Sommaire

Remerciements.....II
Dédicaces.....III
Résumé.....IV
Sommaire.....VII
Liste des Figures.....X
Liste des Tableaux.....XIII
Nomenclature et abréviations.....XIV
Introduction Générale.....1

Chapitre 1 : Contexte et enjeux de l'efficacité Énergétique dans les bâtiments approche Energétique et Confort thermique.

1-1. Introduction……...4
1-1-1. Habitat solaire ...…….....5
1-2. Efficacité Énergétique dans les bâtiments……7
1-2-1. Définition de l'énergie……8
1-2-2. Besoin d'énergie dans le bâtiment……..8
1-2-3. Réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment……...9
1-3. Economie d'énergie dans le processus de gestion énergétique……10
1-4. Perspective sur le besoin de maîtrise de la demande énergétique……12
1.5. Maîtrise de l'énergie et le contexte réglementaire en Algérie……..13
1-6. Confort thermique……13
1-6-1. Paramètres du confort thermique……...17
1-6-2. Amélioration du confort thermique……...18
1.7. Conclusion……21

Chapitre 2 : Etat de l'aire utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) en tant que matériaux de construction.

2-1. Introduction……..24
2-2-Méthodes de stockage d'énergie thermique……...24
2-2-1. Stockage d'énergie chimique……..25
2-2-2. Stockage d'énergie thermique……26
2-2-2-a. Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible…….....26

2-2-2-a-1. Matériaux de stockage à chaleur sensible……..27
a- Stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide…….27
b- Stockage par chaleur sensible avec un matériau solide……...28
2-2-2-a-2. Quelques exemples de stockage de chaleur sensible……..29
2-2-2-b. Stockage par chaleur latente……..30
2-2-2-b-1. Les avantage de stockage par chaleur latente……..31
2-3. Les Matériaux à Changement de Phase (MCP)…….32
2-3-1. Description……...32
2-3-2. Historique des MCP…….33
2-3-3. Les différents changements d'état……33
2-3-4. Choix d'un MCP……...35
2-3-5. Classification des matériaux à changement de phase……..36
a-Les MCP organiques……..37
b-Les MCP inorganiques……...40
c-Les eutectiques……42
2-3-6. Avantages et inconvénients des trois types de MCP……...43
2-3-7. Classe de MCP……44
2-3-8. Conditionnement des matériaux à changement de phase ……...46
2-3-8-1. Macro-encapsulation……46
2-3-8-2. Micro-encapsulation……48
2-3-9. Les domaines d'application……48
2-3-10. Incorporation des MCP dans les matériaux de construction…….57
2-3-10-1. L'intégration du MCP dans le plâtre……..57
2-3-10-2. L'intégration du MCP dans le béton……..59
2-3-10-3. L'intégration du MCP dans la brique……....60
2.4 Conclusion…….62

Chapitre 3 : Modélisation numérique d'un planché en béton-MCP.

3-1. Introduction……..64
3-2. Formulation théorique du problème de transfert avec changement de phase…….....64
3-3. Méthode de résolution du problème de transfert avec changement de phase……..66
3-3-1. Méthode à maillage mobile……66
3-3-2. Méthode à maillage fixe……67

A. Méthode de la capacité effective……...68
B. Méthode enthalpique…….69
3-4. Description du modèle numérique……..70
3-5. Présentation des logiciels Gambit et Fluent……73
3-5-1. Préprocesseur Gambit……...73
3-5-2. Code FLUENT…….....82
3-5-2-1. Interface du code Fluent…….83
3-5-2-2. Mise en place problème dans FLUENT…….84
3-6. Conclusion…….....91

Chapitre 4 : Résultats et interprétations.

4-1. Introduction…….93
4-2. Test de maillage……..93
4-3. Résultats et discussions……...93
4-4. Conclusion……100
Conclusion Générale…….....101
Références bibliographiques……102

Liste des Figures

Chapitre 1 : Contexte et enjeux de l'efficacité Énergétique dans les bâtiments approche Energétique et Confort thermique

Figure 1.1 : Consommation d'énergie finale dans le monde en 2030 selon scénario de référence de l'AIE (A. Touzani ,2017) ……...4

Figure 1.2 : hémicycle de Franck Lloyd Wright (Wisconsin,1944-1948) …….....6

Figure 1.3 : Maison Trombe à Odeillo…….....7

Figure 1.4: Energie dans les bâtiments…….....11

Figure 1.5 : Démarche d'amélioration de l'efficacité énergétique (P.Tittelein,2012) ……11

Figure 1.6 : Axes de l'efficacité énergétique (Guide vers un bâtiment durable : les équipements et solutions d'efficacité énergétique (Yves.Robillard, 2011) ……..12

Figure 1.7: Transfert de chaleur par conduction (Isover guide la thermique du bâtiment) …….....14

Figure 1.8: Transfert de chaleur par conduction (Isover guide la thermique du bâtiment) ……15

Figure 1.9 : Transfert de chaleur par rayonnement (Isover guide la thermique du bâtiment)…….16

Figure 1.10: Echanges de chaleur…….....16

Figure 1.11: Isolation par l'intérieur par doublage maçonné…….....19

Figure 1.12 : Isolation par l'intérieur par complexe colle……20

Figure 1.13: Isolation par l'intérieur par doublages sur ossature…….20

Chapitre 2 : Etat de l'art de l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) en tant que matériaux de construction

Figure 2.1: Différentes techniques de stockage de l'énergie thermique (A.Akrouche, 2011)…….25

Figure 2.2: Différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique……26

Figure 2.3: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état…….....29

Figure 2.4: Changement d'état d'un corps pur homogène……31

Figure 2.5: Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase (S.Guichard,2013)…….32

Figure 2.6: Classification des MCP proposée par (A.Abhat ,1983)…….37
Figure 2.7: Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulées……...38
Figure 2.8: Acides gras……40
Figure 2.9: Sels Hydratés…….41
Figure 2.10 : Acide Laurique……43
Figure 2.11 : MCP Classe SP…….....44
Figure 2.12: MCP Classe RT…….....45
Figure 2.13 : Exemple de MCP macro-encapsulés……..47
Figure 2.14 : Images MEB de microcapsules de MCP, produites par polymérisation, après séchage par pulvérisation de leur suspension aqueuse: (a) grossissement 3500x et (b) grossissement 8000x (N.Sarier et E. Onder, 2012)……48
Figure 2.15 : Modèle de mur contenant une Plaque de plâtre-MCP fabriqué par Schossig et al. (d'après S.Atul, 2007)……49
Figure 2.16 : Configuration d'un modèle de mur trombe MCP (A. Sharma et al.2009)…….....50
Figure 2.17 : blocs de béton contenant MCP……51
Figure 2.18 : Enduit à base de MCP…….51
Figure 2.19: Rideaux à MCP (A. Sharma et al.2009)……...52
Figure 2.20 : Fenêtre GlassX fabriqué par Dietrich. (a) prototype à l'échelle 1, (b) évolution des rayons solaires en été (c) évolution des rayons solaires en hiver (S.B.E Ango, 2011)…….53
Figure 2.21: Panneau à base de MCP fabriqué DuPont ™ Energain ®. (a) le modèle que l'on installe au plafond et (b) un exemple de montage de ce panneau dans un plafond (B. Zalba et al.2003)…….54
Figure 2.22: Concept de refroidissement avec MCP intégré dans le sol (S.B.E Ango,2011) ……54
Figure 2.23: A gauche : image du granulat MCP. À droite : construction du système de climatisation au sol (H. Mehling et all.2008) ……56
Figure 2.24 : Toiture avec MCP **(**A. Pasupathy et al.2008) ……....57
Figure 2.25 : Les plaques de plâtres avec et sans MCP……58
Figure 2.26: Chambre d'essai (plaque de plâtre avec MCP) ……..58
Figure 2.27 : Plaques de plâtre avec MCP (National Gypsum) ……..59
Figure 2.28 : Panneau mural en gypse avec microcapsule du MCP (BASF)……..59
Figure 2.29: Microstructures des bétons-MCP……....60
Figure 2.30: Microstructures des bétons-MCP après 28 jours…….60
Figure 2.31: En-haut : Brique creuse conventionnelle ; En bas : Brique alvéolaire+MCP……..61
Figure 2.32 : intégration de MCP dans les briques……..62

Chapitre 3 : Modélisation numérique d'un planché en béton-MCP.

Figure 3.1: Géométrie du modèle physique…….....70
Figure 3.2 : Variation de capacité calorifique spécifique en fonction de la température…….....72
Figure 3.3: Interface de Gambit …….....73
Figure 3.4: Type de solver ……..74
Figure 3.5: Création des points ……75
Figure 3.6 : Création des lignes ……..76
Figure 3.7: Création des faces. ……....77
Figure 3.8: Maillage des lignes ……78
Figure 3.9 : Maillage des surfaces……79
Figure 3.10: les conditions aux limites…….....80
Figure 3.11: les matériaux ……...81
Figure 3.12: Exporter le maillage…….82
Figure 3.13: Interface de code Fluent……...83
Figure 3.14 : Fenêtre de la résolution……...83
Figure 3.15 Importation de la géométrie……..84
Figure 3.16 : Affichage du maillage……85
Figure 3.17 : Définie équation d'énergie……..85
Figure 3.18 : Définition du modèle……..86
Figure 3.19 : Définition du matériel paraffine…….....86
Figure 3.20 : Définition du matériel béton……87
Figure 3.21 : Définition de la gravité……...87
Figure 3.22 : Définition de température en haut……..88
Figure 3.23 : Définition de température en bas……88
Figure 3.24 : Définition de température dans la face gauche……...88
Figure 3.25: Définition de température dans la face droite……..89
Figure 3.26: Control la solution……89
Figure 3.27: Initialiser la température……..89
Figure 3.28 : Les résidus des calculs……90
Figure 3.29 : Lancement des itérations……90
Figure 3.30: Lancement de simulation ……91

Chapitre 4 : Résultats et interprétations.

Figure 4.1: Exemple de maillage utilisé pour plancher……93

Figure 4.2 : Evolution Temporelle de la température durant 24h……....94

Figure 4.3 : Evolution Temporelle de la température durant 6 jours……96

Figure 4.4 : Evolution Temporelle de la Température avec et sans MCP au long de l'axe Y avec X=0.50mca……....97

Figure 4-5 (a) : Variation de la température le long de l'axe y Cas Planché avec MCP…….98

Figure 4-5 (b) : Variation de la température le long de l'axe y Cas Planché sans MCP…….99

Liste des Tableaux

Chapitre 2 : Etat de l'art de l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) en tant que matériaux de construction

Tableaux 2.1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C (A.Akrouche, 2011) ……..28

Tableau 2.2 : Avantages et inconvénients des différents changements d'état (M. Ahmad,2004)……..34

Tableau 2.3: Exemples de propriétés physiques de paraffine(A.Akrouche,2011) …….....39

Tableau 2.4: Différents hydrates salins (C.K. Jotshi et al. 1992)……41

Tableau 2.5 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métalliques……42

Tableau 2.6: Liste de quelques eutectiques……..43

Tableau 2.7 : énonce les principaux avantages et inconvénients des trois types de MCP……43

Chapitre 3 : Modélisation numérique d'un planché en béton-MCP

Tableau 3.1 : Propriétés thermo-physiques des deux matériaux……71

Rapport-Gratuit.com

Nomenclature et abréviations

Symboles latines	Signification	Unité
m	masse du matériau utilisé	[Kg]
Cp	chaleur massique du matériau utilisé	[J/Kg.K]
ΔT	Différence entre température moyennes finale et initiale du stockage	[K]
T_i	Température initiale du stockage	[K]
T_f	Température finale du stockage	[K]
Δh_f	L'enthalpie spécifique de fusion	
t	temps	[s]
x	cordonnée horizontale	[m]
y	cordonnée verticale	[m]
u	Vitesse horizontale perpendiculaire à la dalle	[m/s]
v	Vitesse verticale	[m/s]
C_{eff}	la chaleur massique apparente	[J/Kg.K]
l_s	la chaleur latente	
T_s	Température de phase solide	
T_l	Température de phase liquide	
H	L'enthalpie du système	

Symboles grecques

λ	conductivité thermique	[W/m.K]
ρ	Masse volumique	[Kg/m^3]
ξ	la position du front solide/liquide	

Abréviation

AIE	Agence internationale de l'énergie
MCP	Matériaux à changement de phase
SGE	système de gestion de l'énergie
SET	stockage d'énergie thermique
CFD	Computational Fluid Dynamics
DAO	Dessin Assisté par Ordinateur
RT	Réglementation Thermique

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Introduction Générale

Alors que la consommation d'énergie augmente, de nombreux pays se mobilisent Recherche de solutions permettant de réduire cette consommation, notamment dans ce secteur bâtiment.

La réduction de la consommation énergétique des bâtiments est un enjeu majeur au tournant du siècle. La réalisation de bâtiments basse consommation d'énergie est un processus complexe, nécessitant le développement d'outils performants pour aider à sa conception, sa construction et sa maintenance.

L'efficacité énergétique des bâtiments s'inscrit dans la réponse aux enjeux énergétiques actuels (économie de ressources, réduction des gaz à effet de serre et de l'empreinte carbone,, utilisation d'énergies renouvelables, etc.), et l'isolation Thermique est l'un des points clés pour agir sur d'atteindre l'objectif de réduire la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. Pour cela L'isolation se trouve au cœur des bouquets de solutions retenues pour réaliser les futures économies d'énergie. En réduisant la chaleur, les matériaux isolants peuvent réduire la chaleur en hiver et éviter d'utiliser la climatisation en été.

Pour atteindre ces objectifs, il existe plusieurs solutions (isolation, parois vitrées, Contrôle des équipements d'éclairage, de chauffage / ventilation / climatisation, etc.) L'énergie a été obtenue pour maintenir la température interne requise Cependant, l'utilisation de ces solutions seules n'offre pas tout le confort Nécessaire en hiver et en été. L'une des principales préoccupations De cette manière, les professionnels de la construction peuvent apporter un confort thermique dans le bâtiment Quelle que soit la saison. Le cœur de l'innovation est une recherche, Recherche sur les matériaux intelligents régulant l'échange de chaleur Différents compartiments de construction pour réduire ou parfois éviter l'utilisation Système de chauffage et de climatisation traditionnel. S'appelle MCP, Les matériaux à changement de phase sont une solution de plus en plus attrayante pour les constructeurs. En effet, ces matériaux ont la capacité de stocker et de libérer L'énergie thermique latente pendant la transition de phase, permettant ainsi Réduire la consommation d'énergie, réduisant ainsi les émissions de gaz nocifs, L'amélioration du confort thermique et ces différents avantages s'inscrivent clairement dans la démarche de généralisation de Grenelle pour l'environnement et la durabilité.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

L’utilisation des MCP permet d’améliorer nettement la capacité de stockage de l’énergie au sein des bâtiments et vise en particulier à rendre l’énergie partie intégrante de la structure du bâtiment. Les planchers en béton et avec l’ajoute des MCP constituent une solution pour améliorer le stockage thermique et pour minimiser le flux thermique qui passe au travers ces planchers.

L’objectif de ce mémoire est donc de modéliser et simuler le comportement thermique et dynamique des planchers intégrant un matériau à changement de phase MCP.

Le premier chapitre est consacré à une Contexte et enjeux de l’efficacité Énergétique dans les bâtiments approche Energétique et Confort thermique.

Dans le second chapitre on fait une étude sur l’Etat de l’art de l’utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) en tant que matériaux de construction.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation d’un plancher en béton et matériau changement de phase (MCP).

Le quatrième chapitre contient la simulation numérique, discussion et interprétation des résultats à l’aide du logiciel Fluent.
En fin, on donne aussi un résumé de l'essentiel des résultats obtenus.

Chapitre 1

Contexte et enjeux de l'efficacité Énergétique dans les bâtiments approche Energétique et Confort thermique

1-1.Introduction :

Aujourd'hui, le secteur de la construction est l'une des principales sources de consommation d'énergie et l'un des principaux facteurs d'émissions de gaz à effet de serre. Derrière ce constat, les enjeux environnementaux sont très importants en termes d'épuisement des ressources et de changement climatique. La limitation du recours aux énergies fossiles et l'utilisation de nucléaire, d'une production d'énergie centralisée soulève d'autres problèmes liés à la gestion et à la distribution de l'énergie, notamment la gestion des pics de consommation hivernaux.

Pour ces raisons, de nombreux travaux de recherche se sont focalisés sur l'efficacité énergétique des bâtiments, et plus particulièrement sur la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. La figure ci-dessous représente Consommation d'énergie finale dans le monde en 2030 selon scénario de référence d'Agence internationale de l'énergie (AIE)

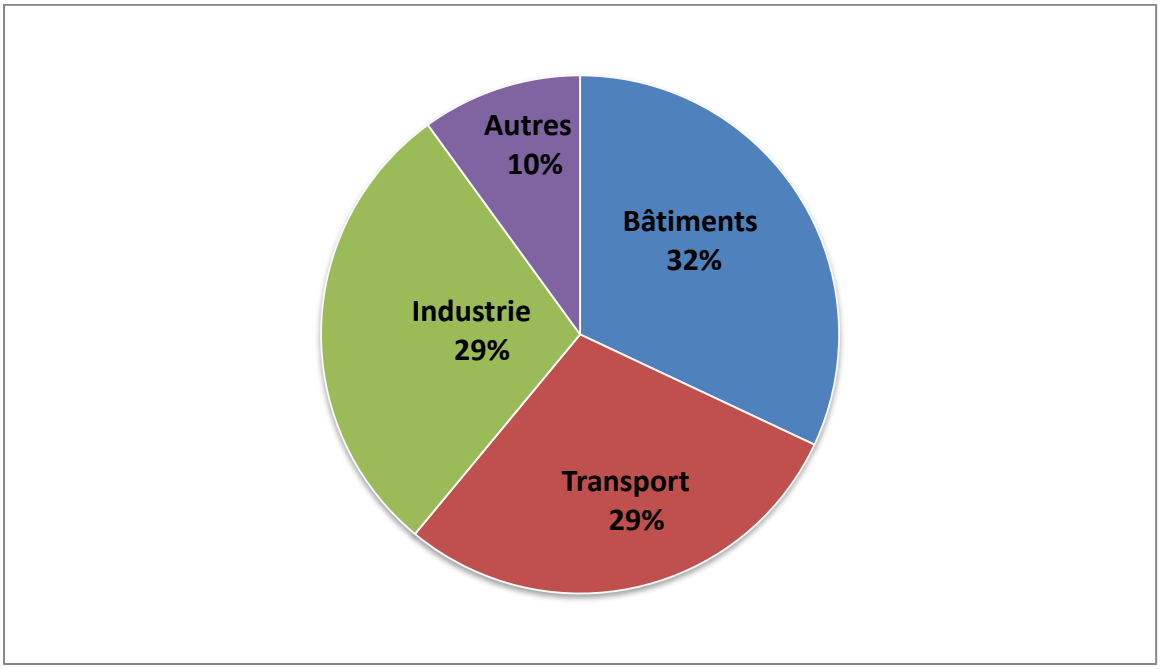

Figure 1.1: Consommation d'énergie finale dans le monde en 2030 selon scénario de référence de l'AIE **(A.Touzani ,2017**).

Cette volonté a conduit à deux axes de recherche très différents:

– Un axe de recherche centrée sur l'amélioration de l'efficacité des systèmes énergétiques du bâtiment.

– L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment.

Les travaux de recherche dédiés à l'amélioration de la performance énergétique de l'enceinte se divisent en deux catégories:

– Une voie qualifiée de « bioclimatique » et revendiquée progressivement comme telle depuis début du siècle et qui considère que le bâtiment doit s'intégrer dans son environnement, notamment en utilisez l'énergie qui s'y trouve.

– Une voie plus classique largement répandue depuis les années 1970 dans laquelle l'enveloppe du bâtiment est considérée comme un vecteur de pertes d'énergie vers l'environnement, et qui consiste donc à isoler thermiquement le bâtiment de son environnement.

Les architectes pionniers sont impatients de percer le style classique et d'adopter une méthode de conception globale, en adoptant des chemins bioclimatiques de la sélection du site à l'utilisation résidentielle des bâtiments. La volonté de réduire la consommation énergétique des bâtiments.

1-1-1. Habitat solaire :

La restauration et la gestion du gain solaire utilisé pour chauffer et éclairer les bâtiments s'inscrit naturellement dans la continuité de l'approche bioclimatique. Elle s'est exprimée sous la forme de projets de construction expérimentaux aux États-Unis depuis les années 40, et elle n'a cessé d'augmenter jusqu'aux années 70. Au nom de maison solaire ou de maison passive, ces deux mots se combinent ailleurs. Le principal problème résolu par tous ces projets est la récupération du revenu solaire en hiver et son stockage de nuit. Ensuite, la solution trouvée était une combinaison d'entrée directe et d'un système de capteur et d'accumulateur qui permettait un déphasage. Différentes technologies ont été testées : la façade sud entièrement vitrée avec capteurs et murs phaser robustes, ventilation naturelle par effet cheminée, capteurs d'eau, serres, murs Trombe. La Jacobs House II de Franck Lloyd Wright en est l'un des premiers exemples avec son célèbre hémicycle solaire (figure 1.2).

Figure 1.2 : hémicycle de Franck Lloyd Wright (Wisconsin,1944-1948).

On peut également illustrer cette démarche avec les travaux de David Wright, et notamment la maison de Karen Terry à Santa Fe, Nouveau Mexique, construite en 1974. Elle est conçue sur trois niveaux orientés vers le sud et délimités par des « murs d'eau » qui viennent réguler les apports solaires reçus à travers plusieurs rangées de vitrage en toiture inclinée. Par conséquent, la vie de la maison est ajustée en fonction de la saison et de la saison de la journée, et les résidents peuvent s'adapter à Conditions de température des différents niveaux (Heschong,1979).

Le mur Trombe (figure1.3) est également un exemple emblématique de mur capteur accumulateur. C'est le résultat de la coopération entre Félix Trombe et Jacques Michel pour utiliser l'effet de serre créé dans le mur. La paroi Trombe se compose d'une paroi de capteur. Une fenêtre en verre est placée devant la paroi de capteur pour former un espace d'air. L'espace lui-même est fourni par l'entrée d'air en bas de la paroi et le ventilateur en haut. Le rayonnement solaire chauffe alors le mur et l'espace aérien, et la chaleur est transférée à l'intérieur presque instantanément par la convection naturelle de l'espace aérien, et est transférée à l'intérieur du bâtiment avec un certain déphasage à travers le rayonnement du mur épais. La première maison de Trombe a été construite en 1962 à Odeillo dans les Pyrénées-Orientales.

Figure 1.3 : Maison Trombe à Odeillo.

1-2. Efficacité Énergétique dans les bâtiments :

L'énergie est indispensable à toutes nos activités, elle est utilisée dans l'activité humaine sous différentes formes notamment, thermique, chimique, électrique et nucléaire, permettant à chacune des utilisations différentes. L'énergie est également considérée comme un bien-être social, elle nous donne la vie et assure notre bien-être.

Le bâtiment avec ses différents secteurs (habitation, tertiaire, résidentiel, …) utilise cette énergie pour répondre aux multiples besoins et conforts (éclairage, cuisson, chauffage, climatisation, etc.). L'énergie utilisée dans la construction, la rénovation et l'utilisation du bâtiment peut être calculée et considérablement réduite. Une évaluation globale du bâtiment nécessite de prendre en compte la consommation d'énergie lors de sa fabrication, son fonctionnement et sa démolition. La flambée de la consommation d'énergie dans le monde durant ces dernières décennies est un fait incontestable. L'énergie utilisée dans la construction, la rénovation et l'utilisation du bâtiment peut être calculée et considérablement réduite. Cette croissance a engendré de nouveaux défis, sur le plan environnemental et économique sachant que le changement climatique liée à l'augmentation des gaz à effets de serre est généré Provient principalement du CO2 dans la production et la consommation d'énergie.

1-2-1. Définition de l'énergie :

L'énergie veut dire « puissance physique qui permet d'agir et de réagir ». L'énergie est capable de produire soit du travail, soit de la chaleur, soit tous les deux, qui sont fondamentaux pour notre vie. La définition de l'énergie est vague, est dépend suivant les différents domaines ou on se trouve **(D.W.Curran, 1981) :**

• Pour les physiciens et naturalistes : l'énergie est la force physique du travail.

• Par rapport aux économistes : il s'agit de l'énergie mécanique vendue sur le marché. Autrement dit, toutes les énergies et formes utilisables en grande quantité peuvent générer de la chaleur et faire fonctionner les machines. Parce que le confort est essentiel, l'énergie peut entrer par deux axes principaux. Bâtiments (P. Depecker, 1985).

• Le coût énergétique « **primaire** » de la construction à partir du coût énergétique des matériaux et de la construction.

• Le coût énergétique « **finale** » de la consommation dû au chauffage, climatisation, éclairage et alimentation.

1-2-2. Besoin d'énergie dans le bâtiment :

La demande totale d'un bâtiment est la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir un climat intérieur approprié et répondre aux performances du bâtiment dans une période de temps donnée (eau chaude, cuisson, éclairage, chauffage, climatisation, ...). Elle se caractérise par les différentes formes. Dans le bâtiment, le maintien d'un confort thermique agréable semble s'opposer aux recherches d'économie d'énergie ou nous ne pouvons traiter cette contradiction évidente qu'à travers le concept architectural de « globalisme ». Pour cela, vous devez avoir une bonne compréhension des paramètres climatiques, de l'inertie thermique du bâtiment et de sa localisation. Cette approche du besoin d'énergie de chauffage et de climatisation renvoie trois facteurs explicatifs **(B. Chateau et B. Lappilonne, 1977)** :

- Besoin en température : est un besoin de climat intérieur, caractérisé par la température intérieure moyenne (chauffage ou climatisation). Ce besoin en température est, un besoin « social ».

- Caractéristiques physiques du bâtiment qui interviennent de façon prépondérante dans la création du besoin d'énergie sont : le volume et le degré d'isolation.

- Le climat du site, qui détermine la période du besoin.

D'autres caractéristiques importantes telles que l'exposition au soleil, l'orientation au vent, le vitrage qu'on doit prendre en considération dès la conception et l'implantation.

1-2-3. Réduction des consommation énergétiques dans le bâtiment :

La crise pétrolière des années 1974 imprime une pression sans précédent sur les prix de l'énergie et conduisent les pouvoirs publics à initier une politique de réduction des consommations énergétiques, notamment dans le secteur du bâtiment où les potentiels d'économie d'énergie sont repérés comme très importants. Effectivement, jusqu'alors, les bâtiments ne sont pas conçus ni dimensionnés en fonction de leurs besoins énergétiques et ils ne sont par exemple pas isolés du tout.

Ainsi, la première réglementation thermique, publiée en 1974 sous la forme d'un arrêté ministériel [RT], va imposer une valeur maximale aux déperditions des constructions neuves dans le secteur résidentiel. Est alors introduit le coefficient G qui caractérise les pertes globales au travers des parois et induites par la ventilation. En 1976, la nouvelle réglementation thermique applicable aux secteurs non résidentiels introduit un nouveau coefficient G1, qui ne prend en compte que la perte de chaleur à travers les murs. L'application de ces réglementations thermiques a conduit à l'utilisation systématique de matériaux isolants et à une ventilation plus efficace dans le secteur résidentiel.

Diverses réglementations et labels de dissipation thermique ont été mis en place pour récompenser les structures les plus avancées pour réduire la consommation d'énergie, préparant ainsi les réglementations de dissipation thermique suivantes. C'est le cas du label « Haute Isolation » mis en place en 1980, et ses objectifs seront repris dans la réglementation de 1982 [RT]. Dans les années 1980, les institutions publiques investissent dans les matériaux d'isolation (matériaux d'isolation dynamique, matériaux d'isolation externe) et notamment sur de nouveaux matériaux (polystyrène, mousse de polyuréthane, MCP, etc..).

Rapport-Gratuit.com

La nouvelle réglementation thermique la RT 2012, entrant en application pour la plupart des nouveaux bâtiments au 1er janvier 2013, préconise des niveaux de consommations bien plus De manière restrictive, cela semble difficile à réaliser en réduisant au maximum la perte d'énergie, notamment à travers l'enveloppe. De plus, les futures réglementations pour les bâtiments à énergie active (les gains l'emporteront sur les pertes) doivent envisager le recyclage des intrants environnementaux dans le cadre du bilan énergétique du bâtiment.

Ainsi, l'isolation, qui permet de réduire efficacement les besoins énergétiques des bâtiments non isolés, comme ce fut le cas lors de la première réglementation thermique de 1974, n'apporte pas une réelle amélioration de la performance énergétique des bâtiments déjà isolés. Or les réglementations thermiques fixent des objectifs de plus en plus contraignants en matière de limitation de la consommation énergétique des bâtiments.

Pour satisfaire ces critères, il semble que l'approche d'une conception des bâtiments relevant simplement de la limitation des pertes ne soit pas suffisante. Une nouvelle approche à la fois technologique, mais également méthodologique, de prise en compte des apports énergétiques de l'environnement semble nécessaire.

1-3. Economie d'énergie dans le processus de gestion énergétique :

Le système de gestion de l'énergie (SGE) est un processus d'amélioration continue en énergie qui est structuré et systématique. Inspiré de la norme de gestion volontaire de l'énergie ISO 50 001 (adoptée en 2011). En affichant l'énergie, le suivi de la consommation d'énergie devient partie intégrante du mode de gestion. Afin d'identifier et de quantifier la consommation d'énergie inutile et de découvrir un potentiel d'économie d'énergie inattendu, l'efficacité énergétique peut également être améliorée.

- Concevoir l'éclairage pour l'activité prévue (lumière plus intense dans les zones de travail que celles de repos).
- Concevoir des luminaires plus efficaces et utiliser correctement l'éclairage naturel.
- Utiliser les lampes à rendement élevé (Lumen/Watt élevé).
- Utiliser des luminaires à rendement élevé.
- Utiliser un fini plus brillant pour les plafonds, les murs, les sols et le mobilier.

- Utiliser des lampes à incandescence de rendement élevé si nécessaire.
- Éteindre les lumières en cas de non-utilisation.
- Contrôler la luminosité des fenêtres.
- Utiliser la lumière du jour si possible.
- Maintenir l'équipement d'éclairage en bon état de fonctionnement et de propreté.
- Afficher les instructions de fonctionnement et de maintenance de l'éclairage.

Figure 1.4: Energie dans les bâtiments.

Nous devons également jouer un rôle sous deux aspects : réduire la demande liée au bâtiment lui-même, et améliorer les équipements techniques de construction et sa gestion.Un troisième levier très difficile à quantifier et qui est le comportement de l'utilisateur être inclus.

Figure 1.5 : Démarche d'amélioration de l'efficacité énergétique **(P.Tittelein,2012).**

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

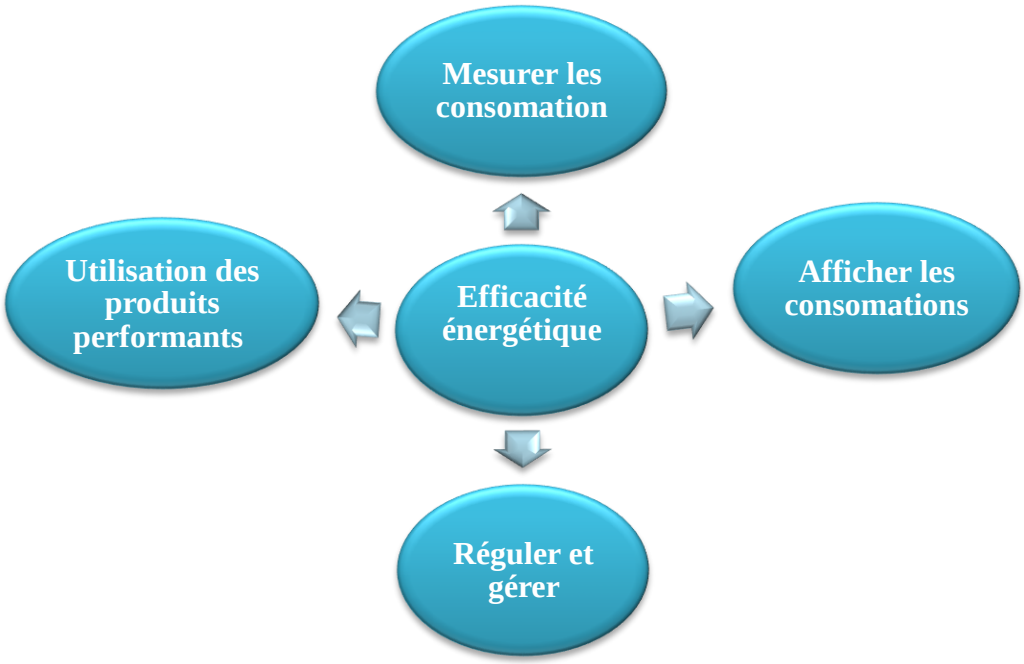

Figure 1.6 : Axes de l'efficacité énergétique (Guide vers un bâtiment durable : les équipements et solutions d'efficacité énergétique **(Yves.Robillard, 2011)**

1-4. Perspective sur le besoin de maîtrise de la demande énergétique :

Les recherches autour de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments sont en cours d'exploration. Elles se divisent en deux grandes thématiques :

-Une thématique de recherche concernant les équipements énergétiques des bâtiments.

