



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 NUMERIQUE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR UTILISANT UN
MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE (MCP).**

Présenté par :

- ❖ HADDAM Amine
- ❖ BUCUANE Enio Valter Felix

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

Président	Pr. HOUAT Samir	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Pr. RETIEL Nouredine	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 **Pr. RETIEL Noureddine** 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 près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce projet :

À mes chères mères, Victória A. Mabuíango et BUCUANE Édite
À mon cher père, BUCUANE Félix Lourenço
Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.
À mes frères, Félix Júnior et Kaio L.
À ma petite sœur, Leticia
Et à ma grande sœur et son mari, Eunice et PACO Mauro
Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.
À mes deux grand-mères
Qui je souhaite une bonne santé.
À ma copine et à mon colocataire et ami que le destin m'a donné
GUERRA Neíma et GRACHANE Norman
Pour les sacrifices qu'ils ont fait pour me voir sourire quand je sentais l'absence de ma famille dans ma vie en Algérie.
À ma marraine et ma tante
NHADOMBE Vânia et Machiana Cacilda
de m'avoir toujours aimé sans mesurer des efforts.
À mon binôme
HADDAM Amine
Pour m'avoir accueilli en Algérie et de m'aider à m'intégrer dans cette société.
Enfin,
Merci à tous les Algériens.



شكرا جزيلاً

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- *mes très chers parent, source de vie, d'amour et d'affection ;*
 - *mes chers frères , sources de joie et de bonheur ;*
 - *toutes ma famille, source d'espoir et de motivation ;*
- *tous mes amis, pour leurs conseils pendant la réalisation du travail ;*
- *BUCUANE Énio , très chers ami avant d'être binôme.*

À vous chers lecteurs,

MERCI.

LISTE DES FIGURES

Figure	Description	Page
Figure 2.1	Exemple de transmission de chaleur par conduction	9
Figure 2.2	Exemple du flux thermique à travers un mur homogène	10
Figure 2.3	Exemple du flux thermique à travers un mur composé	11
Figure 2.4	Exemple de la transmission de chaleur par convection	12
Figure 2.5	Coefficients d'échange superficiel intérieur et extérieur par convection sur une paroi	14
Figure 2.6	Exemple de transmission de chaleur par rayonnement d'un mur	15
Figure 3.1	Diagramme de la température du MCP en fonction du contenu énergétique	18
Figure 3.2	Classification des MCP	19
Figure 3.3	Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP.	23
Figure 3.4	Matériau de stockage de chaleur latente	25
Figure 3.5	Les positionnements des capteurs de température	29
Figure 3.6	Unité de stockage d'énergie thermique en cuivre (Échangeur de chaleur avec MCP)	29
Figure 4.1	Échangeur de chaleur à double diamètre	31
Figure 4.2	Échangeur de chaleur double diamètre en serpentin	31
Figure 4.3	Maillage hexaédrique de l'échangeur de chaleur à double diamètre	33
Figure 4.4	Maillage tétraédrique de l'échangeur de chaleur à double diamètre en serpentin	33
Figure 4.5	Positionnement des 5 sections radiales étudiée	35
Figure 4.6	Distribution des températures du chauffage à travers la section radiale à $z = 0.01\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	36
Figure 4.7	L'évolution de la température du chauffage à $Z = 0.01\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	36
Figure 4.8	L'évolution de la température du chauffage à $Z = 0.25\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	36
Figure 4.9	L'évolution de la température du chauffage à $Z = 0.5\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	37
Figure 4.10	L'évolution de la température du chauffage à $Z = 0.75\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	37
Figure 4.11	L'évolution de la température du chauffage à $Z = 0.99\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	37
Figure 4.12	Distribution des températures du chauffage à travers la section radiale à $Z = 0.99\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	38
Figure 4.13	Distribution des température du refroidissement à travers la section radiale à $Z = 0.01\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	39
Figure 4.14	L'évolution de la température du refroidissement à $Z = 0.01\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	39
Figure 4.15	L'évolution de la température du refroidissement à $Z = 0.25\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	40
Figure 4.16	L'évolution de la température du refroidissement à $Z = 0.5\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	40
Figure 4.17	L'évolution de la température du refroidissement à $Z = 0.75\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	40
Figure 4.18	L'évolution de la température du refroidissement à $Z = 0.99\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	41
Figure 4.19	Distribution des température du refroidissement à travers la section radiale à $Z = 0.99\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	41
Figure 4.20	Positionnement des 9 sections radiales étudiée	41

LISTE DES FIGURES

Figure 4.21	Distribution des température du chauffage à travers la section radiale à $X = 0.01\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	42
Figure 4.22	L'évolution de la température du chauffage à travers les sections radiales dans le cas référence (eau-eau)	43
Figure 4.23	L'évolution de la température du chauffage à travers les sections radiales dans le cas du MCP 1 (paraffine RT-58)	43
Figure 4.24	L'évolution de la température du chauffage à travers les sections radiales dans le cas du MCP 2(Acétate de sodium tri-hydraté)	44
Figure 4.25	L'évolution de la température du chauffage à travers les sections radiales dans le cas du MCP 3 (Magnésium nitrate hexa-hydraté)	44
Figure 4.26	Distribution des températures du chauffage à travers la section radiale à $X = 6.67\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	45
Figure 4.27	Distribution des températures du refroidissement à travers la section radiale à $X = 0.01\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	46
Figure 4.28	L'évolution de la température du refroidissement à travers les sections radiales dans le cas référence (eau-eau)	46
Figure 4.29	L'évolution de la température du refroidissement à travers les sections radiales dans le cas du MCP 1 (paraffine RT-58)	47
Figure 4.30	L'évolution de la température du refroidissement à travers les sections radiales dans le cas du MCP 2(Acétate de sodium tri-hydraté)	47
Figure 4.31	L'évolution de la température du refroidissement à travers les sections radiales dans le cas du MCP 3 (Magnésium nitrate hexa-hydraté)	48
Figure 4.32	Distribution des températures du refroidissement à travers la section radiale à $X = 6.67\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Description	Page
Tableau 2.1	Valeurs de résistances thermiques d'échange superficiel selon EN 6946 -1	14
Tableau 2.2	Valeurs des facteurs d'émission (ε)	16
Tableau 3.1	Avantages et désavantages des MCP organiques	20
Tableau 3.2	Avantages et les désavantages des MCP inorganique	21
Tableau 3.3	Avantages et désavantages des MCP eutectiques	22
Tableau 4.1	Propriétés thermo-physiques des matériaux	33
Tableau 4.2	Les conditions limites pour le chauffage	34
Tableau 4.3	Les conditions limites pour le refroidissement	34
Tableau 4.4	Les conditions limites pour le chauffage	34
Tableau 4.5	Les conditions aux limites pour le refroidissement	34

NOMENCLATURE

SYMBOLES	UNITES	DESIGNATION
a_m		Fraction fondue
C_p	J/kgK	Chaleur spécifique
$C_{p p}$	J/kg.k	Chaleur spécifique moyenne entre T_m et t_f
$C_{p_{sp}}$	J/kg.k	Chaleur spécifique moyenne entre T_i et t_m
D_{ext}	mm	Diamètre extérieur
D_{in}	mm	Diamètre intérieur
e	m	Epaisseur
h_c	W/m^2C	Coefficient de transmission thermique par convection qui dépend de : la vitesse, l'écart de température ($\theta_1 - \theta_2$) et de la nature du fluide.
h_e	W/m^2C	Coefficient de transmission thermique par convection entre la température de l'air extérieur du local θ_e et la température de la face externe de la paroi θ_{se}
h_i	W/m^2C	Coefficient de transmission thermique par convection entre la température de l'air intérieur du local θ_i et la température de la face interne de la paroi θ_{si} ;
h_r	W/m^2C	Coefficient de transmission thermique par rayonnement
m	kg	Masse de stockage de chaleur
Q	J	Quantité de chaleur stockée
R	m^2C/W	La résistance thermique par conduction d'un mur plan homogène.
S	m^2	Surface de l'élément considéré
T_a	K	Température ambiante
T_f	$^{\circ}C$	Temperature finale
T_i	$^{\circ}C$	Temperature initiale
T_m	K	Température moyenne
t_m	$^{\circ}C$	Temperature de fusion
T_s	K	Température de la surface
v	m/s	Vitesse de l'écoulement
Φ_{cond}	W	Flux thermique par conduction dissipé à travers le matériau

NOMENCLATURE

Φ_{conv}	W	Flux thermique par convection
Φ_{ray}	W	Flux thermique par rayonnement
$\frac{d\theta}{dx}$		Variation de la température par unité de longueur lorsqu'on se déplace dans la direction de propagation de la chaleur
$\theta_{si} - \theta_{se}$	°C	Différence des températures superficielles intérieures et extérieures
λ	W/m°C	Conductivité thermique du matériau
ε		Facteur d'émission ou émissivité du matériau.
σ	W/m ² K ⁴	Constante de Stefan-Boltzmann égale à $5,67 \cdot 10^{-8}$

Etude numérique d'un échangeur de chaleur utilisant un matériau à changement de phase (MCP).

Résumé :

Parmi les différentes solutions de stockage thermique, les matériaux à changement de phase (MCP) sont récemment devenus plus largement utilisés, couvrant une large gamme de températures de fonctionnement. A cet égard, une simulation numérique d'un procédé de fusion du MCP est réalisée sous environnement ANSYS Fluent. Dans notre étude nous avons pris deux cas différents d'échangeurs de chaleurs, dans le premier cas nous avons fait l'étude d'un tube concentrique à double diamètre, de longueur de 1 mètre horizontale en cuivre, en essayant trois différents types de MCP (organique, inorganique et eutectique (organique+inorganique)) plus le cas référence (eau-eau) et dans le deuxième cas nous avons fait l'étude d'un tube de 7 mètres en forme de serpent en cuivre à double diamètre en utilisant les mêmes type de MCP que le premier cas et le même cas référence. Dans les deux études nous avons fait pour chacun le chauffage et le refroidissement de l'eau qui se situe dans le tube interne et les MCP dans le tube externe. Les résultats décrivent le comportement thermique d'un processus de fusion du MCP et pourraient être davantage intégrés dans toute simulation de processus de charge de stockage des échangeurs de chaleur. L'analyse montre que les résultats pour les deux cas est bien la réalité physique.

Mots clés : Echangeur de chaleur, Logiciel ANSYS18.0, Régime stationnaire, Matériaux à changement de phase (MCP), Température.

Numerical study of a heat exchanger using a phase change material (PCM).

Abstract:

Among the various thermal storage solutions, phase change materials (PCMs) have recently become more widely used, covering a wide range of operating temperatures. In this regard, a numerical simulation of a PCM fusion process is carried out in an ANSYS Fluent environment. In our study we took two different cases of heat exchangers, in the first case we studied a concentric tube with double diameter, length of 1 meter horizontal in copper, by trying three different types of PCM (organic, inorganic and eutectic (organic + inorganic)) plus the reference case (water-water) and in the second case we studied a 7 meter tube in the form of a serpentine with a double diameter in copper using the same type of PCM as the first case and the same reference case. In both studies, we performed the heating and cooling of the water in the inner tube and the PCMs in the outer tube. The results describe the thermal behavior of a PCM fusion process and could be further integrated into any simulation of heat exchanger storage charge processes. Analysis shows that the results for both cases are indeed physical reality.

Keywords: Heat exchanger, ANSYS18.0 software, Steady state, Phase change materials (PCM), Temperature.

دراسة عددية لمبادل حراري باستخدام مادة تغيير الطور (PCM).

ملخص:

من بين حلول التخزين الحراري المختلفة ، أصبحت مواد تغيير الطور (PCM) مؤخرًا مستخدمة على نطاق أوسع ، بحيث تغطي نطاقًا واسعًا من درجات حرارة التشغيل. في هذا الصدد، يتم إجراء محاكاة عددية لعملية اندماج PCM في بيئة ANSYS Fluent. في دراستنا ، أخذنا حالتين مختلفتين من المبادلات الحرارية ، في الحالة الأولى درسنا أنبوبًا متحد المركز بقطر مزدوج ، بطول متر واحد أفقيًا في النحاس ، من خلال تجربة ثلاثة أنواع مختلفة من PCM (عضوي ، غير عضوي ، سهل الانصهار (عضوي + غير عضوي)) بالإضافة إلى الحالة المرجعية (ماء - ماء) وفي الحالة الثانية درسنا أنبوبًا بطول 7 أمتار على شكل ملف نحاسي بقطر مزدوج باستخدام نفس النوع من PCM مثل الحالة الأولى ونفس الحالة المرجعية. في كلتا الدراستين ، أجرينا تسخين وتبريد الماء في الأنبوب الداخلي وأجهزة PCM في الأنبوب الخارجي. تصف النتائج السلوك الحراري لعملية اندماج PCM ويمكن دمجها بشكل أكبر في أي محاكاة لعمليات شحن وتخزين المبادل الحراري. يظهر التحليل أن نتائج كلتا الحالتين هي في الواقع حقيقة مادية.

الكلمات المفتاحية: المبادل الحراري، برنامج ANSYS18.0 ، الحالة الثابتة ، مواد تغيير الطور (PCM) ، درجة الحرارة.

Introduction générale:

Dans le cadre de ce travail de recherche, une solution d'économie d'énergie pour l'utilisation des MCP dans le secteur industrielle a pour objectif de réduire la consommation d'énergie. Elle consiste à augmenter la capacité de stockage thermique dans les échangeurs de chaleur dans le domaine industrielle par intégration des MCP. Ces matériaux se distinguent par un échange de chaleur important et isotherme, par changement de phase. En se basant sur la propriété de stockage de chaleur par voie latente, ces matériaux permettent une protection ou une isolation thermique de l'habitat vis-à-vis de l'influence extérieure. Dans notre étude nous avons pris deux cas différents d'échangeurs de chaleurs, dans le premier cas nous avons fait l'étude d'un tube concentrique à double diamètre horizontale en cuivre, en essayant trois différents types de MCP (organique, inorganique et eutectique (organique+inorganique)) et dans le deuxième cas nous avons fait l'étude d'un tube en forme de serpentin en cuivre à double diamètre en utilisant les mêmes type de MCP que le premier cas et le même cas référence. Cette étude a pour objectif de déterminer quelle est le meilleur MCP pour le refroidissement et/ou pour le chauffage de l'eau dans les échangeurs de chaleur.

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 scientifique pour l'application des matériaux à changement de phase dans les échangeurs des chaleurs. 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 à changement de phase (MCP) dans les échangeurs de chaleurs est présentée dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre a été réservé à la présentation des conditions aux limites et les discussions des résultats. Une conclusion générale est donnée à la fin de ce document.

Chapitre 01 : Étude bibliographique

1. Étude bibliographique

L'application des MCP (matériaux à changement de phase) en tant que matériaux de stockage d'énergie a suscité l'intérêt de diverses industries et chercheurs. La propriété de transition solide-liquide du matériau à changement de phase peut être utilisée dans diverses applications industrielles en tant que support de stockage d'énergie [1]. Une telle application de MCP est dans une usine pharmaceutique qui utilise la chaleur de l'ERI (eau résiduelle industrielle) et cette chaleur est utilisée dans le système de chauffage du laboratoire [2]. Harikrishanan et al. ont mené une enquête expérimentale sur les caractéristiques de solidification et de fusion d'un nano-fluide nouvellement préparé. Il a été observé que le temps requis pour les processus de fusion et de solidification complets des MCP composites était inférieur à celui du MCP de base [3].

Les recherches sur les performances thermiques et la résistance structurelle des échantillons de mortier intégrés au MCP micro encapsulé sont abondantes, et la recherche croissante se concentre sur les performances thermiques et dynamiques réelles dans des expériences à petite échelle même dans les bâtiments réels. Dans la plupart des recherches actuelles, le MCP est uniformément réparti dans le mélange de mortier. En fait, la position et la répartition du MCP dans la structure de ciment est également un problème intéressant et significatif [4].

Li et al. ont fabriqué deux types de panneaux muraux avec le MCP, hybrides et multicouches, en utilisant des matériaux à changement de phase avec des températures de changement de phase différentes. Par rapport aux panneaux passifs, le panneau mural multicouche avec MCP a mieux réussi à la fois à retarder le transfert de chaleur et à libérer de la chaleur [4].

Li et al ont également étudié l'effet des différentes positions de la couche MCP dans le mur. Lorsque le MCP a été installé plus près de la surface extérieure, la réduction du transfert de chaleur était plus importante [4]. Ismail et al, ont étudiée théoriquement et expérimentalement le processus de solidification autour d'un tube vertical avec des ailettes longitudinales et un caloporteur circulant à l'intérieur du tube [5]. Velraj et al. Ont effectué une analyse expérimentale et une modélisation numérique du processus de solidification d'un MCP à l'intérieur d'un tube vertical à ailettes interne lorsque le tube était refroidi de l'extérieur. Les résultats expérimentaux ont démontré que lorsque le nombre d'ailettes dépassait quatre les nageoires pouvaient avoir des hauteurs différentes. Certaines ailettes pourraient être limitées pour avoir une hauteur égale à la moitié du rayon du tube [5].

Tayeb a réalisé la première expérience qualitative dans le but d'augmenter la conductivité thermique effective dans un MSCL(matériaux de stockage de chaleur latente) tel qu'une cire

Chapitre 01 : Étude bibliographique

de paraffine en incorporant des scories et des copeaux métalliques. Il a été observé que la conductivité effective pendant le processus de solidification était de 0,5 W/mK, ce qui n'est pas la moitié de sa valeur au début de l'expérience [5]. Une des premières tentatives d'utilisation du MCP pour le chauffage solaire a été entreprise par Telkes et al. à Douvres (USA). La maison privée de plain-pied se composait de cinq pièces dont deux chambres. Le système fonctionnait avec succès pendant 2 ans, fournissant une température confortable de 21 °C sans système de chauffage d'appoint nécessaire. Cependant, l'expérience s'est soldée par un échec en raison de la décomposition du sel. À ce moment-là, la méthode pour éliminer ce problème avec MCP n'était pas développée [5]. Un programme de simulation basé sur les modèles de Morrison et al. a été utilisé pour réaliser une étude théorique du système de chauffage solaire avec MCP basée sur le SET (stockage de l'énergie thermique). Les résultats obtenus à partir de ces études ont présentés que le matériau à changement de phase basée sur les stockages de l'énergie thermique utilisant du chlorure de Calcium hexa-hydraté ou du sulfate de sodium déca-hydraté pouvait être utilisé efficacement pour le stockage de l'énergie thermique, en particulier dans un système de pompe à chaleur solaire pour le chauffage domestique [5]. Kern et al. ont utilisé 1650 kg de $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dans des bombes aérosols pesant chacune 0,74 kg pour étudier les possibilités de stockage d'énergie à l'intérieur et à l'extérieur d'une serre de 36m² au sol recouverte de fibre de verre enduite de fanon. La chaleur emmagasinée a été utilisée pendant les heures de faible ensoleillement pour maintenir la température souhaitée de la serre. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ a été utilisé comme matériau de stockage MCP dans la serre [5]. Nishina et al, ont utilisé $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ avec certains additifs pour empêcher la séparation de phases et la dégradation pour chauffer une serre au Japon. Ils ont conclu que 40 à 60% du potentiel de chaleur latente du MCP était réalisé, ce qui indiquait que près de la moitié du MCP n'était pas utilisée efficacement pendant les processus d'échange d'énergie [5].

