



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
La République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche Scientifique  
جامعة محمد 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'ETUDES MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

## *Thème*

**ETUDE D'INFLUENCE PAR LA METHODE DES VOLUMES FINIS DE  
L'UTILISATION D'UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE (MCP) SUR LA  
TEMPERATURE DANS UN MUR DE BATIMENT.**

Présenté par :

- ❖ MERABET Nawal
- ❖ SACI Chahinez

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

Président	Pr. HOUAT Samir	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***

*Nous remercions le bon Dieu pour le courage qu'il nous a donné pour surmonter toutes les difficultés durant nos années d'études.*

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

*Nous adressons nos remerciements à Monsieur le Président de jury **Pr. HOUAT Samir** 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, nous adressons nos vives reconnaissances à toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.*

*Dédicaces*

*Je dédie ce travail aux personnes  
Les plus chères pour moi :  
Ma mère, que Dieu la protège.  
À mon père, que Dieu lui fasse miséricorde.  
A mes frères et toute ma famille  
A mon amie Ahlam et Naima,  
A Mon encadreur « Dr. Bendida Medjahed»*

***Saci Chahinez***

*Je dédie ce travail aux personnes  
Les plus chères pour moi :  
Ma mère, que Dieu la protège.  
À mon père, que Dieu lui fasse miséricorde.  
A mes frères et toute ma famille  
A mon amie Maghnia et Djamila,  
A Mon encadreur « Dr. Bendida Medjahed»*

***Merabet Nawal***

*Merci infiniment.*

# **Sommaire**

# Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Sommaire	
Nomenclature	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	1
Introduction générale	4
<b>Chapitre 01 : Etude bibliographique</b>	
Etude bibliographique	6
<b>Chapitre 02 : Généralité sur le transfert de chaleur</b>	
2. Généralité sur le transfert de chaleur	10
2.1. Le transfert de chaleur	10
2.2 Transfert de chaleur par conduction	11
2.3. Transfert de chaleur par convection	12
2.4. Transfert de chaleur par rayonnement	13
<b>Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase</b>	
3. les Matériaux à changement de phase	16
3.1. Définition	16
3.2. Généralités sur les MCP	17
3.2.1 Types des matériaux à changement de phase (MCP)	17
3.2.1.1 Les MCP Organiques	17
3.2.1.2 Les MCP inorganiques	17
3.2.1.3. Les MCP eutectiques	17
3.3. Propriétés thermo physiques des MCP	18
3.4. Le choix d'un MCP	18
3.5 Le stockage d'énergie par chaleur latente dans les MCP	19
3.6. Incorporation des MCP dans le bâtiment	20
<b>Chapitre 04 : Méthode de résolution</b>	
4.1.La méthode de volume finis	23
4.2. Principe	23
4.3. La description du problème	24
4.4 .Composition de la configuration	24
4.5. Les hypothèses de travail	24

4.6. Les conditions aux limites	25
4.7. Application	26
4.8. Forme numérique	27

### **Chapitre 05 : résultats et discussions**

5. Résultats et discussion	30
5.1. Résultats et discussion (1 <sup>ère</sup> partie de travail (1D))	30
5.2. Résultats et discussion (2 <sup>ème</sup> partie de travail(2D))	31

### **Conclusion**

Conclusion	46
Références bibliographiques	48
Annexe 01	52
Annexe 02	58

# **LISTE DES FIGURES**

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure</b>	<b>Description</b>	<b>Page</b>
Figure 2.1	Représentation des 3 modes de transfert de chaleur	11
Figure 2.2	principe de conduction	11
Figure 2.3	Action de fluide en mouvement dans la convection	12
Figure 2.4	principe de rayonnement	14
Figure 3.1	Liquéfaction et solidification du MCP	16
Figure 4.1	Domaine de calcul	24
Figure 5.1	Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur avec changement des MCP, (Matin (07h)).	31
Figure 5.2	Distribution de la température sur les l'épaisseur du changement mur avec des MCP, (Après midi (13 h)).	31
Figure 5.3	Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur avec changement des MCP, (Soir (19 h)).	31
Figure 5.4	Représentation de maillage non structuré en deux dimensions (2D) (34x10).	32
Figure 5.5	Contours de la distribution de température du mur avec changent de MCP, (Le 15/08/2020 à matin (07 h)).	34
Figure 5.6	Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur avec changement des MCP dans la période matin (07h)	34
Figure 5.7	Contours de la distribution de température du mur avec changent de MCP, (Le 15/08/2020 à après midi (13 h)).	36
Figure 5.8	Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur avec changement des MCP dans la période après midi (13h).	37
Figure 5.9	Contours de la distribution de température du mur avec changent de MCP, (Le 15/08/2020 à le soir (19 h)).	39
Figure 5.10	Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur avec changement des MCP dans la période soir (19h).	39
Figure 5.11	L'influence de temps sur la distribution de température pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.2 \text{ W/m. K}$ )	40
Figure 5.12	Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.2 \text{ W/m. K}$ )	40
Figure 5.13	L'influence de temps sur la distribution de température pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.26 \text{ W/m. K}$ )	41
Figure 5.14	Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur pour le cas de la	41

	conductivité thermique ( $k = 0.26 \text{ W/m. K}$ )	
Figure 5.15	L'influence de temps sur la distribution de température pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.39 \text{ W/m. K}$ )	42
Figure 5.16	Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.39 \text{ W/m. K}$ )	42
Figure 5.17	L'influence de temps sur la distribution de température pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.8 \text{ W/m. K}$ )	43
Figure 5.18	Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.8 \text{ W/m. K}$ )	43
Figure 5.19	L'influence de temps sur la distribution de température pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 1.09 \text{ W/m. K}$ )	44
Figure 5.20	Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 1.09 \text{ W/m. K}$ )	44

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau</b>	<b>Description</b>	<b>Page</b>
Tableau 4.1	Propriétés thermiques des matériaux de mur de maçonnerie sélectionnés, où $k$ est la conductivité thermique, la $\rho$ densité et $c$ est la capacité thermique spécifique .	26
Tableau 4.2	Propriétés physiques des matériaux de construction.	26
Tableau 4.3	Les données qui est utilisé dans le calcul	26

# **NOMENCLATURES**

## NOMENCLATURES :

### Symboles :

$C_p$  : Chaleur spécifique (J/kg.k)

$C_{ps}(T)$ : Capacité thermique massique du corps considéré à l'état solide (J/kg. K).

$C_{pl}(T)$ : Capacité thermique massique du corps considéré à l'état liquide (J/kg. K)

hext: Coefficient de transfert de chaleur par convection extraire ( $w/m^2.k$ ).

hint: Coefficient de transfert de chaleur par convection intraire ( $w/m^2.k$ ).

$I_s$  : irradiation solaire ( $w/m^2$ )

$k$  : Conductivité thermique (W/.m.K)

Lf: Chaleur latente de changement de phase.

$q_r$  :Density of heat flux emitted by radiation (W/m<sup>2</sup>)

$q_{con-ext}$ : Flux de chaleur transmis par convection extraire (W/m<sup>2</sup>)

$q_{con-int}$ : Flux de chaleur transmis par convection intraire (W/m<sup>2</sup>).

$q_{cond}$  : Flux de chaleur transmis par conduction (W/.m).

$S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide (m<sup>2</sup>).

$t$  : Temps (s)

$T_A$  : température de paroi extraire(k).

$T_B$  : température de paroi intraire (k)

$T_{SKY}$ : température du ciel ( °C) .

$T_{\infty 1}$  : Ambient température extraire (°C)

$T_{\infty 2}$  : Ambient température intraire (°C)

### Symboles grec :

$\lambda$  : La conductivité thermique (W/m.°K)

$\alpha_s$ : solaire Absorptivité

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann ( $w/m^2.K^4$ )

$\sigma$  : Constante de Stefan (=5,67.10<sup>-8</sup> w/m<sup>2</sup>.k<sup>4</sup>)

$\epsilon$ :Facteur d'émission de la surface

### Abréviation

MCP matériaux à changement de phase.

DTA : Analyse thermique différentielle .

DSC : Calorimétrie à balayage différentiel.

# **Etude d'influence par la méthode des volumes finis de l'utilisation d'un matériau à changement de phase (PCM) sur la température dans un mur de Bâtiment.**

## **Résumé :**

La consommation d'énergie des bâtiments pour le chauffage, la ventilation et la climatisation augmente avec la demande croissante de confort thermique. Le stockage d'énergie thermique avec des matériaux à changement de phase (MCP) a attiré une attention croissante pour son rôle dans la réalisation de la conservation de l'énergie dans les bâtiments à confort thermique. Ce mémoire étudie 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 intérieur du bâtiment. La méthode de simulation numérique de la conduction de la chaleur a une seule dimension et deux dimensions, dans un mur de bâtiment, en utilisant la méthode des volumes finis avec un maillage structuré pour le cas (1D) et non structuré pour le cas (2D), des coordonnées cartésiennes et différentes conditions aux limites, en utilisant le langage MATLAB comme outil de programmation a été élaboré. Les résultats obtenus avec MATLAB sont comparés les cinq matériaux à changement de phase (MCP) avec la même composition de matériaux de mur bâtiment et même position de MCP, et ont permis de déterminer la distribution de la température et la solution numérique de l'équation de la chaleur.

Mots- clés : Mur de bâtiment, Méthode des volumes finis (MVF), Matériaux à changement de phase (MCP), Température.

## **Study of the influence by the finite volume method of the use of a phase change material (PCM) on the temperature in a building wall.**

### **Abstract :**

The energy consumption of buildings for heating, ventilation and air conditioning increases with the increasing demand for thermal comfort. Thermal energy storage with phase change materials (PCMs) has attracted increasing attention for its role in achieving energy conservation in thermal comfort buildings. This thesis studies the effect of MCP on the heat transfer rate in a building wall and the role of MCP on thermal comfort inside the building. The numerical simulation method of heat conduction has one dimension and two dimensions, in a building wall, using the finite volume method with a structured mesh for the case (1D) and unstructured for the case (2D ), Cartesian coordinates and various boundary conditions, using the MATLAB language as a programming tool has been developed. The results obtained with MATLAB are compared the five phase change materials (PCM) with the same composition of building wall materials and same position of MCP, and allowed to determine the temperature distribution and the numerical solution of the heat equation.

Keywords: Building wall, Finite volume method (MVF), Phase change materials (PCM), Temperature.

## دراسة تأثير طريقة الحجم المحدود لاستخدام مادة تغيير الطور (PCM) على درجة الحرارة في جدار المبنى.

### ملخص:

يزداد استهلاك الطاقة في المباني لأغراض التدفئة والتهوية وتكييف الهواء مع زيادة الطلب على الراحة الحرارية. جذب تخزين الطاقة الحرارية مع مواد تغيير الطور اهتمامًا متزايدًا لدورها في تحقيق الحفاظ على الطاقة في مباني الراحة الحرارية. تدرس هذه الرسالة تأثير مواد تغيير الطور على معدل انتقال الحرارة في جدار المبنى ودور مواد تغيير الطور على الراحة الحرارية داخل المبنى. طريقة المحاكاة الرقمية للتوصيل الحراري لها بعد واحد وُبعدان ، في جدار المبنى ، باستخدام طريقة الحجم المحدود مع شبكة منظمة للحالة (D1) وغير منظمة للحالة (D2) ، والإحداثيات الديكارتية وشروط الحدود المختلفة ، تم تطوير استخدام لغة MATLAB كأداة برمجة. النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام MATLAB تمت مقارنة مواد تغيير الطور الخمس مواد تغيير الطور بنفس تركيبة جدران المبنى ونفس موضع مواد تغيير الطور ، وتم السماح لها بتحديد توزيع درجة الحرارة والحل العددي للمعادلة.

**الكلمات المفتاحية:** جدار المبنى ، طريقة الحجم المحدود (MVF) ، مواد تغيير الطور ، درجة الحرارة.

# **Introduction générale**

## **Introduction générale :**

Les matériaux changement de phase (MCP), appelés matériaux à changement de phase, 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 plus grande densité de stockage d'énergie et une plus grande conductivité thermique mais ils présentent un super-refroidissement et une ségrégation de phase. Les temps de stockage et déstockage, à cause de leur asymétrie, posent de vraies limitations [3,4]. Pour ce la nous avons étudié dans ce mémoire l'effet du PCM sur le taux de transfert de chaleur dans un mur de bâtiment et le rôle du PCM sur le confort thermique intérieur du bâtiment. La méthode de simulation numérique de la conduction de la chaleur a une seule dimension et 2 dimensions, dans un mur de bâtiment multi couche, en utilisant la méthode des volumes finis avec un maillage structuré pour le cas (1D) et non structuré pour le cas (2D), des coordonnées cartésiennes et différentes conditions aux limites, en utilisant le langage MATLAB comme outil de programmation a été élaboré.

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 pour l'application des matériaux changement de phase sur les murs de bâtiment, dans le deuxième chapitre nous avons présenté une généralité sur le phénomène du transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement. Une notion sur les matériaux changement de phase (MCP) dans les murs de bâtiment est présentée dans le troisième chapitre, Le quatrième chapitre a été réservé à la présentation les conditions aux limites et les discussions des résultats. Une conclusion générale est donnée à la fin de ce document.

**Chapitre 01 :**  
**Etude bibliographique**

## **Etude bibliographique**

La limitation des besoins en climatisation/chauffage, dans le secteur du bâtiment, est devenue un impact primordial. En effet, ce dernier consomme une énergie importante en chauffage et climatisation. Ceci est dû partiellement au changement climatique. Un des moyens qui a fait l'objet de plusieurs études, pour y remédier, est l'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM). Ces derniers, incorporés dans l'enveloppe du bâtiment, permettent d'accroître son inertie thermique et ce, grâce à leur chaleur latente qui permet de stocker/déstocker une grande quantité d'énergie. Depuis les années 80, plusieurs études ont été effectuées sur l'utilisation des MCP dans le bâtiment. De nombreux travaux de recherche ont été réalisés, ces dernières années, sur l'utilisation de PCM dans la climatisation et le chauffage des bâtiments dont les résultats montrent que les pics de température dans une pièce équipée de PCM peuvent être réduits de 3 à 4°C, ainsi la consommation de l'énergie liée à la climatisation baisse de 30 %, [1]. L'incorporation des PCM, dans les différents éléments de construction, se fait par différentes manières dont on cite l'incorporation directe du PCM, l'imprégnation du matériau de construction, l'incorporation de capsules remplies de PCM dans les éléments de construction, etc.

