}$ $(\boldsymbol{Kg/m^3})$	$\boldsymbol{c_p}$ $(\boldsymbol{J/KgK})$
Béton	1.5	2200	800
MCP	0.18	900	Figure 3.4

ρ : masse volumique [Kg/m^3] ;

Cp: Capacité calorifique spécifique [J/Kg.K] et

λ: Conductivité thermique [W/m.K]

La chaleur spécifique apparente présentée sur la figure 3.3 a été obtenue expérimentalement [5] par le conductimètre et a été ajustée de telle sorte que l'augmentation de *Cp* 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 :

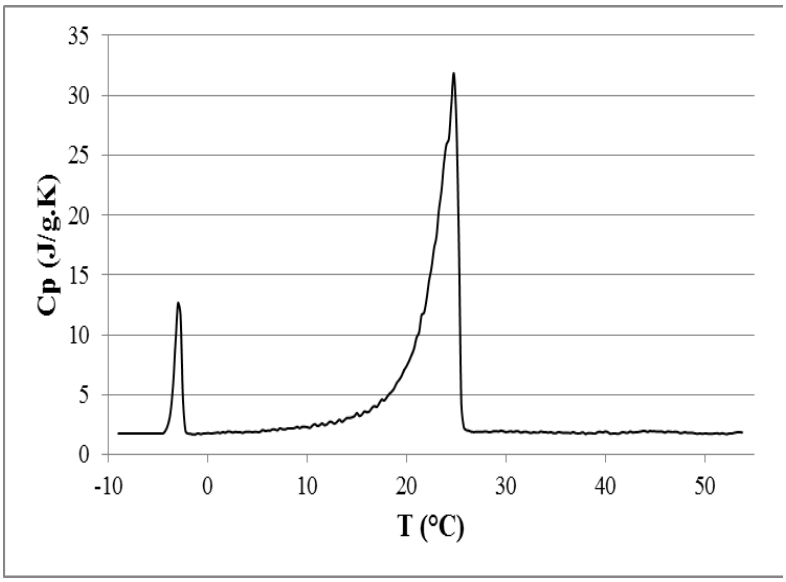


Figure 3.4 : Propriétés thermiques des MCP [5].

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 [6], 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.

3.4.3 Description de GAMBIT 2.4.6

GAMBIT 2.4.6 est un logiciel de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO). Il permet d'implémenter des formes géométriques 2D ou 3D et de construire des maillages.

Les options de génération de réseau de GAMBIT offrent une flexibilité dans la 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 défauts. Ces fenêtres d'outils sont utilisées pour créer, générer et vérifier le maillage du modèle étudié et fusionner les conditions aux limites.

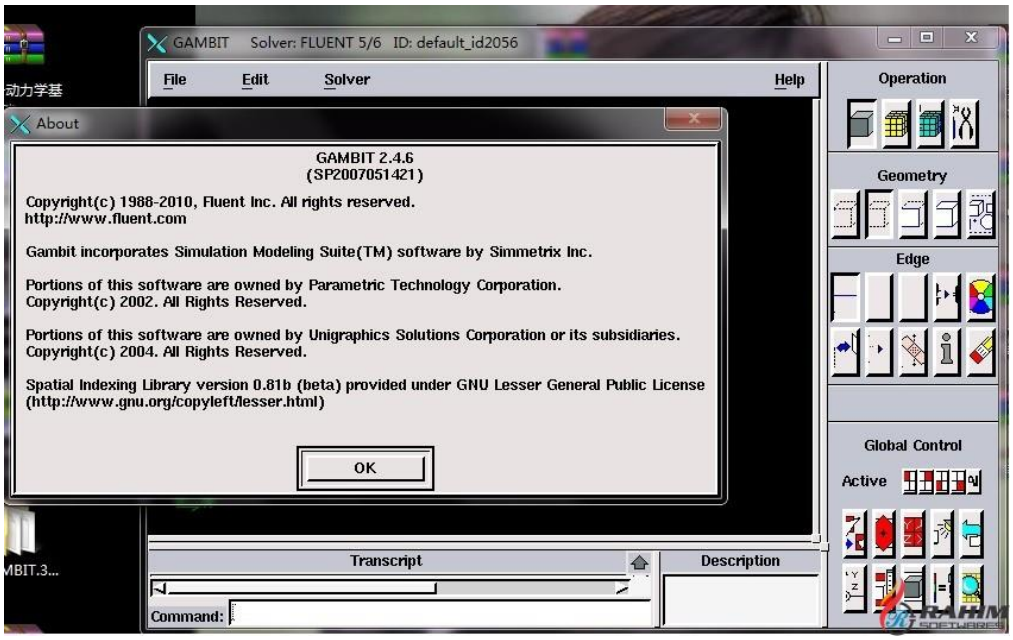


Figure 3.5 : Description Gambit 2.4.6.

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.

3.4.4. Génération du maillage par GAMBIT

La génération du maillage passe par les étapes suivantes :