Takakura et al. ont testé le polyéthylène glycol et le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en tant que MCP dans le chauffage d'une serre pour 7,2m² de surface au sol [5]. Ils ont comparé les serres conventionnelles aux serres de type de stockage MCP. L'efficacité de la serre avec stockage MCP intégré au capteur solaire était de 59% et capable de maintenir 8 °C à l'intérieur de la serre la nuit, lorsque la température extérieure a chuté à 0,6 °C. Un système de contrôle par micro-ordinateur a été développé afin d'établir un contrôle plus précis et plus sophistiqué pour les systèmes de serres solaires [5].

Chapitre 01 : Étude bibliographique

Les MCP pourraient être utilisés dans les bâtiments avec une conservation d'énergie active et passive. Les mesures actives de conservation de l'énergie des bâtiments font référence au fonctionnement des équipements consommateurs d'énergie pour créer un moyen de réguler l'environnement du bâtiment pour compenser les perturbations externes, telles que le chauffage, climatisation, la ventilation, la récupération de chaleur [6].

Hirmiz et al. ont ajouté un réservoir de transfert de chaleur avec 75% de MCP entre le système de pompe à chaleur et les radiateurs du bâtiment dans le système de chauffage par pompe à chaleur géothermique. Le MCP a permis de réduire la taille du réservoir de 2/3 et résout le problème de la puissance calorifique de pointe insuffisante des pompes à chaleur géothermique ordinaire [6]. La masse thermique joue un rôle important dans la conservation de l'énergie du bâtiment et dans le contrôle thermique interne. Il a été observé qu'elle peut également être grandement facilitée par l'incorporation d'éléments de construction avec des capacités de stockage de chaleur latente [7].

Dans les bâtiments, les MCP peuvent être utilisés à des nombreuses fins différentes, notamment :

- la réduction de la consommation d'énergie pour le conditionnement de l'espace ;
- la réduction et le déplacement de la charge de pointe thermique ;
- le contrôle de la température locale dans les composants de l'enveloppe du bâtiment ou l'amélioration de la durabilité globale du système [7].

Les trois méthodes les plus prometteuses d'incorporation des MCP sont les suivantes : l'incorporation directe ou l'imprégnation, l'immersion et l'encapsulation [8].

Les températures de fusion et de congélation des MCP varient légèrement lorsqu'ils sont incorporés dans les matériaux de construction. De plus, le MCP peut être utilisé sous la forme d'un seul panneau stratifié et combiné avec d'autres composants de l'enveloppe bâtiment [8].

Parmi les différentes manières d'intégration des MCP dans le bâtiment, nous disposons actuellement de 2 méthodes : l'intégration passive et l'intégration active. L'utilisation passive est réalisée par intégration des MCP dans les divers parois constituant un bâtiment : planchers, plafonds, parois, menuiseries, même dans les vitres et les rideaux des fenêtres, et les tuiles [8]. Les systèmes actifs sont des systèmes dont le fonctionnement est basé sur la circulation d'un fluide caloporteur (généralement l'air). Ce dernier traverse les composants d'un échangeur air – MCP via un système mécanique (ventilateur, pompe, etc) [8].

Chapitre 01 : Étude bibliographique

Pendant la journée, on fait circuler l'air chaud du bâtiment avec un système de ventilation dans le SSCL (système de stockage de la chaleur latente) qui contient des MCP solidifiés. Ces derniers soumis à une température supérieure à leur température de fusion vont fondre sous l'effet de l'absorption de la chaleur de l'air. Ensuite, on réinjecte cet air rafraîchi dans le bâtiment. Durant la nuit, on fait circuler l'air extérieur au bâtiment frais qui a une température inférieure à la température de fusion du MCP pour solidifier le MCP [8]. Le principe est le même mais le fonctionnement s'inverse. Durant la journée, on fait stocker la chaleur par la circulation d'air chaud du bâtiment (issu d'un système de chauffage, à source d'énergie solaire ou électrique par exemple). Pendant la nuit : on réchauffe le bâtiment en faisant circuler l'air frais de ce dernier dans ces échangeurs [8].

Chapitre 02 : Généralité sur le transfert de chaleur

2. Généralité sur le transfert de chaleur

2.1 Qu'est-ce que le transfert de chaleur?

Un transfert de chaleur qu'il convient d'appeler transfert thermique ou transfert par chaleur est un transit d'énergie sous forme microscopie désordonnée [9].

Deux corps ayant la même température sont dits en « équilibre thermique ». Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid : il y a transfert thermique, ou par chaleur.

L'étude thermodynamique des transferts thermiques complète l'étude de la thermodynamique en décrivant la manière dont s'opère le transfert d'énergie. À la différence de la thermodynamique, la thermocinétique fournit des informations sur le mode de transfert en situation de non-équilibre ainsi que sur les valeurs de flux de chaleur [9].

Le transfert de chaleur peut s'effectuer de trois façons différentes :

- la conduction : la chaleur passe d'un corps à un autre, par contact ;
- la convection : un corps qui se déplace emmène la chaleur qu'il contient. La quantité de chaleur ainsi transportée peut être importante, notamment dans le cas d'un changement de phase ;
- le rayonnement : tous les corps émettent de la lumière, en fonction de leur température, et se font eux-mêmes chauffer par la lumière qu'ils reçoivent.

2.2 Transfert de chaleur par conduction

Soit une barre métallique AB chauffée à son extrémité A. On remarque que la chaleur se transmet à l'intérieur du métal jusqu'à l'extrémité B avec contact : on dit que la chaleur est transmise par conduction [9].

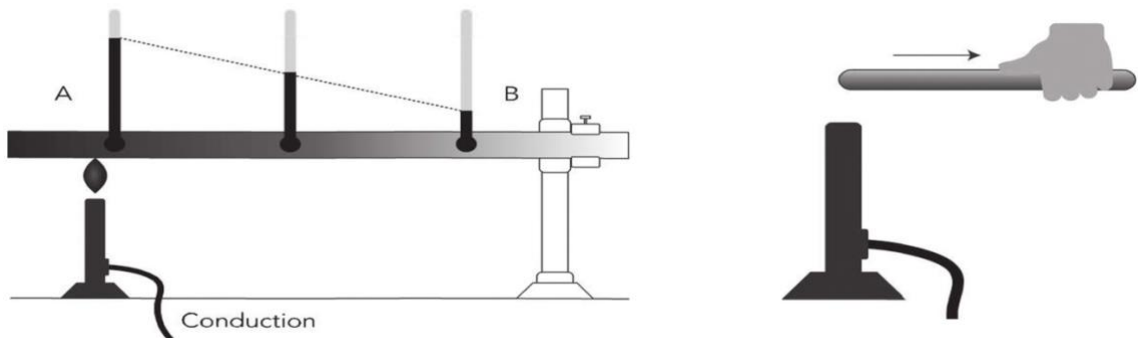


Figure 2.1 : Exemple de transmission de chaleur par conduction

Chapitre 02 : Généralité sur le transfert de chaleur

La transmission de chaleur par conduction est calculée d'après la loi de Fourier par la relation :

$$\Phi_{\text{cond}} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (2.1)$$

- Φ_{cond} : flux thermique par conduction dissipé à travers le matériau en W ;
- S : surface de l'élément considéré en m^2 ;
- $\frac{d\theta}{dx}$: variation de la température par unité de longueur lorsqu'on se déplace dans la direction de propagation de la chaleur ;
- λ : conductivité thermique du matériau exprimé en $W/m^\circ C$.

Plus la conductivité thermique est élevée, plus les matériaux conduisent facilement la chaleur. Au contraire les matériaux de faible conductivité thermique conduisent difficilement la chaleur et sont donc utilisés comme isolants.

2.2.1 Cas d'un mur homogène

2.2.1.1 Expression du flux thermique par conduction

On considère un mur plan homogène de section S et d'épaisseur (e) composé d'un matériau de conductivité thermique λ .

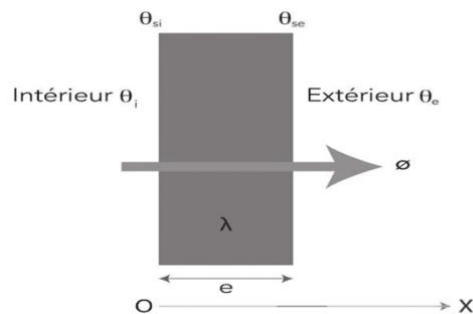


Figure 2.2 : Exemple du flux thermique à travers un mur homogène

L'équation de la température en fonction de x peut s'écrire sous la forme :

$$\theta(x) = ax + b$$

$$\text{pour } x = 0 \Rightarrow \theta(0) = b = \theta_{si}$$

$$\text{pour } x = e \Rightarrow \theta(e) = ae + \theta_{si} = \theta_{se} \Rightarrow a = \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{e}$$

$$\theta(x) = \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{e} x + \theta_{si} \Rightarrow \frac{d\theta}{dx} = \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{e} \quad (2.2)$$

Chapitre 02 : Généralité sur le transfert de chaleur

On remplace de l'équation de Fourier, on obtient le flux thermique par conduction égal :

$$\Phi_{\text{cond}} = \frac{\lambda}{e} \cdot S \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (2.3)$$

➤ $\theta_{si} - \theta_{se}$: différence des températures superficielles intérieures et extérieures en °C.

2.2.1.2 Expression de la résistance thermique par conduction

La résistance thermique par conduction d'un mur plan homogène est égale au rapport de différences des températures et flux.

$$R = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{\Phi_{\text{cond}}} = \frac{e}{\lambda \cdot S} \quad (2.4)$$

➤ R : La résistance thermique par conduction d'un mur plan homogène en $m^2 \cdot C/W$.

2.2.2 Cas d'un mur composé de plusieurs matériaux

2.2.2.1 Expression du flux thermique par conduction

On considère un mur constitué de plusieurs couches d'épaisseur différentes et de conductivités thermiques différentes qui sépare l'intérieur et l'extérieur.

Soient $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ les conductivités thermiques des différents matériaux dont les épaisseurs sont respectivement e_1, e_2, e_3 .

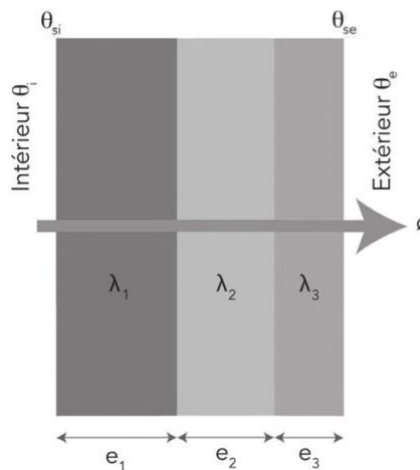


Figure 2.3: Exemple du flux thermique à travers un mur composé.

Chapitre 02 : Généralité sur le transfert de chaleur

Le flux thermique par conduction peut s'écrire d'après le paragraphe précédent :

$$\Phi_{cond} = \left[\frac{1}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}} \right] \cdot S \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (2.5)$$

2.2.2.2 Expression de la résistance thermique de conduction

Dans l'expression précédente du flux, on peut écrire que :

$$\Phi_{cond} = \left[\frac{1}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}} \right] \cdot S \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (2.6)$$

$$\Phi_{cond} = \left[\frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \right] \cdot S \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (2.7)$$

$$\Phi_{cond} = \left[\frac{1}{R_T} \right] \cdot S \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (2.8)$$

La résistance totale du mur $R_T = R_1 + R_2 + R_3$, puisque les résistances sont placées en série

$$\text{avec : } \begin{cases} R_1 = \frac{e_1}{\lambda_1} \\ R_2 = \frac{e_2}{\lambda_2} \\ R_3 = \frac{e_3}{\lambda_3} \end{cases} \quad (2.9)$$

R_1, R_2 et R_3 sont les résistances thermiques des différentes couches constituant le mur.

2.3 Transfert de chaleur par convection

D'une manière générale, la transmission de la chaleur par convection est due à la combinaison d'un phénomène d'écoulement d'un liquide ou d'un gaz et un phénomène thermique de chauffage ou de refroidissement [9].

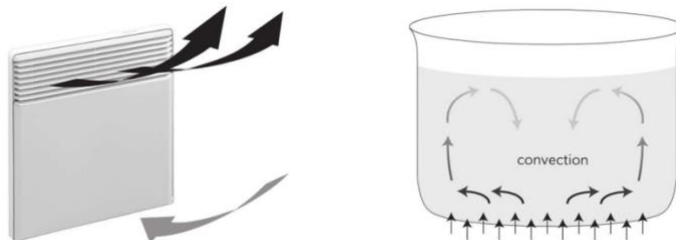


Figure 2.4 : Exemple de la transmission de chaleur par convection

Dans le cas d'un convecteur électrique, par exemple, la convection est naturelle. La carrosserie constitue la cheminée de convection et la résistance électrique est l'élément

Chapitre 02 : Généralité sur le transfert de chaleur

chauffant située en partie basse de l'appareil. La diffusion de l'air réchauffé se fait par le haut. Lorsque la convection est forcée l'air est tiré ou pulsé par une pompe ou un ventilateur. L'élément chauffant est bien entendu disposé dans le flux d'air [9].

Si on chauffe l'eau par le bas dans une casserole, l'eau chaude devenue plus légère monte naturellement, cédant la place à une eau plus froide, chauffée à son tour. C'est là, la naissance de ce courant (ou flux) appelé phénomène de convection.

2.3.1 Expression du flux par convection

Le flux de chaleur par convection est donné par la loi de Newton, par la relation :

$$\Phi_{\text{conv}} = h_c \cdot S \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (2.10)$$

- Φ_{conv} : flux thermique par convection en W
- h_c : coefficient de transmission thermique par convection exprimé en w/m^2C et qui dépend de : la vitesse, l'écart de température ($\theta_1 - \theta_2$) et de la nature du fluide.

Dans le cas d'une paroi d'une construction, il existe deux coefficients de transmission thermique par convection :

- h_i : coefficient de transmission thermique par convection entre la température de l'air intérieur du local θ_i et la température de la face interne de la paroi θ_{si} ;
- h_e : coefficient de transmission thermique par convection entre la température de l'air extérieur du local θ_e et la température de la face externe de la paroi θ_{se} .

On définit ainsi la résistance thermique d'échange superficiel intérieur exprimé en m^2C/W .

$$r = \frac{1}{h_i} \quad (2.11)$$

La résistance thermique d'échange superficiel extérieure exprimé en m^2C/W .

$$r = \frac{1}{h_e} \quad (2.12)$$

Chapitre 02 : Généralité sur le transfert de chaleur

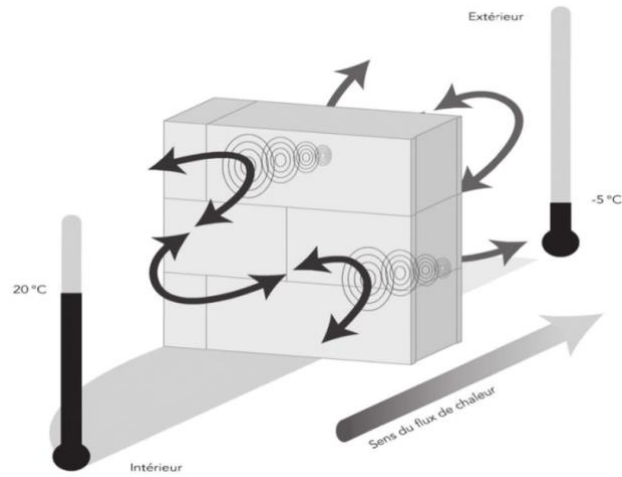
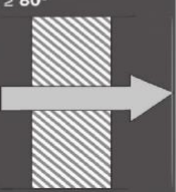




Figure 2.5 : Coefficients d'échange superficiel intérieur et extérieur par convection sur une paroi

On admet conventionnellement que les résistances thermiques d'échanges superficiels intérieurs $1/h_i$ et extérieur $1/h_e$ ont les valeurs données dans le tableau.

Tableau 2.1 : Valeurs de résistances thermiques d'échange superficiel selon EN 6 946 -1

	Paroi en contact avec : L'extérieur Un passage ouvert Un local ouvert			Paroi en contact avec : Un autre local chauffé ou non chauffé Un comble, un vide sanitaire.		
	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$
Paroi verticale Inclinaison $\geq 60^\circ$ Flux horizontal 	0,13	0,04	0,17	0,11	0,11	0,22
Paroi horizontale Inclinaison $\leq 60^\circ$ Flux ascendant 	0,10	0,04	0,14	0,09	0,09	0,18
Flux descendant 	0,17	0,04	0,21	0,17	0,17	0,34

Chapitre 02 : Généralité sur le transfert de chaleur

2.4 Transmission de chaleur par rayonnement

2.4.1 Condition de rayonnement d'un corps

À température de zéro absolu, les électrons ne peuvent se déplacer : ils sont prisonniers des atomes. Par contre, tous les corps matériels, dont la température est supérieure à 0 K, sont capables d'émettre de l'énergie sous forme de rayonnement et d'en échanger entre eux.

Un corps à la température T émet des ondes de plusieurs fréquences différentes, et la répartition de cette énergie dépend de la température du corps. La quantité de l'énergie émise est liée à la température [10].

2.4.2 Transfert par rayonnement

Le rayonnement est un mode d'échange par émission et absorption de radiations électromagnétiques. L'échange thermique par rayonnement se fait suivant le processus :

- **Emission** : il y a conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique.
- **Transmission** : la transmission de cette énergie électromagnétique se fait par propagations des ondes avec éventuellement absorption par le milieu traversé ;
- **Réception** : à la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique.

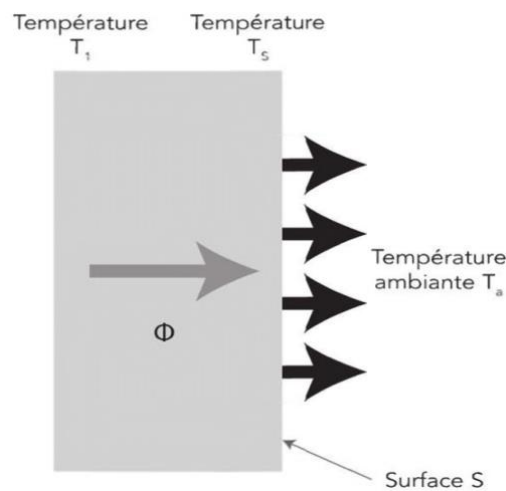


Figure 2.6 : Exemple de transmission de chaleur par rayonnement d'un mur.

On peut expliquer le phénomène global du rayonnement de la façon suivante. Considérons un mur de surface S dont les deux faces sont respectivement maintenues aux températures T_1 et T_s . On suppose que seule la surface située à droite échange de la chaleur par rayonnement avec le milieu ambiant à la température T_a .

Chapitre 02 : Généralité sur le transfert de chaleur

D'après la loi de Stefan-Boltzmann, le flux de chaleur échangé par rayonnement entre les deux surfaces peut s'écrire :

$$\Phi_{ray} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (2.13)$$

- Φ_{ray} : flux thermique par rayonnement exprimé en W
- ε : facteur d'émission ou émissivité du matériau.
- σ : constante de Stefan-Boltzmann égale à $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$
- T_a : température ambiante en Kelvin K
- T_s : température de la surface en kelvin K

Le tableau donne quelques valeurs du facteur d'émission de quelques matériaux pour une température de 300 K.