-Une thématique plus concentrée sur les problématiques d'enveloppe.

La recherche sur les équipements se préoccupe principalement d'améliorer les rendements des systèmes de chauffage et de climatisation afin de diminuer leur facture énergétique primaire. Concernant l'enveloppe, beaucoup de recherches impliquent du développement de solutions d'isolation alternatives à l'isolation classique. Il s'agit notamment de mettre Développer des matériaux innovants et des solutions d'enveloppes à haute capacité d'isolation et à faible épaisseur. C'est le cas des matériaux à changement de phase MCP.La haute inertie thermique de ces matériaux MCP émane de leur capacité à changer de phase à une température ajustable par l'utilisateur. En effet, la grande quantité d'énergie latente absorbée lors de la fusion du

MCP est conservée dans le matériau, puis est libérée au moment voulu lorsque la température diminue.

1.5. Maîtrise de l'énergie et le contexte réglementaire en Algérie :

Aujourd'hui l'Algérie, pays exportateur de pétrole et de gaz naturel, subit de plein fouet le Contrechoc pétrolier : les prix du pétrole baissent et provoquent une diminution des rentrées de devises pour le financement de l'activité économique. Dans ce contexte, le pays prend conscience de la nécessité de définir une politique d'efficacité énergétique.

L 'Algérie important en matière de rationalisation de l'utilisation de l'énergie dans le bâtiment.

- La loi 09-99 du 28 Juillet 1999, relative à la maîtrise d'énergie est une loi cadre, elle traduit un des objectifs fondamentaux de la politique énergétique nationale, Il s'agit de gérer rationnellement la demande énergétique et de réparer de nombreux aspects liés à la maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment.

-Loi n ° 04-09 du 14 août 2004, relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.

-Décret administratif n ° 04-149 du 19 mai 2004 fixant le mode d'élaboration du plan national de maîtrise de l'énergie.

1-6. Confort thermique :

Aujourd'hui, 50 % de la population mondiale vit dans des villes et passe près de 90 % de son temps à l'intérieur (THELLIER et BEDRUNE, 2012). Les bâtiments deviennent de véritables machines thermiques, dont le but est de maintenir des conditions climatiques favorables à l'homme. Les individus réagissent constamment à cet environnement de manière consciente et inconsciente. Grâce à la définition de la physiologie, de la physiologie et du mécanisme psychologique, nous pouvons obtenir la définition du confort thermique.

Qu'est-ce que le confort thermique ?

Ne pas avoir trop froid, ne pas avoir trop chaud, ne pas ressentir de courants d'air gênants : nous pouvons donc essayer de définir le confort thermique. Le définir en précisant la cause de l'inconfort est plus facile que d'essayer de le définir en définissant des normes de confort. Une autre personne

peut se sentir gênée et mal à l'aise. Le corps humain échange continuellement de la chaleur avec son environnement immédiat.

Dans le domaine de bâtiment, les échanges thermiques de la chaleur se font principalement selon trois modes de transmission : la conduction « majoritaire », la convention et le rayonnement.

- ✓ **Par conduction** : C'est la transmission d'énergie de proche en proche dans la partie solide d'un matériau. La chaleur se transmet par contact, du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. En hiver, la chaleur émise dans une pièce va se transmettre à l'enveloppe du bâtiment par contact et se dissiper progressivement vers l'extérieur.

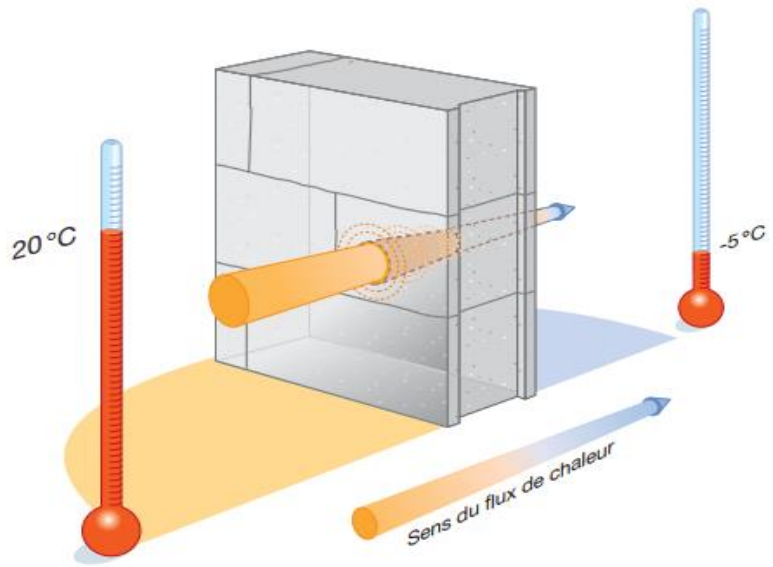

Figure 1.7: Transfert de chaleur par conduction. **(Isover guide la thermique du bâtiment)**

- ✓ **Par convection** : il s'agit des échanges de chaleur liés au mouvement de l'air autour du corps. Ils sont d'autant plus intenses que la vitesse de l'aire est importante et que l'écart de température entre l'air et le corps est grand.

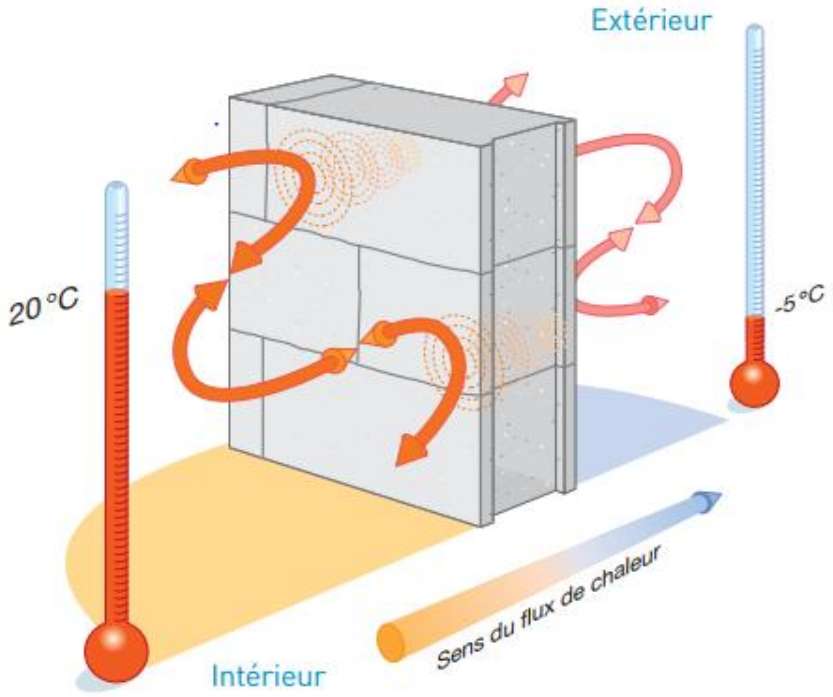

Figure 1.8: Transfert de chaleur par convection **(Isover guide la thermique du bâtiment)**.

- ✓ **Par rayonnement** : ou transport de chaleur par émission et absorption de rayonnement électromagnétique par les surfaces des corps.

La recherche d'une ambiance de confort d'un point de vue thermique consiste à trouver un équilibre entre tous ces processus d'échange thermique de manière à ce que les occupants des pièces du logement n'aient ni trop chaud, ni trop froid.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

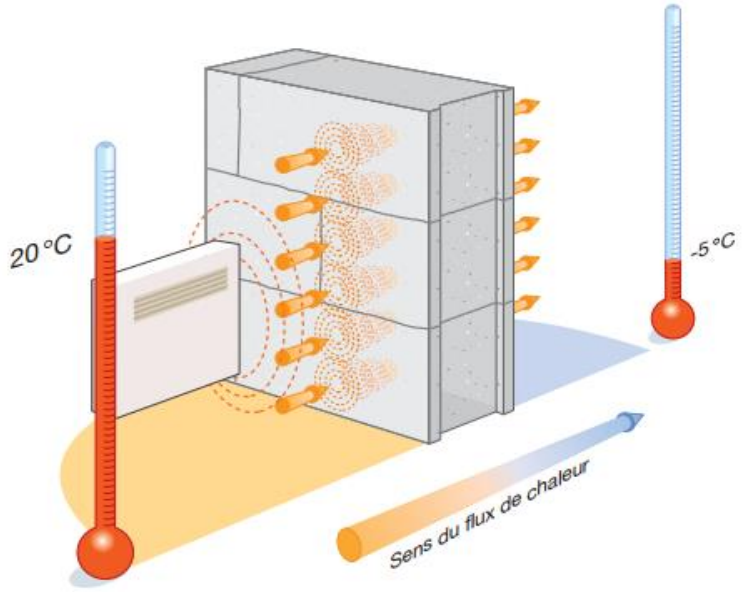

Figure 1.9 : Transfert de chaleur par rayonnement **(Isover guide la thermique du bâtiment)**.

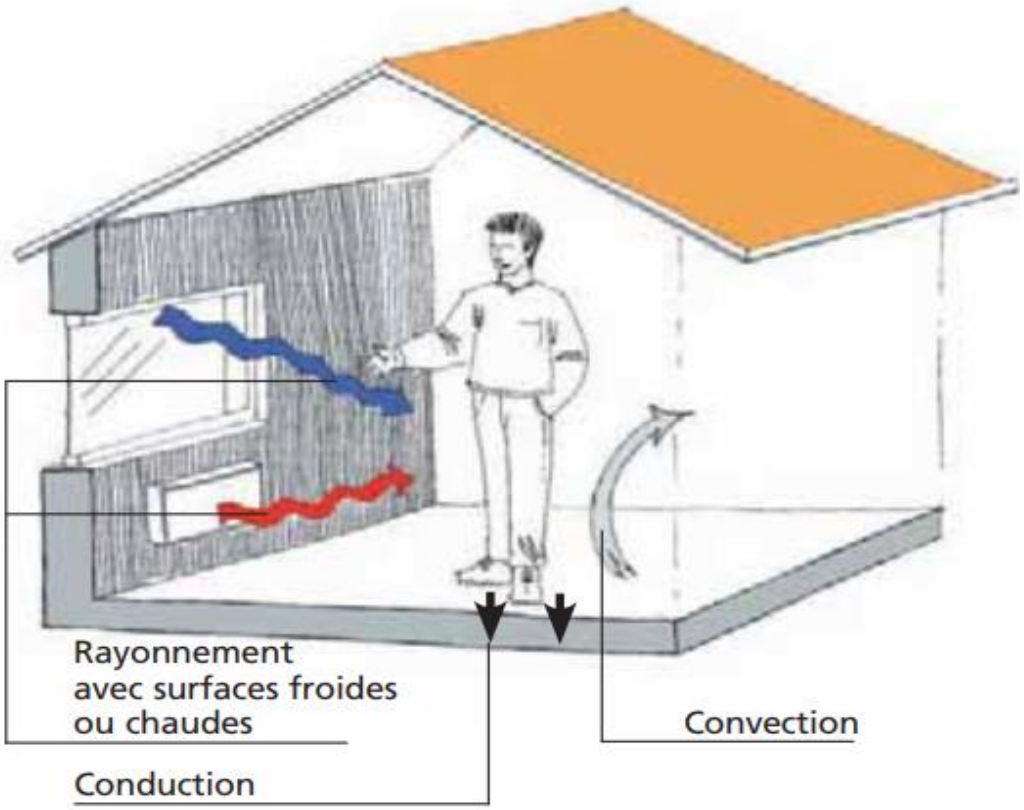

Figure 1.10: Echanges de chaleur.

1-6-1. Paramètres du confort thermique :

La température, la vitesse de l'air et l'humidité sont les principaux paramètres physiques qui contrôlent le confort thermique.

- Température :

Les spécialistes ont défini plusieurs températures destinées à caractériser les échangés thermiques notamment par convection et par rayonnement, tel que :

-La température de l'air « température humide » est la température indiquée par le thermomètre placé dans la pièce. La plupart des gens pensent que 20 ° C en hiver et 26 ° C en été sont des températures liées au confort.

-La température de rayonnement fait référence à la température de la paroi avec laquelle le corps humain échange de la chaleur par rayonnement (la température de rayonnement des fenêtres est plus basse en hiver).

- La température d'ambiant est la température mesurée, lorsque les mouvements d'air sont faibles, à l'intérieur d'une sphère de couleur sombre placée au milieu de la pièce. Elle indique une valeur qui prend en compte les échangés par convection et les échangés radiatifs avec les parois.

- Vitesse de l'air :

La vitesse de l'air autour du corps humain est également un paramètre important. Ici, l'appréciation de la vitesse de l'air « confortable » dépend aussi des personnes, de leurs vêtements et de leurs activités. Si l'air est plus froid que la peau, plus la température ambiante est basse, plus la baisse de température due au mouvement de l'air est évidente.

- Humidité :

La quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir augmente avec la température. Par exemple, dans l'air à 15 ° C, chaque kilogramme d'air sec peut contenir jusqu'à environ 10 grammes de vapeur d'eau, tandis qu'à une température de 20 ° C.

La limite est augmentée à 15 grammes. Toutes les pièces résidentielles qui affecteront les paramètres ci-dessus participeront au processus de construction des occupants pour créer un sentiment de confort (ou d'inconfort).

1-6-2. Amélioration du confort thermique :

a) Confort d'hiver :

L'amélioration du confort thermique en hiver passe par le diagnostic thermique des bâtiments et de ces équipements de chauffage. Des experts (architectes, ingénieurs, bureaux d'études) peuvent réaliser ces diagnostics et proposer des solutions. Quelques réflexes permettent d'orienter les choix parmi les mesures proposées :

- Commencer par isoler les combles avant les parois verticales en maison individuelle (la majeure partie des pertes de chaleur se fait par le toit).

-Isoler le grenier avant les murs verticaux de la maison unifamiliale (l'essentiel de la perte de chaleur se fait par le toit).

-Veiller à maintenir ou rétablir la circulation d'air dans le logement en cas de changement de fenêtres (il ne suffit pas que les nouvelles fenêtres présentent des entrées d'air, il faut aussi que l'air puisse ressortir du logement).

-Remplacer des simples vitrages par des doubles vitrages.

-Élaborer des règlements pour les systèmes de chauffage.

-Vérifiez la possibilité de changer le mode de chauffage ou d'utiliser de l'énergie.

- Isolation des murs par l'intérieur :

Il consiste généralement à recouvrir la surface intérieure du mur concerné avec des matériaux isolants, et à réaliser un revêtement protecteur et isolant pour former une surface pouvant accueillir des éléments décoratifs et supporter divers objets (appliques électriques) à suspendre (Cadre, étagère, etc.). On distingue principalement :

-les cloisons de doublage maçonnées recouvertes d'enduit de plâtre.

-Composé collé (en matériau isolant, collé sur plaque de plâtre)

-les doublages sur ossature métallique (plaque de plâtre vissée sur une ossature métallique solidaire de la structure du bâtiment).

Ces solutions ne sont pas interchangeables. Le choix est bien sur fonction du budget disponible mais également des caractéristiques des murs. Ainsi un doublage thermique par complexe collé suppose un mur bien plan, alors qu'un système sur ossature peut se poser contre un mur présentant des irrégularités de surface. Cependant, dans tous les cas les murs on envisage l'isolation devront être sains et secs.

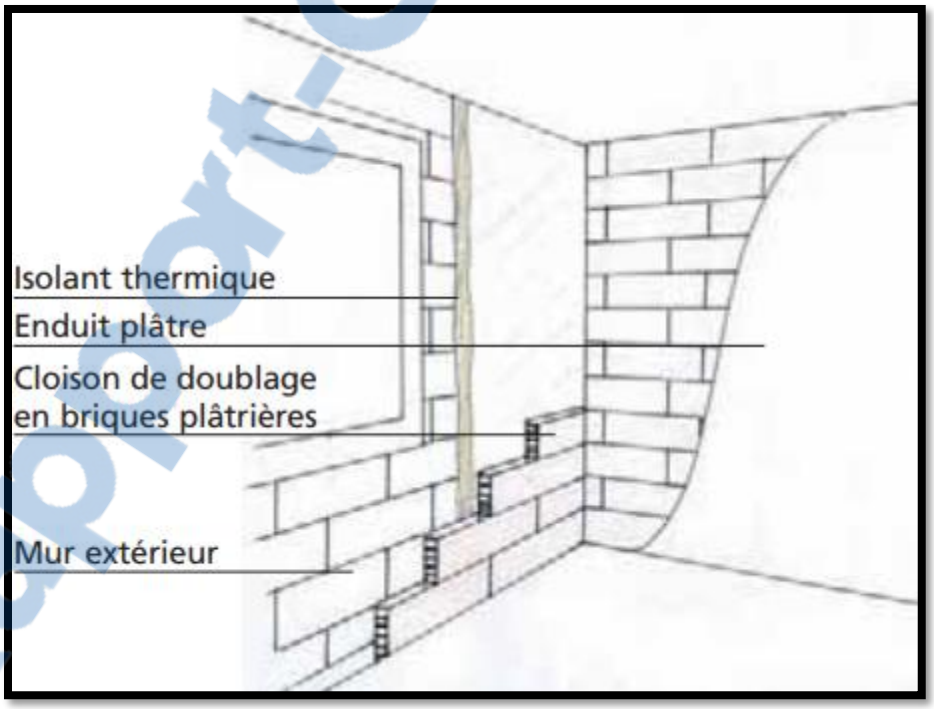

Figure 1.11: Isolation par l'intérieur par doublage maçonné.

Rapport-Gratuit.com

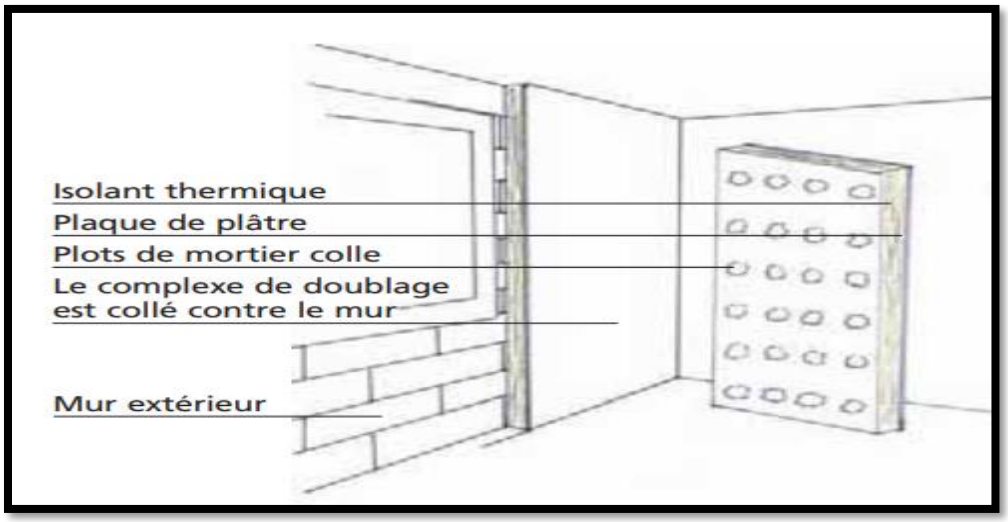

Figure 1.12 : Isolation par l'intérieur par complexe colle.

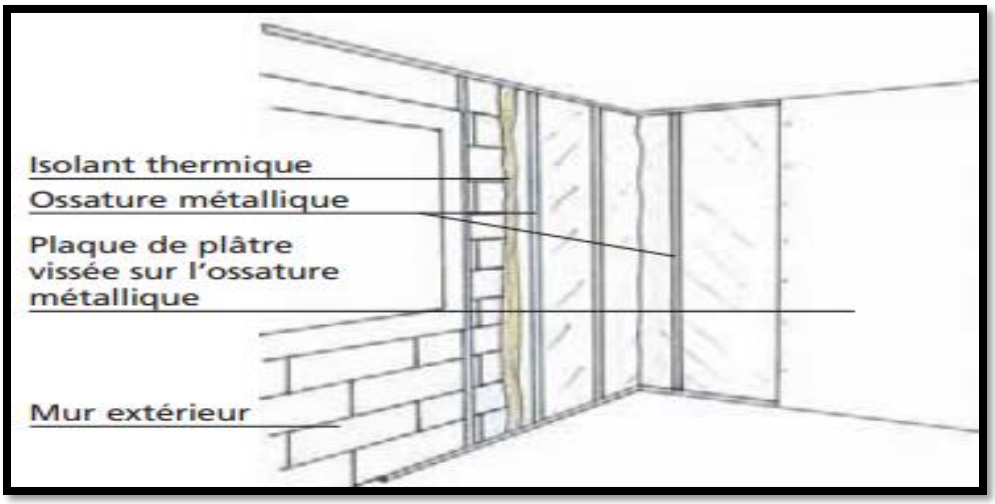

Figure 1.13: Isolation par l'intérieur par doublages sur ossature.

-Isolation des murs par l'extérieur :

Consiste à installer l'isolant sur la surface extérieure du mur. C'est souvent la solution la plus coûteuse mais aussi la plus performante. Elle constitue la meilleure isolation pour le confort d'été et d'hiver, car elle permet de conserver l'inertie thermique forte des murs intérieurs et supprime les ponts thermiques.

b) Confort d'été :

Les moyens les plus courants de se protéger de la chaleur estivale sont:

-la ventilation par ouverture des fenêtres lorsque cela est possible (zone peu bruyante, pas de risque d'intrusion…).

-Utiliser l'inertie thermique du bâtiment, c'est-à-dire utiliser la capacité de stockage du bâtiment pour être frais la nuit afin de limiter la montée en température pendant la journée.

-la limitation des apports solaires à travers les ouvertures (portes et fenêtres), a l'aide de volets ou de stores.

Les concepteurs de nouveaux bâtiments utilisent ces trois méthodes pour s'assurer que les températures estivales, compte tenu du climat local, restent en dessous d'un seuil fixé.

Dans des zones bruyantes, où l'ouverture des fenêtres pour bénéficier d'une bonne aération et d'un éventuel rafraichissement nocturne n'est pas possible, l'installation d'une climatisation est une solution d'amélioration du confort d'été.

1-7 . CONCLUSION :

L'exploitation rationnelle et le remplacement progressif des sources d'énergies traditionnelles par des énergies renouvelables, doivent figurer parmi les objectifs de toute politique énergétique viable. La conception de bâtiments basse consommation est un processus complexe et nécessite des méthodes spéciales. 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.

Afin de définir analytiquement les conditions de confort, de nombreuses études ont été menées. Elles dépendent principalement de quatre paramètres environnementaux :

- Température de l'air.
- Température de rayonnement.
- Vitesse de l'air.
- Humidité relative.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Et deux paramètres individuels :

- Vêture : est constituée d'éléments préfabriqués en usine comprenant un panneau revêtu d'un parement. Une vêture sur façade est un système d'isolation de façade qui comprend des éléments préfabriqués constitués d'un isolant et d'une plaque de parement. Ce système est à fixer sur l'extérieur du mur de votre habitation.
- Métabolisme.

Mais la mesure de ces paramètres est difficile dès lors que l'on sort de chambres climatiques. De plus, les enquêtes sur le confort indiquent que le confort peut varier en fonction de la probabilité d'actions individuelles. Le comportement des individus est souvent mis en cause dans les écarts de consommations énergétiques entre les modèles et la réalité. Deux actions sont souhaitables pour réduire ces écarts. La première serait que les individus aient des comportements plus vertueux et la seconde que la modélisation du comportement humain soit plus proche de la réalité.

Chapitre 2

Etat de l'art de l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) en tant que matériaux de construction

2-1. Introduction :

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une énergie à un endroit donné pour faciliter son exploitation immédiate ou future. En raison de son importance dans notre civilisation énergivore, le stockage de l'énergie est une priorité économique. Il contribue à l'indépendance énergétique, c'est-à-dire à la capacité d'un pays à répondre à ses besoins énergétiques. De ce fait, le stockage de l'énergie fait souvent l'objet d'une attention particulière de la part des autorités politiques, notamment dans les pays fortement dépendants de l'étranger. Par extension, le terme « stockage d’énergie » est souvent utilisé pour décrire le stockage de substances qui généreront cette énergie.

Le stockage est un moyen très important d'optimiser la gestion de l'énergie thermique. En maintenant une relation constante entre l'énergie requise et l'énergie fournie, la production peut être adaptée à la demande et les conditions de gestion les plus favorables peuvent être créées. De plus, dans les bâtiments, lorsqu'il est installé dans l'enceinte (inertie des murs, des sols, etc.), il peut améliorer efficacement le confort des occupants. Ce stockage d'énergie peut utiliser des matériaux à changement de phase (MCP) ou également appelés matériaux de stockage de chaleur latente, tels que la cire, l'eutectique et l'hydrate saline. L'utilisation de matériau à changement de phase (MCP) permet d'avoir une matière première plus petite en raison de sa chaleur latente élevée de fusion ou de solidification. La technologie de stockage de l'énergie fait l'objet de recherches depuis de nombreuses années et le report de la consommation d'énergie est une idée courante qui vient à l'esprit lorsqu'on parle de stockage d'énergie. En fait, l'opération peut alors être réalisée par chaleur sensible ou chaleur latente.

2-2. Méthodes de Stockage d'énergie thermique :

Le stockage d'énergie est le processus de conservation de grandes quantités d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, cette déclaration fait également référence au stockage de matériaux contenant de l’énergie. La réalisation du stockage de chaleur nécessite généralement un compromis entre capacité de stockage, puissance de transmission ou de stockage, et perte. Il existe trois méthodes de stockage d'énergie thermique :

- Stockage par chaleur sensible.
- Stockage par la chaleur latente.
- Stockage par les processus chimiques.

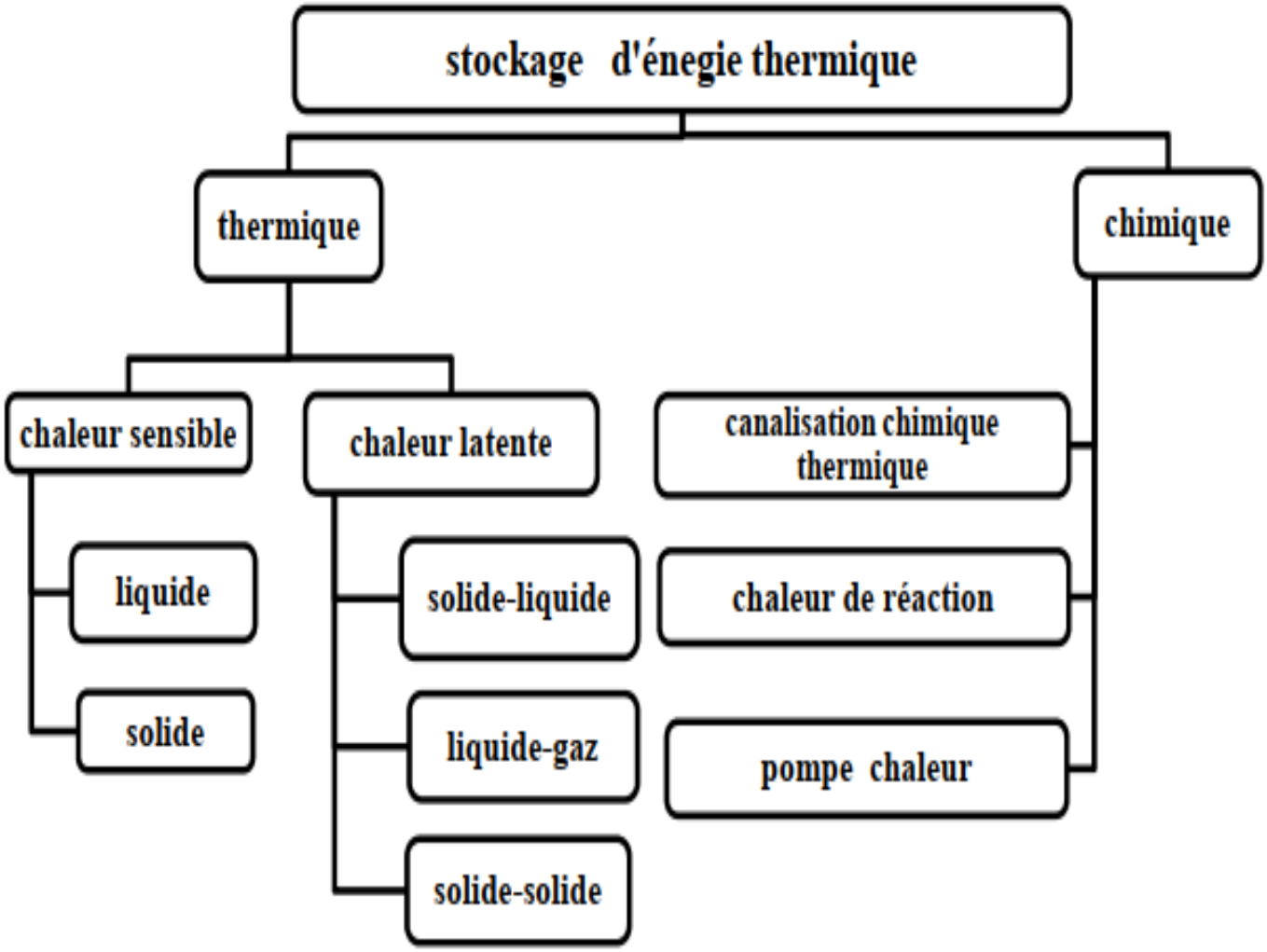

Figure 2.1 : Différentes techniques de stockage de l'énergie thermique **(A. Akrouche,2011).**

2-2-1. Stockage d'énergie chimique :

Quand une réaction chimique a lieu, il y a une différence entre l'enthalpie des substances présentes à la fin de la réaction et l'enthalpie des substances au début de la réaction. Cette différence d'enthalpie est appelée chaleur de réaction. Si la réaction est endothermique, elle absorbera cette chaleur. Si la réaction est exothermique, elle dégagera cette chaleur.

2-2-2. Stockage d'énergie thermique :

L'énergie peut également être stockée sous sa forme thermique et ensuite restituée sous forme de chaleur. Le stockage de l'énergie thermique se présente comme une solution particulièrement intéressante puisqu'il permet de dissocier l'utilisation de la production de l'énergie **(I.O. Salyer et A.K. Sircar ,1990).** Le stockage d'énergie thermique (SET) peut être obtenu par refroidissement, le chauffage, la fusion, la solidification, la vaporisation, ou un matériau avec l'énergie sous forme de chaleur devient disponible lorsque le processus est inversé.

Le stockage d'énergie thermique comprend trois types :

-l'énergie à mesure qu'ils changent de phase stockage par chaleur latente.

-Stockage par chaleur sensible.

- La chaleur des réactions : thermochimie et absorption.

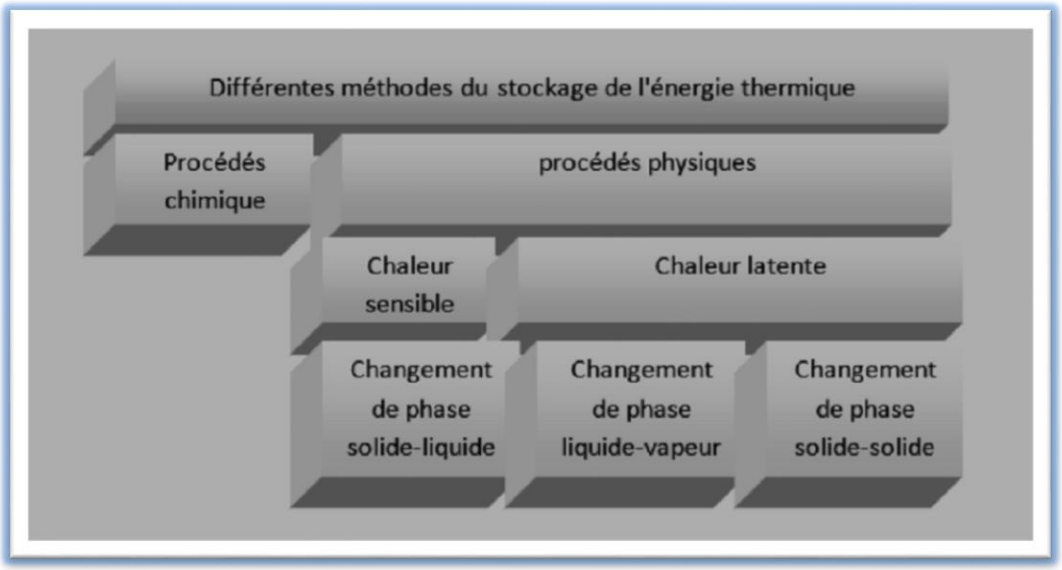

Figure 2.2: Différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique.

