



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

La République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد بن باديس- مستغانم

Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الهندسة الميكانيكية

Département Génie Mécanique



N° d'ordre : M...../GM/2021

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

**ETUDE NUMERIQUE DE LA PERFORMANCE THERMIQUE DES MURS AVEC
L'INTEGRATION D'UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE (MCP)**

Présenté par :

❖ BENAMMAR Houcine

Soutenu le 12/ 07 / 2021 devant le jury composé de :

Président	Pr. RETIEL Nouredine	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. GUERMAT Abdelkader	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr. MEDJAHED Bendida	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2020 /2021

Remerciement

Tout d'abord, la réalisation de ce mémoire a été possible grâce au bon Dieu qu'il m'a donnée la force pour surmonter toutes les difficultés durant mes années d'études.

*Je tiens à remercier mon encadreur le **Dr. MEDJAHED Bendida** pour ces conseils et son suivi continu durant toute la période de la réalisation de ce travail.*

*J'adresse mes remerciements à Monsieur le Président de jury **Pr. RETIEL Nouredine** et le membre de jury **Dr. GUERMAT Abdelkader** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

*Ce travail est dédié à toute ma famille ;
Surtout à mon père, ma mère, mes frères et aussi mes
grands-parents paternels et maternels.*

Dédicace aussi à mes amis et à tous les gens qui sont proches de moi.

LISTE DES FIGURES

Figure	Description	Page
Chapitre II		
Figure II.1	Chemin de propagation de la chaleur dans un mur	7
Figure II.2	Energie cinétique des corps froid et chaud	8
Figure II.3	Les modes de transfert de chaleur dans un mur	9
Chapitre III		
Figure III.1	Schémas général sur le principe fonctionnement de MCP	13
Figure III.2	Schémas représentant les différents domaines d'applications de MCP	15
Figure III.3	illustration de stockage d'énergie par le MCP	20
Figure III.4	Représentation graphique de stockage d'énergie par le MCP	21
Figure III.5	Illustration de décharge de l'énergie par le MCP	21
Figure III.6	Représentation graphique déchargement de l'énergie par le MCP	22
Chapitre IV		
Figure IV.1	Les géométries de calcul présenté par six configurations	26
Figure IV.2	Représentation de maillage (a) et la distribution de la température (b) du cas référence	29
Figure IV.3	Représentation graphique de profil de température du cas référence	30
Figure IV.4	Représentation graphique de profil de température de la 2 ^{ème} configuration	32
Figure IV.5	Représentation graphique de profil de température de la 3 ^{ème} configuration	34
Figure IV.6	Représentation graphique de profil de température de la 4 ^{ème} configuration	36
Figure IV.7	Représentation graphique de profil de température de la 5 ^{ème} configuration	38
Figure IV.8	Représentation graphique de profil de température de la 6 ^{ème} configuration	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Description	Page
Chapitre IV		
Tableau IV.1	caractéristiques thermique pour chaque sélection MCP	28
Tableau IV.2	caractéristiques thermique pour chaque matériaux de construction de mur	28

NOMENCLATURES

Lettres de l'alphabet latin :

SYMBOLES	UNITES	SIGNIFICATIONS
C_p	J/kg ^{°k}	chaleur spécifique
D_h	m	Diamètre hydraulique
d	m	Longueur de référence
$\frac{dT}{dy}$	°C/m	Gradient de température suivant l'axe Y
g	m/s ²	gravité ou l'accélération de pesanteur
h_{ext}	W/m ^{2°k}	Coefficient d'échange thermique par convection externe
h_{int}	W/m ^{2°k}	Coefficient d'échange thermique par convection interne
I_s	KWh/m ²	Rayonnement solaire
K	W/m ^{°k}	Conductivité thermique
N_{pr}	/	Nombre de prandtl
P	m	périmètre
q_r	W/m ²	Flux de chaleur par rayonnement
q_l	W/m ²	Flux de chaleur par émission solaire
R	/	Nombre de rayleigh
S	m ²	Surface
T_A	°C	Température de la couche externe
T_B	°C	Température de la couche interne
$T_{b1, s}$	°C	Température de la sortie de brique 01
$T_{b2, s}$	°C	Température de la sortie de brique 02
T_{bs}	°C	Température de la sortie de brique
T_{ce}	°C	Température d'entrée de ciment externe
T_{cs}	°C	Température de la sortie de ciment interne
$T_{cs, ext}$	°C	Température de la sortie de ciment externe
T_{ext}	°C	Température externe d'air ambiant
T_{int}	°C	Température interne d'air ambiant
$T_{it, s}$	°C	Température de la sortie d'isolant textile
$T_{MCP, s}$	°C	Température de la sortie de matériau à changement de phase
T_{sky}	°C	Température d'air
$T_{\infty 1}$	°C	Température infini d'air extérieur
$T_{\infty 2}$	°C	Température infini d'air ambiant
V	m/s	Vitesse de vent

Lettres de l'alphabet grecques :

SYMBOLES	UNITES	SIGNIFICATIONS
q	W	Flux de chaleur
ϕ	W/m ²	Densité par unité de surface
ρ	Kg/m ³	La masse volumique
β	°C ⁻¹	Coefficient de délitation
α	m ² /s	Diffusivité thermique
μ	kg/m.s	Viscosité dynamique de fluide
ν	m ² /s	Viscosité cinématique de fluide
α_s	m ² /s	Diffusivité solaire
ε	/	Emissivité
σ	W/m ² .K ⁴	Constant de Stephan Boltzmann

SOMMAIRE

Remerciement	i
Dédicace	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Nomenclatures	v
Résumé	1
Introduction générale	4

Chapitre 01

I. Etude bibliographique	5
--------------------------	---

Chapitre 02

II . Généralité sur le transfert de chaleur	7
II.1. Notions de base	7
II.1.1 La chaleur	7
II.1.2. Flux de chaleur	8
II.1.3. La Température	8
II.1.4. Unités de chaleur	9
II.2. Transfert de chaleur	9
II.2.1. Définition	9
II.3. Modes de transfert de chaleur	9
II.3.1. Transfert de chaleur par conduction	10
II.3.1.1. Définition	10
II.3.1.2. Applications	10
II.3.2. Transfert de chaleur par Rayonnement	10
II.3.2.1. Définition	10
II.3.2.2. Applications	11
II.3.3. Transfert de chaleur par Convection	11
II.3.3.1. Définition	11
II.3.3.2. Applications	12

Chapitre 03

III. Matériau à changement de phase (MCP)	13
III.1. Définition	13
III.2. Généralités sur les matériaux à changement de phase	13
III.2.1. Principe du changement de phase : chaleur sensible et chaleur latente	13
III.2.2. Exemples et types de matériaux à changement de phase	14
III.2.3. Applications des matériaux à changement de phase	15
III.2.3.1. Les applications spatiales MCP	16
III.2.3.2. Les applications terrestres MCP	16
III.3. Propriétés thermo physiques des MCP	16
III.3.1. Définition des propriétés de MCP	17
III.3. 2.Performance MCP souhaitables	19
III.4. Le stockage d'énergie par chaleur latente dans les MCP	20
III.4. 1.Principe	20
III.4.2. Performances	22
III.4.3. Avantages	23
III.4.4. Inconvénients	23
III.4.5. Applications	23
III.5. Incorporation des MCP dans le bâtiment	23
III.5.1 Approche générale	23
III.5.2. Le but d'incorporation de MCP dans le secteur bâtiment	24

Chapitre 04

IV.1. La description du problème	25
IV.2. Les hypothèses de travail	25
IV.3. Les conditions aux limites	27
IV.4. Résultats et discussions	29
IV.5. conclusion	40
Conclusion général	42
Référence bibliographie	43

Etude numérique de la performance thermique des murs avec l'intégration d'un matériau à changement de phase (MCP)

Résumé :

Le stockage d'énergie thermique utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) joue un rôle important dans le maintien du confort thermique et la réduction de la consommation d'énergie dans un bâtiment en raison de sa capacité à absorber et libérer la chaleur dans de petites variations de température. Dans cette étude, la performance thermique des murs a été étudiée en fonction de divers facteurs comme l'intégration d'une seule couche MCP, le positionnement du MCP dans le mur composite, la température de transition de phase et la chaleur de fusion du MCP.

Ce travail est basé sur six configurations de murs d'un bâtiment multicouche où nous modifions les positions de la couche de matériau à changement de phase (MCP). Des investigations ont été menées pour trois propositions MCP sur cinq configurations.

La méthode utilisée dans ce travail de simulation numérique de la conduction de la chaleur à trois dimensions dans un mur de bâtiment multicouche, c'est la méthode des volumes finis avec un maillage structuré par application de logiciel ANSYS 18.0.

L'objectif de travail est fait une étude numérique de la performance thermique des murs avec l'intégration d'un matériau à changement de phase (MCP), puis changer le matériau à changement de phase (MCP) et connaître leur effet sur la répartition de la température et puis effet de la position des matériaux à changement de phase (MCP) dans le mur sur la répartition de la température. L'analyse montre que les résultats pour le cas de mur à deux dimensions aient bien la réalité physique.

Mots clés : Mur du bâtiment, Logiciel ANSYS18.0, Régime stationnaire, Matériaux à changement de phase (MCP), Température.

Numerical study of the thermal performance of walls with the integration of a phase change material (PCM)

Abstract:

Thermal energy storage using phase change materials (PCMs) plays an important role in maintaining thermal comfort and reducing energy consumption in a building due to its ability to absorb and release heat in a building. small variations in temperature. In this study, the thermal performance of the walls was investigated as a function of various factors such as the integration of a single MCP layer, the positioning of the MCP in the composite wall, the phase transition temperature and the heat of fusion of the MCP.

This work is based on six configurations of walls of a multilayer building where we modify the positions of the layer of phase change material (PCM). Investigations were carried out for three MCP proposals on five configurations.

The method used in this work of numerical simulation of three-dimensional heat conduction in a multi-layered building wall is the finite volume method with a structured mesh by application of ANSYS 18.0 software.

The work objective is made a digital study of the thermal performance of the walls with the integration of a phase change material (PCM), then change the phase change material (PCM) and know their effect on the distribution temperature and then the effect of the position of the phase change materials (PCM) in the wall on the temperature distribution. The analysis shows that the results for the two-dimensional wall case do have physical reality.

Keywords : Building wall, ANSYS18.0 software, Stationary regime, Phase change materials (PCM), Temperature.

دراسة عددية للأداء الحراري للجدران مع دمج مادة تغيير الطور (MCP)

الملخص:

يلعب تخزين الطاقة الحرارية باستخدام مواد تغيير الطور (MCP) دورًا مهمًا في الحفاظ على الراحة الحرارية وتقليل استهلاك الطاقة في المبنى نظرًا لقدرته على امتصاص وإطلاق الحرارة في المبنى. تغيرات صغيرة في درجة الحرارة. في هذه الدراسة، تم فحص الأداء الحراري للجدران كدالة لعوامل مختلفة مثل تكامل طبقة (MCP) واحدة، ووضع (MCP) في الجدار المركب، ودرجة حرارة انتقال الطور، وحرارة اندماج (MCP).

يعتمد هذا العمل على ستة تكوينات للجدران لمبنى متعدد الطبقات حيث نقوم بتعديل مواضع طبقة مادة تغيير الطور (MCP). أجريت تحقيقات لثلاثة مقترحات (MCP) على خمسة تشكيلات.

الطريقة المستخدمة في هذا العمل من المحاكاة الرقمية للتوصيل الحراري ثلاثي الأبعاد في جدار مبنى متعدد الطبقات هي طريقة الحجم المحدود مع شبكة منظمة عن طريق تطبيق برنامج ANSYS 18.0.

هدف العمل هو دراسة رقمية للأداء الحراري للجدران مع دمج مادة تغيير الطور (MCP)، ثم تغيير مادة تغيير الطور (MCP) ومعرفة تأثيرها على درجة حرارة التوزيع ومن ثم تأثير موضع مواد تغيير الطور (MCP) في الجدار على توزيع درجة الحرارة. يُظهر التحليل أن نتائج حالة الجدار ثنائية الأبعاد لها واقع مادي.

الكلمات المفتاحية: جدار المبنى، برنامج ANSYS 18.0، النظام الثابت، مواد تغيير الطور (MCP)، درجة الحرارة.

Introduction générale :

Les matériaux changement de phase (MCP) sont des éléments de stockage de chaleur latente lors du processus de fusion et de sa restitution pendant la solidification en conservant une température constante [1, 2].

Ces matériaux possèdent une densité importante de stockage d'énergie et une capacité à maintenir une température constante tout en absorbant la chaleur pendant la fusion et en la restituant lors de la solidification [2]. Cet intérêt s'est développé dans le domaine de la gestion thermique et des systèmes d'énergie solaire des bâtiments et des serres.

Les MCP fondent et se solidifient dans une large plage de températures, ce qui les rend attrayants pour diverses applications. Parmi ces matériaux, les cires de paraffine qui sont bon marché avec une densité de stockage thermique modérée et une faible conductivité thermique. Les sels hydratés sont des MCP avec une grande densité de stockage d'énergie et une plus grande conductivité thermique mais ils présentent un super-refroidissement et une ségrégation de phase à cause de leur asymétrie, posent de vraies limitations [3].

Alors le travail consiste à étudier l'effet du MCP sur le taux de transfert de chaleur dans un mur de bâtiment et le rôle du MCP sur le confort thermique à l'intérieur du bâtiment.

Le contexte et les résultats de cette étude sont présentés ici en détails :

Le premier chapitre a été réservé à la présentation de l'étude bibliographique sur les travaux scientifiques de l'application des matériaux à changement qui joue un rôle important pour améliorer le confort thermique dans les murs du bâtiment.

Et après, dans le deuxième chapitre j'ai présenté une généralité sur le phénomène du transfert de chaleur tel que (la chaleur, flux de chaleur, température...etc.) et aussi une notion sur les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement).

Ensuite, ce qui concerne le troisième chapitre j'ai présenté et bien détaillé les matériaux à changement de phase (MCP) par définition, des généralités, des exemples et les domaines d'application de ces matériaux, et aussi j'ai parlé de l'incorporation des MCP dans le secteur du bâtiment.

Et puis le quatrième chapitre a été réservé à la présentation des hypothèses de travail, des conditions aux limites et les discussions des résultats.

Finalement, une conclusion générale est donnée à la fin de ce document.