Tableau 2.2 : Valeurs des facteurs d'émission (ε)

Matériaux	Facteur d'émission ε
Acier	0.25
Ciment	0.96
Brique	0.75
Béton	0.93
Liège	0.93
Cuivre poli	0.05
Pierre	0.93

2.4.3 Échange de chaleur par rayonnement entre deux surfaces

2.4.3.1 Corps noir

Un corps noir est défini comme étant une surface idéale qui absorbe tout le rayonnement qu'elle reçoit. Le soleil peut être considéré comme un corps noir dont la température de surface est proche de 5800 K.

Le facteur d'émission d'un corps noir $\varepsilon = 1$.

Chapitre 02 : Généralité sur le transfert de chaleur

2.4.3.2 Corps gris

L'émission d'un corps réel ou gris est toujours inférieure à celle du corps noir.

2.4.4 Expression du flux par rayonnement

Le flux transmis par rayonnement peut être calculé en introduisant un coefficient de transmission thermique h_r par la relation suivante :

$$\Phi_{ray} = h_r \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.14)$$

h_r : coefficient de transmission thermique par rayonnement exprimé en $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$$h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3 \quad (2.15)$$

T_m : température moyenne déterminée par l'expression :

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2.16)$$

3. Matériaux à changement de phase (MCP)

3.1 Définition

Les 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. Ces matériaux possèdent une densité importante de stockage d'énergie et une capacité à maintenir une température constante tout en absorbant la fusion et en la restituant lors de la solidification. Cet intérêt s'est développé dans le domaine de la gestion thermique et des systèmes d'énergie solaire des bâtiments et des serres [11].

Les MCP se fondent et se solidifient dans une large plage de températures, ce qui les rend attrayants pour divers applications.

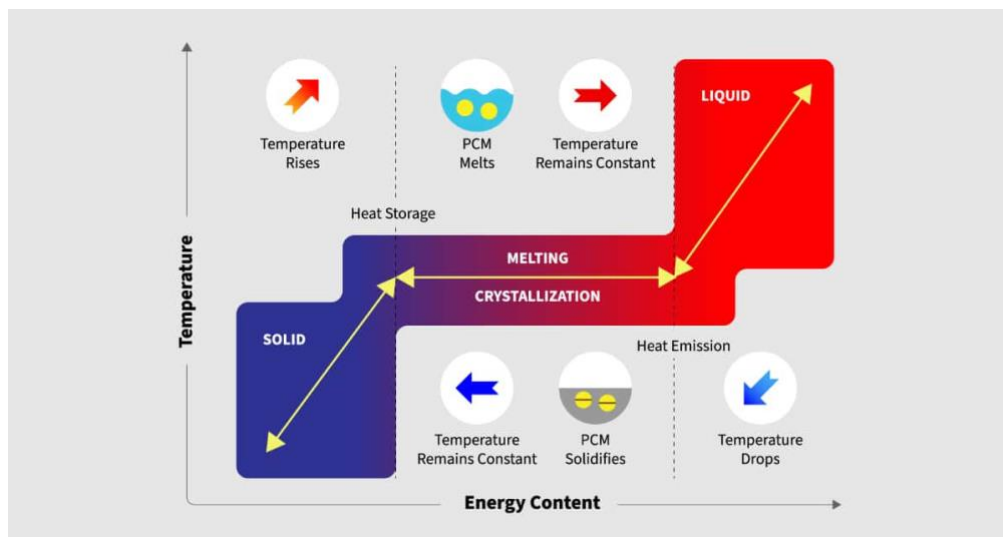


Figure 3.1 : Diagramme de la température du MCP en fonction du contenu énergétique.

3.2 Généralités sur les MCP

Les MCP sont classés suivant leur température de fusion, leur chaleur latente de changement de phase ainsi que leurs températures thermo physiques.

Le choix du MCP dépend du domaine d'application, d'où l'intérêt de définir les critères de sélection d'un MCP. La température et la plage de fusion sont considérées comme les plus importants dans le choix du type de MCP. La plage de fusion est déterminée en fonction de l'application souhaitée (bâtiment, transport, alimentaire, textile). Ces matériaux doivent avoir une chaleur latente de fusion importante. Afin de faciliter et accélérer les charges et de décharges, il est intéressant de choisir une bonne conductivité thermique. Les MCP sont classés en organique, inorganique et eutectique [11].

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

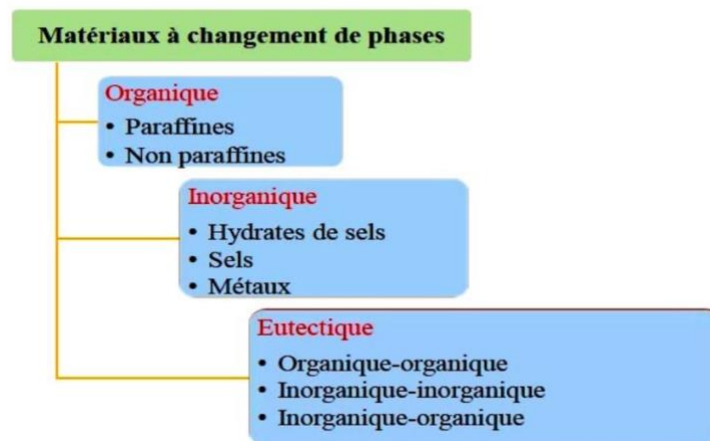


Figure 3.2: Classification des MCP [11].

3.3. MCP organiques :

Les matériaux à changement de phases organiques sont divisés en paraffine et non-paraffine. En général les MCP organiques ne souffrent pas de ségrégation de phase et cristallisent avec peu ou pas de super-refroidissement [12].

La paraffine est disponible dans une large plage de températures, avec une densité d'environ 900kg/m^3 , s'ouvrant pour une utilisation dans divers autres domaines en plus des applications liées au bâtiment. La chaleur latente est basée sur la masse, et ils ne montrent pas aucun signe de séparation de phase après des cycles répétés à travers des transitions solide – liquide et ont une faible pression de vapeur.

Les non – paraffines utilisés comme MCP comprennent les acides gras et leurs esters et alcools d'acides gras, les glycols. Les températures de fusion des acides gras varient de 5 à 70°C et possèdent une chaleur latente appréciable allant de 45 à 210 J/g mais généralement autour de 150 J/g (140 MJ/m^3). Ils sont capables de réaliser des milliers des cycles thermiques et chimiques (fusion/congélation) sans aucune dégradation notable des propriétés thermiques.

Dans l'ensemble, les MCP organiques ont de nombreuses qualités qui les rendent adaptés aux divers types d'application, mais il existe de nombreux MCP organiques considérés comme inflammable, et là c'est un inconvénient crucial qui a un impact considérable, par exemple, sur l'aspect sécurité des MCP organiques lorsqu'ils sont destinés aux applications du bâtiment [12].

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

Tableau 3.1: Avantages et désavantages des MCP organiques.[13]

AVANTAGES	DÉSAVANTAGES
<ul style="list-style-type: none">• Chaleur spécifique élevée ;• Refroidissement faible ou nul ;• Plage de point de fusion large et variable ;• Disponible dans une large plage de températures (de 20°C à 70°C) ;• Thermiquement fiable à long terme (cycle de fusion par congélation) ;• Faible pression de vapeur sous forme fondue ;• Chaleur latente de fusion raisonnable (120 KJ/Kg jusqu'à 210KJ/Kg) ;• Chaleur latente relativement élevée ;• Stabilité chimique et thermique ;• Non corrosifs ;• Innocent (ni toxique ni irritant) ;• Recyclage ;• Compatibilité avec les matériaux de construction ;• Bonne compatibilité avec d'autres matériaux.	<ul style="list-style-type: none">• Faible conductivité thermique ;• Enthalpie de changement de phase inférieure ;• Changement de volume relativement important ;• Non compatible avec des récipients en plastique ;• Inflammabilité.

3.4. MCP Inorganique

Les matériaux à changement de phase inorganique sont constitués des hydrates de sel et des métaux. Pour les applications de construction, cependant, les métaux ne se situent pas dans la plage de températures souhaitée et, en outre, ils ont des pénalités de poids sévères qui les rendent inadaptés [12].

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

Les hydrates de sel sont constitués d'un alliage de sels inorganiques et d'eau et permettent un MCP rentable en raison d'une disponibilité facile et d'un faible coût. La transformation à changement de phase implique l'hydratation ou la déshydratation des sels dans un processus qui ressemble à la fusion et à la congélation typiques. L'hydrate de sel peut fondre en un hydrate de sel contenant moins d'eau ou sous une forme anhydre où le sel et l'eau sont complètement séparés.

Les hydrates de sel possèdent une capacité de stockage importante et opèrent une transition de phase à température ambiante. Elles ont une densité d'environ 1700 Kg/m^3 , ce qui est deux fois plus élevé que pour la paraffine. Avec une chaleur latente maximale de l'ordre de 200 J/g , leur stockage de chaleur par volume est d'environ 350 MJ/m^3 [12].

Tableau 3.2: Avantages et les désavantages des MCP inorganique [13].

Avantages	Désavantages
<ul style="list-style-type: none">• Chaleur latente de fusion élevée ;• Conductivité thermique élevée ;• Une plus grande enthalpie de changement de phase ;• Changement de phase brutal ;• Changement de volume faible ;• Ininflammable ;• Faible coût ;• Compatible avec les conteneurs en plastique ;• Faible impact environnemental.	<ul style="list-style-type: none">• Présente une stabilité chimique variable;• Pression de vapeur élevée (induit une perte d'eau et provoque un changement progressif du comportement thermique pendant le processus de cycle thermique) ;• Corrosion ;• Irritant ;

3.5. MCP Eutectiques

Les matériaux de changement de phase eutectiques est une composition de fusion minimale de deux ou plusieurs composants, dont chacun fond et gèle de manière congruente. Pendant la phase de cristallisation, un mélange de composants est formé, agissant ainsi comme un composant unique. Les composants gèlent en un mélange intime de cristaux et fondent simultanément sans séparation [12].

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

Les eutectiques peuvent être des mélanges organiques – organiques, inorganiques – inorganiques ou organique – inorganique. Cela laisse place à une grande variété de combinaisons qui peuvent être adaptées à des applications spécifiques.

Parmi les mélanges eutectiques organiques, les plus courants testés sont constitués d'acide gras. Les mélanges eutectiques inorganiques les plus étudiés sont constitués des différents hydrates de sel.

Tableau 3.3 : Avantages et désavantages des MCP eutectiques.[13]

Avantages	Désavantages
<ul style="list-style-type: none">• Température de fusion forte ;• Densité de stockage thermique volumétrique élevée.	<ul style="list-style-type: none">• Manques des données d'essai actuellement disponible sur les propriétés thermo-physique.

3.6. Applications des matériaux changement de phase

a – Le transport des produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations des températures que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver [14].

b – Le stockage d'énergie thermique

Les MCP stockent de l'énergie en changeant de phase de solide – liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide – solide (solidification). Le choix du MCP le plus approprié est fondé sur un certain nombre de facteurs : le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique (phase liquide et solide), etc. Un MCP pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58°C. Ce matériau a été mis en œuvre dans des conteneurs déplaçables par camion pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateurs d'ordures ménagères. La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50°C [14].

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

c – Applications médicales

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport du sang et organes. Récipients usagé pour ce travail des buts semblables à ceux expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussins et chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps.



Figure 3.3: Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP.

3.7. Propriétés thermo physiques des matériaux à changement de phase

La propriété thermo – physique du MCP est la propriété la plus importante dans les critères de sélection d'un MCP pour le stockage de la chaleur latente. Les propriétés thermo physique à analyser sont :

- une température de changement de phase dans la plage de température de fonctionnement souhaitée ;
- chaleur latente de fusion élevée par unité de volume de sorte que des conteneurs de plus petites tailles puissent être utilisés ;
- conductivité thermique élevée pour aider à charger et à décharger le MCP dans le laps de temps limité ;
- chaleur spécifique élevée de sorte qu'une énergie supplémentaire sous forme de chaleur sensible soit disponible pour le système de stockage d'énergie thermique ;
- Petit changement de volume pendant la transition de phase et faible pression de vapeur à la température de fonctionnement afin d'éviter le problème de confinement ;
- Le MCP doit fondre complètement (c'est – à – dire fusion congruente) pendant la transition de phase afin que les phases solides et liquide soient homogènes ;

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

- Thermiquement fiable (c'est – à – dire, la stabilité au cycle) de sorte que le MCP soit stable en termes de températures de changement de phase et de chaleur latente de fusion et puisse être utilisé à long terme ;
- Bon transfert de chaleur ;
- Faible pression de vapeur à la température de fonctionnement ;
- Haute densité et fusion complète ;
- Équilibre de phase favorable et pas de ségrégation [13].

3.8. Le stockage d'énergie par chaleur latente dans les matériaux changement de phase.

Le stockage de chaleur latente (SCL) est basé sur le dégagement de chaleur ou l'absorption de chaleur pendant le changement de phase d'un matériau de stockage du solide au liquide ou du liquide au gaz ou vice versa [8].

La capacité de stockage du système de SCL avec MCP est donnée par l'expression [15]:

$$Q = \int_{T_i}^{t_m} m C_P dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m C_P dT \quad (3.1)$$

$$Q = m [C_{sp}(t_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp}(T_f - t_m)] \quad (3.2)$$

Le transfert d'énergie thermique du MCP se produit pendant le processus de charge ou décharge (fusion ou solidification) au cours duquel l'état ou la phase du matériau passe de liquide à solide ou de solide à liquide. Au début du chauffage du matériau, la température du MCP augmente en absorbant l'énergie thermique. Lorsque le matériau atteint une plage de température spécifique, il commence à se fondre vu que, le matériau commence à subir une transition de phase de l'état solide à l'état liquide. Cependant, contrairement aux matériaux de stockage de chaleur sensible, pendant le processus de transition de phase, le MCP libère ou absorbe de la chaleur à une température constante ou pression constante [8].

Les MCP (cire de paraffine, hydrates de sel et sels fondus) présentent un avantage visible par rapport aux matériaux de stockage de chaleur sensible (SCS). Le SCL, par rapport au SCS, offre une densité de stockage d'énergie plus élevée avec des changements de température proche de zéro. Les MCP stockent 5 à 14 fois plus de chaleur par unité de volume en comparant avec les matériaux de stockage sensible tels que l'eau, la maçonnerie ou la roche. Cependant, les difficultés surviennent généralement en réalité en raison du faible changement de densité, de la conductivité thermique, du sous-refroidissement des matériaux à changement de phase, de la stabilité des propriétés et parfois de la ségrégation de phase [12]. Les MCP

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

sont spécifiquement utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie thermique latente, et par conséquent, le MCP peut également être appelé matériau de stockage de chaleur latente.

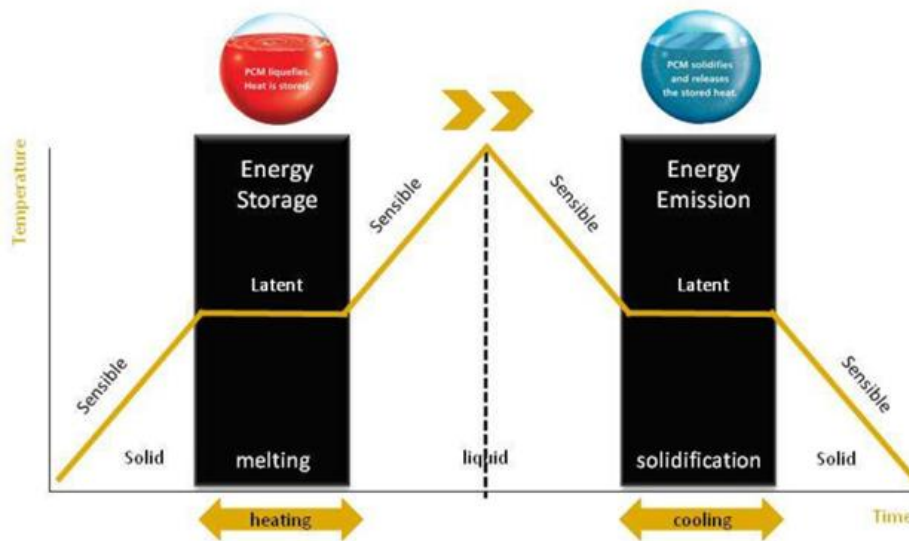


Figure 3.4: Matériau de stockage de chaleur latente.

Le stockage d'énergie par chaleur latente est basé sur l'enthalpie des solides et des liquides. L'avantage est basé sur une plage de variation de température très étroite ou constante pendant le stockage et/ou la libération d'énergie. Dans la plupart des cas, un processus de changement de phase solide à liquide est utilisé en raison de la faible expansion volumétrique, où la fusion est utilisé pour stocker la chaleur et la solidification est utilisé pour libérer la chaleur.

Les enthalpies des MCP vont de 100 à 430 MJ/m. À titre de comparaison, le SCS dans l'eau varie de 50 à 250 pour le refroidissement et le chauffage, respectivement. Les paraffines, les acides gras, les hydrates de sel et les mélanges eutectiques sont des représentants courants des MCP pour les applications de construction [12].

Le MCP à utiliser dans la conception des systèmes de stockage d'énergie thermique (SSET) à chaleur latente doit présenter les propriétés thermo-physiques, cinétiques et chimiques souhaitables [15].

3.9. Propriétés thermo-physiques

En sélectionnant un MCP pour une application particulière, la température de fonctionnement du chauffage ou du refroidissement doit être adaptée à la température de fusion du MCP. La chaleur latente doit être aussi élevée que possible, en particulier sur une base volumétrique,

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

pour minimiser la taille physique de l'accumulateur de chaleur. Une conductivité thermique élevée aiderait à charger et à décharger le stockage d'énergie [15].

3.9.1 Propriétés physiques

La stabilité de phase pendant la fusion par congélation aiderait à fixer le stockage de chaleur et une densité élevée est souhaitable pour permettre une plus petite taille de récipient de stockage. Des petits changements de volume lors de la transformation de phase et une faible pression de vapeur aux températures de fonctionnement pour réduire le problème de confinement [15].

3.9.2 Propriétés cinétiques

La surfusion a été un aspect gênant du développement du MCP, en particulier pour les hydrates de sel. Une surfusion de plus de quelques degrés gênera la bonne extraction de chaleur depuis le magasin, et une surfusion de 5 à 10°C peut l'empêcher complètement. On ce que concerne les propriétés cinétiques, il est souhaitable :

- une vitesse de cristallisation suffisante;
- pas de surfusion [15].

3.9.3 Propriétés chimique

Le MCP peut souffrir dégradation par perte d'eau d'hydratation, de décomposition chimique ou d'incompatibilité avec les matériaux de construction. Les MCP doivent être non toxique, ininflammables et non explosifs pour des raisons de sécurité [15].

3.9.4 Propriétés environnementales

Comme critère de sélection du MCP, l'impact environnemental joue un rôle primordiale dans l'application. On cherche à avoir : une faible énergie intrinsèque, un faible impact environnemental et non – polluant pendant la durée de vie du MCP et, avoir un MCP possédant un potentiel de recyclage [15].

3.9.5 Économique

Le faible coût et la disponibilité à grande échelle des matériaux à changement de phase sont également très importants. L'abondance, la disponibilité et la rentabilité sont les facteurs clés de succès pour pouvoir utiliser les MCP dans les SSET à chaleur latente [15].