Les études effectuées dans le passé ont montré que la première application d'un matériau à changement de phase portait sur le chauffage et la climatisation dans les bâtiments [2, 3]. Vers les années 40, Telkes a conçu un système de chauffage solaire résidentiel et en 1948, l'étude expérimentale sur le changement de phase a débuté à Dover, dans le Massachusetts. La maison expérimentale de 4 m<sup>3</sup> de sel de Glauber, emballés dans des fûts en acier disposés dans des zones vitrées ensoleillées et ventilées mécaniquement pour déplacer l'air chaud dans l'espace de vie pendant l'hiver. Mais, ce matériau perdait de sa capacité de changement de phase au cours de la seconde saison en se désintégrant. Au début des années 70, la crise du carburant à encourager la communauté scientifique à reprendre leurs investigations sur les MCP pour conserver le combustible et développer des sources d'énergie alternatives. Dès lors, la recherche et le développement sur les MCP n'a cessé de progresser [4,5]. Pour extraire plus de puissance, il faut augmenter la surface d'échange car les différences de températures sont bornées. Pour les pays méditerranéens les températures, pendant la saison chaude, oscillent de façon non symétrique autour d'une température moyenne agréable. Pour contrôler le couplage ainsi que les temps de réponse, plusieurs chercheurs dans ce domaine ont incorporé un gel-PCM dans un élément constructif 'parpaing' muni de tubes de ventilation.

Une étude à la fois numérique et expérimentale a été réalisée. Des modèles 2-D ont été développés dans les cas du parpaing avec PCM et avec, en plus, une lame d'air ventilées. Le but étant d'analyser l'effet de l'intra-ventilation sur la dynamique thermique de ce système.

Le stockage thermique fait toujours partie des axes de recherche actuels pour pallier au caractère intermittent de l'énergie solaire et combler l'écart entre l'offre et la demande.

La notion de l'efficacité du système de stockage suscite l'intérêt de la plupart des études. En effet, un système de stockage doit être le plus efficace possible pour restituer le maximum d'énergie stockée. Or, ce système peut être sous forme de chaleur sensible ou chaleur latente.

Comparant aux systèmes classiques de stockage par chaleur sensible, ceux par chaleur latente présentent une technologie très prometteuse. Cette technologie a été qualifiée comme étant la plus efficace à stocker l'énergie thermique avec une densité énergétique plus grande [6,7]. Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) sont introduits dans les systèmes de stockage par chaleur latente.

Kuznik et al, 2008 se sont intéressés à l'évaluation des MCP en se basant sur les propriétés et les applications. Ils ont décrit le MCP comme un matériau possédant la capacité de stocker de l'énergie thermique. L'augmentation de la température provoque un changement d'état solide à liquide par réaction endothermique accompagnée d'une absorption de chaleur.

D'autre part, la diminution de la température induit un changement de la phase liquide à la phase solide par réaction exothermique avec une libération de chaleur. Le MCP permet de stabiliser les fluctuations thermiques extrêmes afin que les variations se fassent plus lentement dans le bâtiment pour réduire la quantité de chauffage ou de refroidissement diminuant ainsi la consommation en carburant ainsi que les émissions en CO<sub>2</sub> [8].

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 [9].

Chen et al, ont examiné le comportement thermique de trois échantillons : plâtre pur, nouveau composant plâtre-PCM 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 [10]. 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-octadecane) 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, 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 MCP proche de la face exposée au milieu ambiant extérieur [11]. 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 [12]. 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 [13]. 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 [14].

# **Chapitre 02 :**

## **Généralité sur le transfert de chaleur**

## 2. Généralité sur le transfert de chaleur

### 2.1. Le transfert de chaleur :

De tous temps, les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc., mais aussi pour des opérations de transformations chimiques. En effet, dans certains systèmes réactionnels, c'est la vitesse des échanges de chaleur et non la vitesse des réactions chimiques qui détermine le coût de l'opération (cas de réactions fortement endo- ou exothermique). En outre, de nos jours, par suite de l'accroissement relatif du prix de revient de l'énergie, on recherche dans tous les cas à obtenir le rendement maximal d'une installation pour une dépense d'énergie minimale. [15]

Les problèmes de transfert de chaleur sont nombreux, et on peut essayer de les différencier par les buts poursuivis dont les principaux sont :

- L'augmentation de l'énergie transmise ou absorbée par une surface,
- L'obtention du meilleur rendement d'une source de chaleur,
- La réduction ou l'augmentation du passage d'un débit de chaleur d'un milieu à un autre.

Le potentiel qui provoque le transport et le transfert de l'énergie thermique est la température. Si deux points matériels placés dans un milieu thermiquement isolé sont à la même température, on peut affirmer qu'il n'existe aucun échange thermique global entre ces deux points dits en équilibre thermique (il s'agit bien d'un équilibre thermique car chacun des points matériels émet une énergie thermique nette de même module, mais de signe opposé). Le transfert de chaleur au sein d'une phase où, plus généralement, entre deux phases, se fait suivant 3 modes [15] :

- **Par conduction.**
- **par convection.**
- **Par rayonnement.**

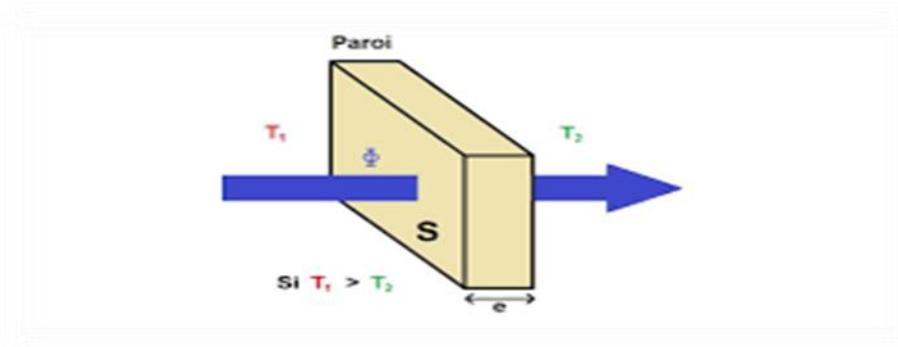


**Figure 2.1 : représentation des 3 modes de transfert de chaleur [15].**

## 2.2 Transfert de chaleur par conduction :

Est un transfert thermique ayant lieu au cœur d'un matériau c'est-à-dire à l'échelle microscopique elle résulte de l'élévation ou de la baisse de la température dans certaine région d'un corps. Ceci provoque une différence de température dans l'intégrité du corps ainsi la région la plus froide du corps s'échauffe au contact de la région la plus chaude. Ce transfert thermique a lieu sans transfert de matière mais avec transfert d'énergie.

En effet, on peut considérer la conduction thermique au sein d'un solide comme la transmission de proche en proche de l'énergie microscopique de vibration du réseau cristallin car le fait que le corps soit chaud se traduit par une agitation microscopique des atomes cristallins [16].



**Figure 2.2 : principe de conduction [16].**

Ce transfert de chaleur obéit à la loi de Fourier, Equation (2.1), établie mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1822. [16]

$$q_{cond} = -\lambda \cdot S \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

$q_{cond}$  : Flux de chaleur transmis par conduction ( $W \cdot m^{-1}$ ).

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu ( $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ ).

$\Delta t$  : Gradient de température en x en ( K ).

S : Aire de la surface de contact solide/fluide ( $m^2$ ).

### 2.3 Transfert de chaleur par convection :

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et de mouvement de milieu, elle est considérée comme le mécanisme le plus important de transport de l'énergie entre une surface solide et un liquide ou gaz. Le transport d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacent. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température est l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte simultanément, le fluide et l'énergie. L'énergie est à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement (Figure 2.3) [17].

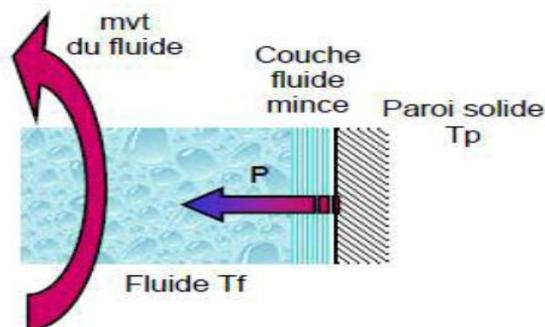


Figure 2.3 : Action de fluide en mouvement dans la convection [17].

La puissance transférée par convection est donnée par la relation

$$q_{con-ext} = h_{ext}(T_{\infty 1} - T_A) \quad (2.2)$$

$$q_{con-int} = h_{int}(T_{\infty 2} - T_B) \quad (2.3)$$

Avec :

$q_{con-ext}$ : Flux de chaleur transmis par convection extraire ( $w. m^{-2}$ ).

$h_{ext}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection extraire ( $w. m^{-2}. k^{-1}$ ).

$q_{con-int}$ : Flux de chaleur transmis par convection intraire ( $w. m^{-2}$ ).

$h_{int}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection intraire ( $w. m^{-2}. k^{-1}$ ).

$T_A$  : température de paroi extraire(k).

$T_B$  : température de paroi intraire (k).

$T_s$  : Température de surface du solide (°C)

$S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide ( $m^2$ ).

La transmission de chaleur par convection est désignée selon le mode d'écoulement du fluide, par :

- Convection libre (naturelle) ;
- Convection forcée ;
- Convection mixte.

## 2.4 Transfert de chaleur par rayonnement :

Le rayonnement est un transfert thermique ne nécessite pas de milieu matériel par opposition aux deux autres. En effet, ce type de transfert thermique résulte de l'émission des rayons électromagnétiques transporte l'énergie. Ils sont émis par un corps chaud, tel que le soleil, et échauffent le corps qui les reçoit, dans ce cas nous avons la relation suivante [16] :

$$q_r = \sigma \varepsilon (T_{sky}^4 - T_A^4) \quad (2.4)$$

Avec :

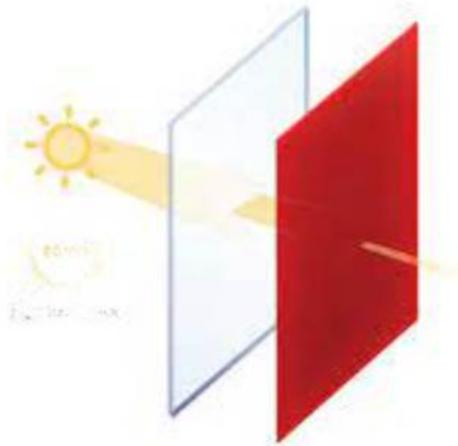
$q_r$  : Flux de chaleur transmis par rayonnement ( $w. m^{-2}$ )

$\varepsilon$ :Facteur d'émission de la surface

$\sigma$  : Constante de Stefan ( $=5,67.10^{-8} W m^{-2}k^{-4}$  )

$T_A$  : Température de paroi extraire (k)

$T_{sky}$  : Température du ciel (k)



**Figure 2.4: principe de rayonnement [16].**

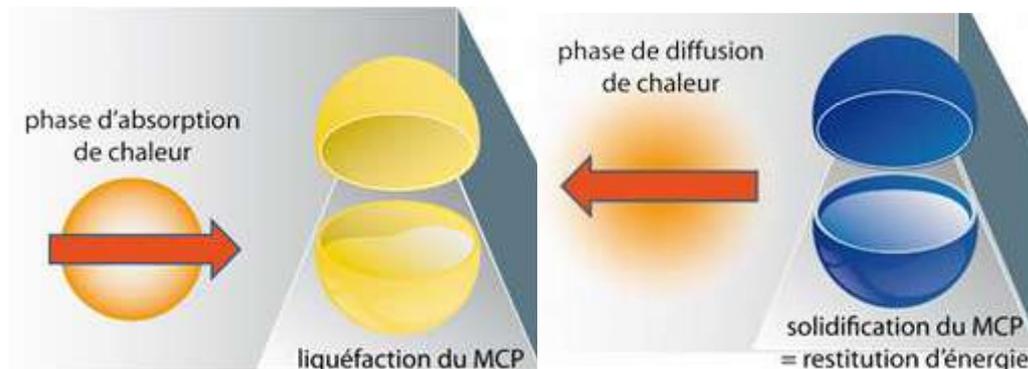
## **Chapitre 03 :**

### **Les matériaux à changement de phase.**

### 3. Les matériaux à changement de phase.

#### 3.1 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...) [18].



**Fig.3.1: Liquéfaction et solidification du MCP [19].**

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Le stockage de chaleur latente de MCP peut être réalisé par le changement solide-solide, de solide-liquide, de solide-gaz et de phase de liquide gaz. Cependant, le seul changement de phase utilisé pour des MCP est le changement de solide-liquide. Les changements de phase de Liquide-gaz ne sont pas pratiques pour l'usage en tant que stockage thermique dû aux grands volumes ou pressions exigés pour stocker les matériaux dans leur phase gazeuse. Les transitions de Liquide-gaz ont une chaleur plus élevée de transformation que des transitions de solide-liquide.

Les changements solides-solides de phase sont en général très lents et ont plutôt une basse température de transformation [20].

### **3.2. Généralités sur les MCP :**

#### **3.2.1 Types des matériaux à changement de phase (MCP)**

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux :

Les organiques, les inorganiques et les eutectiques [21].

##### **3.2.1.1 Les MCP Organiques :**

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables [21]

##### **. 3.2.1.2 Les MCP inorganiques**

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et +1000°C. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150°C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables [21].

##### **3.2.1.3. Les MCP eutectiques**

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique organique, organique inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels [21].

### 3.3. Propriétés thermo physiques des MCP :

Les propriétés thermo physiques sont l'aspect le plus important lorsqu'il s'agit de choisir le meilleur MCP pour le stockage d'énergie. Les principales propriétés de chaque MCP sont :

- Température de fusion dans une plage de température appropriée
- Chaleur latente par unité de volume
- Chaleur spécifique
- Conductivité thermique
- Densité

Pour déterminer les propriétés physiques, quatre méthodes principales sont utilisées [22,23] :

- Calorimétrie conventionnelle,
- Analyse thermique différentielle (DTA),
- Calorimétrie à balayage différentiel (DSC)
- Méthode de T-History.

L'analyse thermique différentielle (DTA) et la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) [24] sont les méthodes les plus développées et les plus utilisées pour déterminer les propriétés thermo physiques [25]. Cependant, ces méthodes ont des inconvénients (les tailles d'échantillon sont faibles, allant de 10 à 150 mg (DTA) et de 1 à 50 mg (DSC)), celles-ci ont révélé une apparition de divergences lorsque le volume de MCP était plus important. En outre, ces méthodes ne peuvent pas déterminer les propriétés de plusieurs échantillons de MCP en même temps.

### 3.4. Le choix d'un MCP

Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée [26].

#### ➤ Considérations thermiques :

- Le niveau de la température de changement de phase qui dépend de l'application.
- La valeur de la chaleur latente de fusion (>130 kJ / kg pour être compétitif).
- Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides.

➤ **Propriétés physiques :**

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

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

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

➤ **Considérations cinétiques :**

- Des cinétiques de charge et de décharge rapides.

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

➤ **Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux :**

- Stabilité du corps lors des cycles thermiques.

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

➤ **Considérations chimiques :**

- Stabilité chimique des corps avec le temps et avec les niveaux de température.

- Un bon taux de cristallisation et ininflammabilité et non-toxicité.