I. Etude bibliographique

Avec une application croissante de la technologie de stockage d'énergie à changement de phase dans les domaines de la conservation de l'énergie des bâtiments, de la réfrigération et de la climatisation ce qui restreint sérieusement le développement de la technologie de stockage à froid à changement de phase. Par conséquent, les matériaux à changement de phase sont devenus un axe de recherche dans le domaine du stockage d'énergie à changement de phase. La classification et les caractéristiques des matériaux à changement de phase sont brièvement décrites dans ce travail. Depuis les années 80, plusieurs études ont été effectuées sur l'utilisation des MCP dans le bâtiment.

Pasupathy et al, ont effectué une étude expérimentale et numérique par volumes finis, sur un élément de stockage d'énergie, se présentant comme une paroi de la toiture des bâtiments et contenant une couche MCP eutectique inorganique. Ils ont montré qu'un bon choix de MCP, joue un rôle important pour améliorer le confort thermique, et que les coefficients de transfert thermique convectif des surfaces externes du toit et l'épaisseur de MCP ont une grande influence sur le stockage d'énergie. Les auteurs ont observé expérimentalement que la température d'air interne reste stable dans la zone des températures de confort thermique [4].

Chen et al [2008] ont examiné le comportement thermique de trois échantillons qui sont présenter comme suit : plâtre pur, nouveau composant plâtre-MCP et MCP pur placés dans une enceinte isotherme (environ 28 C°). L'expérience a montré que la température centrale des trois échantillons atteint la température du récipient isotherme respectivement après un temps de 20 minutes, 140 minutes et 200 minutes. Ce qui montre la grande capacité de charge/décharge des nouveaux composants MCP.

A l'aide d'un modèle mathématique de différences finies basé sur la méthode de capacité apparente, les auteurs ont effectué une étude paramétrique sur des cellules-test construites par des parois contenant des composants MCP [5].

Haghshenaska shani et al, ont examiné numériquement la possibilité de remplir le vide des briques de construction par des matériaux à changement de phase (MCP : n-octadécane) pour améliorer leurs performances thermiques. Un modèle mathématique bidimensionnel à base de volumes finis a été développé pour modéliser le processus de changement de phase et le transfert de chaleur dans une paroi brique-MCP avec des conditions climatiques de la ville de Tehran (Iran). L'étude réalisée montre que plus que la quantité de MCP est grande, plus la

pénétration de la chaleur vers l'intérieur est faible. Ainsi, on réalise une économie d'énergie utile pour le chauffage et la climatisation. Pour une bonne optimisation, les auteurs recommandent l'emplacement des matériaux à changement de phase proche de la face exposée au milieu ambiant extérieur [6].

Castell et al, en considérant plusieurs types de MCP micro-encapsulés. Des expériences additionnelles à l'aide d'une pompe à chaleur pour établir le confort thermique ont été menées et démontrent que la consommation de l'énergie des cellules-test contenant du MCP a été réduite environ de 15 % comparé aux cellules sans MCP [7].

Alawadhi et al, ont examiné les performances d'une dalle de bâtiment avec des trous coniques verticaux remplies par des matériaux à changement de phase, utilisant la chaleur latente élevée de fusion pour réduire les apports calorifiques solaires. Un modèle mathématique par méthode d'éléments finis basé sur la technique de la capacité thermique apparente a été développé. L'étude paramétrique a montré que le MCP (n-Eicosane) a une meilleure adaptation avec une géométrie conique bien déterminé [8].

Kuznik et al, ont amené à l'élaboration et à l'intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment, par l'inclusion des systèmes de stockage d'énergie, parmi lesquels, on distingue les systèmes actifs et les systèmes passifs [9].

II. Généralité sur le transfert de chaleur

II.1. Notions de base

II.1. La chaleur

En physique, on appelle chaleur une forme particulière de l'énergie. Cette équivalence de la chaleur et du travail constitue le premier principe de la thermodynamique. Il en résulte qu'énergie, travail et quantité de chaleur ont une même unité : le joule [10].

A la base de l'étude des transferts thermiques se trouvent les concepts de quantité de chaleur et de différence de température. Le transfert de chaleur d'une partie d'une substance à une autre partie, ou d'un corps à un autre corps, s'effectue sous forme d'énergie cinétique d'agitation moléculaire désordonnée. Ce transfert est le fait d'une différence de température entre les deux corps. La chaleur se propage spontanément du corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse, élevant ainsi la température de ce dernier, tout en abaissant la température du premier, dans la mesure où le volume des deux corps reste constant. Ceci constitue le second principe de la thermodynamique. Ce second principe met en évidence la notion d'irréversibilité : La chaleur ne pourra pas se propager d'un corps froid vers un corps chaud, sauf si on fournit un travail [10].

Par exemple

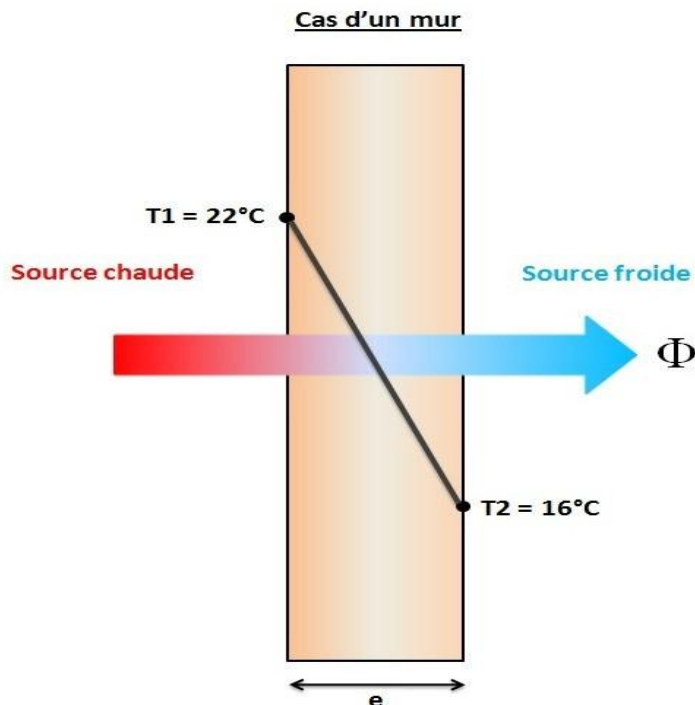


Figure II.1 : chemin de propagation de la chaleur dans un mur

II.1.2. Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [10].

$$\varphi = \frac{1}{S} \times \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Où S est l'aire de la surface

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.2})$$

II.1.3. La Température

On appelle température la grandeur physique qui mesure le degré de chaleur d'un corps ou d'un milieu. Lorsque deux corps sont placés dans une enceinte adiabatique, le corps le plus chaud cède de la chaleur au corps le plus froid, jusqu'à ce que les deux corps aient la même température. On dit alors qu'on a atteint l'équilibre thermique [10].

La température est une propriété thermodynamique du corps et mesure l'agitation microscopique de la matière. Selon la théorie cinétique, la température d'un corps est fonction de l'énergie cinétique moyenne de translation de ses molécules. L'énergie cinétique d'un corps est nulle à une température appelée zéro absolu [10].

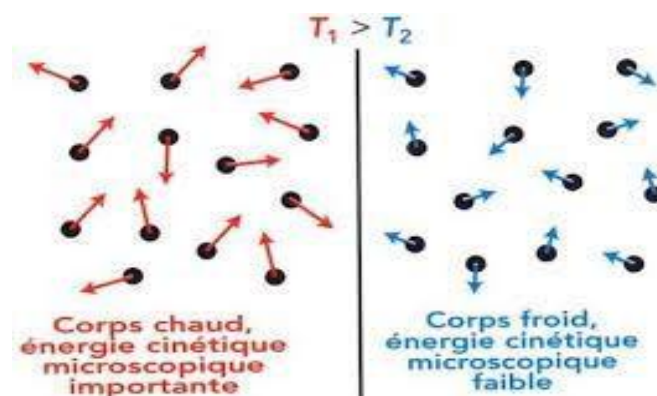


Figure II.2 : énergie cinétique des corps froid et chaud

Plus la température est grande, plus l'agitation cinétique à l'échelle microscopique est grande.

II.1.4. Unités de chaleur

On a vu qu'en physique, la quantité de chaleur est exprimée dans les mêmes unités que l'énergie et le travail, à savoir en joules (J). On utilise également la calorie (Cal), définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1 g d'eau de 14,5 °C à 15,5 °C sous une pression de 1 atm.

L'énergie mécanique peut être convertie en chaleur par frottement, et le travail mécanique nécessaire pour produire une calorie s'appelle « l'équivalent mécanique de la calorie » [10].

On a : 1 Cal = 4,1855 J

II.1. Transfert de chaleur

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre [11].

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final [11].

II.2.1. Définition :

Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur, est un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond en réalité à un transfert d'agitation thermique entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique [11].

II.2. Modes de transfert de chaleur

On distingue trois mécanismes d'échange de chaleur entre milieux matériels : Conduction, convection et rayonnement.

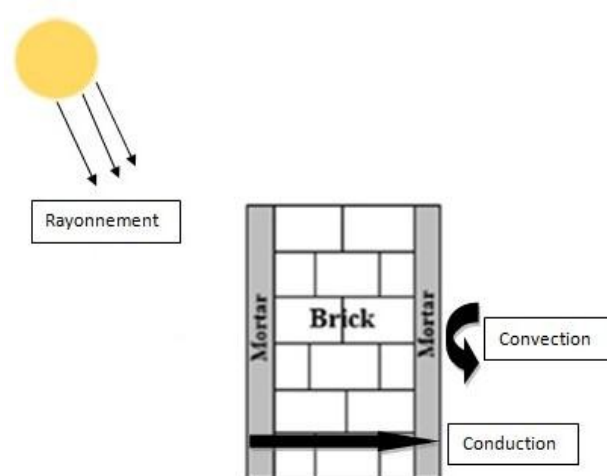


Figure II.3 : les modes de transfert de chaleur dans un mur

II.3.1. Transfert de chaleur par conduction**II.3.1.1. Définition**

La conduction est une transmission de chaleur dans la masse d'un milieu matériel, les zones chaudes cédant de la chaleur à celles qui le sont moins. C'est le cas lorsqu'on chauffe l'extrémité d'une barre [11].

Au plan corpusculaire, l'interprétation est la suivante : une zone chaude est occupée par des particules à vitesse élevée, par définition même de la température. Le mouvement brownien fait constamment passer des particules d'une zone à l'autre ; mais entre zones à températures inégales, les particules ont des énergies cinétiques différentes ; le brassage a pour effet de transférer de l'énergie cinétique d'agitation, des zones chaudes vers celles qui le sont moins. La manifestation macroscopique en est un transfert de chaleur. C'est donc un mécanisme de chocs qui intervient [11].

II.3.1.2. Applications

Le transfert de chaleur par conduction caractérise tous les transferts de chaleur qui s'effectuent dans les parois séparant deux corps à des températures différentes. C'est le cas des surfaces d'échange des échangeurs de chaleur, mais c'est aussi celui des murs et vitrages d'un bâtiment, des cuves contenant des liquides chauds ou froids, des parois des fours, etc. [12].

Il est courant que les parois soient constituées de plusieurs matériaux ayant chacun un rôle spécifique (réfractaire, revêtement anticorrosion, isolant thermique, etc.) et qui sont des parois composites à travers lesquelles s'effectue le transfert de chaleur [12].

II.3.2. Transfert de chaleur par Rayonnement**II.3.2.1. Définition**

Le rayonnement est une transmission d'énergie à distance, entre deux corps séparés ou non par un milieu matériel (transformation d'énergie thermique d'un émetteur en énergie électromagnétique, propagation, transformation partielle en énergie thermique sur un corps récepteur) [12].

C'est le cas de l'énergie qui nous vient du soleil. L'interprétation physique est la suivante : tout corps émet des particules désignées par "photons" ; ceux-ci se déplacent à la vitesse de la lumière et transportent une énergie fonction de leur "longueur d'onde" [12].

Un corps C émettant des photons dans toutes les directions possibles, certains d'entre eux sont reçus par l'autre corps C', éventuellement absorbés, en tout ou partie [12].

Bien entendu, le corps C'émet aussi des photons dont certains seront reçus et absorbés par C. Le bilan net se traduit par un échange d'énergie entre C et C'[12].

II.3.2.2. Applications

Le rayonnement infrarouge est appliqué dans de très nombreux procédés industriels. Son action sur la matière est essentiellement thermique et les applications principales liées à ce rayonnement sont [13] :

- Le séchage (papiers, cartons, textiles, etc.) ;
- La cuisson (teintures, apprêts, enductions...) ;
- Le chauffage (avant formage de matériaux divers, traitements thermiques, soudage, chauffage de postes de travail...) ;
- Les polymérisations (encres, revêtements, emballages...) ;
- La stérilisation (flacons pharmaceutiques, produits alimentaires divers...).

Le rayonnement ultraviolet est constitué de photons dont l'énergie est de l'ordre de grandeur de l'énergie des liaisons atomiques.

Ceux-ci agissent sur la matière par déplacement des électrons vers des niveaux énergétiques supérieurs. Lorsque la matière soumise au rayonnement y est sensible, il s'y produit des réactions chimiques. La partie du rayonnement ultraviolet absorbée par la matière et qui n'est pas utilisée à la réaction chimique est transformée en chaleur [13].

Dans la pratique, cet échauffement reste faible et le rayonnement ultraviolet est principalement utilisé dans le domaine des réticulations de films plastiques et des polymérisations de produits organiques comme les encres d'imprimerie, les laques et vernis, opérations qui sont souvent appelées improprement séchages [13].

II.3.3. Transfert de chaleur par Convection

II.3.3.1. Définition

La convection est le phénomène observé entre un fluide en mouvement et une paroi, phénomène principal dans la plupart des échangeurs de chaleur [12].

La cause profonde est encore une agitation des particules fluides, mais à une échelle beaucoup moins microscopique. Les parcelles de matière au contact de la paroi (chaude par exemple) s'échauffent par conduction ; le mouvement du fluide reporte ces parcelles dans la masse où elles cèdent par mélange une partie de la chaleur reçue ; d'autres les remplacent à la paroi et ainsi de suite [12].

Quant au mouvement du fluide, il peut avoir deux causes. Ou bien il est imposé de l'extérieur par une machine (pompe, ventilateur, compresseur) ; c'est la convection forcée. Ou bien le contact du fluide avec la paroi plus chaude ou plus froide crée des différences de masse volumique, génératrices de mouvement au sein du fluide ; c'est la convection naturelle [12].