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

3.10. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

a – La fusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement de phase. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchent de la solidification et provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement de phase [14]. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures à celles de stockage où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement.

b – La surchauffe

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement de phase (réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps, de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe s'effectue pendant une courte durée, elle n'est pas considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système [14].

c – La dilatation

Pendant le changement de phase de solide à liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression [14].

3.11. Les Échangeurs de chaleur avec matériaux changement de phase

Les systèmes de stockage d'énergie thermique à chaleur latente permettent de stocker des grandes quantités d'énergie dans des volumes relativement petits. Les matériaux changement de phase (MCP), sont utilisés comme support de stockage de chaleur latente. Cependant, la faible conductivité thermique de la plupart des MCP entraîne un long processus de fusion (charge) et de solidification (décharge) [16].

Divers mesures permettent d'intensifier le processus de transfert de chaleur, mais pour que ces systèmes, ils deviennent courants sur le marché commercial, une recherche systématique intense est encore nécessaire [16].

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

Pour résoudre le problème du transfert de chaleur, des solutions et des techniques de conception qui améliorent la conductivité thermique sont utilisées, telles que les nanoparticules, les matériaux poreux et à faible densité, les MCP micro encapsulés, les mousses métalliques et les graphites.

Des solutions combinées sont également disponibles. L'une des principales techniques d'amélioration de la chaleur dans les systèmes de stockage de chaleur latente est l'utilisation d'ailettes à surfaces étendues. Les échangeurs de chaleur à calandre et à tubes étant la plus largement utilisés à cette fin.

L'utilisation de tels échangeurs de chaleur avec des MCP permettent d'atteindre une efficacité énergétique de plus de 70%. L'ajout des ailettes peut accélérer le processus de fusion de près de 50%, ce qui réduit le temps de chargement, mais conduit également à la nécessité d'optimiser les processus de fabrication des échangeurs de chaleur, en tenant compte des coûts de production [16].

Afin de découvrir une méthode ou un outil de conception pratique et suffisamment précis pour les systèmes de stockage de chaleur latente, les chercheurs étudient ces systèmes de manière analytique ou semi-analytique. Pour simplifier les problèmes analysés, les propriétés physiques du MCP sont souvent considérées comme stables et le matériau lui-même, lors du changement de phase, reste homogène, le régime d'écoulement du MCP est laminaire. Lambert, a proposé un modèle analytique simplifié permettant d'estimer l'emplacement de l'interface solide-liquide et d'analyser la distribution de température dans l'ailette. Cependant, la précision suggérée a été fortement influencée par la géométrie du stockage.

L'objet de l'étude est un MCP basée sur le SET avec un échangeur de chaleur en cuivre. L'unité de stockage de l'énergie thermique, est constituée d'un réservoir en acier inoxydable dans lequel est installé un cuivre (type ailette et tube).

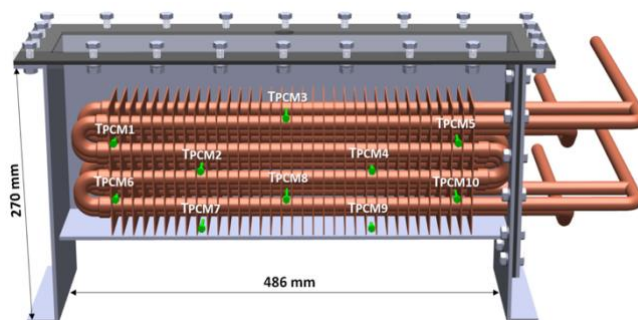


Figure 3.5 : Les positionnements des capteurs de température

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

Le volume du réservoir de stockage a été rempli de MCP RT82 organique. Le MCP avec échangeur de chaleur est conçu pour être utilisé dans les systèmes industriels de récupération/stockage de la chaleur résiduelle dans la plage de température 70-100 °C. Par exemple, la récupération de chaleur de la vapeur résiduelle et du condensat dans l'autoclave et le préchauffage de l'eau d'alimentation [16].

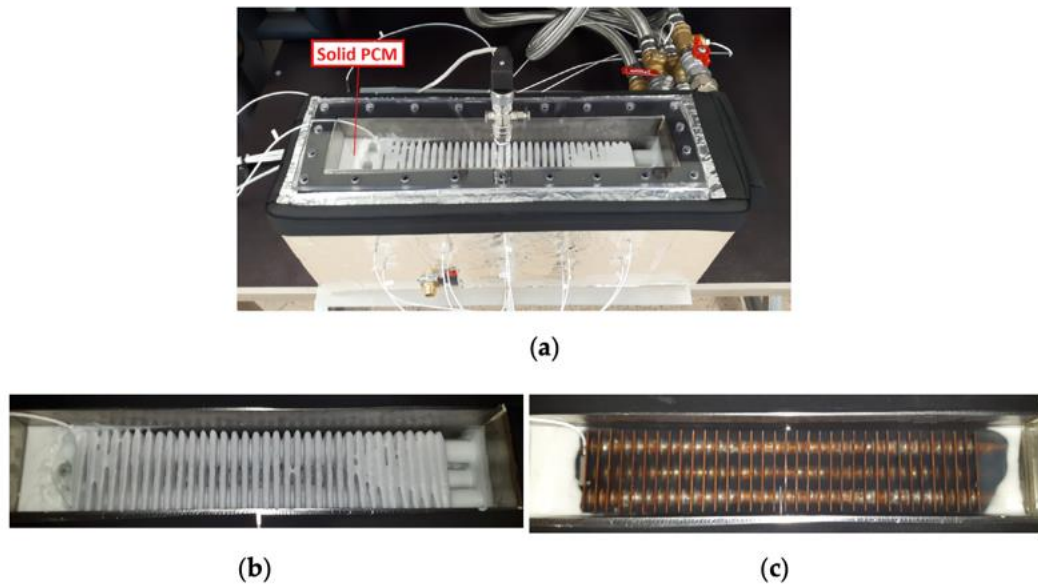


Figure 3.6 : Unité de stockage d'énergie thermique en cuivre (Échangeur de chaleur avec MCP)

L'expérience de charge du MCP (le processus de fusion) est réalisée dans la configuration expérimentale. Au début de l'expérience lorsque le MCP est solide (figure 3.6, b). Avec une température de 24 °C, les vannes d'entrée/sortie du fluide de transfert chaud sont ouvertes et le fluide de transfert chaud circule à travers l'échangeur de chaleur à cuivre et ainsi, le transfert de chaleur avec MCP commence.

Au cours de cette expérience le débit massique du fluide de transfert chaud est de 0,4 kg/s, la température à l'entrée ($T_{HW, IN}$) est de 94 ± 01 °C. Une fois le processus de charge (fusion) terminé (figure 3.6, c), le MCP est refroidi jusqu'à ce qu'il atteigne la température de la consigne en utilisant l'eau froide du réservoir T2 afin d'obtenir les mêmes conditions de départ avant qu'un autre processus de fusion ne commence. Dans cette expérience l'étude du refroidissement n'a pas été étudiée [16].

Au cours de l'étude, il a été remarqué que le transfert de chaleur par convection se produit également à partir de la direction verticale. Dans des zones les plus proches des tubes il est probable que nous aurons un écoulement en développement à partir des surfaces verticales et

Chapitre 03 : Matériaux à changement de phase (MCP)

horizontale qui s'intensifient et en certains points restreignent la formation de courants convectifs dans la direction verticale [16].

Chapitre 04: Les conditions aux limites, hypothèses et modèle mathématique

4.1. La description du problème :

Dans notre étude nous avons pris deux cas différents d'échangeurs de chaleurs:

- Dans le premier cas nous avons fait l'étude d'un échangeur de chaleur à double diamètre: $D_{int}= 25\text{mm}$, $D_{ext} = 50\text{mm}$ et de longueur de 1 mètre horizontale en cuivre (figure 4.1) en essayant 3 différents type de MCP (organique, inorganique et eutectique(organique + inorganique)) plus le cas référence(eau-eau).

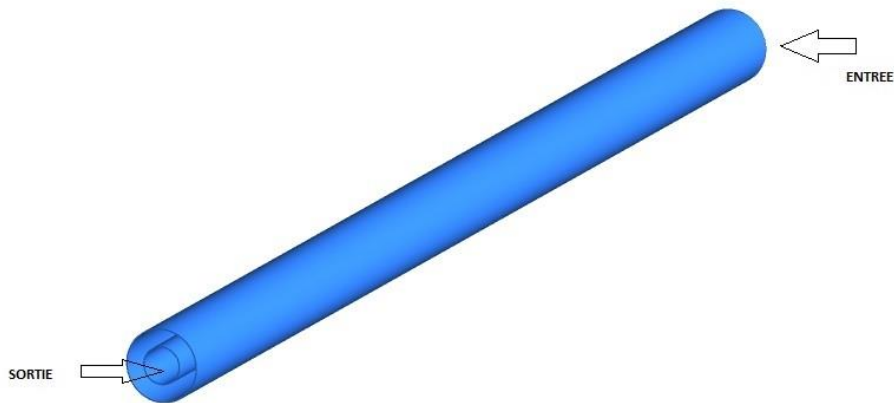


Figure 4.1 : Échangeur de chaleur à double diamètre

- Dans le deuxième cas nous avons fait l'étude d'un échangeur de chaleur de 6.69m en forme de serpentin en cuivre à double diamètre : $D_{int} = 15.9\text{mm}$, $D_{ext} = 50\text{mm}$ (figure 4.2) en utilisant les mêmes type de MCP que le premier cas et le même cas référence.

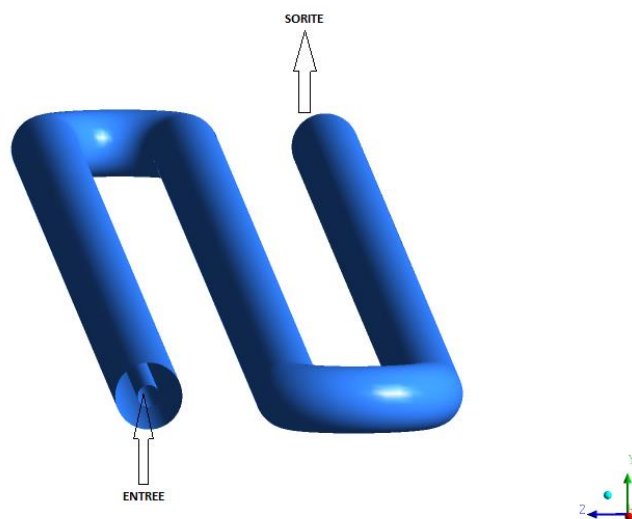


Figure 4.2 : Échangeur de chaleur à double diamètre en serpentin

Chapitre 04: Les conditions aux limites, hypothèses et modèle mathématique

Dans les deux études, nous avons fait pour chacun le chauffage et refroidissement de l'eau qui se situe dans le tube interne et les MCP dans le tube externe.

Pour le cas standard/référence, on a utilisé l'eau dans les deux tubes et pour la comparaison des MCP on en a utilisé 3, notamment :

- Paraffine RT-58 (MCP 1) ;
- Acétate de sodium tri-hydraté (MCP 2) ;
- Magnésium nitrate hexa-hydraté (MCP 3).

Cette étude a pour objectif de déterminer quelle est le meilleur MCP pour le refroidissement et/ou pour le chauffage de l'eau dans les échangeurs de chaleur.

4.2. Les hypothèses du 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 numérique d'un échangeur de chaleur utilisant un matériau à changement de phase (MCP) sont comme suit :

- L'écoulement du fluide à l'intérieure du tube interne (l'eau) est en régime Laminaire ;
- Le MCP dans le tube extérieur est à l'état statique ($v=0$ m/s) ;
- L'écoulement est incompressible ;
- La paroi externe dans le cas chauffage est à 353 K et dans le cas refroidissement est à 283K ;
- Le régime d'écoulement est permanent $\partial/\partial t=0$;
- Le champ de gravité est négligé ;
- L'écoulement est considéré tridimensionnel.

4.3. Les conditions aux limites :

La résolution des équations de conservation d'un phénomène physique se fait par l'utilisation des méthodes numériques bien déterminée. De ce fait, le concept de la discrétisation des équations différentielles, qui a pour résultat, un système d'équations algébriques non linéaires décrivent les propriétés discrètes du fluide dans chaque nœud du domaine étudié.

Il existe plusieurs méthodes numériques de discrétisation des équations différentielles aux dérivées partielles, on citera les plus utilisées :

- La méthode des éléments finis (MEF).
- La méthode des différences finies (MDF).
- La méthode des volumes finis (MVF).

Chapitre 04: Les conditions aux limites, hypothèses et modèle mathématique

Cette dernière notamment (MVF) est la plus utilisée actuellement dans les codes de simulation numérique CFD (Computational Fluid Dynamics).

Nous avons opté dans cette étude pour l'utilisation du code de calcul ANSYS FLUENT un solveur basé sur la méthode des volumes finis pour la résolution des équations de la modélisation des écoulements des fluides. Le logiciel WORKBENCH (DESIGNMODELER) pour la description géométrique et le choix du maillage.

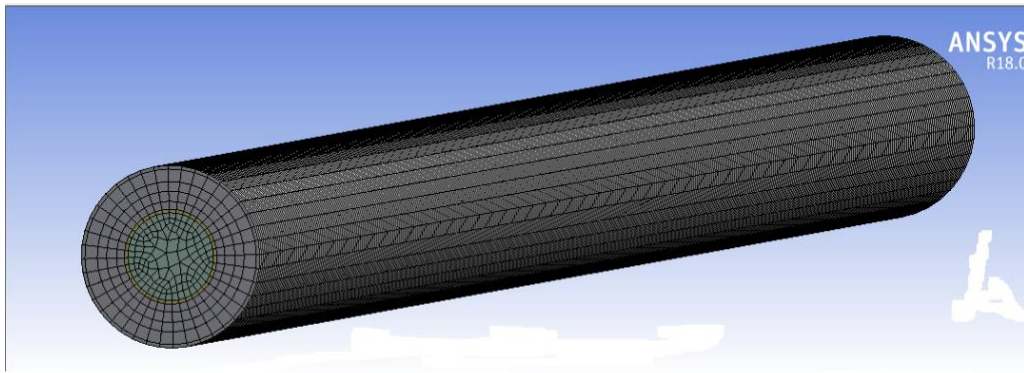


Figure 4.3 : Maillage hexaédrique de l'échangeur de chaleur à double diamètre

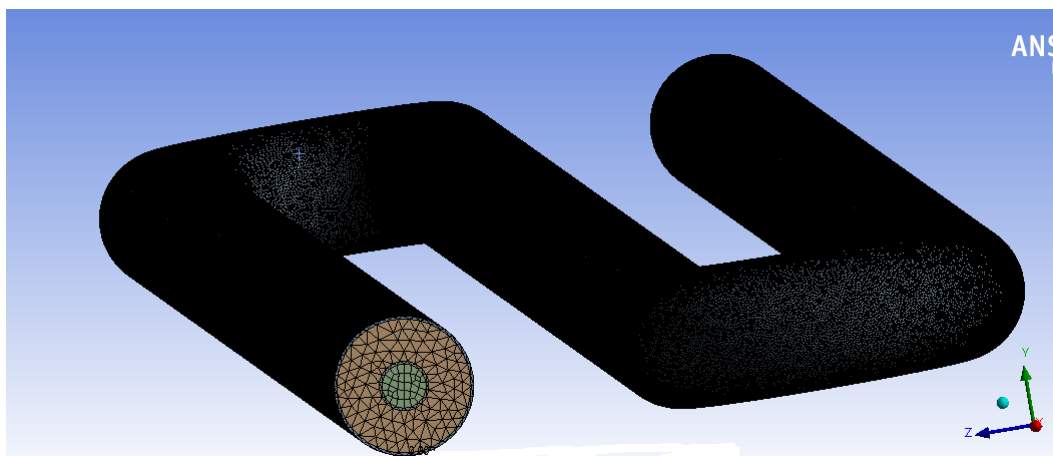


Figure 4.4 : Maillage tétraédrique de l'échangeur de chaleur à double diamètre en serpentin

Chapitre 04: Les conditions aux limites, hypothèses et modèle mathématique

Tableau 4.1 : Propriétés thermo-physiques des matériaux

	MCP 1	MCP 2	MCP3	Eau	Cuivre
Masse Volumique(Kg/m³)	840	1450	1350	998,2	8978
Chaleur Spécifique (J/KgK)	2100	4570	2570	4182	381
Conductivité thermique (W/mK)	0,2	0,63	0,68	0,6	387,6
Point de fusion(K)	331	331	331	273	-
Viscosité dynamique (Kg/ms)	0,0269	0,03	0,035	-	-
Chaleur latente (J/Kg)	180000	267000	132000	-	-

4.3.1. L'échangeur de chaleur à double diamètre

Tableau 4.2 : Les conditions aux limites pour le chauffage

	L'EAU	Paroi externe du MCP
Température entrée (K)	277	353
Température sortie (K)	-	353
Débit entrée (Kg/s)	0,005	-
Débit sortie (Kg/s)	Outflow	-

Tableau 4.3 : Les conditions limites pour le refroidissement

	L'EAU	Paroi externe du MCP
Température entrée (K)	353	283
Température sortie (K)	-	283
Débit entrée (Kg/s)	0,005	-
Débit sortie (Kg/s)	Outflow	-

Chapitre 04: Les conditions aux limites, hypothèses et modèle mathématique

4.3.2.L'échangeur de chaleur à double diamètre en serpentin

Tableau 4.4: Les conditions aux limites pour le chauffage

	L'EAU	Paroi externe du MCP
Température entrée (K)	277	353
Température sortie (K)	-	353
Débit entrée (Kg/s)	0,01	-
Débit sortie (Kg/s)	Outflow	-

Tableau 4.5 : Les conditions aux limites pour le refroidissement

	L'EAU	Paroi externe du MCP
Température entrée (K)	353	283
Température sortie (K)	-	283
Débit entrée (Kg/s)	0,01	-
Débit sortie (Kg/s)	Outflow	-

4.4 Le modèle mathématique :

Les équations gouvernantes sont présentées sous la forme différentielle, qui a été dérivée en considérant un volume de contrôle fixe infiniment petit. Ces équations de conservation (conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) sont des équations aux dérivées partielles non linéaires [17], les analyses différentielles des écoulements de fluides et de transfert de chaleur ne peuvent être résolues numériquement qu'en utilisant un code CFD (par exemple ANSYS FLUENT ou ANSYS CFX, Open FOAM, STAR-CCM+, etc).

Dans cette section, on établit les équations de base régissant l'écoulement considéré dans un système de coordonnées cylindriques (r , θ , z) et en régime stationnaire. Pour un fluide newtonien et compressible, ces équations deviennent :

- La loi de conservation de masse (équation de continuité) ;
- La loi de conservation de quantité de mouvement (équation de Navier-Stokes) ;
- La loi de conservation d'énergie (équation d'énergie).

Chapitre 04: Les conditions aux limites, hypothèses et modèle mathématique

4.4.1 Conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse représente le taux de variation de masse dans un élément fluide. Elle est égale au débit net de la masse dans l'élément fluide exprimée par:

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

4.4.2 Conservation de quantité de mouvement :

L'équation de conservation de quantité de mouvement sans forces de volume est donnée par la relation suivante :

- Selon la coordonnée azimutale :

$$v \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{u^2}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4.2)$$

- Selon la coordonnée radiale :

$$v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{uv}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.3)$$

- Selon la coordonnée axiale :

$$v \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_z \quad (4.4)$$

4.4.3 Équation de conservation d'énergie :

Pour un écoulement compressible, l'équation de conservation de l'énergie donnée par l'expression suivante :

$$\rho c_p \left(v \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.5)$$

Où: u, v, w représentent respectivement les composantes radiale, tangentielle, axiale du vecteur vitesse.