A. Interface de Gambit :

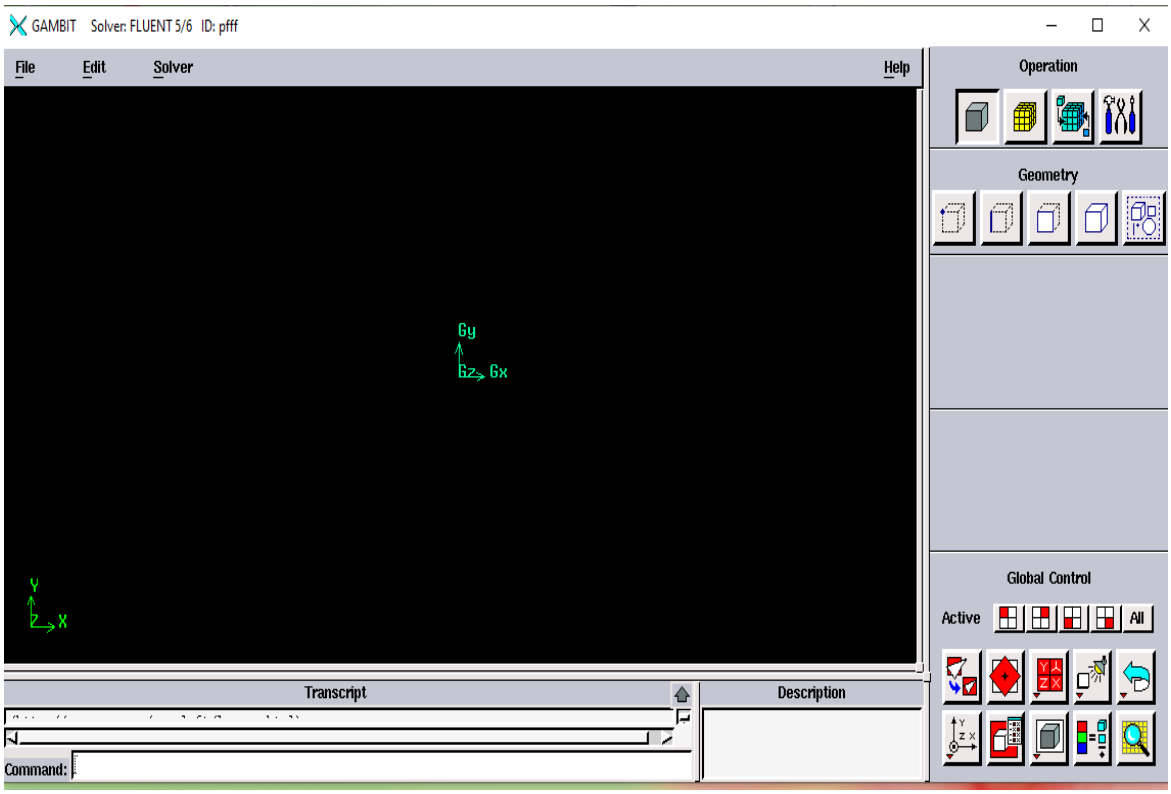


Figure 3.6 : Vue globale

.

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.

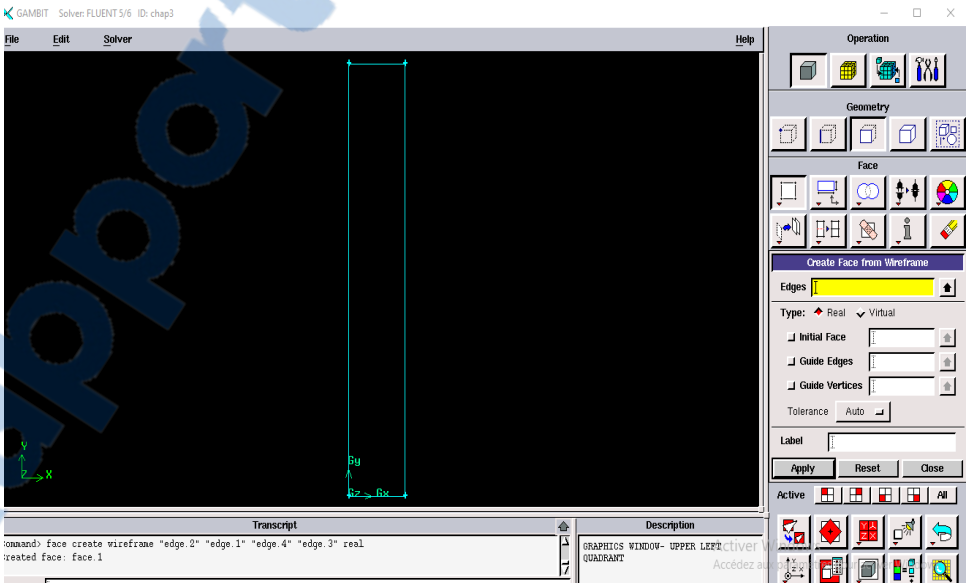


Figure 3.8 : Modélisation sous Gambit

.