Rigoureusement, même en convection forcée, les différences de densité créent un écoulement parasite, en général insignifiant par rapport à l'écoulement principal. On parle de convection mixte quand les 2 phénomènes ont de l'importance [12].

II.3.3.2. Applications

Les applications du transfert de chaleur par convection sont beaucoup trop nombreuses pour que l'on puisse envisager de les citer toutes. Elles interviennent chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz, qu'il s'agisse de faire bouillir de l'eau dans une casserole, du radiateur de chauffage central, du radiateur associé au moteur d'une voiture ou de l'échangeur dans un procédé, évaporateur ou condenseur [13].

La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi, ce qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques, voire des sécheurs à air chaud [13].

III. Matériau à changement de phase (MCP)

III.1. Définition :

On appelle matériau à changement de phase - ou MCP - tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement située entre 10 et 80 degrés. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...) [14].

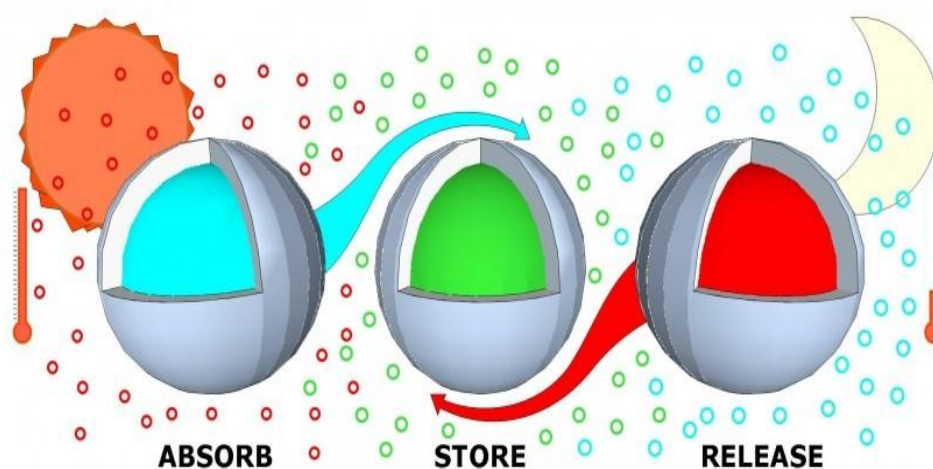


Figure III.1. Schémas général sur le principe fonctionnement de MCP

III.2. Généralités sur les matériaux à changement de phase

III.2.1. Principe du changement de phase : chaleur sensible et chaleur latente :

Tout matériau, solide ou liquide (ou gazeux) possède une capacité à stocker ou céder de l'énergie sous forme de chaleur. On distingue 2 types de transfert de chaleur (ou transfert thermique) [14]:

Le transfert thermique par Chaleur Sensible (CS) :

Dans ce cas, le matériau en question peut céder ou stocker de l'énergie en voyant varier sa propre température, sans pour autant changer d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la CS échangée par un matériau est la Chaleur Massique, notée C_p et exprimée en $J/(kg.K)$.

Exemple : $C_{p \text{ eau}} = 4180 \text{ J/(kg.K)}$ signifie qu'il faut 4186 joules pour élever 1 kg d'eau de 1 °C (valable aux températures proches de 20 °C) [14].

Le transfert thermique par Chaleur Latente (CL) :

Dans ce cas, le matériau peut stocker ou céder de l'énergie par simple changement d'état, tout en conservant une température constante, celle du changement d'état. La grandeur utilisée pour quantifier la CL échangée par un matériau est la Chaleur Latente de Changement de Phase notée L_f (f pour *fusion*) pour un changement de phase Liquide/Solide, et L_v (v pour *vaporisation*) pour un changement de phase Liquide/Vapeur. Celle-ci est exprimée en J/kg. Exemple : $L_{f \text{ eau}} = 330 \times 10^3 \text{ J/kg}$ signifie que la fusion, c'est-à-dire la fonte, de 1 kg de glace à la température (constante) de 0 °C nécessitera une énergie de 330000 joules soit 330 kJ [14].

III.2.2. Exemples et types de matériaux à changement de phase

Il existe de nombreux types de matériaux à changement de phase, de nature physico-chimique très différentes les uns des autres. Ce sont leurs caractéristiques de fusion-cristallisation qui les rendent intéressants pour le stockage de chaleur latente. Parmi ces matériaux, on distingue les 3 grandes familles suivantes [14] :

Les composés minéraux (ou inorganiques)

Parmi ces composés, seuls les sels hydratés présentent un intérêt pour leur utilisation en tant que MCP. Ils sont issus d'un alliage de sels organiques et d'eau. Ils ont l'avantage de posséder des grandes chaleurs latentes et des prix bas. En revanche, leur principal défaut concerne leur tendance à la surfusion [14].

Les composés organiques

De propriétés thermiques (chaleur latente et conductivité thermique en particulier) moindre que les sels hydratés, ceux-ci présentent l'avantage de n'être pas ou très peu concernés par la surfusion. On utilise en particulier, pour le stockage de chaleur latente, les paraffines et les acides gras qui appartiennent à cette famille [14].

Les composés eutectiques

Les eutectiques sont un mélange de sels possédant une température de fusion constante pour une valeur particulière de concentration. Ils peuvent être inorganiques et/ou organiques [14].

III.2.3. Applications des matériaux à changement de phase

L'utilisation des matériaux à changement de phase pour le contrôle thermique n'est pas un concept nouveau ; considérez la glacière utilisée pour stocker les aliments périssables avant que des systèmes de réfrigération active efficaces et peu coûteux ne soient développés. Ces dernières années, cependant, les efforts de recherche et de développement dans le domaine de la technologie MCP ont abouti à de nouvelles applications MCP, à la fois pour les environnements terrestres et spatiaux. Des études récentes indiquent que l'application la plus avantageuse des matériaux à changement de phase sera peut-être dans l'environnement spatial [15].

Dans la discussion suivante, les applications MCP sont divisées en deux catégories :

- (1) Les applications spatiales MCP.
- (2) Les applications terrestres MCP.

Les applications réelles et potentielles sont incluses et des exemples sont fournis [15].

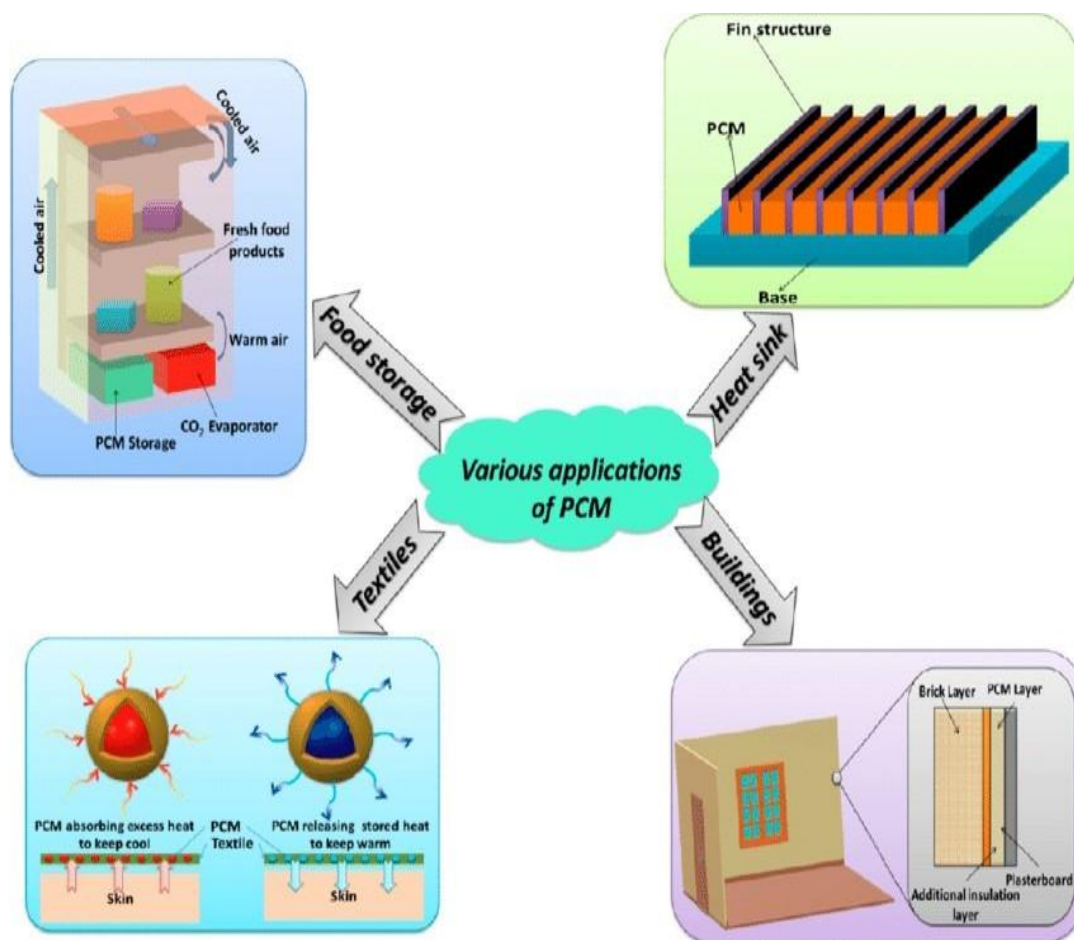


Figure III.2. Schémas représentant les différents domaines d'applications de MCP

III.2.3.1. Les applications spatiales MCP

L'utilisation du MCP dans les systèmes de contrôle thermique (TCS) et les systèmes de stockage d'énergie thermique (TES) dans l'environnement spatial a suscité un large intérêt ces dernières années. Les domaines généraux des applications spatiales MCP sont indiqués ci-dessous [15] :

- système de contrôle thermique des composants électroniques.
- dispositifs de stockage d'énergie thermique.
- appareils électriques.
- dispositifs expérimentaux.
- conteneurs de fret.
- condensateurs thermiques.
- contrôle thermique délicat des instruments.
- contrôle thermique des composants isolés thermiquement.

III.2.3.2. Les applications terrestres MCP

L'application terrestre des matériaux à changement de phase est bien connue dans des systèmes tels que les conteneurs portables réfrigérés, les glacières et coffres, les tasses à parois froides, etc. Cependant, d'autres applications MCP nouvelles ont été envisagées et certaines d'entre elles sont nommées ci-dessous [15] :

- contrôle thermique précis des instruments.
- Dispositifs de stockage d'énergie solaire.
- Contrôle thermique des composants d'aéronefs et de missiles.
- Autres Applications Terrestres Exotiques de MCP.

III.3. Propriétés thermo physiques des MCP :

La capacité unique des matériaux à changement de phase (MCP) à absorber et à libérer des grandes quantités de chaleur sans changement de température appréciable aura sans aucun doute de nombreuses ramifications dans les domaines du contrôle thermique des engins spatiaux et du stockage d'énergie. Bien que l'effort majeur à ce jour dans la technologie MCP se soit largement limité à des recherches théoriques et empiriques préliminaires, les systèmes de vol MCP réels prévus pour une utilisation sur le véhicule mobile lunaire et le Skylab

attestent de la praticité de la technique MCP. Pour l'ingénieur concepteur, cependant, il existe encore un grand écart entre les résultats de la recherche et les systèmes de vol réels [15].

III.3.1. Définition des propriétés de MCP :

Les définitions suivantes incluent les termes utilisés qui décrivent le comportement du MCP et les propriétés du MCP. Le but de ces définitions est de fournir au concepteur une référence pratique pour les termes utilisés dans la technologie MCP [15].

Amorphe : Sans forme définie ; pas cristallin. Les solides amorphes peuvent être considérés comme des liquides surfondus. Ils n'ont pas un point de fusion pointu comme un solide cristallin. Le verre est un solide amorphe typique [15].

Température d'auto-inflammation : La température à laquelle un matériau s'enflammera automatiquement et maintiendra la combustion en l'absence d'étincelle ou de flamme.

Calorie (cal) : La quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 gramme d'eau d'un degré Kelvin à 288 K. Elle équivaut à 0,00396 Btu ou 4,184 Joules [15].

Coefficient d'expansion de volume : Le rapport de la variation de volume par degré ° Kelvin au volume à 273 Kelvin [15].

Cristal : Un solide dans lequel les atomes ou les molécules sont disposés selon un motif répétitif régulièrement espacé. La plupart des solides cristallins sont constitués de millions de minuscules monocristaux appelés grains. A : n'importe quel monocristal, peu importe la taille d'un grain. Les cristaux d'une même substance présentent tous les mêmes structures géométriques ; les faces cristallines correspondantes ont les mêmes angles entre elles. Les cristaux varient considérablement, selon le type et la force des liaisons entre les atomes, les ions ou les molécules constitutifs. La structure cristalline a été utilisée comme base pour l'identification par rayons X, électron. Et les méthodes de diffraction des neutrons. Les cristaux peuvent être classés en types géométriques qui incluent : cubique simple, cubique à corps-c, cubique à faces centrées, tétraogonales, orthorhombiques, monocliniques, tricliniques et hexagonales [16, 17].

Inflammable : Propriété d'un matériau qui lui permet de s'oxyder rapidement et de libérer de la chaleur de combustion lorsqu'il est exposé à une flamme ou à un feu, et permet une combustion continue après que la source d'inflammation externe est retirée [18].

Point d'éclair : La température à laquelle un liquide ou une vapeur combustible s'enflamme et brûle. L'incendie qui s'ensuit est transitoire et auto-extinguible. Il existe plusieurs tests de point d'éclair communs et chacun donne une valeur différente pour la même substance.

Point de congélation : La température à laquelle un matériau se solidifie en refroidissant à partir d'un état fondu. Le point de congélation n'est pas toujours le même que le point de fusion [18].

Capacité calorifique à pression constante (Cp) : quantité de chaleur nécessaire pour élever une unité de masse de matériau homogène d'une unité de température avec une pression maintenue constante. La capacité calorifique est exprimée en énergie par unité de masse par unité de changement de température [18].

Hygroscopie : Propriété d'un matériau qui lui permet d'absorber et de retenir l'eau de l'air ambiant. Les propriétés d'un matériau peuvent être considérablement altérées par l'eau absorbée [18].

Point de fusion : La température à laquelle se produit la liquéfaction d'un solide. Les alliages et les matériaux impurs ont une plage de fusion. Le point de fusion n'est pas toujours le même que le point de congélation [18].

Agents oxydants : Généralement sources d'oxygène. Certains matériaux sont chimiquement constitués de telle sorte qu'ils puissent fournir de l'oxygène à une réaction, même en l'absence d'air [18].