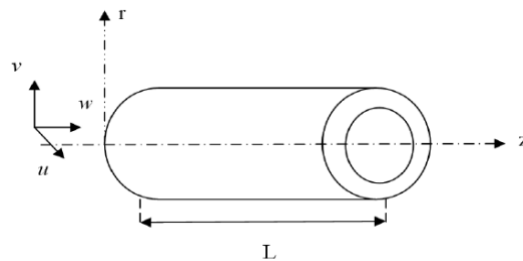


Figure 4.5 : Domaine d'étude des deux cylindres concentriques en entrefer lisse.

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

5.1. Résultats, discussions et analyses :

5.1.1 Le cas de l'échangeur de chaleur à double tube :

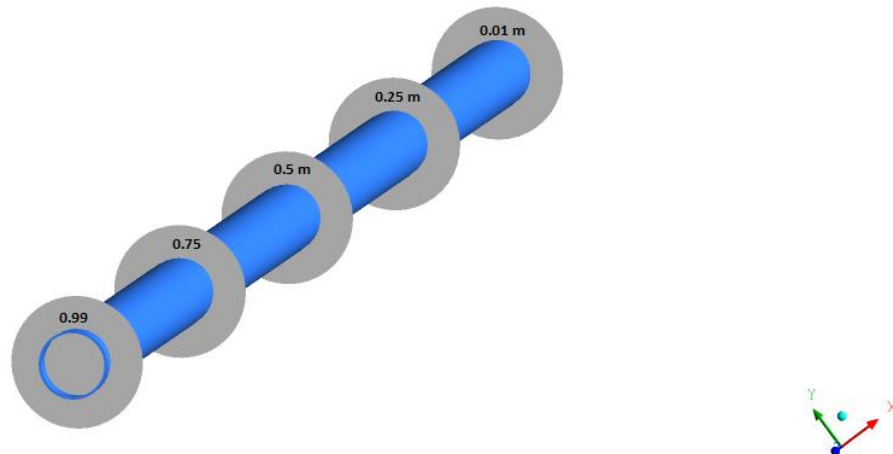


Figure 4.5 : Positionnement des 5 sections radiales étudiée

5.1.1.1 Résultat du cas chauffage :

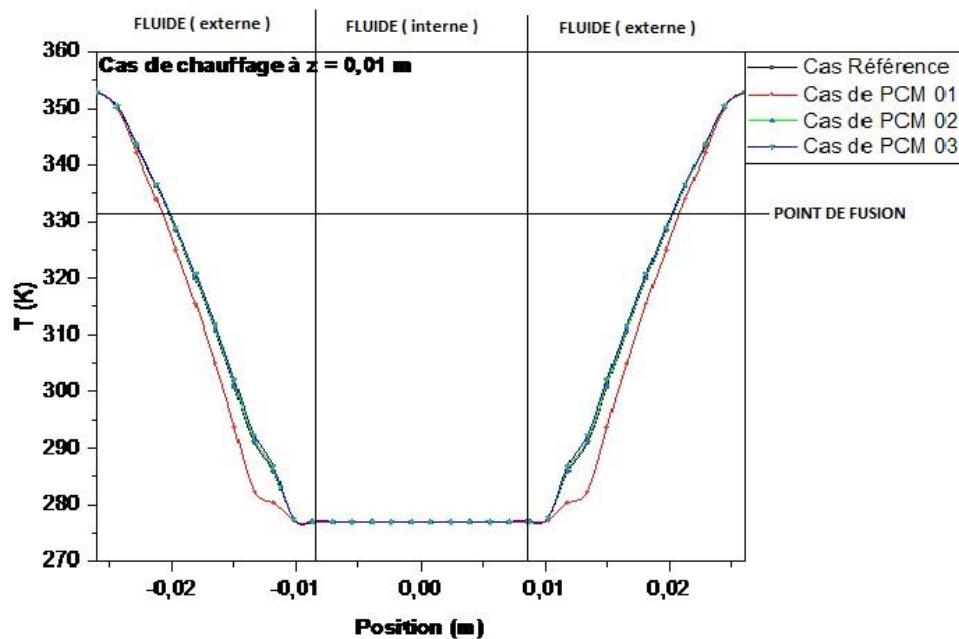


Figure 5.1 : Distribution des températures du chauffage à travers la section radiale à $Z = 0.01\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence

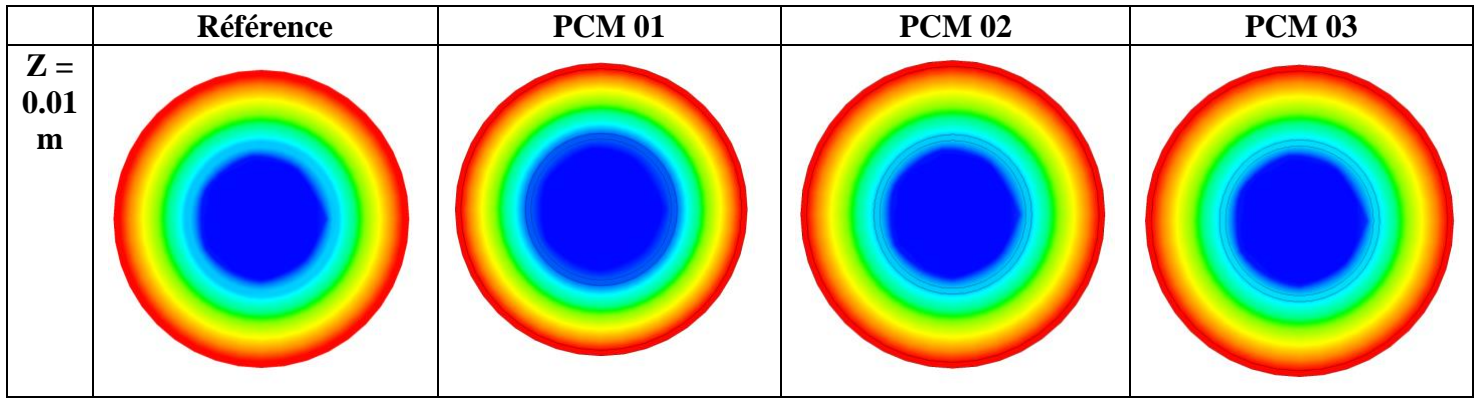


Figure 5.2 : L'évolution de la température du chauffage à Z =0.01m pour les 3 différents MCP et le cas référence

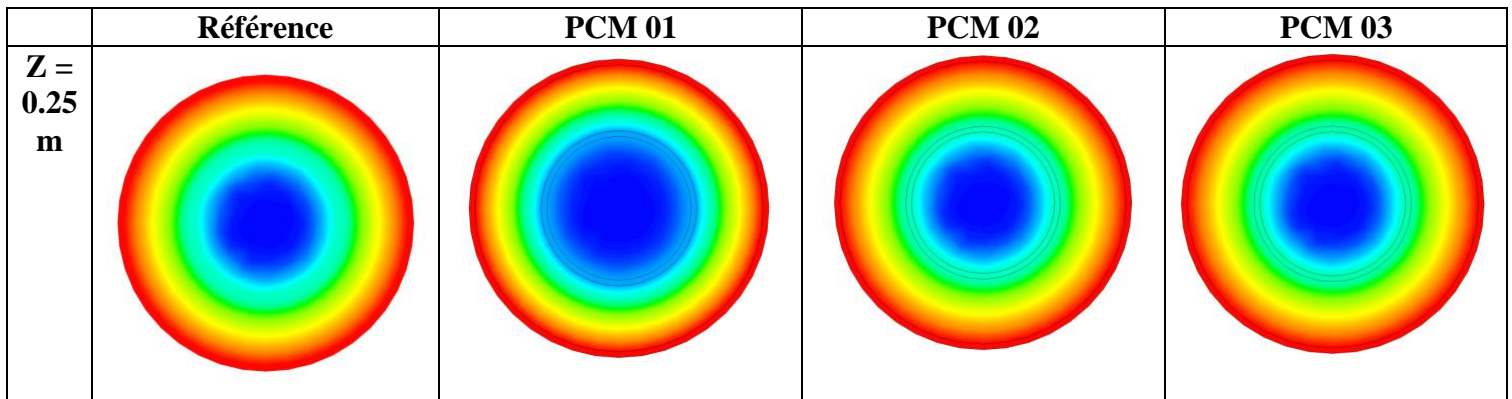


Figure 5.3 : L'évolution de la température du chauffage à Z =0.25m pour les 3 différents MCP et le cas référence

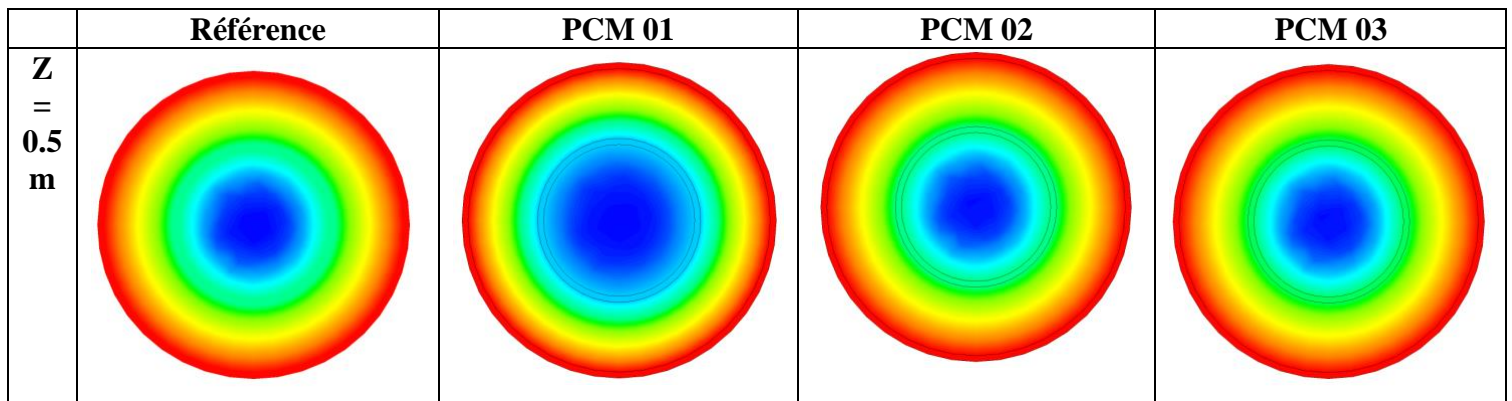


Figure 5.4: L'évolution de la température du chauffage à Z =0.5m pour les 3 différents MCP et le cas référence

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

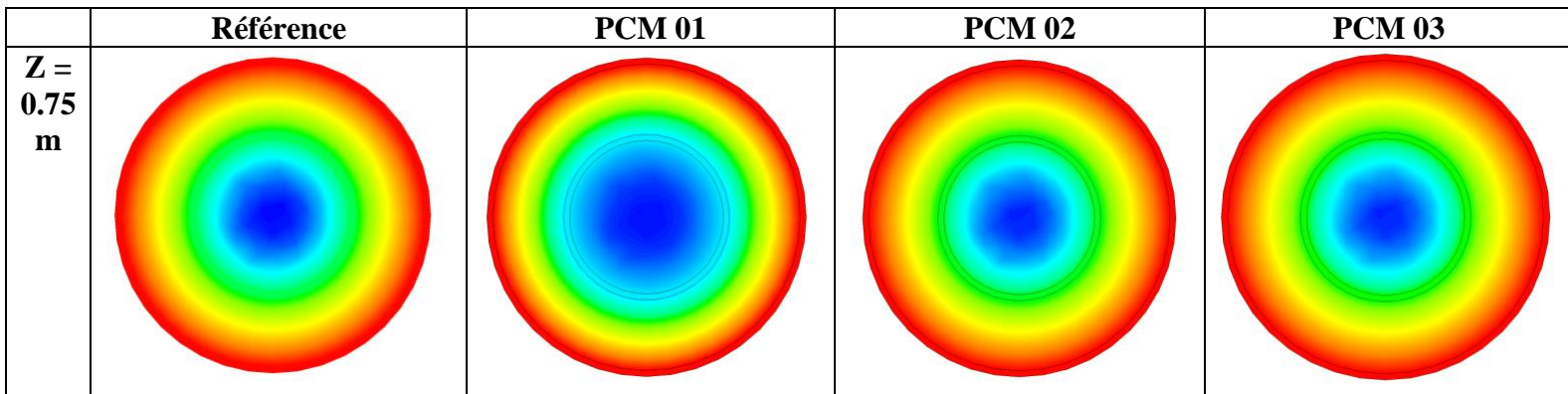


Figure 5.5: L'évolution de la température du chauffage à Z =0.75m pour les 3 différents MCP et le cas référence

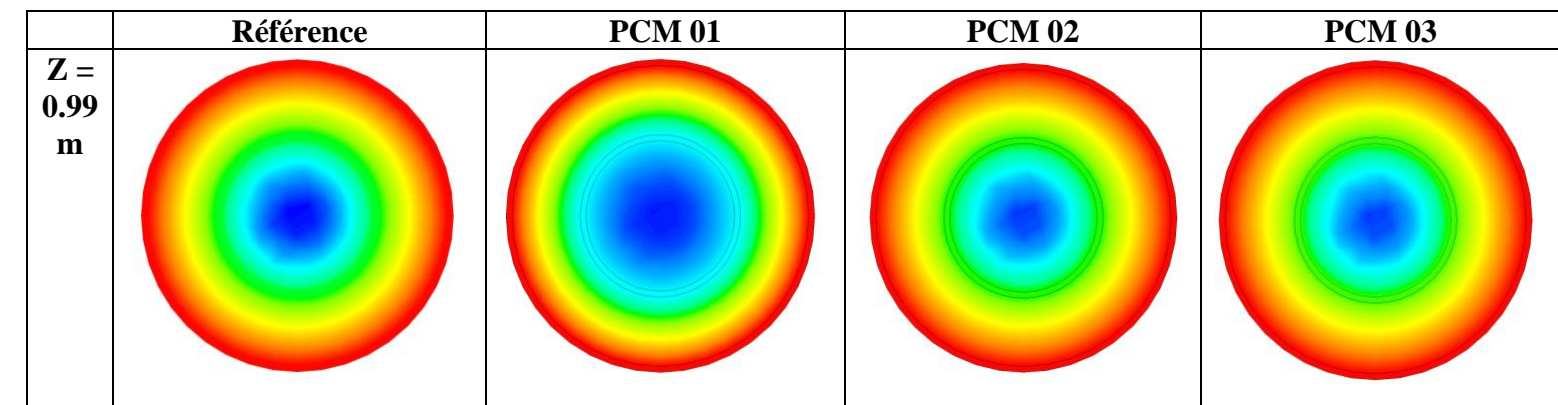


Figure 5.6: L'évolution de la température du chauffage à Z =0.99m pour les 3 différents MCP et le cas référence

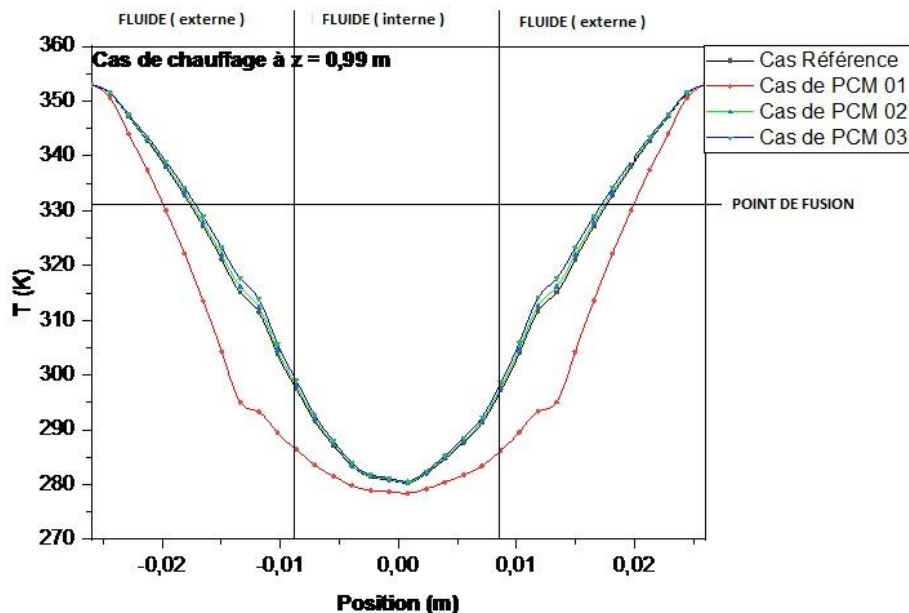


Figure 5.7: Distribution des températures du chauffage à travers la section radiale à Z = 0.99m pour les 3 différents MCP et le cas référence

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

5.1.1.1.1. Discussions et analyse des résultats du cas chauffage :

Pour le cas du Chauffage, la paroi extérieure des 3 MCP et du matériau de référence est à une température de 80°C (353K) et le fluide qui circule dans le tube intérieur est à une température de 4°C (277K). Dans notre géométrie, nous avons pris 5 sections radiales tout au long du tube de 1 m pour analyser les changements de phases des 3 MCP, c'est-à-dire, le point de fusion des matériaux et comparer le transfert thermique avec le cas référence.

La première section radiale à $Z = 0,01\text{m}$, c'est-à-dire, à l'entrée de la conduite, le fluide caloporteur et les MCP ont une grande différence de température. On remarque que nous avons les deux phases (solide et liquide) des MCP entre les deux parois externe et interne.

La deuxième section radiale, à $Z = 0,25\text{m}$, la différence de température entre le fluide et les MCP est inférieure à $Z = 0,01\text{m}$. On observe alors que le MCP 1, n'as pas eu un grand changement de température mais les autres MCP (2 et 3) et le cas référence ont cédé plus de chaleur au fluide interne.

Au milieu de la conduite, à $Z = 0,5\text{m}$, la différence de température entre le fluide et les MCP est encore beaucoup moins importante par rapport à $Z = 0,01\text{m}$. On constate alors que les MCP 2, 3 ont mieux chauffé le liquide par rapport au MCP 1.

À la sortie de la conduite, à $Z = 0,75\text{m}$ et $Z = 0,99\text{m}$, on voit clairement que la différence de température entre le liquide à chauffer et les MCP 2, 3 et le cas référence est moins importante par rapport au MCP 1. On remarque aussi qu'une partie des MCP à l'état solide a changé de phase à la sortie de la conduite en liquide.