2-2-2-a. Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible :

Dans le stockage d'énergie thermique sensible, l'énergie thermique est stockée en augmentant la température d'un solide ou d'un liquide. Le stockage sensible de la chaleur consiste à accumuler de l'énergie thermique dans le corps en augmentant sa température sans changer son état.

La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle à la variation de température et à la quantité de matière concernée et à sa capacité calorifique telle que présentée dans l'équation (2 -1) (**H. Mehling et L.F. Cabeza, 2008)** :

$$Q_{sensible} = m.\, c_p.\, \Delta T = m.\, c_p.(T_f - T_i) \quad [\, J \,] \qquad (2\text{ -}1)$$

Avec :

m : masse du matériau utilisé [Kg].

***Cp* :** chaleur massique du matériau utilisé [J/Kg.K].

ΔT: Différence entre température moyennes finale et initiale du stockage [K].

T_i **:** Température initiale du stockage [K].

T_f **:** Température finale du stockage [K].

Ce mode de stockage est le moyen le plus ancien, le plus simple et le moins onéreux d'emmagasiner de l'énergie. Cependant, la faible densité de stockage de ce type de système est un inconvénient majeur. Le stockage par chaleur sensible s'accompagne d'une élévation de la température mais la structure moléculaire du matériau de stockage ne change pas. Selon l'état physique du matériau de stockage, le stockage par chaleur sensible a deux variantes **(M. Boutaoui,2015) :**

- Le stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide.
- Le stockage par chaleur sensible avec un matériau solide.

2-2-2-a-1.Matériaux de stockage à chaleur sensible:

a- Stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide:

- Stockage par l'eau:

L'eau est le meilleur moyen de stockage à basse température. Comparé à d'autres objets, il a la plus grande capacité thermique massique. De plus, l'eau est bon marché et facilement disponible. Les différentes formes de stockage de l'eau sont :

- Le réservoir.
- Les nappes aquifères naturelles en sous-sol…etc**.(M.Ahmad,2004).**

- Stockage par les autres fluides :

✓ **Huiles organiques :** elles ont une pression de vapeur inférieure à celle de l'eau et peuvent être utilisés à des températures supérieures à 300 ° C mais inférieures à 350 ° C pour éviter la décomposition.

✓ **Sels fondus :** Le plus courant est l'hydroxyde de sodium. Il a un point de fusion de 320°C et il est possible de l'utiliser à une température supérieure à 800°C. Mais, il est fortement corrosif et il est difficile à Stocker à fortes températures **(L.L. Vasiliev et al.2000).**

b - Stockage par chaleur sensible avec un matériau solide:

Les pierres, les métaux, le béton, le sable et la brique sont les matériaux généralement utilisés pour le stockage thermique aux faibles et hautes températures parce qu'ils ne peuvent ni secongeler ni entrer en ébullition **(C.Flory-Celini,2008).**

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau 2.1.

Tableaux 2.1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C **(A.Akrouche, 2011)**

Matériaux	Densité (kg/m^3)	Chaleur spécifique (J/kg K)	Capacité thermique Volumétrique (J/m^3K)
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
Terre	7900	452	3.57

Acier	7840	465	3.57
Eau	988	4182	4.17

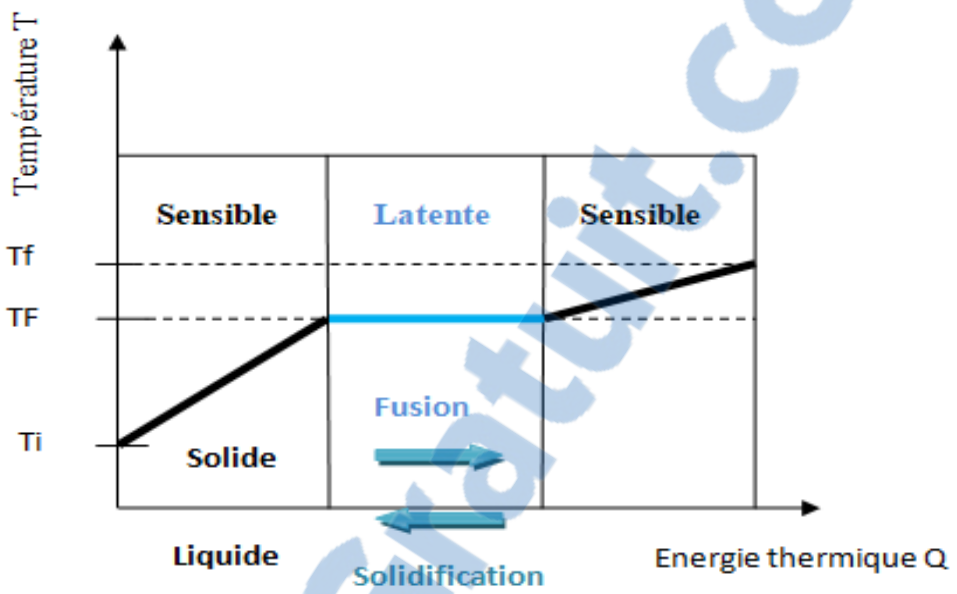

Figure 2.3: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

2-2-2-a-2. Quelques exemples de stockage de chaleur sensible :

De nombreuses applications de ce type de stockage existent dans le secteur du bâtiment. Les matériaux entrant en jeu dans le stockage par chaleur sensible sont stockés dans des réservoirs de natures différentes comme des cuves de petites ou grandes tailles (notamment des ballon d'eau chaude), dans des systèmes de stockage souterrain, en aquifère artificiel, ou encore dans des matériaux spéciaux : matériau utilisé pour fabriquer des briques réfractaires à haut pouvoir d'accumulation). **(M.Duquesne,2013).**

Rapport-Gratuit.com

2-2-2-b. Stockage par chaleur latente :

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière. Elle intervient aussi dans les changements allotropiques. La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit non par un accroissement de la vitesse des molécules, mais par une augmentation de leur énergie potentielle leur permettant de quitter leur position d'équilibre. C'est la raison pour laquelle la température reste constante pendant toute la transformation. Cette température correspondant à la température de la transition de phase. **(M.Ahmad,2004)**,

Il existe plusieurs chaleurs latentes:

- **Chaleur latente de liquéfaction** : quantité de chaleur pour passer de l'état (solide à liquide).
- **Chaleur latente de vaporisation** : quantité de chaleur passer de l'état (liquide à gazeux).
- **Chaleur latent de condensation** : quantité de chaleur pour passer de l'état (gazeux à liquide).
- **Chaleur latente de solidification** : quantité de chaleur pour passer de l'état (liquide à solide)

(M.Pierre Pedro, 2013).

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

$$Q = m\,(h_f - h_i) = m\Delta h_f \quad [J] \qquad (2\text{-}2)$$

Où Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, il faut porter le matériau de sa température initiale Ti à sa température de fusion Tf et l'on écrit

$$Q = m\,(h_f - h_i) = m\,c_p\,(T_f - T_i) + m\Delta h_f \quad [J] \qquad (2\text{-}3)$$

Avec :

m : masse du matériau utilisé [Kg].

Cp : chaleur massique du matériau utilisé [J/Kg.K].

ΔT: Différence entre température moyennes finale et initiale du stockage [K].

T_i **:** Température initiale du stockage [K].

T_f **:** Température de fusion du stockage [K].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

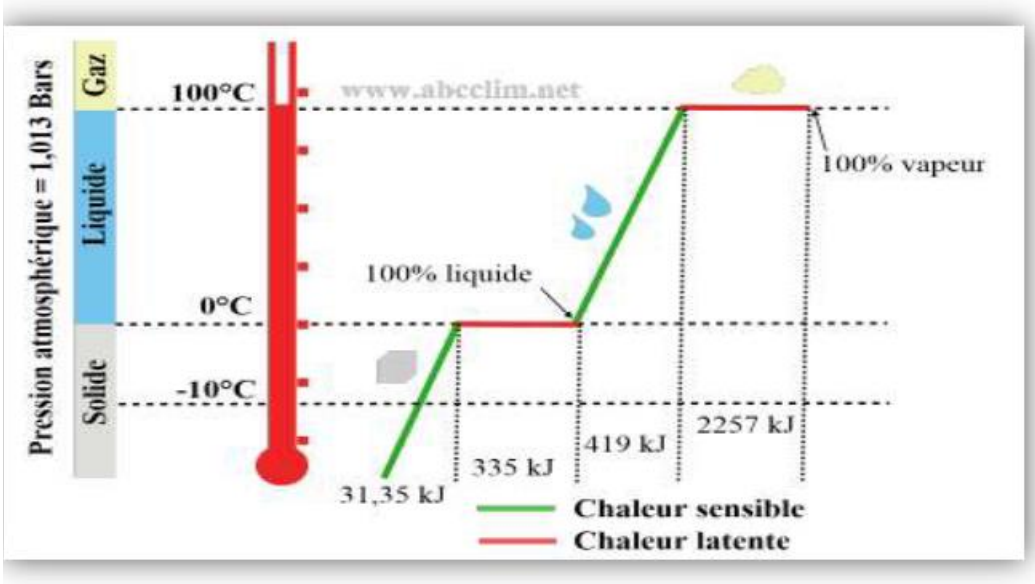

Figure 2.4: Changement d'état d'un corps pur homogène.

2-2-2-b-1. Les avantages de stockage par chaleur latente:

les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi (**M.Ahmad,2004)**

✓Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.

✓Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.

✓Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2-3. Matériaux à Changement de Phase (MCP) :

2-3-1. Description :

Les matériaux à changements de phase (MCP) sont des composés qui stockent et libèrent de la chaleur latente lors d'une transformation de phase (solide-liquide) à température constante. Leur principe de fonctionnement est simple et est illustré par la figure (2.5). Comme pour la transformation de la glace en eau qui se produit lorsque la température dépasse les 0°C, les matériaux à changements de phase changent d'état (solide-liquide) en fonction de leur température de fusion.

Dans les bâtiments, il s'agit du même principe. Une fois que la température du matériau à changement de phase atteint son point de fusion, il commencera à fondre et à absorber une partie de l'énergie environnante afin de la stocker en grande quantité et, dès que la température devient inférieure, l'énergie stockée est restituée. Cette transition de phase est facilitée par l'augmentation de la surface d'échange entre le MCP et l'air ambiant. Généralement, il est intégré au sein des constituants d'une paroi pour faire diminuer les pics de température d'une pièce et de limiter l'utilisation de systèmes coûteux en énergie. Le MCP peut être couplé avec un système de ventilation nocturne où à une climatisation de dimensionnement réduite, pour qu'il puisse se générer plus efficacement (décharge de l'énergie).

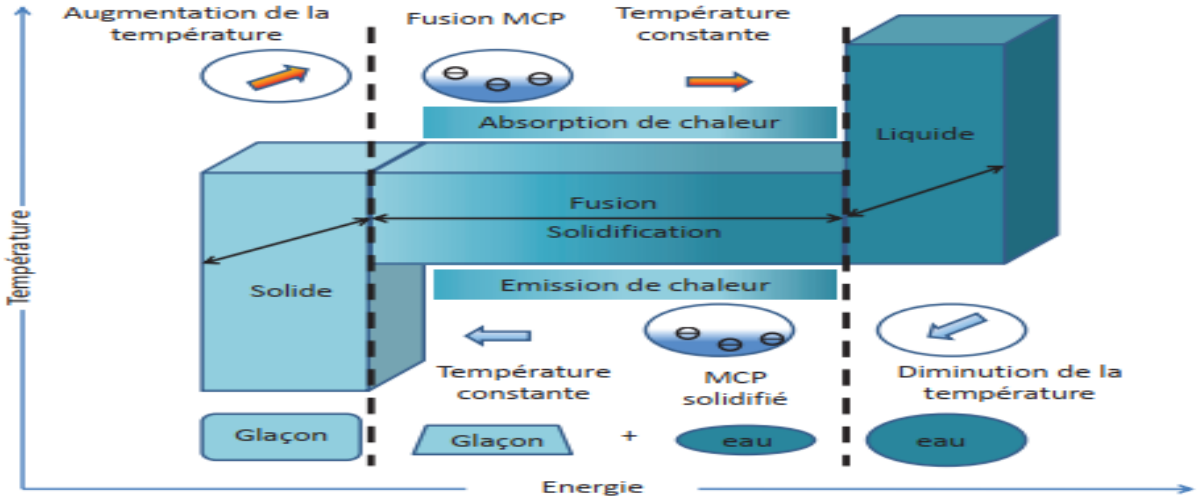

Figure 2.5: Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase **(S.Guichard,2013)**

2-3-2. Historique des MCP :

Depuis la première crise pétrolière des années 70, le MCP a été étudié avec des sels hydratés. Ils étaient testés initialement pour stocker l'énergie solaire. Cependant, de nombreux problèmes sont apparus et la communauté scientifique s'est vite rendu compte que le MCP ne pouvait pas être utilisé. Les principaux problèmes rencontrés étaient : faible limitation du nombre de cycles d'utilisation.

En effet, l'émergence de nouveaux MCP solide / liquide sous formes stables a permis de redémarrer des applications dans de nombreux domaines. La plupart des formes de MCP stables sont des matériaux composites contenant une matrice solide inerte, dont les pores sont remplis de MCP. Cette matrice inerte assure la stabilité structurelle globale et empêche la phase liquide MCP de s'écouler à travers le récipient **(J.L. Dauvergne, 2008)**. A basse température (< 120 ◦C), Les recherches se sont accentues dans les domaines de :

-Micro-encapsulation de la paraffine dans des polymères.
-des matrices inertes qui sont imbibées de paraffine pour améliorer la conductivité thermique du MCP.
-Matériaux polymères/MCP qui sont obtenus par fusion et par un mélange d'un polymère (exemple : polyéthylène à haute densité) et des paraffines.
- Intégration des paraffines micro-encapsulées dans des composites en utilisant des procédés d'imprégnation et d'imbibition.

2-3-3. Différents changements d'état :

Parmi les techniques de stockage de la chaleur thermiques, le stockage d'énergie thermique sous forme de chaleur latente permet notamment une capacité de stockage d'énergie élevée et ses caractéristiques. à une température constante qui correspond à la phase de transition (température de matière du changement de la phase (MCP). Le changement de phase peut être dans la forme :

- Liquide-Gaz.

- Solide- solide.
- Solide-gaz.

Tableau 2.2 : Avantages et inconvénients des différents Changements d'état (**M. Ahmad,2004).**

Changement de phase	Avantage	Inconvénients
Liquide /Gaz	-Grande valeur de la chaleur latente	-Grande 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

Ces constatations amènent les remarques suivantes :

• Le changement de phase **liquide/gaz** met en jeu les plus grandes chaleurs de changement d'état mais il présente un grand changement volumique, ce qui rend les applications peu pratiques et pose un problème de stockage qui peut être crucial. Pour contourner de problème, la phase gaz peut être stockée par absorption (H_2O/Li Br), adsorption (H_2O /zeolite, CO_2/ carbone activé) ou réaction (NH_3/ sels). Ces stockages présentent quelques intérêts spécifiques comme de fonctionner à la température ambiante. Mais ils ont des inconvénients comme la complexité, la toxicité, la corrosion avec le conteneur et le besoin d'une grande efficacité d'échange thermique.

• Dans le cas d'un changement de phase **solide/solide**, le matériau absorbe et cède la chaleur comme dans le cas solide/liquide, mais ne devient jamais liquide sous les conditions normales, il devient alors plus ou moins dur. Cet avantage est largement compensé par les faibles chaleurs latentes et par la difficulté de trouver des niveaux de températures de changement d'état compatibles avec les applications.

• Le changement de phase **solide/liquide** met en jeu des chaleurs latentes d'importance moyenne mais ne présente pas de changements de volumes incompatibles avec un stockage facile. De plus,

il existe un choix important de matériaux dont les niveaux de températures de changement d'état ont des valeurs compatibles avec de nombreuses applications. C'est ce type de changement de phase que nous retiendrons par la suite.

2-3-4. Choix d'un MCP :

La première question qui peut se poser concerne l'utilisation de l'eau comme MCP. En effet, l'eau a d'excellentes propriétés de chaleur latente. Cependant, avec l'eau, nous sommes limités aux températures de 0 °C ou 100 °C (à pression atmosphérique) et de nombreuses applications nécessitent d'autres niveaux de températures. Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée **(Feldman et al. 1993)** :

- ✓ **Critères thermiques** :

  -le niveau de la température de changement de phase qui dépend de l'application.

  - la valeur de la chaleur latente de fusion (>130 kJ / kg pour être compétitif).

  - une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides.

  - une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.

- ✓ **Critères physiques :**

  - un faible changement de volume lors du changement d'état pour le dimensionnement du stockage et sa tenue à la pression.

  - une grande masse volumique pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible.

  - une fusion congruente lors de l'utilisation d'un corps composé.

- ✓ **Critères cinétiques :**

  - des cinétiques de charge et de décharge rapides.

  - pas de surfusion qui détruit la cinétique et altère la possibilité de déstockage.

- ✓ **Critères de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux :**

  - stabilité du corps lors des cycles thermiques.

  - compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase pour éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.

- ✓ **Critères chimiques:**

  - stabilité chimique des corps avec le temps et avec les niveaux de température.
  - un bon taux de cristallisation.
  - ininflammabilité.
  - non-toxicité.

- ✓ **Critères économiques** :

  - un coût raisonnable.
  - une bonne disponibilité.

2-3-5. Classification des matériaux à changement de phase :

Il existe de nombreux matériaux a changements peuvent être utilisés dans n'importe quelle gamme de température souhaitée. Le MCP peut être divisé en trois catégories (organique, inorganique et eutectique) en fonction de ses propriétés chimiques, comme le montre la figure 2.6. Du point de vue de la température et de la chaleur latente du changement de phase, un grand nombre de produits chimiques organiques et inorganiques peuvent être identifiés comme MCP.

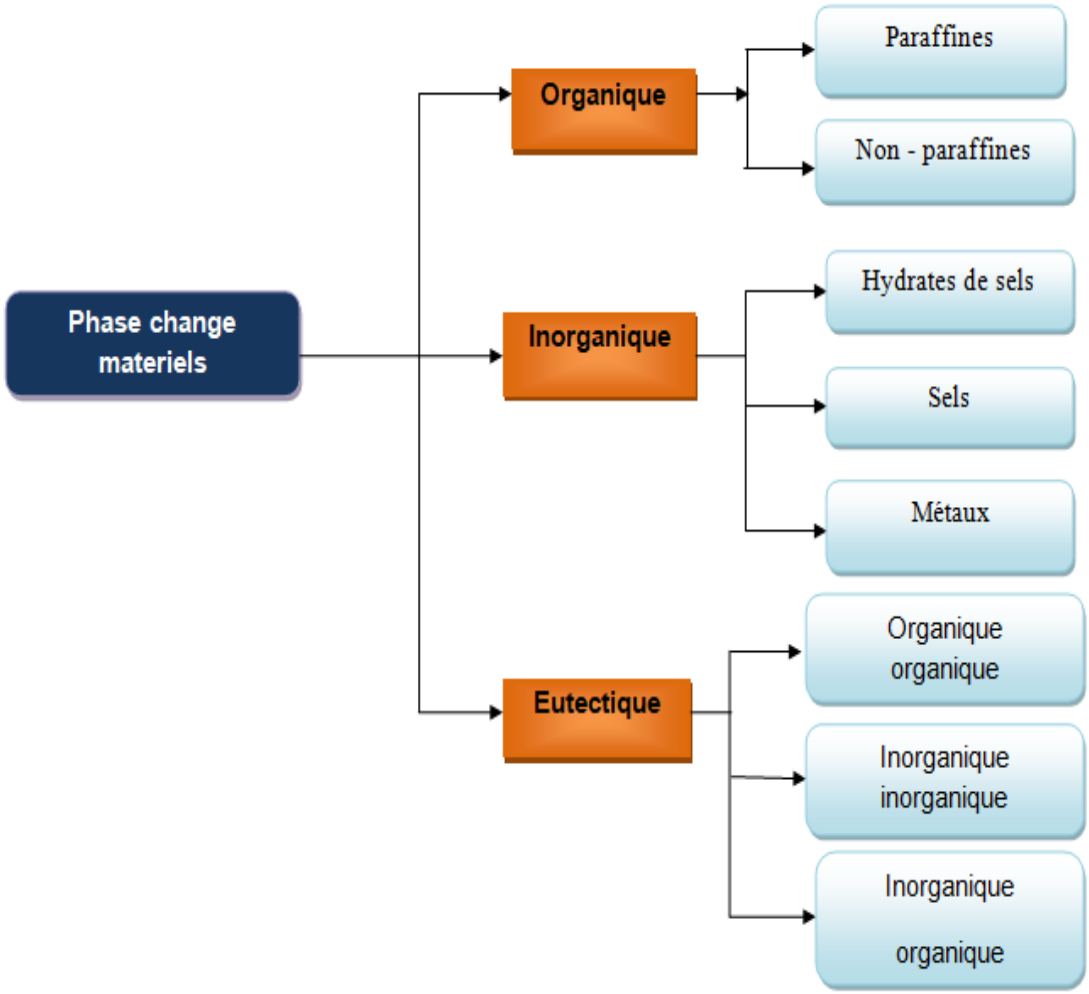

Figure 2.6 : Classification des MCP proposée par **(A. Abhat ,1983)**

a- MCP organiques :

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables

et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables **(M.M.Farid et al.2004; T.Vineet Veer et D.Buddhi, 2005)**.

➢ Paraffine :

Les paraffines sont majoritairement constituées d'alcanes (entre 75 % et 100 %), les alcanes sont des hydrocarbures de formule générale C_nH_{2n+2}. Les paraffines pures sont uniquement constituées d'alcanes, c'est le cas de l'octadécane dont la formule brute est $C_{18}H_{38}$.Dans le cas des alcanes (C_nH_{2n+2}**)** la température de fusion ainsi que la chaleur latente de fusion augmentent quand la chaîne carbonée (n) augmente **(S.Wolfgang,2004)**.

Figure 2.7 : Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulées.

Le tableau ci-dessous donne les propriétés physiques de paraffine

Tableau 2.3: Exemples de propriétés physiques de paraffines **(A.Akrouche,2011)** .

	Paraffines			
	Tétradécane	**Hexadécane**	**Octadecane**	**Eicosane**
Formule	$C_{14}H_{30}$	$C_{16}H_{34}$	$C_{18}H_{38}$	$C_{20}H_{42}$
Température de fusion [°C]	5,5	16,7	28	36,7
Enthalpie de fusion [kJ/kg]	226	237	244	247
Conductivité thermique [W/m. °C]	0,15	0,15	0,15	0,15
Capacité thermique massique [kJ/kg. °C]	2,07	2,11	2,11	2,21
Masse volumique solide[kg/m3]	825	835	814	856
Masse volumique liquide [kg/m3]	771	776	774	778
Retard à la solidification [°C]	Aucun	Négligeable	Négligeable	Aucun
Pression de vapeur [Pa]	133 à 75°C	133 à105°C	133 à 75°C	133à100°C
Tension superficielle [N/m]	$27{,}4.\ 10^{-3}$	3,4	$27{,}4.10^{-3}$	_
Viscosité [Cp]	2,1	_	3,4	_

➢ Les Non-paraffines :

Il s'agit de la plus grande famille de matériaux à changement de phase dont les propriétés sont très différentes. Elles sont considérées comme la plus grande catégorie pouvant servir de stockage de l'énergie thermique. Des études ont été menées par **(A. Abhat, 1978; A.Abhat et al, 1981)**, **(D.Buddhi et R. Sawhney, 1994)**, **(G.A.Lane, 1983)** pour identifier les candidats potentiels pour le stockage de l'énergie thermique. Ces recherches portaient principalement sur un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcools et de glycols. Elles ont conclu que ces matières sont extrêmement inflammables et ne doivent en aucun cas être exposées à une forte température, à des

Rapport-Gratuit.com

flammes ou à des agents oxydants. Ces matières organiques peuvent être divisées en en deux groupes : les acides gras et Esters d'acides gras.

Les acides gras et esters d'acides gras ont à priori de bonnes aptitudes pour une application dans le stockage d'énergie thermique dans le bâtiment. En effet ils ont une bonne stabilité thermique par rapport aux cycles répétitifs de fusion/solidification, ils ont un coût très élevé par rapport aux paraffines **(S.M. Husnain,1998)**

Figure 2.8: Acides gras.

b-MCP inorganiques :

Les composés inorganiques sont essentiellement constitués de sels, de métaux ou d'alliage. Les composés inorganiques tels que les sels hydratés ont des chaleurs latentes par unité de volume plus élevées que celles les composés organiques. En outre, ils sont non inflammables et sont moins couteux que les composés organiques.

A la différence des composés organiques, les composés inorganiques sont recyclables, cependant ils sont plus moins corrosifs et présentent des problèmes de surfusion.

Les sels hydratés sont les produits inorganiques les plus appropriés pour le stockage des d'énergie thermique à basse température. Ils sont constitués de sels et d'eau dans des proportions bien définies **(H.saib, 2009)** .

Sur le tableau suivant [Tableau 2.4] on donne les principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques.

Tableau 2.4: Différents hydrates salins **(C.K. Jotshi et al. 1992)**.

Hydrates salins	La température de fusion [°C]	La chaleur de fusion [kJ/kg]
Sel de Glauber ($N_{a_2}SO_4.10H_2O$)	32,4	252
Chlorure de calcium, hexa hydrate $C_aCl_2.6H_2O$	27 - 30	190
Acétate de sodium tri hydrate $N_aCH_3COO.3H_2O$	58	170 à 264
Hydroxyde de Barium octahydrate $B_a(OH)_2.8H_2O$	78	301
$NH_4.Al(SO_4)_2.12H_2O$	95	238,5
Phosphate de sodium dodécahydrate $N_{a_3}.PO_4.12H_2O$	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate sous forme de Capsules (Calortherm 70)	70	184
Carbonate de sodium déca hydrate$N_{a_2}CO_3.10H_2O$	32 - 35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate$C_a(NO_3)_2.4H_2O$	40 - 43	140

Figure 2.9: Sels Hydratés.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

➢ Métaux :

Il s'agit essentiellement des métaux à fusions basses et des métaux eutectiques. Cette catégorie n'a pour l'instant pas été envisagée pour la technologie de MCP en raison de leur poids. Leurs caractéristiques principales sont: une faible chaleur de fusion par unité de poids, une forte chaleur de fusion par unité de volume, une conductivité thermique élevée, une chaleur spécifique faible et une pression en vapeur relativement élevée. Les plus prometteurs des métalliques **(Sharma et al, 2009)** sont donnés par le tableau 2.5 :

Tableau 2.5 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métalliques

Les métalliques		
Matériau	**Température de mélange (◦C)**	**Chaleur latente de fusion (kJ·kg−1)**
Gallium	30	80,3
Cerrobend eutectique	32,6	32,6

c- Eutectiques :

Les eutectiques peuvent être organiques ou inorganiques. A la différence des mélanges habituels, un eutectique est un mélange de deux corps purs qui fondent et se solidifient à température constante. Il se comporte en fait comme un corps pur (En chimie, un Corps pur est composé d'un seul type de constituant contrairement au mélange (**G.P. Fernanda ,1988).**

-Chacun des deux corps a une fusion et une solidification congruente, c'est-à-dire une fusion ou solidification dans laquelle les deux phases sont de même composition. Le changement d'état des eutectiques se fait presque toujours sans ségrégation.

Certains eutectiques ont des températures de fusion optimales pour une application dans le cadre du stockage d'énergie thermique **(V.V. Tyagi, D. Buddhui.2005).** Ils peuvent être utilisés comme matériaux de stockage dans les collecteurs destinés au chauffage et au rafraîchissement des bâtiments

Figure 2.10 : Acide Laurique.

Tableau 2.6: Liste de quelques eutectiques.

Eutectiques Inorganiques	Points de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ /kg)
$49.3\%MgCl.6H_2O+50.7\%Mg(NO_3).6H_2O$	58	132.3
61.5% Mg $(NO_3).6H_2O$ $+38.5\%$ NH_4NO_3	51	131.1
58.3% Mg $(NO_3).6H_2O+41.7\%MgCl_2.6H_2O$	58	106
$CaCl_2.6H_2O$ $+CaBr_2.6H_2O$	14	140
Eutectique Organique		
Acides Caprique-Laurique	18	120
Acides Palmitique-Laurique	33	145
Acides Stéarique Laurique	34	150

2-3-6. Avantages et inconvénients des trois types de MCP :

Le Tableau 2.7 énonce les principaux avantages et inconvénients des trois types de MCP **(M. Boutaoui,2015)**

	Avantages	Inconvénients
Organiques	-Simple d'utilisation. - Non corrosif. -Pas de surfusion. - Disponible pour une large Gamme de température. - Compatible avec les matériaux conventionnels de construction. - Réactifs et recyclables.	-Généralement cher. -Faible chaleur latente. - Large de changement d'état. - Peut-être inflammable. - Faible conductivités thermique à l'état solide et l'état liquide.

Inorganiques	-Forte chaleur latente de fusion. - Bonne conductivité thermique. - Non-inflammable. - Fusion nette (plage de fusion étroite). - Bon marché et facilement disponible.	-Corrosif pour la plupart des métaux. -Décomposition de phase. -En rapport avec la ségrégation et la corrosion et surfusion.
Eutectique	- Ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure. - Leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés Organiques purs.	- Les données seulement limitées sont disponible sur propriétés. Thermos physiques comme l'usage de ceux-ci. - Les matières sont très nouvelles application au stockage thermique.

2-3-7. Classe des MCP :

Il a plusieurs classes de MCP, les MCP les plus utiliser sont :

➢ Matériaux changement de phase SP :

Les MCP de Rubitherm SP sont des MCP (matériaux à changement de phase) à base de mélanges d'eau salée et d'additifs. Suivie d'un chiffre qui correspond à l'intervalle de fusion par exemple SP-50 ou SP-30 etc. La création de la chaleur latente mêle SP a conduit d'une nouvelle et innovante classe des MCP non inflammables. SP consiste en une composition unique d'hydrates de sel et de composés organiques qui rend vraiment le cycle stable sans détérioration au fil du temps **(H.saib, 2009).**

Figure 2.11 : MCP Classe SP

- **Application:**

SP est largement utilisé emballés dans nos CSM-panneaux propriétaires pour les systèmes de refroidissement actif et passif et de chauffage, comme par exemple des climatiseurs et des éléments de plafond et le mur. Dans cette forme SP devient rapidement le MCP préféré pour une utilisation

dans l'industrie de la construction. L'utilisation de différents additifs ses propriétés peut être adaptées aux besoins particuliers des clients. Il peut également être transformé en substance ou de la structure d'absorption **(H.saib, 2009).**

- **Avantage :**

-Une performance stable tout au long des cycles de changement de phase.

-Grande capacité de stockage thermique.

-surfusion limitée.

-SP-21 à SP26E pas inflammabilité.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

-non toxique.

-Les températures de fusion différentes entre -21 ° C et 90 ° C

➢ Matériaux changement de phase RT :

Les MCP de Rubitherm sont appeler RT suivie d'un chiffre qui correspond à la température de fusion par exemple RT25 ou RT27 etc. Aussi ils sont fabriqués a base de paraffine. Le stockage d'énergie thermique avec un matériau RT absorbe une grande quantité de chaleur appelée chaleur latente, à une température relativement constante. Lorsque ce processus de changement de phase est inversé, c'est à dire du liquide à solide ; la chaleur latente précédemment stockée est libérée **(H.saib, 2009)**.

Figure 2.12: MCP Classe RT.

- **Caractéristiques :**

RT est disponible dans une large gamme de températures de fonctionnement de 10 ° C à environ 82 ° C. Si vous ne trouvez pas la température besoins de votre application, s'il vous plaît contactez-nous - la plupart des températures peuvent être fabriqués sur mesure **(H.saib, 2009).** En outre, la température des points spécifiques de notre gamme de RT de grande capacité (par exemple RT 5 HC) est disponible. Ceux-ci ont la capacité de stockage de chaleur de 25% à 30 % plus latente que la RT classique – nous contacter pour plus de détails ou d'autres points de température.