Changement de phase : le changement d'un matériau dans un état physiquement distinct et mécaniquement séparable (comme un état solide défini) en une autre forme distincte (comme un liquide), les changements de phase se composent de quatre types : solide-solide, solide-vapeur, solide-liquide et liquide-vapeur [18].

Nombre de Prandtl (Npr) : Le rapport de la viscosité dynamique du fluide μ d'un liquide au quotient de sa conductivité thermique k et de sa capacité calorifique C_p .

$$N_{pr} = \frac{\mu}{\frac{k}{C_p}} \quad (III.1)$$

Cette propriété influence la capacité de convection de chaleur d'un fluide. Les fluides tels que les métaux liquides ont de faibles nombres de Prandtl (Npr) et sont efficaces pour les applications de transfert de chaleur par convection [18].

Nombre de Rayleigh (R) : Le rapport de la force de gravité à la force visqueuse. Le nombre de Rayleigh est défini comme [18] :

$$R = \frac{g \cdot B \cdot \frac{dT}{dY} \cdot d^4}{V \cdot \alpha} \quad (III.2)$$

Surfusion : Le processus de refroidissement d'un liquide en dessous de la température d'équilibre solide-liquide sans aucune formation de la phase solide. La surfusion lorsqu'une seule phase est présente est appelée surfusion à une phase. La surfusion en présence à la fois de solide et de liquide est une surfusion à deux phases. La quantité de surfusion dépend du matériau particulier et de l'environnement qui l'entoure.

La meilleure façon de réduire la surfusion est de s'assurer que tout le matériau cristallin d'origine fond net. Les germes cristallins présents dans la masse fondue ont tendance à énucléer la phase solide lorsque la chaleur est retirée. Des catalyseurs de nucléation sont disponibles pour certains matériaux [19].

III.3.2. Performance MCP souhaitables :

Il n'y a pas de matériau MCP parfait car aucun matériau n'a toutes les propriétés souhaitables au degré qui serait idéal. Un MCP est censé fournir un contrôle isotherme pour une mélodie spécifiée dans une application particulière. De toute évidence, des compromis existent dans la sélection du MCP le plus idéal pour une application sélectionnée [15].

Les propriétés souvent inacceptables des MCP peuvent être corrigées. Par exemple, des charges métalliques peuvent être utilisées pour augmenter la conductivité thermique des MCP peu conducteurs. Des catalyseurs de nucléation peuvent être trouvés pour les matériaux qui se refroidissent pour surmonter ce problème assez courant. Les changements de volume peuvent être compensés de plusieurs manières ingénieuses. Si les limitations d'espace sont plus importantes que le poids, un MCP métallique peut fournir la même chaleur de fusion sur une base volumique que presque n'importe quel MCP, et a l'avantage d'une conductivité thermique élevée [15].

En général, le MCP idéal aurait les caractéristiques suivantes :

- Chaleur de fusion élevée : Cette propriété définit l'énergie disponible et peut être importante en poids ou en volume. Certains MCP sont attrayants de toute façon.
- Transition solide-liquide réversible : la composition des phases solide et liquide doit être la même.
- Conductivité thermique élevée : Cette propriété est nécessaire pour éviter les gradients thermiques. Les charges sont utilisées pour améliorer les performances du système.
- Chaleur et densité spécifiques élevées.
- Fiabilité à long terme lors de cycles répétés.

- Comportement de congélation fiable.
- Changement de volume faible pendant la transition de phase.
- Basse pression de vapeur.

III.3. Le stockage d'énergie par chaleur latente dans les MCP

III.3.1. Principe

Le stockage par chaleur latente est une solution de stockage thermique qui exploite la chaleur latente d'un Matériau à Changement de Phase (MCP), autrement dit sa capacité à passer de l'état solide à l'état liquide (fusion) sous l'effet de la chaleur [20].

L'énergie de changement de phase est absorbée lors de la fusion du MCP et est restituée lors de sa solidification. Cette solution nécessite l'utilisation d'un fluide caloporteur pour transférer la chaleur de la source à l'unité de stockage. Le MCP subissant des cycles de fusion/solidification, il ne peut être utilisé directement comme fluide de transfert. Les technologies de transfert de chaleur sont diverses : échangeur tubes ailettes, échangeur multitubes, encapsulation du MCP [20].

Les schémas suivants expliquent les cycles de stockage et de décharge de l'énergie [20] :

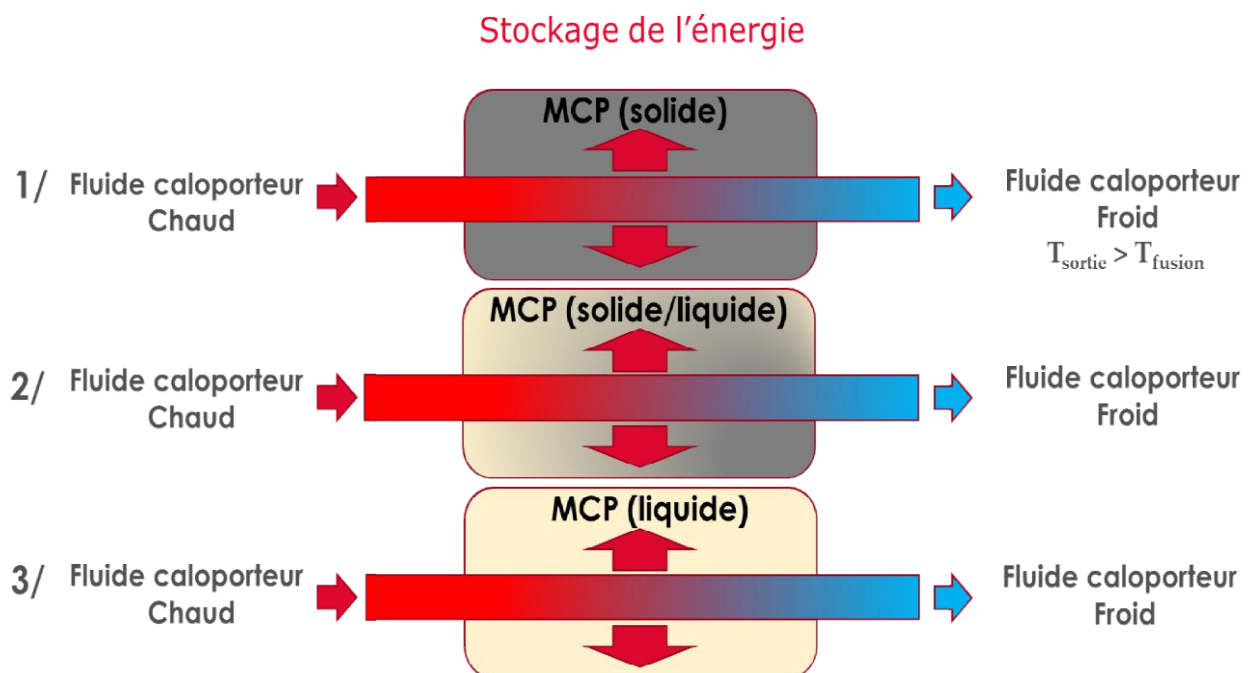


Figure III.3. Illustration de stockage d'énergie par le MCP

Stockage de l'énergie

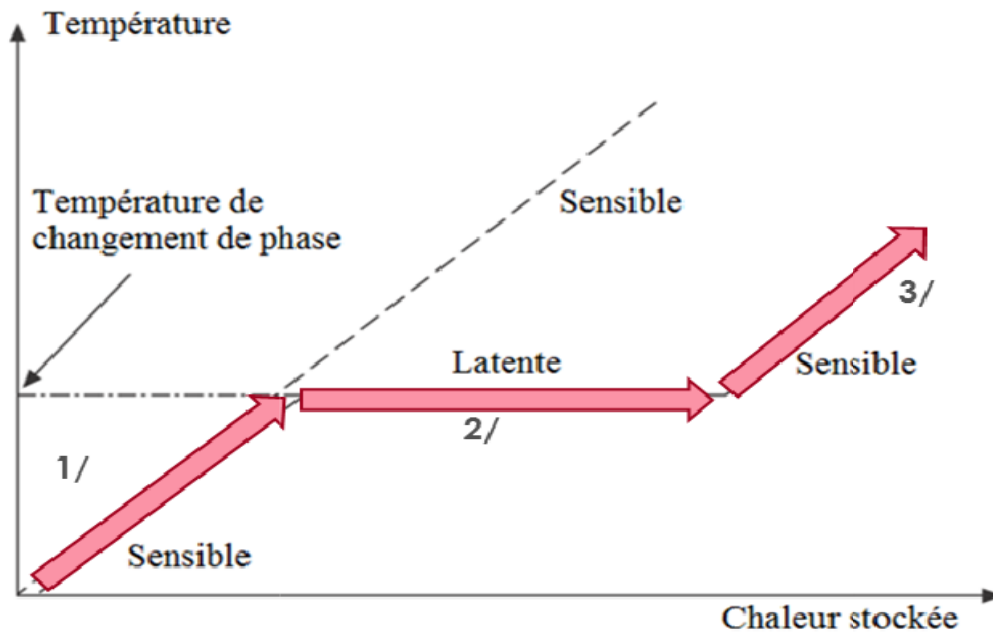


Figure III.4. Représentation graphique de stockage d'énergie par le MCP

Décharge de l'énergie

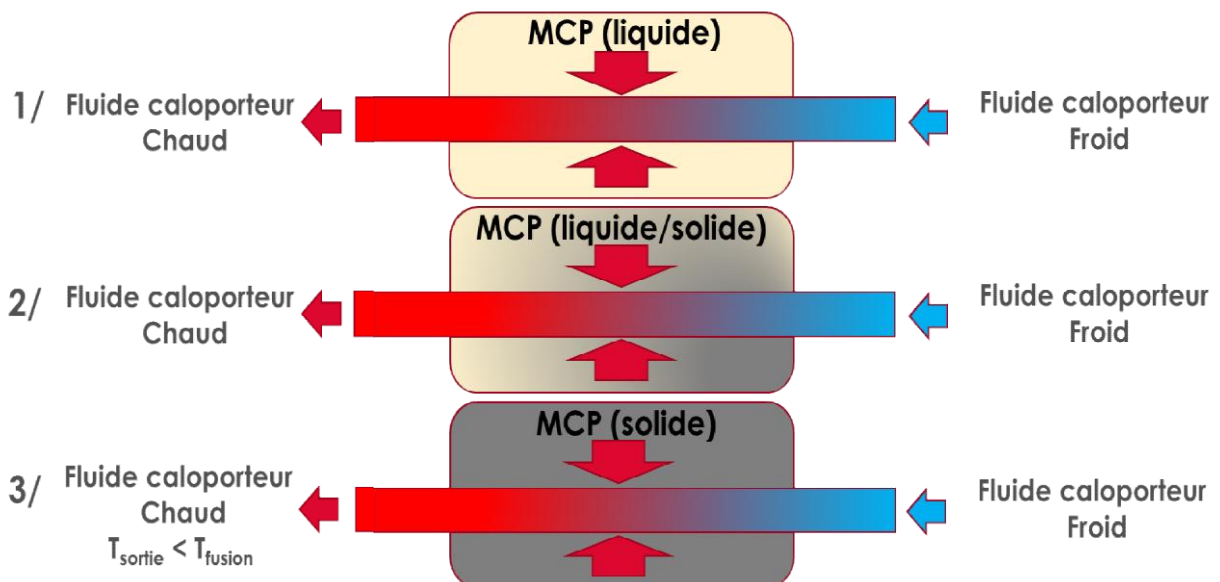


Figure III.5. Illustration de décharge de l'énergie par le MCP

Décharge de l'énergie

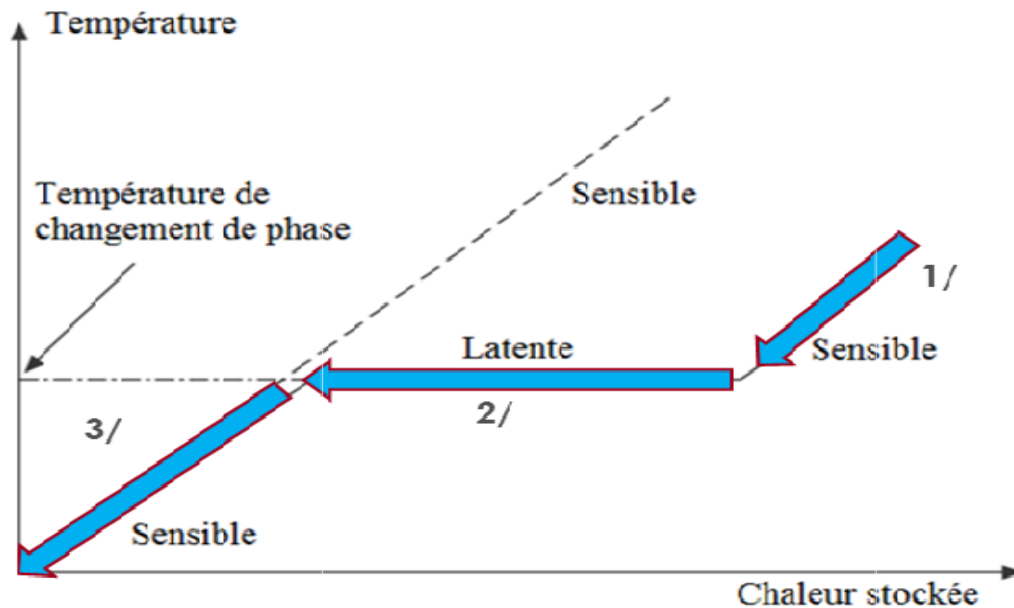


Figure III.6. Représentation graphique déchargement de l'énergie par le MCP

Lorsqu'un fluide chaud entre en contact (indirect) avec le MCP, le MCP passe de l'état solide à l'état liquide (fusion) captant la chaleur du fluide. A l'inverse si le fluide est froid, le MCP en se solidifiant restitue sa chaleur au fluide caloporteur [20].

Pour des applications industrielles dont la température de stockage est supérieure à 100-150°C, ce sont principalement les paraffines, les acides gras et des sels hydratés qui sont considérés. Les enthalpies de fusion de ces composés varient de 150 à 600 KJ/L [20].

III.4.2. Performances

La densité énergétique des MCP (en KWh/m³) est plus élevée que celle des systèmes de stockage par chaleur sensible, ce qui confère aux systèmes de stockage par chaleur latente une plus grande compacité et des pertes thermiques moindres [20].

