



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Thème:

**Etude et conception d'un
système de confort thermique
passif pour l'habitat**

Présenté par:

-BENZINA Mohamed
-BENMOUSSA-MAHI Ali

Encadré par : **Mr NEHARE Driss**

Soutenu le : **08/09/2020**

Devant le jury composé de :

-Mme BOUAFIA Farida
-Mr DORBANE Abdelhakim

Année universitaire 2019/2020

Sommaire

Remerciements.....	7
Dédicaces	8
Résumé	9
ملخص	10
Abstract	11
1. Introduction générale	13
Chapitre I : Le confort thermique et l'habitat	
2. Le confort thermique et l'habitat	15
2.1. Introduction	15
2.2. Notions de confort thermique	15
2.2.1. Définition d'un confort thermique	15
2.3. Le confort thermique	15
2.4. L'aspect physique (les échanges de chaleur)	16
3. Les Modes De Transferts Avec L'environnement	17
3.1. La conduction	17
3.2. La convection	17
3.3. Le rayonnement	17
4. Les Paramètre Du Confort Thermique	18
4.1. Les températures	18
4.1.1. La température de l'air ambiant	18
4.1.2. La température des parois	18
4.1.3. La température ressentie	18
4.2. Humidité relative	18

4.2.1. L'impact de l'humidité relative dans un bâtiment	19
4.3. Mouvement de l'air	19
5. Le confort thermique des bâtiments en utilisant la technique du stockage thermique	20
5.1. Le stockage de l'énergie thermique	20
5.1. Chaleur sensible	21
5.2. Chaleur latente	22
6. Stockage thermochimique	24
7. Matériaux à Changement de Phase (MCP)	24

Chapitre II : Les matériaux à changement de phase

1. Introduction	27
2. Historique des MCPs	28
3. Types des matériaux à changement de phase (MCP)	29
4. Les MCPs organiques	30
4.1 Les paraffines	30
4.2 Les non-paraffines	30
4.3 Les acides gras.....	31
5 Les MCPs inorganiques	31
5.1 Les sels hydratés	31
5.2 Les métaux	32
6 Critères de choix d'un matériau à changement de phase	33
a) Propriétés thermiques	33
b) Propriétés physiques	33
c) Propriétés cinétiques	34
d) Propriétés chimiques	34
e) Aspects économiques.....	34
f) Critères technologiques	34
7. Méthodes d'intégration d'un MCP dans les applications de stockage thermique	35

7.1 Intégration directe	35
7.2 Encapsulation avant intégration	35
a) Macro encapsulation	35
b) Micro encapsulation	36
8. Intégration des MCP passive dans le bâtiment	38
8.1 Plaques de plâtre	38
8.2 Enduits à base de MCP	39
8.3 Murs trombes à base de MCP	40
8.4 Blocs de béton-MCP	41
8.5 Intégration des MCP dans les plafonds	41
8.6 Systèmes actives des MCP en bâtiment	42

Chapitre III : Modélisation numérique du phénomène de changement de phase

1. Introduction	44
1.2 Transfert de chaleur avec changement de phase	44
2. Les Equations régissant le problème en Considération	45
2.1. Équation de continuité	45
3. Les équations de quantités de mouvements	45
3.1. Équation de quantité de mouvement suivant l'axe x	46
3.2 Équation de quantité de mouvement suivant l'axe y	46
4 Équation de la conservation d'énergie	46
5- Présentation du code FLUENT	48
5.1 Résolution du problème avec le code FLUENT	48
a. choix du type de solveur	48
b. choix de matériau	49
c. Solver Controls	49
d. Facteurs Fluid (pcm)	49

e. Facteurs solide (brique)	50
5.2 Schéma du maillage du modèle physique adopté	51

Chapitre IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

1-Introduction	53
2-Étude paramétrique	53
Conclusion Générale	63
Références bibliographiques	64

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Pertes thermiques du corps humain et les paramètres dépendant.

Figure I.2 : Les modes de transferts de chaleur.

Figure I.3 : Température de confort pour différentes vitesses relatives de l'air et un habillement moyen.

Figure I.4. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement de phase.

Figure I.5 : Différents types de stockage thermique de l'énergie solaire.

Figure II.1 : Classification des matériaux à changement de phase.

Figure II.2 : Conditionnement des MCP.

Figure II.3 : Photographie des MCP macro-encapsulés : pochettes, sphères, tubes, plaquettes.

Figure II.4 : Procédé micro encapsulés .

Figure II.5 : Photographie d'une poudre de MCP micro encapsulés.

Figure II.6 : Modèle de mur contenant une plaque de plâtre-MCP.

Figure II.7 : Plâtre contenant des MCP.

Figure II.8 : Modèle d'un mur trombe à base de MCP.

Figure II.9 : Bloc de béton contenant des MCP.

Figure II.10 : Modèle de panneaux de MCP.

Figure II.11 : Système actif conçu par Zalbe et al.

Figure III.1 : Solidification d'un matériau pure.

Figure III.2: Schéma du maillage du modèle physique adopté.

Figure – IV.1 - Contours isothermes du système Brique/PCM étudiés au Flux solaire 600 W/m^2 .

LISTE DES FIGURES

Figure – IV.2- Contours isothermes du système Brique/PCM étudiés au Flux solaire 800 W/m^2 .

Figure – IV.3- Contours isothermes du système Brique/PCM étudiés au Flux solaire 1000 W/m^2 .

Figure – IV.4- Distribution de la fraction liquide au Flux solaire 600 W/m^2

Figure – IV.5- Distribution de la fraction liquide au Flux solaire 800 W/m^2

Figure – IV.6- Distribution de la fraction liquide au Flux solaire 1000 W/m^2

REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent d'abord à « Dieu » le tout puissant qui nous a donné la force, le courage et la patience pour réaliser ce projet.

Nous aimerions remercier chaleureusement notre encadreur Professeur « NEHARI Driss » pour ses précieux conseils et son orientation ficelée tout au long de notre parcours du projet de fin d'étude.

Nous remercions sincèrement nos familles pour nous avoir soutenus et aidés durant toute la durée de nos études.

Nous souhaitons remercier toutes les personnes qui ont bien voulu consacrer un peu de leur temps libre pour aider durant notre travail.

Merci pour tous

DEDICACE

Nous dédions ce travail également à nos familles pour tous les sacrifices
et les encouragements

Comme nous le dédions à nos professeurs et à tous ceux qui s'ont assistés
et soutenus durant nos études

Nous dédions ce travail également à tous nos amis

RESUME

Le stockage d'énergie dans les bâtiments est un moyen important pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus appropriées pour une telle gestion, en établissant une relation constante entre la demande et la fourniture d'énergie.

L'objectif de ce travail est d'étudier un dispositif énergétique intégré dans l'enveloppe des bâtiments permettant de stocker d'importantes quantités de chaleur dans des volumes réduits par la fusion à des températures caractéristiques. Notre travail repose sur le fait que les parois légères équipées de matériaux à changement de phase (*MCP*) constituent une solution prometteuse pour stocker l'énergie solaire captée en façade.

Dans ce présent travail comporte un volet théorique sur l'utilisation des matériaux à changement de phase dans bâtiment, et un volet numérique qui a permis de simuler le comportement thermique du bâtiment et en particulier celui du *MCP*. Cette simulation a été effectuée grâce au logiciel *Fluent*, qui nous a permis d'étudier le comportement énergétique du système.

Mots-clés : Matériau à changement de phase, Stockage thermique, Chaleur latente, Ansys Fluent.

ملخص

يعتبر تخزين الطاقة في المباني وسيلة مهمة للإدارة المثلى للطاقة الحرارية. وهو يتيح تكييف الانتاج مع الاحتياجات وتهيئة أنسب الظروف لمثل هذه الإدارة، عن طريق إقامة علاقة ثابتة مستمرة بين الطلب والعرض من الطاقة.

والهدف من هذا العمل هو دراسة نظام متكامل للطاقة المدمج في الغلاف المبنى يسمح بتخزين كميات كبيرة من الحرارة وإعادتها في أحجام أقل من خلال الانصهار أو التصلب في درجات حرارة مميزة. تعتمد أصالة العمل على حقيقة أن الجدران خفيفة الوزن المزودة بمواد متغيرة الطور (MCP) هي حل واعد لتخزين الطاقة الشمسية التي تم التقاطها في الواجهة ثم إعادتها إذا لزم الأمر.

ويشمل هذا العمل فرعا نظريا عن استخدام المواد المتغيرة تدريجيا في المباني وعن دمج الهواء/الجدار في نظام غير مستقر، وفرعا رقميا تم تطويره لهذه النظرية بهدف إعداد نموذج ثنائي الأبعاد لمحاكاة السلوك الحراري للمبنى، وخاصة سلوك MCP.

وقد أجريت المحاكاة الدينامكية للنظام بفضل برنامج Fluent ، والذي أتاح لنا دراسة السلوك الديناميكي و الطاقوي للنظام وتقدير كفاءته في الظروف المناخية. وقد تم التحقق من صحة هذا النموذج بمقارنة النتائج العددية بالنتائج التي تم الحصول عليها تجريبيا، والاقتراس من الكتابات.

كلمات رئيسية: غلاف المباني: تخزين الطاقة الحرارية. المحاكاة الرقمية - مواد متغيرة الطور

ABSTRACT

Energy storage in buildings is an important means for optimal thermal energy management. It allows production to be adapted to needs and creates the most appropriate conditions for such management, establishing a constant relationship between energy demand and supply.

The aim of this work is to study an energy system integrated into the building envelope that allows large quantities of heat to be stored and released in reduced volumes by melting or solidification at characteristic temperatures. The originality of the work lies in the fact that lightweight walls equipped with phase-change materials (PCM) are a promising solution for storing solar energy captured on the facade and then releasing it when needed.

In this present work, there is a theoretical part on the use of phase change materials in buildings and on the air/wall coupling in unsteady regime, and a numerical part which was developed in this thesis with the objective to set up a 2D model allowing to simulate the thermal behavior of the building and in particular that of the MCP.

The dynamic simulation of the system was carried out thanks to the Fluent software, which allowed us to study the dynamic and energetic behavior of the system and to estimate its efficiency in climatic conditions. This model was validated by comparing the numerical results with those obtained experimentally and cited in the literature.

Keywords: Thermal energy storage, Phase change material PCM, Building envelope, Dynamic simulation

INTRODUCTION
GENERALE

1. Introduction Générale

Dans le cadre de la maîtrise des dépenses énergétiques, beaucoup de pays se sont mobilisés à réduire leurs consommations énergétiques dans le secteur de bâtiment en agissant sur l'isolation des parois extérieures, la ventilation, le chauffage, les apports solaires et la climatisation. C'est dans cet axe que les recherches au niveau de la thermique du bâtiment se sont accentuées en termes d'amélioration de l'efficacité énergétique qui correspond au ratio entre l'énergie utile et l'énergie totale consommée pour une application requérant un apport externe d'énergie. La plupart des matériaux de construction dans le secteur du bâtiment possèdent une masse thermique relativement faible ou une masse structurelle élevée, à l'image du béton. L'apport d'inertie thermique est donc nécessaire mais s'accompagne d'inconvénients en termes de conception structurelle, d'esthétique et d'écologie. Or, il existe un nouveau matériau combinant une haute inertie thermique et d'excellentes propriétés thermiques, qui prennent une place de plus en plus prépondérante dans les nouveaux designs du bâtiment : il s'agit de matériaux à changement de phase MCP. Ces matériaux accumulent temporairement le surplus d'énergie thermique lors de la fusion du MCP et le libèrent au moment voulu lors de la solidification du MCP par un procédé exothermique. Il est possible de réduire considérablement la consommation d'énergie nécessaire pour refroidir et réchauffer un bâtiment en fonction des conditions climatiques de la zone où l'on se trouve. Il est donc possible d'intégrer des MCP et d'en optimiser les paramètres dans le but de déphaser les pics de consommation d'énergie et par le fait même, de réduire significativement l'usage de la climatisation et du chauffage. En effet, les matériaux à changement de phase qui ont fait l'objet de très nombreuses études au début des années 80 pour les systèmes de stockage de l'énergie solaire offrent aujourd'hui de nouvelles potentialités avec leur intégration dans les composants d'enveloppe, à cause en particulier des évolutions technologiques dans les procédés de conditionnement.

Chapitre I :
Le confort thermique
et l'habitat

2. Le confort thermique et l'habitat

2.1. Introduction

L'atmosphère environnante a des incidences à la fois physique et affectives sur l'homme, donc elle occupe une place centrale dans la conception des bâtiments. La mission principale du constructeur est de créer un environnement intérieur et extérieur adapté à toutes activités humaines et ses besoins au confort. Ce chapitre traitera le confort thermique et les interactions des conditions thermiques de l'environnement avec le corps humain. Il présente aussi les techniques et les stratégies adaptées pour créer le confort thermique dans l'habitat traditionnel, ainsi une conception au bâtiment bioclimatique.

2.2. Notions de confort thermique

2.2.1. Définition d'un confort thermique

Le confort thermique est défini comme « un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique. [1]

Pour assurer le confort thermique une personne ne doit avoir ni trop chaud, ni trop froid et ne ressentir aucun courant d'air gênant.

Donc l'appréciation du confort thermique dépend du métabolisme de chacun.