D. Maillage du modèle.

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

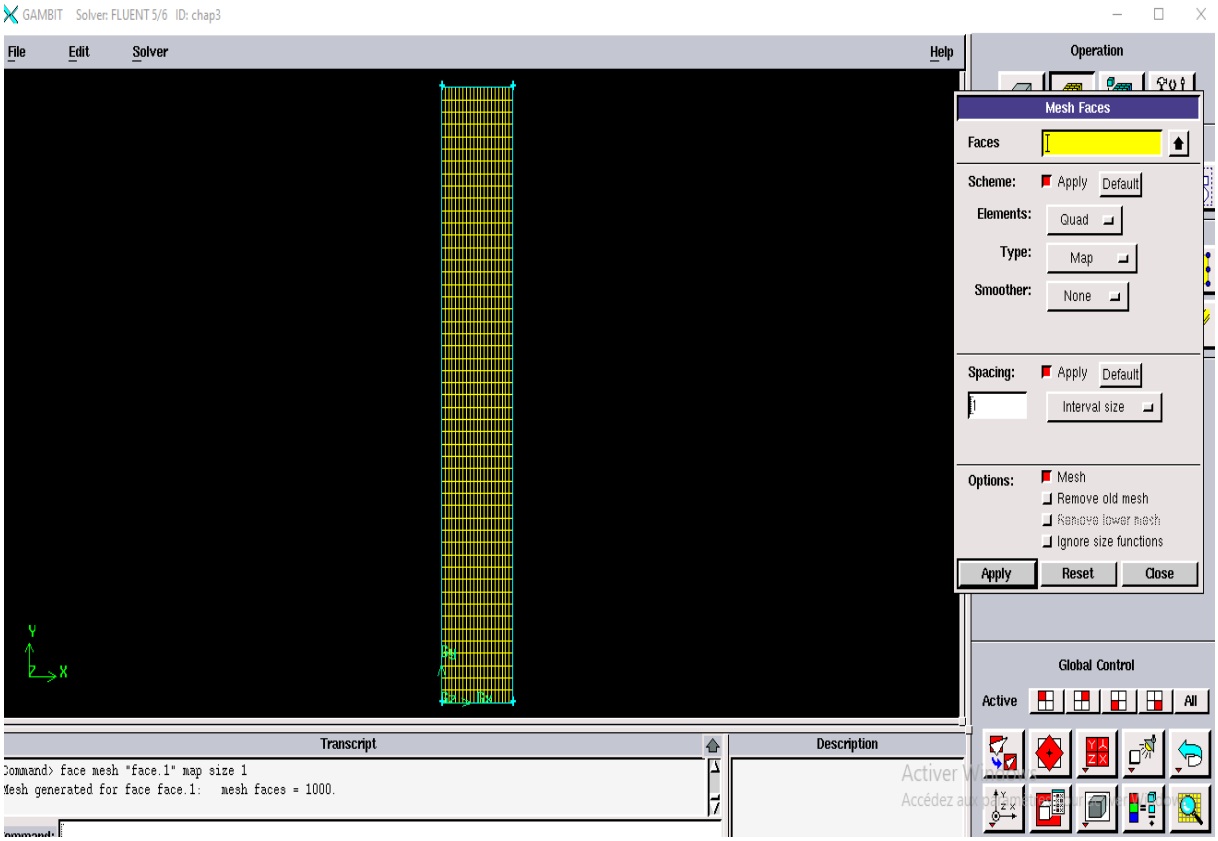


Figure 3.9 : Maillage du modèle étudié.

E. Les conditions aux limites numériques

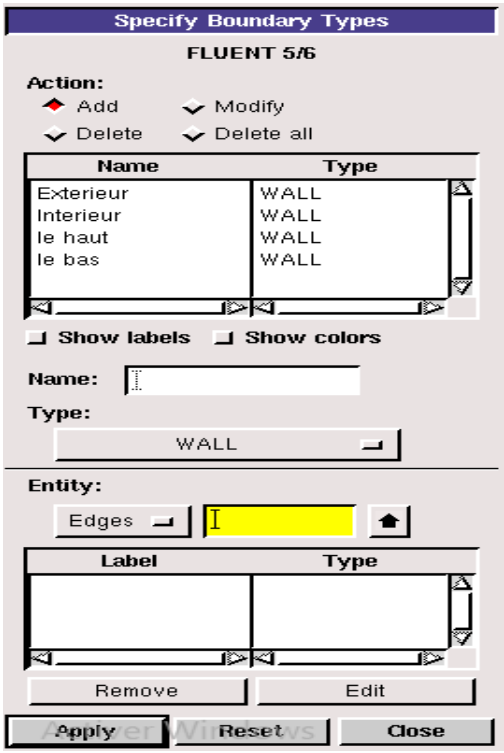


Figure 3.10 : Conditions aux limites numériques

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

File ⟶ export ⟶ msh

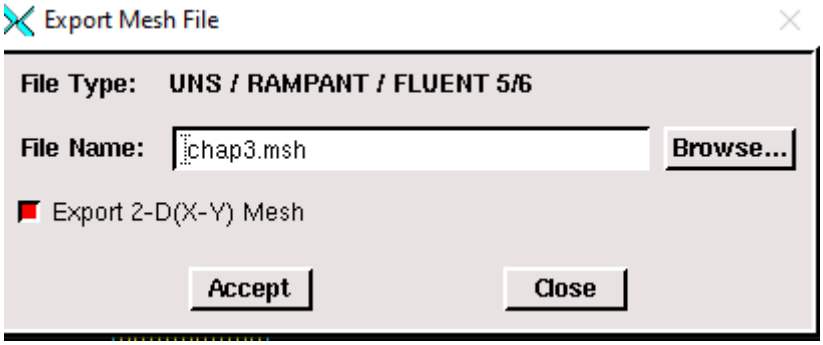


Figure 3.11 : Fenêtre d'exportation de maillage

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

3.4.5 Code Fluent :

Le code *Fluen*t est un logiciel de calculs numériques en dynamique des fluides *CFD* (Computational fluid dynamics) destiné à effectuer la simulation numérique des problèmes d'écoulements fluides. Le progiciel Fluent repose 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 :**

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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, figure (III.6). Puis d'ouvrir ou d'importer un maillage (fichier.msh), et ce en suivant la procédure suivante : File → Import→ case