- **Avantage :**

- la capacité de stockage d'énergie thermique élevée.
-stockage de la chaleur et de la libération ont lieu à température constante.
-produit de longue durée.

2-3-8. Conditionnement des matériaux à changement de phase :

Le choix de la méthode de conditionnement du matériau à changement de phase est essentiel et doit se conformer et répondre aux besoins de l'application considérée. Par ailleurs, afin d'assurer le bon fonctionnement et la durabilité du système de stockage et, également afin d'éviter d'éventuels problèmes de corrosion ou de fuite du MCP, la nature du MCP doit être adaptée au système de stockage. Il existe de nombreuses techniques de conditionnement des matériaux à changement de phase, dont en particulier, la technique d'encapsulation (micro et macro-encapsulation). Les MCP peuvent être également intégrés par incorporation directe dans le « mélange humide » des matériaux du bâtiment ou par absorption (imprégnation) du MCP fondu dans les matériaux poreux du bâtiment **(M.Bahrar,2018).**

2-3-8-1. Macro-encapsulation :

La macro-encapsulation consiste à encapsuler le matériau à changement de phase dans des tubes, sachets, de sphères ou de panneaux. Ces conteneurs doivent être fabriqués avec des matériaux de bonnes conductivités et assez rigides pour limiter les risques de fuite du MCP, tels que l'aluminium, le cuivre, etc. La macroencapsualtion offre l'avantage de limiter les risques de fuite. La figure (2.13) présente quelques exemples de macro-encapsualtion(**M.Bahrar,2018).**

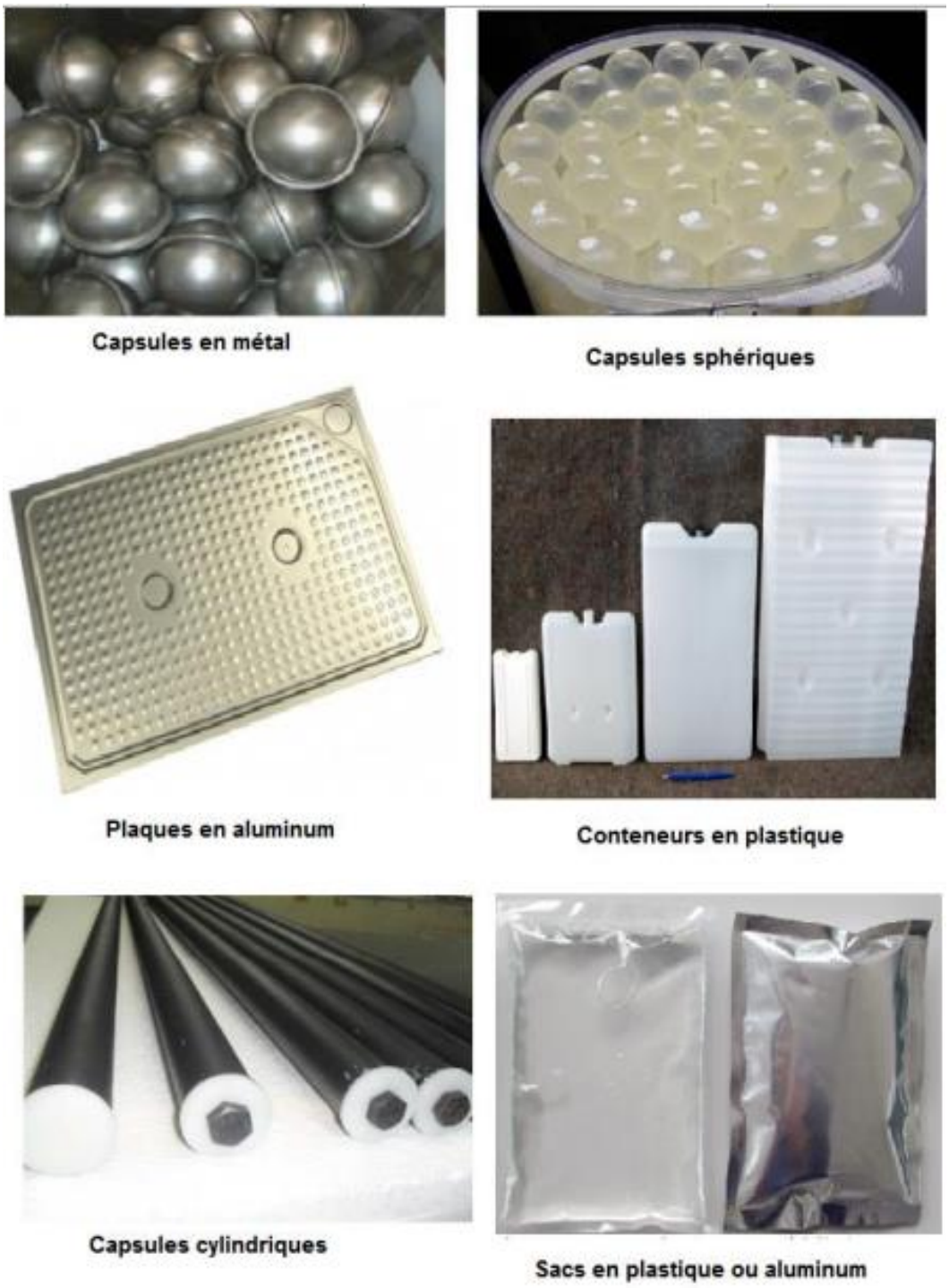

Figure 2.13: Exemple de MCP macro-encapsulés.

2-3-8-2.Micro-encapsulation :

La micro-encapsulation consiste à encapsuler le matériau dans des sphères ou des capsules de diamètre allant de 1 µm à 1000 µm **(A.Waqas et Z. Din,2013)**. Les particules peuvent être incorporées aux matériaux de construction. La technique d'encapsulation permet d'éviter la fuite du matériau à changement de phase lors de la fusion, et ainsi toute interaction avec les autres matériaux de construction.

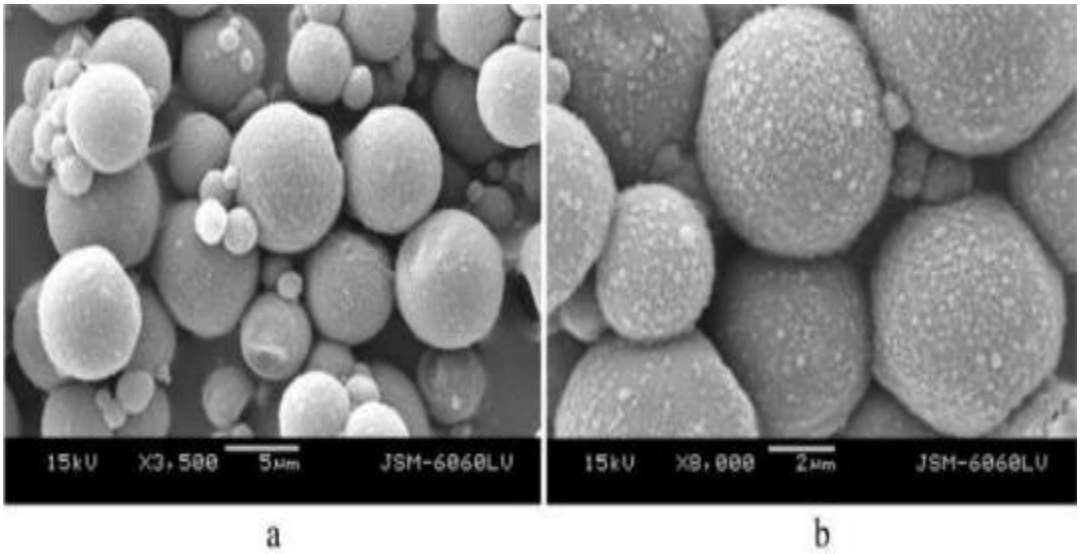

Figure 2.14 : Images MEB de microcapsules de MCP, produites par polymérisation, après séchage par pulvérisation de leur suspension aqueuse : (a) grossissement 3500x et (b) grossissement 8000x **(N. Sarier et E. Onder,2012)**.

2-3-9. Domaines d'application des MCP dans le bâtiment :

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) en vue du stockage de chaleur dans les bâtiments a été l'une des premières applications pour ces matériaux. Les premiers panneaux de construction de bâtiment contenant les MCP sont réalisés au Mexique par Wright et Balcomb **(B. Binet,1998)**. L'intégration de matériau à changement de phase (MCP) dans l'enveloppe d'un bâtiment constitué une solution pour améliorer la performance thermique.

✓Les plaques de plâtres-MCP :

Les plaques de plâtres-MCP sont constituées en général d'un matériau de construction léger et du MCP. Les plaques de plâtres-MCP sont fabriquées en général soit par immersion de la plaque de plâtre dans le MCP, soit par ajout du MCP lors de la fabrication de la plaque de plâtre. Ces

plaques de plâtres-MCP sont fixées sur les murs sous la forme d'un sandwich composés d'isolant, de polystyrène et du plâtre-MCP **(S.E Ango,2011)**.

Schossig et al. **(S Atul et al., 2007)** ont conçu un modèle de plaques de plâtre avec des microencapsulés (Figure 2.15) commercialisé en Allemagne.

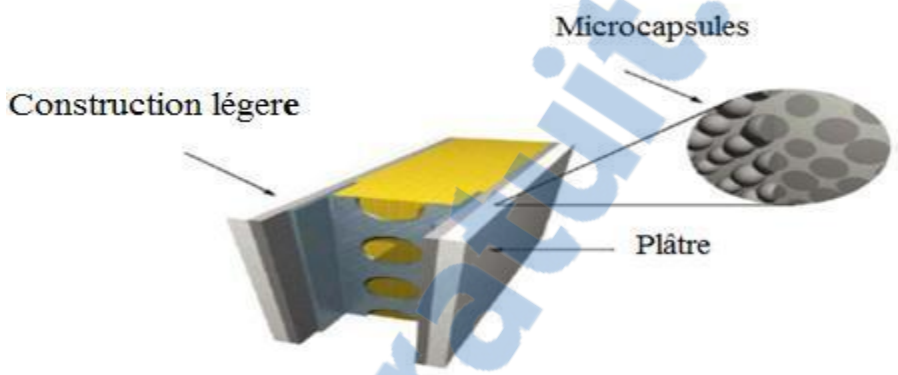

Figure 2.15 : Modèle de mur contenant une Plaque de plâtre-MCP fabriqué par Schossig et al. **(d'après S.Atul,2007).**

✓Murs trombes à base de MCP :

Les murs trombes à base MCP sont composés d'un mur de maçonnerie ordinaire contenant des MCP espacés de 10 cm environ d'une couche de verre ou d'un vitrage en plastique (figure 2.16) **(A. Sharma et al.2009)**.

Rapport-Gratuit.com

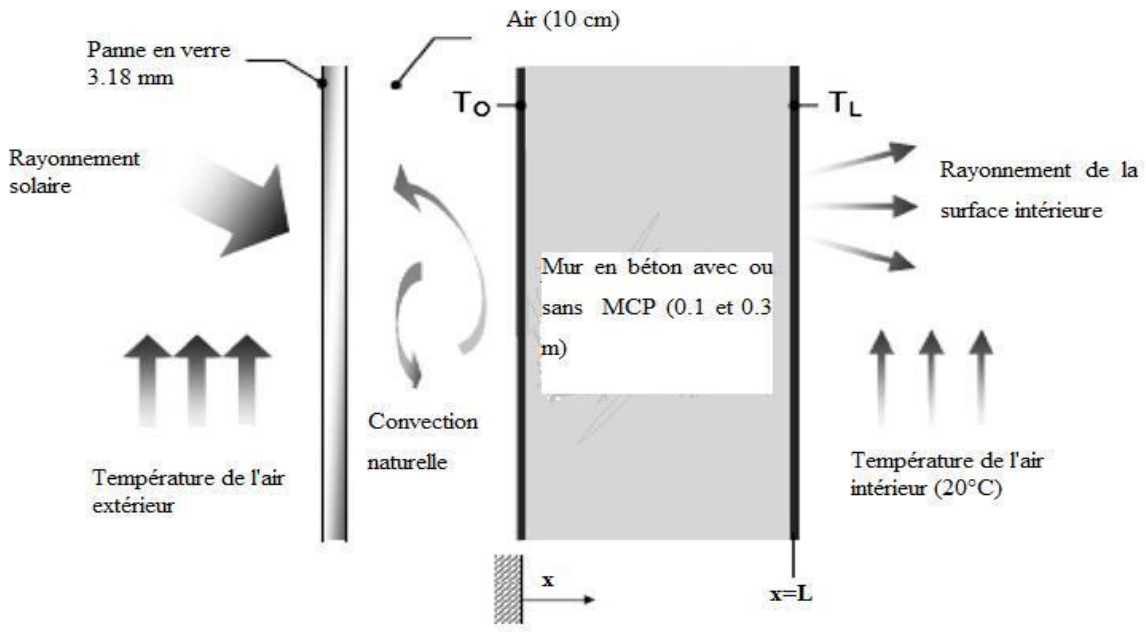

Figure 2.16 : Configuration d'un modèle de mur trombe MCP **(A. Sharma et al.2009)**

Différents MCP ont été expérimentés pour avoir le meilleur rendement thermique d'un mur trombe à base de MCP : Les différents travaux de **(A. Sharma et al.2009)** ont montré que les murs trombe à base de MCP nécessitent moins d'espace entre le mur et la couche de verre ou plastique que les murs trombe traditionnels. Ils sont plus légers que les murs trombe traditionnels.

✓ Blocs de béton-MCP :

Le centre d'étude du bâtiment (université de Concordia) à Montréal au Canada a mis au point des blocs de béton à base MCP. Ils ont utilisé différents MCP : la paraffine, stéarate de butyle, dodecanol et polyéthylène. Au cours des différents essais sur le rendement thermique de ces blocs de béton-MCP, il ressort que les blocs de béton-MCP à base de paraffine ont la capacité de stockage d'énergie (par mètre carré) plus importantes que les autres MCP expérimentés **(A. Sharma et al.2009)**.

Figure 2.17: blocs de béton contenant MCP.

✓ Enduits à base de MCP :

Actuellement sur le marché les enduits à base de MCP (fabriqués par Delta ®, maxit clima, etc) existent sous la forme d'un enduit prédosé « prêt-à-gâcher ». Ils sont à appliquer sur une épaisseur d'environ 15 mm **(J.Venstermans, 2010).**

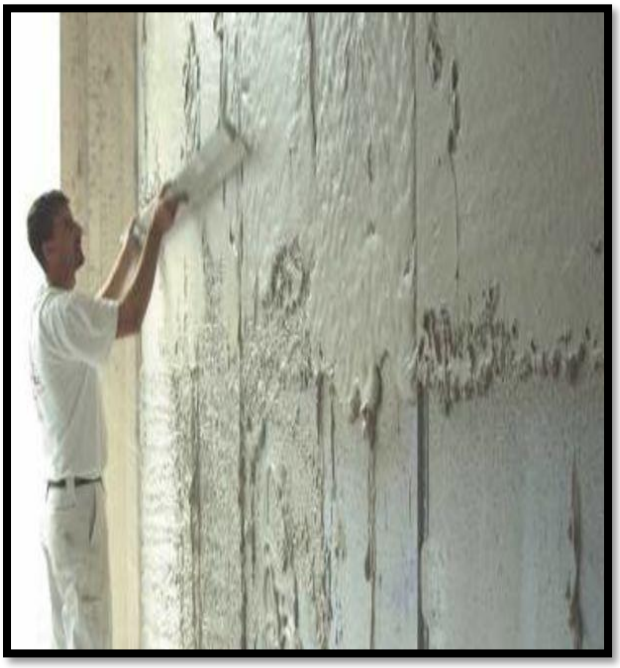

Figure 2.18 : Enduit à base de MCP.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

✓ MCP dans les rideaux :

Les rideaux à base de MCP sont aussi expérimentés pour améliorer le confort résidentiel. Le principe de fonctionnement consiste à laisser les fenêtres ouvertes afin que les rideaux soient exposés aux rayonnements solaires. La fusion des MCP permet de rafraîchir l'intérieur du bâtiment. Au cours du refroidissement nocturne ou par temps nuageux, le rideau libère la chaleur solaire emmagasinée ce qui permet aux MCP de se solidifier et la salle de se réchauffer (figure 2.19) **(A. Sharma et al.2009)** .

Figure 2.19: Rideaux à MCP (A. Sharma et al.2009).

✓ MCP dans les fenêtres :

Les travaux sur les fenêtres à base de MCP les connus sont ceux du cabinet architectural GlassX fondé par Dietrich Schwarz. Il a mis au point les fenêtres GlassX. Ces dernieres sont composées de quatre éléments au sein d'un seul ensemble fonctionnel : une isolation translucide, une protection contre les surchauffes estivales, un matériau à changement de phase intégré dans des conteneurs hermétiquement scellés en polycarbonate peints en gris pour favoriser l'efficacité de l'absorption. En général, c'est un MCP à base de sel hydraté avec une température de fusion aux alentours de 27 °C qui est utilisé. Cette paroi est scellée par un verre de sécurité trempé de 6 mm qui peut être agrémenté d'une sérigraphie esthétique du côté intérieur (Figure 2.20 a). Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est supérieure à 40 °C (été), il y a un réfléchissement total des rayons solaires (Figure 2.20 b) sur la fenêtre. Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est inférieure à 35 °C (hiver),les rayons solaires traversent complètement la fenêtre (Figure 2.20 c).

La capacité de stockage de l'énergie des fenêtres GlassX est dix fois plus importante que le béton ordinaire **(S.B.E Ango,2011)**.

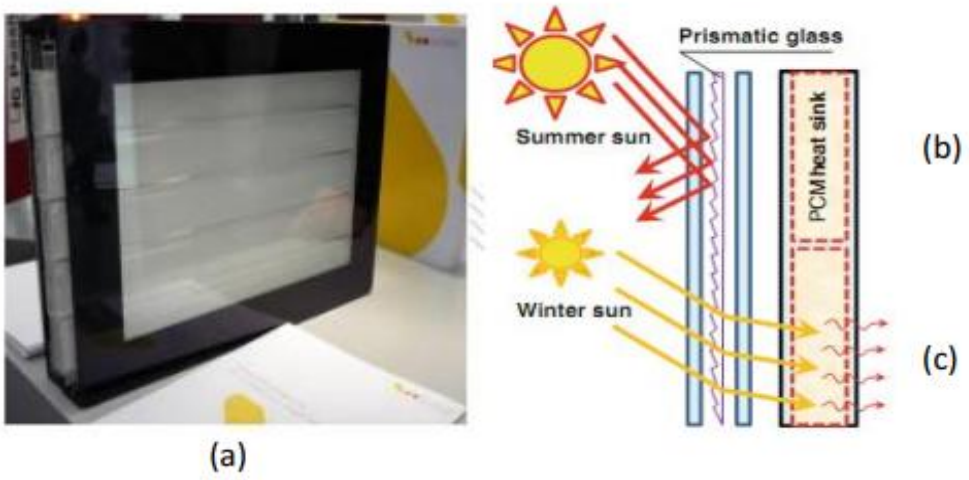

Figure 2.20 : Fenêtre GlassX fabriqué par Dietrich. (a) prototype à l'échelle 1, (b) évolution des rayons solaires en été (c) évolution des rayons solaires en hiver **(S.B.E Ango,2011)**.

✓ MCP dans le plafond et dans le plancher :

Les produits à base de MCP installés dans les plafonds et les planchers pour améliorer le confort du bâtiment sont en général des panneaux à bas de MCP.Différents fabricants des produits à base de MCP (Solairked, Rubitherm, Cristopia, etc.)proposent un panel de panneaux à base de MCP. Le panneau le plus connu est le panneau DuPont™ Energain®. Il se présente sous la forme de panneaux avec 2 faces en aluminium dont les extrémités sont recouvertes de ruban adhésif en aluminium (figure 2.21 a). Le matériau central est un mélange de copolymère et de cire de paraffine à 60 % qui confère au panneau sa fonctionnalité. Il a une chaleur latente de stockage de 315 kJ/m² et une température de fusion de 22 °C. La dimension des panneaux est de(**1m x 1.2m)**avec une épaisseur de **5,26 mm** Il pèse environ 5 kg/m². Ces plaques ont la même capacité de stockage de calories qu'un mur de béton de 5 à 7 cm. Ces panneaux peuvent se poser au plafond (figure 2.21 b), dans les planchers et aux murs **(B. Zalba et al.2003)**.

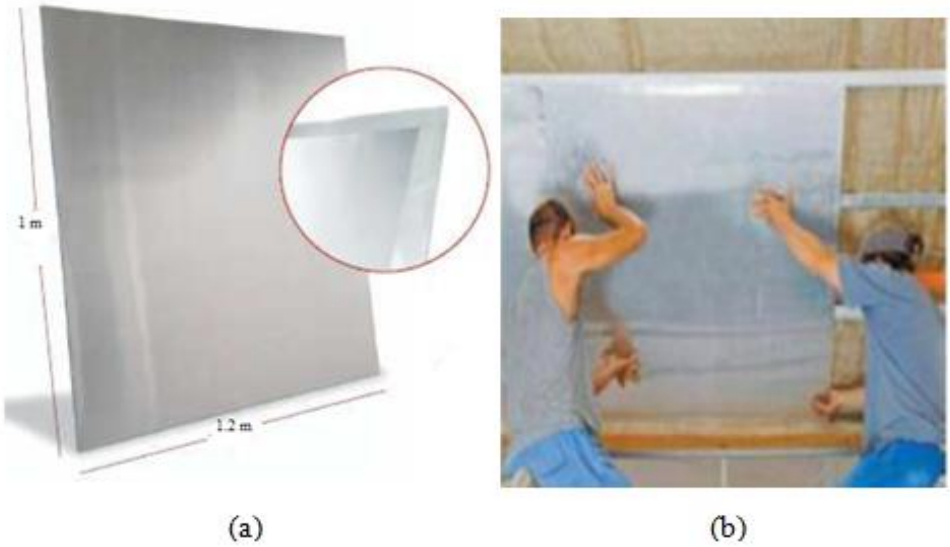

Figure 2.21: Panneau à base de MCP fabriqué DuPont™ Energain®. (a) le modèle que l'on installe au plafond et (b) un exemple de montage de ce panneau dans un plafond **(B. Zalba et al.2003)**.

✓ Intégration des MCP dans le sol :

Après avoir intégré des MCP dans le plafond et le mur, il n'est pas surprenant qu'il soit également possible d'intégrer un système similaire dans le sol. Le concept général d'un tel système est montré sur la figure (2.22). Le MCP est situé directement sous le plancher. Pendant la journée, le refroidissement peut être obtenu en évacuant l'air chaud de la pièce, en le refroidissant tout en faisant fondre le MCP,puis en ramenant l'air refroidi dans la pièce.Pour cela, des planchers perméables peuvent être utilisés. La nuit, l'air froid nocturne peut circuler sous la surface du sol pour refroidir le MCP et rejeter la chaleur stockée **(T. Pacson,2011)**.

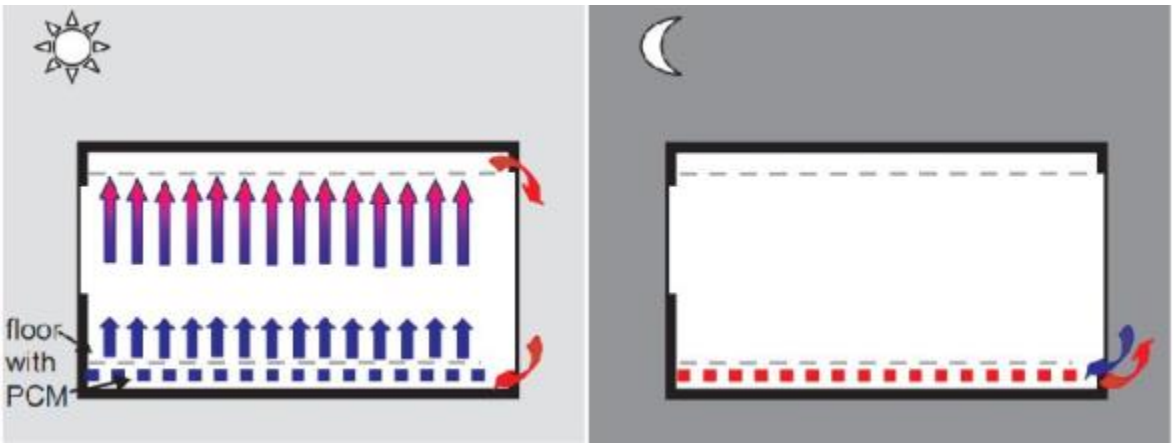

Figure 2.22: Concept de refroidissement avec MCP intégré dans le sol **(S.B.E Ango,2011)**.

Un exemple d'un tel système est un système de climatisation de sol qui a été étudié à l'Université de Hokkaido (Japon). Dans les régions métropolitaines du Japon, la demande de d'électricité pendant les étés chauds augmente d'année en année et la charge de jour est deux fois plus importante que celle de la nuit. La raison principale est la climatisation des bâtiments commerciaux. L'accent a été mis sur un système de climatisation d'alimentation au sol dans lequel l'air est fourni à une pièce à travers des planchers poreux et un tapis perméable, comme Le montre la figure (2.23).

Il est difficile de maintenir le refroidissement pendant les après-midis (période de pic). Pour surmonter ce problème, les auteurs ont proposé de modifier le système de climatisation vers l'étage où le MCP est intégré. Dans leur système, représenté sur la figure (2.23), la chaleur latente est stockée dans un MCP intégré sous les planches sous forme de granulés. Les granulés MCP de plusieurs millimètres de diamètre forment un lit garni, perméable à l'air,de sorte que l'air peut circuler dans le système d'air de la même manière que sans MCP. Pendant la nuit, la circulation d'air froid à travers l'espace au sol permet de refroidir la dalle de béton, ainsi le plancher et le lit de MCP. Pendant la journée, le froid stocké est utilisé pour éliminer la chaleur excessive de la pièce. En raison du système de climatisation existant, il est possible de refroidir artificiellement l'air nocturne à des températures basses si nécessaire pour refroidir le MCP d'avantage. Le MCP utilisé a une plage de fusion d'environ 18 ºC à 21,5 °C et stocke 110 kJ/kg. Environ 12 kg de MCP ont été utilisés par m^2 de surface de plancher; ceci équivaut à 1320 kJ (= 0,37 kWh). Les calculs pour la salle d'essai prédisent que la charge de refroidissement totale peut être couverte par le rejet de froid stocké dans la nuit sans fonctionnement des climatiseurs pendant la journée, si la température de l'air dans le sous-sol est de 12 à 13ºC. Les auteurs ont confirmé que le calcul concordait bien avec l'expérience dans des conditions de fonctionnement similaires en ce qui concerne le froid stocké pendant la nuit et les températures du sol et de l'air ambiant **(H.Mehling et all.2008)**.

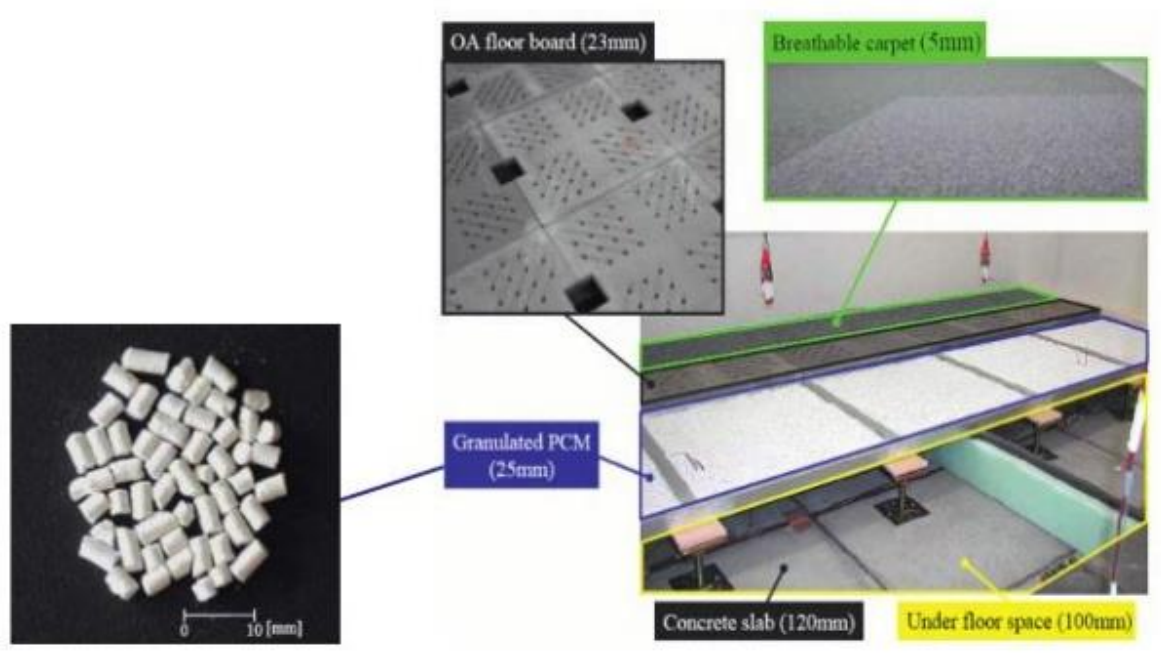

Figure 2.23: A gauche : image du granulat MCP. À droite : construction du système de climatisation au sol **(H. Mehling et all.2008)**.

✓ MCP intégrés à la toiture :

Les sollicitations solaires sont plus importantes au niveau des toitures d'un bâtiment, car il s'agit de la surface la plus exposée au rayonnement solaire. La toiture joue un rôle de «tampon thermique » entre l'environnement intérieur et extérieur. Pour réduire cet apport énergétique provenant de la toiture, trois solutions peuvent être envisagées **(F.Miranville,2002)** :

-Cas 1 : arrêter le rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la paroi.

-Cas 2 : limiter l'absorption de l'énergie par la paroi.

-Cas 3 : limiter le transfert de l'énergie précédemment absorbée par la paroi.

Dans les cas (1) et (2), l'intervention se fait à l'extérieur de la toiture en ayant recours pour le cas (1) à des sur toitures et dans le cas (2) à des revêtements réfléchissants. Du fait des contraintes matérielles, les deux premières méthodes sont limitées et nécessitent de recourir à une troisième méthode qui est l'utilisation d'isolants thermiques.

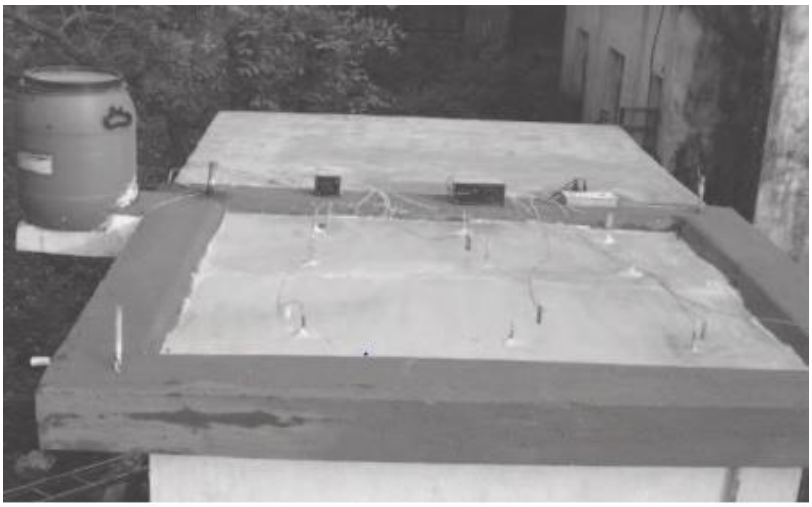

Figure 2.24 : Toiture avec MCP **(A. Pasupathy et al.2008).**

2-3-10. Incorporation des MCP dans les matériaux de construction :

L'incorporation de MCP aux matériaux de construction peut augmenter la masse thermique de ces composants d'enveloppe sans ralentir le taux de transfert de chaleur pendant les heures de pointe, et il peut également réduire les grandes fluctuations de température interne. Par conséquent, le système de stockage d'énergie thermique latente réduit l'impact des fluctuations de température ambiante sur l'enveloppe du bâtiment. La température ambiante devrait donc fluctuer dans la plage de confort thermique.