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

5.1.1.2 Résultat du cas refroidissement :

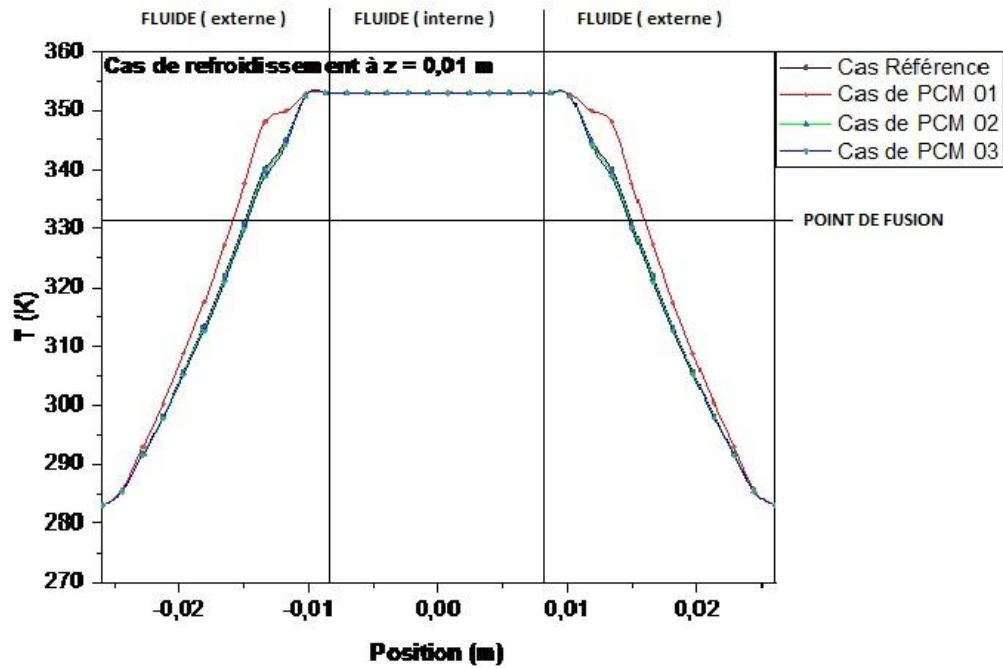


Figure 5.8: Distribution des températures du refroidissement à travers la section radiale à $Z=0.01\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence

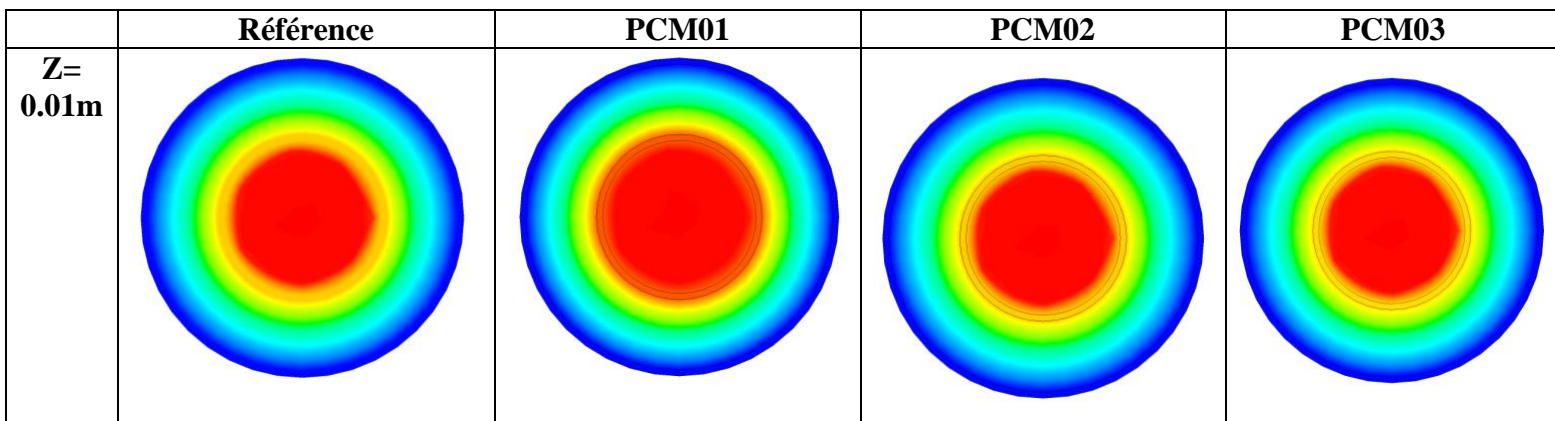


Figure 5.9: L'évolution de la température du refroidissement à $Z=0.01\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

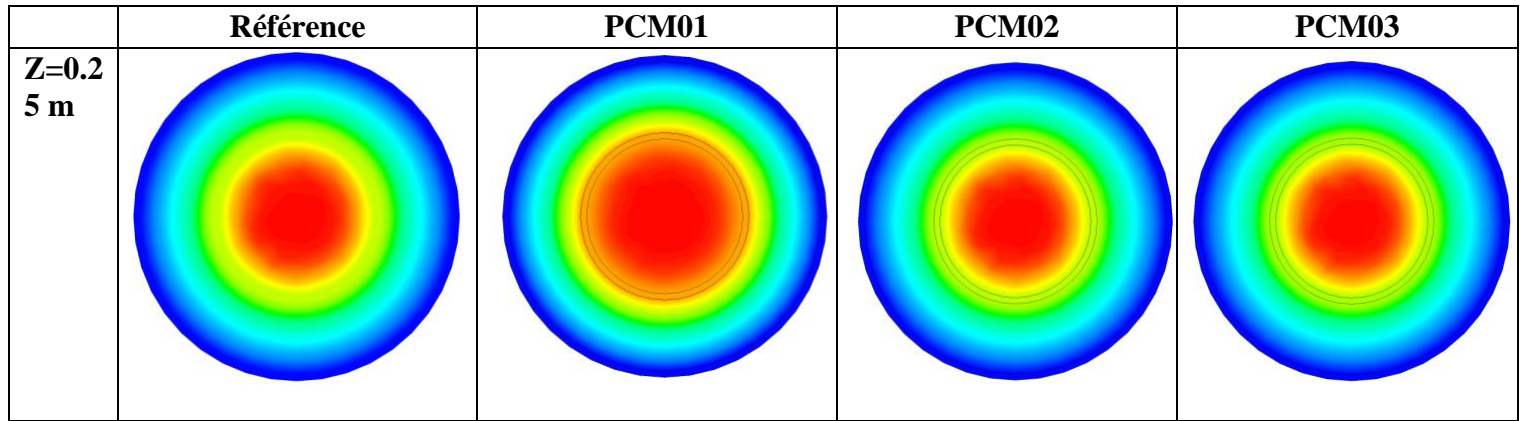


Figure 5.10: L'évolution de la température du refroidissement à $Z = 0.25m$ pour les 3 différents MCP et le cas référence

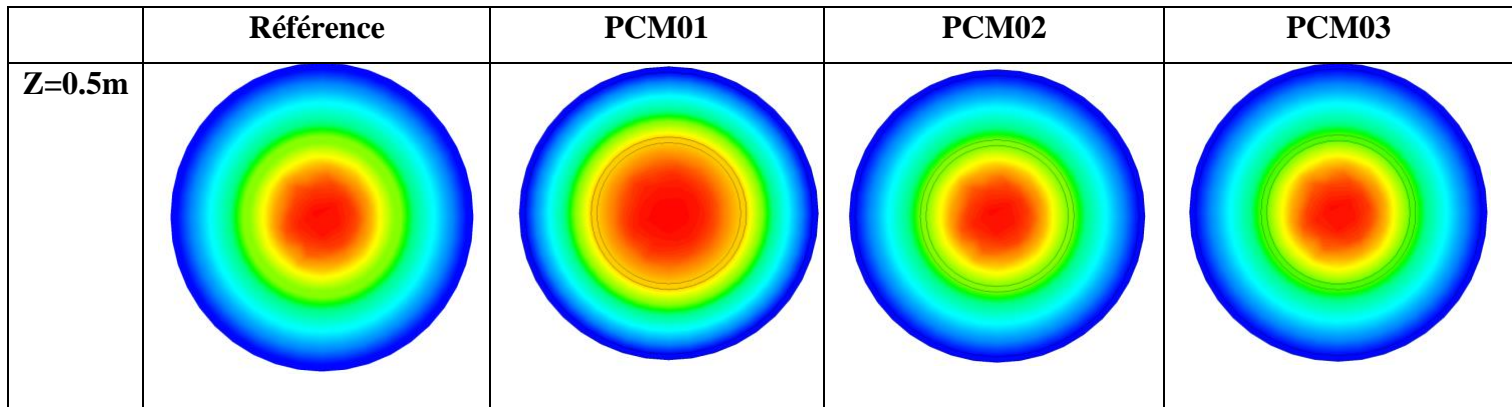


Figure 5.11: L'évolution de la température du refroidissement à $Z = 0.5m$ pour les 3 différents MCP et le cas référence

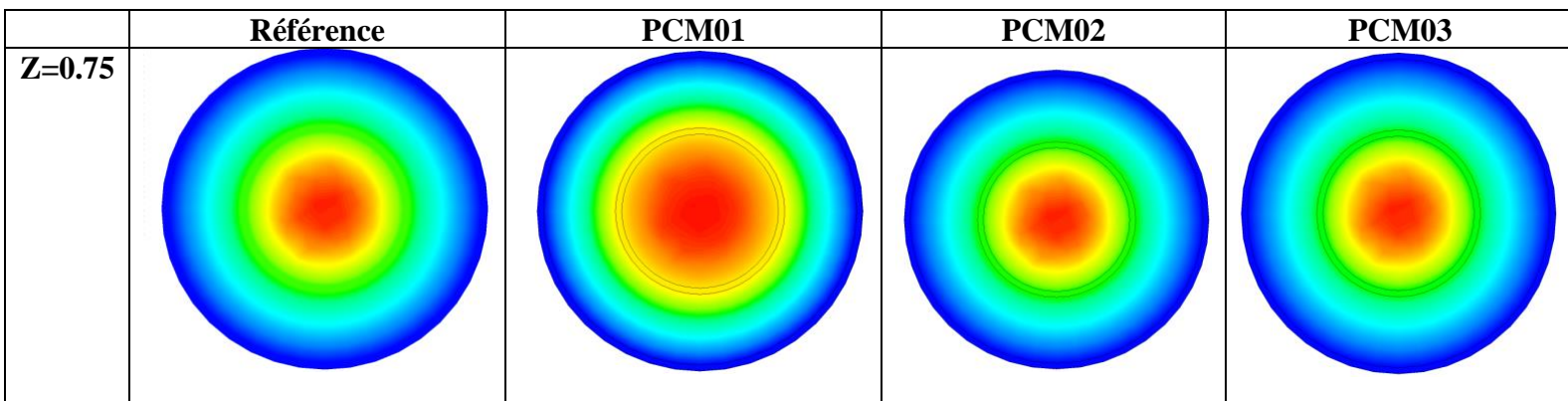


Figure 5.12: L'évolution de la température du refroidissement à $Z = 0.75m$ pour les 3 différents MCP et le cas référence

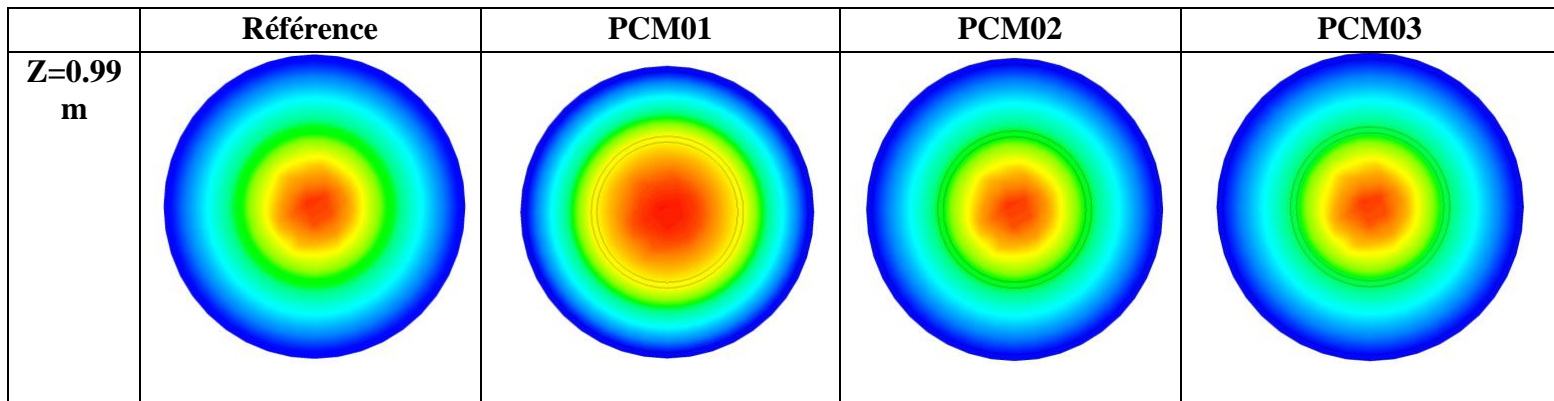


Figure 5.13: L'évolution de la température du refroidissement à $Z = 0.99\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence

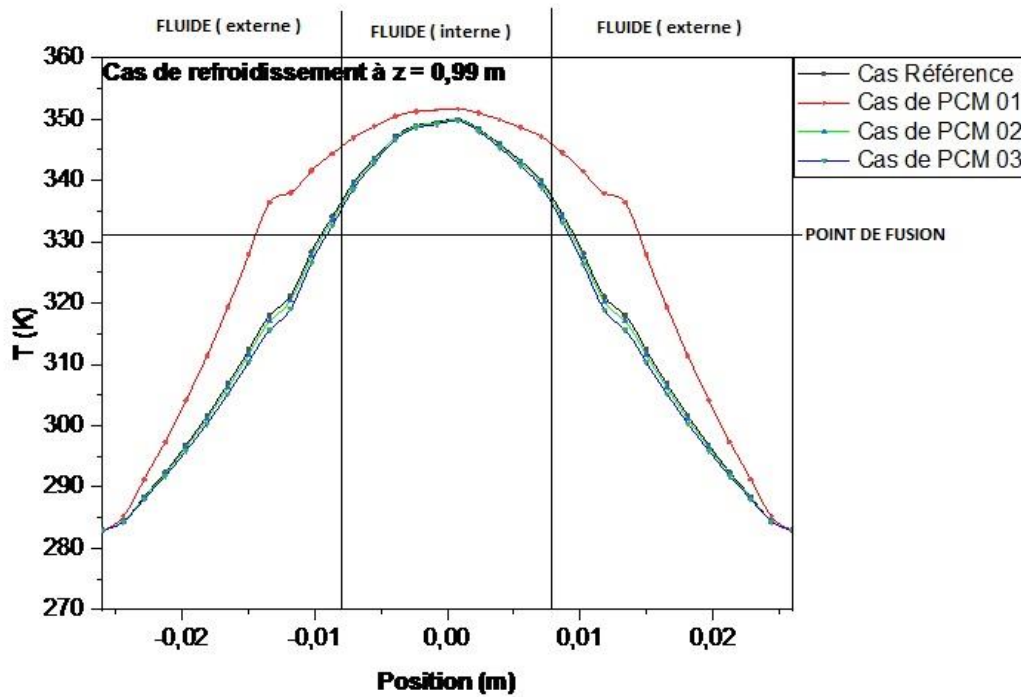


Figure 5.14: Distribution des températures du refroidissement à travers la section radiale à $Z = 0.99\text{m}$ pour les 3 différents MCP et le cas référence

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

5.1.1.2.1. Discussions et analyse des résultats du cas refroidissement :

Pour le cas de refroidissement, la paroi extérieure des 3 MCP et du matériau de référence est à une température de 10°C (283K) et le fluide qui circule dans le tube intérieur est à une température de 80°C (353K). Dans notre géométrie, nous avons pris 5 sections radiales tout au long du tube de 1 m pour analyser les changements de phases des 3 MCP, c'est-à-dire, le point de fusion des matériaux et comparer le transfert thermique avec le cas référence.

La première section radiale $Z = 0,01\text{m}$, c'est-à-dire, à l'entrée de la conduite, les fluides ont à peu près les mêmes températures il n'y a pas grand changement de température. On remarque que nous avons les deux phases (solide et liquide) du MCP entre les deux parois externe et interne.

La deuxième section radiale, à $Z = 0,25\text{m}$, la différence de température entre le fluide et les MCP est inférieure à $Z = 0,01$. On observe alors que le MCP 1, n'a pas eu un grand changement de température mais les autres MCP (2 et 3) et le cas référence ont absorbé plus de chaleur du liquide à refroidir.

Au milieu de la conduite, à $Z = 0,5\text{m}$, la différence de température entre le fluide et les MCP est encore beaucoup moins importante par rapport à $Z = 0,01\text{m}$. On constate alors que les MCP 2 et 3, ont une grande partie à l'état solide par rapport au MCP 1.

À la sortie de la conduite, à $Z = 0,75\text{m}$ et $Z = 0,99\text{m}$, on voit clairement que les températures des MCP 2 et 3 sont presque à leur changement d'état complet mais il reste quand même une petite partie liquide, mais pour le MCP 1 il y a l'état solide et liquide.