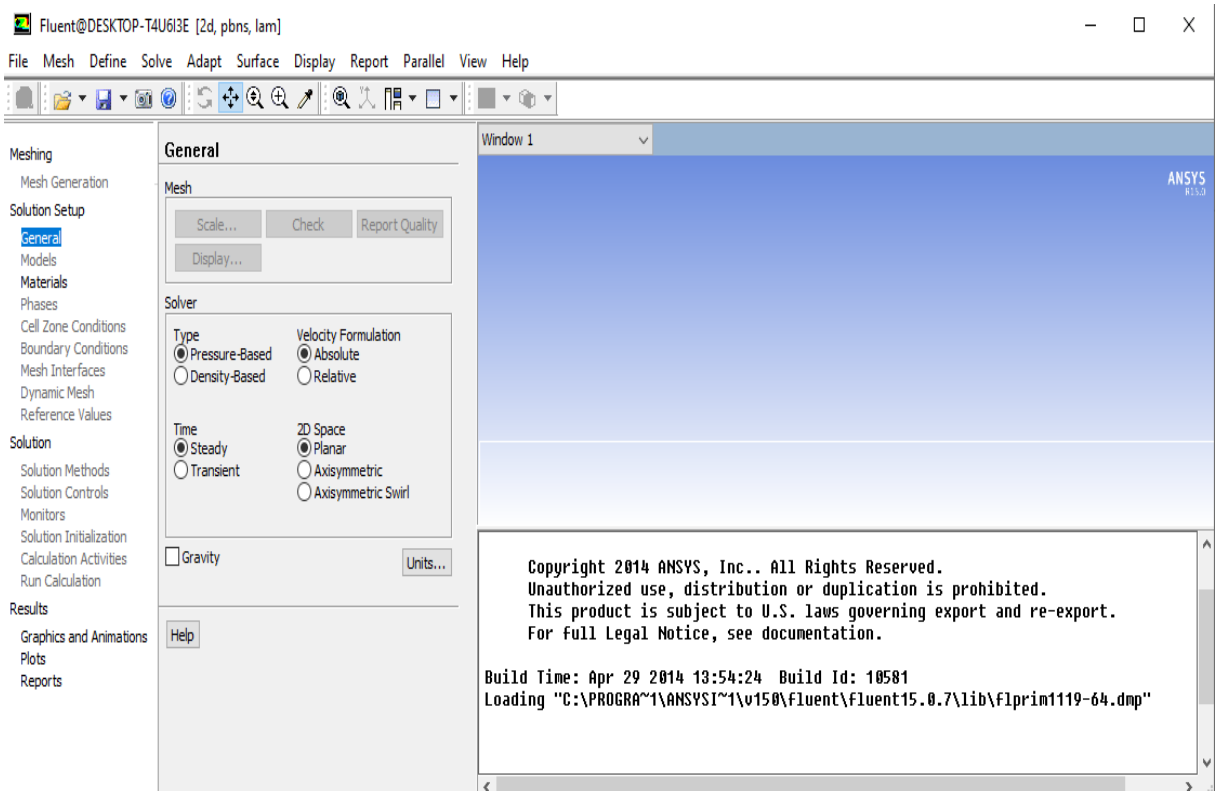


Figure 3.12 : Vue globale de Fluent.

➢ 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…

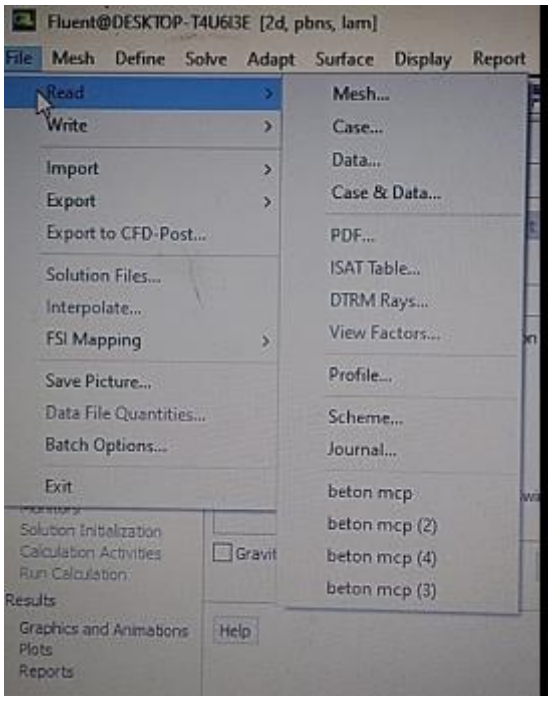


Figure 3.13 : Importation de la géométrie

➢ Lancement des calculs :

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

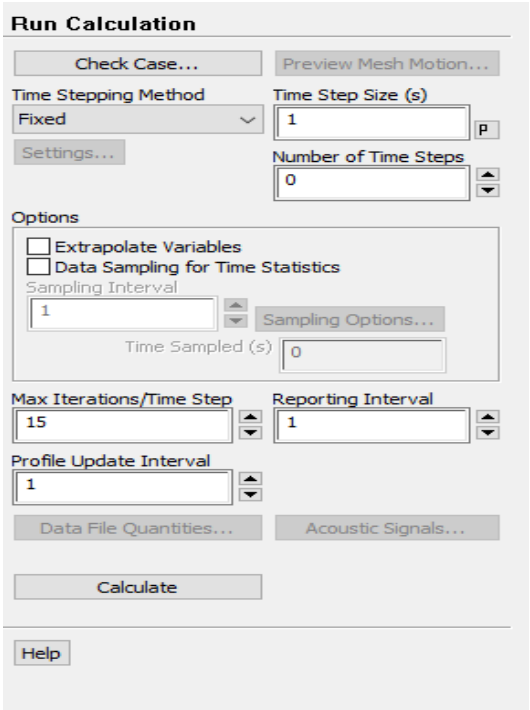


Figure 3.14 : Choix de pas de temps le nombre itérations

Residuals

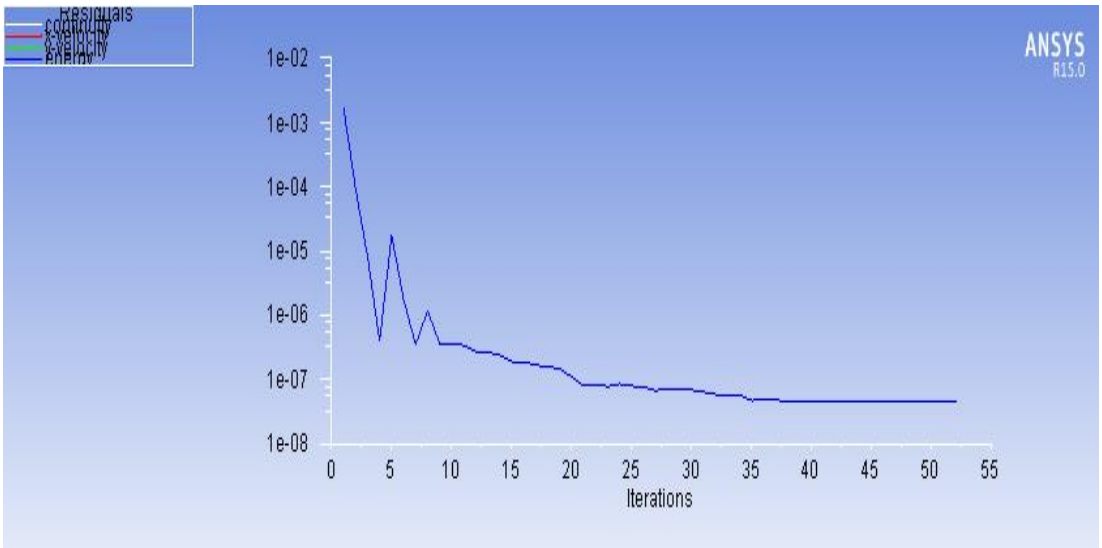


Figure 3.15 : Residuals

3.5. Simulation numérique de la paroi en béton-MCP

Les propriétés thermiques des murs en béton MCP ont été introduit dans le code *Fluent* 6.3.2 / 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 2*D*, 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.

3.6. 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.

Références Bibliographiques du Chapitre 3

[1 **A**. **Stoukov,** Introduction à la mécanique des fluides numérique : Méthode ''Volumes Finis''. Disponible sur: http://hmf.enseeiht.fr/coursenligne/stoukov/vf.pdf.