➤ **Considérations économiques :**

- Un coût raisonnable et une bonne disponibilité.

### **3.5 Le stockage d'énergie par chaleur latente dans les MCP :**

Le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande densité d'énergie, ce type de stockage est une technique attractive. De plus, il permet de stocker la chaleur sous la forme de chaleur latente de fusion à une température constante, cette température correspondant à la température de la transition de phase [27], il existe plusieurs chaleurs latentes :

✓ Chaleur latente de liquéfaction : quantité de chaleur pour passer de l'état (solide à liquide). Chaleur latente de vaporisation : quantité de chaleur pour passer de l'état (liquide à gazeux).

✓ Chaleur latente de condensation : quantité de chaleur pour passer de l'état (gazeux à liquide).

✓ Chaleur latente de solidification : quantité de chaleur pour passer de l'état (liquide à solide) [28].

Le stockage par chaleur latente consiste à exploiter la quantité d'énergie engagée lors du changement d'état d'un corps. La règle des phases implique qu'à pression atmosphérique et pour un corps pur, ce changement d'état se produit à température constante. 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. Sont les transformations les plus énergétiques.

Supposons que ce corps soit à  $T_1$  un solide pur, de masse  $m$  ayant une température de fusion  $T_f$  telle que  $T_1 < T_f < T_2$ . L'énergie stockée serait donnée, à pression constante, par la variation d'enthalpie suivant :

$$(H_2 - H_1) = \int_{T_1}^{T_f} m C_{pS}(T) dT + mL_f + \int_{T_f}^{T_2} m C_{pL}(T) dT \quad (3.1)$$

$C_{pS}(T)$ : Capacité thermique massique du corps considéré à l'état solide (J/kg. K).

$C_{pL}(T)$ : Capacité thermique massique du corps considéré à l'état liquide (J/kg. K).

$L_f$ : Chaleur latente de changement de phase.

En supposant  $C_s(T)$  et  $C_l(T)$  constantes nous obtenons

$$(H_2 - H_1) = m C_{pS}(T_f - T_1) + mL_f + m C_{pL}(T_2 - T_f) \quad (3.2)$$

### 3.6. Incorporation des MCP dans le bâtiment :

Certains auteurs [29,30] ont classé les applications de systèmes passifs de l'enveloppe du bâtiment en deux catégories principales :

- **MCP intégré aux matériaux de construction :**

Quand ils sont incorporés à un matériau de construction tel que le plâtre, le béton, la briques, les panneaux sous forme stabilisée [29] et un mélange de MCP avec d'isolants thermiques.

- **MCP en tant que « composant » :**

La principale différence entre les composants de bâtiment équipés de MCP et ceux intégrés dans les matériaux de construction est qu'un composant est fabriqué avant d'entamer la construction du bâtiment. On peut citer comme exemple : les panneaux muraux, les plafonds suspendus et les stores avec MCP [31].

L'application des MCP dans les bâtiments solaires actifs et passifs a débuté dès les années 1940. Son utilisation a été faite dans le but d'économiser l'énergie et d'améliorer le confort thermique en la stockant dans le bâtiment. Pour le système passif, l'objectif recherché est d'offrir un confort thermique avec une exploitation minimale d'énergie CVC [32-33]. Dans cette technologie, le bâtiment n'exige pas un outil mécanique dans l'application de ses trois fonctions tel que la collecte, le stockage et la libération de la chaleur.

Quant au système actif, il fait appel à d'autres moyens mécaniques comme les pompes ou les ventilateurs pour véhiculer le fluide caloporteur.

## **Chapitre 04 :**

### **Méthode de résolution**

La méthode de simulation numérique de la conduction, convection et rayonnement de la chaleur à une seule dimension et deux dimensions (2D), dans un mur multicouche, en utilisant la méthode des volumes finis avec un maillage structuré et non structuré, des coordonnées cartésiennes et différentes conditions aux limites, en utilisant le langage MATLAB comme outil de programmation a été élaboré.

Cette méthode est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme les autres méthodes numériques.

Dans le présent travail, nous étudions la méthode de volume fini pour résoudre la conduction 2D dans un mur multi couche en utilisant le code de calcul MATLAB.

Pour atteindre ces objectifs, ce document est organisé comme suit :

- Section 2 : contient la description de la méthode des volumes finis (MVF).
- Section 3 : modélisation d'équation de chaleur par la méthode de volume fini
- Section 4 : présenté les résultats numériques des programmes MATLAB
- Section 5 : conclusion de ce document.

#### **4.1. La méthode de volume finis :**

En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et celle des éléments finis.

L'équation aux dérivées partielles est résolue de manière approchée à l'aide d'un maillage Constitué de volumes finis qui sont des petits volumes.

Dans le présent travail, nous étudions la méthode de volume fini pour résoudre la conduction, la convection et le rayonnement en 1D (méthode **TDMA**) et 2D (méthode **Gauss Seidel**) dans un mur multicouche en utilisant le code de calcul **MATLAB**.

#### **4.2. Principe :**

Le principe de la méthode des volumes finis, est la subdivision du domaine d'étude en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volume de contrôle. Chacun de ces derniers englobe un nœud dit nœud principal P, les points E et W (Est et Ouest) sont des voisins dans la direction x, tandis que N et S (Nord et Sud) sont ceux dans la direction y. Le

volume de contrôle entourant P est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points e et w dans la direction x, n et s dans la direction y.

#### 4.3. La description du problème :

Pour ce la nous avons étudié dans cette mémoire 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 intérieur du bâtiment. La méthode de simulation numérique de la conduction de la chaleur a une seule dimension et 2 dimensions, dans un mur de bâtiment multi couche, en utilisant la méthode des volumes finis avec un maillage structuré pour le cas (1D) et non structuré pour le cas (2D), des coordonnées cartésiennes et différents conditions aux limites, en utilisant le langage MATLAB comme outil de programmation a été élaboré.

#### 4.4. Composition de la configuration :

On distingue que le mur de construction figure (4.1) est composé de quatre genre de matériaux (ciment , plâtre , brique1 et MCP) et L'épaisseur de la couche de ciment 0.02m, la couche brique 01 0.15m, la couche MCP 0.05m, la couche brique 02 0.1m et de la couche de plaques de plâtre 0.02m sont (la figure 4.1) par transfert de chaleurs à conduction , convection et rayonnement.

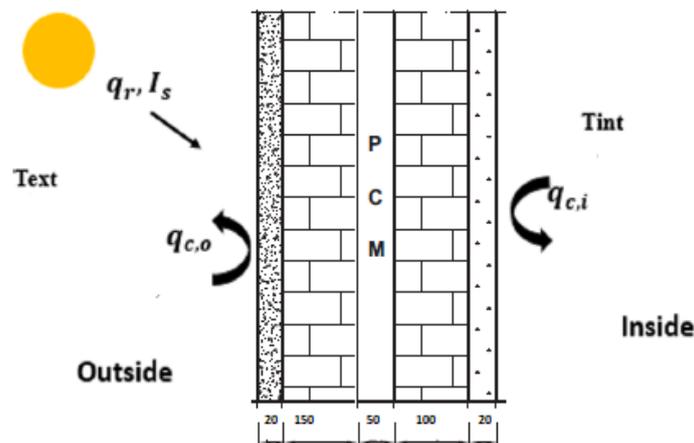


Figure 4.1 : Domaine de calcul.

#### 4.5. 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 température dans un mur multi couche comme suit :

- Le régime d'écoulement permanent ;
- Conduction unidirectionnel dans lère mur composite ;
- La résistance de contact entre mur est négligeable ;
- Les propriétés thermodynamiques des matériaux est constantes ;

#### 4.6. Les conditions aux limites :

La couche extérieure ( $x = 0$ ) de la paroi multicouche est exposée au transfert de chaleur par convection, à l'échange de rayonnement. (Figure 4.1) L'équation devient [34] :

$$k_i \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h_{ext}(T_{\infty 1} - T_A) + q_I + q_r \quad (4.1)$$

Les échanges radiatifs et convectifs sont définis comme suit [34] :

$$q_{con-ext} = h_{ext}(T_{\infty 1} - T_A) \quad (4.2)$$

Ainsi qu'au rayonnement solaire ( $I_S$ ) [35] :

$$I_S = 500 e^{-0.8 \left( \frac{t-12}{8000} \right)^2} \quad (4.3)$$

$$q_I = \alpha_S I_S \quad (4.4)$$

$$q_r = \sigma \varepsilon (T_{Sky}^4 - T_A^4) \quad (4.5)$$

$$T_{Sky}^4 = 0.0552 T_{\infty 1}^{1.5} \quad (4.6)$$

Le coefficient de convection externe est calculé à partir de ce qui précède Corrélation. Utilisation des données météorologiques de la zone étudiée. L'expression de la vitesse du vent a également été définie. Ainsi, le transfert de chaleur le coefficient de convection externe est calculé comme suit [37] :

Comme la couche intérieure

$$h_{ext} = \begin{cases} 6 + 4V & \text{Si } V \leq 5 \text{ m/s} \\ 7 V^{0.78} & \text{Si } V > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4.7)$$

( $x=L$ ) est exposée à l'environnement convectif, Les conditions aux limites sont données comme suit [34] :

$$k_i \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = h_{int} (T_{\infty 2} - T_B) \quad (4.8)$$

Ainsi, le transfert de chaleur le coefficient de convection interne est calculé comme suit [38] :

$$h_{int} = \frac{1.823}{D^{0.121}} (T_B - T_{\infty 2}) \quad (4.9)$$

$$\text{Avec : } D = \frac{4.5}{P}$$

- La journée qui nous avons choisir dans cette étude le 15 aout 2020 avec trois période [33] :
  - Le matin à 07h, la température ambiante à l'externe 25 °C ;
  - Après-midi à 13h, la température ambiante à l'externe 33 °C ;
  - Le soir à 19h, la température ambiante à l'externe 31 °C.

**Tableau 4.1 :** Propriétés thermiques des matériaux de mur de maçonnerie sélectionnés, où  $k$  est la conductivité thermique, la  $\rho$  densité et  $c$  est la capacité thermique spécifique [37]

Matérielle	Conductivité thermique $K$ (w/m.k)	Chaleur spécifique $Cp$ (J/ kg. K)	La masse volumique $\rho$ (Kg/ m3)	épaisseur (m)
Ciment	1.3	1000	1900	0.02
Brique 01	0.4	1000	920	0.15
Brique 02	0.4	1000	920	0.1
Plâtre	0.57	1000	1100	0.02

**Tableau 4.2 :** Propriétés physiques des matériaux de construction. [39]

MCP	Conductivité thermique $K$ (w /m.k)	Chaleur spécifique $Cp$ (J/ kg. K)	La masse volumique $\rho$ (Kg/ m3)	Température de fusion ( $^{\circ}C$ )
Réf (1)	0.20	$2.31 \cdot 10^3$	900	35
Réf (2)	0.26	$1.09 \cdot 10^3$	800	-
Réf (3)	0.39	$1.92 \cdot 10^3$	815	36-38
Réf (4)	0.8	$1.80 \cdot 10^3$	1510	30.4
Réf (5)	1.09	$1.40 \cdot 10^3$	1710	29.9

#### 4.7. Application :

Le 15 août 2020 Mostaganem, la température maximale a été de  $33^{\circ}C$  et la température minimale de  $25^{\circ}C$ . Il y a eu de précipitation ces jours-ci avec en tout 1 mm sur la journée. L'humidité dans l'aire était très importante (en moyenne à 80%) [33].

Pour l'application de l'équation (4.3), (4.6), (4.7) et (4.9) on va traiter les trois cas suivant :

**Tableau 4.3 :** Les données qui est utilisé dans le calcul.

15/08/2020			
Les cas	07h00	13h00	19h00
$T_{\infty 1} (^{\circ}C)$	25 °C	33 °C	31 °C
$I_s$ w/m <sup>2</sup>	499.999	499.999	499.999
$V$ m/s	5	5	5
$T_{SKY} (^{\circ}C)$	6.9°C	10.46°C	6.527 °C
$h_{ext}$ (w/m <sup>2</sup> .k)	26	26	26
$h_{int}$ (w/m <sup>2</sup> .k)	7.692	7.692	7.692

Le tableau (4.3) représente les trois cas de période qui nous avons étudié dans ce travail (7h, 13h, et à 19h) dans le mois de 15 août 2020 d'après les calculs les températures ambiante externe  $T_{\infty}$  ( $^{\circ}C$ ) et de ciel  $T_{SKY}$  ( $^{\circ}C$ ) par l'équation(4.6), et ( $I_s$ ) rayonnement solaire, puis

nous avons calculé les coefficient de transfert de chaleur par convection est à l'extérieur ( $h_{ext}$ ) par l'équation (4.7).et l'intérieur ( $h_{int}$ ) par l'équation (4.9).

#### 4.8. Forme numérique :

- **1ère cas (1D) :**

L'équation différentielle représentant le phénomène physique a été résolue en utilisant la méthode des volumes finis proposée. Les équations algébriques sont obtenues en divisant le champ scalaire en volumes élémentaires, qui sont ensuite combinés à l'aide de volumes de contrôle (Annexe 01) sur les dimensions temporelles et spatiales. L'estimation de l'équation est représentée par l'équation (4-1.1) comme suit :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + S_u \quad (4-1.1)$$

Ou :

$$a_p = a_W + a_E - S_p \quad (4-2.1)$$

$$a_E = \frac{K_E}{\Delta x} A_E \quad (4-3.1)$$

$$a_W = \frac{K_W}{\Delta x} A_W \quad (4-4.1)$$

$$S_u = a_E T_E + a_W T_W - a_p T_p \quad (4-5.1)$$

$$S_p = -a_p + a_W + a_E \quad (4-6.1)$$

✓ Concernant le premier cas (1D) nous avons utilisé la méthode (TDMA) pour détermination la solution d'équation algébrique.

- **Solution d'équation algébrique (méthode TDMA)**

La TDMA est en fait une méthode directe, mais peut être appliquée de manière itérative ligne par ligne, pour résoudre des problèmes multidimensionnels et est largement utilisée dans les programmes CFD.

- **2ème cas (2D) :**

L'équation différentielle représentant le phénomène physique a été résolue en utilisant la méthode des volumes finis proposée. Les équations algébriques sont obtenues en divisant le champ scalaire en volumes élémentaires, qui sont ensuite combinés à l'aide de volumes de contrôle (représentés sur la figure 2d) sur les dimensions temporelles et spatiales. L'estimation de l'équation est représentée par l'équation (4-7) comme suit :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + S_u \quad (4.7.1)$$

ou :

$$a_E = \frac{K_E}{\Delta x} A_E \quad (4.8.1)$$

$$a_W = \frac{K_W}{\Delta x} A_W \quad (4.9.1)$$

$$a_N = \frac{K_N}{\Delta y} A_N \quad (4.10.1)$$

$$a_S = \frac{K_E}{\Delta y} A_S \quad (4.11.1)$$

$$S_u = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S - a_P T_P \quad (4.12.1)$$

$$S_P = -a_P + a_W + a_E + a_N + a_S \quad (4.13.1)$$

- ✓ Concernant le deuxième cas (2D) nous avons utilisé la méthode (Gauss- Seidel) pour détermination la solution d'équation algébrique.