Dans une même ambiance quelqu'un pourra se sentir bien (sensation de confort) alors qu'une autre personne pourra éprouver une certaine gêne. [2]

Confort = équilibre entre l'homme et l'ambiance

2.3. Le confort thermique

Dans les milieux bâtis, le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. L'environnement thermique est caractérisé par quatre grandeurs physiques (la température de l'air, l'intensité de rayonnement solaire, l'humidité et la vitesse de l'air). Ces variables réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain

Chapitre I : Le confort thermique et l'habitat

pour établir son état thermique et constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement. [3]

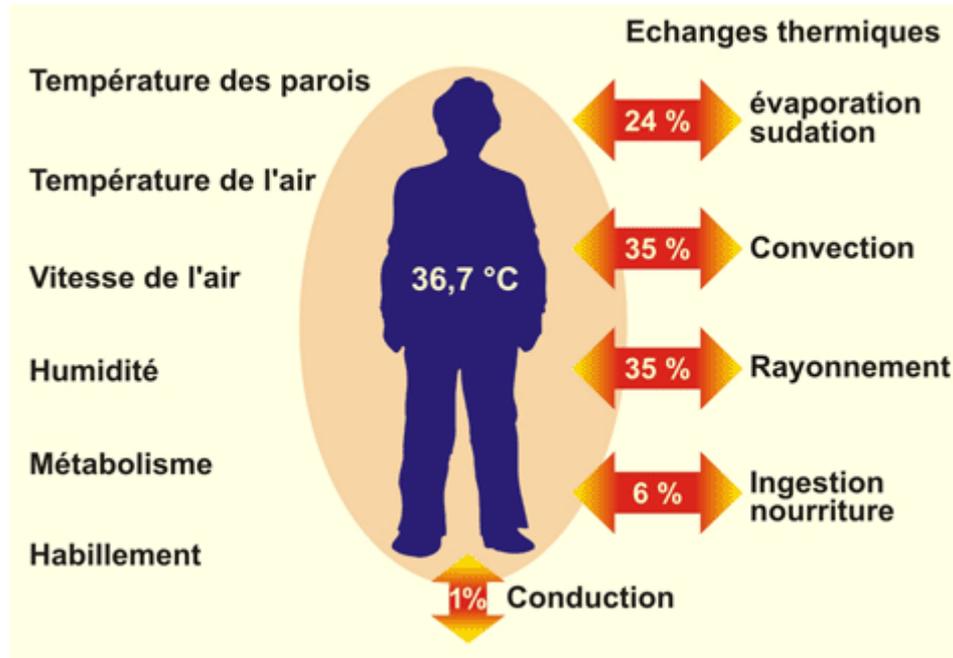


Figure I.1 : Pertes thermiques du corps humain et les paramètres dépendant [3].

2.4. L'aspect physique (les échanges de chaleur)

Il s'agit de gérer les fluctuations de la température par les échanges thermiques avec l'ambiance extérieure. Par conduction, convection, rayonnement et évaporation le corps humain peut maintenir sa température interne vers 37°C en assurant l'équilibre thermique du corps avec son environnement.

L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement s'effectue selon les modes principaux de l'échange de chaleur dans le milieu physique.[4]

3. Les Modes De Transferts Avec L'environnement

3.1. La conduction

Échange par contact direct avec une paroi (marcher pieds nus sur un carrelage froid contribue à une perte de calories pour le corps), Ce type d'échange est d'impact limité.

3.2. La convection

Échange de calories entre l'air ambiant et le corps humain. Ces échanges sont accentués par la vitesse de l'air (généralement compris entre 0,1 et 0,3m/s ; Perception de courant d'air au-delà de 0,3m/s), et par l'écart de température entre l'air et le corps.

3.3. Le rayonnement

Échange de radiations infrarouges entre le corps et les parois. Une paroi froide (telle une vitre) absorbe la chaleur du corps, alors qu'un mur exposé au soleil toute la journée transmet sa chaleur le soir sans même le toucher. [5]

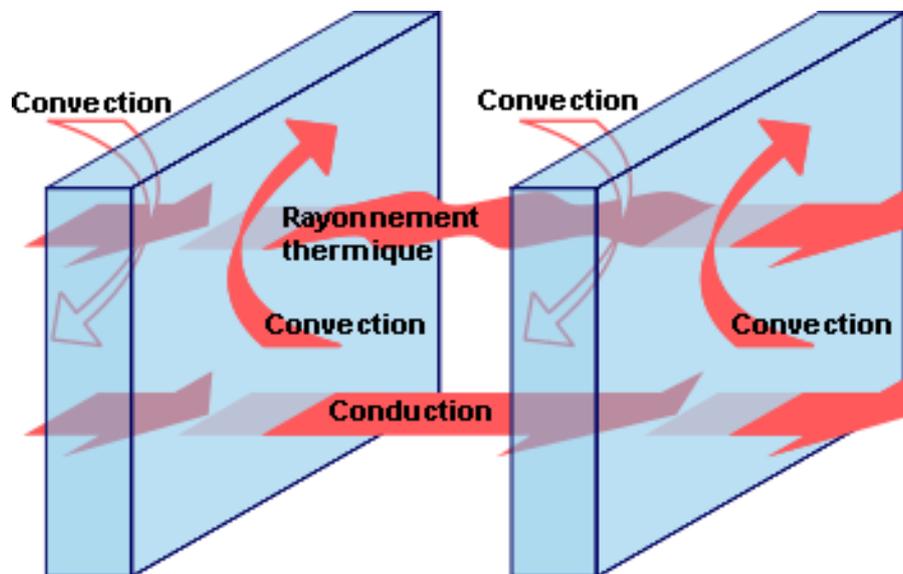


Figure 1.2 : Les modes de transferts de chaleur. Source [6]

4. Les Paramètres Du Confort Thermique

4.1. Les températures

Compte tenu de son importance dans l'intensité des échanges thermiques, il est naturel de s'intéresser à la température qui caractérise l'ambiance du logement [3]. On distingue :

4.1.1. La température de l'air ambiant C'est la température de l'air mesurée à l'ombre, comprise généralement entre 19°C en hiver et 26°C en été. L'enveloppe de l'habitat doit être capable de maintenir la température dans cette fourchette malgré les écarts de la température extérieure. Ensuite, il faut assurer une certaine homogénéité dans l'espace.

4.1.2. La température des parois La température des parois influence les échanges thermiques par rayonnement. Elle est égale à la moyenne des températures des parois environnantes pondérées par leur surface.

4.1.3. La température ressentie C'est la combinaison air/parois. Pour une humidité donnée, en l'absence de courant d'air douillet, on estime que la température effectivement ressentie est la moyenne entre celle de l'air et celle des parois.

Notez que de façon simplifiée, on définit une température de confort ressentie (appelée aussi « température opérative » ou « température résultante sèche ») :

$$T^{\circ}\text{opérative} = (T^{\circ}\text{air} + T^{\circ}\text{parois}) / 2$$

4.2. Humidité relative

L'air contient de la vapeur d'eau. Le taux d'humidité (qui varie de 0 à 100%), mesure la quantité d'eau. Plus la température augmente, plus l'air peut contenir de la vapeur d'eau : à 15°C, l'air contient 10g de la vapeur d'eau par kg d'air, alors qu'à 20°C, cette quantité passe à 15g. Entre 30 et 70%, l'humidité relative pèse peu sur la sensation de confort thermique. Nous restons dans la zone de confort. Sous 20%, l'air est trop sec et au-delà de 80%, trop humide [3].

4.2.1. L'impact de l'humidité relative dans un bâtiment

L'humidité a relativement peu d'impact sur la sensation de confort d'un individu dans un bâtiment. Ainsi, un individu peut difficilement ressentir s'il fait 40 % ou 60 % d'humidité relative dans son bureau. [7]

L'inconfort n'apparaît que lorsque :

- L'humidité relative est inférieure à 30 %,
- L'humidité relative est supérieure à 70 %

4.3. Mouvement de l'air

Le mouvement de l'air est un paramètre très important du confort. Il affecte le corps humain de deux façons différentes. Tout d'abord il détermine l'échange de chaleur convectif du corps [9], et augmente l'évaporation à la surface de la peau. La vitesse de l'air influence le confort dès qu'elle est supérieure à 0.2 m/s [8].

Cette valeur dépend de la température, de l'humidité.

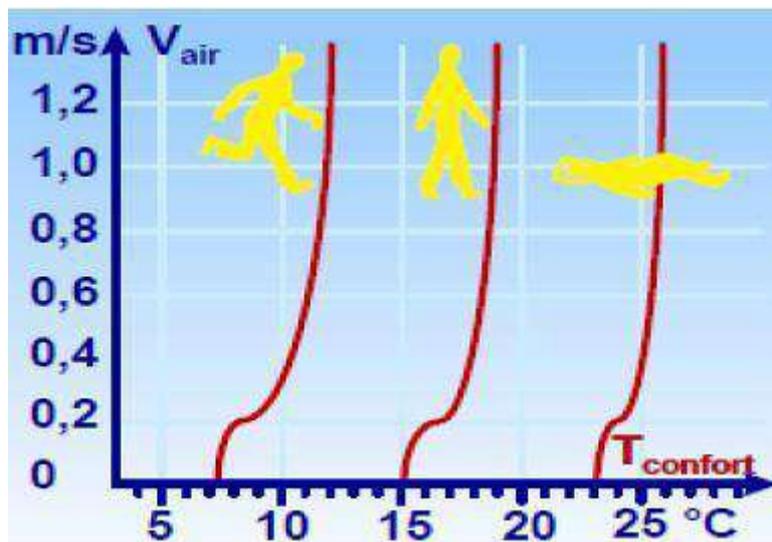


Figure I.3 : Température de confort pour différentes vitesses relatives de l'air et un habillement moyen [3]

5. Le confort thermique des bâtiments en utilisant la technique du stockage thermique

5.1. Le stockage de l'énergie thermique

Le stockage de l'énergie thermique consiste à emmagasiner une quantité d'énergie durant laquelle celle-ci est abondante ou moins coûteuse, en un lieu donné afin de la restituer ultérieurement lorsqu'elle est rare ou plus chère [9]. A titre d'exemple, il est nécessaire pour les énergies renouvelables intermittentes, telles que le solaire ou l'éolien, de stocker l'énergie immédiatement disponible car celle-ci est variable avec le temps. Ainsi, le principal intérêt d'une unité de stockage est la réduction de la consommation d'énergie. Le stockage de la chaleur peut se faire de trois façons différentes, soit par :

- chaleur sensible
- chaleur latente
- stockage thermochimique

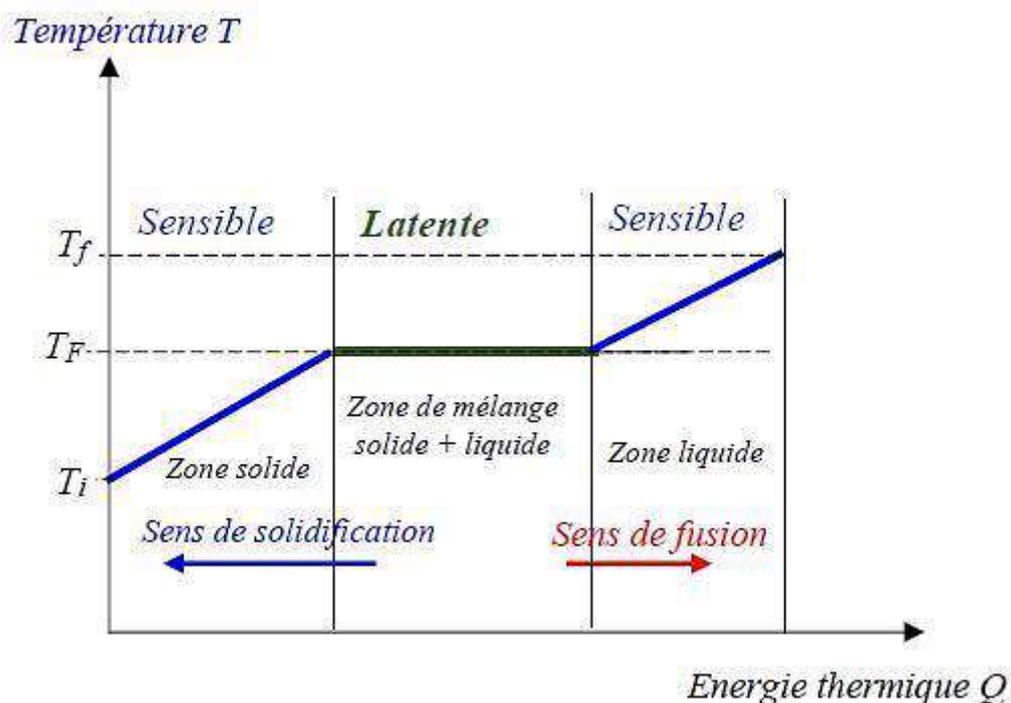


Figure I.4. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement de phase.

5.1. Chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est réalisé par un apport thermique augmentant la température du milieu récepteur « monophasé » (liquide ou solide). Le déstockage (ou soutirage) de la chaleur entraînera une diminution de la température de ce milieu. Considérons le réchauffement d'un corps à haute température qu'on place ensuite dans un système d'utilisation dont la température est plus basse. À pression constante, pour l'élévation de la température T_1 à T_2 d'un corps de masse m et de capacité thermique massique $c(T)$, l'énergie stockée est donnée par la variation d'enthalpie [9].

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} mc(T)dT \quad (\text{I.1})$$

Afin de simplifier le problème, on suppose que la capacité thermique massique ne dépend pas de la température : $c(T) = \text{constante} = c$.

L'équation (I.1) devient :

$$H_2 - H_1 = mc(T_2 - T_1) \quad (\text{I.2})$$

Remarque 1 : La quantité d'énergie qui est stockée est proportionnelle à la différence de température. Ainsi, le choix de ce stockage est intéressant lorsque l'écart de température est grand.

Par la suite, on met le corps préalablement chauffé en présence d'un système utilisateur tel que sa température T_1 soit inférieure à T_2 dans le but qu'il récupère d'une quantité d'énergie égale à :

$$mc(T_2 - T_1) - |Q_{\text{perte}}| \quad (\text{I.3})$$

Où, $|Q_{\text{perte}}|$ désigne la perte de chaleur au cours du maintien à la température T_2 , ou lors de l'échange que l'on essaie de minimiser [9], un stockage par chaleur sensible est ainsi réalisé.

Au cours processus de stockage, si nous rencontrons les cas suivants :

1. Si $T_2 > T_1$ alors il s'agit du stockage chaud.
2. Si $T_2 < T_1$ alors il s'agit du stockage froid.

Selon le cas considéré, l'effet inverse sera un déstockage soit du chaud ou du froid.

Chapitre I : Le confort thermique et l'habitat

Les principaux constituants employés pour le stockage par chaleur sensible sont des liquides (eau) ou des solides (pierres) possédant des chaleurs spécifiques importantes.