2-3-10-1. Intégration du MCP dans le plâtre :

Les MCP sont incorporés dans le plâtre soit en micros-encapsulés, soit par immersion ou par ajout lors de la fabrication. La majorité des études faites sur les plaques de plâtre pour évaluer les performances passives s'appuient en général sur une méthode comparative entre l'une dotée d'un système avec MCP et l'autre sans MCP (figure 2.25) **(F. Kuznik et al .2008).**

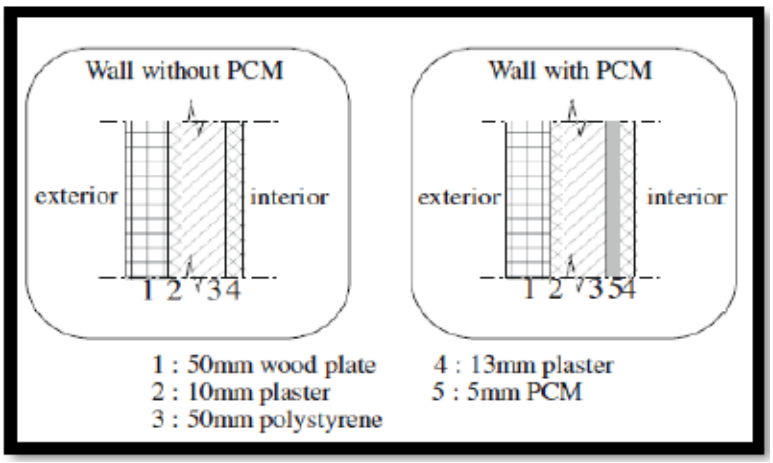

Figure 2.25 : Les plaques de plâtres avec et sans MCP.

Selon la référence **(C. Voelkeret el.2008)**, des agrégats minéraux et quelques adjuvants ont été additionnés à une plaque de plâtre déjà micro encapsulée par les MCP. Ceci a été élaboré dans le but d'améliorer sa performance thermique. Les MCP incorporés possèdent une plage de fusion entre 25 °C et 28 °C. La chaleur sensible et latente du matériau a été mesurée expérimentalement par (DSC). Et ainsi de même ils ont utilisé un instrument (flash laser) pour déterminer la conductivité thermique du composite MCP/plâtre. Ces panneaux de plâtres avec MCP ont été testés dans deux petites cavités d'essais identiques et mitoyennes (figure 2.26). Les murs de la première ont été couverts par des panneaux du plâtre avec MCP et la deuxième avec des plaques de plâtre ordinaires. L'épaisseur de la plaque a été variée entre 1 à 3 cm. les tests ont été effectués dans des conditions variables contrôlées. Il a été constaté, que lors des journées chaudes une réduction de la température maximale pouvait atteindre environ 3 K par rapport à la cavité sans MCP.

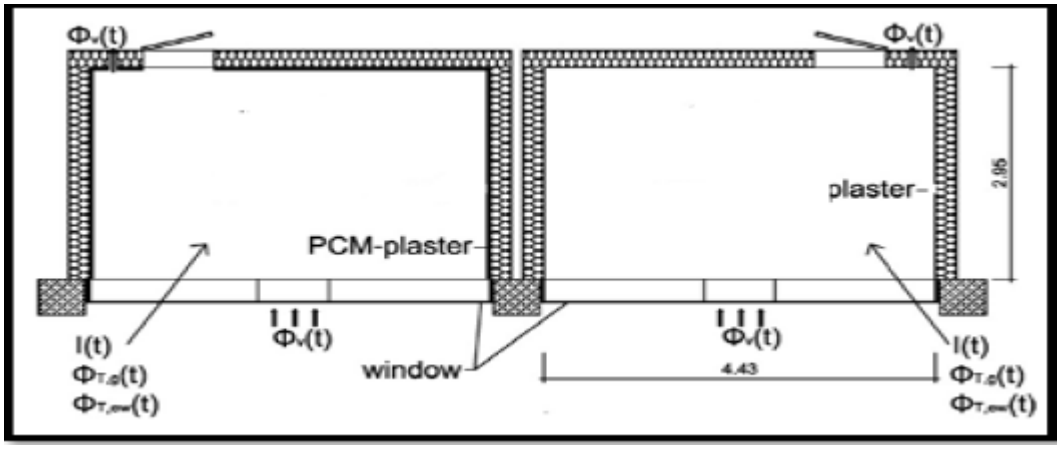

Figure 2.26: Chambre d'essai (plaque de plâtre avec MCP)

Récemment, National Gypsum a produit des panneaux muraux ayant un MCP mirconal, similaire à ceux fabriqués par BASF [20]. Ces panneaux connus sous le nom de « National Gypsum Thermal CORE Panel » contiennent une capacité latente de 22 BTU/ft² et un point de fusion de 23 ° C comme illustré dans la figure (2.27et 2.28).

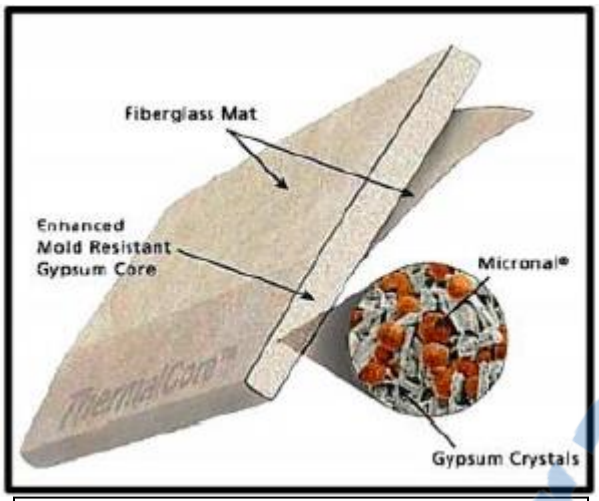

Figure 2.27 : Plaques de plâtre avec MCP (National Gypsum)

Figure 2.28 : Panneau mural en gypse avec microcapsule du MCP (BASF)

2-3-10-2. L'intégration du MCP dans le béton :

L'objectif général de la combinaison des MCP dans les matériaux en béton est d'accroitre beaucoup plus le stockage de la chaleur par des matériaux de constructions lourds **(SA. Memon 2014) (H. Nazir et M. Batool 2019).** L'ajout de MCP directement dans le béton a donné des résultats prometteurs grâce à une conductivité thermique plus basse et à une augmentation de la masse thermique à des températures spécifiques. Cependant, le béton avec MCP a montré certaines propriétés indésirables telles qu'une résistance moindre, une résistance incertaine de la stabilité à long terme et moindre résistance au feu **(T.C. Ling et C.S. Poon 2013)**. Plusieurs études ont été menées sur le béton MCP et ont montré des effets positifs en réduisant les températures intérieures dans les climats chauds.

Rapport-Gratuit.com

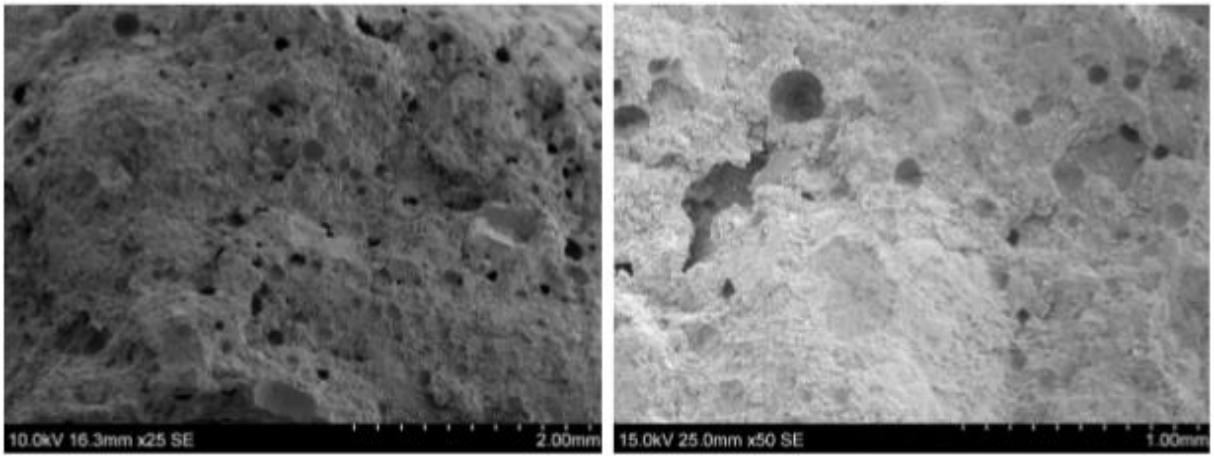

Figure 2.29: Microstructures des bétons-MCP

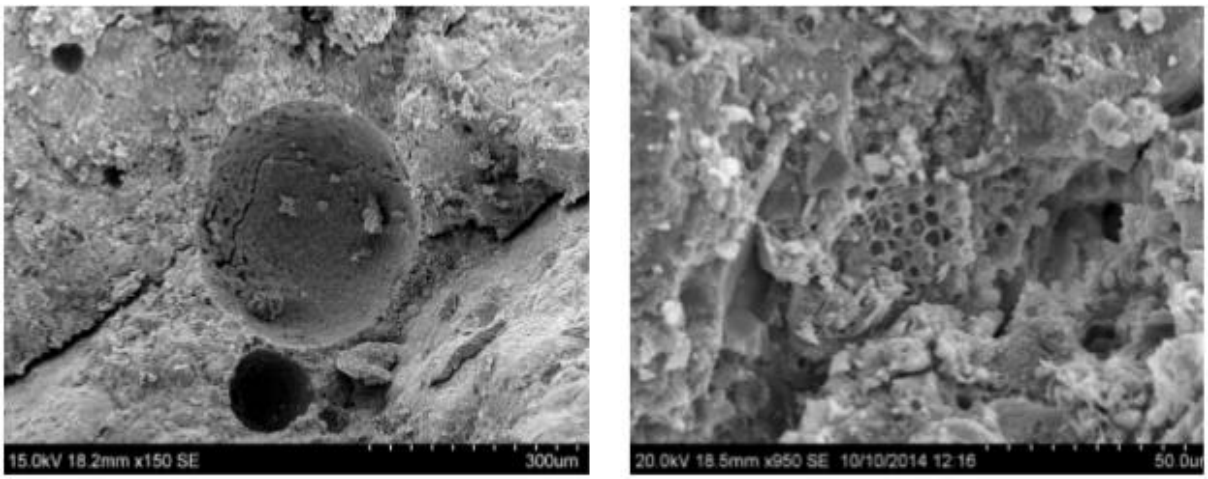

Figure 2.30: Microstructures des bétons-MCP après 28 jours

2-3-10-3. Intégration du MCP dans la brique :

Presque aucun travail n'a été fait sur les solutions constructives en briques jusqu'à 2008 la seule étude est présentée dans **(E.A. Alawadhi 2007).** L'incorporation des MCP dans la brique a été étudiée numériquement et les résultats obtenus indiquent la réduction du flux de chaleur en été dans l'espace ambiant. Cependant, ce modèle numérique n'a pas été validé et aucun travail expérimental effectué jusqu'à celui-ci mentionné dans **(R Jacob et F Bruno .2015)** dans lequel plusieurs cellules ont été construites de briques conventionnelles et de briques alvéolaires (figure 2.31). Deux types de MCP (RT27 et SP25 A8) macro encapsulée ont été ajoutés respectivement dans une brique classique et une brique alvéolaire en étudiant leur comportement thermique

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

.

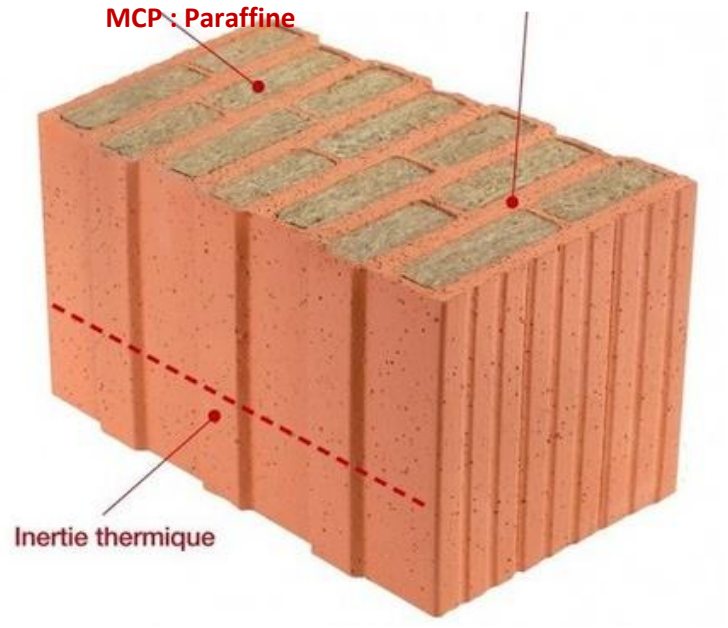

Figure 2.31: En-haut : Brique creuse conventionnelle ;

En bas : Brique alvéolaire+MCP.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

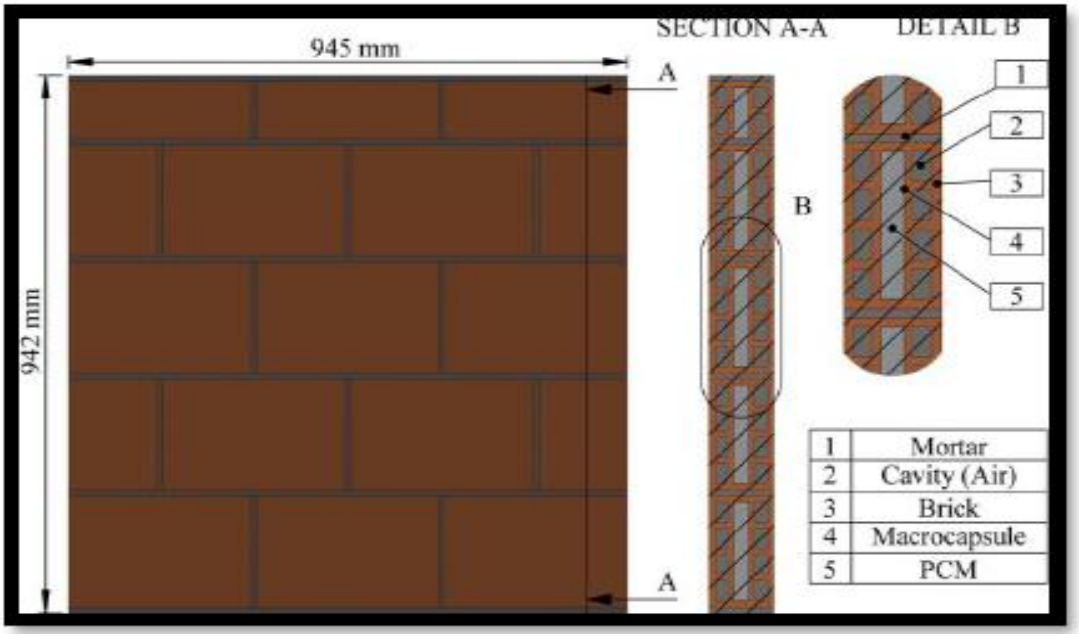

Figure 2.32 : intégration de MCP dans les briques.

2.4 Conclusion :

Les matériaux à changement de phase MCP sont apparus dans le secteur de bâtiment dans un premier temps pour réduire les besoins en climatisation durant les périodes chaudes. Le PCM est intégré à l'intérieur du bâtiment et utilisé dans des produits à base de polymère, de plâtre ou de béton Le PCM peut améliorer les performances énergétiques de l'enveloppe tout en augmentant l'inertie thermique. Ainsi, en complément de l'isolation, ils constituent une amélioration de la régulation thermique et une réponse aux concepts de confort d'été et de confort d'hiver.

De nos jours, les matériaux à changement de phase MCP sont particulièrement appréciés dans la conception et la rénovation de bâtiments légers à faible consommation d'énergie. En effet, MCP améliorera également le confort d'été sans consommation d'énergie excessive dans le bâtiment.

Chapitre 3

Modélisation numérique d'un planché en béton-MCP

3-1. Introduction :

Désormais, la CFD (Computational Fluid Dynamics) peut être utilisée pour traiter correctement le problème de changement de phase de la convection. Cependant, la résolution de ces problèmes nécessite beaucoup de temps de calcul, même dans des formes géométriques relativement simples. En effet, si vous ne faites aucune simplification dans l'équation du problème, vous devez au moins considérer : la conservation de la masse, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie. De plus, des phénomènes tels que la turbulence rendent les calculs plus compliqués et plus longs. Le développement d'un modèle de conductivité à changement de phase simplifié vise à réduire le nombre d'équations et à réduire le temps nécessaire pour résoudre des problèmes similaires à ceux décrits précédemment.

Le but de cette partie est de modéliser le processus de stockage de l'énergie solaire intégré dans les planchers de bâtiment en utilisant des matériaux à changement de phase. On commencera par présenter notre description du problème qui fournit des expressions qui sont généralement des fonctions continues, des variables de temps et d'espace. Après avoir édicté les hypothèses simplificatrices de notre problème, nous avons déduit une formulation finale du comportement thermique d'un modèle d'habitat avec une dalle contenant des matériaux à changement de phase MCP et un autre modèle sans matériaux à changement de phase.

La simulation dynamique du système a été effectuée à l'aide de deux logiciels de calcul et de maillage GAMBIT ET FLUENT, une brève présentation de ces deux logiciels est aborder pour comprendre leur fonctionnement.

3-2. Formulation théorique du problème de transfert avec changement de phase :

- **Hypothèses :**

Afin de simplifier la résolution mathématique du problème, les hypothèses suivantes ont été appliquées :

- ✓ Les propriétés physiques de la phase solide supposées constantes.
- ✓ L'écoulement est considéré incompressible et laminaire.

- ✓ Le fluide est incompressible .
- ✓ La phase liquide est un fluide Newtonien.
- ✓ Hypothèses de Boussinesq.
- ✓ Les phases solides et liquide du MCP sont homogènes et isotropies.
- ✓ Le béton et le MCP sont homogènes et isotropes.

➢ **Equations de conservation de l'énergie :**

L'équation de la conservation de l'énergie peut s'écrire selon l'équation **(3-1) :**

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial X} + v\frac{\partial T}{\partial Y}\right) = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}\right) \qquad \textbf{(3-1)}$$

Avec :

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

λ**:** Conductivité thermique [W/m.K].

ρ: Masse volumique [Kg/m^3].

t: temps [s].

x : cordonnée horizontale [m].

y : cordonnée verticale [m].

u et *v* sont les composantes de la vitesse du fluide dans les directions x et y respectivement.

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

$$\rho C_{eff}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial X}\right) + \frac{\partial}{\partial Y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial Y}\right) \qquad \textbf{(3-2)}$$

C_{eff}: la chaleur massique apparente [J/Kg.K].

- **Domaine solide on a :**

$$\left(\rho C_p\right)_i \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_i\left(\frac{\partial^2 T}{\partial X} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}\right)_{i=1,2\ldots} \qquad \textbf{(3-3)}$$

- **Domaine liquide on a :**

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

$$\rho C_{eff}\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}\right) \qquad \textbf{(3-4)}$$

- **Les conditions aux limites :**

Nous avons un certain nombre de conditions, parmi lesquelles nous pouvons distinguer les conditions d'entrée, les conditions de sortie, les limites fixes, la périodicité ou la symétrie. Il faut rappeler que, par défaut, les conditions obligatoires du type entrée / sortie correspondent à un contour uniforme sur la frontière.

Les conditions aux limites jouent un rôle déterminant pour la résolution des équations gouvernantes établis précédemment du fait de leur influence directe sur les résultats finals.

3-3. Méthode de résolution du problème de transfert avec changement de phase :

Les processus de changement de phase présentent un phénomène transitoire et non linéaire avec une interface liquide-solide mobile. Ils impliquent des problèmes d'écoulement associés aux transferts thermiques. Par conséquent, il est difficile de prédire le comportement des processus de changement de phase.

Jusqu'à présent, les solutions analytiques proposées 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 ne sont pas disponibles, des solutions numériques les remplaceront en raison de la complexité des problèmes réels. Les solutions numériques pour résoudre les problèmes de changement de phase se divisent en deux catégories :

- La méthode à **Maillage mobile** dans le temps.
- La méthode à **maillage fixe**.

3-3-1. Méthode à maillage mobile :

Dans cette méthode, les équations de conservation sont écrites en termes de température dans chaque phase, elles sont résolues séparément dans la région liquide et dans la région solide, la position de l'interface est obtenue par la résolution de l'équation du bilan à l'interface (condition de Stefan) (**A. Bricard et D Gobin,2000).**

Les équations gouvernantes le transfert de chaleur sont :

- **Phase liquide :**

$$C_{pl}\,\rho_l\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial X}+v\frac{\partial T}{\partial Y}\right)=\lambda_l\left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2}+v\frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}\right) \qquad \textbf{(3-5)}$$

- **Phase liquide :**

$$C_{ps}\,\rho_s\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial X}+v\frac{\partial T}{\partial Y}\right)=\lambda_s\left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2}+v\frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}\right) \qquad \textbf{(3-6)}$$

A l'interface liquide-Solide, les deux équations (3-5) et (3-6) sont couplées par la condition de Stefan (**A. Bricard et D Gobin,2000) :**

$$\begin{cases} T_l = T_s = T_f \\ -\lambda_s\frac{\partial T_s}{\partial x}+\lambda_l\frac{\partial T_l}{\partial x}=\rho_s l_s\frac{\partial \xi}{\partial t} \end{cases} \qquad \textbf{(3-7)}$$

Avec :

ξ **:** la position du front solide/liquide.

l_s **:** la chaleur latente.

T_f **:** la température de fusion.

T_s**:** Température de phase solide.

T_l**:** Température de phase liquide.

3-3-2. Méthode à maillage fixe :

Dans ces méthodes, une seule équation d'énergie devient applicable dans les deux phases et donc il n'est pas nécessaire de considérer les deux phases liquides et solides séparément. Pendant le calcul, le maillage reste fixe et les équations gouvernant le transfert de chaleur dans la région liquide et la région solide est résolue simultanément malgré la discontinuité du gradient de la température à l'interface.

L'avantage de ces méthodes réside dans la simplicité et la facilité de mettre en œuvre même dans le cas tridimensionnel **(A .Boumahrat et Gourdin,1993)**. Dans cette famille de méthodes, les deux

méthodes les plus utilisées sont la méthode de la capacité effective (apparente) et la méthode enthalpique.

A. 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, cette méthode est assez simple mais la moins précise dans les méthodes à maillage fixe.

L'équation d'énergie est donnée par **(A. Boumahrat et Gourdin,1993), (A.N. Korti ,2000), (D. G. R. Sharma et al.2000), (J.S. Hasio,1985) :**

$$\rho C_{eff}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial X}+v\frac{\partial T}{\partial Y}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2}+v\frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}\right) \qquad \textbf{(3-8)}$$

Avec :

$$C_{eff}=\begin{cases} C_{ps} & si \quad T<T_f \\ C_p+\frac{L_s}{T_l-T_s}\delta(T-T_f) & si \quad T=T_f \\ C_{pl} & si \quad T>T_f \end{cases} \qquad \textbf{(3-9)}$$

Où $\delta(T-T_f)$ représente la fonction de Dirac, qui est infinie à $T=T_f$ et nulle ailleurs. Elle satisfait l'équation suivante :

$$\int_{-\infty}^{+\infty}\delta(T-T_f)dT=1 \qquad \textbf{(3-10)}$$

Afin de faciliter le calcul numérique, on introduire la fonction Delta afin de pouvoir localiser les nœuds où la chaleur latente est incluse dans la chaleur spécifique, ce qui donne **(s.v. patankar,1980), (A. Boumahrat et Gourdin,1993) :**

$$C_{eff}=\begin{cases} C_{ps} & pour \quad T<T_f-\Delta T \\ C_p+\frac{L_s}{2\Delta T} & pour \quad T_f-\Delta T\leq T\leq T_f+\Delta T \\ C_{pl} & pour \quad T>T_f+\Delta T \end{cases} \qquad \textbf{(3-11)}$$

Pour les alliages, l'intervalle $2\Delta T$ vaut $T_l - T_s$ Pour les métaux purs, le changement de phase s'achève à une température constante, et l'intervalle doit être le plus petit possible.

B. Méthode enthalpique :

Les modèles enthalpiques permettent d'éviter le suivi du front. Le maillage de calcul reste fixe et la condition de changement de phase au niveau d'interface n'est pas imposée. Ces modèles introduisent généralement une zone pâteuse entre les deux phases liquide et solide, ce qui élimine la nature de front dans les modèles de Stefan. Le concept de fraction a été introduit dans la zone pâteuse pour prendre en compte la présence d'une mixture des deux phases liquide et solide.

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 (**R.Tsonglce et W.Y Chiou,1995),** (**H.Saib .2009)** :

$$\rho\left(\frac{\partial H}{\partial t} + u\frac{\partial H}{\partial X} + v\frac{\partial H}{\partial Y}\right) = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}\right) - S_h \qquad \textbf{(3-12)}$$

H : L'enthalpie du système prend alors la forme générale suivante :

$$H = C_p T + f_l L_s \qquad \textbf{(3-13)}$$

Avec f_l**=1** dans la région liquide, f_l**=0** dans la région solide et **0**$\leq f_l \leq$**1** dans la région pâteuse où coexistent les deux phases. Dans la littérature, on suppose très souvent que la chaleur latente varie linéairement avec la température comme suit **(s.v. patankar,1980)** :

$$f_l = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \geq T_l \\ 0 & T < T_f \end{cases} \qquad \textbf{(3-14)}$$

Rapport-Gratuit.com

Après réarrangement on obtient :

$$\rho\, C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial X} + v\frac{\partial T}{\partial Y}\right] = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}\right) - S_h \qquad \textbf{(3-15)}$$

S_h Représentent le terme source dans l'équation est donne par :

$$S_h = \rho L_S \left[\frac{\partial f_l}{\partial t} + u\frac{\partial f_l}{\partial X} + v\frac{\partial f_l}{\partial Y}\right] \qquad \textbf{(3-16)}$$

Le modèle enthalpique est considéré comme le plus efficace et le plus précis des méthodes à maillage fixe.

3-4. Description du modèle numérique :

Le modèle physique étudié est un plancher constitué d'une dalle en béton et aussi un plafond en béton et une couche de MCP de type Paraffine qui peut changer d'état avec un front de fusion ou de solidification. Paramètres géométriques du modèle sont représentés dans la Figure 3.1

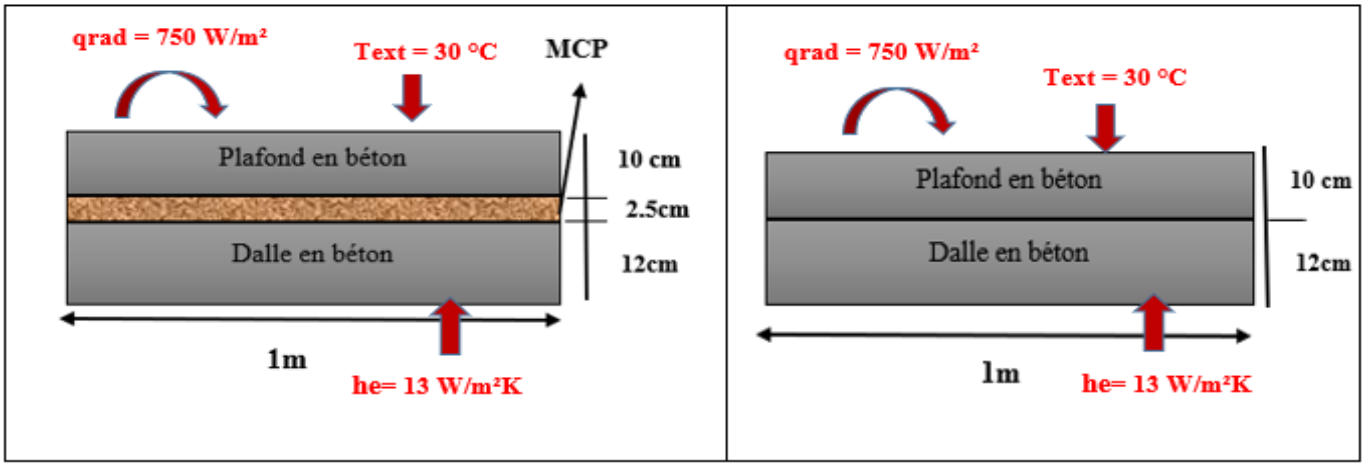

Figure 3.1: Géométrie du modèle physique.

Les conditions thermiques d'une journée type ont été imposées sur cette dalle.

- Sur la dalle inférieure, on impose une condition de transfert par convection avec la température intérieure :

$$T_{int} = 20\ °C$$

- Sur la dalle supérieure, on impose une condition de flux solaire avec un échange convectif avec l'extérieure (milieu ambiant).

La température extérieure est constante :

$$T_{ext} = 30\ °C$$

Le coefficient d'échange convectif avec l'extérieur :

$$h_e = 13 \quad W/m^2K.$$

Le flux solaire moyen imposé :

$$q_{rad} = 750\ W/m^2.$$

- **Paramètres physiques des matériaux :** 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/m.K]**	**ρ [kg/m3]**	***Cp* [J/kg. K]**
Béton	1.5	2200	800
MCP Paraffine	0.18	900	Voir **équation 3.17**

Avec :

ρ: la masse volumique [Kg/m3]

Cp : capacité calorifique spécifique [J/Kg.K]

λ: Conductivité thermique [W/m.K]

La grandeur qui nous intéresse principalement est la température au niveau de la dalle du béton. Ce sont donc les variations de cette grandeur qui seront analysée. Quand le MCP fond ou se solidifie, le changement d'état est pris en compte par une capacité thermique effective Ceff.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Pour le MCP considéré cette capacité thermique est déduite des mesures publiées dans la référence (**F. Kuznik et al, 2008)** voir figure (3-2) et équation (3-17) :

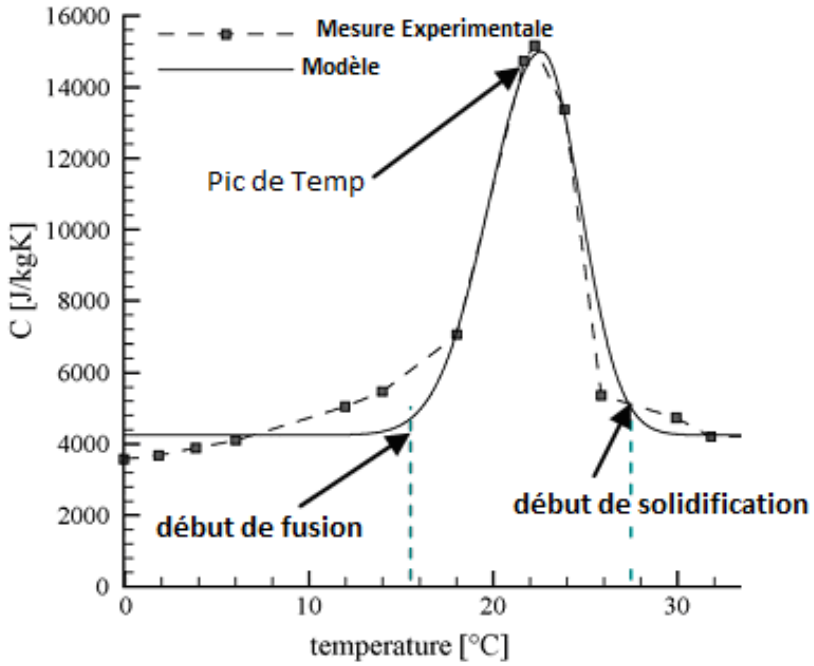

Figure 3.2 : Variation de la capacité effective C_{eff} en fonction de la température (**F. Kuznik et al, 2008)**

$$C_{eff} = 4250 + 10750\exp\left(\frac{T - 295.8}{a}\right)$$

$$\begin{cases} a = 4 & si \quad T \leq 295.8 \quad K \\ a = 3 & si \; T > 295.8 \quad K \end{cases} \qquad \textbf{(3-17)}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

3-5. Présentation des logiciels Gambit et Fluent :

3-5-1. Préprocesseur Gambit :

GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Il permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage.