[2] **M. M. Farid, Y. Kim, et A**. **Kanzawa,** Thermal Performance of a Heat Storage Module using PCM's with Different ~Melting Temperatures: Experimenta. ASME J. Solar Energy Eng. (1990). Vol. 112, pp. 125- 132.

[3] **A. Sharma, V.V. Tyagi, C. Chen et C.R. Buddhi**. "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications". Renewable and sustainable energy reviews. 2009. 13

[4] **Y**. **Chataigner,** « Modélisation du transfert thermique dans un remblai sur pergélisol et élaborations de stratégies pour faire face aux changements climatique ». Mémoire pour l'obtention du grade maître en sciences, 2008. Université Laval Québec.

[5] **N. ESSID, S. DRISSI, A. EDHAHAK, J. NEJI, «** Etude expérimentale et numérique des Bétons à Changement de Phase (BCP) à l'échelle macro »

[6**] C. Comini, G. Nonino**, "Thermal analysis of floor heating panels". Numerical Heat Transfe. 1994. Vol. 25, pp. 537-3150.

Chapitre IV :

Résultats et Interprétation

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente la simulation numérique sur le stockage d'énergie solaire par chaleur latente avec un matériau à changement de phase MCP. La simulation numérique est exécutée à l'aide du code commercial Fluent 6.3.2.

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

4.2. Formulation mathématique du problème 2D

Dans cette section, nous allons définir le modèle mathématique qui est utilisé pour résoudre le type de problèmes que nous avons présenté précédemment,

a) Hypothèses simplificatrices

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Nous considérerons que :

- l'écoulement dans la phase liquide est laminaire, incompressible,
- instationnaire et newtonien
- Nous négligerons la dissipation visqueuse.
- Les propriétés physiques du matériau seront considérées constantes et identiques dans la phase solide.

b) Equations de conservation

En prenant en compte les hypothèses posées précédemment, nous pouvons écrire le système d'équation suivant :

c) Conservation de masse

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (4\text{-}9)$$

d) Equation de conservation de la quantité de mouvement suivant x

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \qquad (4\text{-}10)$$

e) Equation de conservation de la quantité de mouvement suivant y

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+\rho g\beta\left(T-T_0\right) \qquad (4\text{-}11)$$

f) Equation de conservation de l'énergie

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (4\text{-}12)$$

<u>Domaine solide on a</u> **:**

$$(\rho\rho_p)_i\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda_i\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad i=1,2,. \qquad (4\text{-}13)$$

<u>Domaine liquide on a</u> **:**

Le comportement du matériau à changement de phase MCP est basé sur la méthode de la capacité apparente C_{eff}:

$$\rho C_{eff}\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (4\text{-}14)$$

Nous avons décrit le modèle mathématique complet, nous allons passer à la présentation du modèle numérique complet (*CFD*) utilisé lors de la résolution des différents problèmes étudiés.

4.3. Problème physique étudié.

On propose l'analyse du cas simple d'une cellule test composée de parois de faible inertie thermique représentant une structure d'une maison. Cette structure est formée d'un mur de 15 cm en béton ordinaire et béton-MCP qui peut changer d'état avec un front de fusion ou de solidification, voir figure 4.1.

Rapport-Gratuit.com

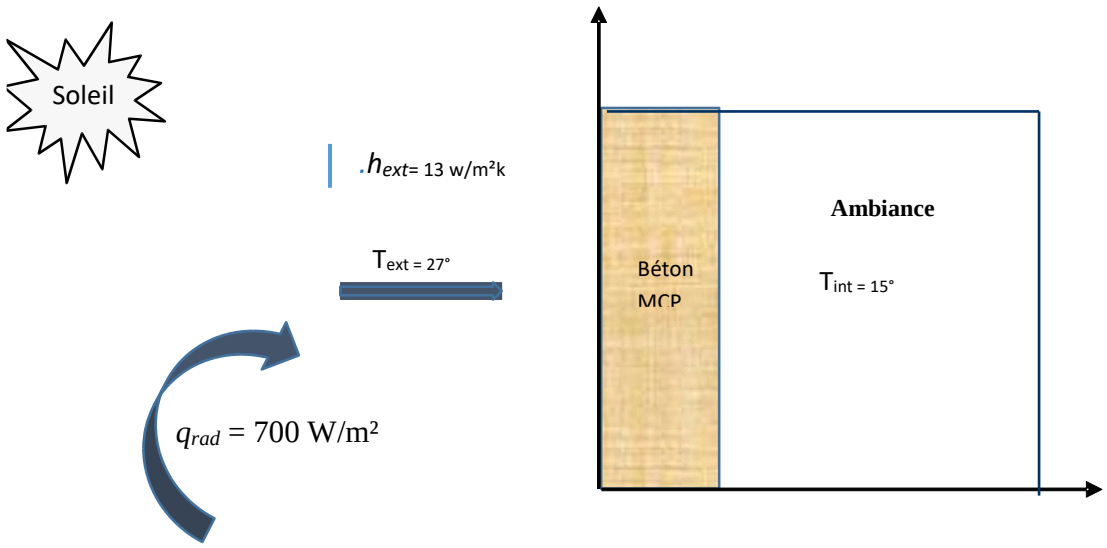


Figure 4.1 : Structure de la cellule test

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 :

$$T_{int} = 15\ °C$$

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

La température extérieure est constante : $T_{ext} = 27\ °C$

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

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

La grandeur qui nous intéresse principalement est la température au niveau de l'ambiance intérieure de la cellule test. Ce sont donc les variations de cette grandeur qui seront analysées.

La paroi présente une hauteur H = 3 m et une épaisseur e = 0.15 m avec des conditions imposées type mixte. Le béton-MCP 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 4.1.