Une des principales contraintes des MCP est sa faible conductivité thermique ($\lambda \ll 0,5$ W/m.K), limitant les vitesses de charge et de décharge et imposant de grandes surfaces d'échange [20].

Le tableau suivant compare les différents systèmes de stockage applicables à la récupération de chaleur fatale industrielle : stockage par chaleur sensible, par chaleur latente, et le stockage thermochimique [20].

III.4.3. Avantages :

- Pallie le décalage entre la production de chaleur fatale (récupération d'énergie) et les besoins en chaleur sur le site (utilisation de l'énergie récupérée) [20].
- Densité énergétique importante par rapport au stockage sensible.
- Température de décharge stable.
- Chimiquement stable.
- Non toxique.

III.4.4. Inconvénients :

- Faible conductivité thermique ($\lambda \ll 0,5 \text{ W/m.K}$) limitant les vitesses de charge et de décharge et imposant de grandes surfaces d'échange [20].
- Durée de stockage limitée (pertes thermiques).
- Température de fusion limitée.
- Coûts relativement importants comparés au stockage sensible.

III.4.5. Applications :

Le stockage thermique par les MCP peut être utilisé dans diverses applications et industries [20] :

- Stockage de chaleur issue de la récupération de chaleur fatale.
- Stockage de chaleur produite par du solaire thermique.
- Stockage sur un réseau de chaleur (en développement).
- Stockage de froid (réfrigération et transport des produits agro-alimentaires ou pharmaceutiques par exemple).
- Stockage de frais pour la climatisation.

III.4. Incorporation des MCP dans le bâtiment**III.4.1. Approche générale :**

Les MCP ont été testés en tant que composant de masse thermique dans les bâtiments au cours des 50 dernières années, et la plupart des études ont montré que les MCP améliorent les performances énergétiques des bâtiments. Certains problèmes, cependant, tels que le coût

initial élevé, la perte de capacité de changement de phase, la corrosivité (dans le cas de certains MCP inorganiques) et les fuites de MCP ont entravé l'adoption généralisée. Les MCP aux hydrocarbures paraffiniques fonctionnent généralement bien, mais ils augmentent l'inflammabilité de l'enveloppe du bâtiment [21].

Pour ces raisons, une plus grande attention est accordée aux MCP à base d'acides gras ou d'hydrates de sels inorganiques.

Une classification générale des matériaux à changement de phase dans les applications de construction peut être répertoriée comme suit :

- Stratégies passives de chauffage/refroidissement avec MCP.
- MCP intégrés à la structure du bâtiment (mur, plafond et sol) : micro-encapsulation.
- MCP dans les composants du bâtiment (par exemple, élément de façade, systèmes vitrés) – macro-encapsulation/micro-encapsulation.
- Stratégies actives de chauffage/refroidissement avec MCP.
- MCP dans des dispositifs de stockage à chaud et à froid séparés—macro-encapsulation/micro-encapsulation.

L'incorporation du MCP dans la structure et les composants du bâtiment représente des systèmes passifs qui libèrent automatiquement la chaleur stockée lorsque les températures intérieures ou extérieures tombent en dessous du point de fusion du MCP. Seuls les MCP qui ont une température de transition de phase proche de la température de confort thermique peuvent être utilisés dans des applications de bâtiment en tant que système passif. La plage de température à cet effet est de 21 à 29 °C.

III.5.2. Le but d'incorporation de MCP dans le secteur bâtiment :

Sur la base de ce qui précède, l'importance de ce MCP qui se reflète dans la contribution au développement de composants de construction sensibles au climat basés sur le stockage d'énergie dans le but de réduire la demande d'énergie des bâtiments et ainsi de préserver les combustibles fossiles. C'est aussi une contribution au développement et à l'application de nouvelles technologies ; par conséquent, c'est une bonne référence pour les architectes, les ingénieurs, les chercheurs, les académiciens et les étudiants [22].

IV.1. La description du problème :

Ce travail est basé sur six configurations de murs d'un bâtiment multicouche où je modifie les positions de la couche de matériau à changement de phase (MCP). Des investigations ont été menées pour trois propositions MCP sur cinq configurations (voir la figure (IV.1)).

A travers l'utilisation de logiciel de simulation ANSYS et par application de la méthode de simulation numérique de la conduction de la chaleur à trois dimensions, c'est à dire dans un, la méthode des volumes finis avec un maillage structuré mur de bâtiment multicouche.

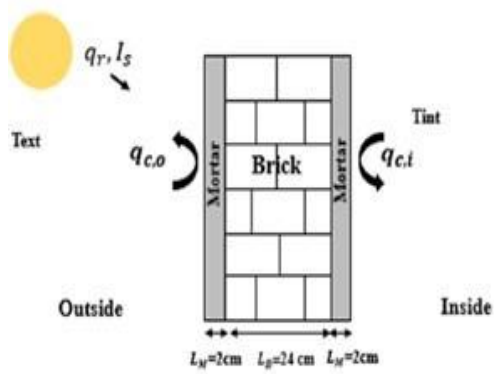
L'objectif de travail est fait une étude numérique de la performance thermique des murs avec l'intégration d'un matériau à changement de phase (MCP), puis changer le matériau à changement de phase et connaître leur effet sur la répartition de la température et puis effet de la position des matériaux à changement de phase (MCP) sur la répartition de la température dans le mur multicouche en générale.

IV.2. Les hypothèses de travail :

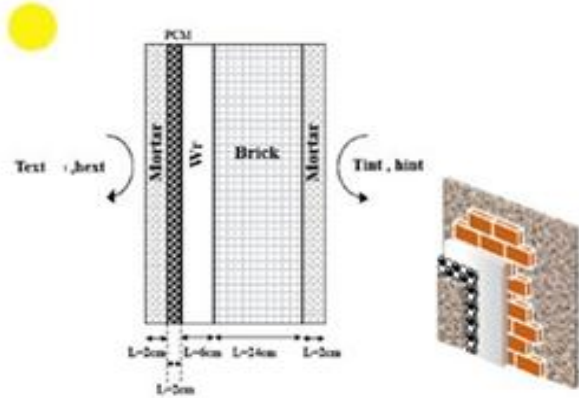
Il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses afin d'établir un modèle mathématique simple qui décrit la physique de ce problème.

Les hypothèses utilisées souvent dans l'étude de la distribution de la température dans un mur bâtiment incorporé de MCP sont :

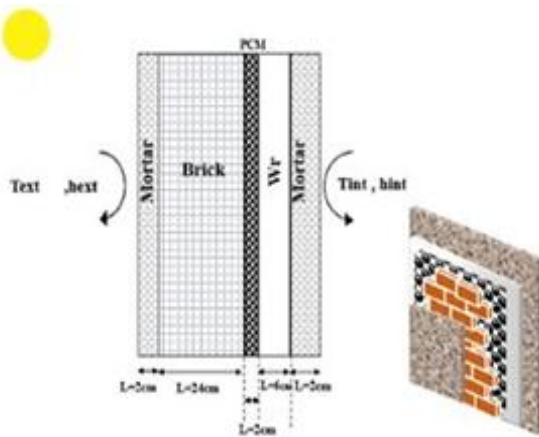
- Le régime stationnaire $\partial/\partial t = 0$.
- Le contact entre les matériaux et MCP dans les composants de mur est parfait.
- La simulation numérique en 3 dimensions (3D).
- Le maillage est structuré pour les six cas étudié.
- Le transfert de chaleur par convection et rayonnement n'est pas négligeable.
- Les conditions météorologiques et climatiques utilisées dans cette étude numérique sont les conditions estivales moyennes d'août dans l'après-midi à 13 heures exactement et avec une température ambiante extérieure de 33°C selon la source [23].



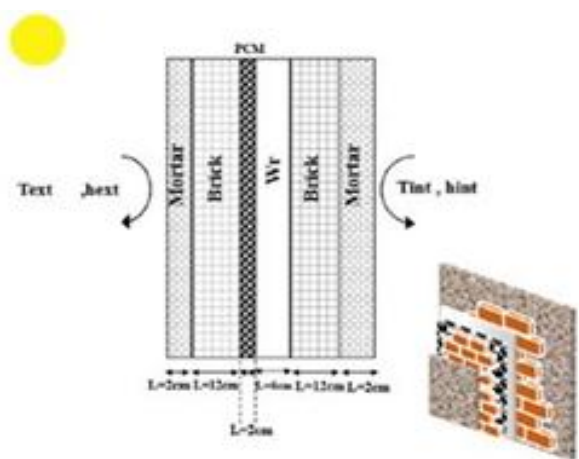
Configuration 01 (cas référence)



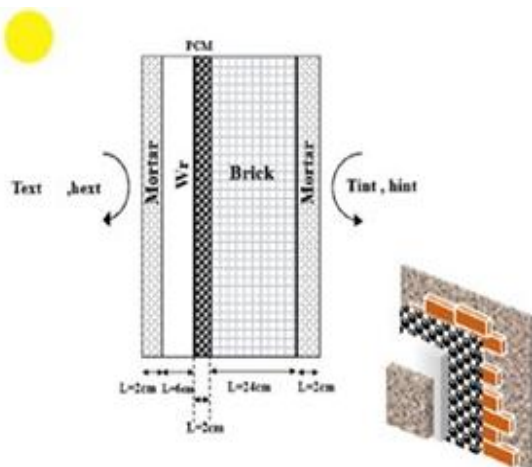
Configuration 02



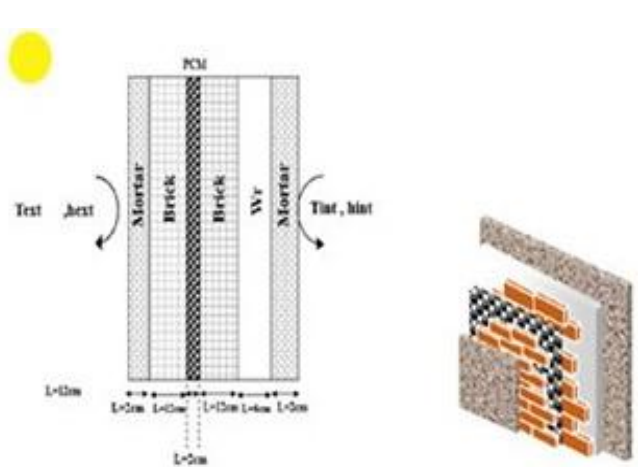
Configuration 03



Configuration 04



06



on 05

Configuration

Figure IV.1: Les géométries de calcul présenté par six configurations [26]

IV.3. Les conditions aux limites:

La couche extérieur ($x = 0$) de la paroi multicouche est exposé au transfert de chaleur par convection, à l'échange de rayonnement. (Figure IV.1) l'équation devient [24] :

$$k_i \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h_{\text{ext}} (T_{\infty 1} - T_A) + q_I + q_r \quad (\text{IV.1})$$

Les échange radiatifs et convectifs sont définis comme suit [24] :

$$q_{\text{con-ext}} = h_{\text{ext}}(T_{\infty} - T_A) \quad (\text{IV.2})$$

Ainsi qu'au rayonnement solaire (I_S) [25] :

$$I_S = 500 e^{-0,8 \left(\frac{t^{-12}}{800} \right)^2} \quad (\text{IV.3})$$

$$q_I = \alpha_S I_S \quad (\text{IV.4})$$

$$q_r = \sigma \varepsilon (T_{\text{Sky}}^4 - T_A^4) \quad (\text{IV.5})$$

$$T_{\text{Sky}}^4 = 0,0552 T_{\infty 1}^{1,5} \quad (\text{IV.6})$$

Le coefficient de convection externe est calculé à partir de ce qui précède corrélation.

D'après l'utilisation de donnée météorologique de la zone étudiée, l'expression de la vitesse du vent a également été définie.

Ainsi, le coefficient de convection externe est calculé comme suit [27] :

$$h_{\text{ext}} = \begin{cases} 6 + 4V & \text{si } V \leq 5 \text{ m/s} \\ 7 V^{0,78} & \text{si } V > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

Comme la couche intérieur ($x = L$) est exposée à l'environnement convectif, les conditions aux limites sont données comme suit [24] :

$$k_i \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h_{\text{int}} (T_{\infty 2} - T_B) \quad (\text{IV.8})$$

Ainsi, le coefficient de convection interne est calculé comme suit [28] :

$$h_{\text{int}} = \frac{1,823}{D_h^{0,121}} (T_B - T_{\infty 2}) \quad ; \text{ Avec : } D_h = \frac{4s}{p} \quad (\text{IV.9})$$

Pour les conditions aux limites d'entrée de ce problème on a :

- La convection extérieure entre la façade externe de ciment et l'air.

Avec les données suivant : $T_{\text{ext}}=33^{\circ}\text{C}$ et $h_{\text{ext}} = 26 \text{ W/m}^2.\text{K}$

- Le rayonnement solaire qui est imposé sur la façade extérieure de ciment.

Avec les données suivant : $T_{\text{amb}}=33^{\circ}\text{C}$ et émissivité $\varepsilon =0,7$

- La convection interne entre la façade interne de ciment et l'air du local.