Les options de génération de maillage de GAMBIT offrent une flexibilité de choix. La géométrie peut être décomposé en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon GAMBIT génère automatique un maillage non structure adapté au type de géométrie construite. Les défauts sont détectés à l'aide de son interface Comportant plusieurs fenêtres d'outils de création, génération, vérification du maillage du modèle étudié et l'incorporation des conditions aux limites. **(D.Bourgueb et I.Bekkouche,2014)**

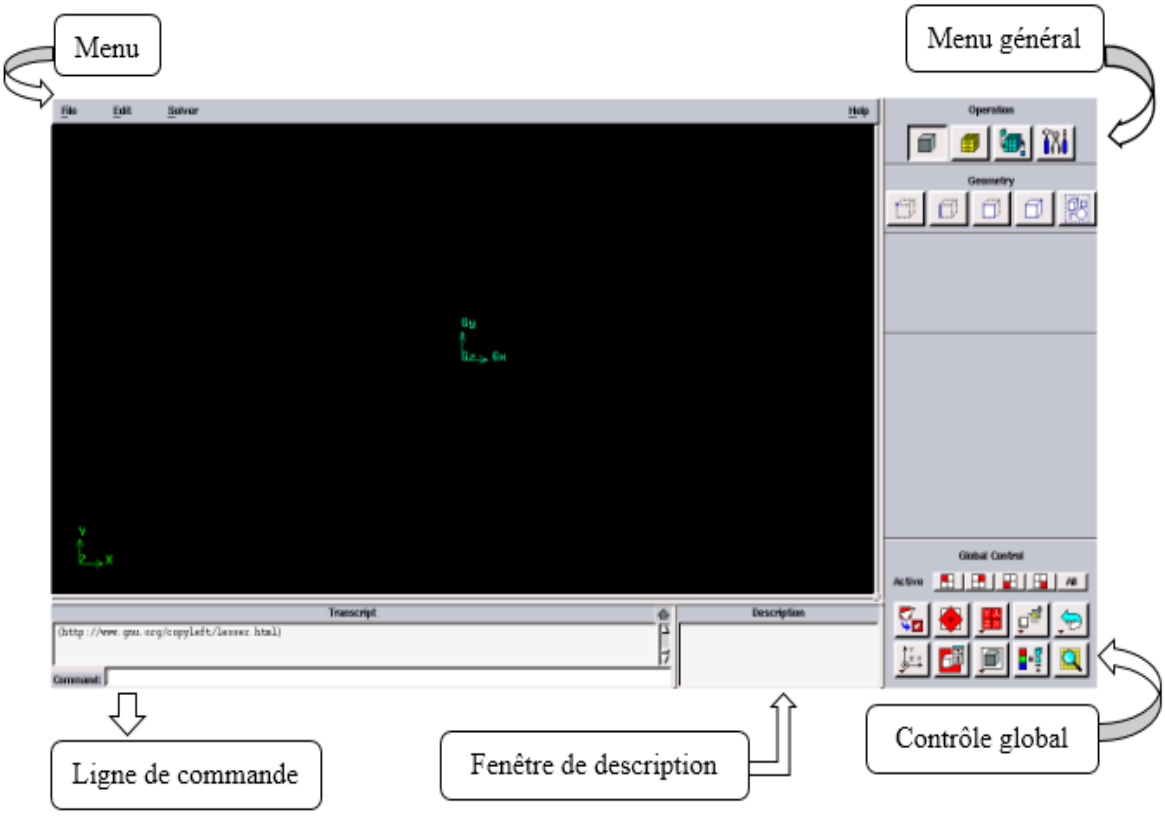

Figure 3.3 : Interface de Gambit.

❖ Procédure de Résolution :

-Étape 1 : Créer Géométrie dans GAMBIT.

- **Choix du solveur :**

Préciser que le maillage à être créé est destiné à être utilisé avec FLUENT 6.3:

Menu > Solver> FLUENT 5 / 6

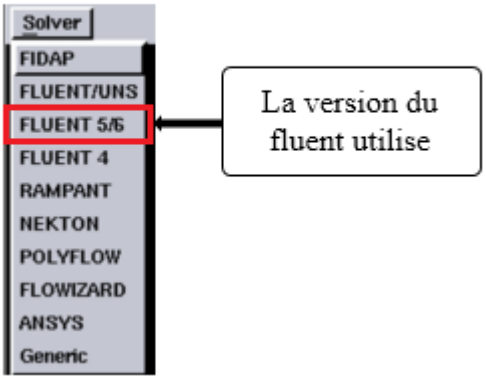

Figure 3.4: Type de solver.

- **Création des points :**

Geometry Command Button > Vertex Command Button

Créer le premier point (0, 0, 0)

Suite à ***x :*** entrez la valeur 0. Suite à ***y :*** entrez la valeur 0. Suite à ***z :*** entrez la valeur 0 (ces valeurs doivent être par défaut). Cliquez sur **Apply.** Cela crée le point (0, 0, 0) qui est affiché dans la fenêtre graphique.

Répétez ce processus pour créer les points restants.

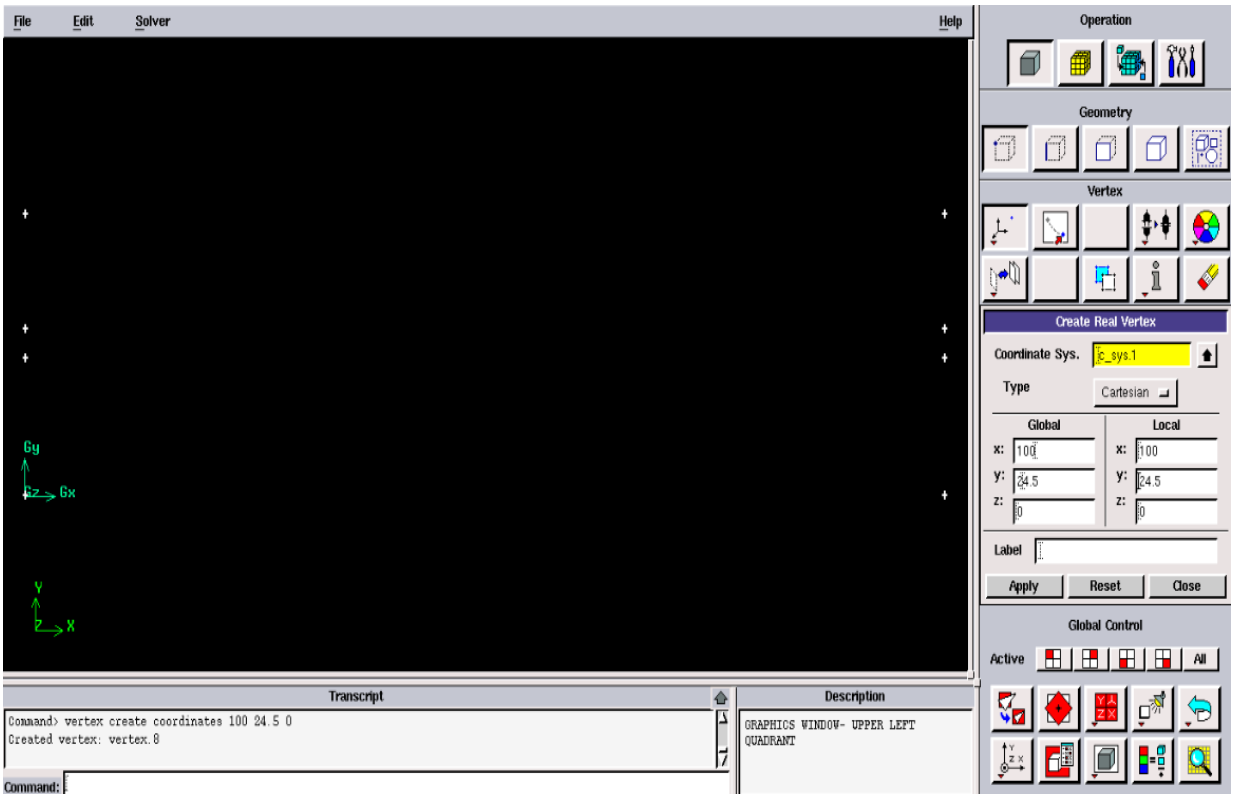

Figure 3.5: Création des points.

- **Création des lignes :**

Geometry Command Button > Edge Command Button

Sélectionnez deux points en maintenant enfoncée la touche **Shift** et en cliquant sur les points. Comme chaque point est choisi, il apparaîtra en rouge dans la fenêtre graphique.

Ensuite, relâchez la touche **Shift** et cliquez sur **Apply** dans la partie Créer Straight Edge fenêtre pour créer cette ligne.

Répétez ce processus pour créer les lignes restantes.

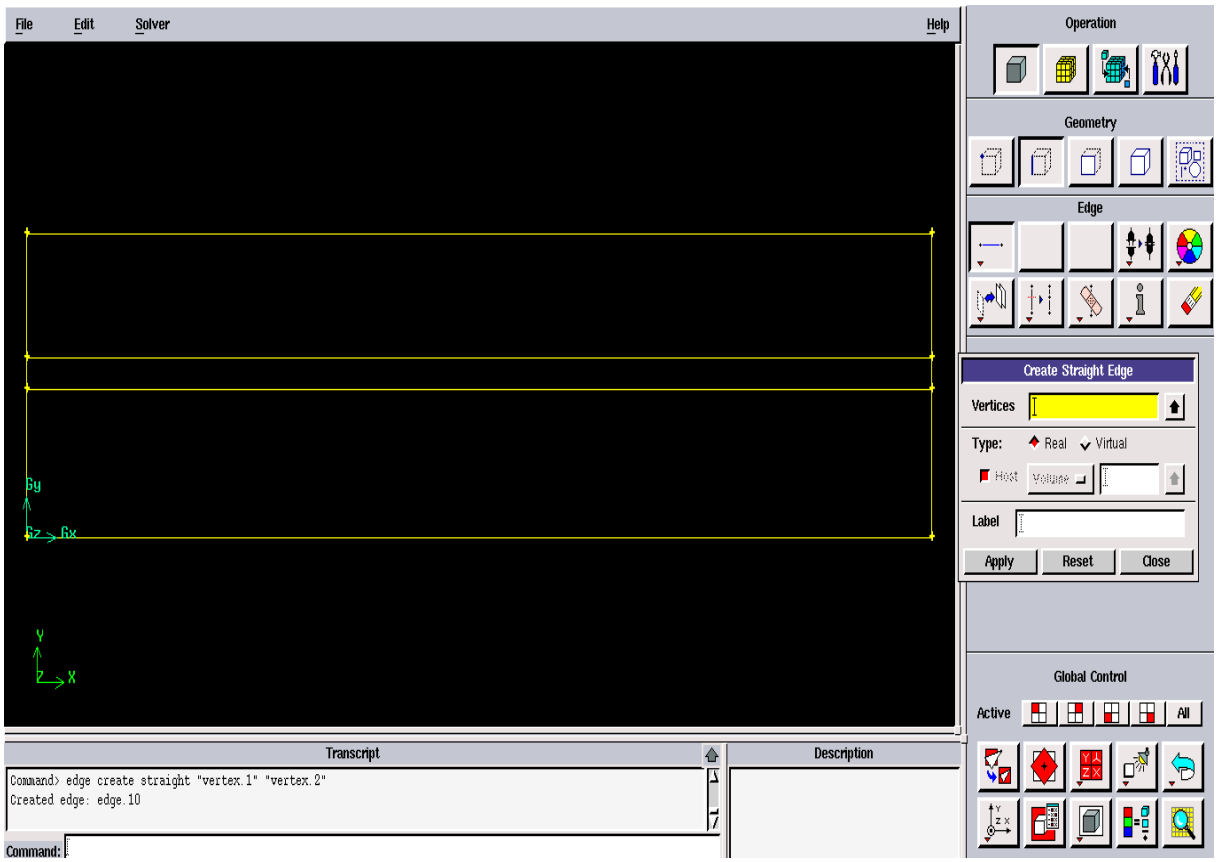

Figure 3.6 : Création des lignes.

- **Création les faces :**

Geometry Command Button > Face Command Button > Form Face

On a trois faces : dalle en béton, MCP et plafond en béton

Pour former une face de dalle en béton nous avons besoin pour sélectionner les lignes qui entourent ce domaine. Cela peut se faire en maintenant la touche **Shift,** en cliquant sur chaque ligne (notez que la ligne actuellement sélectionnée apparaît en rouge), puis relâcher la touche **Shift** après touts les lignes ont été sélectionnées et cliquez sur **Apply**.

Répétez ce processus pour créer les faces restantes.

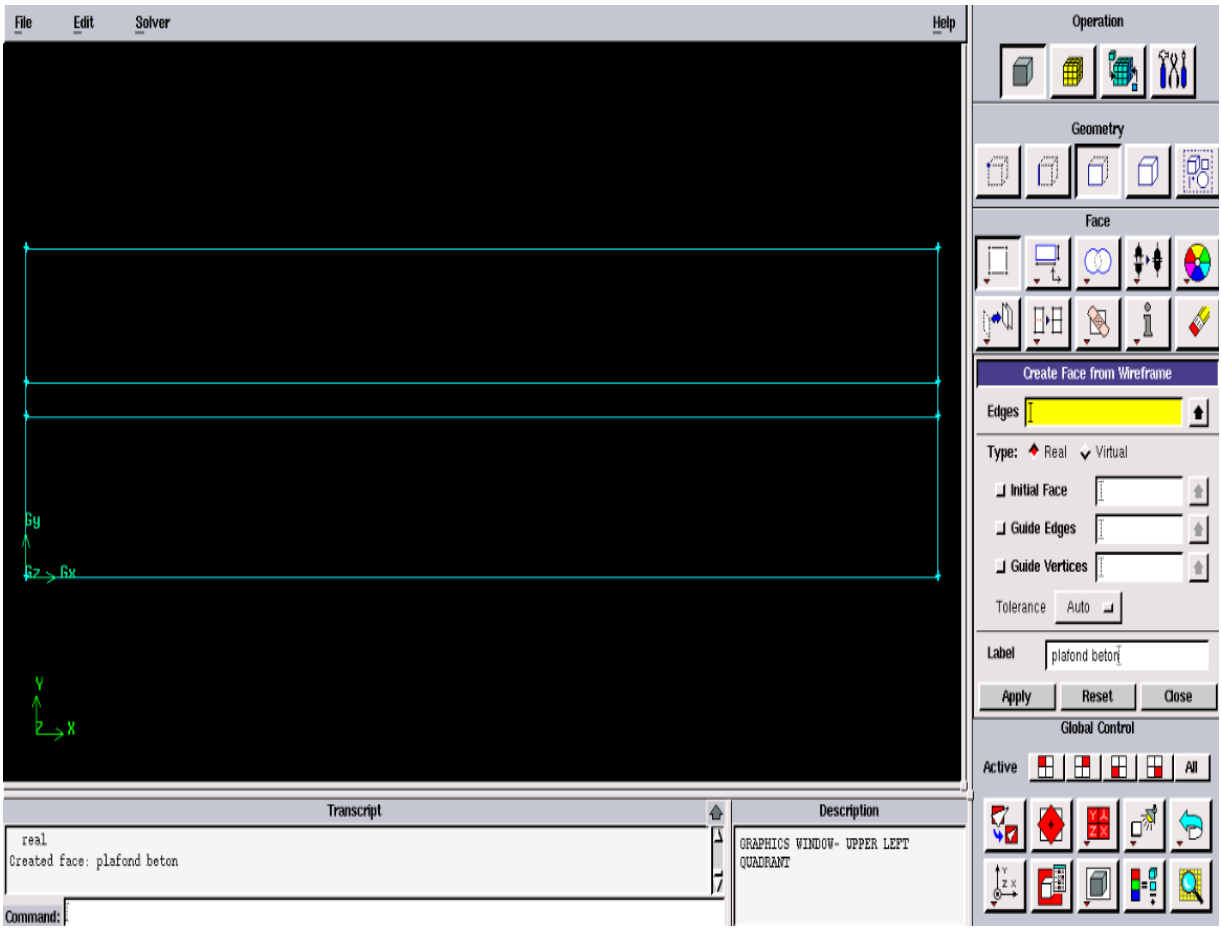

Figure 3.7: Création des faces.

-Étape 2 : Maillage géométrie dans GAMBIT.

- **Maillage des lignes :**

Mesh Command Button > Edge Command Button

Sélectionnez les lignes verticales, sélectionnez **Interval count** dans la liste découlant qui dit **Interval Size** du maillage des bords de fenêtres, entre les nombres des nœuds pour l'intervalle compter et cliquez sur **Apply**.

Répétez le même processus pour les lignes horizontales.

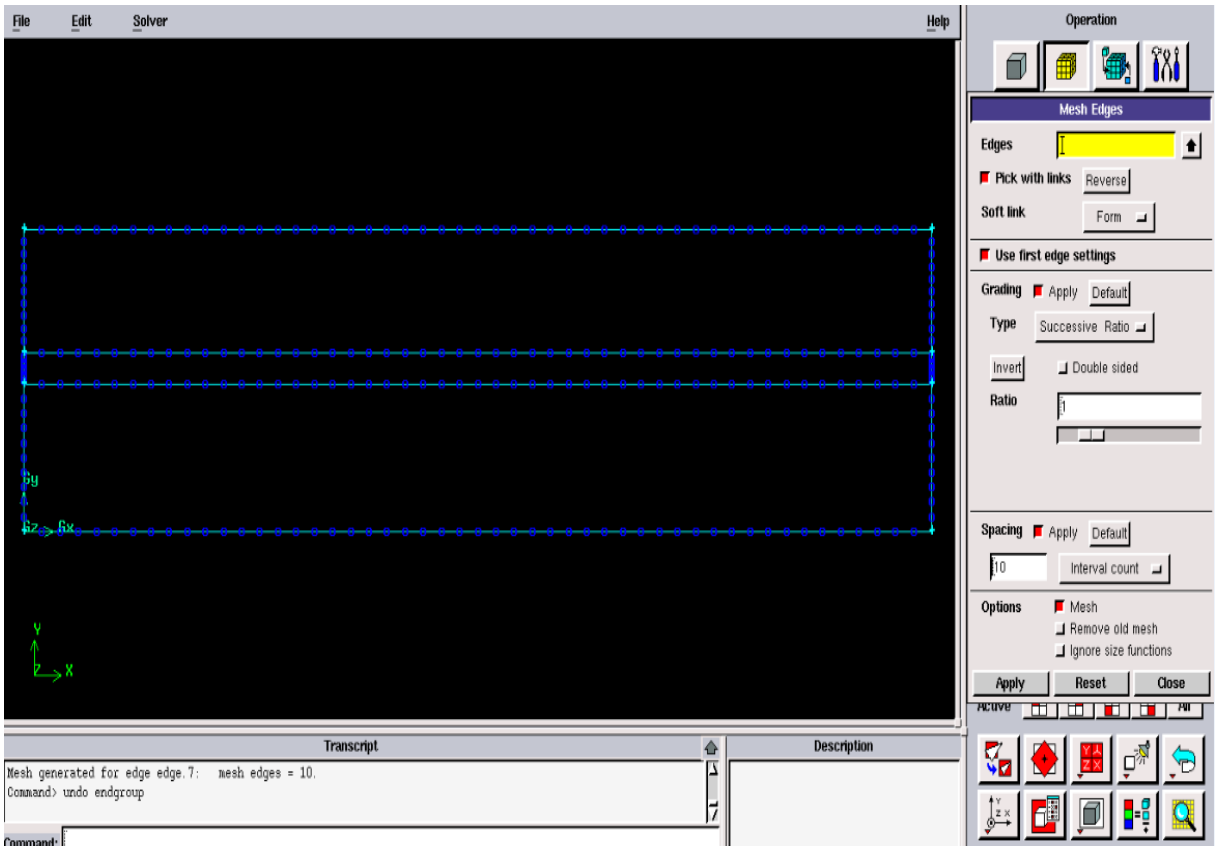

Figure 3.8: Maillage des lignes.

- **Maillage des surfaces :**

Mesh Command Button > Face Command Button

Sélectionnez la première surface et cliquez sur **Apply**.

Répétez le même processus pour les autres surfaces.

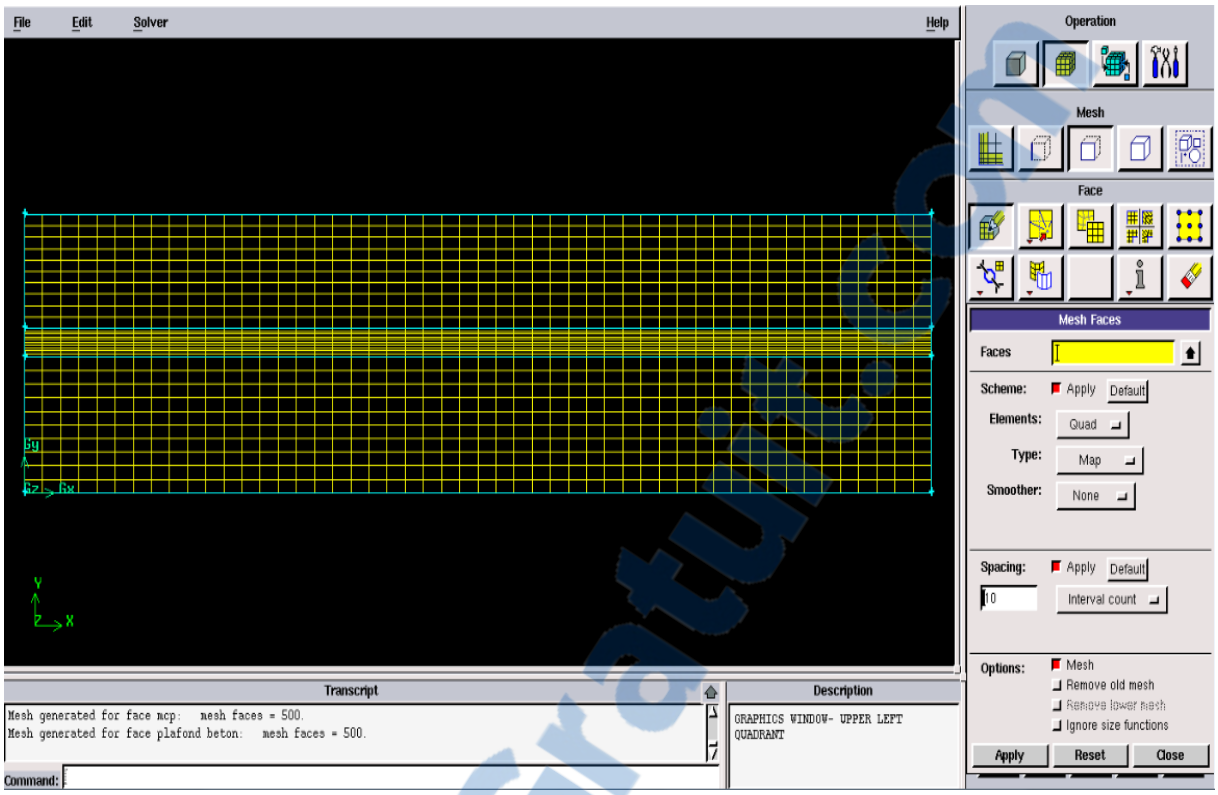

Figure 3.9 : Maillage des surfaces.

Étape 3 : les conditions aux limites dans GAMBIT

Zones Command Button >Specify Boundary Types Command Button

Sélectionnez la ligne haute

Ecrire à côté de **Nom : haut**

Cliquez sur **Apply**.

Répétez le même processus pour les autres lignes.

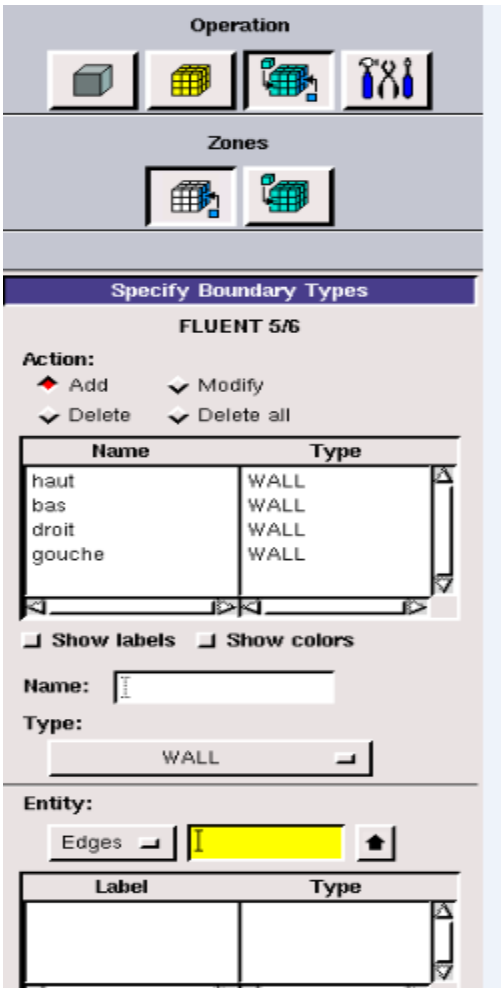

Figure 3.10: les conditions aux limites.

Étape 4 : les matériaux utilisés dans GAMBIT

Zones Command Button > Specify Boundary Types Command Button

On a deux matériaux : béton et paraffine

Sélectionnez la face de dalle en béton

Ecrire à côté de Nom : concrète

Sélectionnez dans type : solide

Cliquez sur Apply.

Répétez le même processus pour les autres faces.

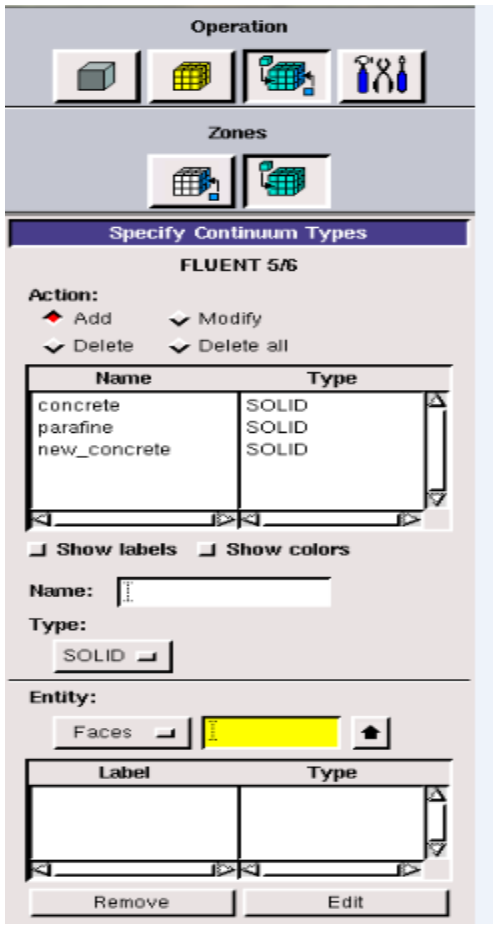

Figure 3.11: les matériaux.

Exporter le maillage et sauvegarder le fichier

Une fois que la géométrie a été créée, que les conditions aux limites ont été définies, il faut exporter le maillage, en point. msh (mesh = maillage en anglais) pour que Fluent soit capable de le lire et de l'utiliser.

On peut ensuite fermer Gambit et lancer Fluent.

File> Export> Mesh

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

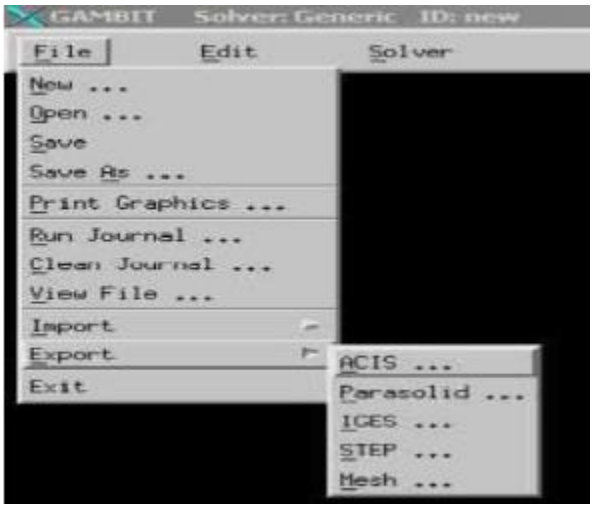

Figure 3.12: Exporter le maillage.

3-5-2. Code FLUENT :

Fluent est un programme informatique conçu pour la simulation des écoulements de fluide et du transfert de chaleur dans des géométries complexes. Il présente une grande flexibilité d'adaptation avec n'importe quel type de maillage. Il permet le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenus. Cela est très utile dans les régions à gradients importants (couches limites, couches à cisaillement libre).

Fluent est écrit en langage C. il emploie toute la flexibilité et la puissance qu'offre ce langage. Il a une architecture serveur client nécessaire au calcul parallèle sur plusieurs machines. Fluent dispose d'un outil de graphisme pour l'affichage des résultats et leur exploitation **(B.Saheb et N. Larab ,2018).**

Le package Fluent s'appuie sur la méthode de volume-fini pour résoudre les équations régissant le mouvement d'un fluide en écoulement et comprend des modèles physiques différents tels que :

- Ecoulements 2D ou 3D ;
- Ecoulement stationnaire ou in stationnaire ;
- Ecoulements incompressibles ou compressibles.
- 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.

3-5-2-1. Interface du code Fluent :

La première chose à faire quand vous entrez sous fluent est de choisir le type de résolution que Fluent va avoir à faire : résolution 2D ou 3D, figure (3.13). Puis d'ouvrir ou d'importer un maillage (fichier.msh).

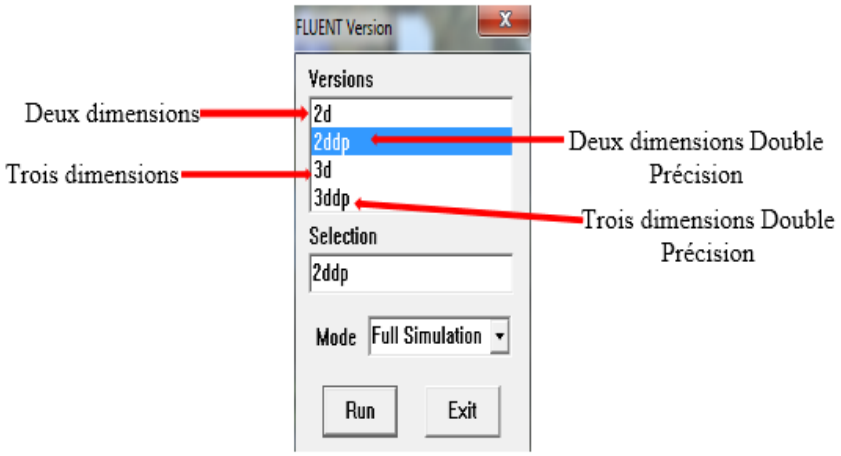

Figure 3.13: Interface de code Fluent.

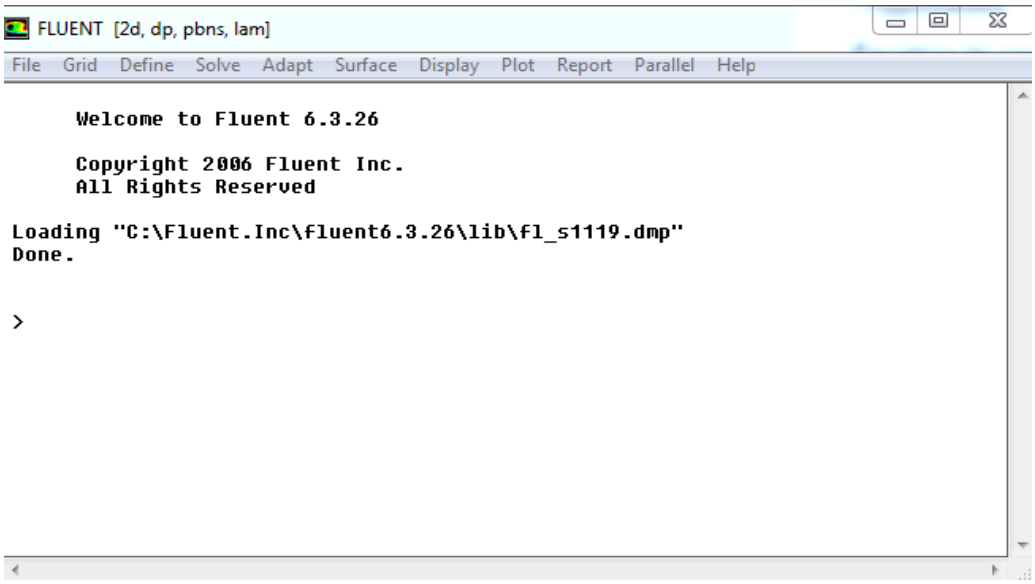

Figure 3.14 : Fenêtre de la résolution.