Tableau 4.1 : Propriétés thermo-physiques des deux matériaux**.**

Matériaux	λ (W/mK)	ρ (kg/m^3)	*Cp* (J/Kg.K)
Béton-MCP	1.8	2300	Voir fig. 4.2
Béton ordinaire	1.5	2200	800

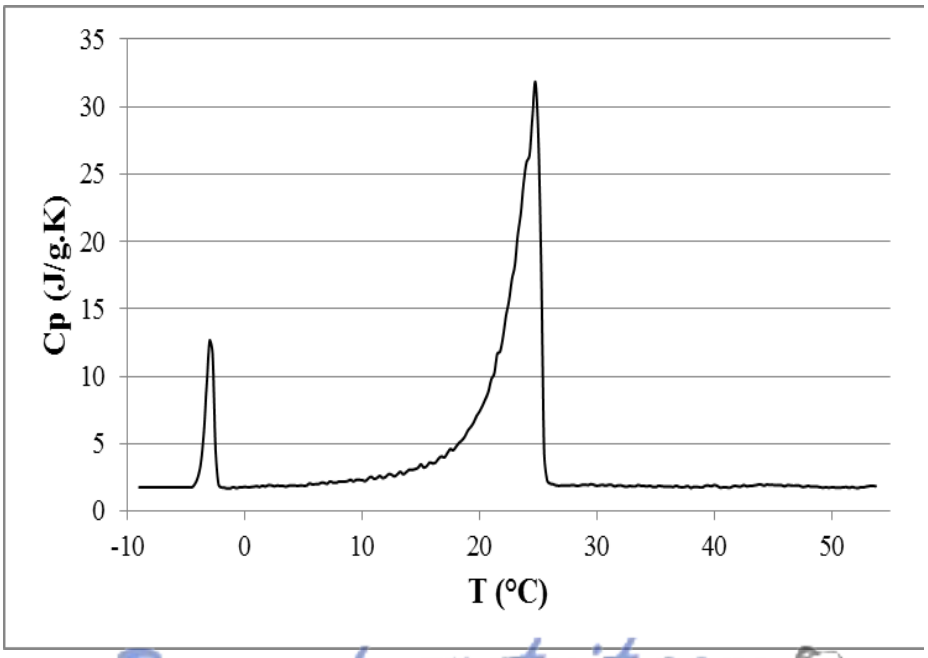
Où :

ρ : masse volumique [Kg/m^3]

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

λ : Conductivité thermique [W/m.K]

La chaleur spécifique apparente présentée sur la figure 4.2 a été obtenue expérimentalement [5] et a été ajustée de telle sorte que l'augmentation de *Cp* soit centrée sur la valeur de température de fusion des MCP et que l'aire du pic de fusion ainsi obtenue soit égale à la chaleur latente :



Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 4.2 : Propriétés thermiques des MCP étudiés : Capacité calorifique spécifique,

La figure 4.2 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}.

4.3.1 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 4-3. Plusieurs maillages ont été opérés 2270, 3078 et 4390 nœuds.

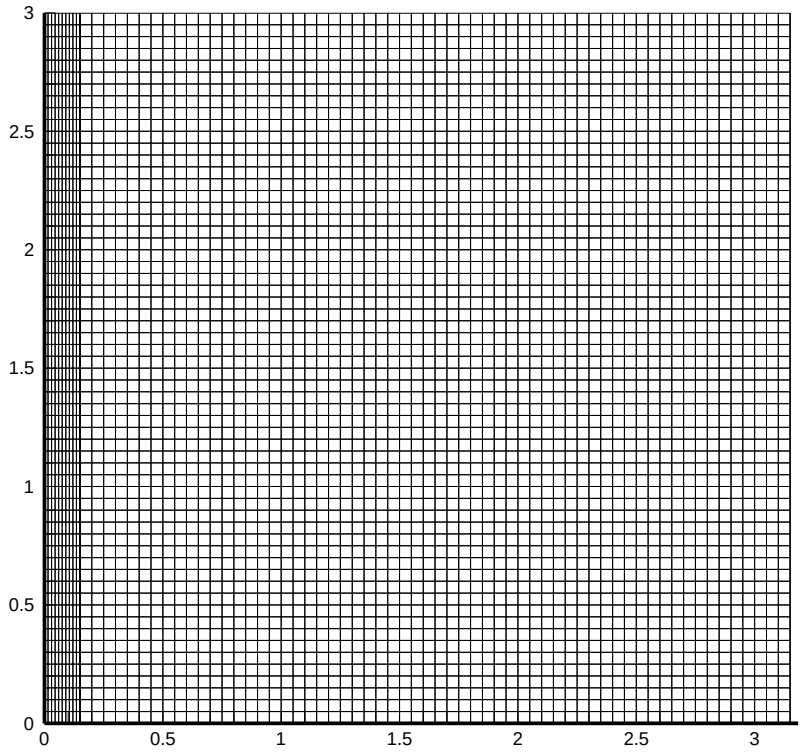
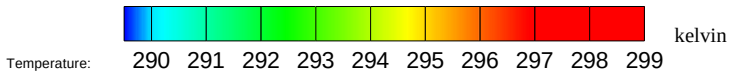