- **Solution d'équation algébrique (méthode Gauss- Seidel)**

La méthode de Gauss-Seidel est une méthode pour résoudre les systèmes linéaires  $Ax=b$ , où  $A$  est une matrice  $n \times n$  et  $x$ ,  $b$  sont des vecteurs de  $\mathbb{R}^n$ , pour résoudre aussi des problèmes multidimensionnels et est largement utilisée dans les programmes CFD.

## **Chapitre 05 :**

### **Résultats et discussion**

## 5. Résultats et discussion

### 5.1. Résultats et discussion (1<sup>ère</sup> partie de travail (1D)):

- **. Composition de la configuration :**

On distingue que le mur de construction figure (4.1) est composé de quatre genres de matériaux (ciment, plâtre, brique et MCP) et avec cinq couches de construction (ciment externe, la brique au milieu, MCP, la brique et plâtre interne). Par transfert de chaleur à rayonnement, convection et à conduction.

Est illustrée à L'extérieur ( $h_{ext}$ ) et l'intérieur ( $h_{int}$ ) le coefficient de transfert de chaleur par convection, rayonnement et conductivité thermiques  $k$ .

Cette étude de simulation pour mieux comprendre l'échange thermique. La figure 4.2 représente la distribution de la température par langage de **MATLAB** Pour une seule dimension et avec les conditions aux limites Pour le jour de 15 aout 2020.

On remarque à 7h dans le premier figure (5.1) que la température elle est optimale au niveau de ciment externe 24 °C et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP .Il va voir une dégradation remarquable de température par ce que la conductivité thermique de MCP différents entre (0.2/1.09) .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu'on est entré dans le plâtre, la température va jusqu'à sortir de ce matériau 21°C pour obtenir la température inférieure.

On remarque à 13h dont le deuxième figure (5.2) que la température elle est optimale au niveau de ciment externe 32.528 et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP .Il va voir une dégradation remarquable de température par ce que la conductivité thermique de MCP différents entre (0.2/1.09) .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu'on est entré dans le plâtre .la température va jusqu'à sortir de ce matériau 21.874°C pour obtenir la température inférieure avec un peu de changement de température par rapport à premier figure (5.1) .

On remarque à 19h dont le troisième figure (5.3) que la température elle est optimale au niveau de ciment externe 30.5 °C et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP .Il va voir une dégradation remarquable de température par ce que la conductivité thermique de MCP différents entre (0.2/1.09) .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu'on est entré dans le plâtre .la température va jusqu'à sortir de ce matériau 21°C pour obtenir la température inférieure.

-peu importe le changement le période de temps à trois cas dans la journée de 15 aout 2020 et prennent conductivité thermique une variable entre (0.2/1.09) dans les trois cas et donc, plus ça augmenter conductivité thermique a augmenté la température de MCP.

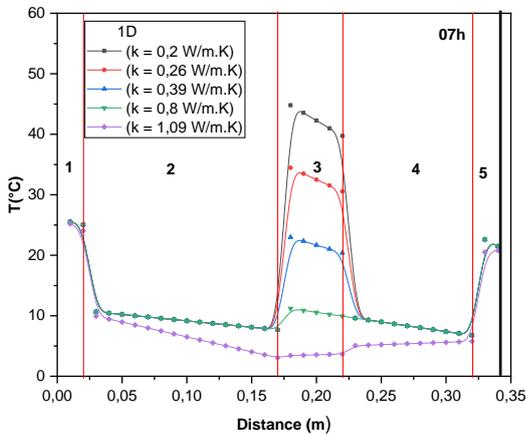


Figure 5.1 : Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur avec changement des MCP, (Matin (07h)).

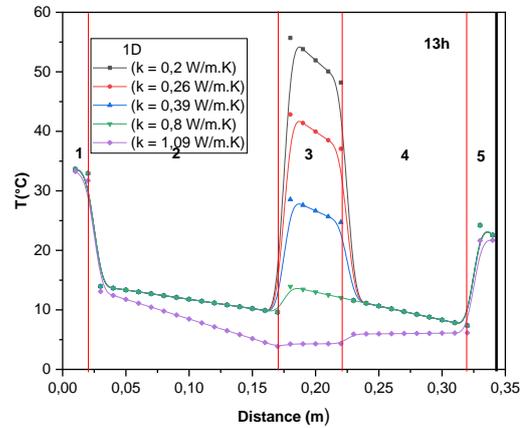


Figure 5.2 : Distribution de la température sur les l'épaisseur du changement mur avec des MCP, (Après midi (13 h)).

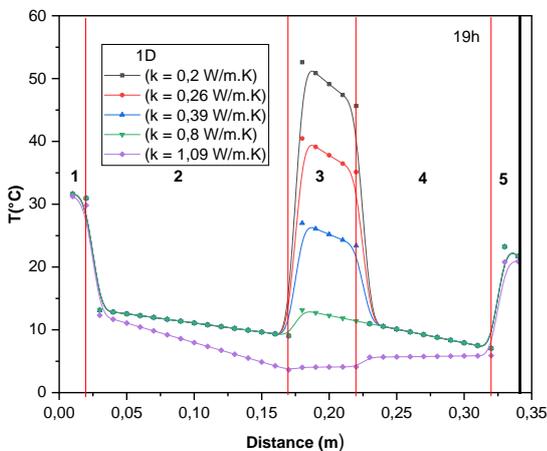


Figure 5.3: Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur avec changement des MCP, (Soir (19 h)).

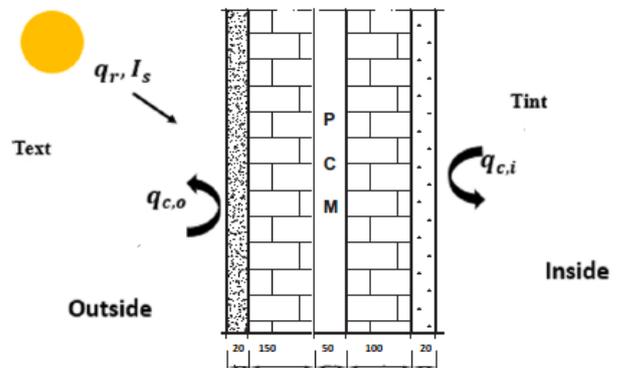


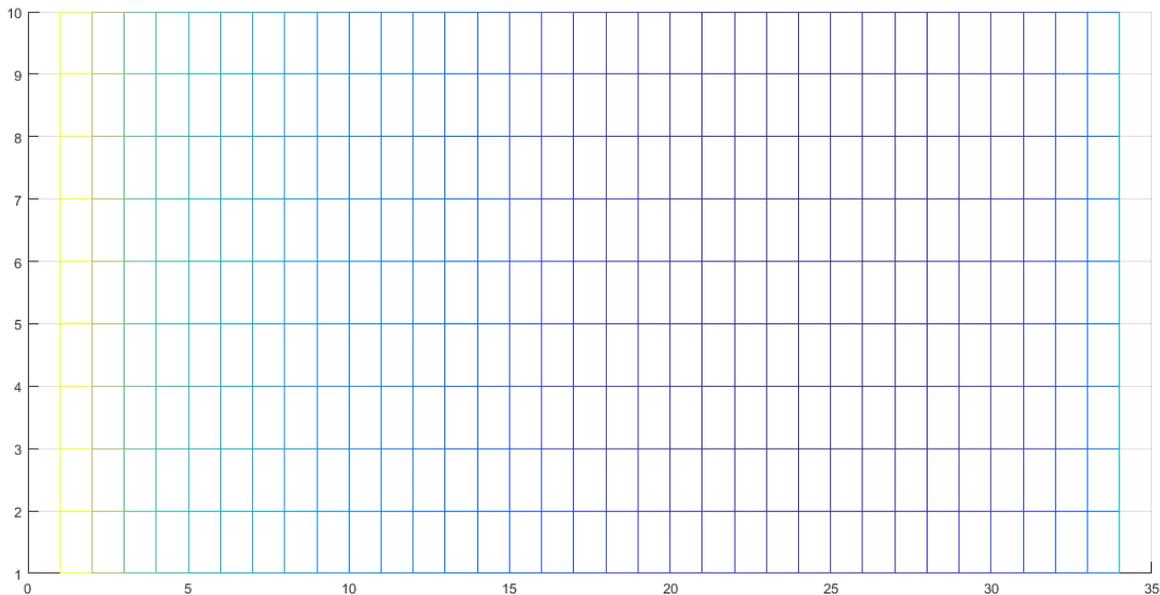
Figure 4.1: Domaine de calcul.

## 5.2. Résultats et discussion (2<sup>ème</sup> partie de travail (2D)) :

- Génération de maillage :

La première étape de la méthode des volumes finis consiste à diviser le domaine en discrets contrôler les volumes. Chaque nœud est entouré d'un volume ou d'une cellule de contrôle. Les nœuds à l'ouest, l'est, le nord, le sud sont identifiés par W, E, N et S respectivement. De plus,

les faces latérales du le volume de contrôle sont désigné par ‘w’ , ‘e’ , ‘n’ , ‘ s’ . Les distances entre les nœuds W et P, et entre les nœuds P et E, sont identifiés respectivement.



**Figure 5.4 : Représentation de maillage non structuré en deux dimensions (2D) (34x10).**

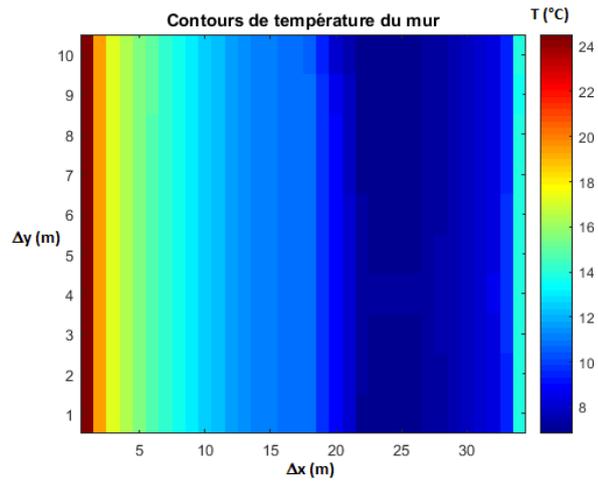
Dans la figure (5.5), nous avons représenté les résultats numériques des contours de la température et l’influence de la distribution sur le mur avec changement de matériaux à changement de phase (MCP) dans la période de matin (07 heures). Cette étude pour mieux comprendre l’échange thermique.

Dans la figure (5.6), on remarque à matin (07h) que la température elle est optimale au niveau du ciment externe 24 °C et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP .Il va voir une dégradation remarquable de température par ce que la conductivité thermique de MCP différents entre (0.2/1.09) .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu’on est entré dans le plâtre .la température va jusqu’à sortir de ce matériau 21°C pour obtenir la température inférieure .

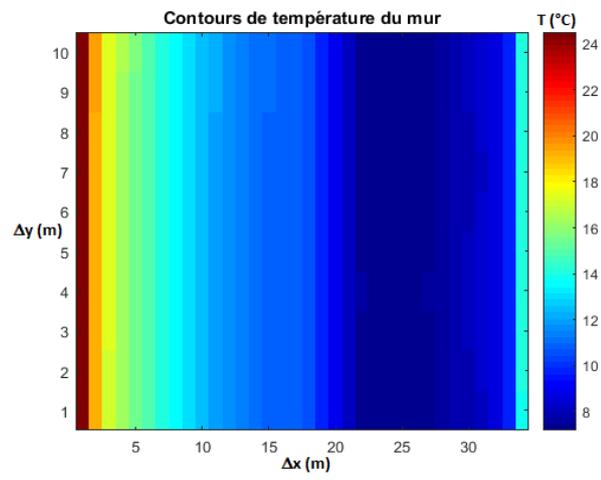
Après les conditions physiques sur les hypothèses, l’analyse de la distribution de température des matériaux mous à avoir une distribution de température parabolique à la température maximale à  $x= 0$ . Comme en négliger la résistance de contact entre les deux matériaux (le flux sortant de matériaux (Brique) égale le flux d’entrée de matériaux (MCP) et la température est même et maintenant la distribution de température va être linéaire.

07h

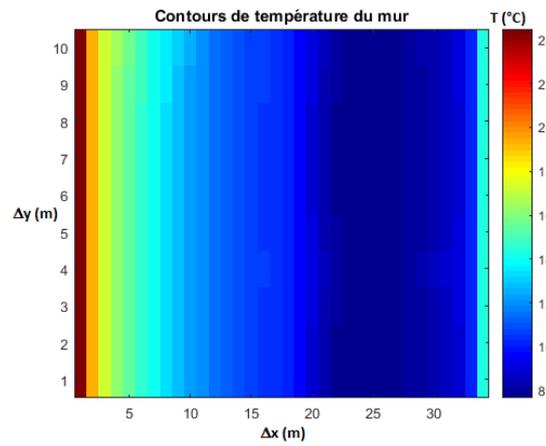
$k = 0.2$



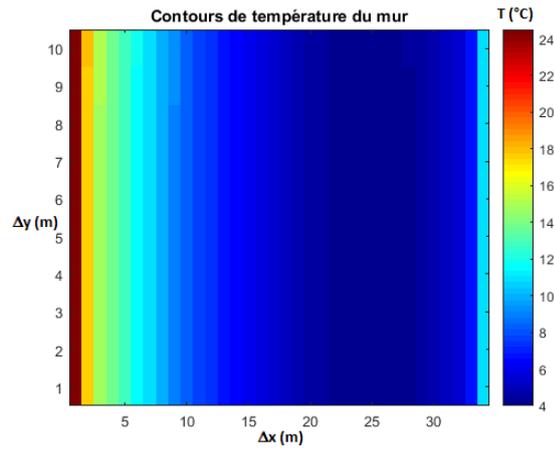
$k = 0.26$



$k = 0.39$



$k = 0.8$



$k = 1.09$

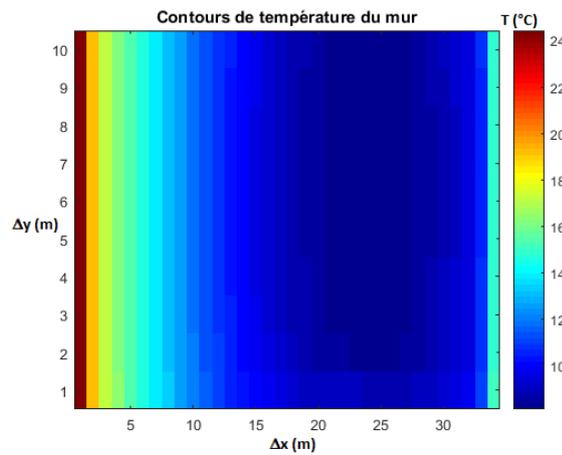


Figure 5.5 : Contours de la distribution de température du mur avec changement de MCP, (Le 15/08/2020 à matin (07 h).