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

5.1.2 Le cas de l'échangeur de chaleur à double tube en serpentin :

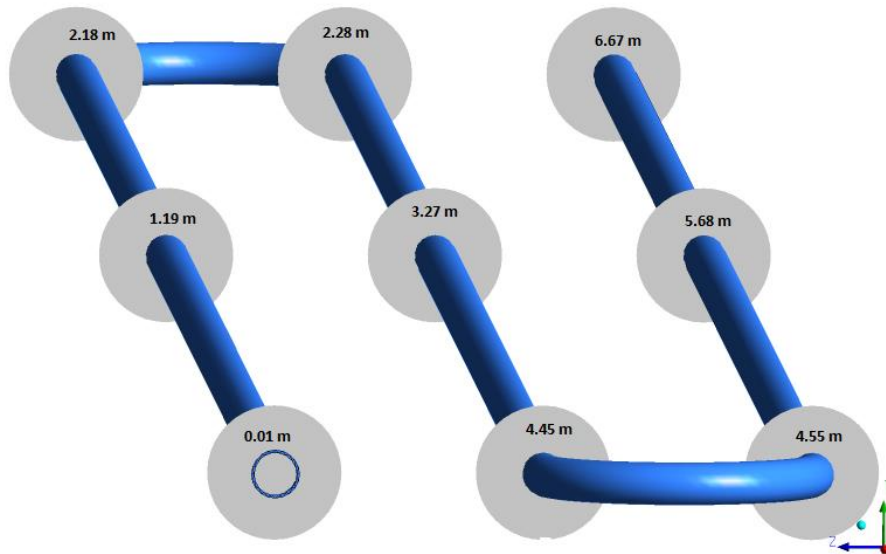


Figure 5.15: Positionnement des 9 sections radiales étudiée

5.1.2.1 Résultat du cas chauffage :

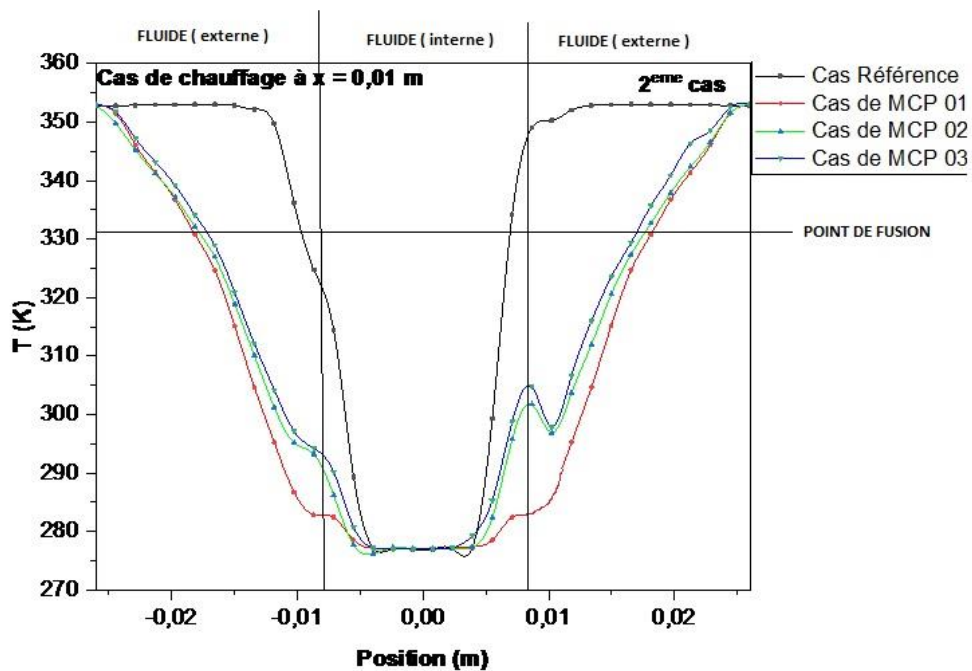


Figure 5.16: Distribution des températures du chauffage à travers la section radiale à $X = 0.01$ m pour les 3 différents MCP et le cas référence

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

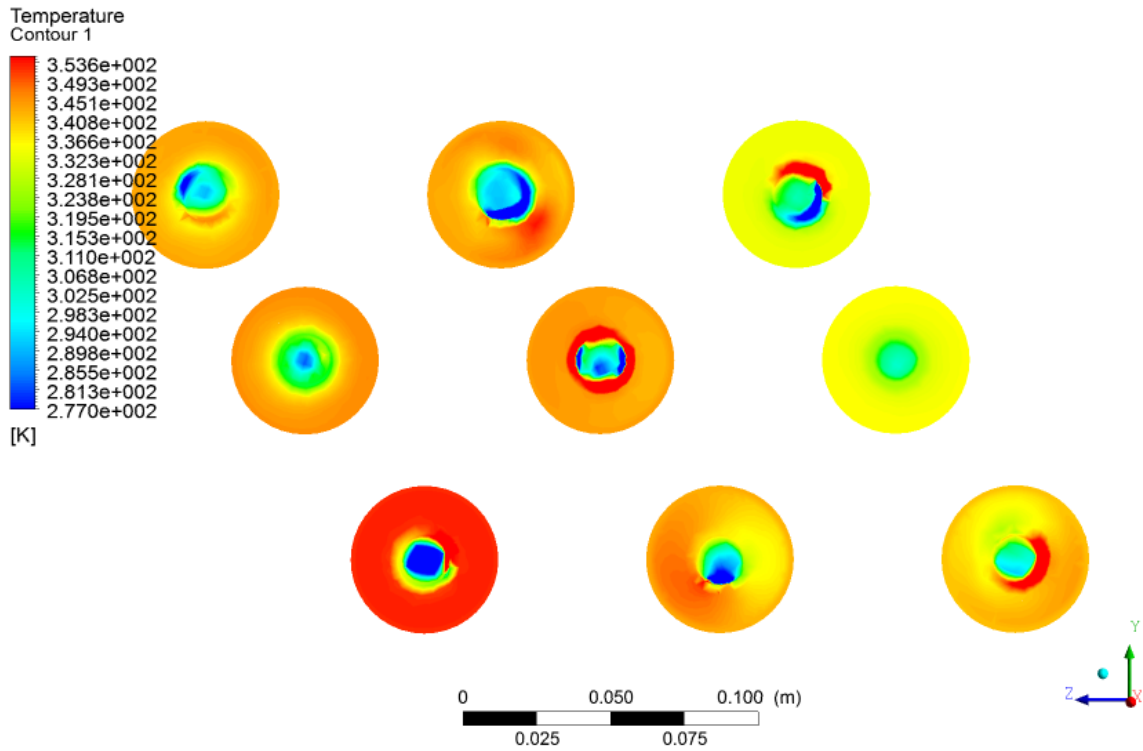


Figure 5.17: L'évolution de la température du chauffage à travers les sections radiales dans le cas référence (eau-eau)

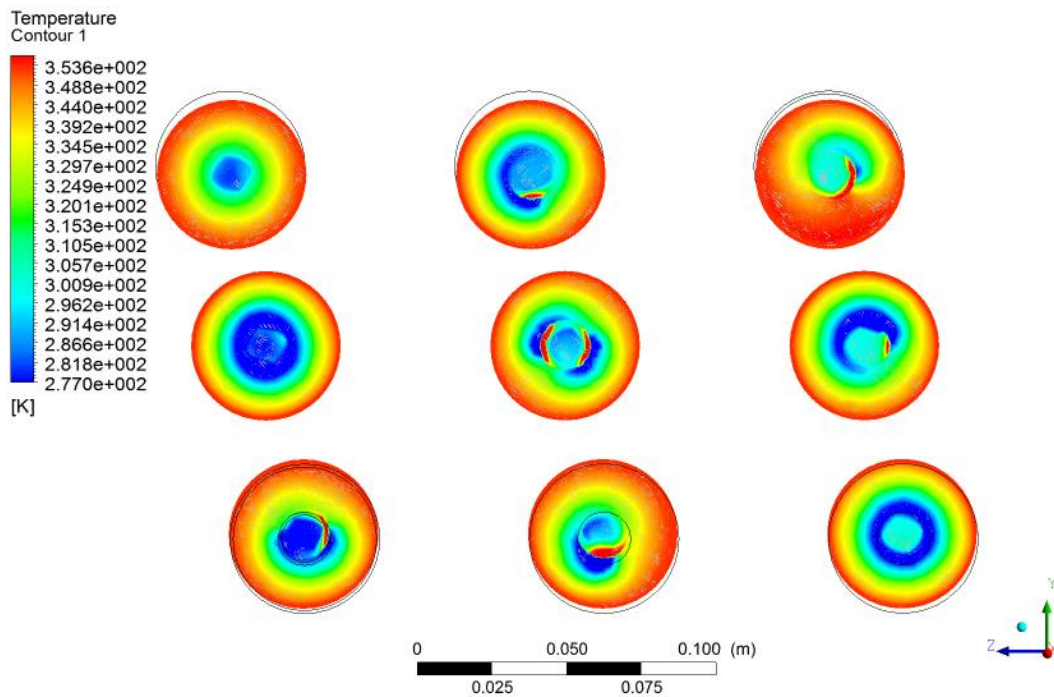


Figure 5.18: L'évolution de la température du chauffage à travers les sections radiales dans le cas du MCP 1 (paraffine RT-58)

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

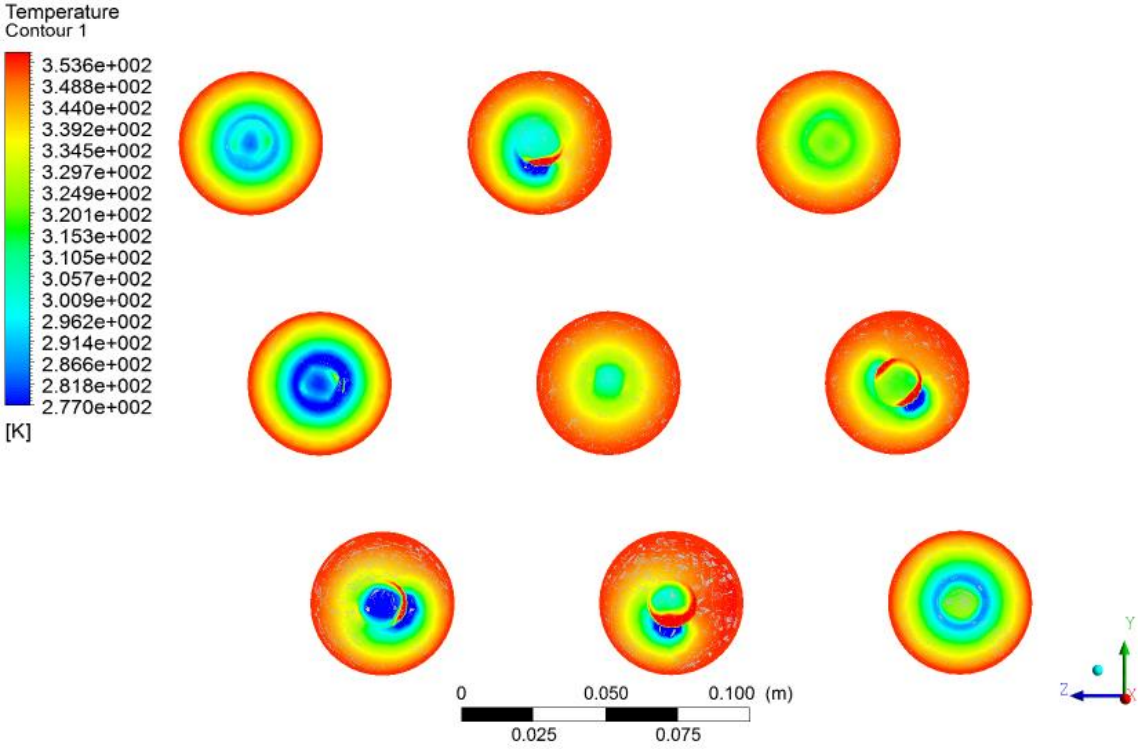


Figure 5.19: L'évolution de la température du chauffage à travers les sections radiales dans le cas du MCP 2(Acétate de sodium tri-hydraté)

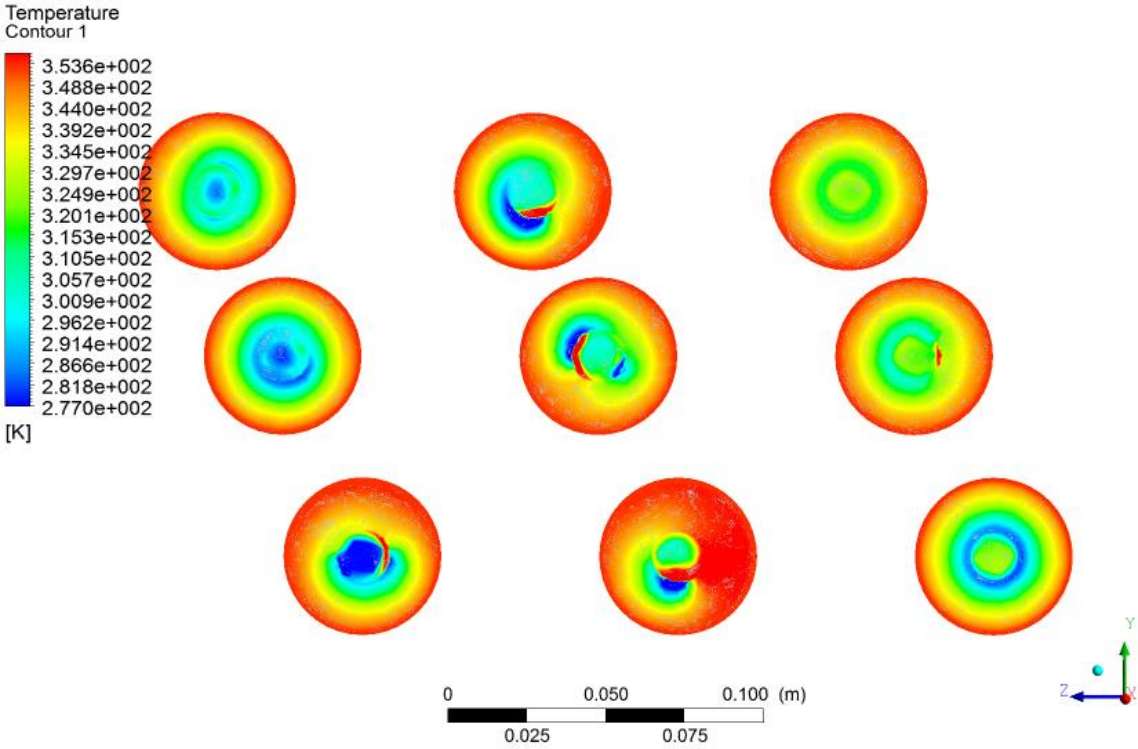


Figure 5.20: L'évolution de la température du chauffage à travers les sections radiales dans le cas du MCP 3 (Magnésium nitrate hexa-hydraté)

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

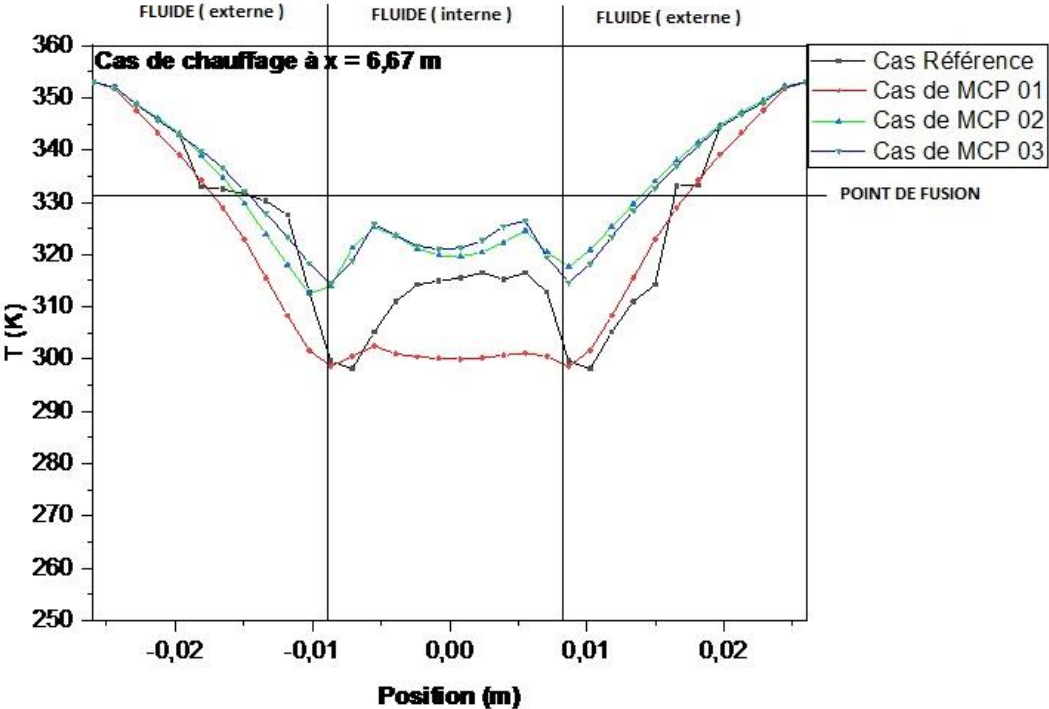


Figure 5.21: Distribution des températures du chauffage à travers la section radiale à X = 6.67 m pour les 3 différents MCP et le cas référence

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

5.1.2.1.1. Discussions et analyse des résultats du cas chauffage :

Pour le cas du chauffage, la paroi extérieure des 3 MCP et du matériau de référence est à une température de 80°C (353K) et le fluide qui circule dans le tube intérieur est à une température de 4°C (277K).

Dans notre géométrie, nous avons pris 9 sections radiales tout au long du tube de 6.69 m pour analyser les changements de phases des 3 MCP, c'est-à-dire, le point de fusion des matériaux et comparer le transfert thermique avec le cas référence.

Dans le cas référence (eau-eau), le fluide interne subit une évolution de température du point $X=0.01\text{m}$ à 4 °C (277K) jusqu'à la sortie de la conduite à $X= 6.67\text{m}$ à 43°C (316K).

Dans le cas du MCP 1, le fluide interne subit une évolution de température de l'entrée jusqu'à la sortie de la conduite moins importante par rapport au cas référence de 4°C (277K) jusqu'à 27°C (300K) et on voit que la majeure partie du MCP est à l'état solide à l'entrée et à la sortie la moitié s'est liquéfié.

Dans les deux derniers cas(MCP 2 et MCP 3), le fluide interne subit une évolution de température de l'entrée jusqu'à la sortie de la conduite très importante par rapport au deux cas précédents de 4°C (277K) jusqu'à 49°C et 50°C (322K et 323K). Les MCP 2 et 3, à $X=0.01\text{m}$ sont beaucoup plus à l'état solide et ils commencent à se liquéfier jusqu'à la sortie de la conduite et on aura deux phases dont la phase liquide est beaucoup plus importante que la phase solide.

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

5.1.2.2 Résultat du cas refroidissement

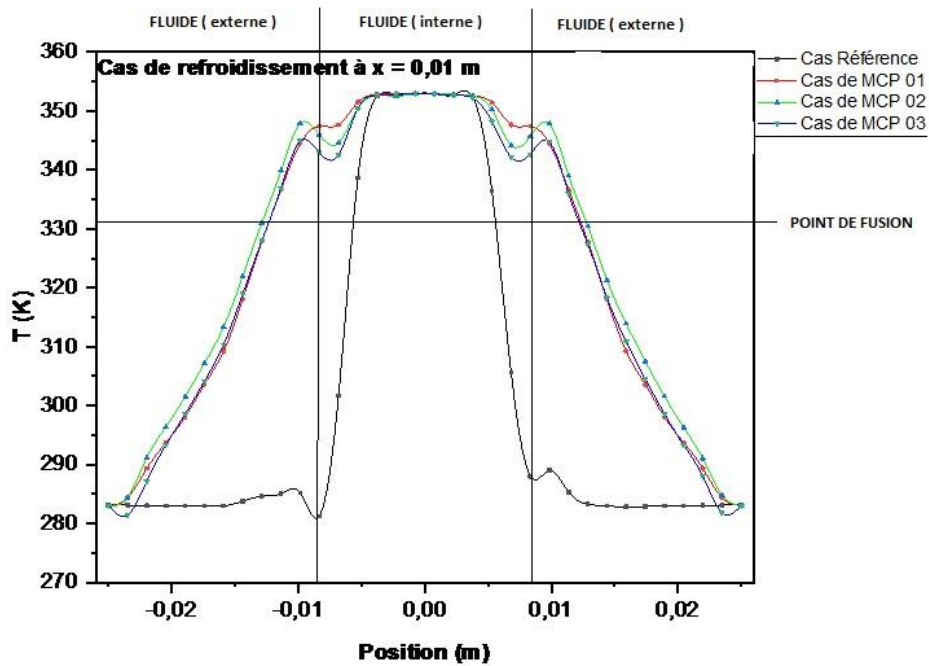


Figure 5.22: Distribution des températures du refroidissement à travers la section radiale à X = 0.01m pour les 3 différents MCP et le cas référence