5.2. Chaleur latente

Le stockage par chaleur latente consiste à emmagasiner de l'énergie, qui par la suite va provoquer une variation de température et un changement de phase du matériau. Lors de la restitution de l'énergie, on observera le phénomène du changement de phase inverse. La chaleur Q , absorbée ou cédée, durant le processus de changement de phase est régie par :

$$Q = mLF \quad (\text{I.4})$$

Dans la pratique, il se peut que la chaleur sensible et la chaleur latente interviennent successivement dans les processus thermiques. En effet, si on considère qu'un constituant servant de stockage est initialement à la température T_1 , qui est inférieure à la température de fusion TF et que TF soit inférieure à la température finale T_2 ($T_1 < TF < T_2$), le stockage se fera sous forme sensible et sous forme latente. A pression constante, le stockage de l'énergie est donné par la variation d'enthalpie [9] :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{TF} m c_{sol}(T) dT + mLF(TF) + \int_{TF}^{T_2} m c_{liq}(T) dT \quad (\text{I.5})$$

Avec :

c_{sol} capacité thermique massique à l'état solide [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

c_{liq} capacité thermique massique à l'état liquide [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

LF chaleur latente de changement de phase [$J.kg^{-1}$]

En supposant que les capacités thermiques massiques des corps sont indépendantes de la température, l'équation (I.5) devient :

$$H_2 - H_1 = m c_{sol}(TF - T_1) + mLF(TF) + m c_{liq}(T_2 - TF) \quad (\text{I.6})$$

et

$$LF(TF) = H_{liq}(TF) - H_{sol}(TF) > 0 \quad (\text{I.7})$$

Chapitre I : Le confort thermique et l'habitat

Avec :

$H_{sol}(TF)$: enthalpie massique du solide à la température d'équilibre TF
[J.kg⁻¹]

$H_{liq}(TF)$: enthalpie massique du liquide à la température d'équilibre TF
[J.kg⁻¹]

$LF(TF)$: variation enthalpie lors du changement de phase [J.kg⁻¹]

Dans l'équation (I.6), le terme mLF est très grand comparé aux autres termes de l'équation. Cela vient du fait que l'énergie stockée par chaleur latente est beaucoup plus importante que celle du stockage par chaleur sensible [9].

. Les matériaux de stockages par chaleur latente permettent d'emmagasiner une grande quantité de chaleur dans une masse et un volume plus faibles de matériau, avec seulement une faible variation de température par rapport aux supports de stockage de chaleur sensible. Les matériaux utilisés comme supports de stockage de chaleur latente sont connus sous le nom de **Matériaux à Changement de Phase (MCP)**. [10]

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

6. Stockage thermochimique

Le stockage thermochimique met en jeu l'énergie absorbée au cours d'une réaction chimique endothermique. Lors d'un réchauffement, l'équilibre chimique est perturbé et celui-ci se déplace vers la droite (sens de réaction). Lorsqu'il y a contact avec une source dont la température est plus basse que

celle au départ, le déplacement de l'équilibre chimique est observé dans le sens inverse. Dans le premier cas, l'énergie est stockée et dans le second elle est déstockée. D'après [9], le déplacement de l'équilibre est généralement insuffisant et le gain d'énergie est inférieur à 10 % de l'énergie de type sensible. Selon [11], une étude menée par [12] a démontré que ce type de stockage est très limité.

Parmi les trois types de stockages présentés précédemment, le stockage par chaleur latente semble être le plus adapté pour stocker l'énergie thermique. Les matériaux utilisant ce type de stockage sont qualifiés de « Matériaux à Changement de Phase (MCP) ».

7. Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Les MCP ont été considérés comme des matériaux de stockage d'énergie thermique.

L'application des MCP se trouve généralement dans de nombreux domaines, notamment le refroidissement des produits alimentaires, les parois dans le bâtiment, le système de récupération de chaleur, les centrales solaires, l'emballage, le textile, ...etc. Dans le bâtiment, les matériaux de construction thermiquement massifs permettent de réduire les fluctuations de la température de l'air et de déplacer les charges de refroidissement en périodes creuses (réduire les charges de refroidissement et de chauffage) en réduisant ainsi la consommation énergétique [13].

Les MCP peuvent être tout matériau capable d'absorber, de stocker et de libérer de la chaleur sous forme d'énergie thermique. En effet, l'énergie thermique est stockée dans les MCP au cours d'un processus de fusion alors qu'elle est récupérée au cours du processus de solidification [14]. Les phénomènes de fusion et de solidification des MCP peuvent être expliqués par la modification de la température ambiante dans laquelle les MCP sont placés.

Chapitre I : Le confort thermique et l'habitat

Le Stockage de l'énergie thermique (TES: Thermal Energy Storage) en général, et les matériaux à changement de phase en particulier, ont été un sujet principal dans la recherche au cours des 20 dernières années, mais bien que l'information est quantitativement énorme, il est également largement répandu dans la littérature, et difficile à trouver.

L'intérêt international de stocker l'énergie thermique est la diminution de la consommation d'énergie, l'utilisation efficace et rationnelle des ressources disponibles et l'utilisation optimale des énergies renouvelables. Dans ce cadre, le TES fournit des solutions dans des domaines très spécifiques:

- Le temps de retard et la puissance disponible entre la production ou la disponibilité de l'énergie et sa consommation dans les systèmes de réception (de l'énergie solaire, cogénération, etc.)
- Sécurité de l'approvisionnement énergétique (hôpitaux, centres informatiques, etc.)
- L'inertie thermique et une protection thermique. [15]

L'énergie thermique peut être stockée sous la forme d'un changement de l'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente et thermochimique ou d'une combinaison de ceux-ci. Un aperçu de la technique majeure du stockage de l'énergie solaire thermique est représenté sur la figure (I.5). [15]

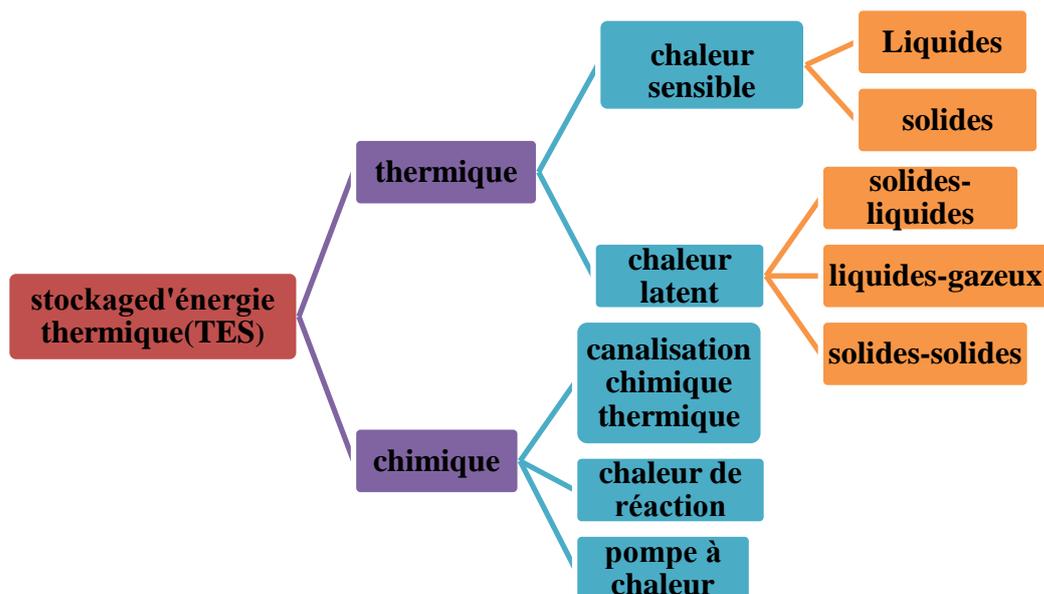


Figure I.5 : Différents types de stockage thermique de l'énergie solaire

Chapitre II :
Les matériaux à
changement de phase

1. Introduction

Au moment où l'on parle de plus en plus d'environnement et de rationalisation de l'exploitation des ressources énergétiques, 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.

Les matériaux à changement de phase (MCP) suscitent un intérêt particulier pour la réduction de la consommation d'énergie. En effet, ils permettent de stocker des grandes quantités de chaleur dans des volumes réduits. Les MCP présentent aussi l'avantage de pouvoir stocker les apports de chaleur aux périodes de surchauffe, puis de les restituer une fois la température ambiante est en dessous de leur température de fusion. De ce fait, l'idée de les incorporer dans les matériaux de construction, tels que le béton, a été adoptée dans une optique d'augmenter la capacité de stockage thermique de ces derniers, baisser les températures à l'intérieur des bâtiments favorisant ainsi le confort thermique des usagers. Cependant, l'utilisation de ces matériaux nécessite la bonne maîtrise de leurs propriétés, notamment thermophysiques. Cette tâche s'avère délicate étant donné la complexité du MCP qui présente des propriétés très variables et souvent difficiles à mesurer.

Essentiellement trois modes de stockage thermique peuvent être envisagés :

- le stockage par chaleur sensible qui exploite la capacité calorifique d'un matériau
- le stockage par chaleur latente qui consiste à utiliser la transformation solide -liquide d'un Matériau à Changement de Phase (MCP).
- le stockage thermochimique qui exploite la chaleur de sorption mise en œuvre dans des processus physico-chimiques renversables d'absorption exothermique et de désorption endothermique d'un gaz sur un milieu absorbant.

Le stockage d'énergie est une solution très adaptée aux systèmes de froid industriel et de climatisation. Mais dans ce secteur, le stockage par chaleur sensible est souvent inopérant du fait de la nécessité de forts écarts en températures et le stockage thermochimique est encore peu développé.

Actuellement, le stockage d'énergie par chaleur latente apporte une solution efficace aux investisseurs soucieux afin d'optimiser leur équipement : il permet une réelle gestion de l'énergie et donc d'utiliser des énergies au moment où elles sont les moins coûteuses (énergie solaire, tarifs de nuits pour l'électricité. . .).

Dans le cas particulier du stockage du froid, il offre de plus la possibilité de diminuer de façon sensible la quantité de fluides frigorigènes utilisés en accord

avec les nouvelles législations très restrictives pour la protection de l'environnement.

2. Historique des MCPs

Depuis le premier choc pétrolier des années 70, des études sur les MCP ont été entreprises avec les sels hydratés. Ils étaient testés initialement pour stocker l'énergie solaire. Or, de nombreux problèmes se sont présentés et la communauté scientifique se rendit rapidement compte que ce type de MCP ne pouvait être utilisé. Les principaux problèmes rencontrés étaient :

- la toxicité ;
- une mauvaise transition de phase ;
- la propension à la surfusion ;
- un mauvais conditionnement (poches, capsules, barres, ...) ;
- la durée de vie très faible (limitation du nombre de cycles).

Beaucoup de ces désavantages ont mis à l'écart l'étude de ces matériaux. Ce n'est que dans le cadre du « Grenelle de l'Environnement » qu'un intérêt nouveau s'est manifesté, avec de nouvelles substances et de nouveaux modes de conditionnement. En effet, l'apparition de nouveaux MCP solide/liquide à forme stabilisée a permis de relancer les applications dans de nombreux domaines. La majorité des MCP à forme stabilisée sont des composites comportant une matrice solide inerte dont la porosité est remplie par le MCP. Cette matrice inerte assure la stabilité structurelle de l'ensemble et évite l'écoulement de la phase liquide du MCP à travers le conteneur [19]. A basse température (< 120 °C), les développements suivants sont rencontrés :

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

Par le biais des nouvelles techniques, les MCP connaissent de multiples applications.

3. Types des matériaux à changement de phase (MCP)

Les matériaux à changements sont nombreux et disponibles dans n'importe quelle gamme de température souhaitée. Les MCP peuvent être classés selon leur nature chimique, en trois catégories (organiques, inorganiques et eutectiques) qui sont illustrés sur la **Figure II.1** .

Un grand nombre de matières chimiques organiques et inorganiques peuvent être identifiées comme MCP d'un point de vue température et chaleur latente de changement de phase. En revanche, le point de transition de phase dans une plage de fonctionnement pour la majorité d'entre eux, ne permet pas de satisfaire aux critères requis pour un support de stockage adéquat. Afin de pallier ces inconvénients, des solutions seront proposées après avoir passé en revue les différentes familles de matériaux à changements de phase.

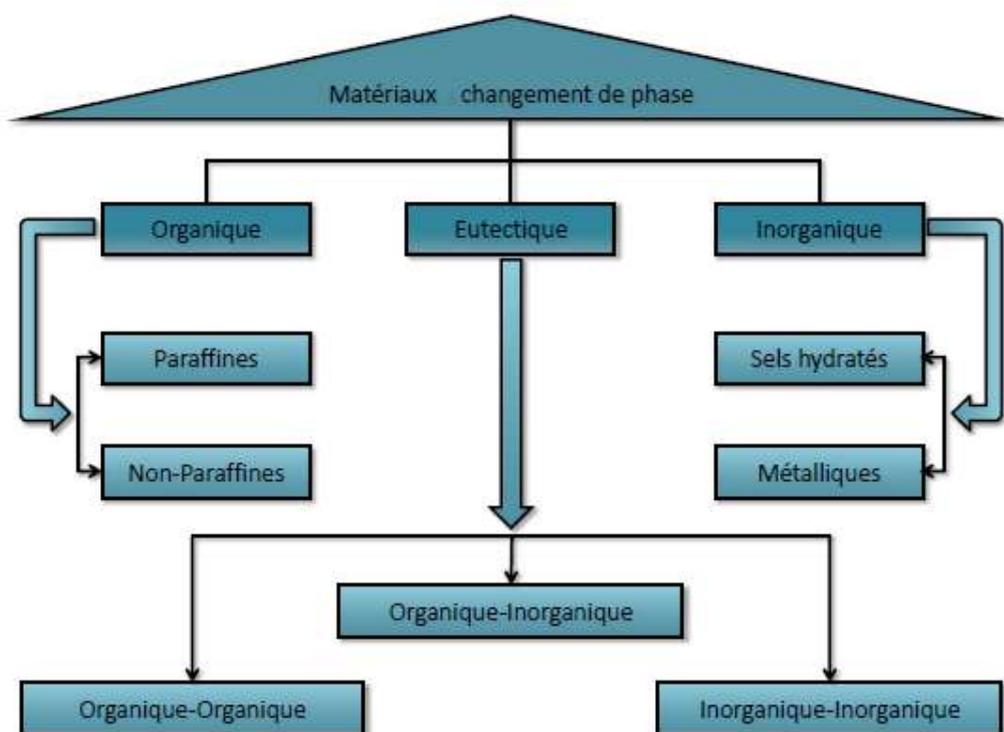


Figure II.1 : Classification des matériaux à changement de phase

4 Les MCPs organiques

Dans les matières organiques, on distingue les paraffines et les non paraffines [20]. Les matières organiques ont des mélanges congruents, c'est-à-dire qu'elles peuvent être solide et liquide à plusieurs reprises sans entraîner la ségrégation des phases et la dégradation de leur chaleur latente. La cristallisation se fait avec une surfusion quasi-nulle, et dans la majeure partie des cas elle est non corrosive.