Les fonctions disponibles dans la barre de menu de Fluent sont :

- **File** : pour les opérations concernant les fichiers : lecture, sauvegarde, importation …etc.
- **Grid :** pour la vérification et la manipulation du maillage et de géométrie.
- **Define** : pour définir les phénomènes physiques, les matériaux et les conditions aux limites.
- **Solve** : pour choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisation, les facteurs de sous relaxation, les critères de convergence et pour initialiser et procéder au calcul.
- **Adapte** : pour l'adaptation du maillage selon plusieurs paramètres.
- **Surface** : pour créer des points, de 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.
- **Parallèle** : pour le calcul parallèle.
- **Help** : pour l'exploitation du contenu du code.

3-5-2-2. Mise en place problème dans FLUENT :

- Démarrer la version 2ddp de FLUENT.
- Importation de la géométrie (modele.msh) :

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

File > Read >Case

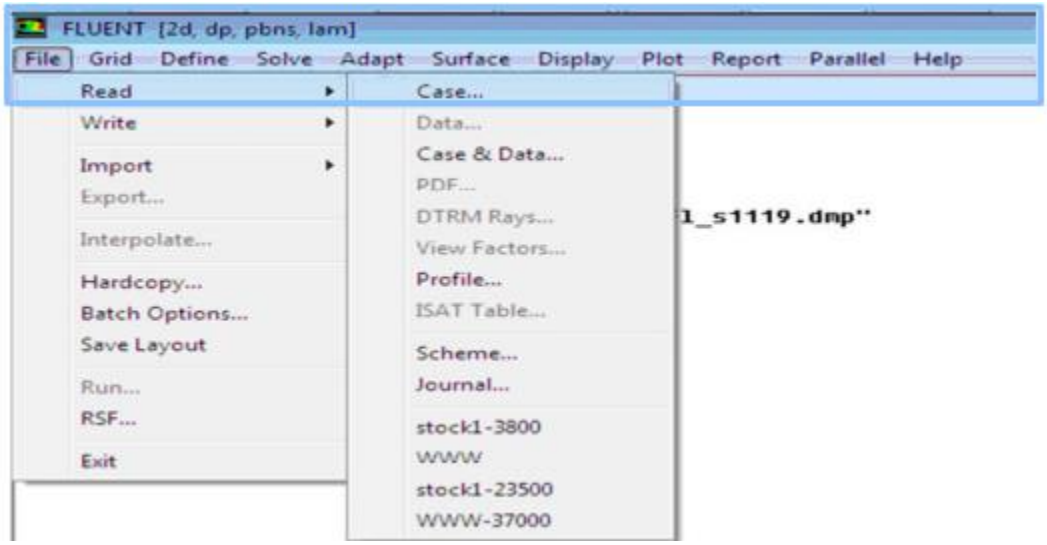

Figure 3.15 Importation de la géométrie.

- Afficher le maillage :

Display > Grid

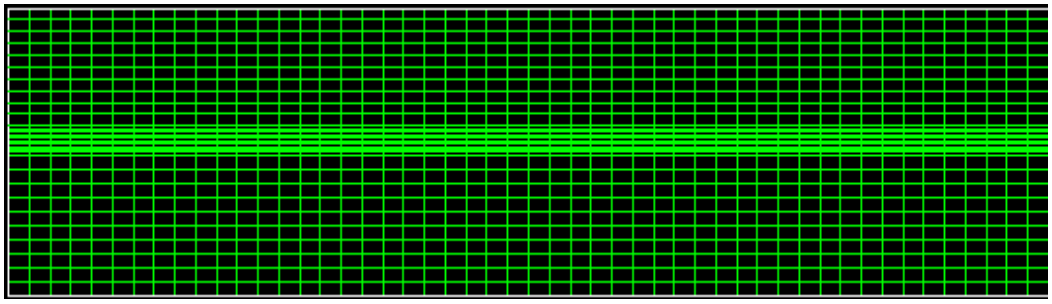

Figure 3.16 : Affichage du maillage.

- Formulation de l'équation d'énergie :

Define > Models > Energy

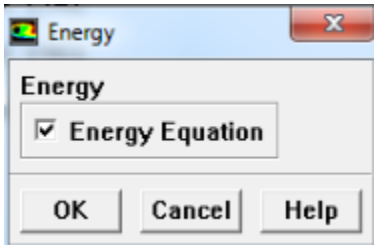

Figure 3.17 : Définie équation d'énergie.

- Préciser le solutionneur de propriétés :

Define > Models > Solver

Pour notre cas, c'est un solveur découplé avec une formulation implicite pour un cas 2D, et un écoulement stationnaire et une vitesse absolue en cliquant sur **Unsteady**, et valider en cliquant sur OK.

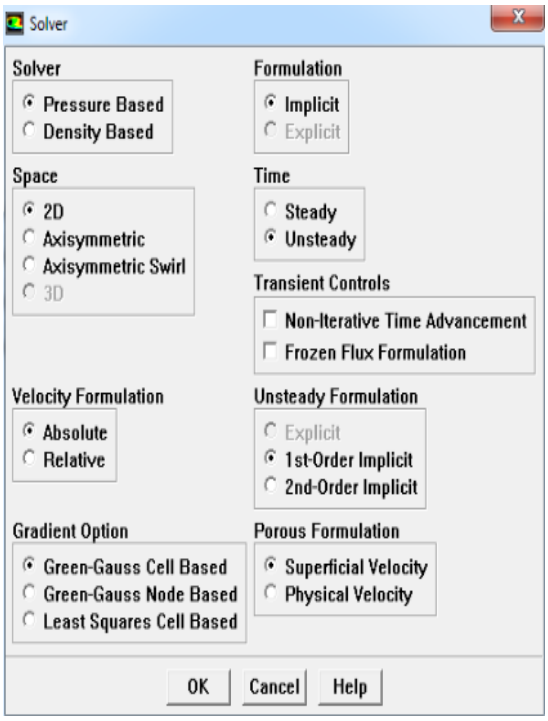

Figure 3.18 : Définition du modèle.

- Définir les propriétés des matériaux :

Define >Materials

C'est le choix du solide utilisé avec l'introduction des données concernant les propriétés physiques.

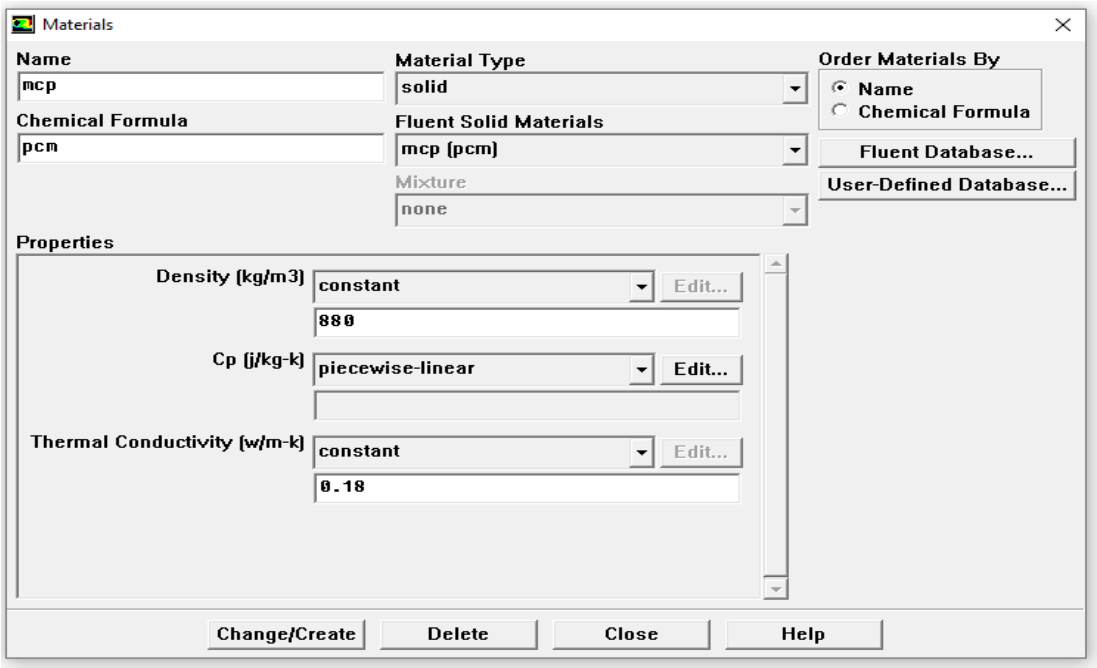

Figure 3.19 : Définition du matériel paraffine.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

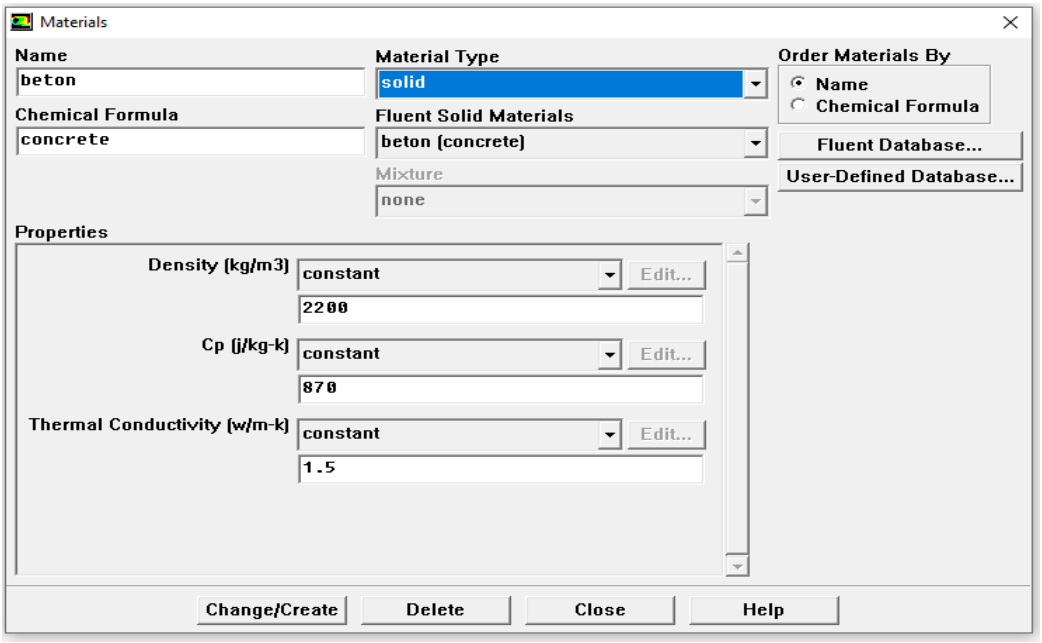

Figure 3.20 : Définition du matériel béton.

- Définir les conditions aux limites :

Define > Operating conditions

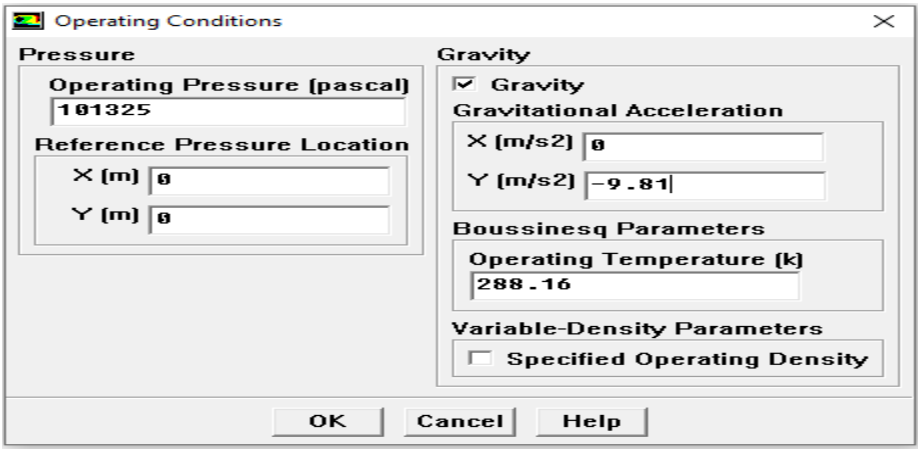

Figure 3.21 : Définition de la gravité.

Les conditions aux limites pour chaque frontière seront définies avec la fenêtre Boundary condition, après avoir sélectionné chaque fois, la frontière concernée et faire rentrer les conditions aux limites de cette dernière ensuite valider.

Define > Boundary conditions

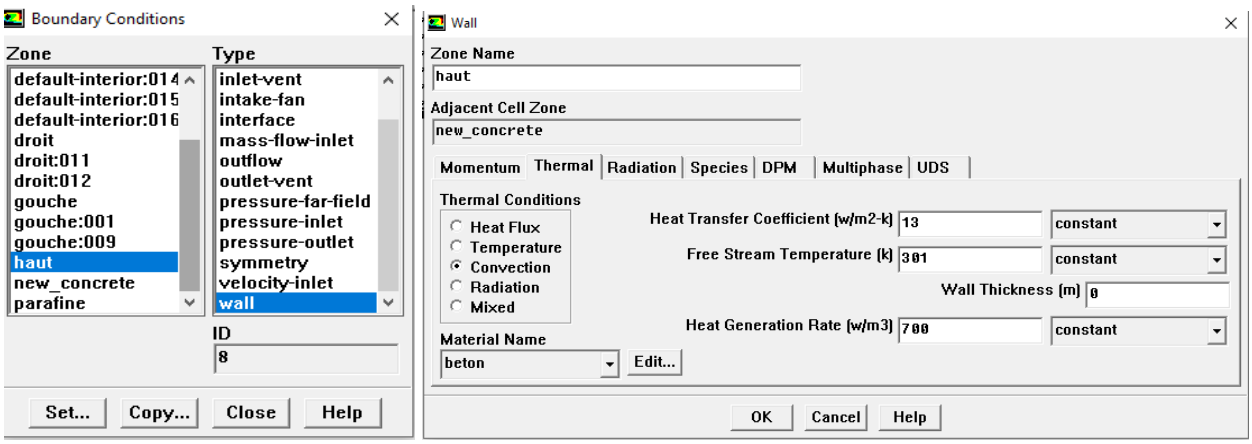

Figure 3.22 : Définition de température en haut.

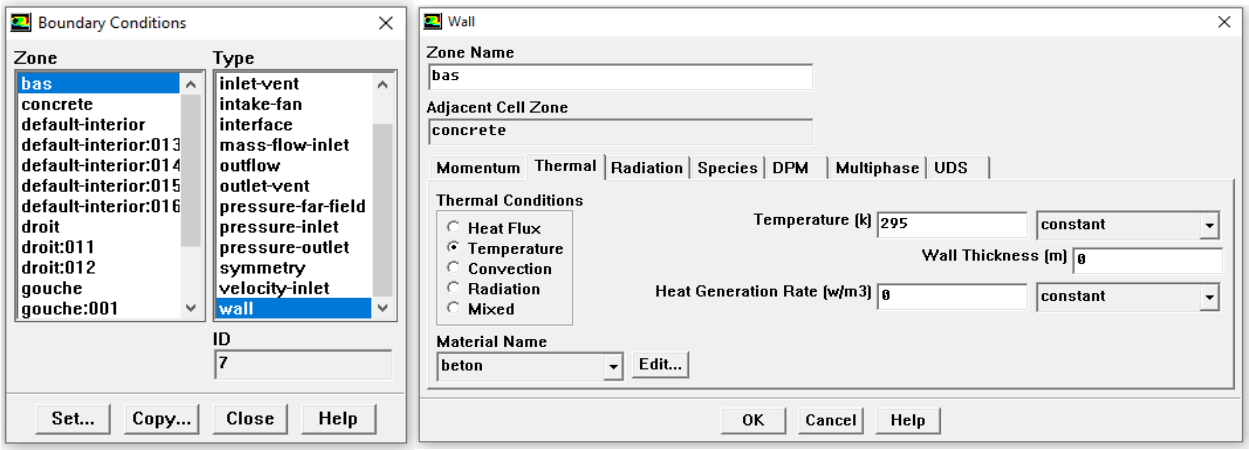

Figure 3.23 : Définition de température en bas.

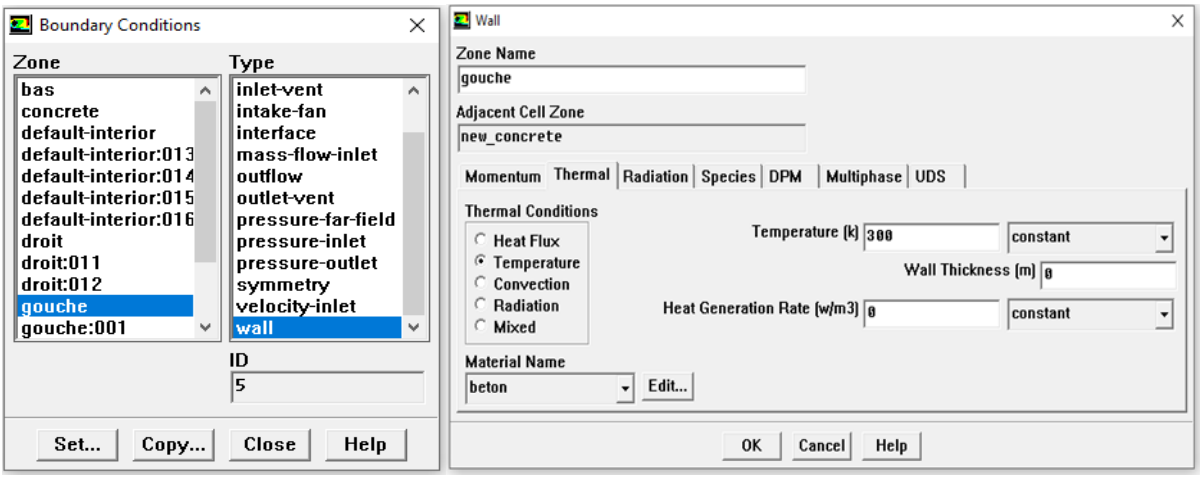

Figure 3.24 : Définition de température dans la face gauche.

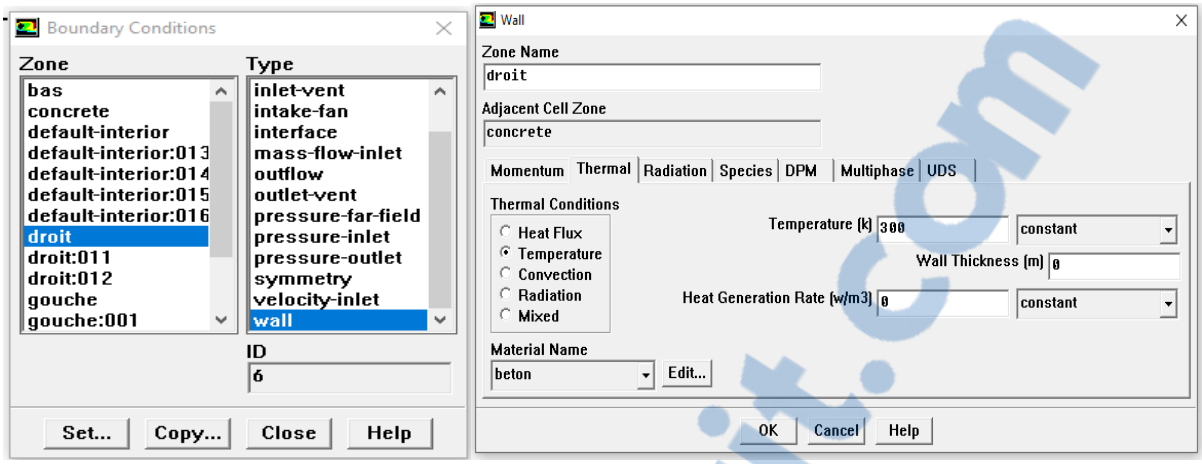

Figure 3.25: Définition de température dans la face droite.

- Solution :

Solve > Controls > Solution

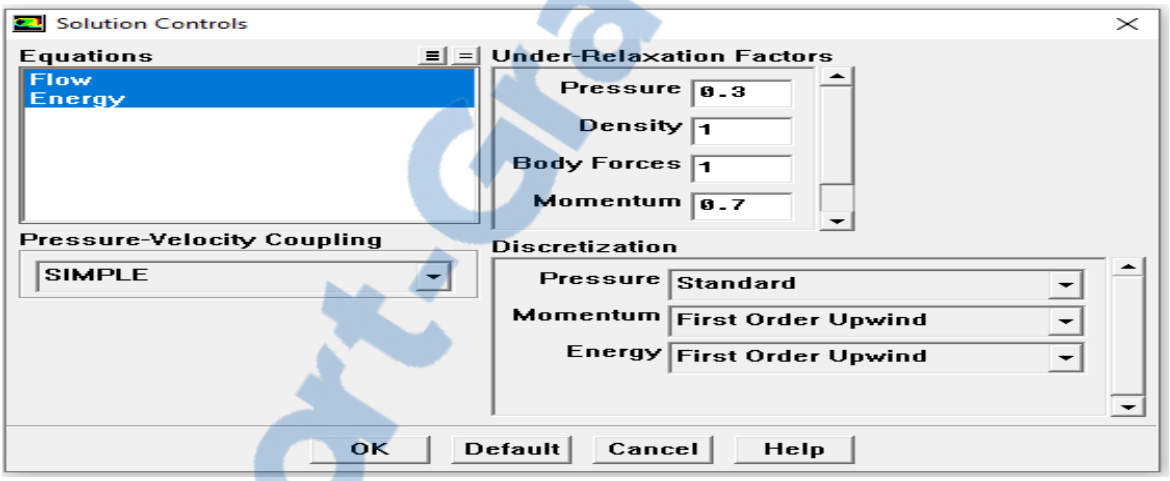

Figure 3.26: Control la solution.

Solve > Initialize > initialize...

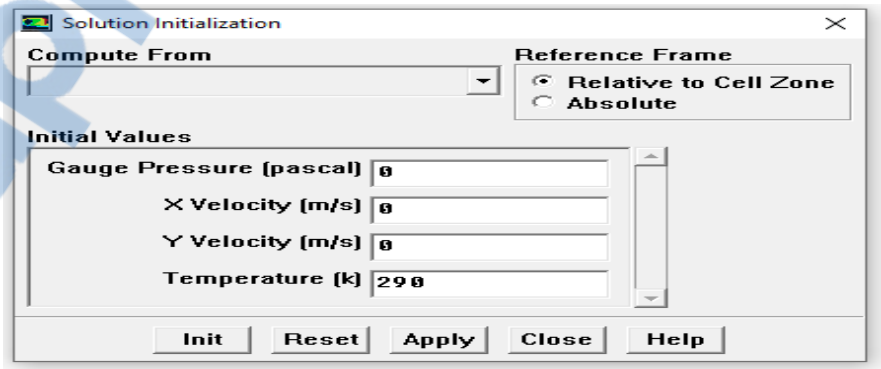

Figure 3.27: Initialiser la température.

Rapport-Gratuit.com

Solve > Monitors > Residuel…

Faire activer l'option plot dans la fenêtre residual monitor. Lancement des itérations jusqu'à la convergence (Solve > Iterate...).

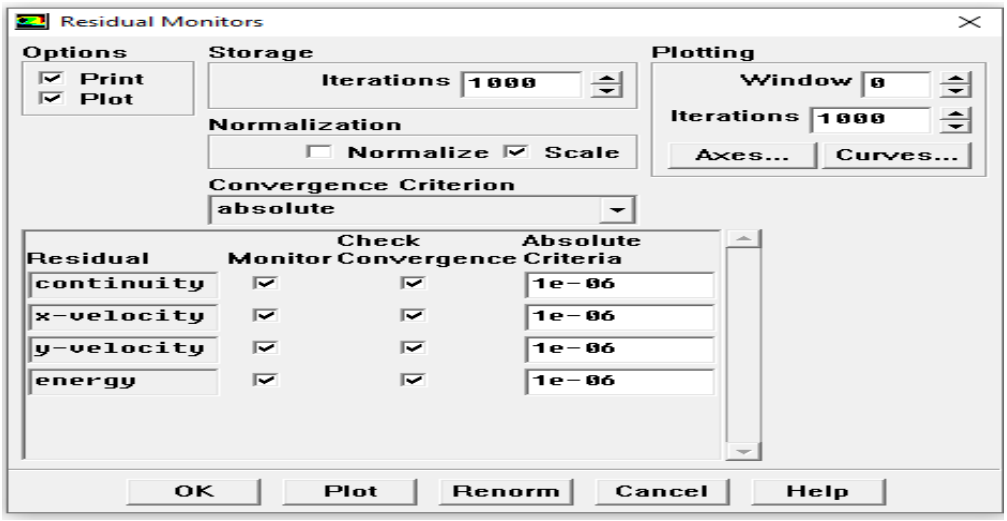

Figure 3.28 : Les résidus des calculs.

Solve > Iterate

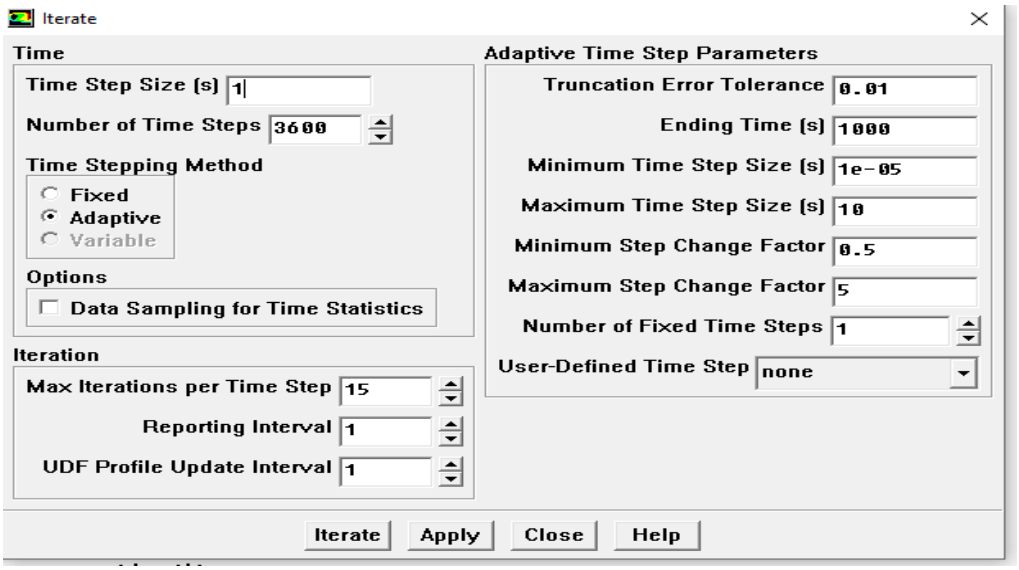

Figure 3.29 : Lancement des itérations.

Display > Contours

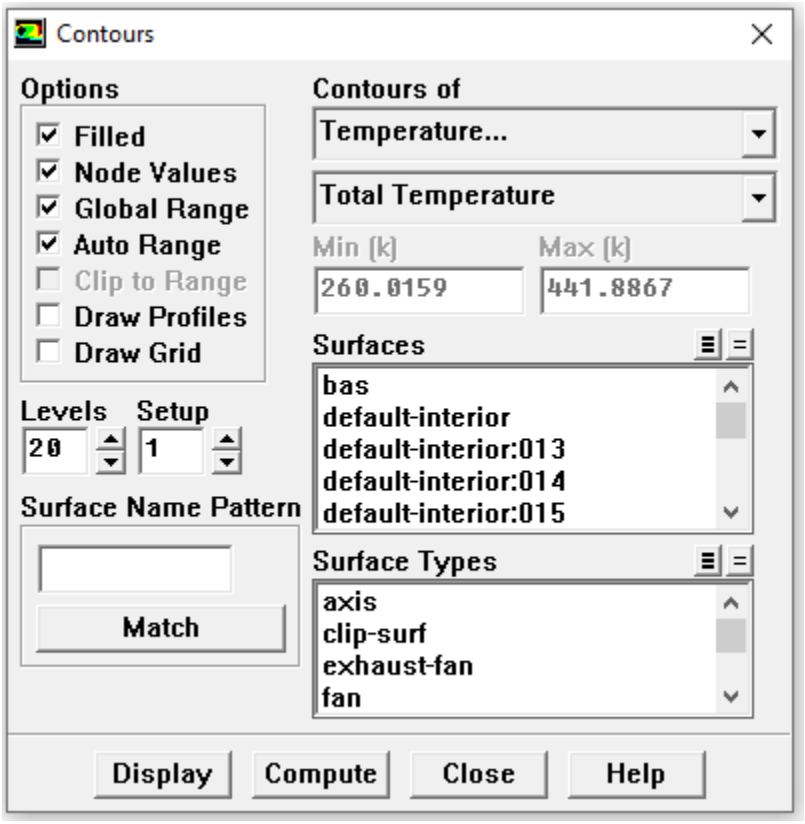

Figure 3.30: Lancement de simulation.

3-6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous venons de présenter le modèle physique utilisé dans ce travail. Nous avons, ensuite, présenté les principes de base du calcul numérique adapté a notre modèle. La discrétisation des équations d'énergie, sa fiabilité aux résultats et son adaptation aux problèmes physiques.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Chapitre 4

Résultats et interprétations

4-1. Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter et discuté les résultats de simulation obtenus par le Logiciel *Fluen*t. Dans cette analyse on utilise la variation temporelle de la température pour comparer entre les deux cas étudier avec et sans MCP.

La géométrie considérée et les conditions aux limites ont été présentées dans le chapitre 3, ainsi que la discrétisation du modèle numérique et la simulation numérique ont été faite respectivement dans un sous processeur Gambit et le code de calcul *Fluent.*

4-2. 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 4.1. Plusieurs maillages ont été opérés 1270, 2378 et 4130 nœuds. Nous avons retenu une grille avec un maillage à 4130 nœuds qui donne des résultats très satisfaisants.

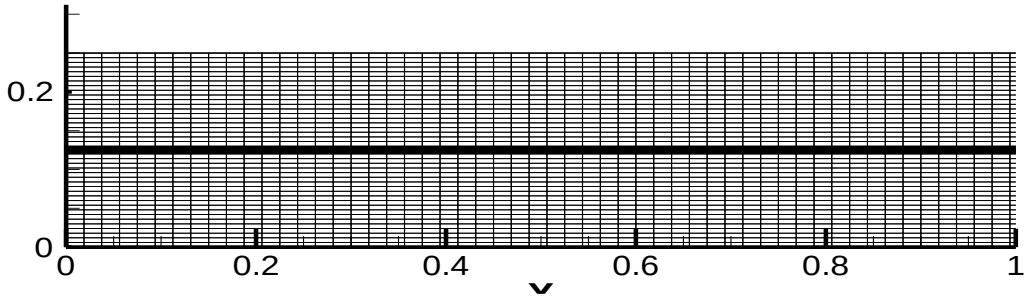

Figure 4.1: Exemple de maillage utilisé pour plancher.

4-3. Résultats et discussions :

La figure 4.2 montre l'évolution des champs de température de plancher avec et sans MCP aux instants 0s, 6h, 12h, 18h et 24h. La température extérieure imposée de façon constante a 30°C.