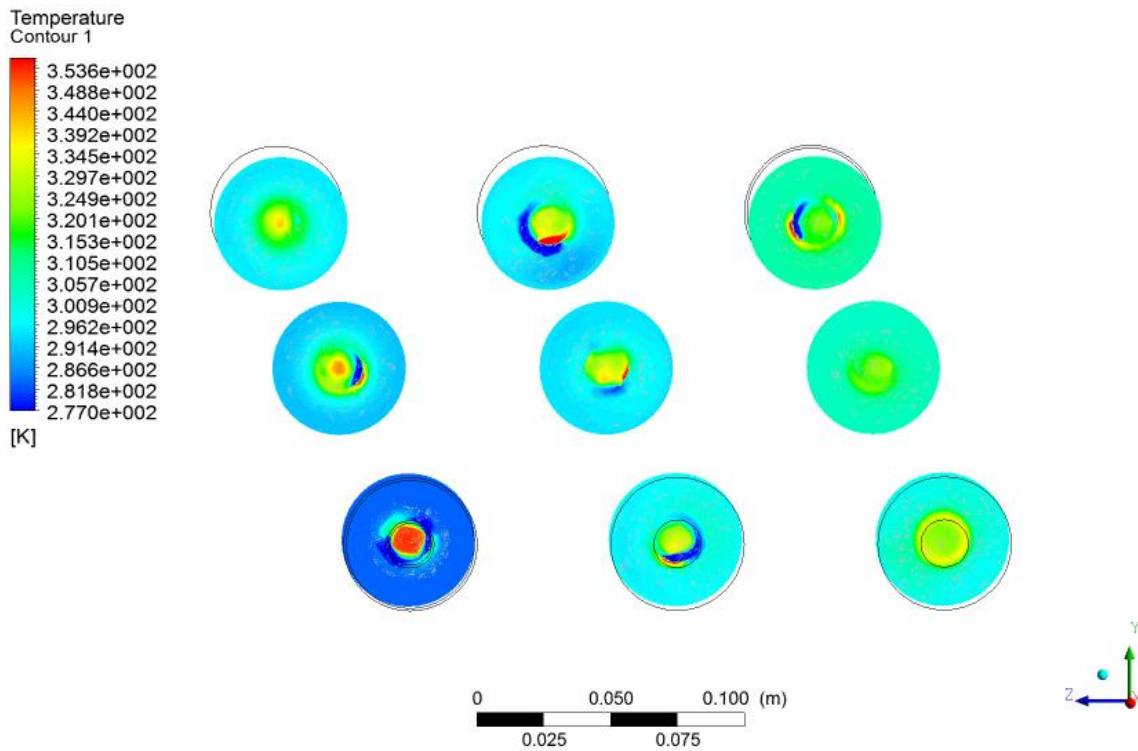


Figure 5.23: L'évolution de la température du refroidissement à travers les sections radiales dans le cas référence (eau-eau)

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

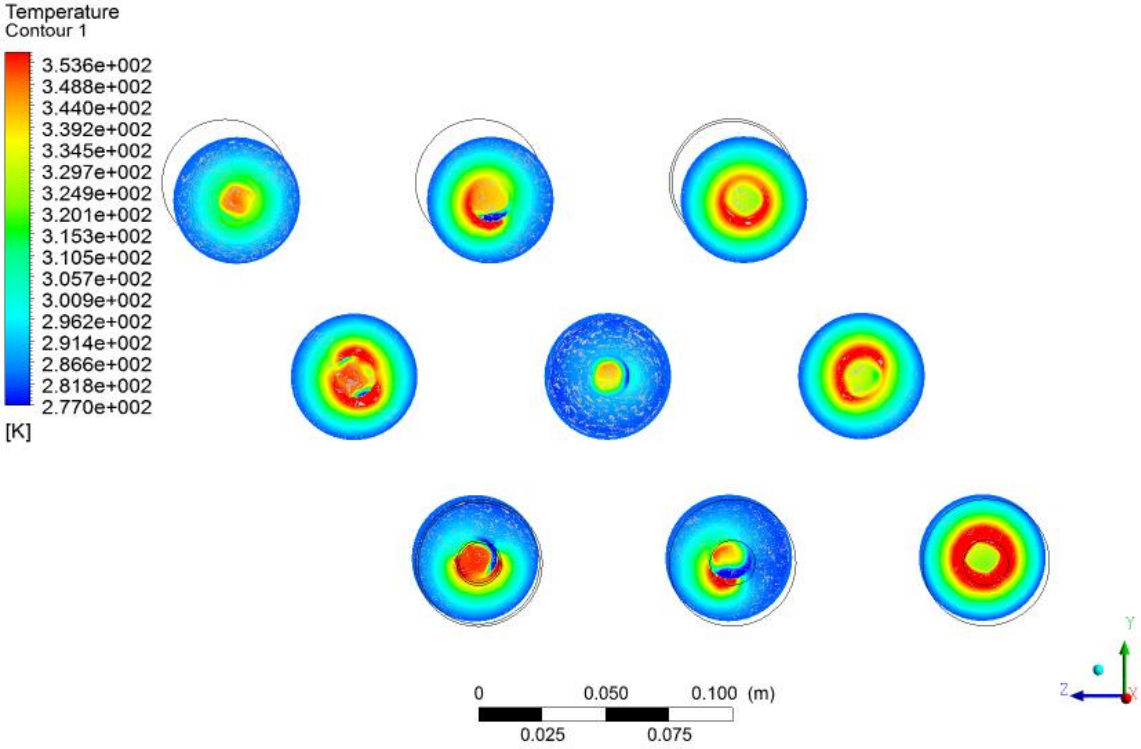


Figure 5.24: L'évolution de la température du refroidissement à travers les sections radiales dans le cas du MCP 1 (paraffine RT-58)

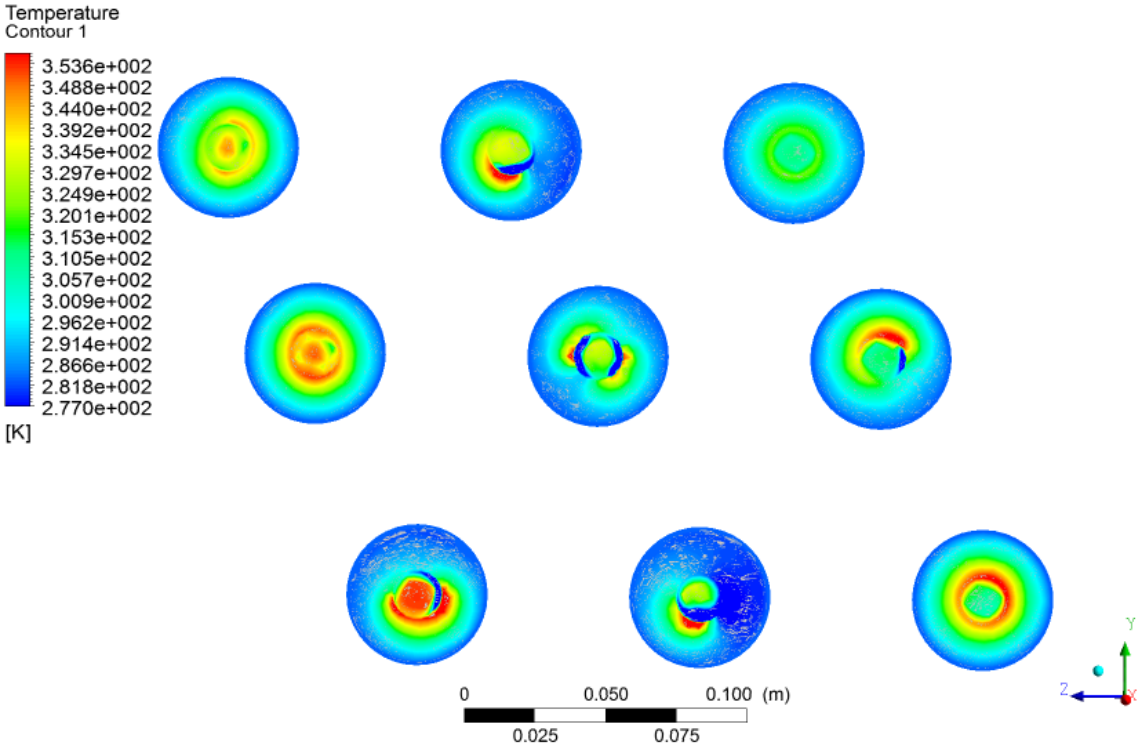


Figure 5.25: L'évolution de la température du refroidissement à travers les sections radiales dans le cas du MCP 2 (Acétate de sodium tri-hydraté)

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

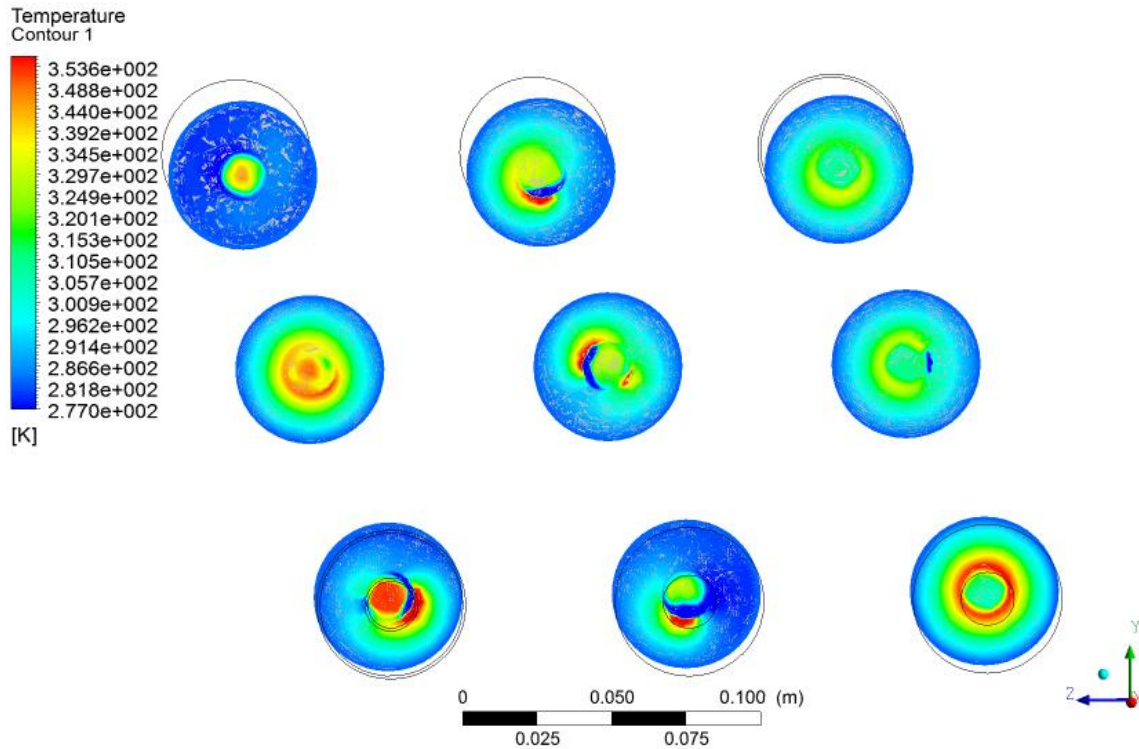


Figure 5.26: L'évolution de la température du refroidissement à travers les sections radiales dans le cas du MCP 3 (Magnésium nitrate hexa-hydraté)

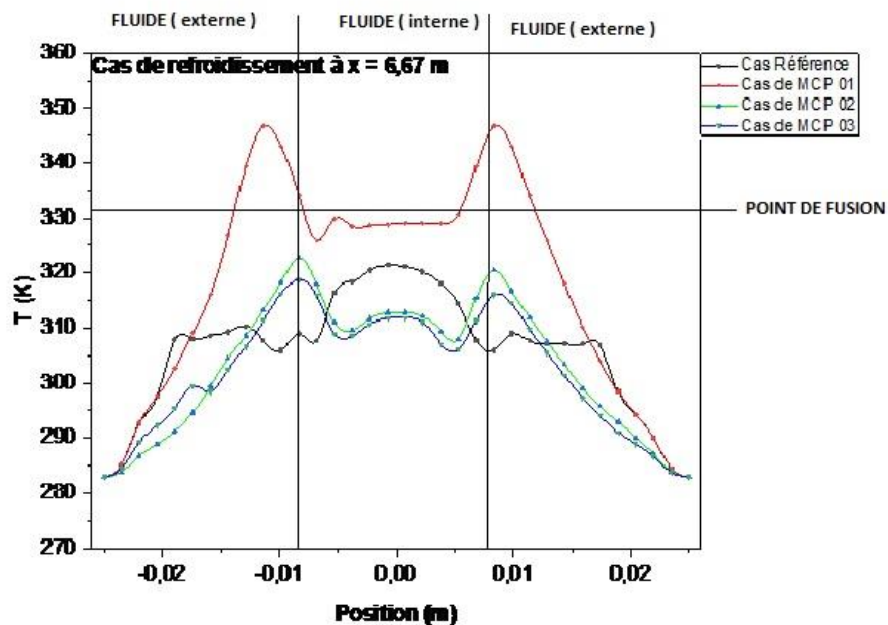


Figure 5.27: Distribution des température du refroidissement à travers la section radiale à $X = 6.67$ m pour les 3 différents MCP et le cas référence

Chapitre 05: Résultats, discussions et conclusion

5.1.2.2.1. Discussions et analyse des résultats du cas refroidissement :

Pour le cas de refroidissement, la paroi extérieure des 3 MCP et du matériau de référence est à une température de 10°C (283K) et le fluide qui circule dans le tube intérieur est à une température de 80°C (353K).

Dans notre géométrie, nous avons pris 9 sections radiales tout au long du tube de 6.69 m pour analyser les changements de phases des 3 MCP, c'est-à-dire, le point de fusion des matériaux et comparer le transfert thermique avec le cas référence.

Dans le cas référence (eau-eau), le fluide interne subit une évolution de température du point $X=0.01\text{m}$ à 80°C (353K) jusqu'à la sortie de la conduite à $x= 6.67\text{m}$ à 48°C (321K).

Dans le cas du MCP 1, le fluide interne subit une évolution de température de l'entrée jusqu'à la sortie de la conduite moins importante par rapport au cas référence, de 80°C (353 K) jusqu'à 57°C (330 K) et on voit que il n'y a pas eu un grand changement de phase du début jusqu'à la fin de l'écoulement.

Dans le cas du MCP 2, le fluide interne subit une évolution de température de l'entrée jusqu'à la sortie de la conduite très importante par rapport au deux cas précédents de 80°C (353 K) jusqu'à 39°C (312K). Le MCP 2 a subi un changement de phase complet on remarque que a la sortie du pipe il est complètement solidifié par rapport a l'entrée ou on trouve une partie liquide.

Dans le cas du MCP 3, le fluide interne subit a peu près la même transformation de température que le MCP 2 de 80°C (353K) à 38°C (311K) et aussi il a subi le même changement de phase que le MCP 2 c'est-à-dire il est complètement solide.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est de déterminer quelle est le matériaux à changement de phase (organique , inorganique et eutectiques) le plus performant pour le chauffage et/ou le refroidissement de l'eau dans un échangeur de chaleur de forme cylindrique à double diamètre de longueur de 1m et le deuxième échangeur de chaleur de forme cylindrique en serpentin à double diamètre de longueur de 6.69m. Cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel de simulation ANSYS Fluent software pour déterminer l'évolution de la température des 3 différents matériaux à changement de phase et le matériau de référence (l'eau).

Pour atteindre l'objectif de cette étude, nous avons subdivisé le travail en 4 chapitre :

- Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique des travaux de recherches sur les matériaux à changement de phase. Les études traitant le stockage thermique par chaleur latente dans différents domaine du bâtiment ou l'agriculture ou même alimentaire.
- Le deuxième chapitre traite le sujet du transfert de chaleur avec toute ces méthode en convection, conduction et rayonnement.
- Le troisième chapitre, porte sur l'étude théorique des matériaux à changement de phase basée sur les connaissances et recherches les plus récentes et comprend une généralité sur le stockage thermique.
- Le quatrième et dernier chapitre, présente une simulation numérique sur le transfert thermique entre le fluide caloporteur (eau) et les matériaux à changement de phase dans les deux différents échangeurs de chaleur.

La conclusion tirée des résultats obtenus peuvent être résumée par les point suivants :

- La forme et la longueur des échangeurs de chaleur est très importante pour l'évolution de la températures des matériaux à changement de phase et du fluide à réchauffer ou à refroidir.
- pour les processus de fusion et de solidification des matériaux à changement de phase de type inorganique et eutectiques était plus rapide à celui du matériaux à changement de phase organique. Ces matériaux doivent avoir une chaleur latente de fusion importante, afin de faciliter et accélérer les charges et de décharges, il est intéressant de choisir une bonne conductivité thermique.
- à la fin de la simulation nous pouvons constater que le MCP 2 et 3 ont mieux refroidi l'eau résiduaire de cette industrie par rapport au MCP 1 et au fluide de référence. Le MCP 1 a été le plus lent a absorbé de la chaleur à cause de sa conductivité thermique.

Pour conclure, le choix du meilleur MCP doit être basé sur les propriétés physiques, cinétiques, chimiques, environnementales et économiques. Une recherche systématique intense est encore nécessaire pour le bon choix du MCP.

Référence bibliographique

Reference bibliographies:

- [1] W. Sun, Y. Hong, Y. Wang, Operation optimization of steam accumulators as thermal energy storage and buffer units, *Energies* (2017) 10 (1).
- [2] Y. Li, J. Xia, H. Fang, Y. Su, Y.i. Jiang, Case study on industrial surplus heat of steel plants for district heating in Northern China, *Energy* 102 (2016) 397–405.
- [3] S. Harikrishnan, A. Devaraju, P. Sivasamy, S. Kalaiselvam, Experimental investigation of improved thermal characteristics of SiO₂/myristic acid nanofluid as phase change material (PCM), *Mater. Today: Proc.* 9 (2019) 397–409.
- [4] Jiwei Guo et al. Thermal storage and thermal management properties of a novel ventilated mortar block integrated with phase change material for floor heating: an experimental study. *Energy conversion and management* 2020; 205: 112228.
- [5] Murat Kenisarin et al. Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007; 11 : 1913-1965.
- [6] Dazhang Yang et al. Review on active building energy conservation using phase change materials. *E3S Web of Conferences* (2021); 236: 05007.
- [7] Kosny Jan. PCM – Enhanced building components an application of phase change materials in building envelopes and internal structures. Springer Briefs international publishing Switzerland.2015.270.ISBN 978-3-319-14285-2.
- [8] Joao M.P.Q Delgado et al. Thermal Energy Storage with Phase Change Materials, a literature review of applications for buildings materials. Springer Briefs in applied sciences and technology.2019: issn 2191-5318.
- [9] Jedidi Malek et al. La thermique du bâtiment – du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation. Dunod, 2016.208. ISBN 978-2-10-074481-7.
- [10] Battaglia Jean-Luc. Introduction au transfert thermiques-cours et exercices corrigés. Dunod, Paris, 2010. ISBN 978-2-10-054828-6.
- [11] N. Madjoudj et al. Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique. *Revue des énergies renouvelables*. Vol 19, N° 14, 647-662. 2016.

Référence bibliographique

[12] Duraković Benjamin. PCM-Based building envelope system, Innovative energy solutions for passive design. Springer nature Switzerland. 2020. ISBN 978-030-38334-3.

[13] Socaciu Lavinia et al. Review on phase change materials for buildings applications. Leonardo Electronic Journal of Practices and technologies. 2014. 25:179-194.

[14] GUEZEI Abbasi. Etude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériau à changement de phase. Mémoire fin d'étude Diplôme de master académique. Université Mohamed Larbi Ben M'hidi, Oum el Bouaghi Faculté des sciences et des sciences appliquées : 2017/2018.

[15] Sharma Atul et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and sustainable energy review 13 (2019).318-395.

[16] Saulius Pakalka et al. Experimental and theoretical investigation of the natural convection heat-transfer coefficient in phase change material (PCM) based fin-and-tube heat exchanger. *Energies*2021; 14: 716.