4.1 Les paraffines

Les paraffines normales du type C_nH_{2n+2} sont une famille d'hydrocarbures saturés dont les propriétés physiques sont assez semblables. Les paraffines possédant un nombre d'atomes de carbone situé entre 5 et 15 sont caractérisés de liquides, et les autres de solides cireux. La cire de paraffine est un mélange issu des chaînes n-alcane $CH_3-(CH_2)-CH_3$. Lors de la cristallisation de la chaîne (CH_3), une quantité importante de chaleur latente est libérée. Plus la longueur de cette chaîne sera grande, plus la température et la chaleur latente de fusion seront élevées. La paraffine est très utilisée car elle est : sûre, fiable et non réactive [21], possède un long cycle de fusion, non-corrosive, chimiquement inerte et stable ($< 500\text{ }^\circ\text{C}$) [22]. Elle est compatible avec tous les conteneurs en métal et s'incorpore facilement dans les systèmes de stockage de l'énergie thermique [22]. Lors du changement de phase, sa variation en volume et sa pression en vapeur sont faibles. En revanche, elle possède également des propriétés non désirables à son utilisation. En effet, la paraffine est inflammable, possède une faible conductivité thermique et n'est pas compatible avec les conteneurs en plastiques [22]. Néanmoins, ces inconvénients peuvent être réduits en modifiant légèrement ses propriétés thermophysiques et l'unité de stockage [23].

4.2 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 [26][27][28][22][23] 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

Chapitre II : Les matériaux à changement de phase

cas être exposées à une forte température, à des flammes ou à des agents oxydants. Ces matières organiques peuvent être divisées en sous-groupes : les acides gras et autres non-paraffines organiques. Pour le sous-groupe « autres nonparaffines organiques », les caractéristiques de ces matériaux sont les suivantes :

- chaleur de fusion élevée
- inflammabilité
- faible conductivité thermique
- niveau de toxicité variable
- instabilité en hautes températures.

4.3 Les acides gras

Le sous-groupe « acides gras » possède des chaleurs de fusion comparables avec celles des paraffines. De plus, ils sont peu ou pas concernés par la surfusion [24] et ils présentent une faible corrosion. Les acides gras peuvent être considérés comme matériaux de stockage de l'énergie thermique .

5 Les MCPs inorganiques

Dans cette catégorie on distingue les sels hydrates et les métaux.

5.1 Les sels hydratés

Ils peuvent être considérés comme des alliages de sels inorganiques et de l'eau formant un solide cristallin. Les sels hydratés sont le groupe qui a été largement étudié pour leurs utilisations en tant que MCP dans les systèmes thermiques de stockage de la chaleur car ils présentent de nombreux avantages tels que :

- une forte chaleur latente de fusion par unité de volume (diminution de la taille du système de stockage)
- une conductivité thermique élevée (augmentation du transfert de chaleur)
- faible variation de volume lors du changement de phase

Chapitre II : Les matériaux à changement de phase

- faible pouvoir corrosif
- compatibilité avec les conteneurs en plastiques
- faible coût.

En revanche, ils sont concernés par de forts inconvénients comme le mélange incongruent, (le sel n'est pas totalement soluble dans l'hydratation de l'eau lors du point de mélange) et la ségrégation (formation d'hydrates ou des sels déshydratés qui ont tendance à se déposer et réduire le volume actif disponible pour le stockage de la chaleur).

5.2 Les 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 forte chaleur de fusion par unité de poids, une faible chaleur de fusion par unité de volume, une conductivité thermique élevée, une chaleur spécifique faible et une pression en vapeur relativement élevée.

Avantages		
Organiques	Inorganiques	Eutectiques
<ul style="list-style-type: none"> ➤ disponibles dans une large gamme de température ➤ pas de ségrégation ➤ chimiquement stables ➤ haute énergie de fusion ➤ non corrosifs ➤ recyclables 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ chaleur latente élevée ➤ disponibles en grande quantité ➤ faible coût ➤ point de fusion nette ➤ inflammables ➤ forte conductivité thermique ➤ chaleur spécifique massique élevée 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ point de fusion nette similaire à une substance pure ➤ chaleur latente légèrement supérieure à celle des composés organiques

Chapitre II : Les matériaux à changement de phase

Inconvénients		
Organiques	Inorganiques	Eutectiques
<ul style="list-style-type: none">➤ faible conductivité thermique➤ chaleur latente faible➤ non inflammables➤ chaleur spécifique massique faible➤ fort coût➤ masse faible	<ul style="list-style-type: none">➤ phénomène de surfusion➤ agent de nucléation étranger indispensable➤ corrosifs➤ vieillissement rapide	<ul style="list-style-type: none">➤ peu de données disponibles sur les propriétés de ces matériaux➤ peu utilisés au niveau des applications industrielles

6. Critères de choix d'un matériau à changement de phase

Le choix d'un MCP doit être fait selon plusieurs critères. Les principaux pour le stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente sont :

a) Propriétés thermiques

- La température de transition de phase doit être conforme au domaine d'application.
- Une chaleur latente de transition élevée.
- Une bonne qualité de transfert de chaleur. Par exemple, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage de l'énergie.

b) Propriétés physiques

- Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage petit. Durant le processus du changement de phase, il faudra étudier la variation de la densité (exemple : les MCP aqueux).
- Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique petite.

Chapitre II : Les matériaux à changement de phase

- Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur.

c) Propriétés cinétiques

- La surfusion doit être réduite. Le recours à l'utilisation d'additif est nécessaire.
- Un taux de cristallisation important.
-

d) Propriétés chimiques

- Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification.
- La compatibilité avec les matériaux de construction.
- L'étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,...) passant par les réglementations et normalisations en vigueur. La dangerosité du produit doit être minimisée.
- Recyclable.

e) Aspects économiques

- Le coût est un critère également très important. Celui-ci sera différent selon les utilisations. Par exemple, les utilisations domestiques demandent quelques kilogrammes alors que les utilisations industrielles quelques tonnes.
- Disponible en grande quantité.

f) Critères technologiques

- La fiabilité des matériels de confinement passe par une compatibilité avec les matériaux du conteneur.

7. Méthodes d'intégration d'un MCP dans les applications de stockage thermique

Le stockage par chaleur latente consiste à exploiter la quantité d'énergie (l'enthalpie) engagée lors du changement de phase (passage de l'état solide à l'état liquide et inversement d'un corps), mais il peut utiliser également la chaleur sensible nécessaire pour chauffer le solide jusqu'à son point de fusion.

Actuellement deux méthodes sont utilisées pour intégrer les MCP dans les bâtiments : l'intégration directe et l'encapsulation avant intégration. [29]

7.1 Intégration directe

Les MCP sont mélangés avec des matériaux de construction (plâtre, ciment, certains plastiques...) lors de la fabrication et même dans une matrice de graphite, qui a l'avantage d'avoir une excellente conductivité thermique. Les paraffines, chimiquement stables, sont les substances les plus répandues. Ils peuvent être incorporés dans les pores d'un matériau porteur (imprégnation dans des enduits) ce qui permet de les rajouter lors d'une rénovation. Les MCP peuvent être conditionnées dans des billes de plastique microscopique (microencapsulation).[29]

7.2 Encapsulation avant intégration

Les MCP sont soit en micro encapsulation, soit en macro encapsulation. Ces derniers sont intégrés soit dans les matériaux de construction, soit dans les échangeurs de chaleur.

a) Macro encapsulation

La macro encapsulation est un dispositif où le MCP est emballé dans des contenants aux dimensions décimétriques à métriques (sachets, bouteilles de plastique, etc.). Ces MCP macro encapsulés peuvent être utilisés comme parties constituantes d'échangeur de chaleur. Ces MCP macro encapsulés sont généralement fabriqués pour chaque application visée. La faible conductivité thermique des MCP peut devenir dans le cas d'une macro encapsulation un problème de transfert de chaleur.[29]

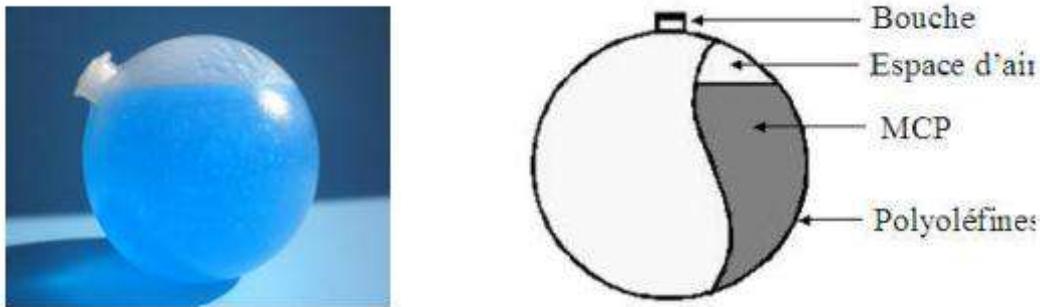


Figure II.2 : Conditionnement des MCP [29]



Figure II.3 : Photographie des MCP macro-encapsulés : pochettes, sphères, tubes, plaquettes [29]

b) Micro encapsulation

La micro encapsulation est un procédé physique ou chimique qui permet d'emprisonner de petites gouttes solides ou liquides de MCP dans une coquille solide de 1 à 1000 μm . de forme sphérique ou cylindrique. Les MCP ainsi encapsulés peuvent être ensuite utilisés dans un système de stockage d'énergie latente, l'avantage de cette géométrie interne de stockeur de MCP micro encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange. D'autre part, la faible conductivité thermique n'est pas un facteur limitant des transferts du fait des petites dimensions des vésicules. L'autre avantage de micro encapsulés est qu'ils sont aisés à manipuler et que leur intégration est adaptable aisément à

Chapitre II : Les matériaux à changement de phase

tout système passif tels que les matériaux de constructions de type béton en plâtre ou panneau en bois reconstitué ou système actif. [29]

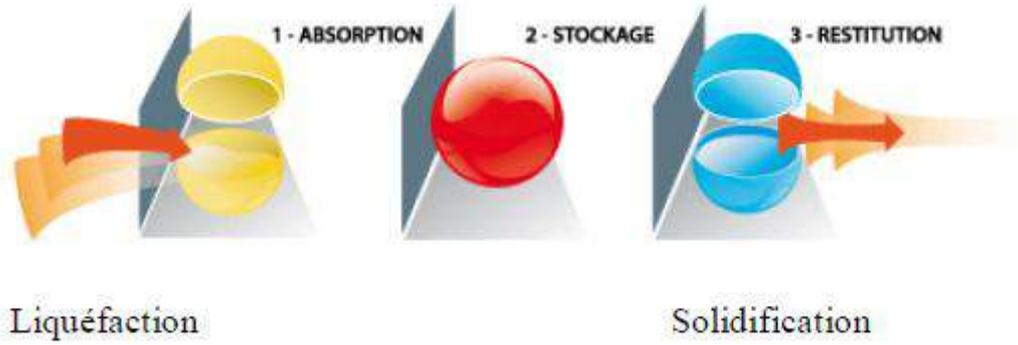


Figure II.4 : Procédé micro encapsulés [29]



Figure II.5 : Photographie d'une poudre de MCP micro encapsulés [29]

8. Intégration des MCP passive dans le bâtiment

Le stockage et le déstockage d'énergie s'effectue au gré des échanges de chaleur avec l'air intérieur du bâtiment et l'environnement de celui-ci (air extérieur, rayonnement solaire, etc.). Ces échanges sont dits passifs car ils ne sont pas actionnés par un système mécanique.