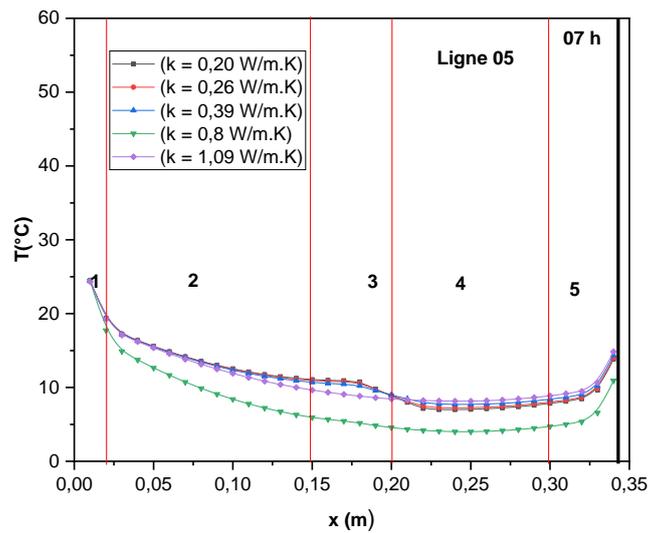
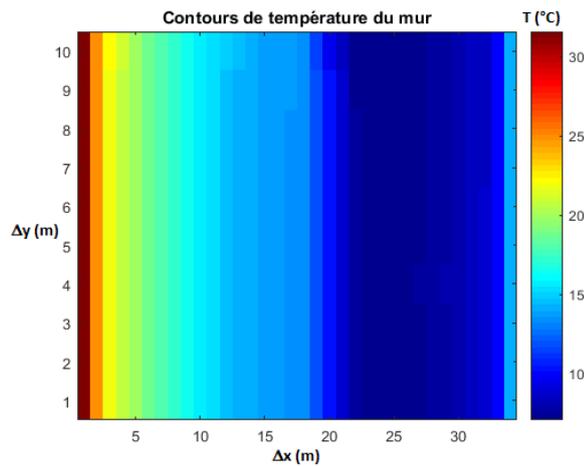


Figure 5.6 : Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur avec changement des MCP dans la période matin (07h).

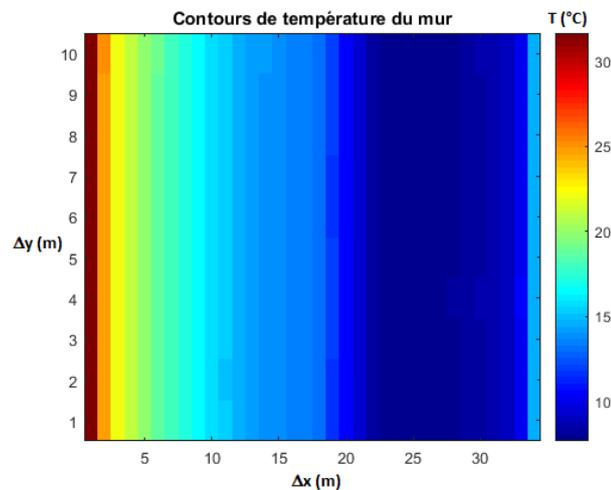
Dans les figures (5.7, 5.8), on remarque dans la période après midi à 13h, que la température elle est optimale au niveau du ciment externe 32.528 et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP. Il va voir une dégradation remarquable de température par ce que la conductivité thermique de MCP différents entre (0.2/1.09) .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu'on est entré dans le plâtre .la température va jusqu'à sortir de ce matériau 21.874°C pour obtenir la température inférieure. L'analyse de la distribution de température des matériaux mous avons avoir une distribution de température parabolique à la température maximale à  $x=0$ . Comme en négliger la résistance de contact entre les deux matériaux (le flux sortant de matériaux (Brique) égale le flux d'entrée de matériaux (MCP) et la température est même et maintenant la distribution de température va être linéaire.

**13h**

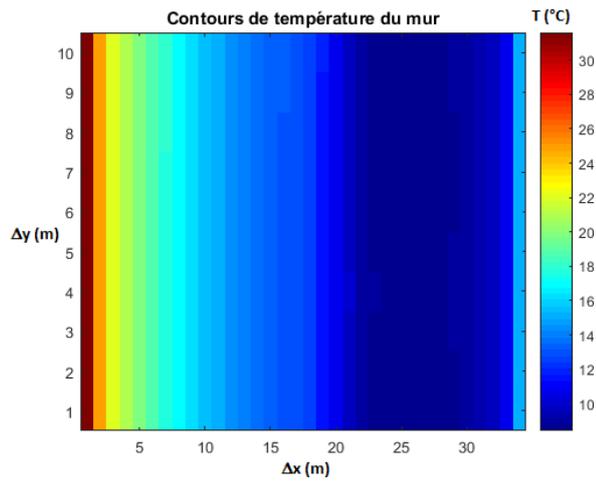
**$k = 0.2$**



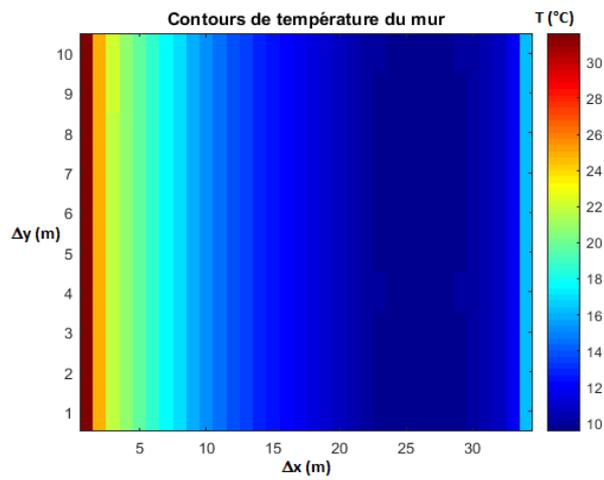
**$k = 0.26$**



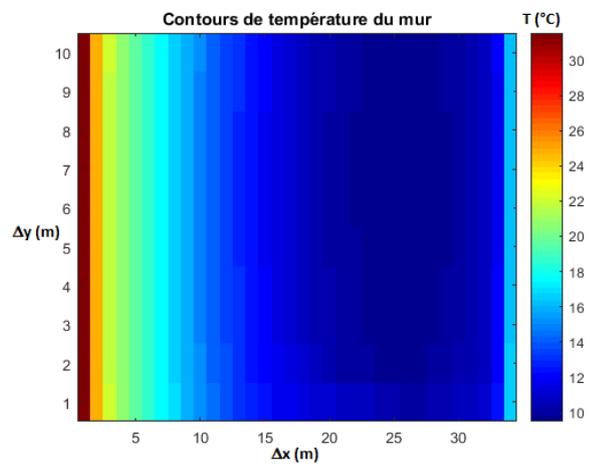
**k = 0.39**



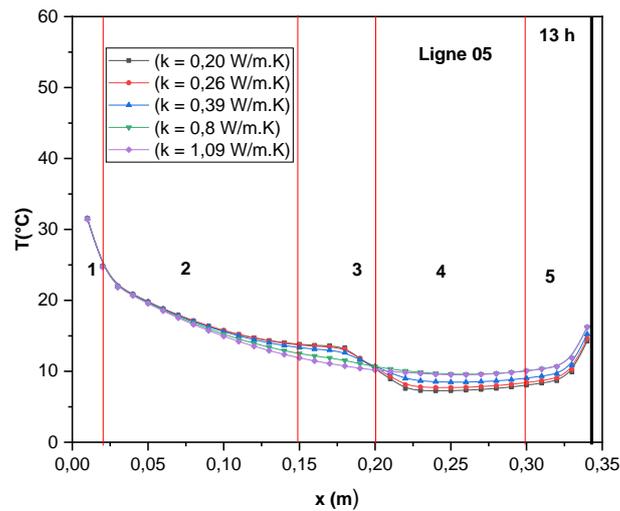
**k = 0.8**



**k = 1.09**



**Figure 5.7 : Contours de la distribution de température du mur avec changement de MCP, (Le 15/08/2020 à après midi (13 h).**

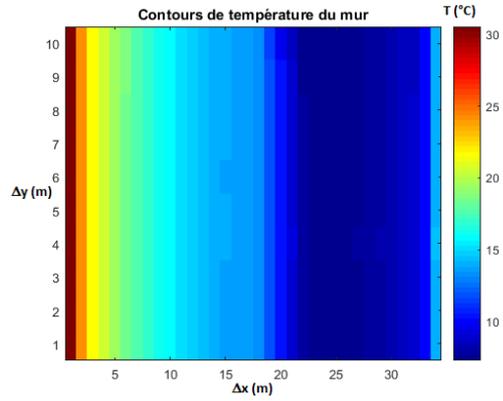


**Figure 5.8 : Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur avec changement des MCP dans la période après midi (13h).**

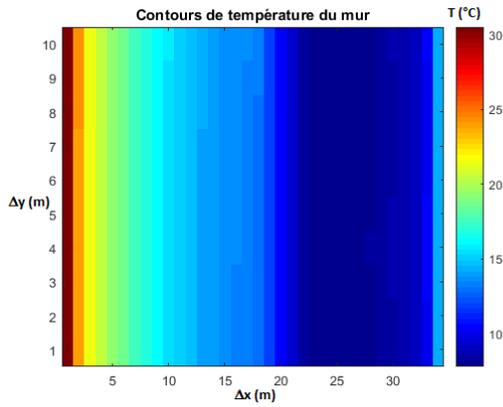
Dans les figures (5.9, 5.10), on remarque dans la période de soir à 19h, que la température elle est optimale au niveau du ciment externe 30.5 °C et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP .Il va voir une dégradation remarquable de température par ce que la conductivité thermique de MCP différents entre (0.2/1.09) .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu'on est entré dans le plâtre .la température va jusqu'à sortir de ce matériau 21°C pour obtenir la température inférieure. Même dans la figure 11 l'analyse de la distribution de température des matériaux mous à avoir une distribution de température parabolique à la température maximale à  $x=0$ . Comme en négliger la résistance de contact entre les deux matériaux (le flux sortant de matériaux (Brique) égale le flux d'entrée de matériaux (MCP) et la température est même et maintenant la distribution de température va être linéaire.

19h

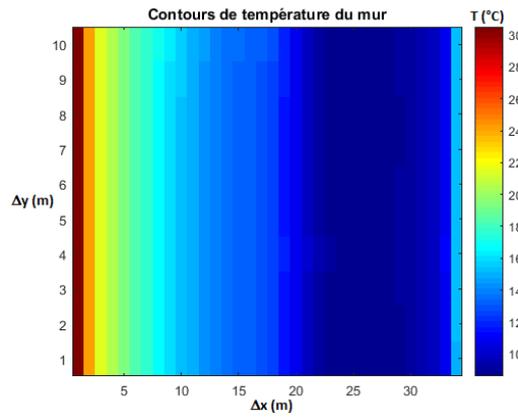
$k = 0.2$



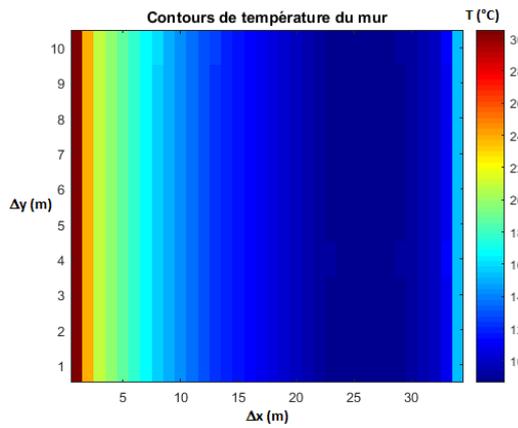
$k = 0.26$



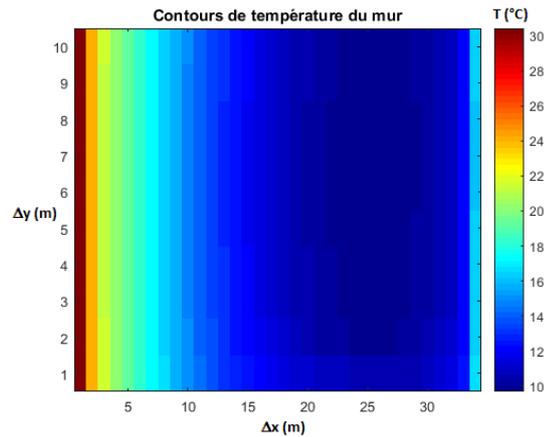
$k = 0.39$



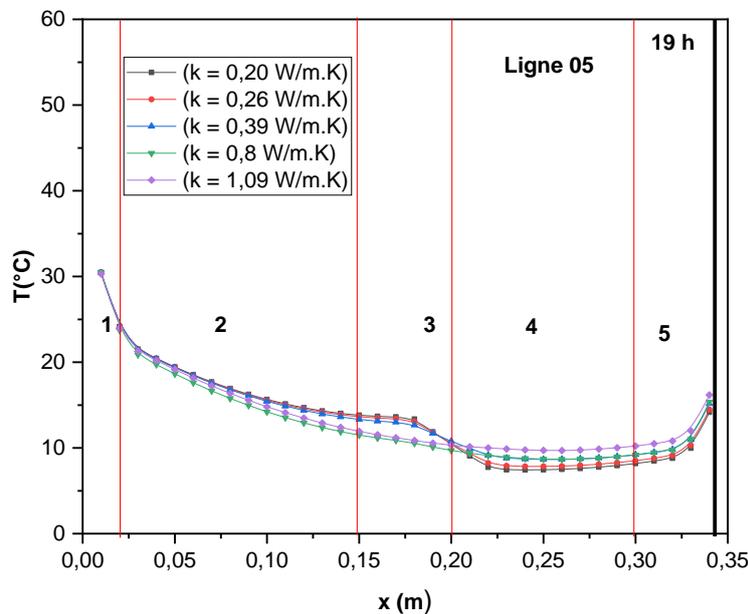
$k = 0.8$



**k = 1.09**



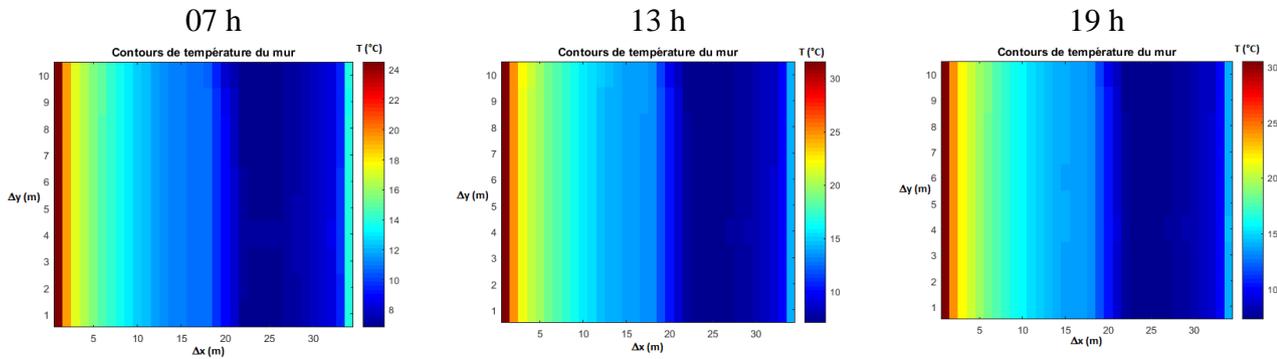
**Figure 5.9 : Contours de la distribution de température du mur avec changent de MCP, (Le 15/08/2020 à le soir (19 h).**