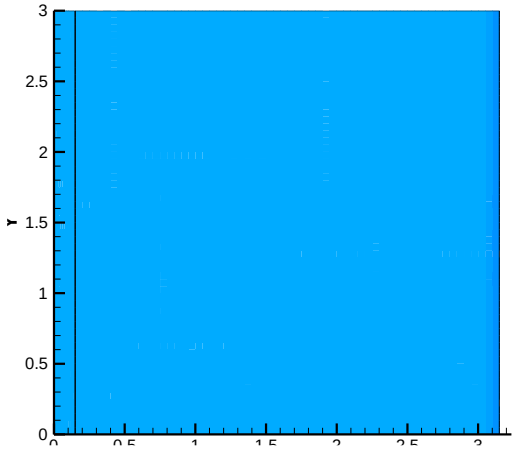
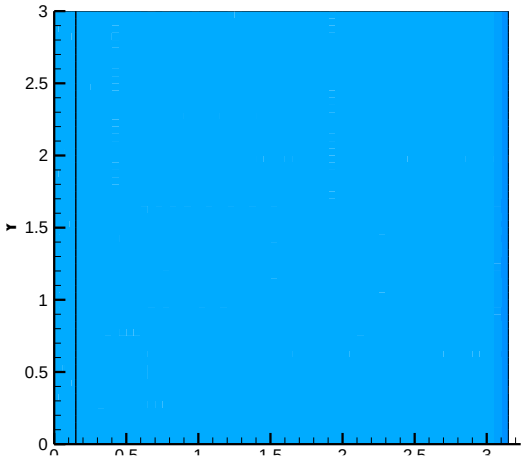
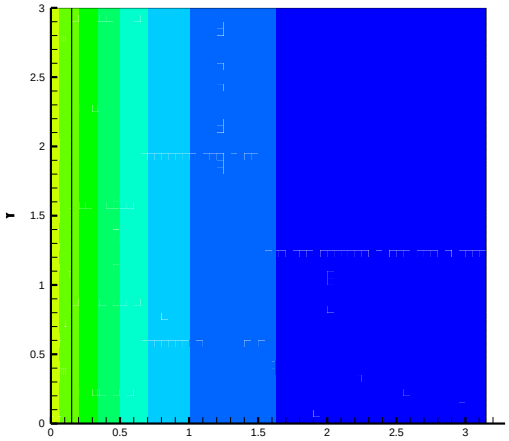
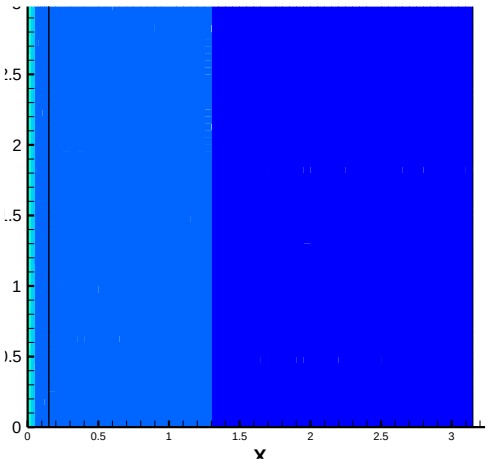
Figure 4.3 : Maillage utilisé pour la Cellule test.

Pour la suite, nous avons retenu une grille avec un maillage à 4390 nœuds qui donnent des résultats très satisfaisants.

4.4 Résultats et discussions

La figure 4.4 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 constante a 27°C



	Béton - MCP	Béton-ordinaire
t =0s		
t =6h		

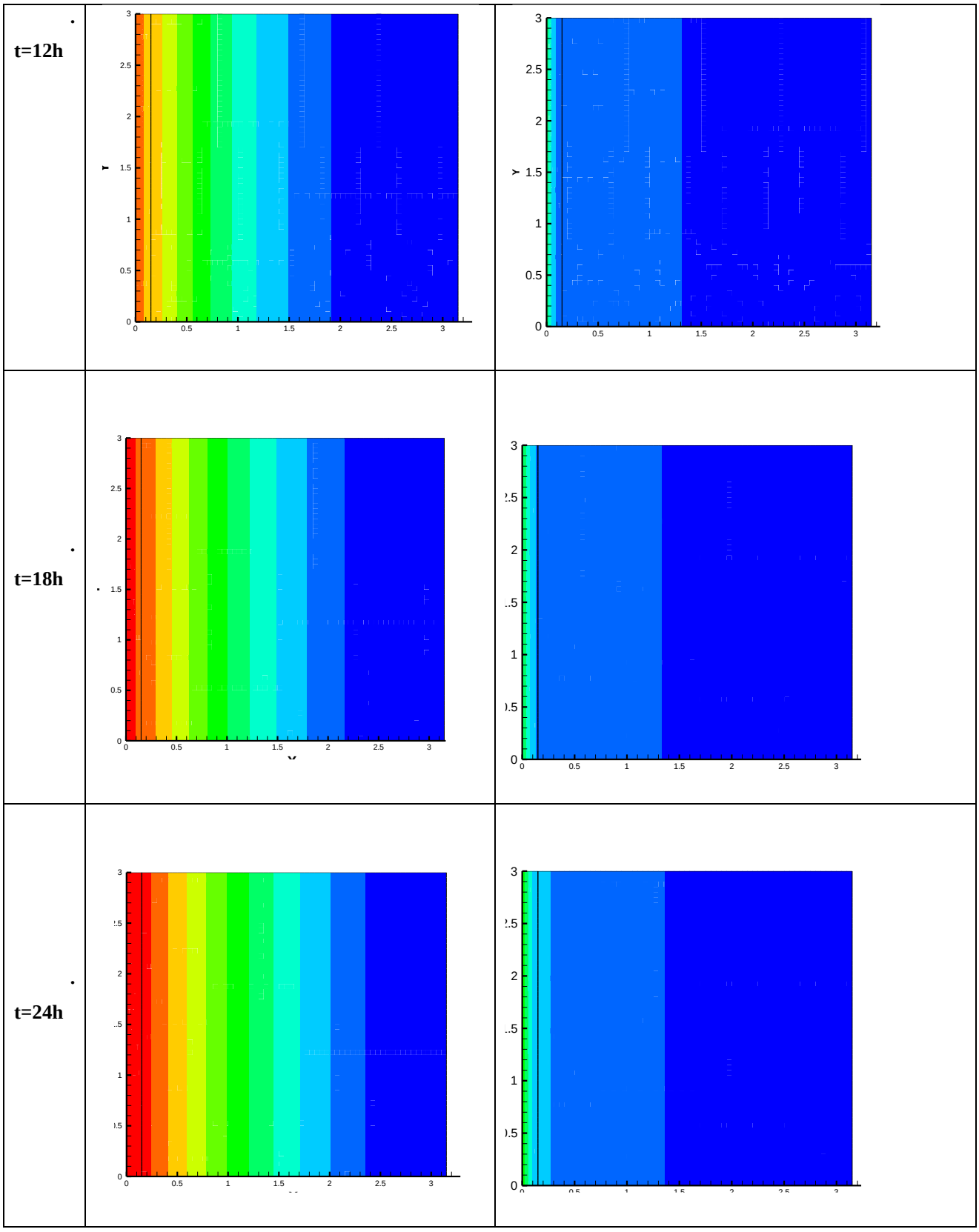


Figure 4.4 : Variation temporelle de la température pendant 24h

On constate d'après la figure 4.4 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 qui est plus intense dans la paroi du béton-MCP du au stockage d'énergie thermique par chaleur latente. Cependant, dans le cas du béton ordinaire, l'évolution de la température est faible parce que la paroi est en train de se charger en énergie thermique par chaleur sensible.