La mise en place des MCP pour augmenter la capacité de stockage thermique de l'enveloppe du bâtiment est la plus utilisée parmi les utilisateurs passifs des MCP dans le bâtiment parce que la surface d'échange de chaleur est grande. Ils combinent les fonctions de stockeur de chaleur et élément de construction. Les structures les plus produites sont : les plaques de plâtre, les enduits, les blocs de béton.[30]

8.1 Plaques de plâtre

Les MCP sont intégrés à des plaques de plâtre sous forme d'un sandwich composé d'isolant et du plâtre-MCP. [30]

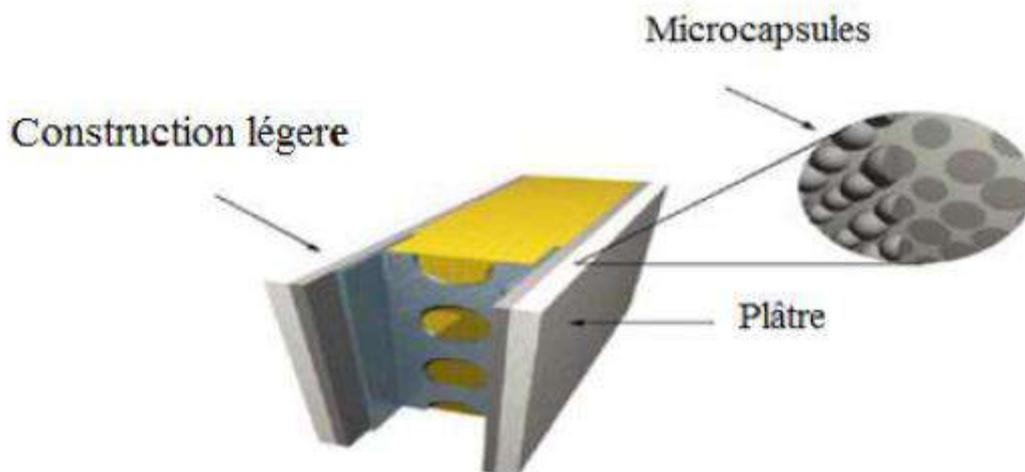


Figure II.6 : Modèle de mur contenant une plaque de plâtre-MCP [30]

8.2 Enduits à base de MCP

Les enduits à base de MCP existent sous la forme d'un produit prédosé. Ils sont à appliquer sur une épaisseur d'environ 15 mm, (voir **Figure II.7**) . Des études expérimentales, ont été effectuées sur deux cellules ayant une surface au plan de 9 m² et une surface vitrée de 3m² orientée vers le sud. L'une d'entre elles est revêtue d'enduits à MCP et l'autre avec un enduit traditionnel de même épaisseur 15 mm. Les mesures de températures ont été effectuées pour différentes périodes d'ensoleillement. Les premiers résultats ont démontré que les écarts de température des parois internes de l'enveloppe sont de l'ordre de 3°C. Pour la température interne des cellules l'écart de température est de 1°C à 1,5°C. [30]

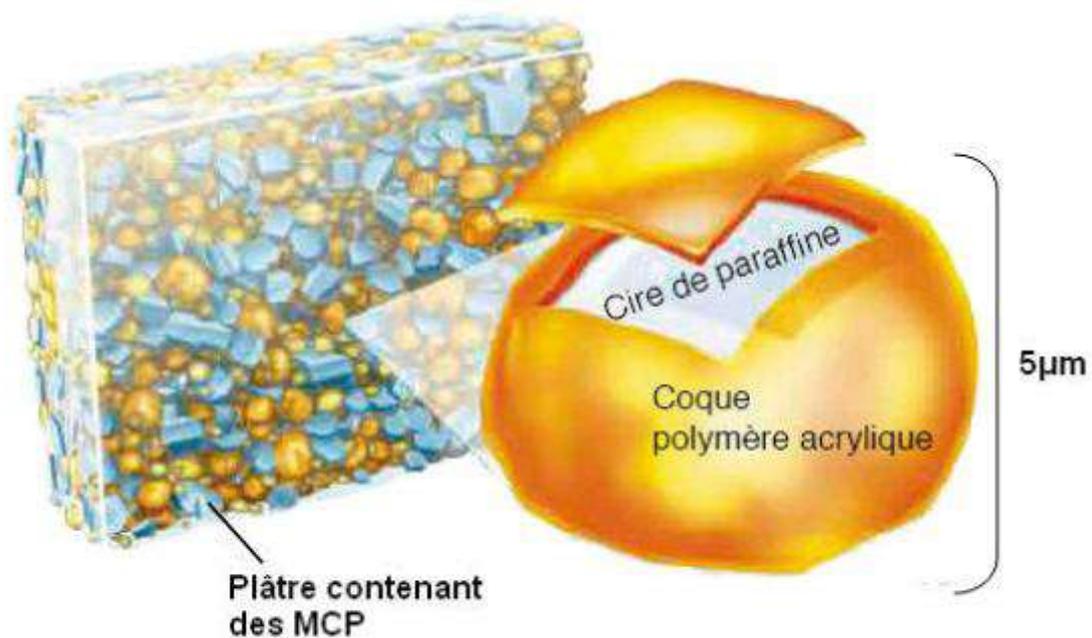


Figure II.7 : Plâtre contenant des MCP [30]

8.3 Murs trombes à base de MCP

Une amélioration du mur trombe classique consiste à intégrer dans les murs de maçonnerie ordinaire des MCP. Ces murs à base MCP sont composés d'un contenant des MCP espacés de 10 cm environ d'une paroi en verre ou en plastique transparente, (voir **Figure II.8**).

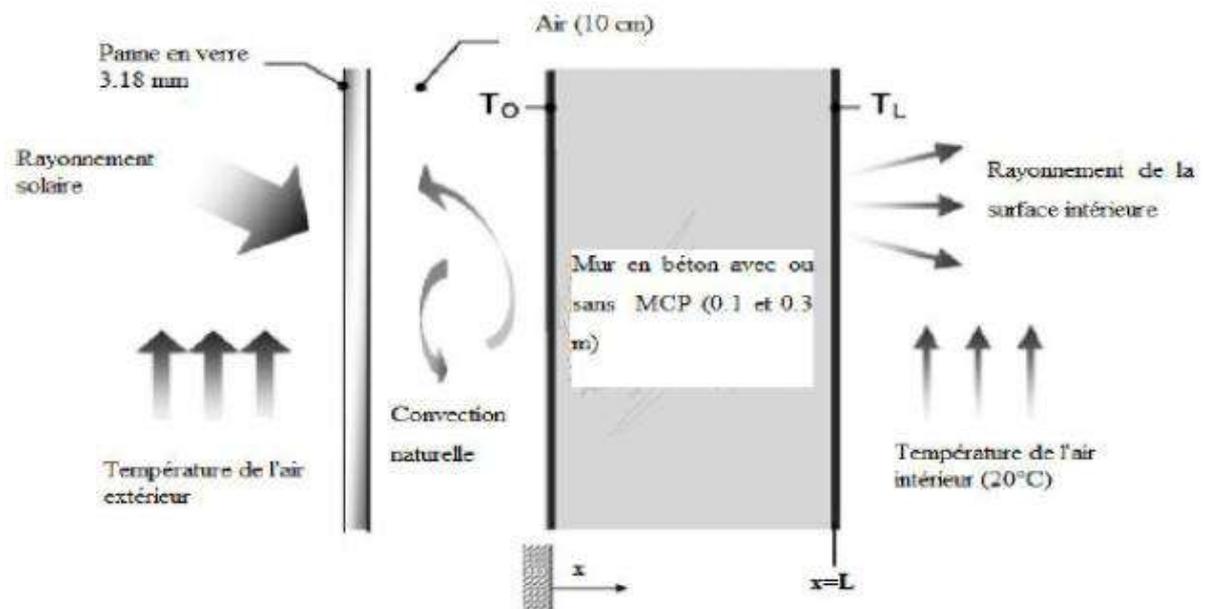


Figure II.8 : Modèle d'un mur trombe à base de MCP [31]

Divers MCP ont été testés pour améliorer l'efficacité thermique d'un mur trombe à base de MCP. Askew (1978) a utilisé de la paraffine tandis que Farouk et Gucero (1979) ont utilisé un mélange de sel de Glauber et de la cire Sunoco P-116. Ces différents travaux ont montré que les murs trombes à base de MCP nécessitent moins d'espace entre le mur et la couche de verre ou de plastique que les murs trombe traditionnels. Ils sont plus légers que les murs trombe traditionnels. Knowler (1983) a utilisé de la cire de paraffine CG avec des additifs métalliques pour augmenter la conductivité globale et l'efficacité du mur trombe à base de MCP. Ces travaux sont encore au stade expérimental. [31]

8.4 Blocs de béton-MCP

Plusieurs programmes de recherches et d'expérimentations se sont lancés dans la mise au point de blocs de béton à base MCP, **Figure II.9**. Différents MCP ont été testés pour améliorer le rendement thermique: tels la paraffine (PAR), stéarate de butyle (BS), dodécanol (DD) et polyéthylène (PEG). La plupart des études confirment que les blocs de béton-MCP à base de paraffine ont la capacité de stockage d'énergie plus importante que les autres MCP expérimentés. [32]



Figure II.9 : Bloc de béton contenant des MCP [32]

8.5 Intégration des MCP dans les plafonds

Des panneaux à base de MCP sont installés dans les plafonds et les planchers pour améliorer le confort résidentiel de l'occupant. Dans ce cas de **Figure II.10**, on peut citer, à titre d'exemple les panneaux DuPont™ Energain®, Rubitherm, Cristopia, (voir figure II.10). [33]



Figure II.10 : Modèle de panneaux de MCP [33]

8.6 Systèmes actifs des MCP en bâtiment

Les systèmes actifs de MCP qui servent à stocker la chaleur ou la fraîcheur, ne font pas partie de la structure du bâtiment. En effet ces dispositifs sont séparés du bâtiment par un système d'isolation, ainsi l'énergie stockée n'est délivrée que sur demande. Ces échanges sont dits actifs car ils sont actionnés par un système mécanique, (pompe ou ventilateur).

Les systèmes actifs de types échangeurs de chaleur permettent d'améliorer le confort des occupants en faisant circuler de l'air frais (rafraîchissement) ou de l'air chaud (chauffage) dans les bâtiments suivant le besoin. La performance de ce système dépend avant tout de son réglage et de la qualité de ces composants.

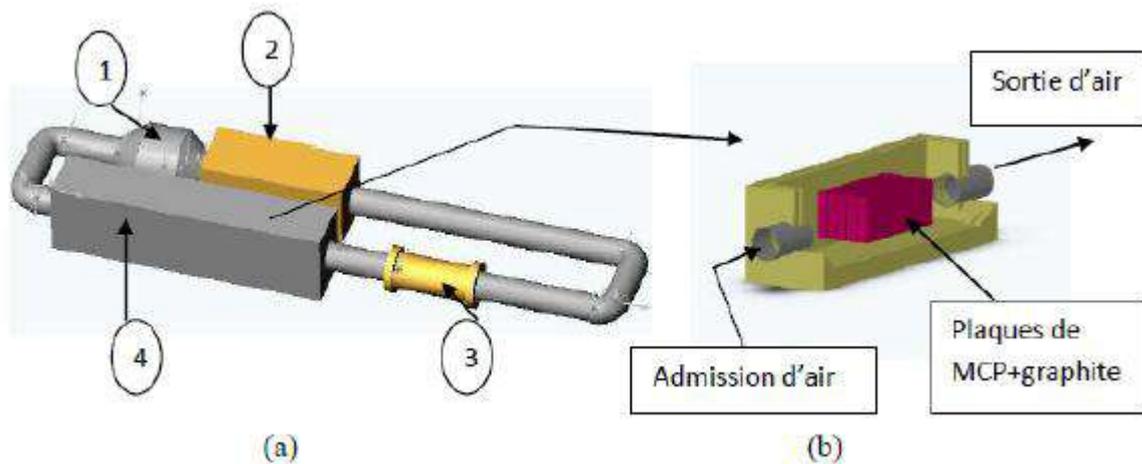


Figure II.11 : Système actif conçu par Zalbe et al

a) dispositif expérimental

b) détail du système de stockage d'énergie

1- ventilateur 2- variation de vitesse 3- débitmètre 4- système de stockage d'énergie

Chapitre III :
Modélisation numérique
du phénomène
de changement de phase

1. Introduction

Lorsqu'un matériau subit un changement de phase, un des aspects fondamentaux est l'existence d'une interface mobile et la façon dont cette interface se déplace doit être déterminée. Dans le cas d'un changement de phase solide – liquide, la convection naturelle peut jouer un rôle qui ne sera pas forcément le même dans les processus de fusion et de solidification. De plus, lorsqu'il se produit, la formulation mathématique est relativement complexe car elle nécessite le traitement du couplage entre les équations de Navier-Stokes dans le liquide et de Fourier dans le solide.

Dans ce chapitre nous allons rappeler quelques notions théoriques ainsi que les méthodes numériques associées qui permettent de résoudre un problème de transfert de chaleur avec changement de phase. Le changement de phase étudié s'effectue sur un intervalle de température.

2. Transfert de chaleur avec changement de phase

La figure III.1 schématise un exemple de solidification d'un matériau pure. On suppose que le transfert de chaleur est dominé uniquement par la conduction (*Problème 1D*), bien que dans certains cas les transferts convectifs et radiatifs peuvent jouer un rôle important. Dans cet exemple la chaleur est évacuée lentement par la surface d'échange. T_0 est la température de la surface d'échange ($T_0 < T_f$) et T_l est la température du fluide loin de l'interface liquide-solide ($T_f < T_l$). On constate que la forme de l'interface solide-liquide est plane [33]. Cette interface représente le front de solidification lors du changement de phase. Elle se déplace en fonction du temps t au fur et à mesure que la phase solide avance et est repérée par l'abscisse $s(t)$.

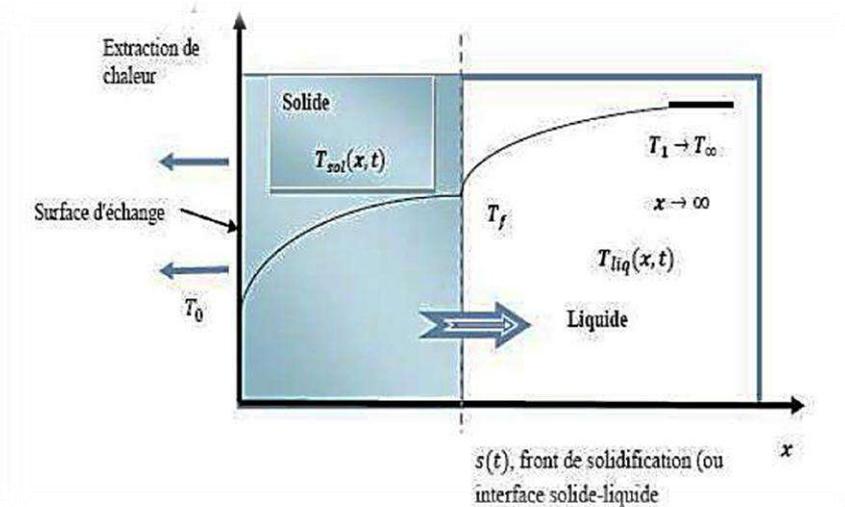


Figure III.1 : Solidification d'un matériau pure

Chapitre III : Modélisation numérique du phénomène de changement de phase

Avant le déclenchement du processus de solidification $t \leq 0$ le matériau est supposé en phase liquide et à température constante $T(x,0) = T_l > T_f$.

Pour $t > 0$ la température de la surface $x = 0$ est instantanément mise à $T(0,t) = T_0 < T_f$. Par conséquent, la phase solide commence à se développer à partir d'une couche adjacente à la frontière $x = 0$ et au fur et à mesure que le temps augmente la phase solide avance $s(t)$ prenant la place du liquide.

2. Les Equations régissant le problème en Considération

2.1. Équation de continuité

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de masse aux cours de l'écoulement. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 \quad 5.3$$

Où ρ est la masse volumique et v est le vecteur vitesse.