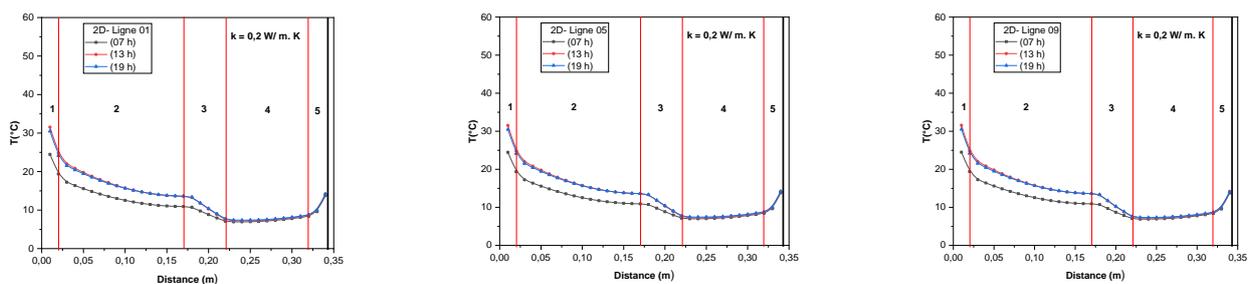
**Figure 5.10 : Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur avec changement des MCP dans la période soir (19h).**

Les figures (5.11, 5.12), représenté les contours de température et la distribution de la température sur l'épaisseur du mur avec une conductivité thermique  $k = 0.2$  W/ m.K dans différents périodes (Matin, après midi et le soir). On remarque que la température elle est optimale au niveau de ciment externe et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP .Il va voir une dégradation remarquable de température .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu'on est entré dans le plâtre .la température va jusqu'à sortir de ce matériau 21°C pour

obtenir la température inférieure Nous faisons prendre conductivité thermique dont le MCP  $k = 0.2 \text{ W/ m.K}$  et nous avons changés le temps dans les trois cas, la température de MCP elle reste constante.

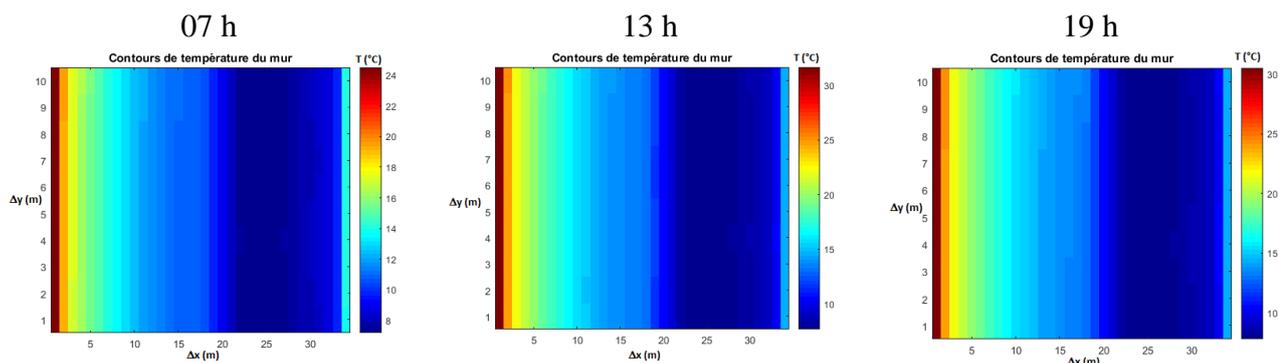


**Figure 5.11 : L'influence de temps sur la distribution de température pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.2 \text{ W/m. K}$ )**

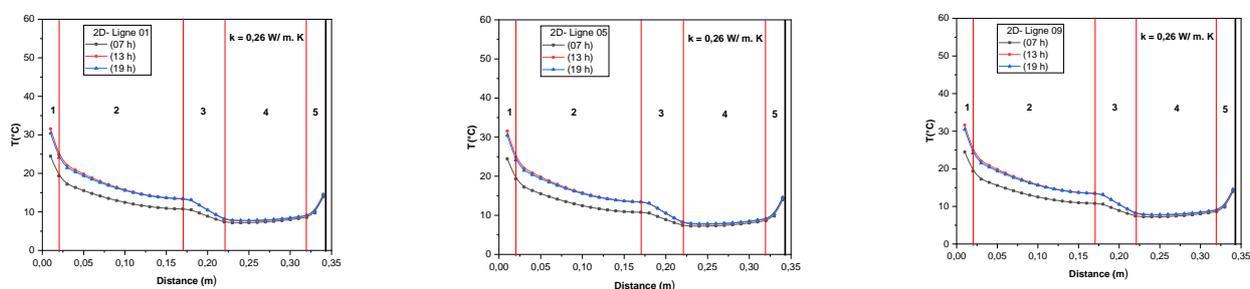


**Figure 5.12 : Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.2 \text{ W/m. K}$ )**

Les figures (5.13, 5.14), représenté les contours de température et la distribution de la température sur l'épaisseur du mur avec une conductivité thermique  $k = 0.26 \text{ W/ m.K}$  dans différents périodes (Matin, après midi et le soir). On remarque que la température elle est optimale au niveau du ciment externe et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP .Il va voir une dégradation remarquable de température .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu' on est entré dans le plâtre .la température va jusqu'à sortir de ce matériau  $21^\circ\text{C}$  pour obtenir la température inférieure.

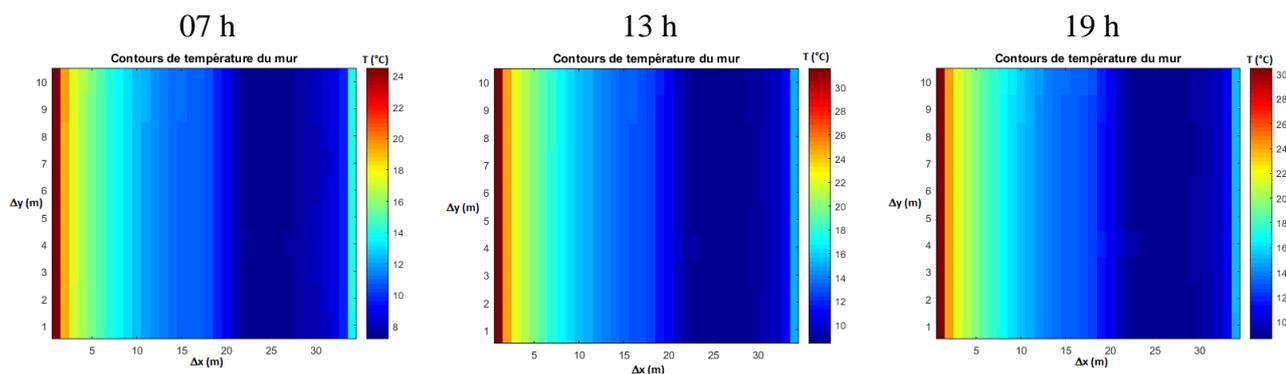


**Figure 5.13 : L'influence de temps sur la distribution de température pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.26 \text{ W/m. K}$ )**

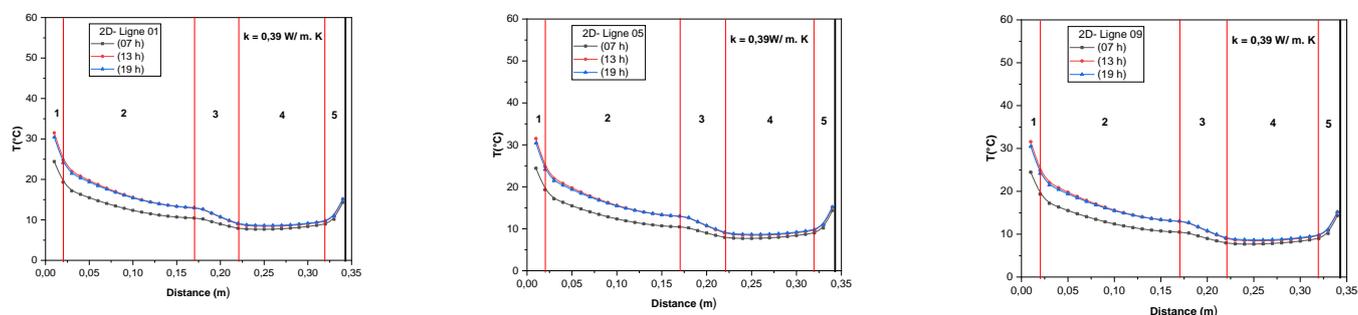


**Figure 5.14 : Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.26 \text{ W/m. K}$ )**

Les figures (5.15, 5.16), représenté les contours de température et la distribution de la température sur l'épaisseur du mur avec une conductivité thermique  $k = 0.39 \text{ W/ m.K}$  dans différent périodes (Matin, après midi et le soir). On remarque que la température elle est optimale au niveau de ciment externe et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP .Il va voir une dégradation remarquable de température .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu'on est entré dans le plâtre .la température va jusqu'à sortir de ce matériau  $21^{\circ}\text{C}$  pour obtenir la température inférieure.

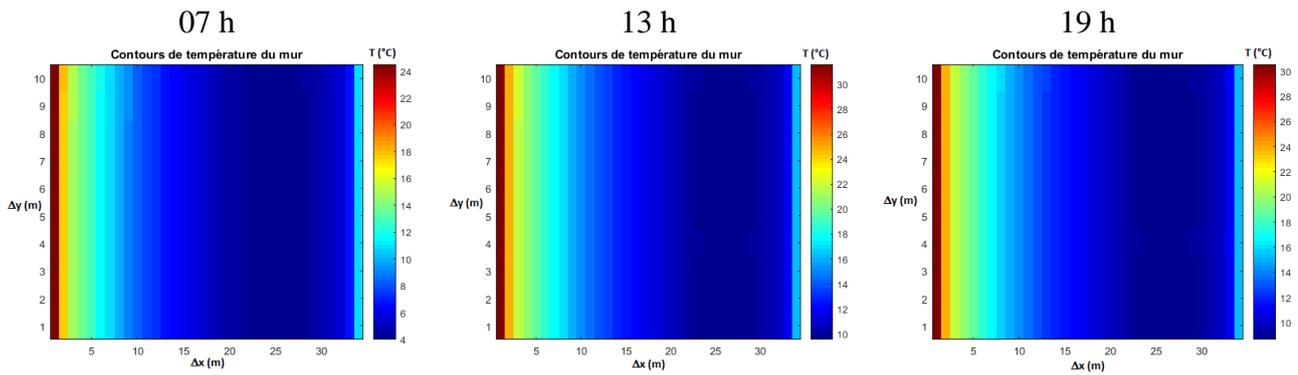


**Figure 5.15 : L'influence de temps sur la distribution de température pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.39 \text{ W/m. K}$ )**

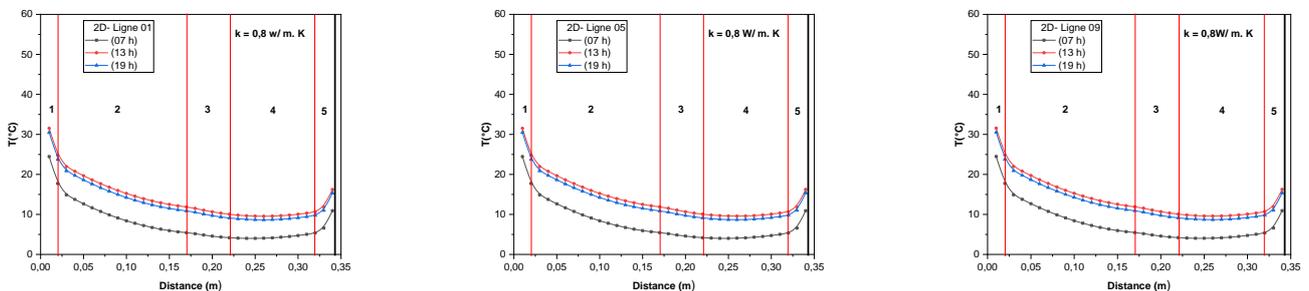


**Figure 5.16 : Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.39 \text{ W/m. K}$ )**

Les figures (5.17, 5.18), représenté les contours de température et la distribution de la température sur l'épaisseur du mur avec une conductivité thermique  $k = 0.8 \text{ W/ m. K}$  dans différents périodes (Matin, après midi et le soir). On remarque que la température elle est optimale au niveau du ciment externe et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP .Il va voir une dégradation remarquable de température .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu' on est entré dans le plâtre .la température va jusqu'à sortir de ce matériau  $21^\circ\text{C}$  pour obtenir la température inférieure.