Avec les données suivant : $T_{\text{int}}=20^{\circ}\text{C}$ et $h_{\text{int}}=7,692 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

MCP	masse volumique (kg/m³)	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Température de fusion (°C)
Gypsum	870	0,8	1800	\
Cacl₂.Ch₂O	1710	1,09	$1,4.10^3$	29,9
OM 35	900	0,2	$2,31.10^3$	35

Tableau IV.1 : caractéristiques thermique pour chaque sélection MCP [29]

Matériaux de construction du mur	Conductivité thermique (W/m.K)	masse volumique (kg/m³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)
Ciment	1,3	1900	1000
Brique	0,4	920	1000
Isolant textile	0,03476	8,153	1200

Tableau IV.2 : caractéristiques thermique pour chaque matériaux de construction de mur [27]

IV.4. Résultats et discussions :

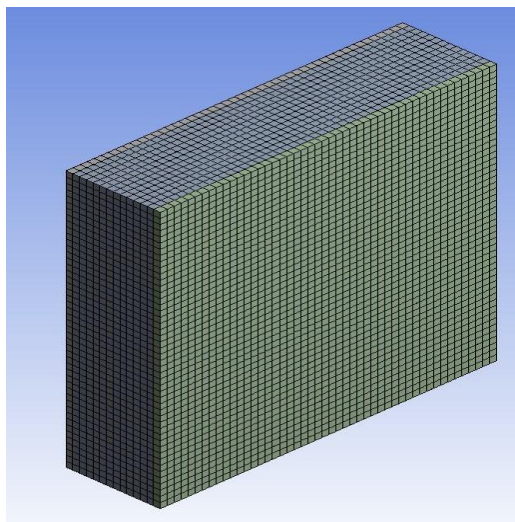
1^{ère} configuration (Cas référence) :

Composition de la 1^{ère} configuration

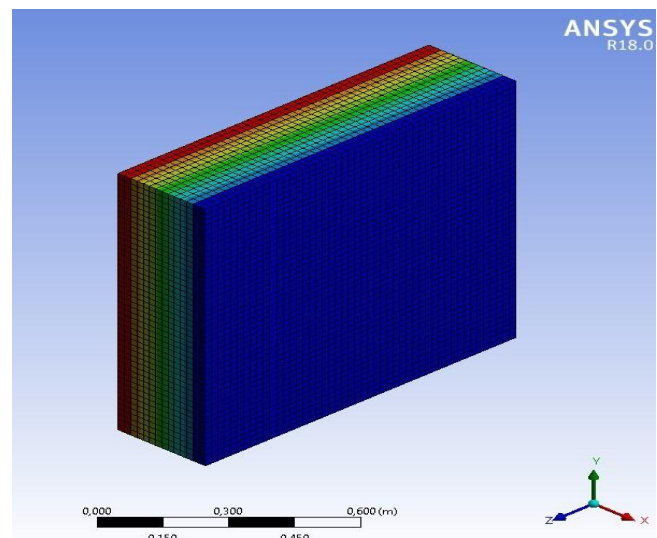
On distingue que le mur de construction est composé de deux genre de matériaux (ciment et la brique) et avec trois couche (ciment externe, la brique au milieu et ciment interne).

Discussion de la 1^{ère} configuration

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,464^{\circ}\text{C}$ après il aura une petite différence de température dans la sortie du ciment externe dont $T_{cs, ext}=32,073^{\circ}\text{C}$ et puis elle commence à chuter rapidement lorsqu'elle est au niveau de brique jusqu'au $T_{bs}=22,423^{\circ}\text{C}$ car ce dernier à un coefficient de conductivité moins élevée par rapport au ciment, et par suite en obtient la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=22,129^{\circ}\text{C}$.



(a)



(b)

Figure IV.2 : Représentation de maillage (a) et la distribution de la température (b) du cas référence

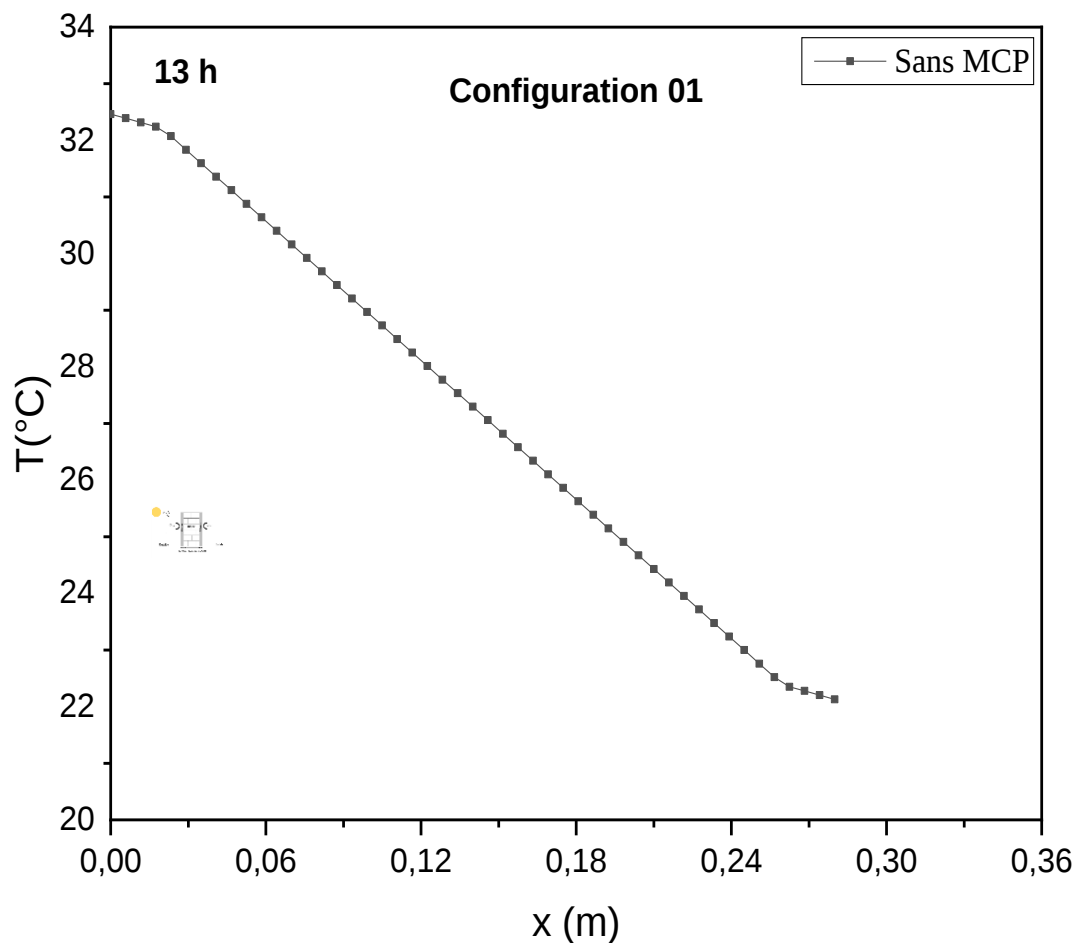


Figure IV.3 : Représentation graphique de profil de température du cas référence

2^{ème} configuration :

Composition de la 2^{ème} configuration

On distingue que le mur de construction de 2^{ème} configuration est composé de quatre genre de matériaux (ciment, MCP, isolant textile et la brique) et avec cinq couche de construction de mur (ciment externe et interne, MCP, isolant textile et la brique) respectivement.

Discussion de la 2^{ème} configuration

a) Pour le Gypsum :

Dans l'entrée de ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,833^{\circ}\text{C}$ et après elle commence à se dégrader lorsqu'elle est au niveau de MCP jusqu'au $T_{MCP,s}=32,391^{\circ}\text{C}$ et puis elle va chuter rapidement lorsqu'on entre dans l'isolant textile jusqu'à $T_{it,s}=24,032^{\circ}\text{C}$ car il possède un faible coefficient d'échange thermique ,ensuite dans la sortie de couche de brique

il y aura une petite variation de température dans $T_{bs}=20,757\text{ }^{\circ}\text{C}$ car ce dernier a un coefficient de conductivité plus élevée par rapport au isolation de textile et finalement en obtient la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,664\text{ }^{\circ}\text{C}$.

b) Pour le $\text{CaCl}_2\cdot\text{CH}_2\text{O}$:

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,832^{\circ}\text{C}$ et après elle commence à se dégrader lorsqu'elle est au niveau de MCP jusqu'au $T_{MCP,s}=32,421^{\circ}\text{C}$ et puis elle va chuté rapidement lorsqu'on entre dans l'isolant textile jusqu'à $T_{it,s}=24,043^{\circ}\text{C}$ car il possède un faible coefficient d'échange thermique ,ensuite dans la sortie de couche de brique il y aura une petite variation de température dans $T_{bs}= 20,759^{\circ}\text{C}$ car ce dernier a un coefficient de conductivité plus élevée par rapport au isolation de textile, et finalement en obtient la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,666^{\circ}\text{C}$.

c) Pour le OM 35 :

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,838^{\circ}\text{C}$ et après elle commence à se dégrader lorsqu'elle est au niveau de MCP jusqu'au $T_{MCP,s}=32,068^{\circ}\text{C}$ et puis elle va chuter rapidement lorsqu'on entre dans l'isolant textile jusqu'à $T_{it,s}=23,916^{\circ}\text{C}$ car il possède un faible coefficient d'échange thermique ,ensuite dans la sortie de couche de brique il y aura une petite variation de température dans $T_{bs}= 20,757^{\circ}\text{C}$ car ce dernier a un coefficient de conductivité plus élevée par rapport au isolation de textile, et finalement en obtient la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,645^{\circ}\text{C}$.

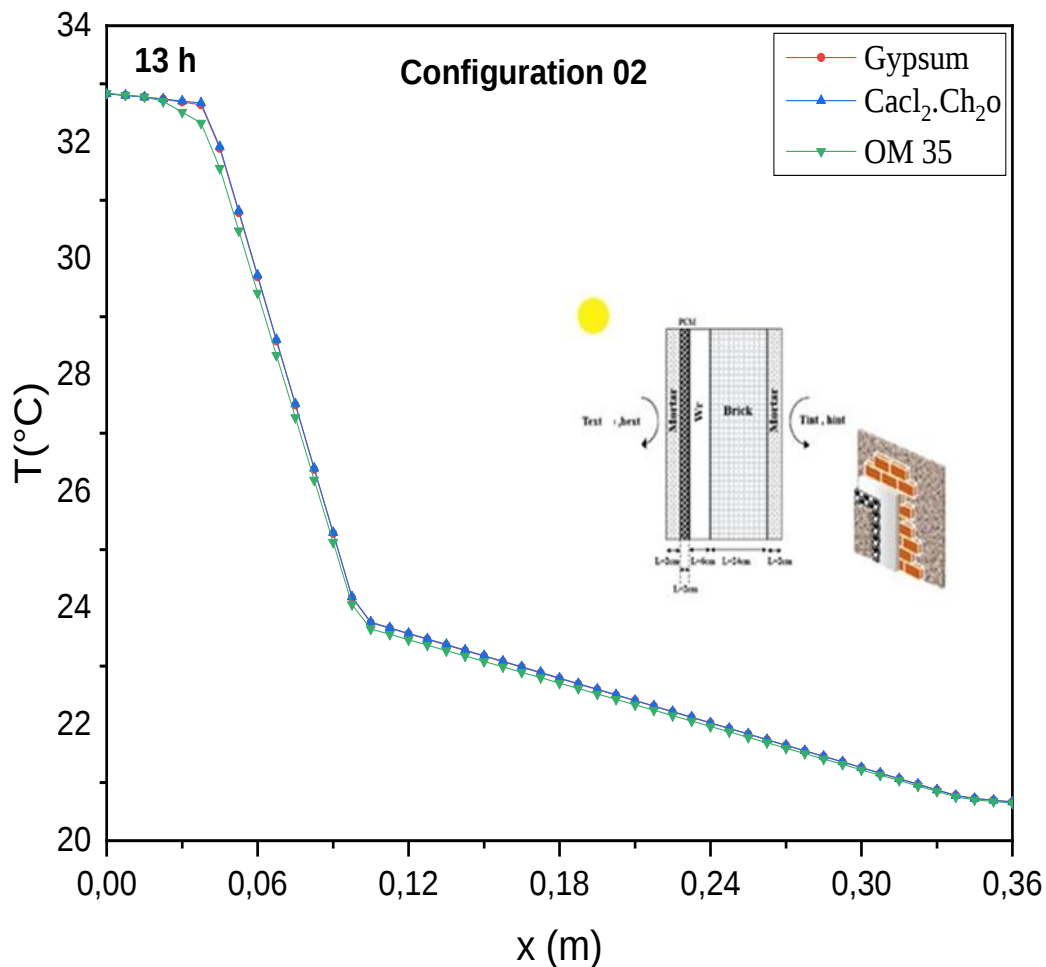


Figure IV.4 : Représentation graphique de profil de température de la 2^{ème} configuration

3^{ème} configuration :

Composition de 3^{ème} configuration

On distingue que le mur de construction de 3^{ème} configuration est composé de quatre genre de matériaux (ciment, brique, MCP, et l'isolant textile) et avec cinq couche de construction de mur (ciment externe et interne, brique, MCP et l'isolant textile) respectivement.

Discussion de la 3^{ème} configuration

a) Pour le Gypsum :

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,833^{\circ}\text{C}$ après il n'aura pas un changement remarquable et puis elle commence à se dégrader lentement lorsqu'elle est au

niveau de brique jusqu'au $T_{bs}=29,699^{\circ}\text{C}$ et puis il va y avoir une dégradation de température au niveau de MCP dont la température de la sortie $T_{MCP,s}=29,326^{\circ}\text{C}$ et puis elle va chuter rapidement lorsqu'on entre dans l'isolant textile jusqu'au $T_{it,s}=20,982^{\circ}\text{C}$ car il possède un faible coefficient d'échange thermique, et finalement en obtient la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,664^{\circ}\text{C}$.

b) Pour le $\text{Cacl}_2.\text{Ch}_2\text{o}$:

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,832^{\circ}\text{C}$ après il n'aura pas un changement remarquable et puis elle commence à se dégrader lentement lorsqu'elle est au niveau de brique jusqu'au $T_{bs}=29,693^{\circ}\text{C}$ et puis il va y avoir une dégradation de température au niveau de MCP dont la température de la sortie $T_{MCP,s}=29,347^{\circ}\text{C}$ puis elle va chuter rapidement lorsqu'on entre dans l'isolant textile jusqu'au $T_{it,s}=20,984^{\circ}\text{C}$ car il possède un faible coefficient d'échange thermique, et finalement en obtient la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,666^{\circ}\text{C}$.

c) Pour le OM 35 :

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,838^{\circ}\text{C}$ après il n'aura pas un changement remarquable et puis elle commence à se dégrader lentement lorsqu'elle est au niveau de brique jusqu'au $T_{bs}=29,763^{\circ}\text{C}$ et puis il va y avoir une dégradation de température au niveau de MCP dont la température de la sortie $T_{MCP,s}=29,09^{\circ}\text{C}$ puis elle va chuter rapidement lorsqu'on entre dans l'isolant textile jusqu'au $T_{it,s}=20,953^{\circ}\text{C}$ car il possède un faible coefficient d'échange thermique, et finalement en obtient la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,645^{\circ}\text{C}$.