Pour le cas des écoulements incompressibles et bidimensionnels, la masse volumique ρ est constante, qui après simplification devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad 5.4$$

3.2. Les équations de quantités de mouvements

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide (le MCP fondu) et son mouvement et la cause qui le produit. On peut indiquer que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées, pour un fluide newtonien incompressible, les équations de Navier Stokes pour la convection naturelle en 2D s'écrivent sous la forme suivante :

3.2.1. Équation de quantité de mouvement suivant l'axe x

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \sin(\alpha) + S_x \quad 5.5$$

3.2.2. Équation de quantité de mouvement suivant l'axe y

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g \cos(\alpha) + S_y \quad 5.6$$

Avec :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad 5.7$$

4 Équation de la conservation d'énergie

L'équation de la conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_h \quad 5.8$$

Ou

x, y : Les coordonnées cartésiennes.

u_i : Composante de vitesse dans la direction x_i

T : Le temps.

K : La conductivité thermique.

T : La température de fluide.

T_{ref} : La température de référence.

C_p : La chaleur spécifique du fluide à pression constante.

Chapitre III : Modélisation numérique du phénomène de changement de phase

ρ : Masse volumique.

μ : La viscosité dynamique.

β : Coefficient de dilatation.

S_h : Terme de source

h : L'enthalpie spécifique

h_s : L'enthalpie sensible

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad 5.9$$

L'enthalpie totale, H est défini comme suivant :

$$H = h_s + \Delta H \quad 5.10$$

Où $\Delta H = \gamma L$ est le changement d'enthalpie en raison du changement de phase, h_{ref} est l'enthalpie de référence à la température de référence T_{ref} , C_p est la chaleur spécifique, L est l'enthalpie spécifique de fusion (état liquide) et γ est la fraction liquide au cours du changement de phase qui se produisent sur une plage de températures $T_{solidis} < T < T_{liquidus}$ définies par les relations suivantes :

Si $T < T_{solidis}$ (état solide)

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = 0 \quad 5.11$$

Si $T_{solidis} < T < T_{liquidus}$ (état de mélange solide + liquide)

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad 5.12$$

Si $T > T_{liquidus}$ (état liquide)

$$\gamma = \frac{\Delta H}{L} = 1 \quad 5.13$$

Le terme source S_i dans l'équation de mouvement est donnée par :

$$S_i = -A(\gamma)u_i \frac{C(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} u_i \quad 5.14$$

$$S_h = \rho L \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad 5.15$$

5- Présentation du code FLUENT

Le calcul numérique a été effectué à l'aide du code "Fluent" 15.0.7. Le logiciel Fluent est un code CFD (anonyme de : Computational Fluid Dynamics) qui permet la prédiction des écoulements fluides par résolution des équations de bilan en se basant sur la méthode des volumes finis et des schémas de discrétisation existant dans sa banque de données.

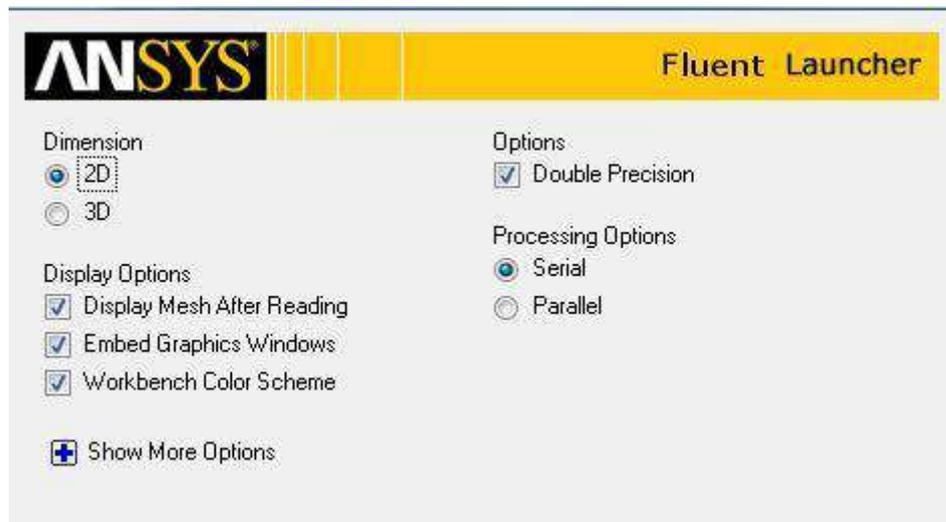
Fluent permet de simuler tous les écoulements fluides, incompressibles ou compressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que les écoulements multiphasiques, la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques... etc.

5.1 Résolution du problème avec le code FLUENT

Pour effectuer la simulation par ce logiciel, il faut décrire les paramètres de solution comme suit :

a. choix du type de solveur :

- | | |
|------------------------------|------------------------------------|
| ✓ Space | 2D |
| ✓ Time Unsteady, | 1st-Order Implicit |
| ✓ Viscous | Laminar |
| ✓ Heat Transfer | Enabled |
| ✓ Solidification and Melting | Enabled (juste dans le cas de MCP) |
| ✓ Radiation | Discrete Transfer Model |



b. choix de matériau

Le choix des matériaux utilisés dans notre modèle à partir des listes existantes, sinon

Il faut les introduire selon nos besoins.

c. Solver Controls:

- Equations: 1. mouvement 2. Energie
- Paramètres de calcul instationnaire:
 1. Pas de temps: 500
 2. Max. Itérations par pas de temps: 1

- Facteurs Fluid (pcm)

-Density (kg/m³) = 1620

-cp (j/kg.k) = 1800

-thermal conductivity (w/m.k)=0.81

-Viscosity (kg/m.s)=2.98

-thermal expansion coefficient (1/k)= 0.0005

Pure solvent melting heat (j/kg)= 187000

Solidus temperature (k)=302.9

Liquid us temperature (k) =302.9

Chapitre III : Modélisation numérique du phénomène de changement de phase

- Facteurs solide (brique)

Density (kg/m³)= 1600

cp (j/kg.k)= 840

Thermal Conductivity (w/m.k)= 0.7

Boundary condition

Outdoor

Heat flux (w/m²)= 600

Temperature (k)=310

Convection (w/m².k)=0

Indoor

Heat transfer coefficient (w/m².k)=10

Free stream temperature(k) =300

Mesh Size

Cells	Faces	Nodes	Partitions
-------	-------	-------	------------

12768	26150	13375	1
-------	-------	-------	---

Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality = 1

Maximum Aspect Ratio = 1.41421

5.2 Schéma du maillage du modèle physique adopté

Pour les différentes simulations appliquées dans notre étude nous avons choisi de travailler avec le maillage montré par la figure (III.2) ci-dessous.

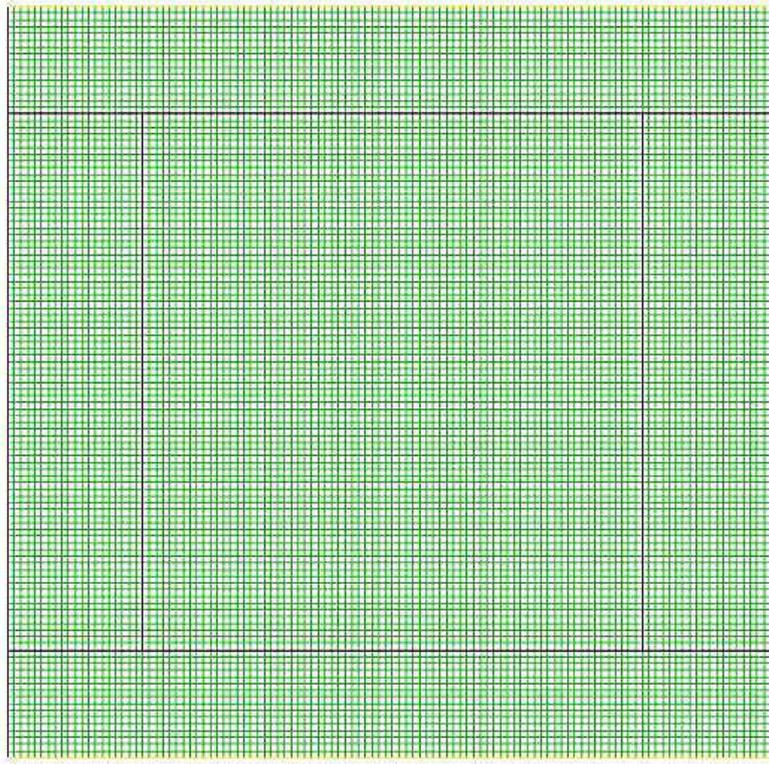


Figure III.2: Schéma du maillage du modèle physique adopté

Chapitre IV :
RESULTATS
ET INTERPRETATIONS

1-Introduction

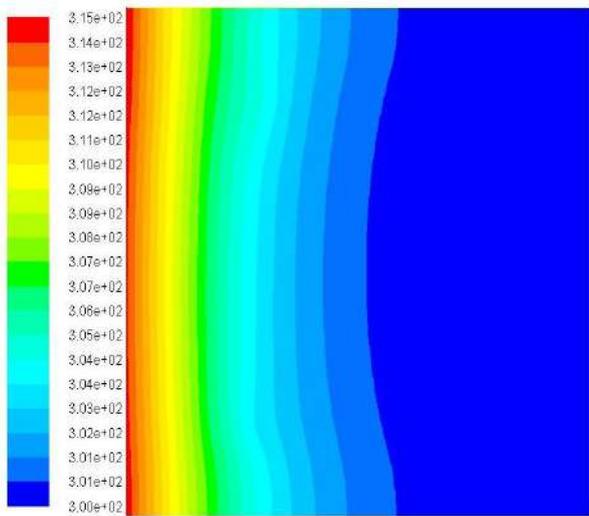
Ce chapitre a été consacré à la présentation des résultats et de leurs discussions. Ces résultats ont été obtenus numériquement par la résolution d'un modèle bidimensionnel qui a été développé avec succès pour traiter un problème de transfert de chaleur avec changement de phase (solide-liquide) pour le cas d'une brique. Les procédures de calcul ont été effectuées par le code de calcul FLUENT pour résoudre les équations régissant le phénomène étudié. Notre travail consiste à étudier l'influence de l'intensité du flux solaire sur le maintien de la température de la brique le plus longtemps que possible.

2-Étude paramétrique

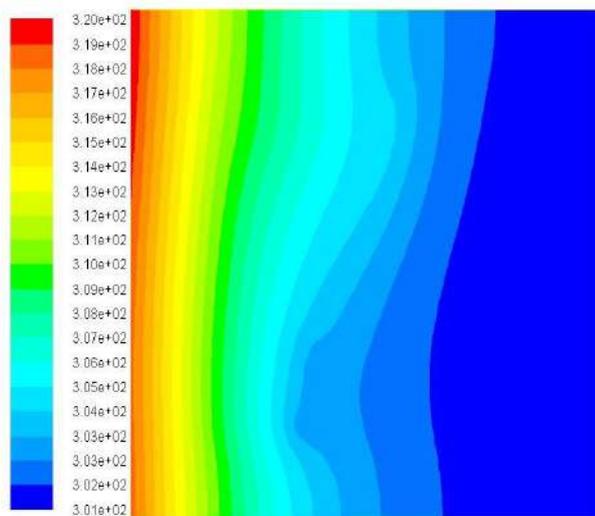
Dans ce qui suit, nous allons présenter nos résultats obtenus par prédiction numérique. Une étude paramétrique a été effectuée pour voir l'influence du champ solaire sur le refroidissement des briques.

Pour étudier la régulation thermique d'un système Brique/MCP, nous avons varié le flux de solaire incident pour les valeurs suivantes : 600, 800 et 1000(W/m^2). Les contours isothermes prédits sont présentés à la 500^{ème}, 1000^{ème}, 1500^{ème} et 2000^{ème} seconde dans les figures **IV.1.2.3**. Sous les conditions aux limites citées auparavant, le flux de rayonnement solaire incident est absorbé par la surface frontale du système Brique/MCP, ensuite transféré vers le MCP par conduction. Le MCP absorbe et stocke d'abord l'énergie sous forme de chaleur sensible dans sa phase solide à mesure que sa température augmente. Lorsque la température du MCP solide atteint la situation du changement de phase, l'énergie commence à se stocker sous forme de chaleur latente. Ce qui résulte l'augmentation de la température du Brique, ainsi la formation d'une couche fine du MCP liquide proche de la paroi frontale. Comme l'apport de chaleur est continu, cette couche s'élargit rapidement du haut par rapport le bas du système à cause des courants convectifs de ce fait, la distribution de la température du Brique est irrégulière, elle prend une valeur plus grande en haut puis elle diminue progressivement jusqu'à sa valeur minimale en bas comme montre les figures **IV.1.2.3**

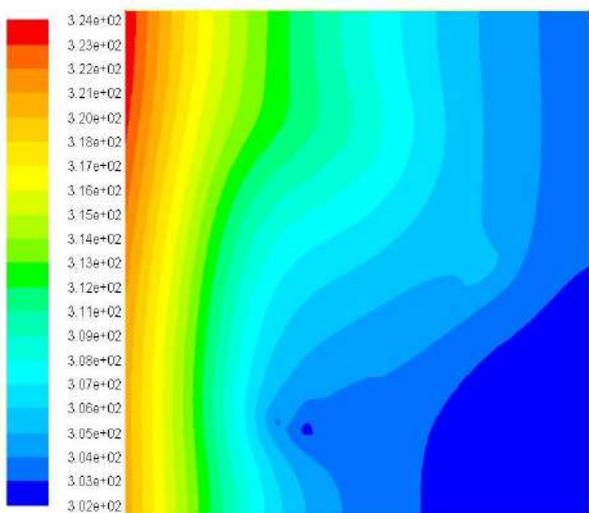
Chapitre IV : Résultats et interprétations