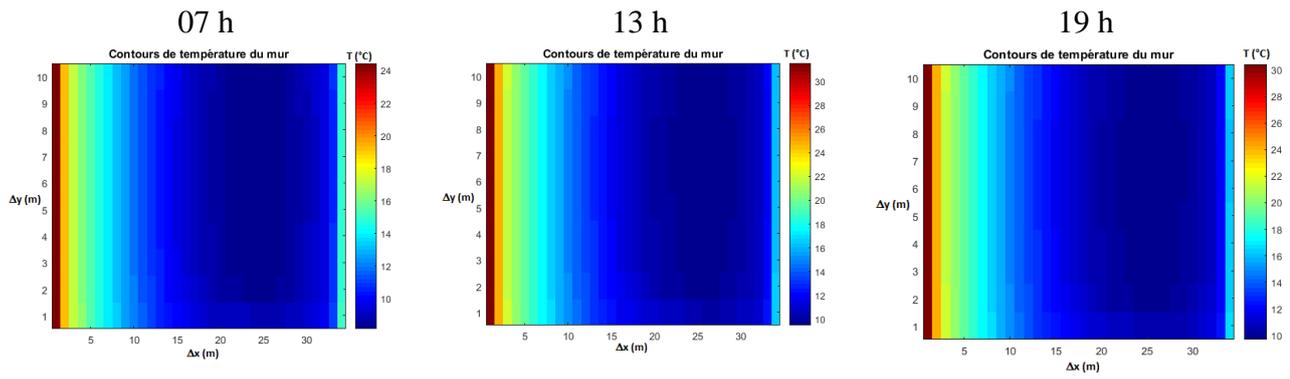


**Figure 5.17 : L'influence de temps sur la distribution de température pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.8 \text{ W/m. K}$ )**

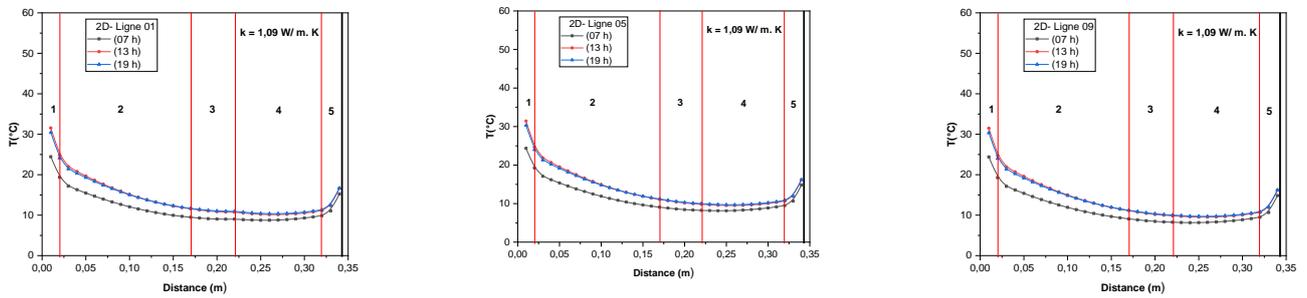


**Figure 5.18 : Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 0.8 \text{ W/m. K}$ )**

Les figures (5.19, 5.20), représenté les contours de température et la distribution de la température sur l'épaisseur du mur avec une conductivité thermique  $k = 1.09 \text{ W/ m.K}$  dans différents périodes (Matin, après midi et le soir). On remarque que la température elle est optimale au niveau du ciment externe et puis elle commence à chuter dans le brique 01 et aussi dans le domaine MCP .Il va voir une dégradation remarquable de température .et par suite une faible chute de température aux cours de deuxième couche de brique et finalement lorsqu'on est entré dans le plâtre .la température va jusqu'à sortir de ce matériau  $21^\circ\text{C}$  pour obtenir la température inférieure.



**Figure 5.19 : L'influence de temps sur la distribution de température pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 1.09 \text{ W/m. K}$ )**



**Figure 5.20 : Distribution de la température sur les l'épaisseur du mur pour le cas de la conductivité thermique ( $k = 1.09 \text{ W/m. K}$ )**

# Conclusion

## **Conclusion :**

Cette mémoire étudie l'effet du MCP sur la distribution de la température dans d'un mur de bâtiment. Une simulation comparative d'un mur de bâtiment avec les MCP a été réalisée en soumettant le mur à différentes conditions (température de changement de phase et conditions météorologiques).

Un schéma numérique de la méthode des volumes finis pour la conduction thermique bidimensionnelle en régime permanent à travers une paroi composite a été utilisé. La division de la grille du mur, la discrétisation et la résolution des équations algébriques étaient les trois étapes principales de la méthode des volumes finis. De plus, les conditions aux limites qui délimitent le mur sont considérées par la méthode des volumes finis.

Le mur a ensuite été réalisé en une dimension en faisant circuler la conduction thermique du problème à deux dimensions dans une dimension afin de tester la solution de la méthode des volumes finis. Les résultats montrent les contours de température du champ de température.

Les résultats de ce travail montrent qu'il n'y a pas de température optimale claire qui minimise la charge thermique à travers le mur. Dans les conditions utilisées dans ce travail, cette température est comprise entre 25 °C et 33 °C, selon la période, changement le type de MCP et l'emplacement et de la couche de MCP.

Après cette étude que nous avons réalisée, nous avons finalement découvert que pour travailler sur les matériaux à changement de phase dans le domaine de la construction de murs de bâtiments, il faut tout d'abord choisir les matériaux à changement de phases optimales. Le choix d'un matériau à changement de phase (MCP) dépend principalement de ses propriétés thermo physiques. Dans cette étude, la température de changement de phase a été considérée comme le critère principal, suivie par la densité, la conductivité thermique, la chaleur latente de fusion et la capacité thermique massique. Ces facteurs sont considérés comme essentiels pour déterminer les performances d'un MCP.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques :

- [1] Ahmad, M., « Nouveaux Composants Actifs pour la Gestion Énergétique de L'Enveloppe Légère des Bâtiments », Ph.D. Thesis, Université Joseph Fourier, Nov. 2004.
- [2] M. Telkes, 'Thermal Storage for Solar Heating and Cooling', Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings, Charlotte Ville, Virginia, USA, 1975.
- [3] G.A. Lane, 'Latent Heat Storage: Background and Scientific Principles', Vol. 1, CRC Press, Boca Raton, 15 p., 1983.
- [4] B. Farouk and S.I. Guceri, 'Tromb-Michal Wall Using a Phase Change Material', In Alternative Energy Sources II, Proceedings of the Second Miami International Conference, Miami, December 10-13, 1979.
- [5] R.J. Kedl, 'Conventional wallboard with latent heat storage for passive solar applications', 25th Inter-Society Energy Conversion Engineering Conference, Reno, NV, pp. 12-17, 1990.
- [6] H. Singh, R.P. Saini and J.S . Saini, "A review on packed bed solar energy storage systems", Renew Sustain Energy Rev, vol.14, pp. 1059–69, 2010.
- [7] Z. Weihuan, A. Elmozughi, A. Oztekin and S. Neti, "Heat transfer analysis of encapsulated phase change material for thermal energy storage", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.63, pp. 323–335, 2013
- [8] F. Kuznik, J. Virgone and J.J. Roux, 'Energetic Efficiency of Room Wall Containing PCM Wallboard: A Full-Scale Experimental Investigation', Energy and buildings, Vol. 40, N°2, 148 – 156, 2008.
- [9] 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.
- [10] C. Chen et al, A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard, Energy and Buildings. (2008) 40, 882–890.
- [11] S.S. Haghshena.et al, Simulation of Thermal Storage Phase Change Material in Buildings, World Academy of Science, Engineering and Technology. (2009) 34.
- [12] A. Castell, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling; Energy and Buildings. (2010) 42, 534-540.
- [13] 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.
- [14] F. Kuznik et al, A review on phase change materials integrated in building walls; Renewable and Sustainable Energy Reviews. (2011) 15, 379-391.
- [15] <https://docplayer.fr/19014578-S-bensaada-m-t-bouziiane-transfert-de-chaleur.html>

- [16] : D. DUVAL, Ailettes thermique, Institut National Des Sciences Appliquée de Rouen, Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur.2013.
- [17] : Cour de convection et rayonnement-4, plate forme TTE-C.E.S.I.R.E, Université Joseph Fourier-Grenoble.pdf.
- [18] Serge Blaise Ekomy Ango «Contribution au stockage d'énergie thermique e<sup>2</sup> bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase» l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [19] WWW.MCI6TECH.COM.
- [20] A. F. Regin, S.C. Solanki et J.S. Saini «Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews», Vol. 12, pp. 2438-2458, 2008.
- [21] Serge Blaise EKOMY ANGO « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase» l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [22] S Hohlein, A Konig-Haagen, D Bruggemann. Thermophysical characterization of MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, xylitol and erythritol as phase change materials (PCM) for latent heat thermal energy storage (LHTES). Materials (Basel) 10 (2017) 444
- [23] Y Cascone, M Perino. Estimation of the thermal properties of PCM through inverse modelling. Energy Procedia 78 (2015) 1714–9
- [24] H-Y Wang, S-S Lu. Study on thermal properties of phase change material by an optical DSC system. Appl Therm Eng, 60 (2013) 132–6.
- [25] J Mazo, M Delgado, C Penalosa, P Dolado, I Miranda, A Lazaro. Evaluation of the suitability of different calorimetric methods to determine the enthalpy-temperature curve of granular PCM composites. Appl Therm Eng, 125 (2017) 306–16
- [26] E. Rodriguez-Ubinas, L. Ruiz-Valero, S. Vega, J. Neila, Applications of phase change material in highly energy-efficient houses, Energy Build. 50 (July) (2012) 49–62.
- [27]. Maha AHMED, couplage matériaux à changement de phase, sup isolation ,apport solaire .(2013)
- [28] M. Pierre Pedro« développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique ».Institut national polytechnique de toulouse,lundi 9 décembre (2013).
- [29] C.V. Konstantinidou, A. Novoselac, Integration of Thermal Energy Storage in Buildings, Univ. Tex., Austin, (2010).
- [30] M. Pomianowski, P. Heiselberg, Y. Zhang, Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings, Energy Build. 67 (2013) 56–69.

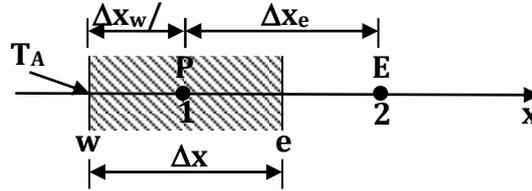
- [31] L. Royon, L. Karim, A. Bontemps, Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings, *Energy Build.* 63 (2013) 29–35.
- [ 32] J Kosny, E Kossecka, A. Brzezinski, A Tleoubaev, D Yarbrough, Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs), *Energy Build.* (2021) 52.
- [33] <https://www.historique-meteo.net/afrique/algerie/mostaganem/2021/01/#moyennes>  
<https://www.historique-meteo.net/afrique/algerie/mostaganem/2020/08/#moyennes>
- [34] 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].
- [35] K. Darkwa , P.W. O Callaghan, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building. *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 853–858.
- [36] 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].
- [37] M.A.Izquierdo-Barrientos et al; Anumerical study of external building walls containing. *Applied thermal engineering.*(2012)47:73-85
- [38] H.B. Awbi, A. Hatton, Natural convection from heated room surfaces, *Energy and Buildings* 30 (1999) 233e244.
- [39 ] 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.

# **Annexe 01**

## 1 .le premier cas :

Discretiser l'équation de la chaleur monodimensionnelle cotée extérieur :

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) + q_{con\_ray-ext} = 0$$



Pour introduire les conditions aux limites au niveau des nœuds (1 et 34), nous appliquons une approximation linéaire pour des températures comprises entre le nœud de la frontière et le nœud adjacent.

### noeud 1

L'**Ouest** est une frontière à température constante ( $T_A=Cst$ )

Au nœud (1) la température à la frontière Ouest est connue. Intégration de l'équation de la chaleur au volume de contrôle entourant le nœud (1) donne:

L'intégration de l'équation sur le volume de contrôle de centre P donne :

$$\int_w^e \frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) dv + \int_w^e q_{con\_ray-ext} dv = 0$$

L'équation de la chaleur peut s'écrire:

$$\Rightarrow \left[ kA \frac{dT}{dx} \right]_w^e + q_{con\_ray-ext} A = 0 \Rightarrow \left[ k_e A \frac{T_E - T_P}{\Delta x_e} \right] - \left[ k_w A \frac{T_P - T_A}{\Delta x_w/2} \right] + q_{con\_ray-ext} A_c = 0$$

$$\Rightarrow \frac{k_{c_e} A_{c_e}}{\Delta x_e} T_P + \frac{2k_{c_w} A_{c_w}}{\Delta x_w} T_P = \frac{k_{c_e} A_{c_e}}{\Delta x_e} T_E + \frac{2k_{c_w} A_{c_w}}{\Delta x_w} T_A + q_{con\_ray-ext} A_c$$

$$\Rightarrow \left( \frac{k_{c_e} A_{c_e}}{\Delta x_e} + \frac{2k_{c_w} A_{c_w}}{\Delta x_w} \right) T_P = \frac{k_{c_e} A_{c_e}}{\Delta x_e} T_E + \frac{2k_{c_w} A_{c_w}}{\Delta x_w} T_A + q_{con\_ray-ext} A_c$$

⇒ L'équation ci-dessus peut être réarrangé que :

$$\left( \frac{3k_c A_c}{\Delta x} \right) T_P = \frac{k_c A_{c_e}}{\Delta x} T_E + \frac{2k_c A_{c_w}}{\Delta x} T_A + q_{con\_ray-ext} A_{c_w}$$

Pour un maillage régulier  $\Delta x_w = \Delta x_e = \Delta x$

$$a_P T_P = a_w T_w + a_E T_E + S_u$$

$$\text{avec } a_E = \frac{k_c A_{c_e}}{\Delta x} \text{ et } a_w = 0 \quad a_P = \frac{3k_c A_c}{\Delta x}$$

$$S_u = \frac{2k_c A_{c_w}}{\Delta x} T_A + q_{con\_ray-ext} A_{c_w}$$

Si  $k=Constante$  donc  $k_w=k_e=k$

$$a_P T_P = a_w T_w + a_E T_E + S_u$$

aE	aw	ap	Su
26 10 <sup>-3</sup>	0	78 10 <sup>-3</sup>	1765.9 10 <sup>-3</sup>

$$78T_1=26T_2+1765.9$$

### noeud 2

L'équation ci-dessus peut être réarrangé que :

$$\left(\frac{2k_c A_c}{\Delta x}\right) T_P = \frac{k_c A_c}{\Delta x} T_W + \frac{k_{E1} A_{E1}}{\Delta x} T_E$$

$$52T_2=26T_1+60T_3$$

### noeud 4

L'équation ci-dessus peut être réarrangé que :

$$\left(\frac{2k_{E1} A_{E1}}{\Delta x}\right) T_P = \frac{k_{E1} A_{E1}}{\Delta x} T_W + \frac{k_{E1} A_{E1}}{\Delta x} T_E$$

$$120T_4=60T_3+60T_5$$

### noeud 19

L'équation ci-dessus peut être réarrangé que :

$$\left(\frac{2k_{pcm} A_{pcm}}{\Delta x}\right) T_P + \frac{k_{pcm} A_{pcm}}{\Delta x} T_W = \frac{k_{pcm} A_{pcm}}{\Delta x} T_E$$

$$15T_{19}=7.5T_{18}+7.5T_{20}$$

### noeud 24

L'équation ci-dessus peut être réarrangé que :

$$\left(\frac{2k_{B2} A_{B2}}{\Delta x}\right) T_P = \frac{k_{B2} A_{B2}}{\Delta x} T_W + \frac{k_{B2} A_{B2}}{\Delta x} T_E$$

$$80T_{24}=40T_{23}+40T_{25}$$

### noeud 34

L'équation ci-dessus peut être réarrangé que :

$$\left(\frac{3k_p A_p}{\Delta x}\right) T_P = \frac{k_p A_p}{\Delta x} T_W + \frac{2k_p A_p}{\Delta x} T_B + q_{con-int} A_p$$