A t=6 h, correspond au début du réchauffement de la cellule test lorsque les MCP sont encore à leurs états solides. La température à l'extérieur a commencé à impacter la température interne. La cellule avec MCP a été la plus influencé par rapport à celle sans MCP, l'écart de la température tend à s'amplifier peu à peu par rapport au temps (h).

A t=12h, le rayonnement solaire est maximum, il provoque le réchauffement des parois spécialement celle avec MCP, car celle qui est sans MCP est moins excitée, qui se charge avec la température extérieure et la température à l'intérieur de la cellule commence à s'élargir entre les deux différentes parois (avec et sans MCP) qui arrive à 3 °C.

A t=18h, la température à l'intérieur de la paroi (avec et sans MCP) continue à augmenter malgré que la température de l'extérieur et le rayonnement solaire reste constant ; mais l'augmentation sur la paroi sans MCP est supérieure par rapport à la paroi avec MCP. Ce phénomène est dû au stockage de la chaleur sensible dans le béton et le stockage de la chaleur latente dans le MCP.

A la fin de la journée (t=24h), la température interne des parois est plus homogène et plus confort dans la paroi avec MCP, donc il faut bien choisir le matériau à changement de phase pour offrir un confort thermique maximum et assurer le stockage thermique. Il est à noter la présence d'un gradient de température entre l'extérieur et l'intérieur la paroi, Par conséquent, il y a une influence significative de la conductivité thermique du béton et du MCP sur la température intérieure.

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

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 cellule. Initialement l'énergie thermique est transférée par conduction à travers la paroi extérieure, cela est due à la différence de température entre T_{ext} - T_{int} et par conséquence des valeurs élevées du

flux de chaleur qrad sont observées au début du processus. Quand le processus de chauffage se poursuit, la fusion du MCP commence et le phénomène de la convection naturelle sera dominant

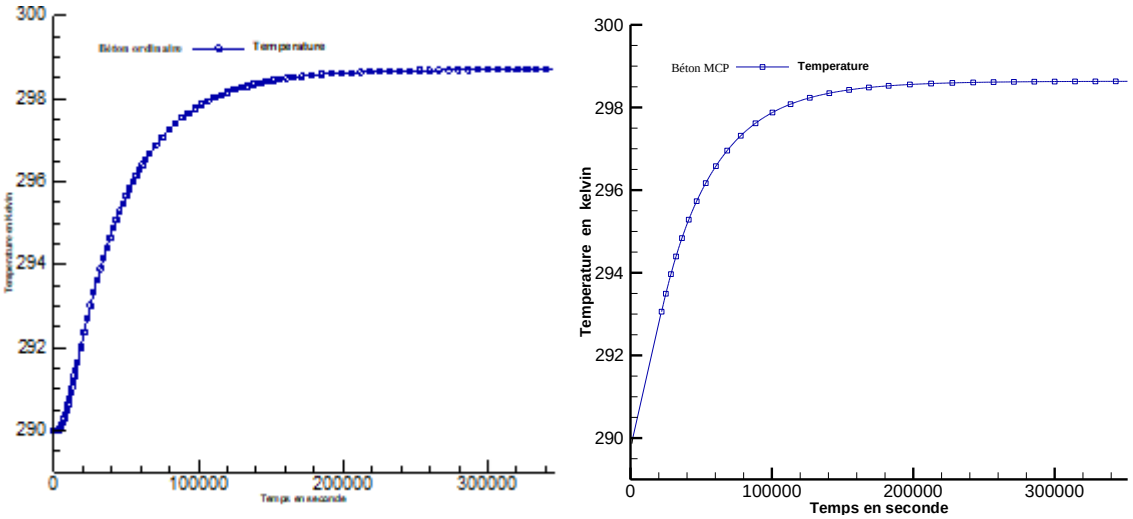


Figure 4.5 : Evolution temporelle de la température.

La figure 4.5 présente l'évolution de la température dans les parois (avec et sans MCP) dans des périodes plus de 4 jours. On peut noter que l'évolution de température de la paroi en béton-MCP est plus significative par rapport aux températures de la paroi du béton-ordinaire.

4.5. 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-MCP. 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 la 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 transfert de chaleur thermique du béton-MCP est bien plus importante que celui du béton ordinaire ceci est dû à l'accumulation de l'énergie thermique par chaleur latente.

• Le béton-MCP permet de stocker l'énergie fournie par le soleil et d'augmenter la capacité de stockage grâce à leur grande densité énergétique.

• 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

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Conclusion générale

Dans ce projet, nous avons traité le problème de stockage d'énergie par chaleur latente avec un matériau à changement de phase incorporé dans la masse du béton.

Le travail entrepris dans cette étude consiste en trois parties essentielles :

- Une première partie, décrit l'efficacité énergétique dans les bâtiments, des généralités sur les MCP et les précédentes études sur ce sujet.
- La seconde partie présente une simulation numérique pour étudier le stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans un matériau à changement de phase incorporé dans le béton.
- La troisième et la dernière partie arbore les résultats de l'étude numérique du transfert thermique qui est effectué par le code « Fluent ». Cette étude a montré l'importance des MCP dans le secteur du bâtiment, où on a pris deux modèles : une paroi en béton ordinaire et la deuxième en béton-MCP et on a comparé l'évolution de la température entre ces deux cas.

Les résultats obtenus peuvent être résumées par les points suivants :

- L'utilisation des matériaux à changement de phase pour le stockage de l'énergie thermique présente un grand intérêt au regard du contexte énergétique actuel.
- Le secteur du bâtiment représente une part très importante des émissions de Gaz à Effet de Serre et les recherches antérieures ont montré l'intérêt d'utiliser des MCP pour réduire la consommation d'énergie.
- Grâce au stockage par chaleur latente caractérisé par le phénomène de changement de phase, ces matériaux ont la capacité de stocker et de libérer d'importantes quantités de chaleur.
- Les résultats obtenus montrent que l'utilisation des MCP incorporé dans le béton en tant que composants de stockage d'énergie réduit la consommation énergétique.
- L'utilisation des MCP dans le domaine de la construction a un rôle très important vu que ce sont des matériaux disponibles sur le marché.

Rapport-Gratuit.com