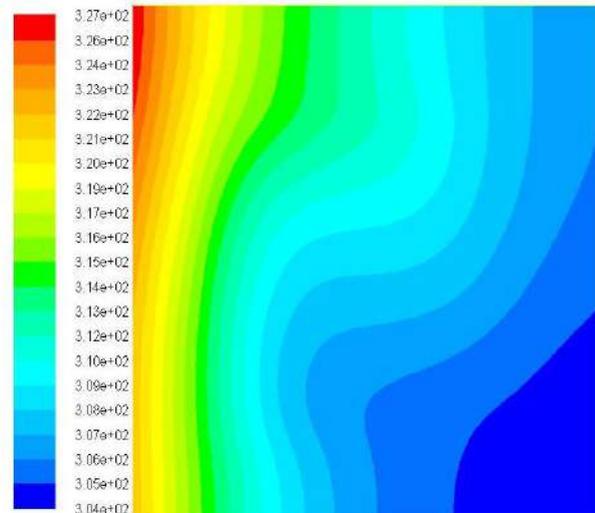
Profile de Température à 500 seconde



Profile de Température à 1000 seconde



Profile de Température à 1500 seconde



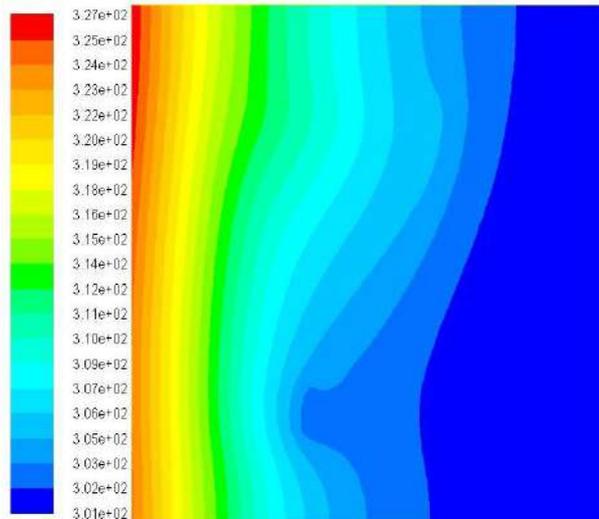
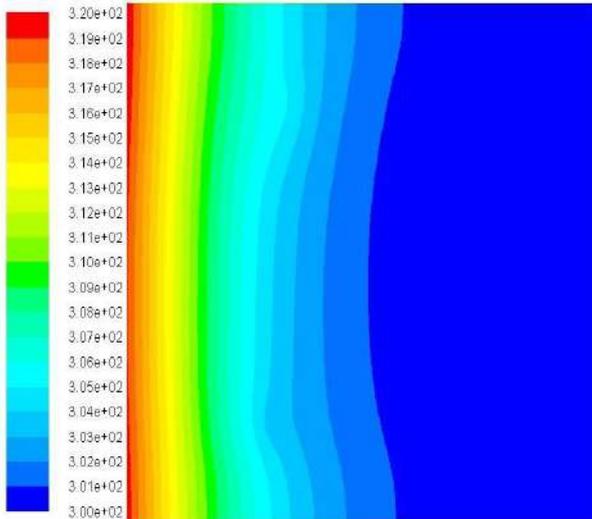
Profile de Température à 2000 seconde

Figure – IV.1 - Contours isothermes du système Brique/PCM étudiés au Flux solaire 600 W/m^2 .

Chapitre IV : Résultats et interprétations

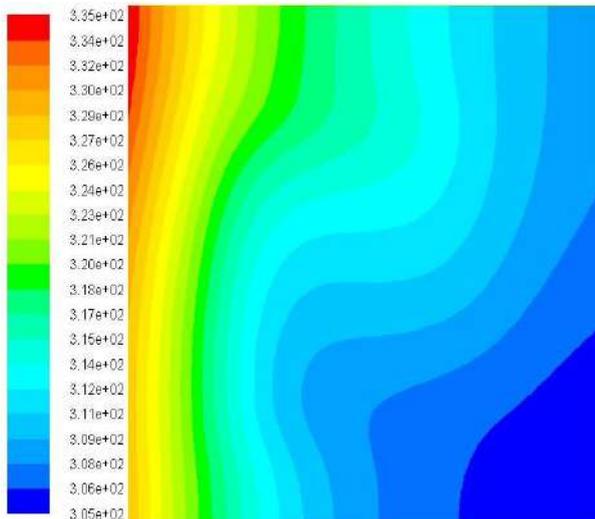
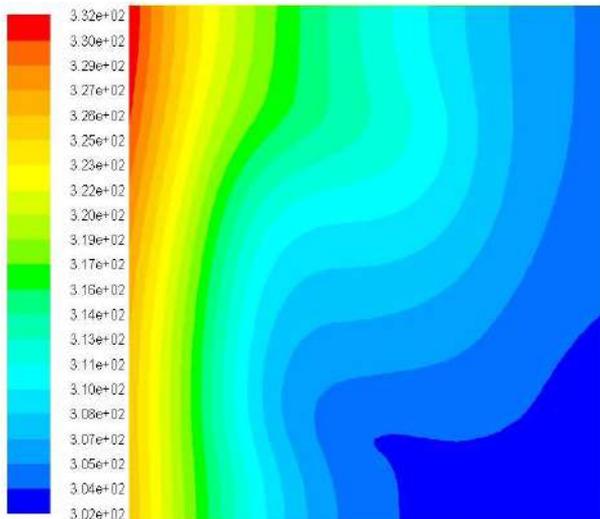
	t=500s	t=1000s	t=1500s	t=2000s
T_{Max}	42 °C	47 °C	51 °C	54 °C

Tableau 1. Valeur maximale de la température sur le front de la brique pour Flux solaire 600 W/m²



Profile de Température à 500 seconde

Profile de Température à 1000 seconde



Profile de Température à 1500 seconde

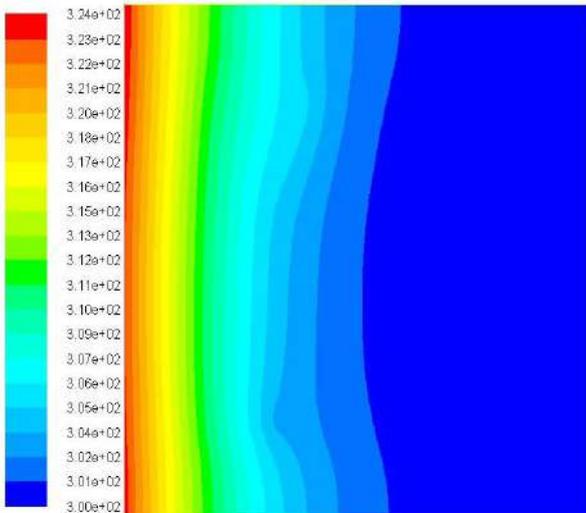
Profile de Température à 2000 seconde

Figure – IV.2- Contours isothermes du système Brique/PCM étudiés au Flux solaire 800 W/m².

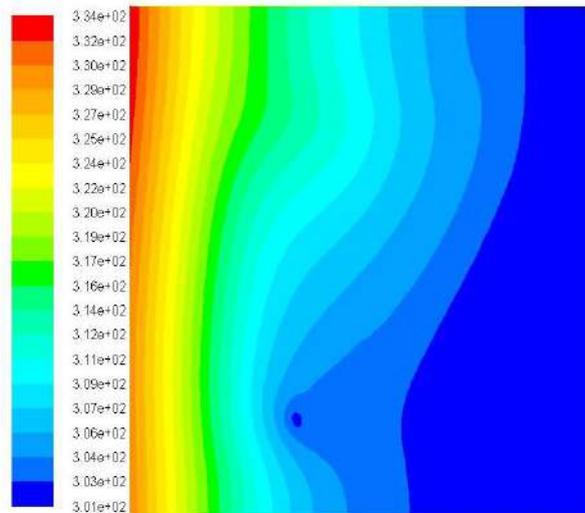
Chapitre IV : Résultats et interprétations

	t=500s	t=1000s	t=1500s	t=2000s
T_{Max}	47 °C	54°C	59°C	62°C

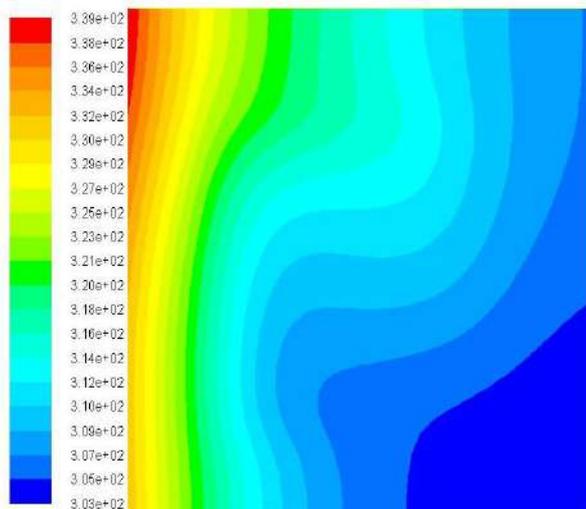
Tableau 2. Valeur maximale de la température sur le front de la brique pour Flux solaire 800 W/m²



Profile de Température à 500 seconde



Profile de Température à 1000 seconde



Profile de Température à 1500 seconde

Figure – IV.3- Contours isothermes du système Brique/PCM étudiés au Flux solaire 1000 W/m² .

Chapitre IV : Résultats et interprétations

	t=500s	t=1000s	t=1500s
T _{Max}	51°C	61°C	66°C

Tableau 3. Valeur maximale de la température sur le front de la brique pour Flux solaire 1000 W/m²

En outre, la température du front de la brique augmente avec le flux solaire incident et aussi au cours du temps, les valeurs maximales de cette température sont enregistrées sur les tableaux **1, 2 et 3**.

Comme le système Brique/MCP a été exposé sous plusieurs intensités de flux d'irradiation (600, 800 et 1000 W/m²), pour évaluer leurs effets sur le comportement thermique du MCP ainsi que son efficacité de refroidissement dans trois climats différents. Les Figures **IV.4.5.6** montrent les contours des fractions liquides du système Brique/MCP enregistrés à 500, 1000, 1500 et 2000 secondes.

L'élévation de la température du système Brique/MCP sous les trois flux d'irradiation a également été rapide jusqu'à 30°C en raison du chauffage sensible du MCP solide par le transfert de chaleur par conduction, à ce moment, la température de la couche MCP en contact direct avec la surface arrière de la brique a atteint son point de fusion et elle a commencé à fondre et absorbe l'énergie thermique de la brique en tant que chaleur latente. Le gradient d'élévation de la température a diminué et la température de la brique reste maintenue. Une fois le front de fusion solide-liquide se propage, la combinaison du transfert de chaleur par convection dans le MCP fondu et par conduction dans le MCP solide ont continué.

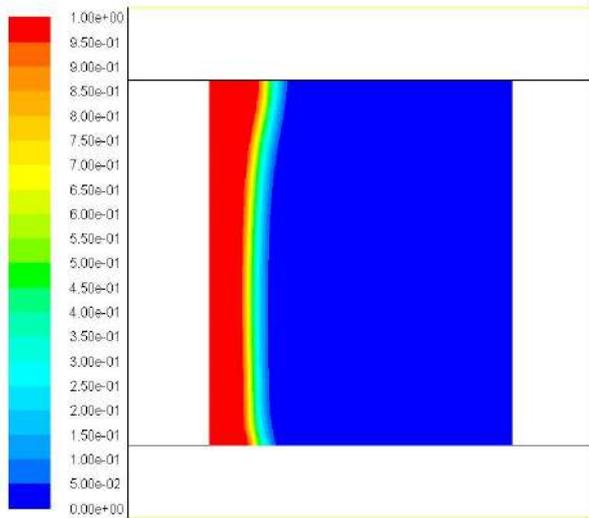
Il est clair que la quantité de MCP liquide augmente rapidement lorsque le système Brique/MCP est exposé à un flux de 1000 W/m², car sa température augmente rapidement par rapport à l'autre qui reçoit un flux de 600 W/m².

Chapitre IV : Résultats et interprétations

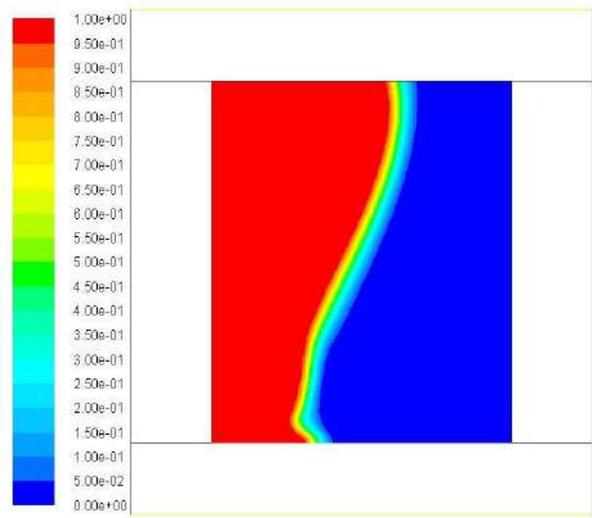
Sous un flux de 600, 800 et 1000 W/m², le MCP prend 1800 secondes, 1600 secondes et 1400 secondes respectivement, pour être complètement fondus, ce qui résulte l'augmentation du transfert de chaleur par convection dans le MCP fondu.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