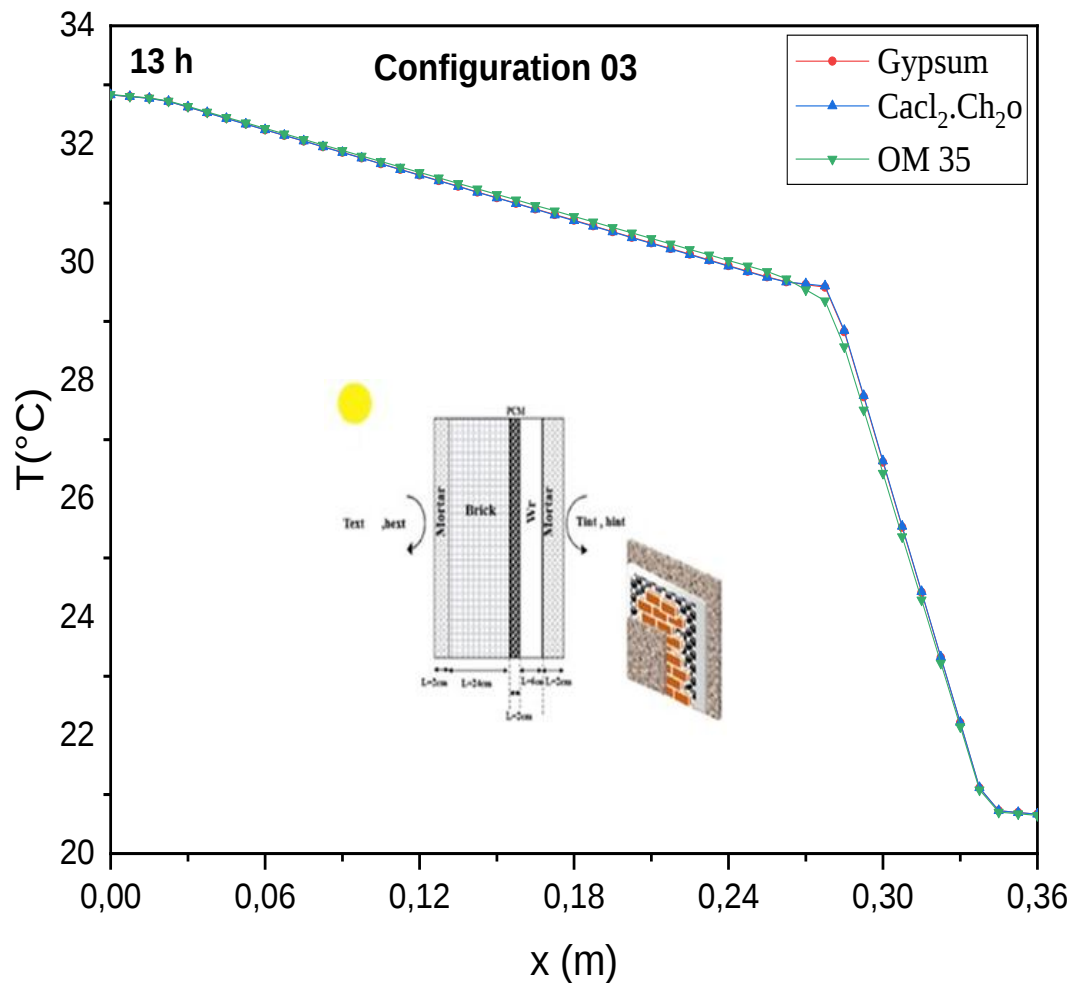


Figure IV.5 : Représentation graphique de profil de température de la 3^{ème} configuration

4^{ème} configuration :

Composition de la 4^{ème} configuration

On distingue que le mur de construction de la 4^{ème} configuration est composé de quatre genre de matériaux (ciment, brique, MCP et l'isolant textile) et avec six couche de mur de construction (du ciment externe et interne, brique01, MCP, isolant textile et de la brique 02) respectivement.

Discussion de la 4^{ème} configuration

a) Pour le Gypsum :

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,833^{\circ}\text{C}$ après il n'aura pas

un changement remarquable et puis elle commence à se dégrader lentement en passant par la première couche de brique dont la sortie $T_{b1,s}=31,232^{\circ}\text{C}$ et par suite le MCP va engendrer une petite différence de température jusqu'au $T_{MCP,s}=30,859^{\circ}\text{C}$ et après l'isolant textile qui va chuter la température rapidement jusqu'aux $T_{it,s}=22,479^{\circ}\text{C}$ et par suite la température continuée de dégrader dans la deuxième couche de brique jusqu'au $T_{b2,s}=20,757^{\circ}\text{C}$, et finalement on obtient la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,664^{\circ}\text{C}$.

b) Pour le $\text{CaCl}_2\cdot\text{CH}_2\text{O}$:

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,832^{\circ}\text{C}$ après il n'aura pas un changement remarquable et puis elle commence à se dégrader lentement en passant par la première couche de brique dont la sortie $T_{b1,s}=31,230^{\circ}\text{C}$ et par suite le MCP va engendrer une petite différence de température jusqu'au $T_{MCP,s}=30,884^{\circ}\text{C}$ et après l'isolant textile qui va chuter la température rapidement jusqu'aux $T_{it,s}=22,506^{\circ}\text{C}$ et par suite la température continuée de dégrader dans la deuxième couche de brique jusqu'au $T_{b2,s}=20,76^{\circ}\text{C}$, et finalement on obtient la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,666^{\circ}\text{C}$.

c) Pour le OM 35 :

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,838^{\circ}\text{C}$ après il n'aura pas un changement remarquable et puis elle commence à se dégrader lentement en passant par la première couche de brique dont la sortie $T_{b1,s}=31,251^{\circ}\text{C}$ et par suite le MCP va engendrer une petite différence de température jusqu'au $T_{MCP,s}=30,58^{\circ}\text{C}$ et après l'isolant textile qui va chuter la température rapidement jusqu'aux $T_{it,s}=22,428^{\circ}\text{C}$ et par suite la température continuée de dégrader dans la deuxième couche de brique jusqu'au $T_{b2,s}=20,736^{\circ}\text{C}$, et finalement on obtient la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,645^{\circ}\text{C}$.

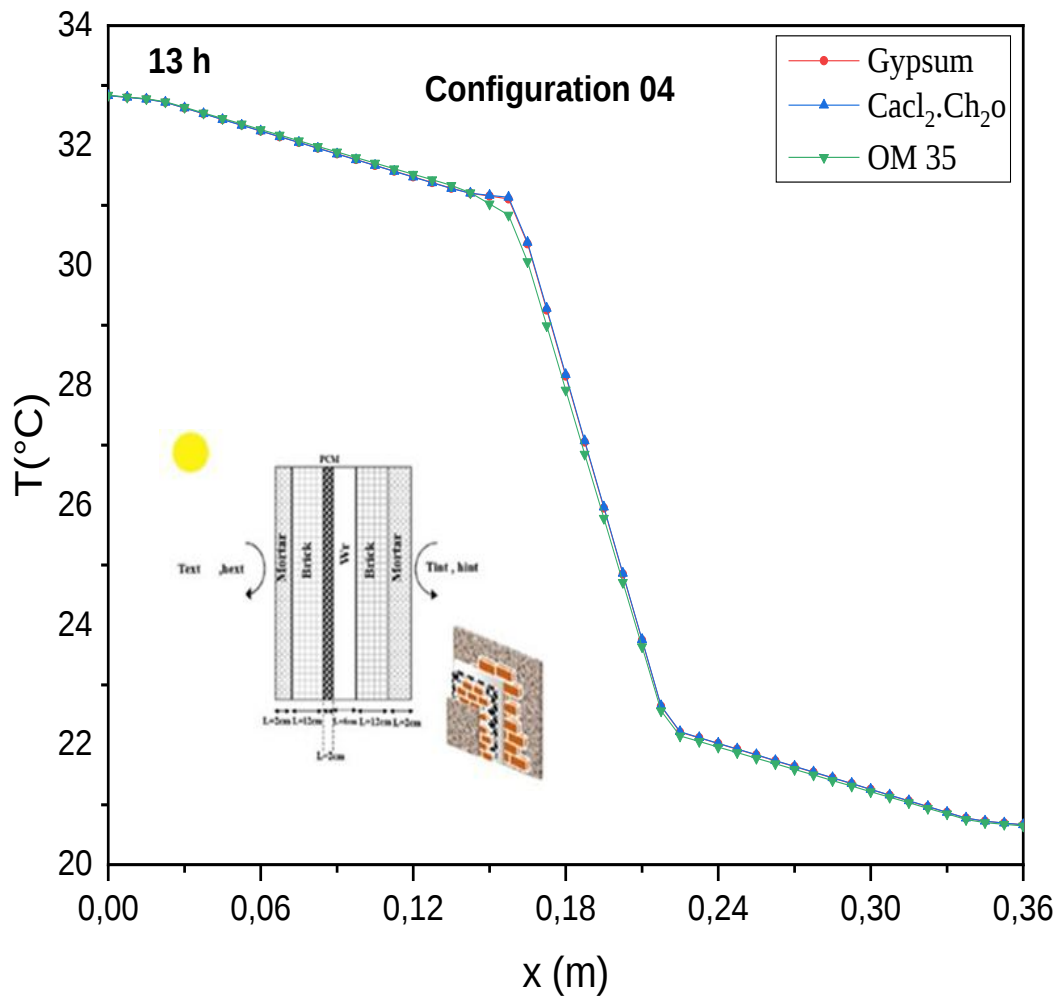


Figure IV.6: Représentation graphique de profil de température de la 4^{ème} configuration

5^{ème} configuration :

Composition de la 5^{ème} configuration

On distingue que le mur de construction de la 5^{ème} configuration est composé de quatre genre de matériaux (ciment, isolant textile, MCP et de la brique) et il est composé de cinq couche (du ciment externe et interne, isolant textile, MCP et du brique) respectivement.

Discussion de la 5^{ème} configuration

a) Pour le Gypsum :

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,833^{\circ}\text{C}$ après il n'aura pas un changement remarquable et après lorsqu'on est incluse dans l'isolant textile la température

va chuter rapidement jusqu'au $T_{it,s}=24,17^{\circ}\text{C}$ et puis dans le domaine MCP il y aura une petite différence de température jusqu'au $T_{MCP,s}=23,797^{\circ}\text{C}$ parce que sa conductivité thermique elle est plus importante par rapport au l'isolant textile et puis dans la couche de brique on voit que la température va dégrader lentement dont la sortie $T_{bs}=20,758^{\circ}\text{C}$ et en passant aussi par le ciment interne jusqu'au en obtenir la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,664^{\circ}\text{C}$.

b) Pour le $\text{CaCl}_2\cdot\text{CH}_2\text{O}$:

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,832^{\circ}\text{C}$ après il n'aura pas un changement remarquable et après lorsqu'on est incluse dans l'isolant textile la température va chuter rapidement jusqu'au $T_{it,s}=24,15^{\circ}\text{C}$ et puis dans le domaine MCP il y aura une petite différence de température jusqu'au $T_{MCP,s}=23,805^{\circ}\text{C}$ parce que sa conductivité thermique elle est plus importante par rapport au l'isolant textile et puis dans la couche de brique on voit que la température va dégrader lentement dont la sortie $T_{bs}=20,76^{\circ}\text{C}$ et en passant aussi par le ciment interne jusqu'au en obtenir la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,666^{\circ}\text{C}$.

c) Pour le OM 35 :

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,838^{\circ}\text{C}$ après il n'aura pas un changement remarquable et après lorsqu'on est incluse dans l'isolant textile la température va chuter rapidement jusqu'au $T_{it,s}=24,394^{\circ}\text{C}$ et puis dans le domaine MCP il y aura une petite différence de température jusqu'au $T_{MCP,s}=23,72^{\circ}\text{C}$ parce que sa conductivité thermique elle est plus importante par rapport au l'isolant textile et puis dans la couche de brique on voit que la température va dégrader lentement dont la sortie $T_{bs}=20,736^{\circ}\text{C}$ et en passant aussi par le ciment interne jusqu'au en obtenir la température inférieure dans la sortie de ciment interne à $T_{cs}=20,645^{\circ}\text{C}$.

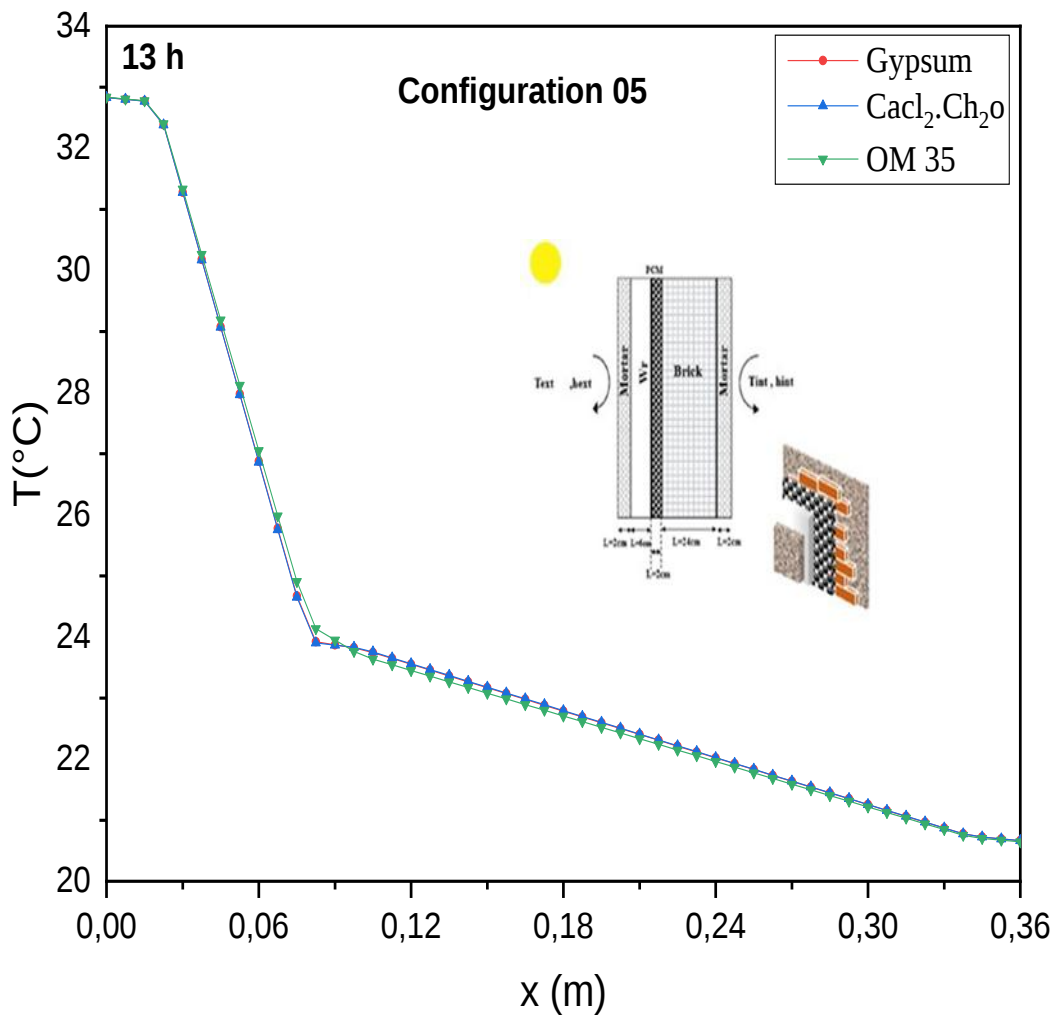


Figure IV.7: Représentation graphique de profil de température de la 5^{ème} configuration

6^{ème} configuration :

Composition de la 6^{ème} configuration

On distingue que le mur de construction de la 6^{ème} configuration est composé de quatre genre de matériaux (ciment, brique, MCP et l'isolant textile) et avec six couche de construction (du ciment externe et interne, brique01, MCP, brique 02 et l'isolant textile) respectivement.