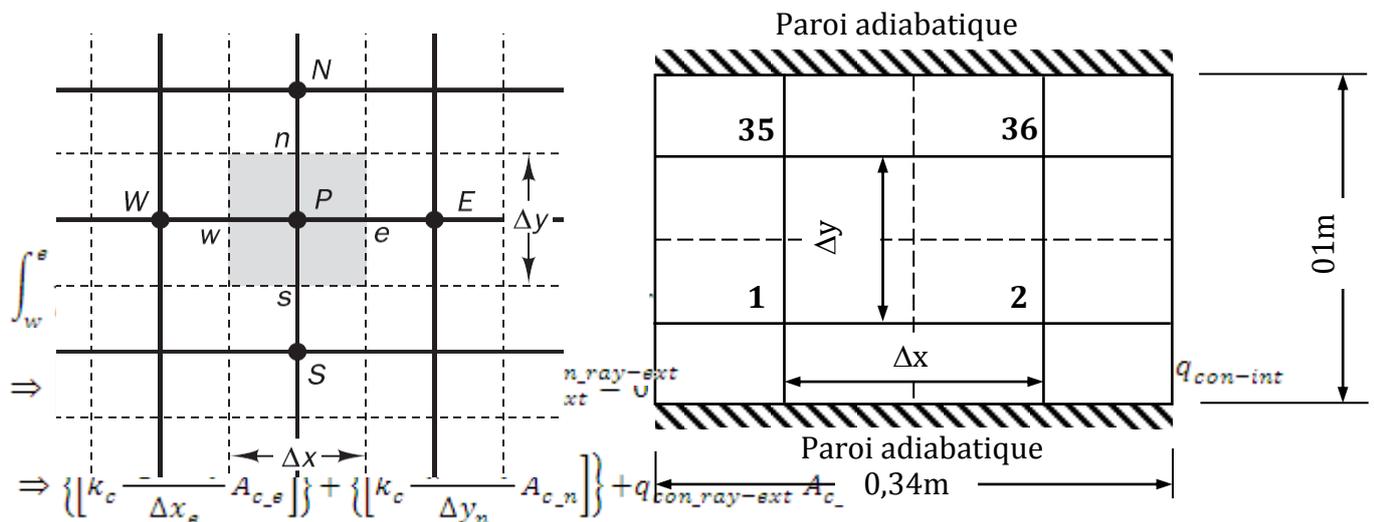
$$34.2T_{34}-11.4T_{33}=495.$$

## 2. le deuxième cas : noeud 1

L'équation de la chaleur bidimensionnelle sans source de chaleur en régime permanent:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_{con\_ray-ext} = 0$$

Nous intégrons l'équation de la chaleur sur le volume de contrôle suivant:



$$\Rightarrow \left\{ \left[ k_c \frac{\Delta y}{\Delta x_e} A_{c,s} \right] \right\} + \left\{ \left[ k_c \frac{\Delta x}{\Delta y_n} A_{c,n} \right] \right\} + q_{con\_ray-ext} A_{c,w}$$

$$\Rightarrow \left( \frac{k_c}{\Delta x_e} A_{c,s} + \frac{k_c}{\Delta y_n} A_{c,n} \right) T_P = \frac{k_c}{\Delta x_e} A_{c,s} T_E + \frac{k_c}{\Delta y_n} A_{c,n} T_N + q_{con\_ray-ext} A_{c,w}$$

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + S_u$$

$$avec : a_P = \frac{k_c}{\Delta x} A_{c,s} + \frac{k_c}{\Delta y} A_{c,n} \cdot a_E = \frac{k_c}{\Delta x} A_{c,s}, \quad a_W = 0, \quad a_N = \frac{k_c}{\Delta y} A_{c,s}$$

$$et \ a_S = 0$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \quad S_u = q_{con\_ray-ext} A_{c,w}$$

$$A_{c,e} = A_{c,w} = e \cdot \Delta y \quad ; \quad A_{c,n} = A_{c,s} = e \cdot \Delta x$$

$$k_e = k_w = k_n = k_s = ? \text{ W/m.K}$$

### Le noeud 35

$$\Rightarrow \left( \frac{k_c}{\Delta x_e} A_{c,s} + 2 \frac{k_c}{\Delta y} A_{c,n} \right) T_P$$

$$= \frac{k_c}{\Delta x} A_{c,s} T_E + \frac{k_c}{\Delta y_n} A_{c,n} T_N + \frac{k_c}{\Delta y_s} A_{c,s} T_S + q_{con\_ray-ext} A_{c,w}$$

### noeud 307

$$\Rightarrow \left( \frac{k_c}{\Delta x} A_{c,s} + \frac{k_c}{\Delta y} A_{c,s} \right) T_P = \frac{k_c}{\Delta x} A_{c,s} T_E + \frac{k_c}{\Delta y} A_{c,s} T_S + q_{con\_ray-ext} A_{c,w}$$

### noeud 34

$$\left( \frac{k_p}{\Delta x} A_{p,w} + \frac{k_p}{\Delta y} A_{p,n} \right) T_P = \frac{k_p}{\Delta x} A_{p,w} T_W + \frac{k_p}{\Delta y} A_{p,n} T_N + q_{con\_int} A_{p,e}$$

**noeud 340**

$$\left( \frac{k_p}{\Delta x} A_{p_w} + \frac{k_p}{\Delta y} A_{p_s} \right) T_P = \frac{k_p}{\Delta x} A_{p_w} T_W + \frac{k_p}{\Delta y} A_{p_s} T_s + q_{con\_int} A_{p_s}$$

**noeud 40**

$$\left( 2 \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_e} + \frac{k_{B1}}{\Delta y} A_{B1_s} \right) T_P = \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_w} T_W + \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_e} T_E + \frac{k_{B1}}{\Delta y} A_{B1_s} T_s$$

**noeud 2**

$$\left( 2 \frac{k_c}{\Delta x} A_{c_e} + \frac{k_c}{\Delta y} A_{c_n} \right) T_P = \frac{k_c}{\Delta x} A_{c_w} T_W + \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_e} T_E + \frac{k_c}{\Delta y} A_{c_n} T_N$$

**noeud 70**

$$\left( 2 \frac{k_c}{\Delta x_e} A_{c_e} + 2 \frac{k_c}{\Delta y} A_{c_n} \right) T_P = \frac{k_c}{\Delta x_w} A_{c_w} T_W + \frac{k_{B1}}{\Delta x_e} A_{B1_e} T_E + \frac{k_c}{\Delta y_n} A_{c_n} T_N + \frac{k_c}{\Delta y_s} A_{c_s} T_s$$

**noeud 308**

$$\left( 2 \frac{k_c}{\Delta x} A_{c_e} + \frac{k_c}{\Delta y} A_{c_s} \right) T_P = \frac{k_c}{\Delta x} A_{c_w} T_W + \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_e} T_E + \frac{k_c}{\Delta y} A_{c_s} T_s$$

**noeud 177**

$$\begin{aligned} & \left( 2 \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_e} + 2 \frac{k_{B1}}{\Delta y} A_{B1_s} \right) T_P \\ &= \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_e} T_E + \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_w} T_W + \frac{k_{B1}}{\Delta y} A_{B1_n} T_N + \frac{k_{B1}}{\Delta y} A_{B1_s} T_s \end{aligned}$$

**noeud 17**

$$\left( 2 \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_e} + 2 \frac{k_{B1}}{\Delta y} A_{B1_n} \right) T_P = \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_w} T_W + \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_e} T_E + \frac{k_{B1}}{\Delta y} A_{B1_n} T_N$$

**noeud 51**

$$\begin{aligned} & \left( 2 \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_e} + 2 \frac{k_{B1}}{\Delta y} A_{B1_s} \right) T_P \\ &= \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_w} T_W + \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_e} T_E + \frac{k_{B1}}{\Delta y} A_{B1_n} T_N + \frac{k_{B1}}{\Delta y} A_{B1_s} T_s \end{aligned}$$

**noeud 190**

$$\begin{aligned} & \left( 2 \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_e} + 2 \frac{k_{pcm}}{\Delta y} A_{pcm_s} \right) T_P \\ &= \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_w} T_W + \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_e} T_E + \frac{k_{pcm}}{\Delta y} A_{pcm_n} T_N + \frac{k_{pcm}}{\Delta y} A_{pcm_s} T_s \end{aligned}$$

**noeud 18**

$$\left( 2 \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_e} + \frac{k_{pcm}}{\Delta y} A_{pcm_s} \right) T_P = \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_w} T_W + \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_e} T_E + \frac{k_{pcm}}{\Delta y} A_{pcm_n} T_N$$

**noeud 154**

$$\begin{aligned} & \left( 2 \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_e} + 2 \frac{k_{pcm}}{\Delta y} A_{pcm_s} \right) T_P \\ &= \frac{k_{B1}}{\Delta x} A_{B1_w} T_W + \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_e} T_E + \frac{k_{pcm}}{\Delta y} A_{pcm_n} T_N + \frac{k_{pcm}}{\Delta y} A_{pcm_s} T_s \end{aligned}$$

**noeud 20**

$$\left( 2 \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_e} + \frac{k_{pcm}}{\Delta y} A_{pcm_s} \right) = \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_e} T_E + \frac{k_{pcm}}{\Delta x} A_{pcm_w} T_W + \frac{k_{pcm}}{\Delta y} A_{pcm_n} T_N$$

**noeud 23**

$$\left(2 \frac{k_{B2}}{\Delta x} A_{B2\_e} + \frac{k_{B2}}{\Delta y} A_{B2\_n}\right) T_P = \frac{k_{p_{mc}}}{\Delta x} A_{p_{cm\_w}} T_W + \frac{k_{B2}}{\Delta x} A_{B2\_e} T_E + \frac{k_{B2}}{\Delta y} A_{B2\_n} T_N$$

**noeud 198**

$$\begin{aligned} \left(2 \frac{k_{B2}}{\Delta x} A_{B2\_e} + 2 \frac{k_{B2}}{\Delta y} A_{B2\_s}\right) T_P \\ = \frac{k_{B2}}{\Delta x} A_{B2\_e} T_E + \frac{k_{B2}}{\Delta x} A_{B2\_w} T_W + \frac{k_{B2}}{\Delta y} A_{B2\_n} T_N + \frac{k_{B2}}{\Delta y} A_{B2\_s} T_s \end{aligned}$$

**noeud 204**

$$\left(\frac{k_p}{\Delta x} A_{p_w} + 2 \frac{k_p}{\Delta y} A_{p_n}\right) T_P = \frac{k_p}{\Delta x} A_{p_w} T_W + \frac{k_p}{\Delta y} A_{p_n} T_N + \frac{k_p}{\Delta y} A_{p_s} T_s + q_{conint} A_{p_s}$$

**noeud 329**

$$\left(2 \frac{k_{B2}}{\Delta x} A_{B2\_e} + \frac{k_{B2}}{\Delta y} A_{B2\_s}\right) T_P = \frac{k_{p_{cm}}}{\Delta x} A_{p_{cm\_w}} T_W + \frac{k_{B2}}{\Delta x} A_{B2\_e} T_E + \frac{k_{B2}}{\Delta y} A_{B2\_s} T_s$$

## **Annexe 02**

## Programme de calcul la distribution de la température dans un mur multi couche en en seul dimension (1D) par la méthode des volumes finis (Langage MATLAB)

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
filename1 = 'C:\Users\MEDJAHED\Desktop\Article PDF Medjahed-2021\Saci-Merabat\Finale 1D  
medjahed\07h\109\AA109.xlsx';
```

```
A = xlsread(filename1);
```

```
filename2 = 'C:\Users\MEDJAHED\Desktop\Article PDF Medjahed-2021\Saci-Merabat\Finale 1D  
medjahed\07h\109\dd.xlsx';
```

```
d = xlsread(filename2);
```

```
N = 34;
```

```
a = diag(A);
```

```
for i = 1:N  
    c(1) = 0;  
    b(N) = 0;  
    if (i ~= N)  
        b(i) = -A(i,i+1);  
    end  
    if (i ~= 1)  
        c(i) = -A(i,i-1);  
    end  
end
```

```
for i = 1:N  
    if i == 1  
        P(i) = b(i)/a(i);  
        Q(i) = d(i)/a(i);  
    else  
        P(i) = b(i)/(a(i)-c(i)*P(i-1));  
        Q(i) = (d(i)+c(i)*Q(i-1))/((a(i)-c(i)*P(i-1)));  
    end  
end
```

```
for i = N:-1:1  
    if i == N  
        X(i) = Q(i);  
    else  
        X(i) = P(i)*X(i+1)+Q(i);  
    end  
end  
XX=X';
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

## 1- Programme de calcul la distribution de la température dans un mur multi couche en en deux dimension (2D) par la méthode des volumes finis (Langage MATLAB)

```
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
```

```
clear all
close all
%Specify grid size
Nx = 34;
Ny = 10;
%%%%%%%%%%
filename1 = 'C:\Users\MEDJAHED\Desktop\Article PDF Medjahed-2021\Saci-Merabat\Finale 2D
medjahed\07h\109\AA109.xlsx';
A = xlsread(filename1);
filename2 = 'C:\Users\MEDJAHED\Desktop\Article PDF Medjahed-2021\Saci-Merabat\Finale 2D
medjahed\07h\109\CC.xlsx';
C = xlsread(filename2);
```

```
% initial 'guess' for temperature distribution
T(1:Nx*Ny,1) = 0;
```

```
%Solve using Gauss-Seidel
residual = 10;
iterations = 0;
while (iterations < 231) % The residual criterion is 0.0001 in this example
% You can test different values
iterations = iterations+1;
%Transfer the previously computed temperatures to an array Told
Told = T;
%Update estimate of the temperature distribution
for n=1:Ny
for m=1:Nx
i = (n-1)*Nx + m;
Told(i) = T(i);
end
end
% iterate through all of the equations
for n=1:Ny
for m=1:Nx
i = (n-1)*Nx + m;
%sum the terms based on updated temperatures
sum1 = 0;
for j=1:i-1
sum1 = sum1 + A(i,j)*T(j);
end
%sum the terms based on temperatures not yet updated
sum2 = 0;
for j=i+1:Nx*Ny
sum2 = sum2 + A(i,j)*Told(j);
end
% update the temperature for the current node
T(i) = (1/A(i,i)) * (C(i) - sum1 - sum2);
end
end
residual = max(T(i) - Told(i));
iterations
end
```

```

%compute residual
deltaT = abs(T - Told);
residual = max(deltaT);
iterations; % report the number of iterations that were executed
%Now transform T into 2-D network so it can be plotted.
delta_x = 0.34/(Nx+1);
delta_y = 1/(Ny+1);
for n=1:Ny
for m=1:Nx
i = (n-1)*Nx + m;
T2d(m,n) = T(i);
x(m) = m*delta_x;
y(n) = n*delta_y;
end
end
T2d;

%surf(x,y,T2d)
grid on;
figure (1)

contourf(T2d')
title('Lignes isothermes du mur');
colormap(jet);
colorbar
figure(2)

grid on;

imagesc (T2d');
title('Contours de température du mur');
colormap(jet);
colorbar
axis xy
figure(3)
mesh(T2d');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```