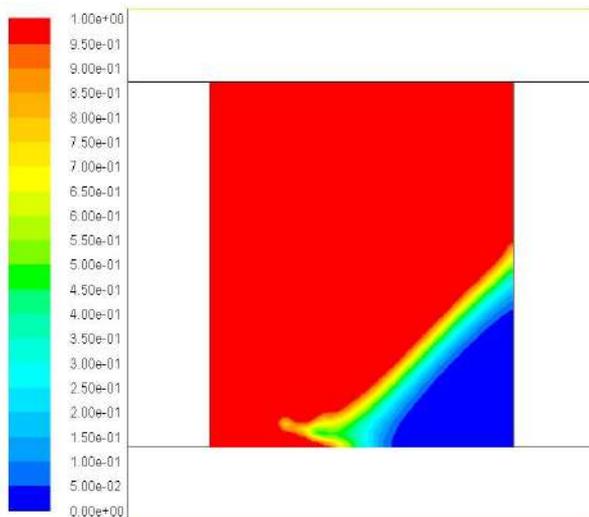
Champ de Solidification/Fusion



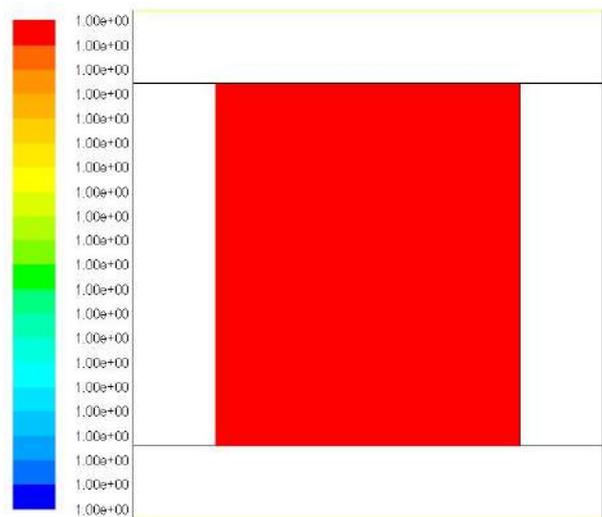
Profile de Fusion à 500 Seconde



Profile de Fusion à 1000 Seconde



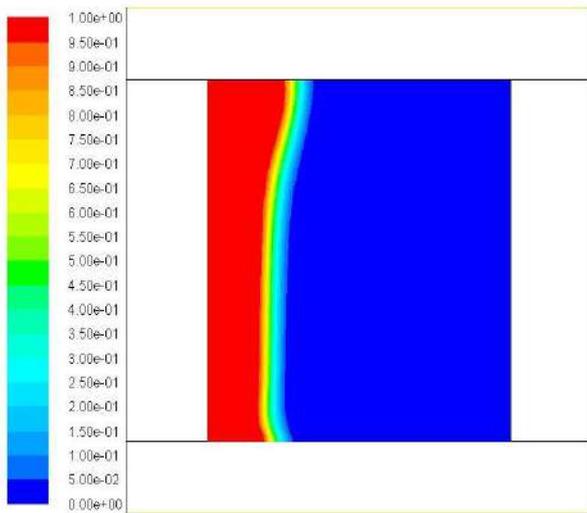
Profile de Fusion à 1500 Seconde



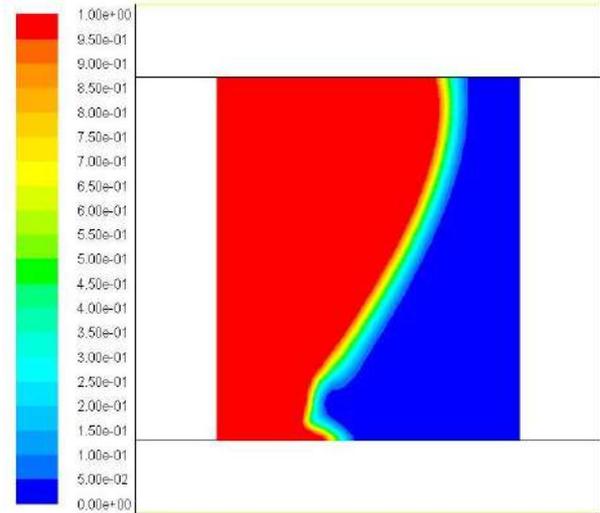
Profile de Fusion à 2000 Seconde

Figure – IV.4-Distribution de la fraction liquide au Flux solaire 600 W/m²

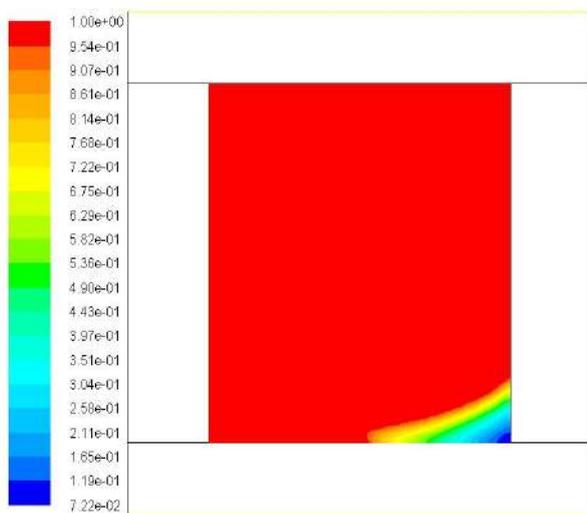
Chapitre IV : Résultats et interprétations



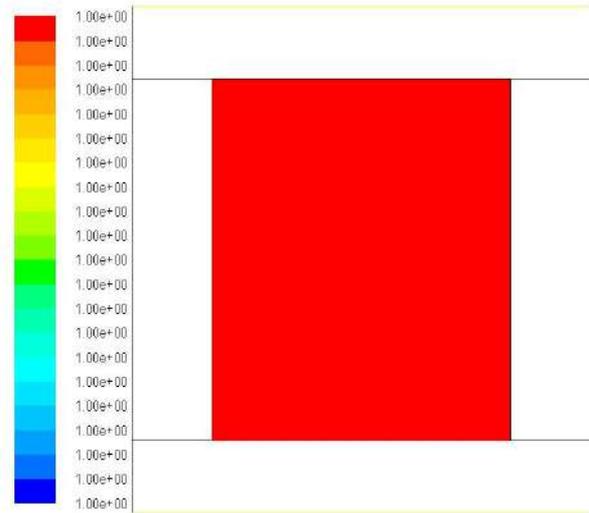
Profile de Fusion à 500 Seconde



Profile de Fusion à 1000 Seconde



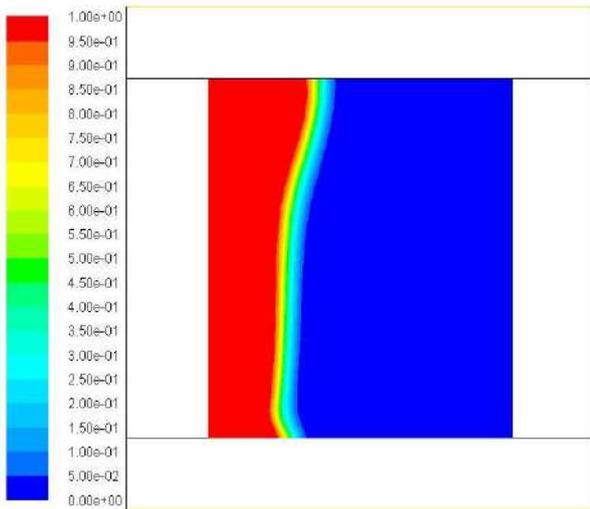
Profile de Fusion à 1500 Seconde



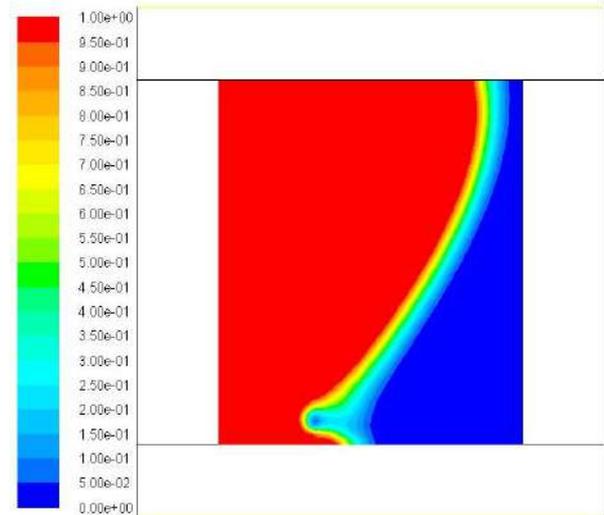
Profile de Fusion à 2000 Seconde

Figure – IV.5- Distribution de la fraction liquide au Flux solaire 800 W/m²

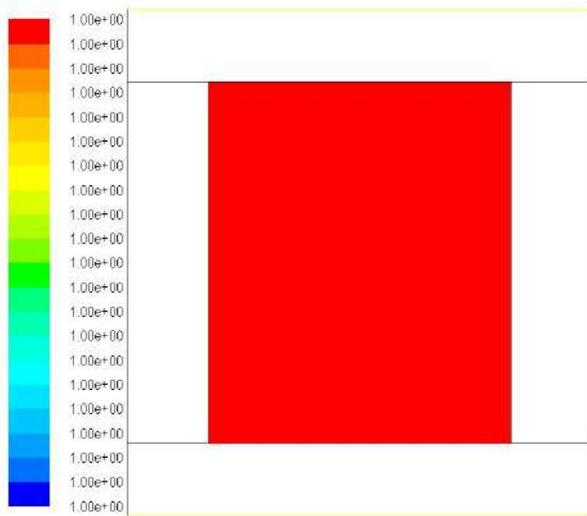
Chapitre IV : Résultats et interprétations



Profile de Fusion à 500 Seconde



Profile de Fusion à 1000 Seconde



Profile de Fusion à 1500 Seconde

Figure – IV.6- Distribution de la fraction liquide au Flux solaire 1000 W/m^2

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les objectifs définis au début de ce travail étaient d'étudier un dispositif énergétique intégré dans l'enveloppe des bâtiments permettant de stocker d'importantes quantités de chaleur dans des volumes réduits par le processus fusion à des températures caractéristiques.

Pour atteindre ces objectifs un modèle numérique a été utilisé permettant de simuler le comportement thermique du bâtiment et en particulier celui du *MCP*.

L'évolution des températures intérieures, et des températures à la surface des parois a été évaluée. On a ainsi montré que les parois contenant le MCP jouaient convenablement leur rôle d'«amortisseur thermique» et que les fluctuations des températures intérieures étaient considérablement réduites.

L'ensemble des applications 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.

Les résultats numériques obtenus montrent que l'utilisation des MCP dans les parois en tant que composants de stockage d'énergie peut réduire la température intérieure par rapport à la température extérieure en du niveau considéré.

Le MCP réduit donc de manière significative les variations de température par absorption de la chaleur pendant la journée. La couche de MCP peut fonctionner comme un isolant semi-thermique lorsque le rayonnement solaire est indisponible.

Ce travail a donc permis d'établir le bien fondé du concept de couplage paroi-MCP proposé pour réaliser l'enveloppe légère d'un bâtiment.

Les résultats obtenus ouvrent de nombreuses perspectives qui nécessitent la poursuite de ces études et la mise en place d'expériences complémentaires.

REFERENCES

- [1] Herde André, Liébard Alain, « Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable », Éditions du Moniteur, Paris, France, 2005.
- [2] <https://fr.slideshare.net/Saamysaami/confort-thermique-02>
- [3] Alain Liébard, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, édition Le Moniteur. (2005).
- [4] Moujelled. B, « Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés » thèse de doctorat, L'Institut des Sciences Appliquées de Lyon.
- [5] <https://fr.slideshare.net/Saamysaami/isolation-thermique>
- [6] <https://www.ecohabitation.com/guides/2666/portes-et-fenetres-faites-entrer-la-lumiere-conservez-la-chaaleur/>
- [7] <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/>
- [8] Corinne Martinet, Jean- pierre Meyer, Travail à la chaleur et confort thermique, NST1 84 (décembre 1999)
- [9] Dumas, J. P. 2002. Stockage du froid par chaleur latente. Techniques de l'ingénieur, 10 Juillet.
- [10] <http://www.recuperation-chaaleur.fr/stockage-par-chaaleur-latente>
- [11] El Omari, K. 2001 (18 décembre). Etude de la convection autour d'un nodule sphérique contenant un matériau à changement de phase au cours de sa cristallisation. Ph.D. thesis, L'Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- [12] Ehmimed, A. J. 1983. Etude spectrophotométrique d'un équilibre thermochimique en vue du stockage chimique de l'énergie. Ph.D. thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau.
- [13] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review, Energy Build. 42 (2010) 1361–1368.
- [14] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), Renew. Sustain. Energy Rev. (2010).

REFERENCES

- [15] Atul Sharma et al, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2009, pp.318-345.
- [16] Mohammed M. Farid et al, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, 45, 2004, pp 1597–1615.
- [17] https://www.ffbatiment.fr/federation-francaise-du-batiment/laffb/mediatheque/batimetiers.html?ID_ARTICLE=825
- [18] <https://docplayer.fr/65446886-Transfert-de-chaleur-dans-une-brique-contenant-un-materiau-a-changement-de-phase.html>
- [19] Dauvergne, J.L. 2008b. Réduction et inversion de modèles de conduction thermique avec changement de phase. Ph.D. thesis, université de Bordeaux 1.
- [20] Sharma, A, V.V, Tyagi, C.R, Chen, & D., Buddhi. 2009a. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol.13, pages 318–345.
- [21] Hasnain, S M. 1998. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part i : heat storage materials and techniques. *Energy conversion and management*, Volume 39(11), pages : 1127–1138.
- [22] Lane, G. A. 1983. *Latent heat materials*. Crc press, boca raton, florida., Volume 1.
- [23] Lane, G. A. 1989. *Hand book of thermal design*, chapter 1 :phase change thermal storage materials. Edité par C.Guyer, McGraw Hill Book Co.
- [24] Lane, G. A., & Glew, DN. 1975. Heat of fusion system for solar energy storage. In. *proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings*.
- [25] Veraj, R, Seeniraj, B, Hafner, B, Faber, C, & Schwarzer, K. 1999. Heat transfer enhancement in a latent heat storage system. *Solar energy*, Volume 65(1 Février), Pages 171–180.

REFERENCES

- [26] Abhat, A. 1978. Investigation of physical and chemical properties of phase change materials for space heating/cooling applications. In : Proc. of the international solar energy congress.
- [27] Abhat, A., D., Heine, M., Heinisch, A., Malatidis N., & 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.
- [28] Buddhi, D, & Sawhney, R. 1994. Proc : Thermal energy storage and energy conversion. School of energy and environmental studies.
- [29] A.F. Regin, S.C Solanki, JS Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2008;12:2438–58
- [30] Dossier Thématique Sept 2008 C.R.C.I Rhône-Alpes
- [31] S. Atul et al. : Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and sustainable energy reviews*, 2007.
- [32] D.A. Neeper. Potential benefits of distributed PCM thermal storage. In: Coleman MJ, editor. *Proceedings of 14th National Passive Solar Conference*. Denver, Colorado, USA: American Solar Energy Society; 1989. p. 283–8.
- [33] BASF. The Chemical Company. *Construction Applications and Systems with Micronal® PCM*. Gypsum wall board with Micronal® PCM. (2013).