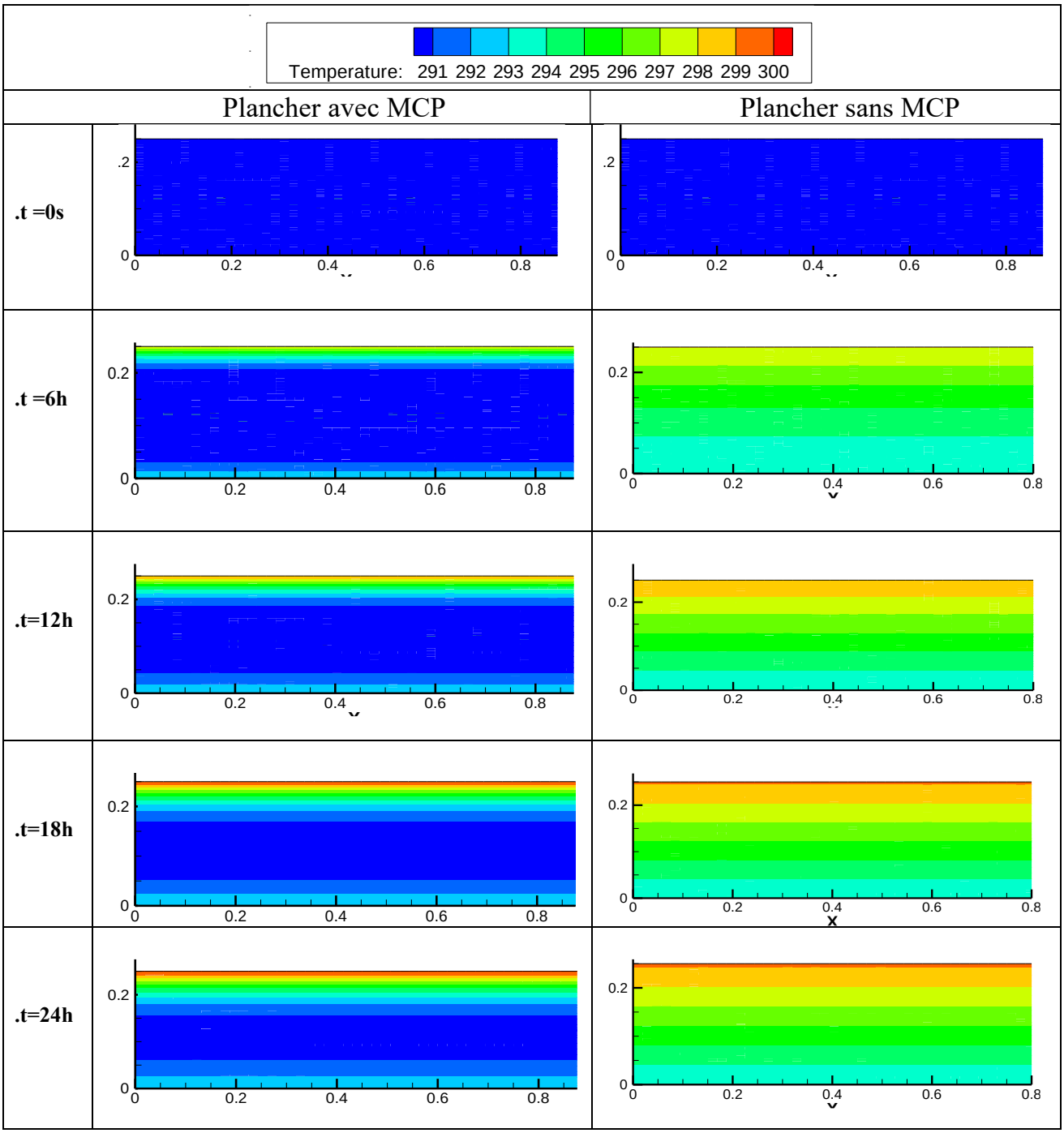

Figure 4.2 : Evolution Temporelle de la température durant 24h.

L'effet de la température de la surface extérieure a été examiné en comparant les cas du plancher avec et sans MCP.

Nous constatons que le pic de température dans le plancher varie en fonction de l'évolution du temps. Pendant le rayonnement solaire q_{rad} il y a un réchauffement de la dalle et plus intense dans la couche du béton sans paraffine à cause de la conductivité du béton (1.5 W/m.K) et absence d'isolant. Cependant dans le cas avec paraffine l'évolution de température est faible parce que est entrain de ce chargé ou d'absorber l'énergie thermique.

-A t=0s la température constante dans les deux cas de plancher avec et sans MCP.

-A t=6 h, Correspond au début du réchauffement de plancher lorsque les paraffine sont encore à leurs états solides. La température de l'extérieure à commencer à influer sur la température interne, le plancher sans paraffine a été la plus influencé que celle qui contient le MCP, l'écart de la température tend à s'amplifier peu à peu par rapport au temps (t).

-A t=12h, le rayonnement solaire est maximum provoque le réchauffement des planchers spécialement celle sans paraffine car celle qui est avec MCP est moins provoqué à cause de la présence des matériaux à changement de phase qui se charge avec la température extérieure et se fusionner.

-A t=18h, la température à l'intérieure de plancher (avec et sans paraffine) continue à augmenter malgré que la température de l'extérieure et le rayonnement solaire reste constante mais l'augmentation sur le plancher sans MCP est plus supérieure que le plancher avec MCP. Ce phénomène du au stockage de la chaleur sensible dans le béton et le stockage de la chaleur latente dans la paraffine.

-A la fin de la journée t=24h, il y'a une petite augmentation de température interne de plancher avec MCP par rapport ou plancher sans MCP, donc il faut bien choisir le matériau à changement de phase pour offrir un confort thermique maximum., Par conséquent, il y a une influence significative de la conductivité thermique du béton et du MCP sur la température intérieure.

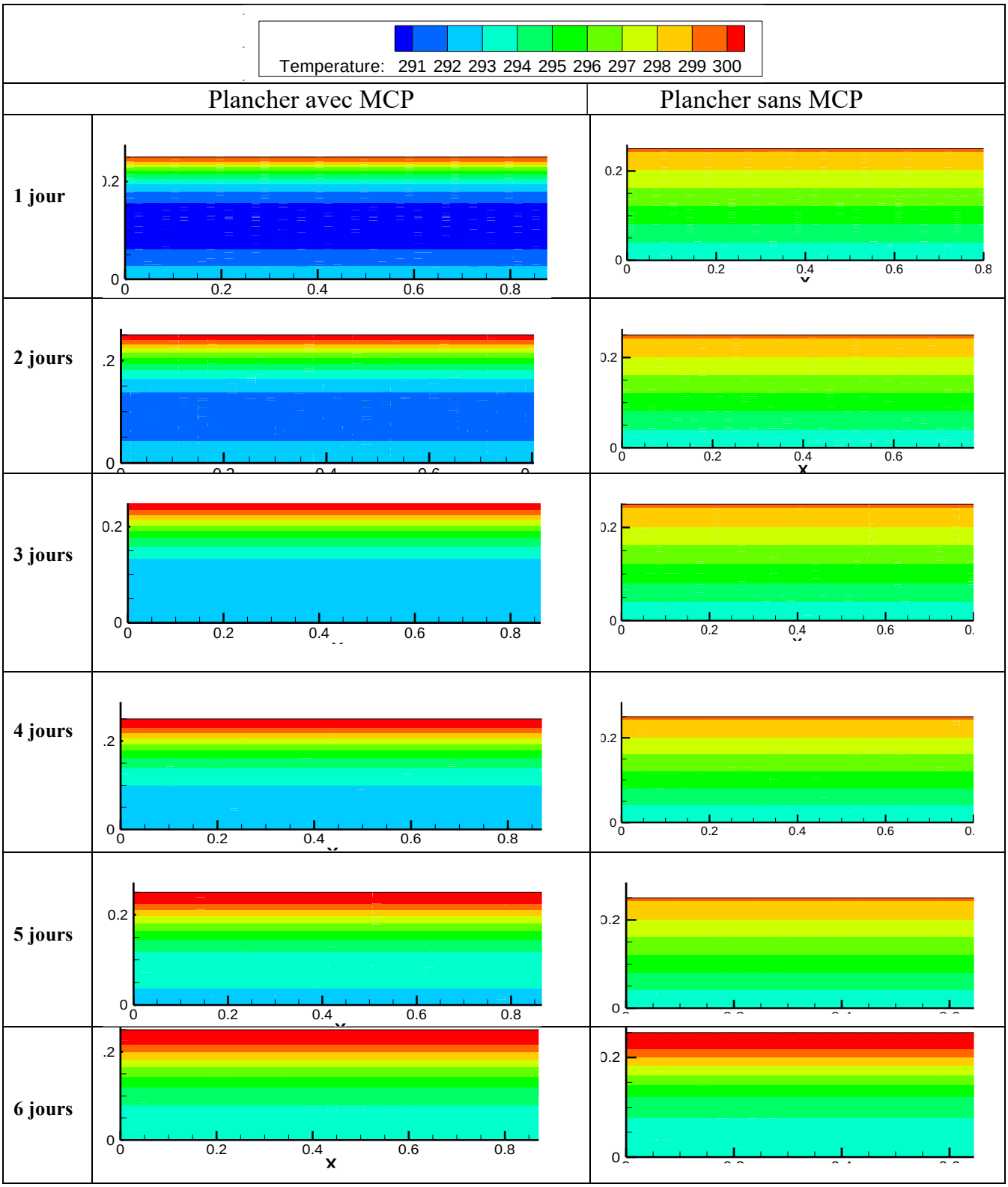

Figure 4.3 : Evolution Temporelle de la température durant 6 jours.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

La figure 4.3 présente l'évolution temporelle de la température pendant 6 jours. Après les premiers 24 heures, la température à l'intérieure des planches à augmenter plus dans le plancher sans Paraffine que l'autre avec paraffine pendant les autres 6 jours.

On peut dire que le MCP peut réduire considérablement la température intérieure. Le plancher composé de paraffine améliore le confort thermique dans ces conditions.

-Pour le 1er jour et 2 ème jours la température dans l'intérieure de plancher avec MCP diminué que dans le plancher sans MCP. Les MCP de par leur particularité à pouvoir stocker et relâcher une quantité importante de chaleur c'est pour ça la température dans le cas avec MCP moins que le plancher sans MCP.

-Pour 3 et 4 ,5 jours, la variation de température est continue dans le plancher avec MCP par contre dans le plancher sans MCP est stable mais toujours la température moins élevée dans le plancher avec paraffine par rapport aux plancher sans paraffine.

-pour le 6 jours, on remarque que la variation de température devine stable entre (21 et 27) °C dans les deux cas et presque la même valeur.

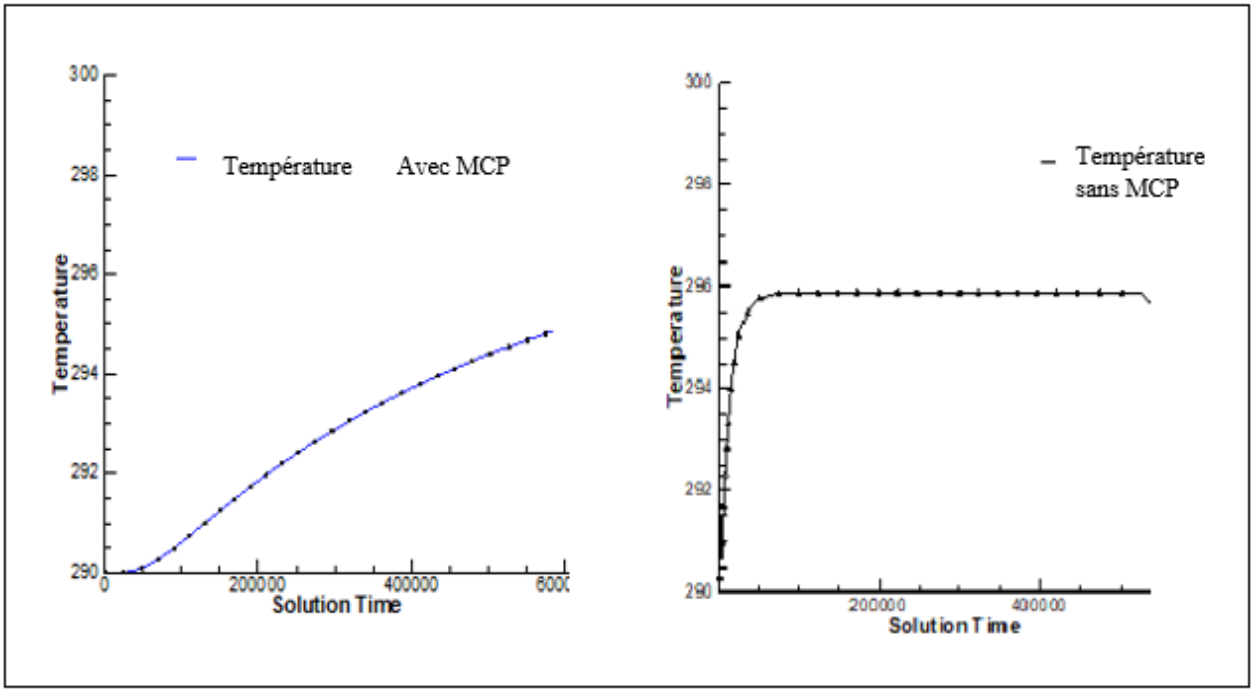

Figure 4.4 : Evolution Temporelle de la Température avec et sans MCP au long de l'axe Y avec X=0.50mca

Dans un premier temps, l'énergie thermique est transférée par conduction à travers la paroi de supérieure du planché en raison de la différence de température entre T_{ext} et T_{int}, par conséquent, des valeurs élevées du flux de chaleur sont observés au début du processus du chaufage. Aussi on peut apercevoir que l'amplitude des températures de plancher sans paraffine est plus importante (+2°C) par rapport aux températures de plancher avec paraffine (21.4°C).la courbe avec MCP augmente uniformément avec des faibles température par rapport au courbe sans MCP qui augmenter maximum on observe un pic de température 23°C.la présence des matériaux à changement de phase l'influence de la température sur le plancher est plus long celle veut dire que le paraffine se charge à partir de la température extérieure sur eux et joue un rôle d'accumulateur d'énergie thermique et régule parfaitement la température intérieure.

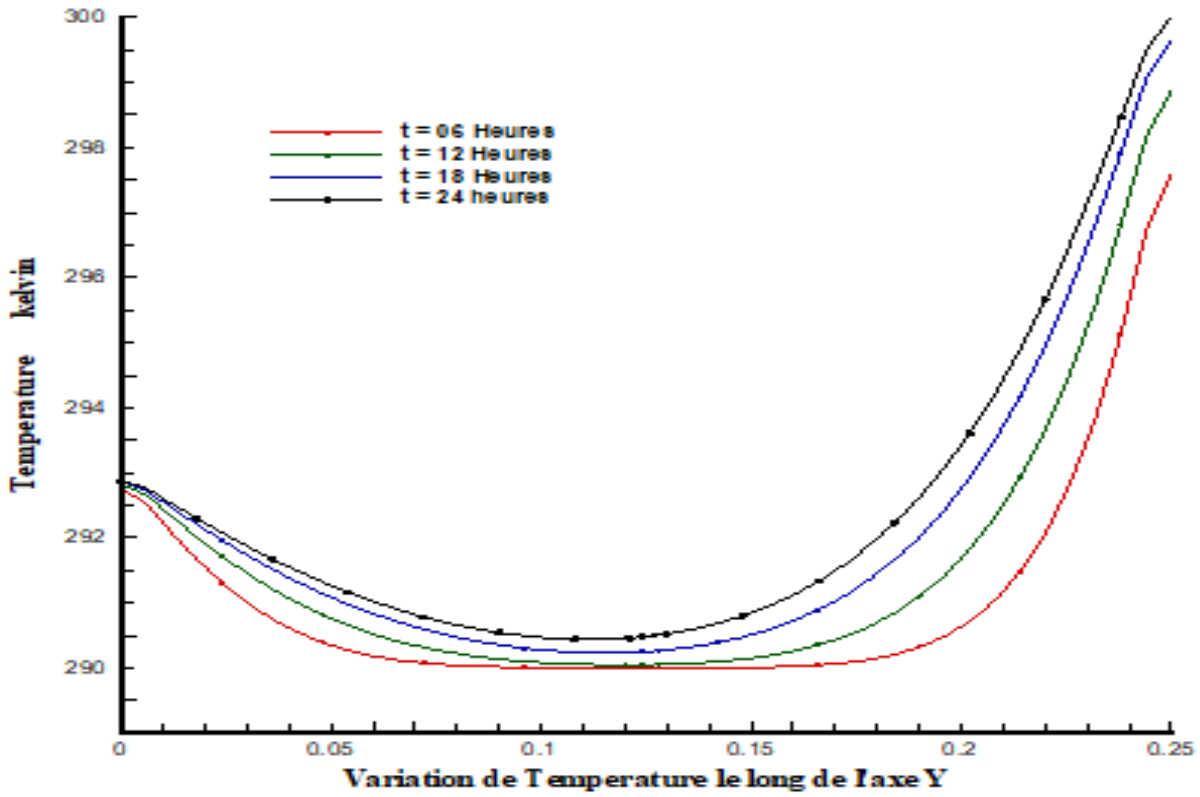

Figure 4-5 (a) : Variation de la température le long de l'axe y

Cas Planché avec MCP.

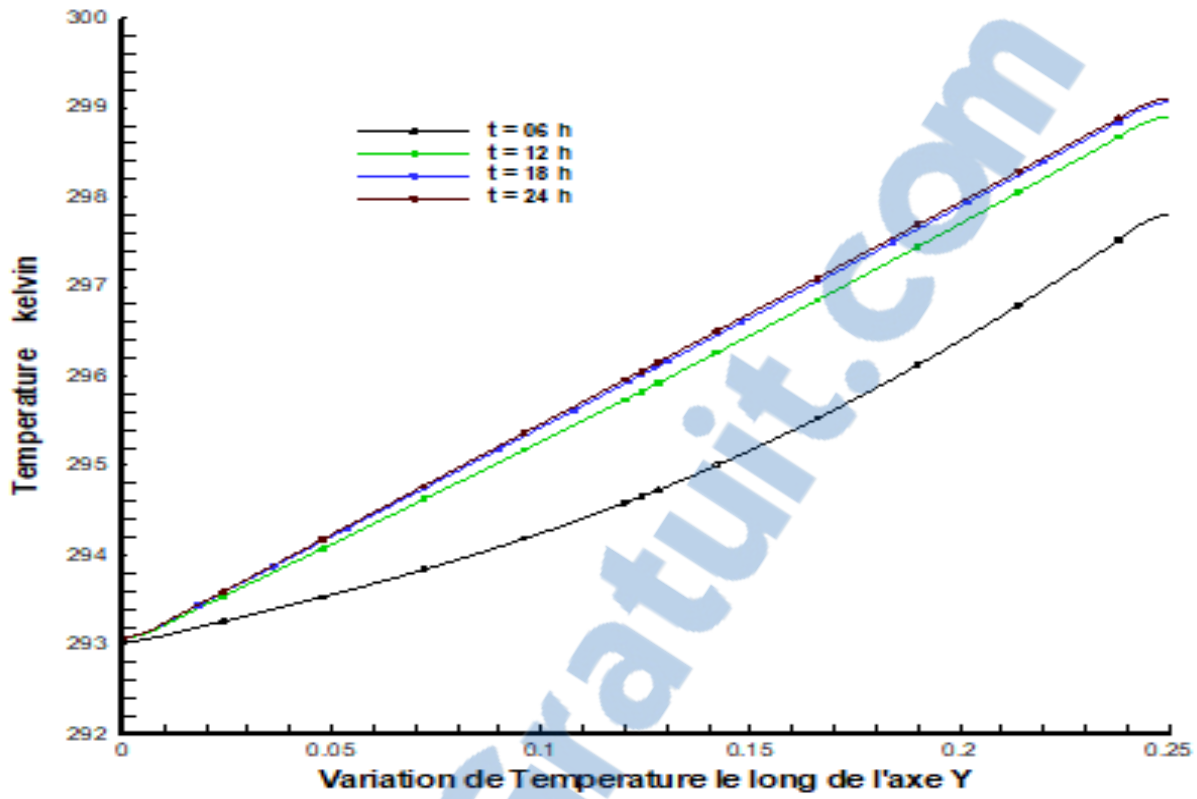

Figure 4-5 (b) : Variation de la température le long de l'axe y

Cas Planché sans MCP.

La figure. 4.5 illustre les profils des températures intérieures du plancher (x=0,75m), avec et sans MCP a différents instants (6, 12, 18 et 24 heures).

Le profil de température de la paroi du plancher avec MCP présente un pic de température dus à la présence de la couche de MCP aux milieux de la dalle en béton qui stoppe la surchauffent intérieur du plancher. Notons également que la température de la couche sous le MCP est bien inférieure aux températures de la couche supérieure en raison du rayonnement solaire reçu par l'extérieure.

Il est intéressant de noter que l'évolution du profil de température dans le plancher sans MCP (cas b) est croissante et plus continu que celui avec MCP (cas a) qui agit comme un accumulateur d'énergie thermique. Cela indique clairement le lien entre le changement de phase et le stockage de la chaleur associée.

Rapport-Gratuit.com

4-4. Conclusion :

Dans ce travail une simulation numérique sur le stockage thermique par chaleur latente avec un matériau à changement de phase (MCP) à été étudier. Pour cela on a examiné deux cas de planché avec et sans MCP.

Les résultats obtenus de comportement thermique de plancher avec et sans paraffine sont comparé. Dans cette simulation, les résultats obtenus confirment que la présence de paraffine permet de jouer un rôle remarquable sur le confort thermique notamment en stabilisant la température du milieu dans lequel il est inséré ainsi il est possible de réaliser des économies de consommation d'énergie électrique.

Aussi la présence de MCP dans de telle épaisseur mince joue son rôle d'amortisseur thermique et permet d'atténuer les variations de température.

Dans les deux cas tests, avec et sans MCP et suivant les importances relatives données au coût et au confort, nous avons montré que le l'utilisation de matériaux à changement de phase MCP permet de faire des économies énergétiques substantielles en évitant les consommations excessives durant les pics de température et évitant les systèmes de climatisations.

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail est d'étudier 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 importante des émissions et les recherches antérieures ont montré l'intérêt d'utiliser des MCP pour réduire les consommations 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. Chercheurs et industriels mettent au point des techniques innovantes pour intégrer les MCP à l'enveloppe du bâtiment afin d'augmenter leur capacité de stockage thermique et pour tenter d'utiliser de manière optimale ces matériaux, notamment avec le conditionnement des MCP par micro encapsulation.

L'objectif de cette étude est d'assurer la stabilité de la température du milieu ambiant intérieure d'une cellule à des perturbations de température du milieu ambiant extérieur. Cette cavité pouvant désigner un espace habitable.
L'étude numérique est réalisée à l'aide d'un modèle physique traitant un plancher avec une couche de MCP et un autre plancher sans MCP pour faire la simulation sous des conditions climatiques. Le transfert de chaleur avec changement de phase est modélisé numériquement par la méthode de la capacité thermique effective Ceff. Le type de matériau à changement de phase utilisé est le Paraffine qui demande une température de fusion arrive à 22.5°C.
D'après l'essais traitées confirme que la présence de ce matériau permet de jouer un rôle notable dans le confort thermique, notamment en stabilisant la température du milieu dans lequel il est inséré et permet aussi de réduire la consommation quotidienne d'énergie et fournit un milieu interne modéré.

Les résultats numériques obtenus montrent que l'utilisation des MCP dans les planchers de bâtiment en tant que composants de stockage d'énergie peut réduire la température. le MCP se charge pendant la journée par la chaleur extérieure et la restituer pendant la nuit. Le temps aussi joue un rôle au fonctionnement de la température extérieure sur les planchers on observant que le plancher avec MCP se chauffe plus lentement que le plancher sans MCP on peut dire que le MCP est un amortisseur thermique.

Le seul défaut de MCP le cout élève de ce type de matériau à changement de phase mais ses avantages peuvent couverts ce défaut, donc il faut bien trouver une solution qui convient pour une utilisation facile et peu couteuse des MCP.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Références Bibliographiques

A .Boumahrat, Gourdin.(1993) : Méthodes numériques appliquées, Réimpression Alger. Edition TEC et Doc- PARIS.

A. Bricard , D Gobin.(2000) : transferts de chaleur avec changement d'état solide-liquide, Techniques de l'ingénieur .

A. Gontard, K. Gryska, L. Lallemand .(2012) : « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour .

A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen , D. Buddhi. (2009): « Review on thermal energy storage with phase change materials and applications» Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 318-345.

A.Abhat ,D. Heine , M.Heinisch ,A.Malatidis ,G. Neuer. (1981 Février): Development of a modular heat exchanger with integrated latent heat energy store. Tech. rept.BMFT FBT 81-050. Germany Ministry of Science and Technology Bonn.

A.Abhat .(1983):"Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials", Sol. Energy, vol. 30, no. 4, pp. 313-332.

A.Abhat. (1978): Investigation of physical and chemical properties of phase change materials for space heating/cooling applications. In : Proc. of the international solar energy congress.

A.Akrouche. (2011) : « Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase» Mémoire de Magister: Systèmes Energétiques Avenacés,Université M'Hamed Bougara,Boumerdes.

A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini. (2008): Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, 2438–2458.

A.N.Korti.(2000) : Modélisation numérique du transfert de chaleur lors de la solidification des métaux, Mémoire de magister, Université Abou bekr belkaid, Algérie.

A.Pasupathy, L.Athanasius, R.Velraj, R.V Seeniraj.(2008): Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (pcm) for thermal management. Applied thermal engineering, 556 – 565.

A.Touzani .(2017) : « Énergétique du bâtiment » **,**Présentation Bureau Veritas.

A.Waqas et Z. Din,(2013): Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings-A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, 607–625.

B. Zalba, J. Marın, L. F. Cabeza, H. Mehling. (2003): Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering, vol. 23, 251-283.

B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza et H. Mehling.(2003): Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 251-283.

B.Binet .(1998): Bruno BINET « Etude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes».Sherbrooke (Québec), Canada.

B.Chateau et B.Lappilonne.(1977) : La Prévision a Long Terme De La Demande D'énergie propositions méthodologiques éditions du centre national de la recherche scientifique, Paris p.90.

B.Saheb ,N. Larab .(2018) : « Etude et simulation de Etude et simulation de ventilation d'un local ventilation d'un », Mémoire de Master : Génie mécanique, Université de Bouira.

C. Voelker, O. Kornadt, M. Ostry. (2008): Temperature reduction due to the application of phase change materials, Energy Build. 937–944.

C.Flory-Celini.(2008) : « Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiels existant» Thèse de Doctorat, Génie Civil, Université de Lyon 1 Claude Bernard.

C.K. Jotshi, D.Y. Goswami , J.J. Tomlinson(1992): Solar thermal energy storage in phase change materials, in proc. 1992 ASES Annual Conf, USA.

D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, A. Athienitis , C. Liu. (1993) : Energy storage building materials with organic PCM's, 28th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf,Georgia, Alta, Vol. 2, pp. 143-148.

D. G. R. Sharma, M. Krishnan, C. Ravindran .(2000): Determination of the rate of latent heat liberation in binary alloys, Materials Characterization 44 309–320.

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

D.Bourgueba,I.Bekkouche.(2014) : « Simulation numérique du stockage De l'énergie solaire par chaleur latente », Mémoire de Master : Génie thermique et énergie renouvelable, Université Abou bekr belkaid,Tlemcen.

D.Buddhi et R. Sawhney,(1994) Proc : Thermal energy storage and energy conversion.School of energy and environmental studies.

D.W.Curran .(1981) : la nouvelle donnée énergétique, Masson, collection géographie, p.17

E .Oró Prim. (2013): « Thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications », Universitat de Lleida.

E.A. Alawadhi. (2007): Thermal analysis of a building brick containing phase change material, Energy and Buildings 351–357.

EREC Brief, Phase change materials for solar Heat Storage, http://www.eren.doe.gov/

F. Kuznik, J. Virgone, J.-J. (2008): Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation, Energy Build. 148–156.

F.Kuznik ,J. Virgone ,J.Noel.(2008): Optimization of a phase change material wallboard for building use. Applied Thermal Engineering.pp.1291-1298.

F.Kuznik, J.Virgone, J.J Roux.(2008) : Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard:a full-experimental investing. Energy and buildings.40(2),pp.148-156.

F.Miranville,(2002) :Contribution à l'Étude des parois complexes en physique du bâtiment : Modélisation, expérimentation et validation expérimentale de complexes de toitures incluant des produits minces réfléchissants en climat tropical humide. Ph.D. thesis, Université de La Réunion.

Fiche technique agence nationale de l'habitat Anah www. anah.fr

G.A.Lane.(1983):. Latent heat materials. Crc press, boca raton, florida., Volume 1.

G.P. Fernanda. (1988): "Salt hydrates used for latent heat storage: corrosion metals and reliability of thermal performance", Solar Energy 193–197.

H .Nazir, M Batool, F. J. B Osorio, M I Ruiz. (2019): Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review, Int J. of Heat and Mass Transfer, 491-523.

H.Mehling et L.F.Cabeza. (2008): Heat and cold storage with PCM, Springer -Verlag Berlin Heidelberg.

H.saib,(2009) :«Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages», mémoire de magister.

H.Saib.(2009) : Etude de simulation des phénomènes de transfert thermique lors de la solidification d'alliages, mémoire de magister.

Harald Mehling , L.F.C., Heat, Mass Transfer. (2008): Verlag Berlin Heidelberg: Springer.

I.O.Salyer et A.K.Sircar .(1990):«phase change materials for heating and cooling of residential building , procceeding of the 28th intersociety energy conversion engineering confference», reno, nevada,pp.12-17 .

Isover guide la thermique du bâtiment

J.L. Dauvergne .(2008) :Réduction et inversion de modèles de conduction thermique avec changement de phase. Ph.D. thesis, université de Bordeau 1.

J.S. Hasio.(1985) : An effecient algorithm for finite difference analyses of heat transfer with melting and solidification, Numerical heat transfer,vol 8, 653-666.

J.Venstermans .(2010) : Des enduits pour une climatisation douce – Revue d'information générale du Centre scientifique et technique de la construction.

L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A. I. Fernández. (2011): Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, 1675-1695.

L.L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A. Mishkinis et P.V. Bohan .(2000): «Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine» A pplied Ther ma l Engineering, Vol. 20, pp. 913-923.

Livre vert sur l'efficacité énergétique. (2005) : Comment consommer mieux avec moins,Office des publications officielles des Communautés européennes.

M.Ahmad .(2004) :« Couplage matériaux à changement de phase, supe isolation, apports solaire ». Thèse de Doctorat : mécanique énergétique. Université Joseph Fourier, Grenoble.

M.Bahrar .(2018) : «Contribution au développement et à l'analyse d'une enveloppe de bâtiment multifonctionnelle dans le cadre de l'optimisation du confort dans l'habitat » Thèse de Doctorat: Mécanique et Ingénierie l'université Lyon .

M.Boutaoui.(2015) : Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique, mémoire du master, Université M'Hamed Bougara Boumerdes.

M.Duquesne. (2013) : « résolution et réduction d'un modèle non linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes » l'université de bordeaux.

M.M.Farid et al.(2004): A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy conservation and management,1597-1615.

M.Pierre Pedro.(2013) : «développement d'un procède de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique». Institut national polytechnique de Toulouse.

N.Sarier et E. Onder,(2012) :Organic phase change materials and their textile applications: An overview,Thermochimica Acta. **540**: p. 7-60.

P. Schossig, H.M. Henning, S. Gschwander, T. Haussmann. (2005): Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials, Solar Energy Materials and Solar Cells 89 (2–3) 297–306.

P.Depecker .(1985) : Organisation des contenus sur le thème de l'énergie.

R Jacob, F Bruno. (2015): Review on shell materials used in the encapsulation of phase change materials for high temperature thermal energy storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79-87.

R.Tsonglce , W.Y Chiou. (1995): Finite element analyses of phase-change problem using multivel techniques, Numerical heat transfer, 277-290.

S .Atul et al.(2007): Review on thermal energy storage with phase change materials and applications – Renewable and sustainable energy reviews (999-1031) .

S.B.E Ango .(2011) : Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment, développement d'un système actif à matériaux à changement de phase : Arts et Métiers ParisTech - Centre de Bordeaux I2M-TREFLE.

S.Berreksi et S.Latarsa .(2016) : « Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique »Mémoire de Master : énergétique **,**Université M'Hamed Bougara, Boumerdes.

S.E Ango.(2011): Serge Ekomy Ango. Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase ,Thèse de Doctorat ,Génie des procédés. Arts et Métiers ParisTech. Français.

S.Guichard .(2013) : « Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale » Thèse de Doctorat : Physique Générale. Université de La Réunion. Français

S.M.Husnain.(1998): "Part I: Heat Storage Material and Technique", Review onSustainable Thermal Energy Storage Technologies, Energy Research, Vol. 39, pp. 1127-1138.

S.V. patankar.**(1980):**Numerical heat transfer and fluid flow, Hemispher, Washinpto, DC 196.

S.Wolfgang .(2004): "Phase Change Material Heat Storage: New Materials and New Solar and Other Applications", Graz University of Technology, Institute of Thermal Engineering, IEA Task 32 Subtask C leader (PCM).

SA Memon. (2014): Phase change materials integrated in building walls: a state-of-the-art review. Renew Sustain Energy Rev, 870–906.

T. Pacson,(2011).Introduction to Phase Change Materials:Building Applications .

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

T.C. Ling, C.S. Poon. (2013): "Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview", Construction and Building Materials, 55-62.

T.Vineet Veer, D.Buddhi .(2005): PCM thermal storage in building: a state of art ,Renewable et sustainable,energy reviews.

V. D. Bhatt, K. Gohil, A. Mishra .(2010) : Thermal Energy Storage Capacity of some Phase Changing Materials and Ionic Liquids, Int. J. of Chem. Tech. Res., vol. 2, N°3, 1771-1779.

V.V. Tyagi, D. Buddhui (2005): "PCM thermal storage in buildings: A state of art", Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, H. Di. (2007): Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook, Building and Environment 42 (6) 2197–2209.

Yves. Robillard.(2011) : Guide vers un bâtiment durable : les équipements et solutions d'efficacité énergétique.