Discussion de la 6^{ème} configuration

a) Pour le Gypsum :

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,833^{\circ}\text{C}$ après il n'aura pas

un changement remarquable et puis elle commence à se dégrader lentement en passant par la première couche de brique jusqu'à la sortie dans $T_{b1,s}=31,232^{\circ}\text{C}$ et par suite le MCP va engendrer une petite différence de température dont la sortie $T_{MCP,s}=31,082^{\circ}\text{C}$ et par suite on entame la deuxième couche de brique qui va dégrader la température jusqu'à $T_{b2,s}=29,336^{\circ}\text{C}$ et puis dans l'isolant textile la température va chuter rapidement dans $T_{it,s}=20,982^{\circ}\text{C}$ car il possède une faible valeur de conductivité thermique, et finalement dans la sortie de ciment interne la température va dégrader jusqu'à $T_{cs}=20,664^{\circ}\text{C}$.

b) Pour le $\text{CaCl}_2\cdot\text{CH}_2\text{O}$:

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,832^{\circ}\text{C}$ après il n'y aura pas un changement remarquable et puis elle commence à se dégrader lentement en passant par la première couche de brique jusqu'à la sortie dans $T_{b1,s}=31,230^{\circ}\text{C}$ et par suite le MCP va engendrer une petite différence de température dans la sortie $T_{MCP,s}=31,109^{\circ}\text{C}$ et par suite on entame la deuxième couche de brique qui va dégrader la température jusqu'à $T_{b2,s}=29,36^{\circ}\text{C}$ et puis dans l'isolant textile la température va chuter rapidement dans $T_{it,s}=20,984^{\circ}\text{C}$ car il possède une faible valeur de conductivité thermique, et finalement dans la sortie de ciment interne la température va dégrader jusqu'à $T_{cs}=20,666^{\circ}\text{C}$.

c) Pour le OM 35 :

Dans l'entrée du ciment externe la température est égale à $T_{ce}=32,838^{\circ}\text{C}$ après il n'y aura pas un changement remarquable et puis elle commence à se dégrader lentement en passant par la première couche de brique jusqu'à la sortie dans $T_{b1,s}=31,251^{\circ}\text{C}$ et par suite le MCP va engendrer une petite différence de température dans la sortie $T_{MCP,s}=30,796^{\circ}\text{C}$ et par suite on entame la deuxième couche de brique qui va dégrader la température jusqu'à $T_{b2,s}=29,069^{\circ}\text{C}$ et puis dans l'isolant textile la température va chuter rapidement dans $T_{it,s}=20,953^{\circ}\text{C}$ car il possède une faible valeur de conductivité thermique, et finalement dans la sortie de ciment interne la température va dégrader jusqu'à $T_{cs}=20,645^{\circ}\text{C}$.

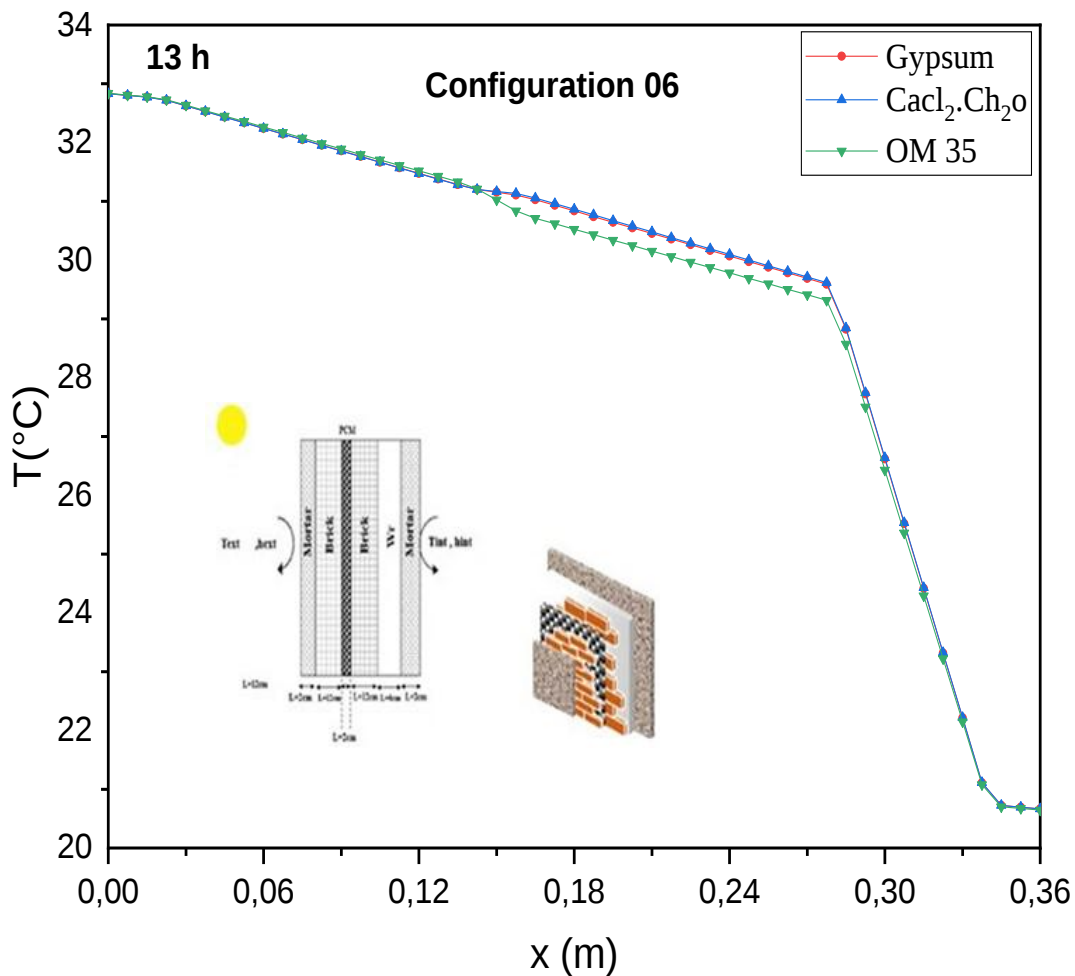


Figure IV.8 : Représentation graphique de profil de température de la 6^{ème} configuration

IV.5. Conclusion :

D'après les résultats obtenus pour chaque configuration avec différents MCP, on constate qu'il y a une petite différence entre les valeurs des contacts parfaits de chaque couche qui constitue la construction d'un mur, alors que pour chaque MCP il aura des valeurs différentes en terme de température de distribution ce qui fait que la température de ciment interne va changer aussi mais avec une petite marche, même le MCP va influencer sur toute la variation de température d'interface pour chaque matériau et ce qui est important c'est la température interne du bâtiment de ce mur multicouche.

Si je veux bien détaillé le contexte ce qui concerne le **Gypsum** et le **CaCl₂.Ch₂O** je conclue que les valeurs de la distributions de la températures pour chaque interface de contact des matériaux qui font la construction de mur multicouche sont rapprochée un petit peu dans les cinq configurations d'étude qu'on a fait ; et cette distinction revient sur le fait que les caractéristiques thermiques tel que (conductivité thermique, chaleur spécifique ,densité) des **Gypsum** et **CaCl₂.Ch₂O** sont rapproché (voir le **tableau IV.1**, page 28).

Et pour les valeurs distribution de la température de **OM 35** dans les cinq configurations d'étude il est un petit peu éloigné par rapport aux **Gypsum**, **CaCl₂.Ch₂O** et ça aussi revient sur le fait des caractéristiques thermiques qui sont loin par rapport au deux premiers MCP (voir le **tableau IV.1**, page 28).

Conclusion générale :

D'après les calculs et les résultats numériques effectués par l'aide de logiciel ANSYS, On peut constater que dans le domaine de construction d'un mur multicouche, il faut respecter quelque normes et règlements en ce qui concerne le choix des matériaux et l'emplacement de chaque matériaux avec différentes caractéristiques et paramètres tels que (l'épaisseur, le nombre de couches qui font la construction du mur, les différentes propriétés thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique et la masse volumique ...etc.) et ce qui influe aussi le résultat de travail c'est les conditions aux limites.

Le matériau qui est spécifique et très utile dans le secteur du bâtiment et dans la construction du mur c'est le MCP ou bien le matériau à changement de phase qui possède des performances thermo physiques uniques en matière de stockage de chaleur latente, changement de phase sans une variation de température appréciable et transition solide-liquide réversible et même chaleur et densité spécifiques élevées, d'où que tous c'est caractéristiques de performance pour ces matériau attirent l'attention des constructeurs de mur de bâtiment et tous les spécialistes qui sont inclus dans le domaine énergétique.

Parmi les 3 MCP sélectionnées dans ce travail pour la composition de mur multicouche, les 3 MCP possèdent des différentes caractéristiques en matière de conductivité thermique, densité, chaleur spécifique et même température de fusion, malgré tout ça on a constaté qu'il n'y a pas une grande différence dans les résultats de simulation de la distribution de la température pour chaque sélection car ces derniers ont des caractéristiques rapprochées et aussi ça peut revenir aux plusieurs complexités que possède ce matériau à changement de phase.

Finalement, l'objectif de ce travail est d'avoir une base forte et utile dans le choix de construction du mur en ce qui concerne la sélection de PCM et autres matériaux pour bien limiter les dépenses énergétiques qui se présente en forme de système CVC (chauffage, ventilation et climatisation) et aussi pour le but de conserver l'énergie thermique dans le secteur bâtiment.

Références bibliographiques:

- [1] J. Li, P. Xue, W. Ding, J. Han and G. Sun, 'Micro-Encapsulated Paraffin/High- Density Polyethylene/Wood Flour Composite as Form-Stable Phase Change Material For Thermal Energy Storage', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 93, N°10, pp. 1761 - 1767, 2009
- [2] C. Alkan and A. Sari, 'Fatty Acid/Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA) Blends as Form-Stable Phase Change Materials for Latent Heat Thermal Energy Storage', *Solar Energy*, Vol. 82, N°2, pp. 118 - 124, 2008.
- [3] Ahmad, M., thèse « nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux a changement de phase, super isolation, apports solaires », 2004, UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER – GRENOBLE 1.
- [4] A.Pasupathy et al , 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*. (2008) 28, 556-565.
- [5] C. Chen et al, A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard, *Energy and Buildings*. (2008) 40, 882–890.
- [6] S.S. Haghshena.et al, Simulation of Thermal Storage Phase Change Material in Buildings, *World Academy of Science, Engineering and Technology*. (2009) 34.
- [7] A. Castell, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling; *Energy and Buildings*. (2010) 42, 534-540.
- [8] M. alawadhi e et al, Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study; *Energy Conversion and Management*. (2011) 52 2958-2964.
- [9] F. Kuznik et al, A review on phase change materials integrated in building walls; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (2011) 15, 379-391.
- [10] Pierre Cormault, «Cours de Thermique théorique et pratique», Edition Janvier, 1999.
- [11] Yves JANNOT, «TRANSFERTS THERMIQUES », Ecole des Mines Nancy 2ème année, 2012, 5,6.
- [12] «Transfert thermique », http://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique, Dernière modification de cette page le 26 mars 2013 à 16:25
- [13] Dominique Marchio et Paul Reboux, «Introduction Aux Transferts Thermiques », École des mines de Paris, ISBN : 978291176293, 2008, 6,7.
- [14] By D. V. Hale, M. J. Hoover, and M. J. O'Neill, PHASE CHANGE MATERIALS HANDBOOK; NASA CR-61363, Huntsville Research and Engineering Center 4800 Bradford Drive, September 1971.

- [15] Handbook of Chemistry and Physics, 47th Edition; Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio, 1966.
- [16] McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Engineering, McGraw-Hill Co., New York, 1971.
- [17] Besancon, R. M., The Encyclopedia of Physics, Reinhold Publishing Corp., New York, 1966.
- [18] Van Nostrand's Scientific Encyclopedia, Third Edition; D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, New Jersey, 1958.
- [19] Grodzka, P. G., and C. Fan, "Thermal Control by Freezing and Melting, 11 LMSC-HREC A791342, NASS-21123, Lockheed Missiles & Space Company, Huntsville, Ala., March 1968.
- [20] <http://www.recuperation-chaleur.fr/stockage-par-chaleur-latente>.
- [21] Kisson J, Kelly J, Hannig M, Thomas I (1998) Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings. In: Proceedings of international solar energy conference, Albuquerque, New Mexico, 14–17 June 1998.
- [22] Dincer I, Rosen MA (2002) Thermal energy storage—systems and applications. Wiley.
- [23] <https://www.historique-meteo.net/afrique/algerie/mostaganem/2021/01/#moyennes>
<https://www.historique-meteo.net/afrique/algerie/mostaganem/2020/08/#moyennes>
- [24] O. Inghoure et al, performance evaluation of phase change materials for thermal comfort in a hot climate region. Applied thermal engineering.(2021):186,116509[6].
- [25] K. Darkwa , P.W. O Callaghan, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building. Applied Thermal Engineering 26 (2006) 853–858.
- [26] O. Inghoure et al, performance evaluation of phase change materials for thermal comfort in a hot climate region. Applied thermal engineering.(2021):186,116509[6].
- [27] M.A.Izquierdo-Barrientos et al; A numerical study of external building walls containing. Applied thermal engineering.(2012)47:73-85
- [28] H.B. Awbi, A. Hatton, Natural convection from heated room surfaces, Energy and Buildings 30 (1999) 233-244.
- [29] K.S REDDY Thermal Performance Analysis of Multi-Phase Change Material Layer-Integrated Building Roofs for Energy Efficiency in Built-Environment, Energies 2017, 10, 1367; doi:10.3390/en10091367.